



Л. С. КИСЕЛЕВИЧ

ПОРІВНЯЛЬНА ПЛАНЕТОЛОГІЯ

Л. С. КИСЕЛЕВИЧ

ПОРІВНЯЛЬНА ПЛАНЕТОЛОГІЯ

Підручник

Київ
Ніка-Центр
2011

УДК 523.1/.8
ББК 22.65я73
К44

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів геологічних спеціальностей вищих навчальних закладів
(Лист № 1.4/18-Г-547 від 28.02.2008р.)*

Рецензенти:

Відьмаченко А.П. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділом фізики тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України;

Лялько В.І. – член-кореспондент НАН України, директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України;

Митропольської О.Ю. – член-кореспондент НАН України, заступник директора Інституту геологічних наук НАН України.

Киселевич Л.С.

К44 Порівняльна планетологія: підручник. / Л.С. Киселевич. – К.: Ніка-Центр, 2011.- 263с.
ISBN 978-966-521-586-4

Підручник підготовлено у відповідності до програми нормативної дисципліни „Порівняльна планетологія” для магістрів першого року навчання за спеціальністю 7.070701 *Геологія* на геологічному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

У підручнику розглянуті сучасні уявлення про появу, еволюцію та будову оточуючого нас Всесвіту; про безперервність спектра різних космічних об’єктів Всесвіту за масами (розмірами) та наведені основні відомості про ці об’єкти. Розглянуті специфічні особливості геологічних та інших процесів на планетах Сонячної системи та їх супутниках, інформація про пояс Койпера та Хмару Орта. Висвітлені новітні дані про екзопланети та їх системи навколо інших зірок, про Темну Речовину та Темну Енергію та їх роль у майбутньому розвитку Всесвіту; про Мультиверсум, Темний потік та численність всесвітів тощо на підставі якісно нової інформації, яка була отримана за допомогою наукових досліджень, за даними космічних обсерваторій, автоматичних міжпланетних станцій та посадочних космічних апаратів і зондів на різних об’єктах Сонячної системи з метою пізнання геологічних процесів на Землі у минулому із можливістю їх прогнозування на майбутнє.

Підручник може використовуватися у якості розширеного вступного розділу „Походження та будова Всесвіту” у нормативному курсі „Загальна геологія” при підготовці 6.040103 бакалаврів геології та інших напрямів, рекомендується студентам і аспірантам геологічних, географічних та деяких спеціальностей фізичних факультетів вищих навчальних закладів України, а також різним фахівцям природничого напрямку.

УДК 523.1/.8
ББК 22.65

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
1. ПОХОДЖЕННЯ ТА БУДОВА ВСЕСВІТУ.....	6
1.1. Галактики.....	11
1.1.1. Молочний (Чумацький) Шлях.....	14
1.2. Квасари.....	20
1.3. Зорі.....	21
1.4. Коричневі карлики.....	31
1.5. Міжзоряна речовина.....	33
2. БУДОВА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ.....	36
2.1. СОНЦЕ.....	36
2.2. Планети Сонячної системи.....	43
2.2.1. МЕРКУРІЙ.....	44
2.2.2. ВЕНЕРА.....	52
2.2.3. ЗЕМЛЯ.....	75
2.2.3.1. Місяць.....	77
2.2.4. МАРС.....	82
2.2.4.1. Фобос.....	119
2.2.4.2. Деймос.....	121
2.2.5. АСТЕРОЇДИ.....	121
2.2.5.1. ЦЕРЕРА.....	123
2.2.6. ЮПІТЕР.....	129
2.2.6.1. Іо.....	137
2.2.6.2. Європа.....	140
2.2.6.3. Ганімед.....	143
2.2.6.4. Калісто.....	147
2.2.7. САТУРН.....	152
2.2.7.1. Япет.....	161
2.2.7.2. Титан.....	163
2.2.7.3. Рея.....	172
2.2.7.4. Діона.....	174
2.2.7.5. Тефія.....	175
2.2.7.6. Енцелад.....	177
2.2.7.7. Мімас.....	183
2.2.7.8. Феба.....	184
2.2.7.9. Гіперіон.....	185
2.2.7.10. ЕНДОГЕННІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ САТУРНА.....	187
2.2.7.11. ЕКЗОГЕННІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ САТУРНА.....	188
2.2.7.12. ЕНДОГІДРОСФЕРИ І ЕНДОБІОСФЕРИ.....	189
2.2.8. УРАН.....	191
2.2.8.1. Міранда.....	196
2.2.8.2. Оберон і Тітанія.....	197
2.2.8.3. Умбріель і Аріель.....	197
2.2.9. НЕПТУН.....	202
2.2.9.1. Тритон.....	205
2.2.9.2. ПОЯС КОЙПЕРА.....	208
2.2.10. ПЛУТОН-ХАРОН.....	208
2.2.11. ХМАРА ООРТА.....	224
2.3. КОМЕТИ.....	225
2.4. МЕТЕОРОЇДИ.....	230
2.5. МЕТЕОРИ.....	230
2.6. МЕТЕОРИТИ.....	230
3. ГІПОТЕЗИ ПОХОДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ.....	236
4. ПОХОДЖЕННЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОСМОХІМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ	240
5. ЗОРЯНІ ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ.....	243
6. МАЙБУТНЄ ВСЕСВІТУ.....	250
7. ТЕМНА РЕЧОВИНА І ТЕМНА ЕНЕРГІЯ.....	253
8. МУЛЬТИВЕРСУМ.....	258
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	261

Передмова

Необхідність випуску даного підручника була зумовлена введенням до навчального плану геологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка нової нормативної дисципліни „Порівняльна планетологія” для магістрів першого року навчання за спеціальністю 7.070701 *Геологія* та заходами, що спрямовані на розвиток інтересу до астрономії у зв'язку з оголошенням Організацією Об'єднаних Націй 2009 року Міжнародним роком астрономії. Підручник також може використовуватися у якості розширеного вступного розділу „Походження та будова Всесвіту” у нормативному курсі „Загальна геологія” при підготовці 6.040103 бакалаврів геології, а також може бути рекомендованим для студентів і аспірантів геологічних, географічних та деяких спеціальностей фізичних факультетів вищих навчальних закладів України, а також для інших фахівців природничого напрямку.

Значне розширення вступного розділу „Походження та будова Всесвіту” зумовлено незначним об'ємом уроків з навчальної дисципліни “Астрономія” у загальноосвітній середній школі. Крім того, останнім часом за допомогою автоматичних міжпланетних станцій та зондів була отримана якісно нова інформація про будову, розвиток та специфіку геологічних і інших процесів на планетах Сонячної системи та їх супутниках, про пояс Койпера та Хмару Оорта тощо, яка зібрана та впорядкована у даному підручнику з метою пізнання геологічних процесів на Землі у минулому з можливістю їх прогнозування на майбутнє.

Об'єкт вивчення геології – планета Земля та її надра. Геологи мають справу з твердою оболонкою Землі, але деякі геологічні процеси і явища пов'язані з іншими тілами та подіями космічного простору. Відповідно, необхідно розглянути астрономічне положення нашої планети, щоб розібратися - як впливали на геологічну історію Землі різні процеси Всесвіту. Чи є всі отримані нові дані лише інформацією для допитливих чи вони все ж мають практичне застосування. Деякі геологічні процеси, наприклад, магматизм, широко поширений на планетах земної групи і на супутнику Юпітера Іо, але скрізь він має свої особливості; новий вид вулканізму – кріовулканізм та водно-крижані гейзерні виверження – зустрічаються, крім Марса, на супутнику Сатурна Енцеладі. Новими об'єктами для досліджень стануть відкриті ендогідросфери – підповерхневі глобальні океани рідкої води на супутниках Юпітера і, можливо, на деяких супутниках Сатурна тощо.

Різні екзогенні процеси на Венері, Марсі і Титані (супутнику Сатурна) можна порівнювати із аналогічними процесами на Землі. Для появи та існування життя на планеті найважливішою умовою є наявність відповідного клімату - температури, тиску, присутності чи відсутності води, а також склад атмосфери. Історія еволюції нашої планети записана у геологічному літопису осадових порід. Біостратиграфічні, палеоекологічні та інші дослідження дозволяють вченим заглянути у минуле і простежити зміну умов середовища на Землі аж до моменту появи життя та оцінити умови більш ранніх епох. Вивчення порід більш давнього віку набагато складніше через відсутність біомаркерів, які свідчать про їх вік. Але навіть таку цінну інформацію, як геологічний літопис, часто буває важко інтерпретувати. Історія розвитку та специфічні геологічні процеси на інших планетах Сонячної системи допоможуть її розшифрувати - там можна напряму спостерігати ці процеси із їх результатами та наслідками, які на поверхні Землі були знищені мільйони років тому.

Аналогії з іншими планетами допомагають заглянути не тільки в минуле, але і в майбутнє Землі. Зростаючу тривогу людства викликають зміни клімату, які пов'язані з діяльністю людини. Так, вивчення процесів на Венері дозволяє скласти певну думку щодо антропогенного впливу парникового ефекту на земну атмосферу та визначити - наскільки стійка кліматична система Землі, чи дійсно твердження про збільшення в атмосфері вуглекислого газу із точки зору змін умов проживання, чи можуть незначні зміни температури, які пов'язані із збільшенням вмісту CO₂, викликати різкі зміни у тропосфері і привести до незворотного збільшення водяної пари та до парникової катастрофи. Досліджуючи температурні колізії, що викликані періодичними глобальними пиловими бурями на Марсі, - отримуємо цілком визначене уявлення про можливі жахливі наслідки так званої „ядерної зими”.

Пошуки відповідей на ці та інші питання зараз може дати моделювання цих процесів, але моделі добре працюють при можливості їх порівняння із вимірюваннями у середовищі. І тут на допомогу приходять інші планети Сонячної системи, які можна розглядати як великі масштабні природні лабораторії, що дозволяють отримувати висновки, які часто неможливо реалізувати у найсучасніших лабораторіях світу. Особливості будови поверхонь планет та їх супутників, специфічні геологічні процеси, атмосфери і кліматичні системи – відмінні стенди досліджень для перевірки різних моделей та тестувань, що лежать в основі численних допущень й параметризацій. У силу різних причин, найголовніша з яких – відсутність на інших планетах біосферного фактору, їх різноманітні системи набагато простіше та легше піддаються кількісному опису.

Вивчення цих питань дасть можливість не тільки зрозуміти грандіозну картину еволюції Сонячної системи та Всесвіту, а й відкрити нові явища, процеси та закони, про існування яких зараз ми навіть не здогадуємося і які змінять наш світогляд, але й наблизитись до відповіді на корінні питання науки стосовно фундаментальних властивостей Всесвіту.

Автор усвідомлює, що можливі альтернативні варіанти і висновки як при форматуванні матеріалу самого підручника та його окремих розділів, так і при викладанні змісту окремих питань. Тому всі поради, пропозиції, критичні зауваження тощо будуть із вдячністю сприйняті за адресою: 03022, Київ, вул. Мала Васильківська, 90. Геологічний факультет. Кафедра загальної та історичної геології.



1. ПОХОДЖЕННЯ ТА БУДОВА ВСЕСВІТУ

ВСЕСВІТ – це все, що існує: матерія, простір, енергія і час. З нашої точки зору існує тільки один видимий Всесвіт. У принципі, можуть існувати і інші Всесвіти, а той, який ми спостерігаємо, може бути нескінченним у всі сторони. Але “наш” **Всесвіт** – *це той об’єм простору, який ми спостерігаємо і який зараз простягається на всі боки на віддаль проходження світла і до складу якого входять галактики, зорі, планети та безліч інших космічних тіл.*

Згідно із сучасною космологічною **аксіомою Великого Вибуху**, 14 млрд. років тому не було ні Всесвіту, ні простору; не існувало ні часу, ні матерії – нічого, крім точки простору нескінченно малого об’єму з нескінченно великою густиною та енергією (таку ситуацію точки фізики називають *сингулярністю*). Неможливо навіть приблизно сказати, скільки часу Всесвіт перебував у стані сингулярності - миттєвість чи мільярди років – часу тоді взагалі не існувало. Його не існувало поза межами точки, так як за її межами не було ні простору, ні матерії. Часу не було і в самій точці, тому, що там він практично повинен був зупинитися. **Простір і час виникли саме у момент Великого Вибуху - без часу простір не міг розвиватися, а без простору час не міг плинути.** Події, що зумовили народження Всесвіту, залишаються таємницею. Вважають, що Всесвіт виник або *квантово-механічним шляхом із пустоти (вакууму)*, або *за рахунок колапсу попереднього нескінченно пульсуючого Всесвіту чи внаслідок перетворення четвертого виміру простору в час* тощо.

Утворення Всесвіту із надщільної надмалої точки відбулося $13,82 \pm 0,06$ млрд. років тому за долю секунди в результаті **Великого Вибуху**, коли початкова швидкість утворення Всесвіту набагато перевищувала швидкість світла. Утворилася неймовірно гаряча, температурою у трильйони градусів, вогняна куля первинного випромінювання, яка з неймовірною швидкістю та прискоренням розкидала у всіх напрямках *кварк-глюонну плазму* (частинки матерії і потоки енергії). Розлітаючись та розширюючись у всі боки, матерія відсовувала границі небуття, створюючи космічний простір і почавши в його межах відлік часу.

Більш того, **Всесвіт і зараз продовжує прискорено розширюватися** за всіма напрямками – дві галактики, які розділені відстанню в 1 мегапарсек (3,26млн світ. р.), віддаляються одна від іншої зі швидкістю 67,15км/сек. (постійна Хаббла 74,03 км/сек. Мпк; дані телескопу *Planck*, 2019). Із збільшенням віддалі до галактик на кожний мільйон світлових років, швидкість їх віддалення збільшується на 20км/сек.

До 10^{-43} сек. Всесвіт займав об’єм, у якому не існувало ніяких фізичних законів - вони не діють нижче критичної межі, відомої як *комтонівська довжина хвилі об’єкта* - на протязі цього періоду, так званого *часу Планка*, відбувалося утворення простору і самого часу, фундаментальних сил природи та законів фізики. Після цієї миттєвості весь Всесвіт ще був меншим за атом, але до нього вже можна застосувати закони квантової фізики, згідно з якими

елементарні частинки мають хвильові властивості, а хвилі – корпускулярні, а також відбувається перехід маси (m) в енергію (E) і навпаки за формулою $E=mc^2$. Новонароджений Всесвіт спочатку розширювався досить повільно і за таких умов він би закрився, так як не зміг би подолати власної гравітації, але величезною енергією невелика частина Всесвіту була викинута назовні і підхоплена *інфляцією* (розширенням за рахунок єдиної надсили у складі сил: тяжіння, електромагнітної, слабкої та сильної взаємодій на субатомному рівні) почала швидко розширюватися. *Суть моделі „інфляційного Всесвіту” полягає в тому, що у межах перегрітого Всесвіту, який швидко розширювався, невеликий об’єм простору охолоджується і починає розширюватися ще швидше, подібно до того, як переохолоджена вода стрімко замерзає, збільшуючи при цьому свій об’єм.* Приблизно за 10^{-32} сек. Всесвіт розширився на 50 порядків – був менше протона, а став розміром з грейпфрут.

Гравітація ураз відокремилась, а решта сил залишалися зв’язаними доки Всесвіт не досяг віку 10^{-35} сек. і вступив до **радіаційної ери** розвитку. З цього моменту три сили почали діяти самостійно, але їх виділення з єдиної надсили, в умовах постійної температури, супроводжувалося виділенням енергії, яка роздувала ще невеликий Всесвіт.

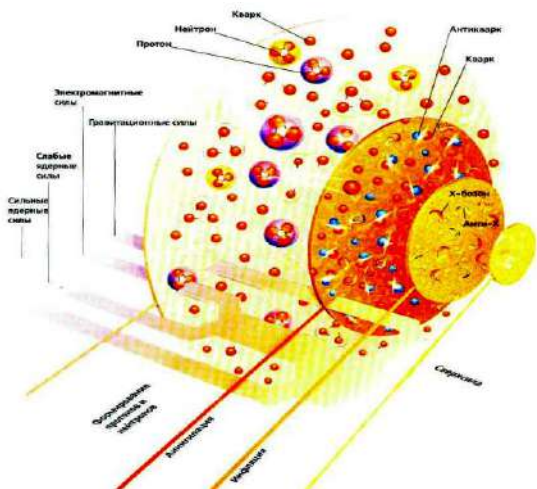


Рис.1.1. За першу секунду існування Всесвіт пережив Великий Вибух, інфляцію, розподіл фізичних сил, утворення та анігіляцію речовини і антиречовини, об’єднання кварків у протони та нейтрони

У перші 10^{-35} сек. існування Всесвіту, після початку розширення, вакуум, мабуть, вже розпадався, утворюючи **частинки** та **античастинки**, які взаємознищувалися із виділенням гама-квантів високих енергій. Ця енергія відповідала температурі

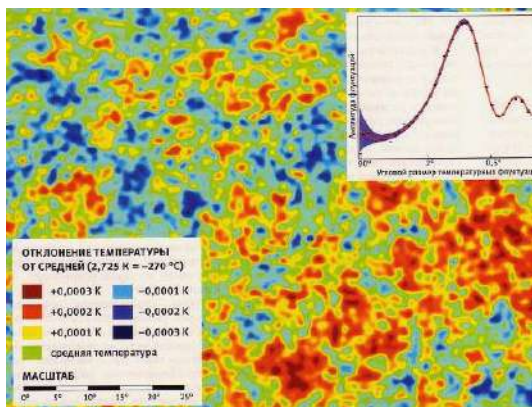
10^{28}K , а густина речовини складала 10^{75}г/см^3 . Інфляція закінчилася швидко – до моменту, коли Всесвіту виповнилося 10^{-12} сек. Всесвіт став однорідним та добре перемішаним, а за рахунок швидкого розширення його температура різко впала. Спочатку матерія Всесвіту складалася із суміші екзотичних частинок (фотони мали таку енергію, що утримували речовину у стані повної іонізації – вони руйнували протони і нейтрони, розщеплюючи їх на складові **кварки** та **глюони**) у вигляді **радіації** та **енергії**, які активно поширювалися і швидко охолоджувалися по мірі розширення мініатюрного світу. Тільки коли вік Всесвіту досяг однієї мільйонної долі секунди, більша частина енергії та маси перетворилася у **протони** (ядра атомів водню). У наступну тисячну долю секунди утворилися **електрони**, які, з’єднавшись з протонами, утворили **нейтрони**. Таким чином, *за першу секунду свого існування Всесвіт пережив Великий Вибух, інфляцію (розширення), розподіл фізичних сил, утворення та анігіляцію речовини з антиречовиною із перетворенням у кванти світла – фотони, об’єднання кварків у протони та нейтрони, які створили всю матерію Всесвіту – приблизно 10^{50} тонн.*

Нейтрони існують самостійно всього тисячу секунд, тому за ці 15 хвилин, доки температура не впала нижче 1 млрд. градусів і енергії частинок стало вже недостатньо для ядерних реакцій, в утвореному Всесвіті відбувся **ядерний синтез**, при якому за перші 3 хвилини із первинної суміші ядерних частинок (протонів і нейтронів) утворилися тільки легкі елементи – **ізотопи водню** (дейтерій та тритій), **гелій**, **літій** і **берилій** (усі інші елементи виникли пізніше, у надрах зірок при термоядерних реакціях та при спалахах наднових). Протягом кількох хвилин, поки протони і нейтрони не розлетілися далеко, Всесвіт нагадував ядро великої зорі, де відбувався синтез елементів. За цей час Всесвіт, який розширювався і охолоджувався, встиг переробити із водню в гелій близько четвертої частини своєї матерії. Решта водню пішла на утворення зірок, у надрах яких починають відбуватися процеси нуклеосинтезу.

У кінці першої години після Великого Вибуху Всесвіт складався із ядер **водню** (протонів) і ядер **гелію**, бо енергія фотонів випромінювання була настільки великою, що вони легко

«збивали» електрони з їх орбіт у атомів, утворюючи плазму з атомних ядер і вільних електронів. Первинне світло було таким же яскравим, як і сонячне, воно йшло з усіх боків, але фотони хаотично змінювали напрями свого руху – вони розсіювалися частинками дуже густої плазми як світло в тумані, а тому середовище було непрозорим для випромінювання. **Всесвіт на той час являв собою величезну густу в'язку розжарену кулю – гігантське сонце, яке збільшувалося із швидкістю світла.** Зменшення енергії фотонів після частих зіткнень зумовлювало перехід гама-випромінювання у рентгенівське, а потім, через ультрафіолетове, у видиме та у невидиме людському оку інфрачервоне. Всесвіт розширювався і охолоджувався, протони втрачали свою енергію, так як їм доводилося заповнювати все більший простір. Через 379 тис. років у результаті охолодження плазми, яка складалася із протонів, електронів та іонів гелію, температура Всесвіту понизилася до $+3000^{\circ}\text{C}$, що дозволило електронам розміщуватися на орбітах утворених атомів – непрозора для електромагнітного випромінювання **іонізована плазма** почала перетворюватися у **нейтральний газ** (в основному, водень), який практично зовсім прозорий для абсолютної більшості фотонів реліктового випромінювання, яке з цього моменту відокремилось від речовини. Всесвіт очистився і став прозорим – тепер світло могло безперешкодно поширюватися по прямій і з цього моменту **речовина** та **випромінювання** почали існувати окремо. Всесвіт вступив в **еру речовини**: 75% його складав водень, майже всю решту – гелій. Основна частина енергії Всесвіту зосередилася у масі речовини. Тільки після перетворення гарячої плазми у нейтральний газ стало можливим проявлення **гравітаційної нестійкості** – у майже однорідній речовині під дією гравітації почали формуватися її згустки.

Якщо аксіома про Великий Вибух вірна, то ця подія повинна була залишити у космосі свого роду “слід” чи “відлуння”. І такий слід був знайдений - простір Всесвіту виявився пронизаний охолодженням до трьох градусів вище абсолютного нуля і зміщеним у червону область **світлом**



від спалаху Великого Вибуху - мікрохвильовим (тепловим, $t^0=2,725\pm0,002\text{ K}$) електромагнітним випромінюванням у міліметровому діапазоні.

Рис.1.2. Флуктуації мікрохвильового реліктового випромінювання Всесвіту (за даними COBE і WMAP)

Це “**реліктове випромінювання Всесвіту**” віком 13,3 млрд. років, яке залишилося від Великого Вибуху, передбачили фізики Ральф Алвер і Роберт Герман (1947) та відкрили Арно Пензіас та Роберт Вільсон (1967) і воно свідчило, що фонове космічне випромінювання нічим не відрізняється від теплового випромінювання любого нагрітого тіла, воно приходить до Землі рівномірно з усіх ділянок неба, а його однорідність стверджувала, що Всесвіт однаковий за всіма напрямками. Реліктове електромагнітне випромінювання до цього часу несе важливу інформацію про ранні стадії розвитку Всесвіту - кілька років тому у ньому вдалося відкрити нерівномірності (флуктуації) – ознаки найдрібнішої неоднорідності густини речовини у ранньому Всесвіті, які розвинулись через гравітаційну нестабільність і зумовили його сучасну крупномасштабну структуру (розподіл у просторі галактик та їх скупчень).

Реліктове випромінювання не виникло з яких-небудь джерел, а воно існувало в гарячій речовині Всесвіту з самого початку розширення від сингулярності.

На цьому бурхливій події закінчилися і наступила **Темна ера**, яка тривала протягом приблизно 250 млн. років до утворення перших зірок, коли у Всесвіті було зовсім темно, пусто і холодно. Не існувало ні однієї галактики, жодної зорі, головне, що відбувалося – подальше зниження температури в умовах практично рівномірного розподілу речовини з ймовірними незначними згущеннями **Темної Речовини**. Якщо на початку Темної епохи око людини ще могло б помітити тьмяне червоне світіння неба, то тепер настала повсюдна темрява. Простір був заповнений головним чином **Темною Речовиною** та **реліктовим випромінюванням**, яке тоді було більш короткохвильовим (інфрачервоним - тобто, за межами видимого діапазону), відповідало приблизно -120°C і продовжувало охолоджуватися по мірі розширення простору.

Баріонна матерія складала 1/10 *Темної матерії* і складалася з атомів водню та гелію у пропорції 4:1 за масою, що залишилася від Великого Вибуху. **Темна Енергія** практично ніякої ролі не відігравала. Коли зв'язок реліктового випромінювання з матерією розірвався, випромінювання і стало самостійним – наступила **ера випромінювання**.

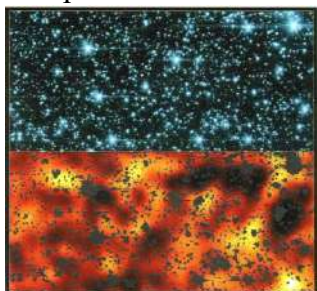


Рис.1.3. Випромінювання першої генерації зірок (яскраві світлі плями внизу) у сузір'ї Дракона – світло перших зірок у молодому Всесвіті 13 млрд. років тому (інфрачервоне фото ділянки неба у сузір'ї Дракона NASA/JPL – Caltech)

Із елементарних частинок матерії стали формуватися різні *атоми легких хімічних елементів*, а з часом, у результаті подальшого охолодження Всесвіту, – *більш важких хімічних елементів*. В абсолютній темряві тодішнього Всесвіту почали спалахувати перші зорі, які були великими і утворилися вже через 100-200 млн. років після народження Всесвіту („темні” зорі – вони світилися в ІЧ-діапазоні спектру), ймовірно, за рахунок *анігіляції Темної Матерії* у їх надрах із утворенням *нейтрино, фотонів, позитронів та електронів*, бо зорі ще не стиснулися гравітацією до появи реакцій ядерного синтезу. Утворення перших зірок було більш простим, ніж зірок сучасного типу, через хімічну чистоту початкового матеріалу – суміш водень-гелій, проте термоядерні реакції у їх надрах йшли повільніше, а тепло реакцій не врівноважувало силу тяжіння – вона притягувала нові згустки матерії і зорі розросталися аж до 300 сонячних мас, температури досягали $+100\,000-110\,000^{\circ}\text{C}$, а випромінювана енергія реакцій ядерного синтезу перевищувала сонячну в десятки мільйонів разів. Ці зорі були *ультрафіолетовими*, вони вигорали і руйнувалися всього за кілька мільйонів років, проте встигали виконати дві функції, що істотно вплинули на властивості майбутнього світу: **перша** - у результаті реакцій ядерного синтезу відбувалося *збагачення надр цих зірок більш важкими, за водень та гелій, хімічними елементами*, а за рахунок „зоряного вітру” та вибухів наднових зірок *міжзоряний простір із газово-пиловими туманностями збагачувався цими важкими хімічними елементами*, що сприяло насиченню ними наступних поколінь зірок; **друга** – відбувалося *нагрівання та іонізація міжзоряного і міжгалактичного газу* за рахунок потужного ультрафіолетового випромінювання зірок.

Новоутворені атоми збиралися навколо перших *чорних дірок*, що виникли після вибухів перших наднових, у гігантські космічні хмари газу та пилу (*туманності*). В епоху, коли світ вперше став прозорим, уже існувала його крупномасштабна структура, тобто, речовина вже почала згущуватися утворюючи величезні надскопчення галактик у стадії формування. У результаті впливу сил гравітації і взаємних зіткнень частинки пилу з'єднувалися між собою в єдине ціле. Гравітаційні сили притягували маленькі об'єкти до більш масивних і у Всесвіті з часом почали формуватися різноманітні космічні об'єкти.



Рис.1.4. Розширення Всесвіту після Великого Вибуху

Гігантські ультрафіолетові зорі входили до складу протогалактик, утворених, головним чином, *Темною Речовиною*. Розміри протогалактик були невеликими і вони розташовувалися близько одна від другої, що викликало потужну гравітацію, яка об'єднувала їх у перші невеликі – розмірами 20-30 світлових років – *галактики*. Наймасивніші зорі у кінці свого життєвого шляху формували, мабуть, *чорні дірки*. Скупчення великих кількостей матерії в певних обсягах простору відбувалося завдяки зовнішнім краям колосальних звукових хвиль, які розбігалися в різні боки від епіцентру Великого Вибуху в густій в'язкій субстанції початкового Всесвіту, аналогічно поширенню їх у воді або газах – у вигляді хвиль згущення речовини. Мабуть, не всі галактики утворилися одночасно. Масивні *еліптичні галактики* утворилися незабаром після Великого Вибуху, як тільки Всесвіт став прозорим. Зіткнення галактик тоді було досить частим, так як Всесвіт ще не був таким великим і був значно щільніше наповненим. На ранній стадії Всесвіту галактики були менші за розміром і мали менш правильну форму ніж зараз. При

зіткненнях галактик та їх злиттях вони збільшувалися у розмірах. З великою швидкістю формувалися *зорі*, космос освітлювався спалахами *наднових зір*. *Спіральні галактики* утворювалися, мабуть, пізніше. Навколо деяких з них спочатку формувалися диски із речовини, які потім утворювали спіральні рукави.

Глибокі знімки *Hubble*, максимально наближені до моменту Великого Вибуху, дозволяють простежити інтенсивність утворення зірок у Всесвіті від епохи до епохи. У молодому Всесвіті (вік 1 млрд. років) швидкість утворення зірок вже була великою і складала 1/3 її максимального значення. Свого піку вона досягла приблизно 7 млрд. років тому, а потім поступово зменшилася приблизно в 10 разів.

Ще недавно астрономи та космологи вважали, що на ранніх стадіях еволюції Всесвіту (у межах 2 млрд. років після Великого Вибуху) матерія в ньому була розподілена досить рівномірно. Останні відкриття, зроблені за допомогою японського 8,2-метрового рефлектора *Subaru* і телескопа *Keck II* дозволяють стверджувати, що вже в той далекий час у Всесвіті існували неоднорідності, які за розміром переважали всі відомі до тепер галактичні скупчення.

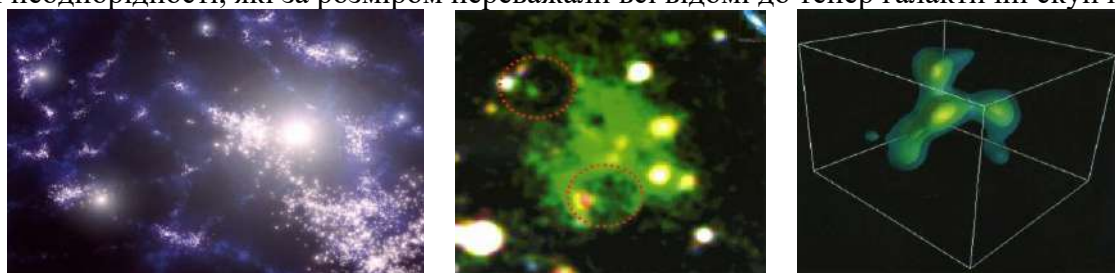


Рис.1.5. Ліворуч: зорі раннього Всесвіту (фото NASA/JPL – Caltech/R.Hurt (SSC) та фото однієї з газових хмар діаметром 400 000 світлових років на віддалі 12 млрд. світлових років (пунктиром виділені лакуни – об’єми пустого простору). Праворуч: модель структури надскупчення речовини розміром біля 200 млн. світлових років із трьох гігантських волокон (філаментів), які утворені концентраціями галактик, із гігантськими скупченнями міжгалактичного газу у місцях пересічень волокон

Всесвіт почав розширюватися $13,82 \pm 0,06$ млрд. років тому. Через розширення Всесвіту віддалі між галактиками дуже зросли, тоді як радіус спостерігаемого Всесвіту зріс ще більше (адже швидкість світла перевищує швидкість розширення). Сьогодні ми спостерігаємо ті віддалені галактики Всесвіту, світло від яких вже досягло Чумацького (Молочного) Шляху. Точки простору Всесвіту, які лежать на цій віддалі називають **горизонтом бачення**. Області Всесвіту, які лежать за цим горизонтом принципово не наглядні – зараз ми не можемо їх побачити, бо світло від галактик з-за меж горизонту бачення просто ще не встигло до нас дійти.

Наш Всесвіт значно більший за видиму його частину. Вік нашого Всесвіту $13,82 \pm 0,06$ млрд. років. Точка, з якої 13,82 млрд. років тому відправився у подорож фотон світла, який зараз досягає Землі, сьогодні віддалена від нас вже на 78 млрд. світлових років (враховуючи час руху фотона - 13,82 млрд. років - до Землі, продовження розширення Всесвіту за час руху цього фотона до Землі та прискорене розширення Всесвіту під дією Темної Енергії). Приймаючи Землю за точку відліку, а пройдену фотоном віддаль за радіус, і отримуємо розмір Всесвіту як мінімум у 156 млрд. світлових років.

Частина Всесвіту, яку ми спостерігаємо і яка доступна зараз для вивчення та обмежена віддаллю, яке пройшло світло з моменту Великого Вибуху – так звана **Метагалактика** – простягається на 28 млрд. світлових років, а у її межах зараз доступні для перегляду близько 400 млрд. галактик. Для вимірювання віддалей у Всесвіті добирали відповідні масштабні одиниці. Наприклад, віддаль до Місяця вимірюють у кілометрах. У межах Сонячної системи зручною виявилася **астрономічна одиниця (а.о.)** – віддаль від Землі до Сонця ($1 \text{ а.о.} = 149\,597\,870\,691 \pm 6 \text{ м} \approx 150 \text{ млн. км}$). При вивченні об’єктів Галактики довелося ввести одиницю вимірювання **світловий рік** – віддаль, яку світло проходить за 1 рік ($1 \text{ св. рік} = 63\,240 \text{ а.о.} = 9,5 \times 10^{12} \text{ км}$) і **парсек** ($1 \text{ пс} = 206\,265 \text{ а.о.} = 3,26 \text{ св. роки} = 3,09 \times 10^{13} \text{ км}$). Для вивчення глибин Всесвіту використовують **кілопарсеки** ($1 \text{ кпс} = 1000 \text{ пс}$) і **мегапарсеки** ($1 \text{ Мпс} = 1 \text{ млн. пс} = 3,263 \text{ млн. св. р.} = 30\,860 \text{ млрд. км.}$). Для оцінки міжгалактичних віддалей використовують **цефеїди** – зорі з характерними пульсаціями, періоди яких вказують на їх справжній блиск, а значить і на віддаль до них.

1.1. ГАЛАКТИКИ

ГАЛАКТИКИ - системи сотень мільярдів різних за розмірами, будовою та складом космічних тіл, які займають певний об'єм у Всесвіті, взаємопов'язані між собою гравітаційними силами і рухаються у просторі як єдине ціле.

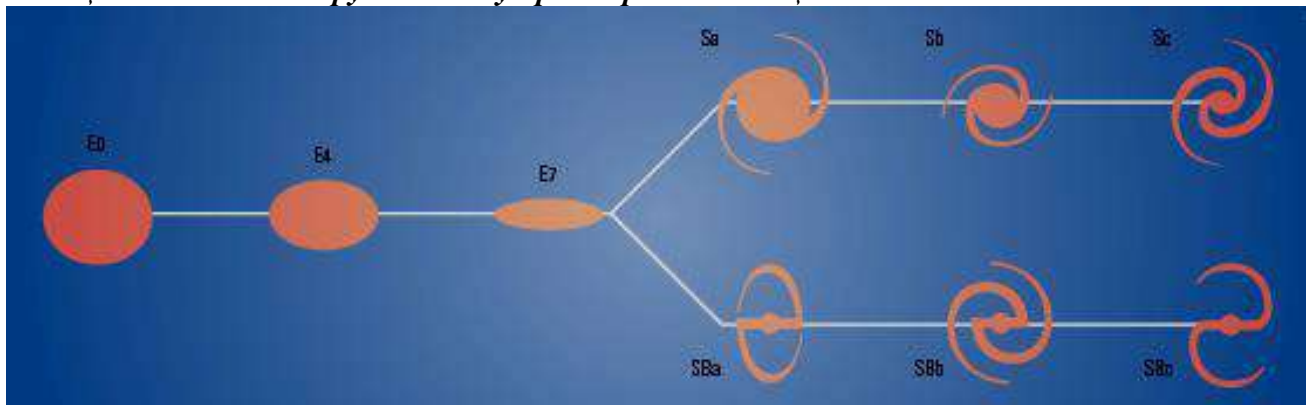


Рис.1.6. Типи галактик (камертон Едвіна Хаббла, 1925р.)

Типи галактик позначені буквами, числом позначають форму галактики, яка залежить від кута, під яким до спостерігача повернута площина цієї галактики. *Сферичні галактики* **E0** безперечно мають заповнену зорями форму сфери. *Еліптичні галактики*: **E1** – **E7** мають явну овальну форму, а число у позначці еліптичних галактик вказує на їх ексцентриситет. *Лінзовидні дисковидні галактики* **S0** мають центральне ядро (балдж) і диск, але у них відсутні рукави. *Спиральні галактики*: букви **a**, **b**, **c** у позначках звичайних спіральних галактик (типу **S**) та *пересічених (з баром) спіральних галактик* (типу **SB**) вказують на розмір ядра та щільність розташування спіральних рукавів (у галактик **Sa** і **SBa** найбільші ядра і щільні рукави)

Існує багато морфологічних видів галактик, що відрізняються між собою формою, розмірами, масою та випромінюваною енергією, але *всі галактики складаються із зірок, різноманітних космічних тіл, газових та пилових хмар*, які розміщуються навколо масивних чорних дірок у ядрах галактик. Незважаючи на різноманітність зовнішнього вигляду, 95% усіх галактик мають симетричну форму. Виділяють **сферичні, еліптичні, спіральні і неправильні галактики**.

Сферичні галактики (тип **E0**, рис.1.6) не мають лінзовидного диску, у них мало газу і практично немає областей народження молодих зірок, вони являють собою гігантські сферичні скупчення із сотень мільярдів зірок, траєкторії яких у межах сфери зовсім довільні.



Еліптичні галактики позначають буквою **E** (від англ. *ellipticall* – «еліптичний», типи від **E0** до **E7**), мають вигляд сплюснутої кулі або еліпса без диску – їх форма залежить від орбіт зірок. В еліптичних галактиках відсутній міжзоряний газ і, відповідно, молоді зорі. Вони складені тільки старими, рівномірно розсіяними і дуже повільно обертаючимися навколо ядра *червоними зорями*, не мають спіральних рукавів, а їх форма може змінюватися від майже сферичної (**E0**) до сигароподібної (**E7**). Розміри цих галактик дуже різні – від карликів до надгігантів, а найбільші сягають у діаметрі мільйонів світлових років і є наймасивнішими із усіх відомих - деякі включають до себе велику кількість галактичних скупчень. Обертаються еліптичні галактики значно повільніше спіральних, а їх яскравість плавно зменшується від центра до периферії. Приблизно 25% вивчених галактик є еліптичними.

Спіральні галактики (рис.1.7) складаються із *ядра* та двох і більше (до десяти) закручених в один бік *спіральних рукавів*, діляться на два типи - **S** та **SB** - з потовщеннями у центрі галактик (балдж) із старих червоних зірок, які оточені більш молодими зорями. У *звичайних спіральних галактик* (тип **S**) рукави виходять безпосередньо із балджу (рис.1.7а). У *пересічених спіральних галактиках* (тип **SB**) дуже витягнута сигароподібна перемичка (*бар*) пересікає весь балдж і з'єднує внутрішні кінці двох спіральних рукавів (рис.1.7б). Рукави розміщуються у площині галактичного диску, а створена ними хвиля стискання зумовлює активне формування зірок (рис.1.7в). Зорі інтенсивно формуються на передній границі любого рукава, їх життя

коротке, а місце розташування точно повторює хвилю стискання. Позаду знаходяться більш спокійні райони, де зосереджені зрілі зорі типу нашого Сонця. Розміри спіралей коливаються в межах 20 000-100 000 світлових років упоперек. Біля 50% вивчених галактик є спіральними.



Рис.1.7. Зліва праворуч: а- спіральна галактика (тип Sa) *Вир* (M51, NGC 5194/95); б- спіральна галактика з баром (тип SBb) NGC 1365; в- хвиля ущільнення і молоді зорі; г- неправильна галактика (фото *Hubble*)

Наша Галактика – *Чумацький* (рос. *Молочний*) *Шлях* – одна з великих *пересічених спіральних галактик з баром* типу SB у вигляді витягнутого овалу. Рух зірок та газу у центрі Галактики не відповідають тим орбітам, які повинні бути у звичайної спіральної галактики, а проведені дослідження в інфрачервоному діапазоні дозволили виявити у галактичному ядрі Чумацького Шляху раніше прихований від нас хмарами пилу масивний *бар*, вісь якого прямо направлена у бік Землі (рис.1.14). Вік галактик типу Чумацького Шляху нараховує близько 10-12 млрд. років. В оптичному діапазоні 2/3 усіх галактик мають бар, огляд космосу в інфрачервоному діапазоні збільшив їх долю до 3/4.

Лінзоподібні галактики (тип **S0**) є проміжними між еліптичними та спіральними галактиками (рис.1.8), це - *спіральні галактики без чітко виражених рукавів*. Вони мають *балдж*, *гало* і *диск*; проте не мають певної структури, області формування зірок і масивних зірок, а яскравість від центра до краю в них змінюється стрибками (“сходінками”). У таких галактик виділяють *ядро*, дуже сплюснуте згущення – *лінзу* - і слабкий, іноді кільцеподібний *ореол*. У центрі лінзоподібних галактик зосереджені старі зорі, а у нещільному диску – молоді. Це колишні спіральні галактики, які чомусь втратили міжзоряний газ, з якого могли б формуватися нові зорі. До лінзоподібних галактик відноситься до 20% усіх вивчених галактик.

До **неправильних (іррегулярних) галактик** (тип **Irr**) - їх до 5% - належать ті, що не попадають в яку-небудь чітку категорію (рис.1.7г) і часто є супутниками більших галактик. Вони *мають рештки спіральної структури* (підтип **Irr1**) - багато газу (до 50% їх загальної маси) та пилу, молодих зірок та крупних районів їх формування, але останні не витягнуті у спіралі, а розкидані у вигляді плям. У цих галактик відсутнє чітке ядро, немає обертальної симетрії, багато з них мають бар і зародки рукавів; інші галактики *мають зовсім неправильну форму* (підтип **IrrII**) чи є *карликовими* (позначення **d**, їх підтипи **dE**, **dS**, **dIr**, **dIrrs** тощо). Неправильними галактиками є *Велика і Мала Магелланові Хмари* – найближчі до нас галактики (рис.1.15). До неправильних галактик належать і **пекулярні галактики**, кожна з яких має унікальну форму (дископодібну, кільцеву, асиметричну тощо).

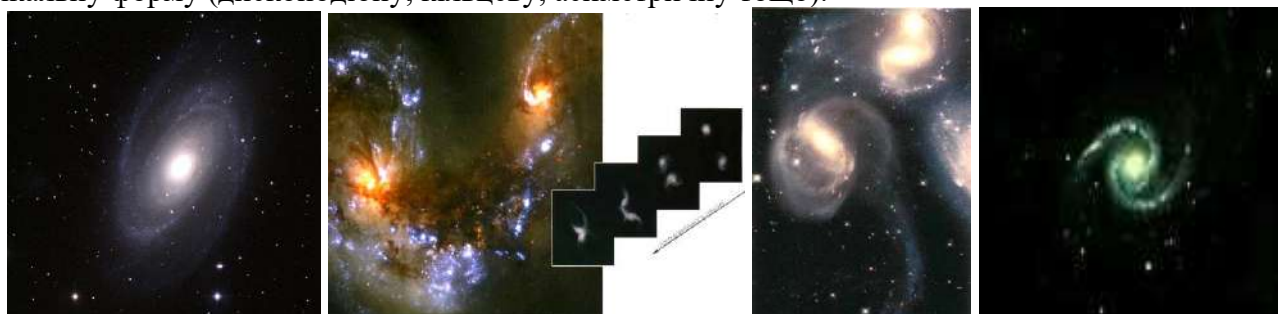


Рис.1.8. Зліва праворуч: лінзовидна галактика; зіткнення та взаємодія спіральних галактик NGC 4038 та NGC 4039 у сузір'ї *Ворона* із втратою своїх початкових форм і перетворенням в довгі „хвости”; група взаємодіючих галактик у *Секстеті Сейфера* із утворенням світлих перемичок, “хвостів” тощо; сейфертівська галактика NGC 1566

Існують інші види галактик (за межами класифікації Хаббла): **взаємодіючі** – 5-10% від загального числа (зараз їх відомо 1765), вони мають спотворений вигляд від взаємних зіткнень чи впливу (рис.1.8); **сейфертівські** (до 1%) – молоді галактики із подібним до крапки яскравим ядром (через хаотичний і дуже швидкий рух газових мас), непомітними спіральними рукавами та **джетами** – викидами речовини зі швидкостями 500-4000 км/сек. і **радіогалактики** – джерела інтенсивного радіовипромінювання, які тісно пов'язані з квазарами (див. ст. 20), багато з яких у радіодіапазоні мають близькі характеристики.

З 1975р. відомо, що **рукави спіральних галактик і бари** – не постійні жорсткі структури галактик, а періодичні динамічні згущення матерії галактики, які у вигляді хвильових коливань надлишкової густини речовини, з тимчасово накопиченими у них зорями (своєрідні „космічні пробки”), розбігаються по галактичному диску подібно до хвиль від кинутого у воду камінця.

До останнього часу теоретики не могли пояснити найважливішу властивість цих хвиль – велику різноманітність морфологічних типів галактик. Виявилось, що у розрахункові моделі не включали важливий компонент галактик – **міжзоряний газ**, який проявляє зовсім не пропорційний своїй малій масі вплив. Хвильові коливання густини можуть переносити кутовий момент, дозволяючи речовині скупчуватися у центрі галактик, що, можливо, сприяє росту там чорної дірки. Більш того, циклічні рухи хвиль викликають зміни форм галактик – від одного типу до другого – і це вже підкріплено спостереженнями близьких та далеких галактик.

Згідно розрахунків, галактика народжується у вигляді безструктурного диску із зірок, газу та пилу і тільки через 2 млрд. років у ній розвиваються спіральні рукави та бар. Міжгалактичний газ притягується до галактики і подвоює масу її диска за 6,5 млрд. років. Через 5 млрд. років хвильові коливання посилюються, бар змітає газ поблизу ядра галактики, але не впливає на міжгалактичний газ, що падає на периферію диска. Через 8 млрд. років газ, що зібрався у ядрі, починає руйнувати бар. Через 11 млрд. років бар зруйнований, а міжгалактичний газ, який вже більше не утримується обертанням на периферії галактичного диска, направляється до центра галактики і через 14 млрд. років бар знову відновлюється завдяки накопиченому газу. Починається новий процес його руйнування. **Таким чином, спіральні рукави галактик та бари як виникають, так і зникають. Гравітація, яка створює бар, в кінці кінців руйнує його, а потім відновлює – галактика відтворює себе.**

Незалежно від форми галактики, всі розташовані в ній зорі, газово-пилові туманності утворюють єдину сім'ю, яку об'єднують сили взаємного тяжіння. У межах кожної галактики всі її складові частини знаходяться у безперервному русі, зорі також рухаються своїми власними орбітами навколо галактик або перетинають їх; один їх оберт (галактичний рік) займає мільйони років. Еліптичні галактики обертаються значно повільніше за спіральні, а у сферичних галактиках траєкторії зірок абсолютно довільні.

Чим більше сплюснені галактики – тим більш упорядковано рухаються зорі.

Формування галактик залишається загадковим. Існують *дві моделі* утворення галактик:

згідно *першої*: газові хмари, стискаючись, починають обертатися, утворюючи протогалактики. При цьому формуються окремі зорі, а речовина стягується до центру обертання і там утворюється чорна дірка з масою у мільярд сонячних;

за *другою*: спочатку утворюється чорна дірка і втягує у себе оточуючий газ. Це теорія недавно отримала підтвердження – всі великі галактики мають у центрі чорні дірки, які відіграють ключову роль у їх розвитку. Крім того, далекі квазари також знаходяться під впливом чорних дірок, які затягують у себе більш молоді галактики.

У цілому, Всесвіт характеризується дуже нерівномірним розподілом матерії, більша частина якої зосереджена у порівняно згущених космічних системах і тілах. В «океані» галактик течуть свої течії, існують острови і навіть «стіни». У 1992р. супутник з радіотелескопом відкриває коливання інтенсивності реліктового випромінювання в $0,0005^{\circ}\text{C}$ від середньої величини і на отриманій карті Всесвіту більш теплі області відповідали згущенням газів, а холодні – пустим просторам. Отримана картина Всесвіту показала його комірчасту структуру - «космічну павутину» з **вузьких смуг та пасм із галактик**, які оточували **лакуни** (войди) – кулясті об'єми пустого простору (рис.1.2, 1.5).

Детальний аналіз розподілу галактик у Всесвіті показав, що і вони в свою чергу утворюють у просторі Всесвіту *групи, скупчення і надскупчення*, у найбільших з яких налічується до

декількох десятків тисяч галактик, тобто, **розподіл галактик у Всесвіті нагадує бджолині соти із найбільшою густиною галактик у ребрах цих сот.**

Скупчення галактик відокремлені між собою гігантськими пустими просторами – *лакунами* (войдами) - в сотні мільйонів світлових років у поперечнику. У середині цих скупчень також є своєрідні “пухирі” розмірами в мільйони світлових років, у межах яких немає галактик.

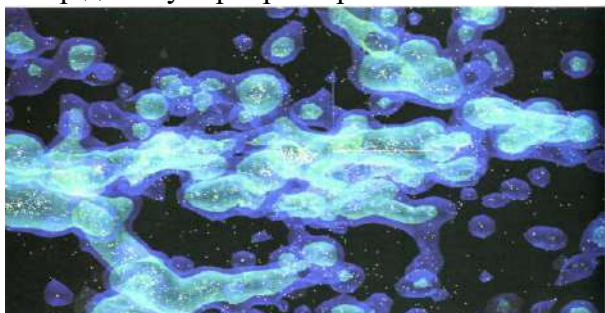


Рис.1.9. На карті ділянки Всесвіту навколо нашої Галактики *скупчення і надскупчення галактик* утворюють пухирі розміром у мільйони світлових років. Надскупчення вміщують тисячі яскравих галактик та багато тьмяних галактик із зірок-карликів.

У *надскупченнях галактик* (їх відкрито понад 50) галактики та їх скупчення концентруються вздовж поверхонь, які обгинають величезні пустоти (пухирі), внутрішні частини яких практично порожні. **Надскупчення галактик** у свою чергу утворюють своєрідні *волокна (філаменти)* – від сплосчених смуг до звивистих довгих вузьких стрічок - протяжністю у сотні мільйонів світлових років, які, мабуть, обертаються навколо пустих сферичних ділянок, пов'язані між собою в єдину сітку і **надають Всесвіту у самому грандіозному масштабі губчастої структури.** До найвіддаленішої відомої групи галактик 10 млрд. світлових років. В усьому Всесвіті біля 500 білльйонів зірок у 2 трільйонах галактик.

У 1989р. огляд червоних зміщень віддалених галактик *Гарвард-Смітсонівського астрофізичного центру* (CfA) відкрив на віддалі понад 200млн. св. років найбільшу площину (150×90×5Мпк) надскупчень галактик - **Велику стіну CfA2**, що простягається від одного краю дослідженого Всесвіту до протилежного на понад 700 млн. св. років. Нинішній *Слоанівський цифровий огляд неба* (SDSS) покрив значно більший об'єм Всесвіту і виявив на віддалі у 1 млрд. св. років найбільшу з усіх відомих структур Всесвіту - **другу Велику стіну Слоуна** довжиною у 420Мпк. Видима нами матерія (галактики і зорі) відіграє зовсім незначну роль у Всесвіті. У значно більшій мірі ці гігантські структури у просторі формуються під впливом гравітаційного поля „прихованої маси” (або *Темної Матерії*), випромінювання якої не фіксується нашими приладами, або антигравітаційного впливу *Темної Енергії*, який сприяє розширенню Метагалактики.

1.1.1. МОЛОЧНИЙ (ЧУМАЦЬКИЙ) ШЛЯХ

Величезна зоряна система, разом з нашим Сонцем, називається **Галактика**, що у перекладі з грецької означає **Молочний** (укр. назва **Чумацький) Шлях**. Галактика утворилася біля 12млрд. років тому, у Всесвіті вона є однією із *пересічених спіральних галактик типу SB(sr)bs* (рис.1.14). Галактика, за новітніми даними, має ~200-400 млрд. зірок та міжзоряну матерію; рухається Молочний Шлях із швидкістю 90 км/сек. у напрямі найближчої сусідки – *галактики Туманність Андромеди*. Маса Галактики більша за Сонце у 1,5 трільйони разів.

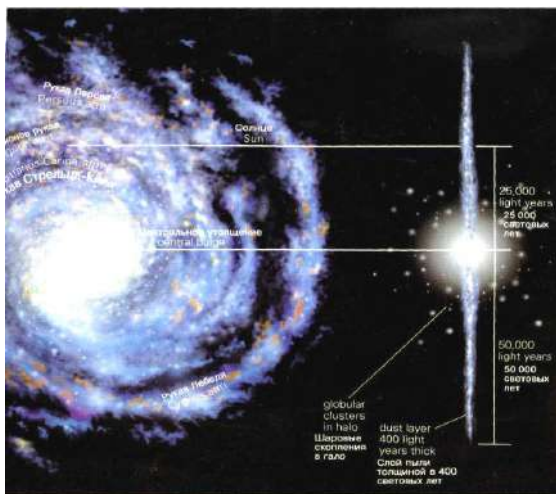


Рис.1.10. Форма *Чумацького Шляху* при спостереженні зверху (ліворуч) та збоку (праворуч)

Чумацький Шлях являє собою тонкий диск з великим ядром та гігантським еліптичним баром, що пересікає весь балдж, від кінців бару починають закручуватися спіральні рукави (рис.1.14) - *вся ця структура, як сьогодні вважає більшість вчених, занурена в невидиму хмару Темної Матерії.* Діаметр основної частини диска досягає 100 тис. світлових років, середня товщина

диску майже 12 тис. світлових років. У центрі внутрішньої частини диску існує центральна, дещо ширша та більш протяжна ліворуч, ніж праворуч, опуклість (рис.1.10, праворуч) діаметром 27 000 світлових років – **балдж** - сфера згущення біля 10 млрд. зірок (зоряна густина тут досягає свого максимального значення – майже 100 000 зірок у кубічному парсеку).

Спіральний диск разом із центральною сферою (балджем) знаходиться в середині великого **гало** – хмари речовини, яка охоплює всю Галактику і простягається на 150 тис. світлових років від її центра. У межах цього гало, на деякій віддалі від балджу, зустрічаються хаотично розміщені зоряні утворення, які складаються із сотень тисяч старих червоних зір – так звані “**кулясті зоряні скупчення**” - діаметром 20-100 світлових років із числом зірок 10^5 - 10^7 (рис.1.10, 1.11), які утворюють своєрідне сферичне “**кільце**” навколо всієї Галактики та обертаються своїми орбітами навколо галактичного центру, періодично то піднімаючись над площиною Галактики, то опускаючись під неї. Всі зорі кулястих скупчень, чия маса перевищувала сонячну, вже закінчили свою еволюцію і вибухнули або перетворилися у білі карлики, і тільки холодні зорі малих мас продовжують світити. **Основні компоненти Галактики: балдж, гало, зоряні скупчення почали формуватися одночасно – 11-12 млрд. років тому.** Процеси, які відбуваються в ядрі Галактики і в її диску, помітно відрізняються між собою. Зорі, які щільно наповнюють ядро Галактики, відносяться до *старих червоних зір*, вік яких співпадає з віком Галактики і нараховує близько 12 млрд. років. Ці зорі утворилися в гелієво-водневих туманностях ще до того, як туди потрапили важкі елементи і тому в складі цих зір мало металів.



Рис.1.11. Зоряне скупчення 47 Тукана (розмір 120 світлових років) у 16 700 світлових роках від Землі (дані і фото *Southern African Large Telescope*)

Згідно теорії еволюції, перше покоління зірок складалося тільки з водню і невеликої кількості гелію. У результаті реакцій термоядерного синтезу в їх надрах утворювалися нові більш важкі елементи. Після завершення термоядерних реакцій (вигорання „палива”) зорі вибухали, їх рештки розліталися у космосі за всіма напрямками і попадали на поверхню сусідніх зір (які на початку Всесвіту розташовувалися значно ближче, ніж зараз), або насичували туманності, а нові покоління зірок, які формувалися у цих туманностях, у своєму складі вже мали більш важкі елементи.

Зорі, які розташовані в диску Галактики, відносно молоді – їм близько 5 млрд. років. Серед них багато голубих і голубувато-білих зір, космічний простір між якими заповнений хмарами газів (водню і гелію) та пилу (уламки атомів більш важких хімічних елементів від гігантських зірок, що вибухнули раніше) – так званими **туманностями**. Крім іонів та електронів у міжзоряному середовищі багато атомів і молекул. При змінах їх внутрішньої енергії (під впливом міжзоряних магнітних полів) вони створюють випромінювання на чітко визначених довжинах хвиль, за якими і визначають ці речовини. Крім ліній водню H_2 (довжина хвилі випромінювання 21см), у Галактиці спостерігаються спектральні лінії різних молекул: гідроксиду OH (на хвилі 18см), води H_2O (1,35см), формальдегіду CH_2O (6см), оксиду вуглецю CO (2,6мм) тощо. У таких туманностях і народжуються нові зорі. У центрі Чумацького Шляху, в області інтенсивного формування зірок *Sagittarius B2* – у хмарі щільного гарячого газу діаметром 0,3 світлового року, яка підігрівается великою кількістю молодих зірок, - відкриті складні молекули етилового спирту, формальдегіду, мурашиної та оцтової кислот, глікольальдегіду, етиленгліколю і аміноацетонітрилу. Вважають, що майже 1/10 маси всієї Галактики приходить на долю туманностей. Туманності також вміщують значні рештки матерії, яка розлетілась у просторі після вибухів гігантських вмираючих зір. Тому зорі, які народжуються в цих туманностях, вміщують значну кількість різних металів, а типова зірка в диску Галактики – це молода і гаряча зоря.

У 2002р. астрономи відкрили віддалену гігантську зорю *HEO 107-5240*, моменти народження якої можна віднести до початкової стадії народження Всесвіту та процесу синтезу хімічних елементів: легких у більш важкі (*C, P, Pb* тощо) – унікальність зорі в тому, що вона фактично не має металів і

якщо будуть знайдені нові зорі без металів, то це дозволить напряду провести дослідження газу, який утворився під час Великого Вибуху.

Ядро Галактики Чумацький Шлях – це область радіусом біля 3000 світлових років, яка розташована у напряду сузір'я Стрільця. Центр галактики закритий непрозорими у видимому діапазоні довжин хвиль хмарами газу та пилу, але вони пропускають радіохвилі та інфрачервоне випромінювання, які і надають нам інформацію про центр Галактики. Потік випромінювання із ядра у видимому діапазоні довжин хвиль, який проходить через ці газопилові хмари, слабшає у 10^{12} разів. За допомогою радіотелескопів було встановлено, що в межах 1000 світлових років від центру Галактики мільйони зір розташовані дуже щільно – віддалі між ними всього в декілька світлових днів. Тут спостерігаються газові потоки, що рухаються із швидкостями біля 500 км/сек.

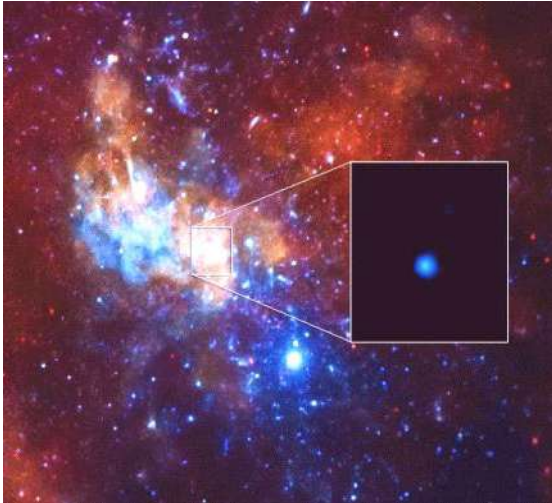


Рис.1.12. Центр Чумацького Шляху – чорна дірка - джерело радіовипромінювання *Стрілець А** (*Sgr A** - від *Sagittarius A**) та його місце знаходження серед оточуючих зірок (фото *Chandra.harvard.edu*)

Центральна область розміром у 20 світлових років є потужним джерелом інфрачервоного та рентгенівського випромінювань і радіохвиль. На радіохвильових картах цього району видно хмари, які з неймовірною швидкістю обертаються навколо центральної області, а розжарений газ зривається із

внутрішнього краю кільця хмар і падає до центра (рис.1.13). Особливий інтерес викликає **центральною областю** ядра галактики радіусом менше 3 світлових років, де сконцентрована маса, еквівалентна 50млн. сонячних мас, що випромінює гігантську кількість енергії.

Результати досліджень *Chandra* свідчать, що тут розташована **надмасивна чорна дірка** – об'єкт *Sagittarius A** (*Sgr A** або *Стрілець А**) - потужне джерело радіовипромінювання. Надмасивна чорна дірка розташована на віддалі $7,86 \pm 0,14 \pm 0,04$ кілопарсек (21,17 тис. св. років) від Землі, має діаметр до 20-25 млн. км (раніше вважали, що вона у 5 разів більша) і масу – в $\sim 4,3$ млн. сонячних мас, а навколо неї у тумані розігрітого до мільйонів градусів газу обертаються **невелика чорна дірка** масою біля 1500 сонячних з кластером із 7 зірок (рис.1.13), яка притягує велику кількість **молодих зірок** з найближчих скупчень та викликає майже хаотичну орієнтацію їх орбіт, та десятки тисяч **білих карликів** і **нейтронних зірок**.

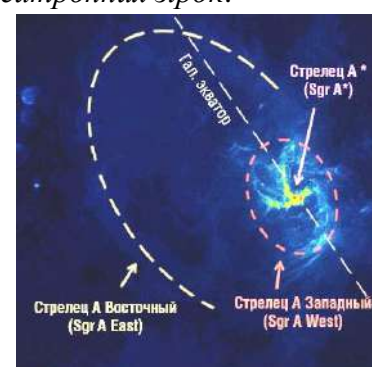
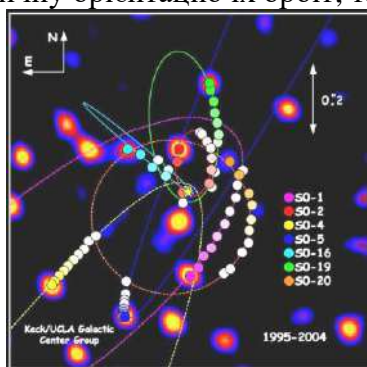


Рис.1.13. Ліворуч: крапками показане щорічне (з 1995 до 2008р.) положення зірок на траєкторіях власних орбіт при їх обертанні навколо **надмасивної чорної дірки** (позначена зірочкою) в ядрі Чумацького Шляху (рис. із сайту www.astro.ucla.edu). У центрі (крупним планом): **чорна дірка** у центрі Галактики в оточенні газових хмар, які обертаються навколо неї (дані *MIT/Shep Doeleman*). Праворуч: структура об'єкта *Стрілець А** (*Sgr A**) свідчить, що він складений із 3-ох вкладених радіоджерел: **1-** нетеплове джерело радіовипромінювання (випромінювання розширюючоїся оболонки наднової) *Стрілець А Східний*; **2-** теплове джерело радіовипромінювання (потрійна міні-спіраль випромінювання падаючої на чорну дірку гарячої плазми) *Стрілець А Західний*; **3-** центральний об'єкт нетеплового магнітно-гальмівного випромінювання – чорна дірка *Стрілець А** (*Sgr A**) (за новітніми даними *NASA*)

У безпосередній близькості від центра нашої Галактики – в 9,5 млрд. км (менше 1 світлового року) – за допомогою космічного радіотелескопу *Chandra* було відкрито декілька десятків великих і дуже яскравих зірок, які в 30-50 разів перевищують за своїми розмірами Сонце та яскравіші за нього в 100 тис. разів. Вчені допускають, що дуже близько від чорних дір може існувати своєрідне кільце, в якому можуть знаходитися різні космічні тіла. Вважається, що у кінцевому результаті, після того як ці зорі стануть надновими і вибухнуть, після гравітаційного стискання вони перетворяться у відносно невеликі чорні дірки.

Галактика обертається навколо **осі**. Области ближче до центра Галактики обертаються швидше, ніж на периферії, що і зумовлює **спіральну форму Чумацького Шляху** (рис.1.14).

За новітніми даними, Галактика обертається (в області Сонця) за годинниковою стрілкою зі швидкістю 254км/сек (1млн км/год.), але ореол зірок навколо її рукавів обертається у протилежний бік зі швидкістю 200тис. км/год., а в ореолі є ще дві власні сфери, кожна з яких обертається також проти годинникової стрілки, але із різними швидкостями – це свідчить про належність цих зірок до більш мільярдів галактик, які були поглинуті Молочним Шляхом.

Нові зображення оточуючого простору космічного телескопу *Spitzer* дали новітні дані про найбільш точну та повну зараз загальну будову нашої Галактики - виявилось, що **Чумацький Шлях має чотири головних зоряних рукави**, які беруть початок від кінців бару: рукав **Персея**

(*Perseus Arm*) і рукав **Щита-Центавра** (*Scutum-Centaurus Arm*), які мають дуже високу щільність молодих яскравих зірок та червоних гігантів більш старшого віку, а рукав **Лебеда** (*Cygnus* чи *Norma Arm*) та рукав **Стрільця** (*Sagittarius Arm*) – менш щільні і складені газом із пустотами та областями формування молодих зірок.

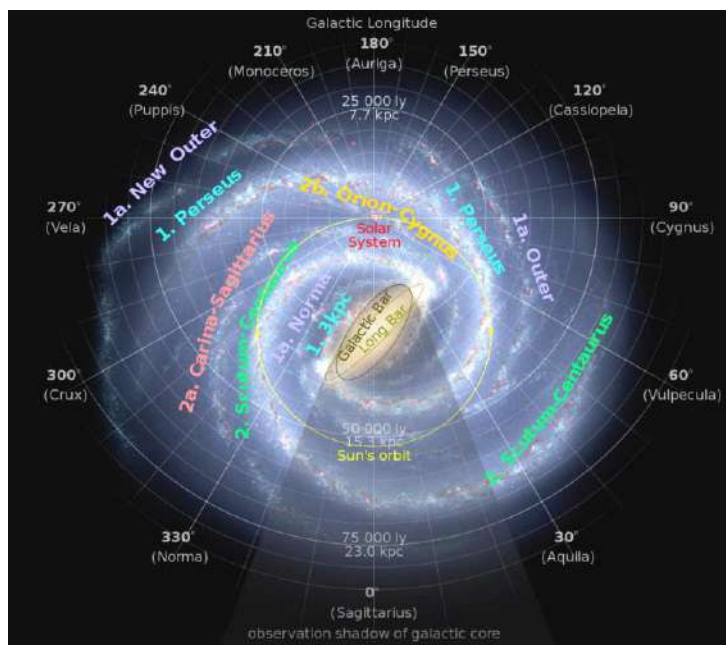


Рис.1.14. Чумацький Шлях - пересічена спіральна галактика з баром типу SB (дані NASA)

Менший рукав із нейтрального водню і голубувато-білих гарячих зірок, який розташований між рукавами Стрільця і Персея, називається рукавом **Оріона** (*Orion Arm*) або **Шпорою Оріона** (*Orion Spur*). На краю рукава Оріона, на віддалі

21,17тис. світлових років від центра Галактики та 80 світлових років на північ від площини Галактики, знаходиться **Сонце зі своєю планетною системою**. Сонце розташоване приблизно посередині між рукавами Стрільця та Персея на віддалі 1,95 кпс від найближчої області утворення молодих зір рукава Персея.

Зоряна щільність у районі Сонця – приблизно одна зоря на десять кубічних парсеків, що у декілька разів більше середнього галактичного фону. У спіральних рукавах знаходиться основна частина газових хмар, а також молодих зір. Зорі, які входять до рукавів, утворюють на нічному небі світлу смугу Чумацького Шляху. Розглядаючи на небі Чумацький Шлях, ми дивимось у напрямі, який лежить у площині диску Галактики. Подібно до того, як зорі утворюють галактики, галактики в свою чергу утворюють свої скупчення. Товщина диску Галактики у цій частині не перевищує 500 світлових років.

Відкритий у 2005р. гігантський **бар** (*Long Bar*) у центрі Галактики виявився у 2 рази більшим, ніж вважалося раніше, від кінців цього бару і починають закручуватися спіральні рукави. Еліптичний бар Чумацького Шляху обрамляють ще більш коротші та симетрично розташовані новий „**далекі трикілопарсековий рукав**” (*Far 3kpc Arm*) та „**ближній трикілопарсековий рукав**” (*Near 3kpc Arm*). Найвіддаленішим від ядра Галактики є **Зовнішній** рукав (*Outer arm*). Рукави Чумацького Шляху названі за сузір'ями, в яких вони спостерігаються із Землі.

Наша Галактика входить до **галактичного скупчення Місцева Група** в 2-3Мпк уперек (рис.1.16). Це досить розріджене утворення - у просторі радіусом 5млн. св. років розкидані **49** його членів: **11** з них – неправильної форми **газові хмари із молодими зорями**, напр. *Велика і Мала Магелланові Хмари*; ще **33** об'єкти відносяться до **карликових еліптичних галактик**, які являють собою дуже розсіяні зоряні скупчення; та **3** найбільших галактики, в яких зосереджено 95% маси Місцевої Групи, це – **Чумацький Шлях**, а також **спіральні галактики Туманність Андромеди (M31)** на віддалі 670 кілопарсек (2млн. св. років) та **Трикутник (M33)**.



Рис.1.15. Наші сусіди у галактичному скупченні *Місцева Група*(зліва праворуч): галактика типу Sb *Туманність Андромеди (M31)* із супутниками M32 та M110; галактика типу Sc *Трикутник (M33)*; галактики *Велика Магеланова Хмара* і *Мала Магеланова Хмара*

Підгрупа Чумацького Шляху включає ще 12 *іррегулярних карликових галактик* (рис.1.16). *Підгрупа Андромеди* включає, крім Туманності Андромеди (наймасивнішого члену Місцевої Групи) та невеликої спіральної галактики M33 у сузір'ї Трикутника, ще до двох десятків карликових супутників. Іноді виділяють *третю підгрупу* із «головною» галактикою NGC 3109.

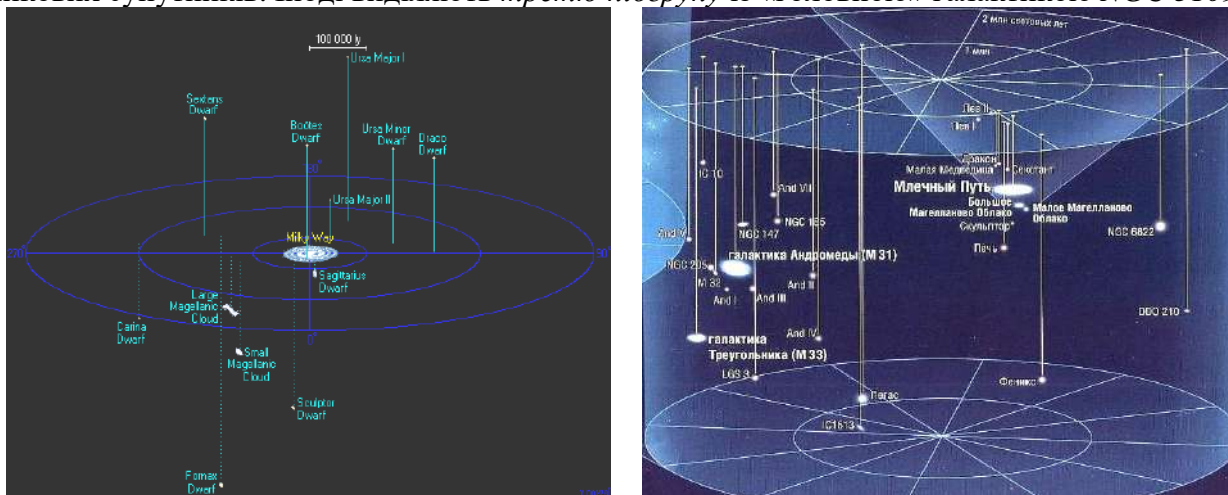
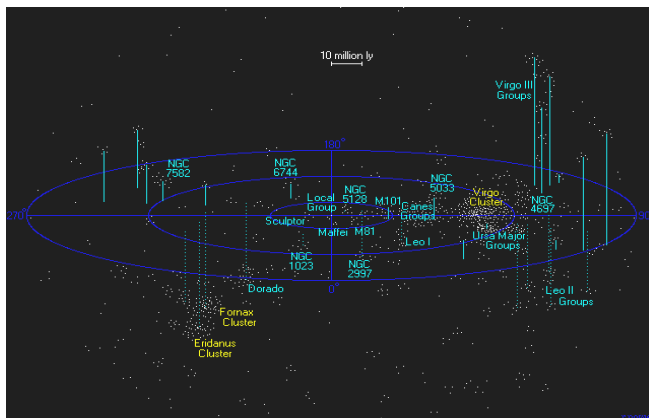


Рис.1.16. Ліворуч: *Чумацький Шлях (Milky Way)* зі своїми супутниками – *карликовими галактиками*. Праворуч: *Місцева Група* галактик – найбільші галактики *Чумацький Шлях*, *Туманність Андромеди (M31)* і *Трикутник (M33)* (дані www.atlasoftheuniverse.com)

Супутники *Чумацького Шляху* - неправильні карликові галактики *Велика і Мала Магеланові Хмари*, за останніми даними, рухаються «транзитними» орбітами на віддальх відповідно 52 і 63 кілопарсеки і просто тимчасово зблизились з нашою Галактикою. Вивчення швидкості їх руху свідчить, що **Чумацький Шлях значно більший, ніж вважалося раніше, а його невидиме масивне гало приблизно в 10 разів переважає за розмірами спіральний диск Галактики**.

Шлях *Великої Магеланової Хмари* орбітою зі швидкістю 378 км/сек. навколо *Чумацького Шляху* може зайняти біля 2,5 млрд. років, причому через дуже близькі орбіти гравітаційні сили невидимого гало Галактики рвуть *Велику і Малу Магеланові Хмари* (її швидкість 302 км/сек.) на частини, а відокремлені від них дуги із речовини падають на *Чумацький Шлях*. За підрахунками астрономів, у найближчі 10 млрд. років *Чумацький Шлях* завершить акт галактичного канібалізму і повністю поглине всю речовину обох *Магеланових Хмар*.

Місцева Група – дуже маленьке *скупчення* із понад 50 галактик (рис.1.16), входить до складу *філаменту* галактик Волосся Вероніки - *Скульптор*. Кожний член *Місцевої Групи* рухається під дією гравітаційного тяжіння решти її членів, а все скупчення галактик утримується спільним гравітаційним полем і рухається у космосі зі швидкістю біля 627 ± 22 км/сек. у напрямі *сузір'я Діви*, де на віддалі понад 100 млн. св. років на пересіченні двох всесвітніх волокон Темної Матерії розташований центр найближчого **надскупчення галактик** (*Virgo Supercluster*)



радіусом 100 млн. св. років (рис.1.17) яке в цілому в свою чергу притягується до ще більшого надскупчення під назвою «**Великий Атрактор**», яке розміщене у напрямі сузір'я Центавра.

Рис.1.17. Місцева Група галактик у надскупченні галактик *Діви*

Дещо більш віддалене надскупчення у *сузір'ї Волосся Вероніки* складається з понад 3000 галактик, які займають у 2 рази більший

простір. Із **50 відомих надскупчень** найближчі розташовані в *сузір'ях Лева* (віддаль 87Мпк) та *Геркулеса* (віддаль 100Мпк). **Надскупчення Діви** складається із кількох філаментів, вміщує біля 100 груп і скупчень галактик та близько 30 000 окремих галактик високої і середньої світимості, у тому числі і найяскравішу з них – галактику *Сомбреро*. Наша *Місцева Група* разом з іншими близькими *групами галактик* (*Скульптора, IC342-Maffei, M81*) входить у склад видовженої структури, яка розташована на периферії *надскупчення Діви*.

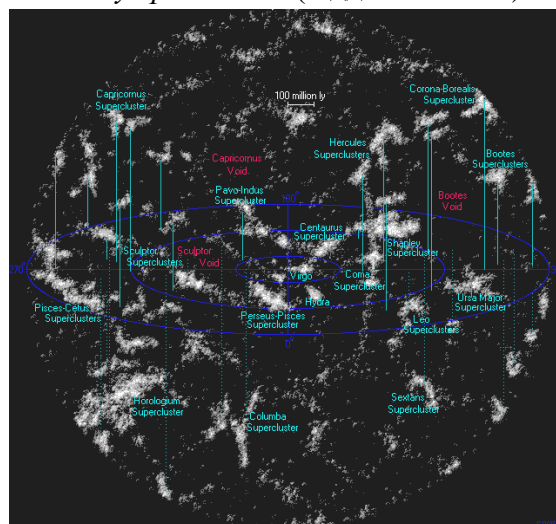


Рис.1.18. Праворуч: *надскупчення галактик Діви (Virgo Supercluster)* – звичайний рядовий член сім'ї оточуючої спілки надскупчень галактик

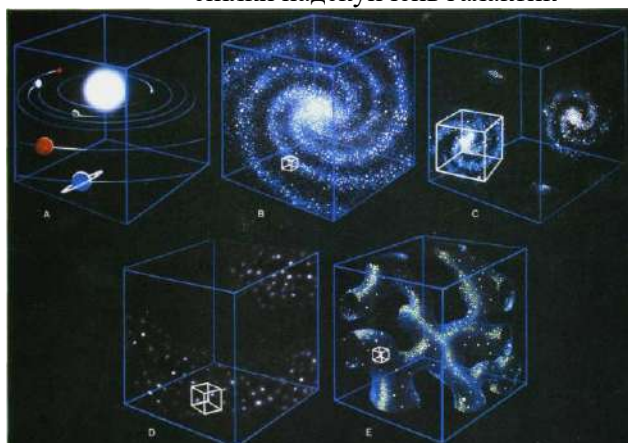


Рис.1.19. Ліворуч: *схема найближчого Всесвіту: Земля у Сонячній системі (схема А); Сонячна система - в рукаві Оріона Галактики (схема В); Галактика - в галактичному скупченні Місцева Група (схема С); Місцева Група – у надскупченні галактик у сузір'ях Діви, Гідри і Центавра (схема D); надскупчення галактик - у волокнах мегаструктури найближчої частини Всесвіту (схема Е)*

Потік нових, отриманих за останні роки ХХ ст. фактів повністю зруйнував старі уявлення про існування чіткої різниці між *зорями* та *планетами*. Спектр мас (або розмірів) космічних об'єктів виявився безперервним. Біля одного краю цього спектру – зореподібні **квазари**, які мають практично безмежні запаси енергії. Потім, у порядку зменшення, ідуть **зорі**: *зорі-надгіганти*, *зорі-гіганти*, звичайні *зорі-карлики* (типу нашого Сонця), *червоні карлики*, *коричневі карлики* або “малі ширяючі об'єкти”; *планети-гіганти* (наприклад, Юпітер), *планети земного типу*, *планетоїди*, *астероїди*, *метеорна речовина*, *міжзоряна речовина* у вигляді *газових туманностей* та *пилових хмар*. Ця послідовність має важливу особливість – чим менше розмір космічного об'єкту, тим у більшій кількості такі об'єкти зустрічаються у космосі.

1.2. КВАЗАРИ

КВАЗАРИ (від англійського *QUAsi-StellAR radio source* - “схоже на зорю джерело радіовипромінювання” або “квазізоряне радіоджерело”) - **найвіддаленіші серед усіх відомих у Всесвіті позагалактичні об'єкти у вигляді крапки, які розміщені на межі спостережасмого Всесвіту і є найпотужнішими зореподібними джерелами світла та інших видів енергії, яка у мільйони разів перевищує енергію нашої Галактики.**

Зараз відкрито близько 100 000 квазарів і майже всі вони віддалені від нашої Галактики на декілька мільярдів світлових років, а деякі з них – на 12-13 млрд. світлових років. Найвіддаленіші квазари віддаляються від нас із швидкостями, які досягають 9/10 швидкості світла. Світло від далеких квазарів, що доходить до нас через мільярди років, є більш ніж на 10 млрд. років молодшим за нашу Галактику зараз, у момент його спостереження, і розповідає нам про умови, які існували у Всесвіті в той час, коли галактики лише починали формуватися. 12 квазарів - *подвійні*, а об'єкт *LBQS 1429-008*, розташований від нас на віддалі 10,5 млрд. світлових років - *перший потрійний квазар*.

Близько 1/10 відомих квазарів є потужними джерелами випромінювання радіохвиль у всьому електромагнітному діапазоні від рентгенівських хвиль до радіохвиль, причому в багатьох з них інфрачервоне („теплове”) випромінювання особливо потужне. Блиск квазарів характеризується помітними коливаннями із дуже малими періодами – тижні, дні і навіть менші (відомий квазар з періодом зміни блиску всього близько 200 секунд), що свідчить про відносно невеликі розміри квазарів, діаметри яких не повинні перевищувати декількох сотень астрономічних одиниць. Тобто, *за своїми розмірами деякі квазари відповідають розмірам планетних систем*, а квазар з періодом у 200сек. має поперечник 6×10^{10} м, що удвічі менше радіуса земної орбіти. Астрономи вважають, що **квазари є або надзорями з масою, яка в мільярд разів більша за сонячну**, так як спектр квазарів за хімічним складом мало відрізняється від спектру звичайних зірок, **або чорними дірками з масою у мільярди Сонць**, але вони є **найяскравішими різновидами активних галактичних ядер**.

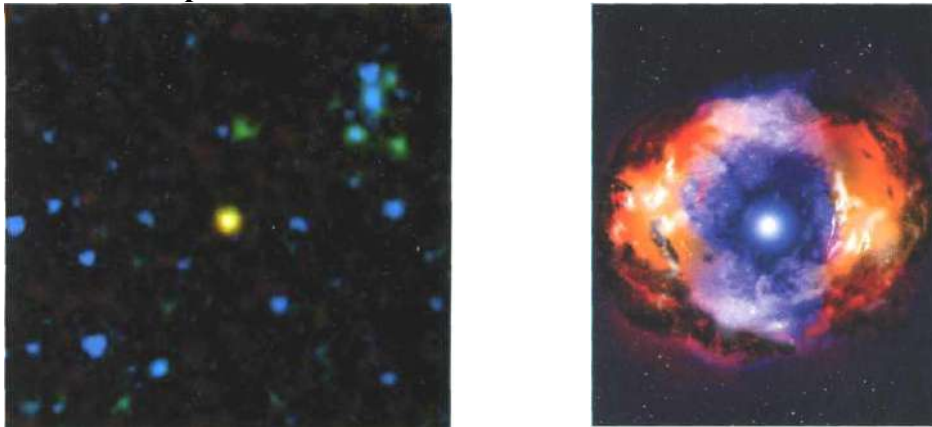


Рис.1.20. Ліворуч: *квазар* – найпотужніше у Всесвіті джерело рентгенівського випромінювання – чорна дірка, оточена кільцями газу та пилу у центрі далекої масивної галактики (фото *Spitzer*) та розташована на віддалі 30 млн. світлових років від Землі - наймолодша із відомих об'єктів у Всесвіті - чорна дірка чи нейтронна зоря, що утворилася на місці *Наднової зорі SN 1986G* у галактиці *NGC 891* і спалахнула 400 років тому (праворуч)

Квазари розташовані у віддалених галактиках, але в усіх випадках вони сяють настільки яскраво, що затьмарюють світло галактик і тому на отриманих фотографіях видно лише яскраві точки від активних ядер (рис.1.20). З 1960-их років астрономи отримали підтвердження того, що джерелом енергії квазарів і інших активних ядер галактик служать **гігантські чорні дірки**, які формуються при зіткненнях галактик, злитті їх чорних дірок та поглинанні оточуючого кокона пилу і речовини.

Всередині квазару розташована чорна дірка, яка оточена диском із речовини діаметром у декілька світлових років. Поблизу диску швидко обертаються хмари газу, який перед падінням

на чорну дірку розігрівається і випромінює велику кількість енергії в усіх діапазонах електромагнітного спектру - від рентгенівських променів до радіохвиль, а ще далі, на віддалі близько 100 світлових років, розташовані більш *тонкі і більш холодні газові хмари*, де квазар зливається із своєю галактикою. За допомогою орбітального інфрачервоного телескопу *Spitzer* недавно відкрили оточені такими щільними хмарами космічного пилу квазари, що поглинають практично все світлове випромінювання. Зображення квазарів, отримані з високим кутовим розділенням, показали розміщення їх в яскравих еліптичних чи взаємодіючих галактиках, що свідчить про необхідність специфічних умов для живлення центральної чорної дірки.

Цікавим є факт, що при вивченні глибин Всесвіту кількість нових квазарів спочатку збільшувалася, а потім зменшувалася. Цей факт доказує, що *квазари – короткочасна форма існування матерії*. Можливо, що квазари – це фрагменти чи уламки того насиченого енергією надгустого тіла, з якого в минулому виникла та частина Всесвіту, що ми спостерігаємо.

Згідно сучасних уявлень, **квазари – найбільш яскраві і компактні рентгенівські джерела Всесвіту – оточені акреційними дисками газу та пилу надважкі чорні дірки в ядрах найвіддаленіших масивних галактик, що зараз ми спостерігаємо їх „ранню юність” із процесами активного формування зірок, а народжені зорі, в свою чергу, вступали у взаємодію між собою (найчастіше це відбувалося в центральних областях, де концентрація речовини і відповідно зірок була найбільшою). При падінні спіральної обертаючої речовини диску на чорну дірку виділяється енергія в усіх діапазонах (від рентгенівського до радіохвиль). Через величезні віддалі квазари, згідно закону Хаббла, віддаляються від нас зі швидкостями, які можна порівняти із швидкостями світла, що зумовлює істотне зміщення ліній в їх спектрах у бік більш довгих хвиль („червоне зміщення”).**

1.3. ЗОРИ

ЗОРИ – космічні газові тіла, які складаються із дуже іонізованого газу, світяться завдяки власним джерелам енергії (упродовж більшої частини життя це термоядерні реакції в їх надрах) і вся їх енергія випромінюється через зоряну атмосферу в космос, а тиск газу у надрах зорі врівноважує вагу її зовнішніх шарів.

Границя між масами зірок і планет дорівнює 0,02 маси Сонця, тобто, при меншій за цю величину масі термоядерна реакція в надрах зорі не відбувається.

Однією з головних сил в еволюції космічної матерії є, мабуть, *сила тяжіння*. Під дією сил гравітації відбувається **колапс** – *газово-пилові туманності, які пронизані випромінюванням та слабким магнітним полем і простягаються на сотні світлових років у Всесвіті, починають обертатися та поступово, на протязі мільйонів років, стискаються під впливом гравітації і у них утворюються більш щільні згустки центрів конденсації, газ та пил яких нагрівається за рахунок енергії стискання і починає світитися*. До причин утворення таких згустків можна віднести: проходження через туманність ударних хвиль від зіткнень галактик або від вибухів гігантських зірок; проходження постійно циркулюючих усередині спіральних галактик хвиль стискання або просто стискання під дією власної гравітації через велику густину.

До утвореного згустку **протозорі** сили тяжіння починають притягувати все більше речовини, постійно збільшуючи його густину. Енергія речовини, яка притягується і падає на протозорю під дією сили тяжіння, перетворюється у тепло. У результаті температура в надрах протозорі постійно зростає і якщо вона досягає 10 мільйонів градусів - починаються *термоядерні реакції*, коли в ході синтезу із ядер атомів водню утворюється **гелій** із виділенням величезної кількості енергії. У протозорях, чия маса в 100 і більше разів перевищує сонячну, розігрів до такої температури відбувається дуже швидко – всього за 20 000 років, а у зірок сонячного типу цей процес займає близько 50млн. років. Як тільки починаються ядерні реакції, тиск у надрах зорі зрівнюється з силами тяжіння і гравітаційне стискання припиняється. У зорях сонячного типу енергія від ядра переноситься випромінюванням, а ближче до поверхні температура газу нижча і головним переносником енергії до поверхні стає конвекція, звідки енергія випромінюється в космос у вигляді світла і тепла – таким чином протозоря перетворюється у **справжню зорю**.

Астрономи поділили зорі на класи у залежності від їх спектру та позначили їх літерами: для самих блакитних та гарячих (+30 000-50 000°C, оптична світимість у 10 000 разів більша за сонячну, напр. зоря *Спіка*) використали літеру **O**, потім у порядку зменшення температури літери **B, A, E, G, K** і - для найхолодніших червоних зірок (+3000°C, оптична світимість у 1000 разів слабкіша за Сонце, напр. зоря *Крюгер 60*) – літеру **M**. Кожен клас поділений на 10 підкласів і позначений цифрами від **0** (найгарячіші) до **9** (найхолодніші). Зв'язок між температурою (кольором) та світимістю зірок відображений на діаграмі Герцшпрунга-Рассела (Г-Р).

Якщо розташувати зорі на Г-Р діаграмі, то вони складуть чітку картину: червоні зорі мають або велику яскравість, або зовсім тьмяні; зорі подібні до Сонця займають середнє значення, а блакитні зорі – найяскравіші. Зорі у верхній частині діаграми називаються *гігантами* та *надгігантами*, а внизу розташувалися *карлики*. Наше Сонце відноситься до *субкарликів*. Більшість зірок лежить на діагональній смугі, яка з'єднує тьмяні червоні карлики правого нижнього кута з блакитними надгігантами лівого верхнього кута діаграми і називається **Головною послідовністю**.

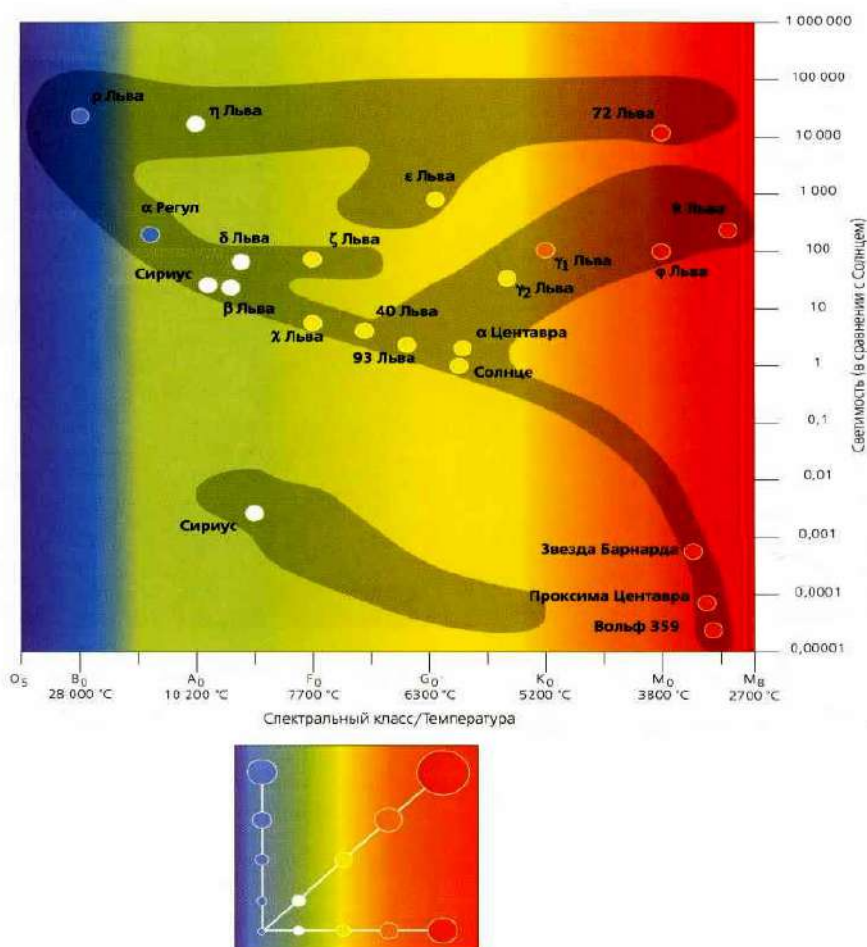


Рис.1.21. Діаграма Герцшпрунга-Рассела (Г-Р) поєднує спектральний тип зорі – її температуру - (горизонтальна вісь діаграми) з її світимістю (вертикальна вісь). На нижній діаграмі - блакитні зорі її верхньої частини найяскравіші (багато ядерного палива), а червоні зорі тієї ж світимості повинні бути ще крупніші – мати більшу поверхню.

У її верхній частині знаходяться найгарячіші і найсвітліші **блакитні зорі** (зоря *Спіка*), далі розташовані **білі зорі** (*Сиріус A*), **жовтуваті-білі** (*Проціон*), **жовті** (*Сонце*), **оранжеві** (*т Кита*) і закінчується Головна послідовність **червоними карликами** (*Крюгер 60*). Вище Головної послідовності розташовані **червонуваті субгіганти**, потім **оранжеві** та **червоні гіганти**, які мають великі розміри і відповідно великі світимості (зорі *Капелла*, *Альдебаран*,

Арктур). У самій верхній частині діаграми розташовані **надгіганти**, світимість яких у сотні тисяч разів більша за сонячну (*Ригель*, *Бетельгейзе*).

Яскраві зорі верхнього відрізка Головної послідовності зустрічаються рідше, ніж карлики нижньої її частини (білий карлик *Сириус В*).

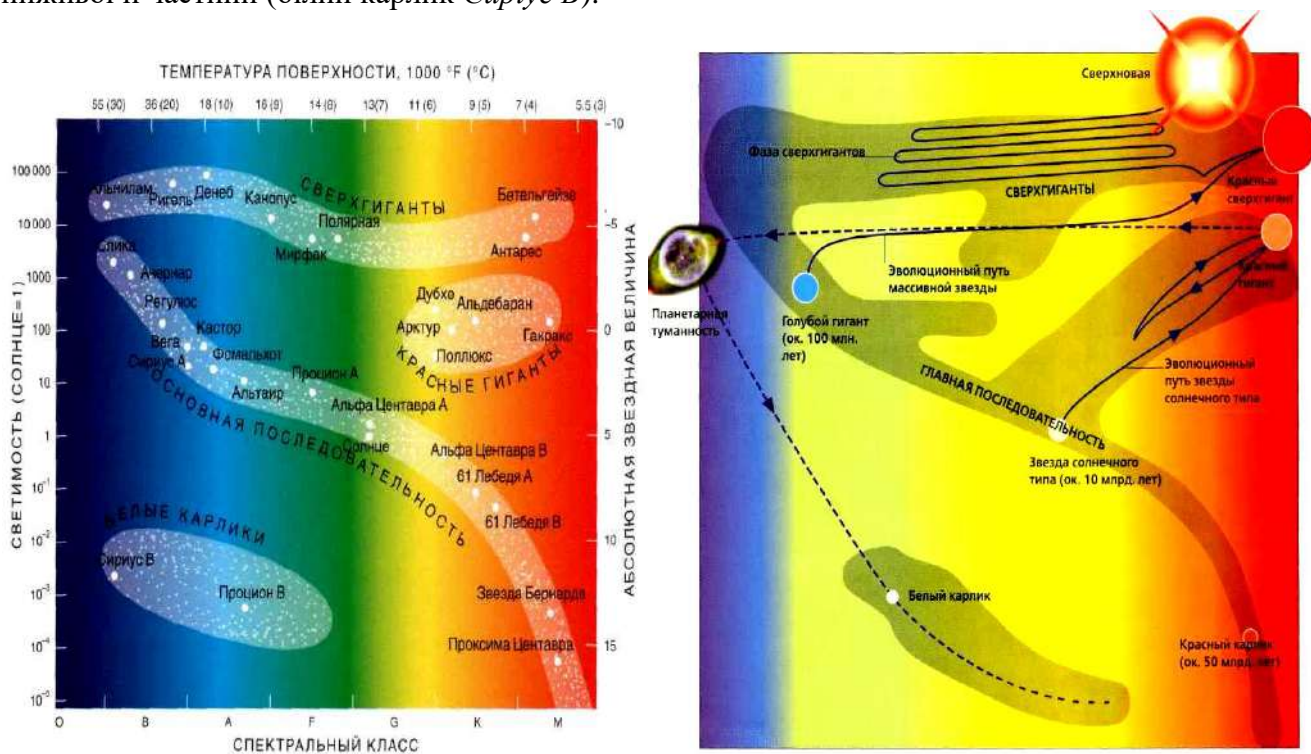


Рис.1.22. Життєві цикли зірок, які покинули *Головну послідовність*.

Зоря сонячного типу розширюється і стає *червоним гігантом*, стискається і знову розширюється. Потім вона скидає свої зовнішні шари у вигляді *планетарної туманності* і зменшується до *білого карлика*.

Блакитна зоря з масою рівною восьми Сонцям, розширюється до *надгіганта*, проходить стадії стискання та розширення, вибухає і стає *надновою*.

У кінці своєї еволюції всі зорі старіють та гаснуть, але **тривалість життя кожної окремої зорі визначається швидкістю втрати її енергії на випромінювання і запасами ядерного палива – тобто, залежить від маси зорі**.

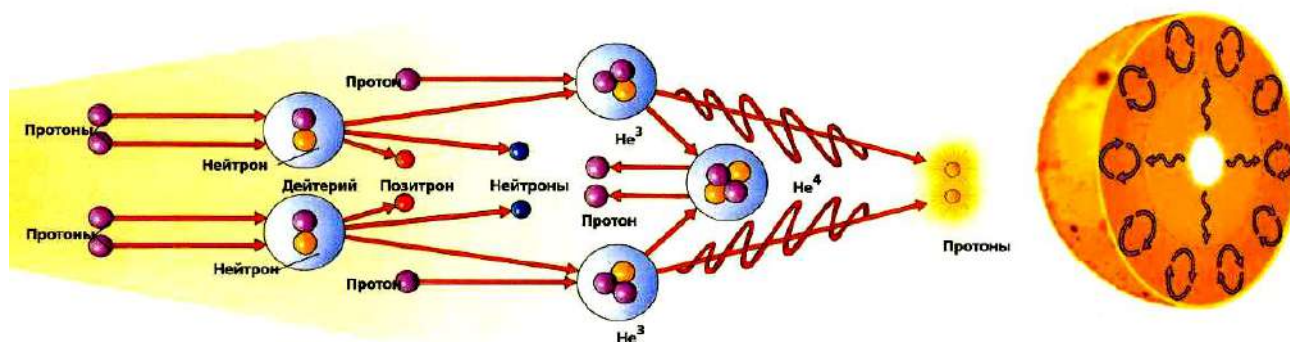


Рис.1.23. Схема ядерного синтезу у надрах зорі на основі протон-протонної реакції (ліворуч) та схема переносу енергії від ядра процесами випромінювання та конвекції (праворуч) у надрах зорі сонячного типу

Звичайні невеликі **жовті зорі**, такі як Сонце (або з масою до 1,2 маси Сонця), виділяють енергію за рахунок синтезу ядер водню в гелій у ході термоядерних реакцій у своїх надрах. У результаті синтезу, під час протон-протонної реакції, 4 ядра атомів водню з'єднуються і утворюють ядро гелію (2 протони перетворюються в нейтрони та декілька елементарних частинок із частковою втратою маси, яка вся перетворюється в енергію за формулою $E=mc^2$).

Лише 10% речовини зорі розігріто настільки, щоб приймати участь у термоядерній реакції, але цих сотень трильйонів трильйонів тонн досить для підтримання термоядерної реакції у надрах зірок, з близькою до сонячної масою, протягом 10 мільярдів років. У зорі кожен мільйон тонн речовини переходять в енергію потужністю близько 390 трлн. МВт. Приблизно за 10 млрд. років водневе “паливо” в таких зорях вичерпується і в їх надрах залишається головним чином *гелій*. Інтенсивності направленої від ядра сили виштовхування гарячого газу стає недостатньо для врівноваження направленої до центру сили тяжіння і розпочинається гравітаційний *колапс* (стискання) ядра із зростанням його густини та температури.

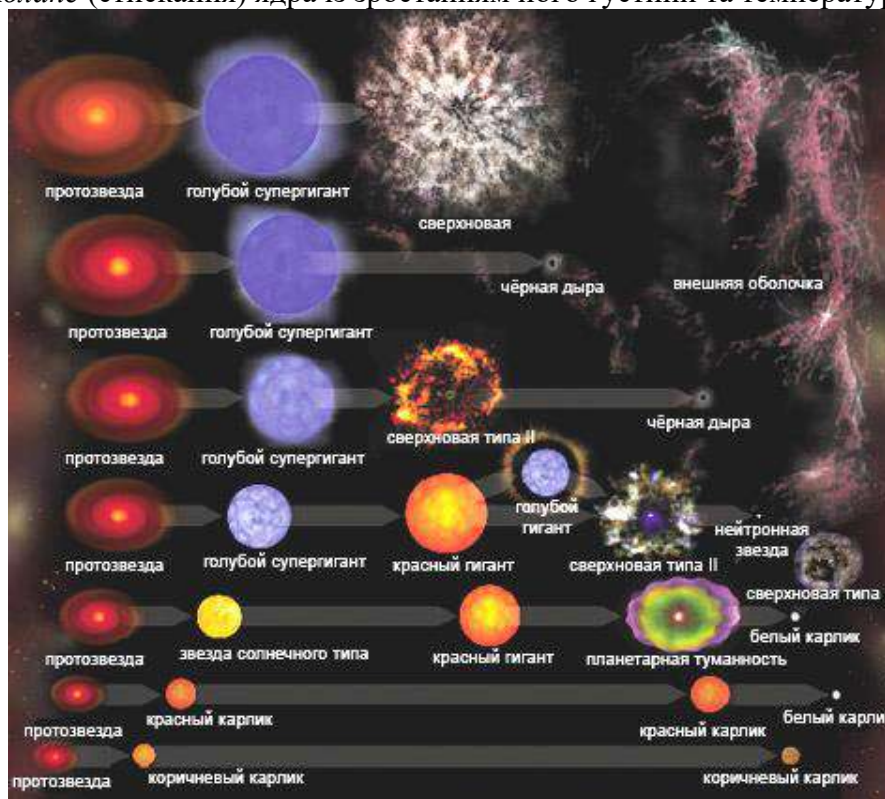


Рис.1.24. Схема еволюції зірок у залежності від їх маси (ілюстрація NASA/CXC/M.Weiss)

Енергії, яка виділяється при цьому, досить для розігрівання оточуючої ядро речовини і у цій оболонці розпочинається термоядерна реакція. Кількість енергії різко зростає і зоря стає дуже яскравою. Надлишок енергії розігріває надра зорі і вона розширюється (рис.1.25). Незважаючи на збільшення яскравості, швидке розширення зорі у десятки разів зумовлює падіння її температури до $+3000^{\circ}\text{C}$. Зоря світиться яскравим, але вже червонуватим світлом і перетворюється у *червоний гігант* – величезну низькотемпературну розріджену зорю.

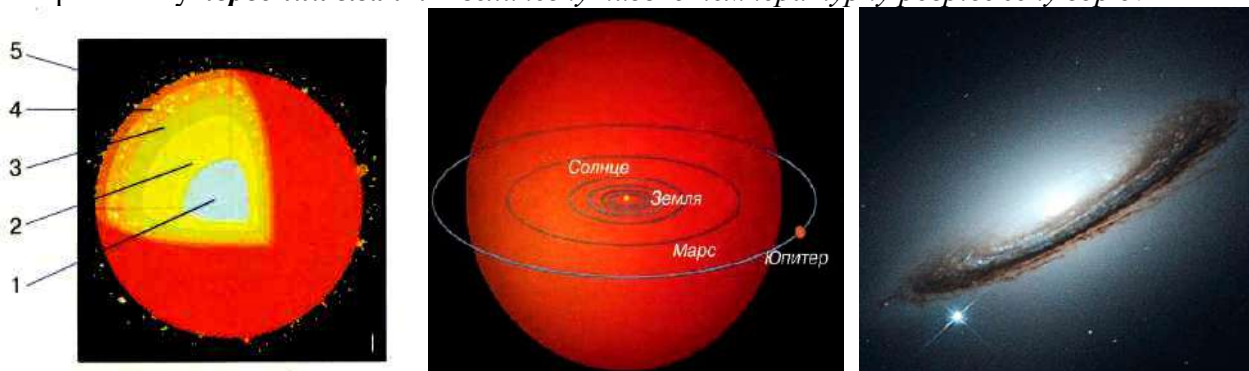


Рис.1.25. Ліворуч: будова зорі Головної послідовності: ядро (1), області переносу енергії від ядра до поверхні випромінюванням (2) і конвекцією (3), фотосфера (4), хромосфера (5). У центрі: розмір „холодної” червоної зорі-надгіганта високої світимості V838 Однорога після її розширення у порівнянні з Сонячною системою (додатково див. рис.1.28). Праворуч: яскравість надкової зорі на периферії галактики NGC 4256 відповідає яскравості всієї галактики

Температура поверхні червоних гігантів значно нижча, у порівнянні з нормальними зорями типу Сонця, але вони, завдяки величезній площі своєї поверхні, випромінюють невимірно більше енергії. При розширенні зовнішніх шарів ядро червоного гіганта, позбавлене джерела енергії, стискається під дією гравітації, а його температура зростає до 100 млн. градусів - починається *синтез ядер гелію* і їх перетворення у більш важкі елементи – в основному у *вуглець* та *кисень*. Завдяки новому джерелу енергії, яка виділяється при цьому, зоря подібна Сонцю світиться ще біля 2 млрд. років. Після вичерпання запасів гелію у ядрі, починається синтез гелію у зовнішніх шарах і зоря знову розширюється і вступає у другу стадію червоного гіганта. Для невеликих жовтих зірок сонячного типу це вже агонія. Ядро знову різко стискається, але його щільність не досягає тих значень, при яких можуть вступати в реакцію синтезу новоутворені вуглець і кисень.

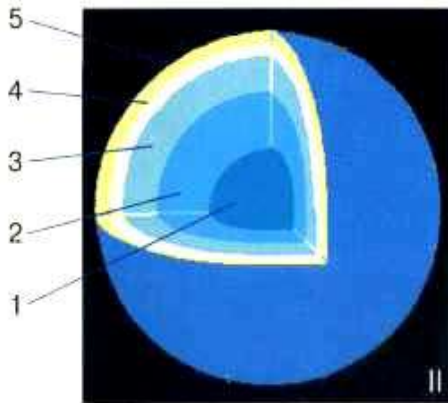


Рис.1.26. Будова ядра масивної зорі на пізній стадії еволюції перед вибухом як Наднова: 1- металеве (*Fe*) ядро; оболонки: 2- із кремнію (*Si*) та сірки (*S*), 3- із кисню (*O*), неону (*Ne*) і магнію (*Mg*), 4- із кисню (*O*) і вуглецю (*C*), 5- нижня гелієва (*He*) та зовнішня воднева (*H*).

У більш масивних зірок цей процес повторюється декілька разів, причому на кожній стадії у ході синтезу утворюються все більш важкі хімічні елементи.

Коли гелій закінчується і реакції затухають, вся зоря під впливом гравітації поступово стискається майже до розмірів Землі. Енергії, яка виділяється при цьому, досить, щоб утворена зоря – *білий карлик* – продовжувала світитись ще деякий час. Надщільна речовина білих карликів досягає густини 10^9 г/см^3 і вони оточені атмосферою переважно із водню та гелію. У процесі перетворення червоного гіганта у білий карлик зоря може поступово, протягом 10 тисяч років, скинути зовнішні шари як легку газову оболонку, відкривши при цьому своє ядро, температура якого на поверхні може досягати $+100\,000^\circ\text{C}$.

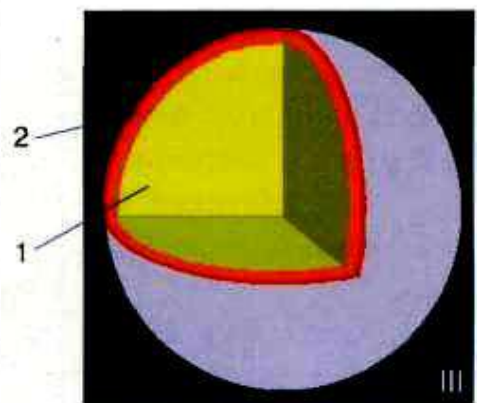
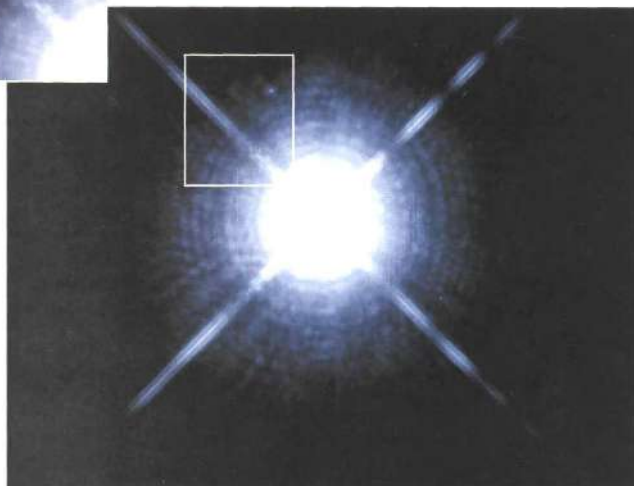


Рис.1.27. Ліворуч – біла зоря Головної послідовності *Сиріус А* із своїм супутником білим карликом *Сиріус В*; праворуч – схема будови надр білого карлика: 1- металеве ядро, 2- тонка зовнішня оболонка із водню та гелію.

Газова оболонка яскраво світиться під іонізуючим впливом потужного випромінювання покинутої зірки яскраво-зеленим (іонізований кисень) та червоним (іонізований водень) кольорами. У результаті утворюється *планетарна туманність*, яка може набувати різних

надзвичайно складних форм, іноді – з кількома концентричними сферами, що свідчить про періодичний, а не безперервний викид газу. Причому ймовірний час між двома викидами приблизно складає 500 років, що дуже багато для динамічних пульсацій (при яких зоря то стискається, то розширюється у результаті протиборства гравітації та газового тиску) і надто швидко для теплових пульсацій (при яких зоря виходить із стану рівноваги). Речовина газової оболонки зірок у процесі їх еволюції може “здуватися” у космічний простір і перетворюється у *газово-пилові туманності*, із яких можуть повторно утворюватися майбутні зорі, або через розширення вона поступово з’єднується із речовиною *газових міжзоряних туманностей*.

Білий карлик з масою Сонця за об’ємом приблизно буде рівний Землі, але вага столової ложки його речовини на Землі досягала б тисячі тонн. Електрони та атомні ядра цієї речовини стиснуті надзвичайно сильно, утворюючи неймовірну за густиною матерію. Речовину надр білого карлика уявити дуже важко. Скоріше за все, вона нагадує єдиний гігантський кристал, який поступово остиває, стаючи все більш тьмяним та червоним. Температура на поверхні білого карлика близько $+10\,000^{\circ}\text{C}$, але ці зорі такі малі, що по випромінюванню їх дуже важко знайти у космосі.

Зараз відомі сотні білих карликів; за оцінками астрономів, не менше десятої частини всіх зір галактики – білі карлики. Сиріус, найяскравіша зоря нашого неба, є потрійною зорею і один із його супутників – Сиріус В є білим карликом.

Кожен білий карлик поступово охолоджується і, практично не зменшуючись у розмірах, перетворюється у абсолютно мертві залишки зорі – чорну кулю радіоактивного попелу – так званий **чорний карлик**, що являє собою *величезну масу із вуглецю*.

Крім того, у Всесвіті існують **червоні карлики** – невеликі зорі, маса яких від 8 до 50% маси Сонця. Це означає, що температура і тиск у їх ядрі невеликі, але там може вироблятися термоядерна енергія у значно менших кількостях, так як перетворення водню в гелій проходить значно повільніше. Дарма що червоні карлики не такі яскраві, як Сонце, але їх розміри не дуже відрізняються від сонячних через невелику гравітацію, а тиск внутрішнього випромінювання та конвекція допомагають зберегти рівновагу і уникнути стискання. Невелика кількість випромінюваної енергії означає, що внутрішня будова червоного карлика простіша, ніж у зорі сонячного типу - тепло від ядра переноситься до поверхні за рахунок потужної зони конвекційних потоків, які допомагають запасати енергію магнітного поля – і ця енергія час від часу проявляється у вигляді спалахів, вибухів у верхніх шарах зоряної атмосфери, генеруючи при цьому рентгенівське та інше випромінювання. Зона переносу променистої енергії відсутня. Червоні карлики – найпоширеніший тип зорі. Світять вони менш яскраво, ніж зорі типу нашого Сонця та більш масивні, але існують вони значно довше.

Червоний карлик Проксима Центавра – найближчий зоряний сусід нашого Сонця із підвищеною активністю своєї поверхні, де спалахи та викиди речовини і енергії майже безперервні – може проіснувати у такому стані сотні мільярдів років, а нашому Сонцю відміряно „лише” біля 10 мільярдів років.

Якщо звичайні невеликі зорі скромних розмірів, включаючи Сонце - **жовті карлики**, проіснувавши близько 10 млрд. років у кінці свого існування стискаються і перетворюються у невеликі за розмірами *білі карлики* з їх виключною густиною, а потім взагалі просто погасають, то масивні зорі проносяться через свій життєвий цикл, закінчуючи його ефектним вибухом.

На стадії *червоного гіганта* надвисока температура в ядрі зумовлює *реакції синтезу ядер вуглецю*, який перетворюється у *більш важкі елементи*, включаючи залізо. Під впливом енергії, яка виділяється при цьому, зоря розширюється до розмірів у сотні разів більших за початкові. На цій стадії її називають **червоним надгігантом**.

Діаметр червоного надгіганта – зорі Бетельгейзе у туманності Оріона – майже у тисячу разів перевищує діаметр Сонця, а за розмірами ця зоря більша за орбіту Землі у Сонячній системі.

В ядрах набагато масивніших за Сонце зірок зовнішні шари створюють такий тиск і температуру, що в ядерні реакції вступають *вуглець* і *кисень* (продукти синтезу гелію). Появляються більш важкі елементи, але енергії виділяється значно менше. *Вуглець* при синтезі перетворюється у *кисень*, *неон*, *натрій* і *магній*, які у свою чергу створюють елементи від *сірки* до *кремнію* і *заліза*. Синтез важких елементів закінчується швидко - він утворює менше

енергії і дає менше атомів нового елементу. Надра зорі набувають сферично-шаруватої структури, в якій більш важкі хімічні елементи розміщені все ближче до центра зорі (для їх утворення необхідні все більш високі температури) (рис.1.32), а її ядро стає все меншим і щільнішим. Потім настає катастрофа: **залізо – перший елемент, для реакції синтезу якого вже необхідно більше ядерної енергії, ніж утворюється**. На цьому подальший синтез припиняється - починає формуватися залізне ядро зорі.



Рис.1.28. Зоря Бетельгейзе (α Оріона) – червоний надгігант самої верхньої частини діаграми Герцшпрунга-Рассела.

Реакції утворення термоядерної енергії в ядрі червоного надгіганта закінчуються раптово, а внутрішній тиск у зростаючому залізному ядрі досягає такої величини, що ядра заліза починають «кришитися» - знову розпадатися на ядра гелію. Залізне ядро втрачає міцність і під дією гравітації «обрушується»

до центра зорі. Зовнішні шари зорі починають стискатися і падають на її центральну частину. Настає катастрофічне стискання зорі – **колапс**. Менше ніж за секунду у центрі зорі утворюється ядро з масою близько маси Сонця (2×10^{30} кг) та із радіусом Землі (біля 10 000 км), що приводить до появи **білого карлика**. Якщо ж маса початкової зорі дуже велика (наприклад, 10 мас Сонця), то радіус внутрішнього ядра зменшиться до 10 км. При цьому гравітаційні сили такі великі, що вони руйнують атомну структуру речовини – зривають електронні оболонки з атомів, а самі ядра починають розвалюватися на нуклони (протони і нейтрони), а потім протони і електрони також об'єднуються у нейтрони із виділенням частинки нейтрино – утворюється **нейтронна зоря**. Ці процеси виділяють величезну кількість гравітаційної енергії. Частина зовнішніх шарів зорі, які ще не встигли долетіти до центрального ядра, викидається у простір катастрофічною вибуховою хвилею у вигляді розжареної оболонки, яка розширюється і спостерігачем сприймається як дуже потужний вибух **наднової зорі** (рис.1.25, 1.29). Спалах найвіддаленішої наднової зорі зафіксований на віддалі 13 млрд. світлових років.

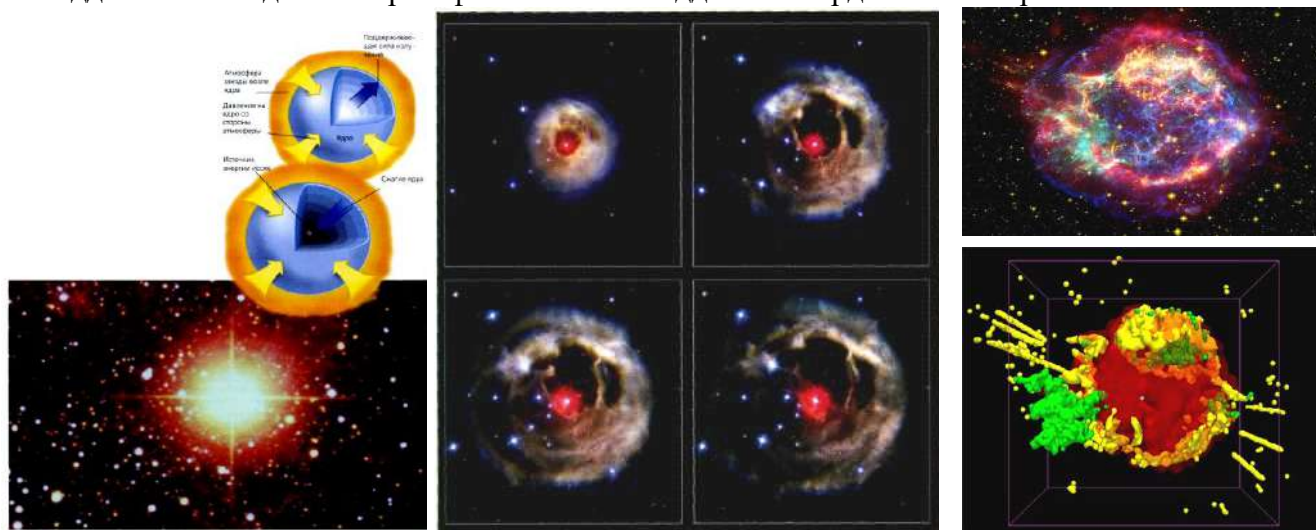


Рис.1.29. *Ліворуч*: агонія масивної зорі, ядро якої має сферичну будову з легкими елементами у зовнішніх сферах та важкими – у внутрішніх. Атмосфера зорі, яку підтримував тиск випромінювання, після синтезу заліза втрачає внутрішню опору, стискається і зумовлює вибух наднової (вгорі). Спалах наднової зорі SN 1987A у Великій Магеллановій Хмарі тривав кілька місяців, зоря стала яскравішою у мільйони разів (унизу). *У центрі*: спалах (06.01.2002) незвичної (пекулярної) Нової зорі V 838 у сузір'ї Овна та її перетворення - із надшвидким розширенням до гігантських розмірів без катастрофічного вибуху та скидання своїх зовнішніх оболонок - із звичайної жовтої зорі у найяскравішу зорю Галактики - „холодний” надгігант високої світимості з утворенням та розвитком планетарної туманності протягом 2002 року (послідовні фото підсвічених спалахом пилових оболонок 20.05.2002р.; 02.09.2002р.; 8.10.2002р. та 17.12.2002р., діаметр найбільшої оболонки 6 світлових років). *Праворуч*: угорі - рештки наднової Кассіопея А та (внизу) її 3D модель (фото та ілюстрація NASA)

Зовнішні шари газової оболонки зорі викидаються у космічний простір зі швидкістю 5% від швидкості світла. Процес супроводжується спалахом, який триває декілька місяців. У момент вибуху наднової у ядра заліза вбиваються додаткові протони і нейтрони. Так утворюються ядра елементів більш важких за залізо: вольфраму, золота, урану тощо.

23 лютого 1987 року в сусідній галактиці – Великій Магеллановій хмарі – надновою зорею вибухнув блакитний надгігант, віком біля 20 млн. років і масою близько 17 сонячних мас. За одну миттєвість звільнилось більше енергії, ніж її випромінює наше Сонце за 10 млрд. років. Потік світла, який посиляє ця одна гинуча зоря еквівалентний цілій галактиці – протягом короткого часу ця наднова зірка світилася яскравіше цілого трильйону Сонць, а видиме світло складало тільки малу долю виділеної енергії. Наднова зберігає свою максимальну яскравість протягом місяця, а потім безперервно погасає. У цей час джерелом світлової енергії є радіоактивний розпад речовини, яка утворилася під час вибуху.

Тривалий час після вибуху можна спостерігати речовину скинутої зовнішньої оболонки зорі, яка із швидкостями близько 20 000 км/сек. поступово розлітається у навколишньому просторі у вигляді туманності. У сузір'ї Тільця існує Крабовидна туманність, яка утворилася у результаті вибуху наднової зорі в 1054 році (рис.1.30).

На місці вибуху наднової зорі залишається її ядро – **нейтронна зоря** – це своєрідне атомне ядро діаметром до 20 км та масою до 1,5 сонячних мас із своєю найхімернішою будовою із усіх об'єктів Всесвіту – *тверда оболонка товщиною до 2 км, під якою кипить гаряча речовина із нейтронів та інших частинок, яка оточена атмосферою з гарячої плазми товщиною у кілька сантиметрів*. Вчені визначили, що діаметр нейтронної зорі з масою біля 1,4 мас Сонця не може перевищувати 14,5-16,5 км. Нейтронні зорі, крім нечувано великої ваги (1 см³ важить біля 1 млрд. тонн), густини (у центрі зорі вона 10¹⁴-10¹⁵ г/см³ – фактично там атомні ядра без електронних оболонок), температури (сотні мільйонів градусів у ядрі та мільйон градусів на поверхні) характеризуються дуже швидким обертанням навколо власної осі (від чотирьох секунд на 1 оберт до 642 обертів за 1 секунду) і дуже потужним магнітним полем (у мільйони разів сильніше земного). У результаті цього нейтронна зоря створює сильне електромагнітне поле, яке випромінює потужні радіохвилі. Враховуючи те, що ці радіохвилі випромінюються вузьким пучком (як промінь прожектора) із магнітних полюсів зорі, а вони не співпадають із її осями обертання, то при обертанні нейтронної зорі пучок направлених радіохвиль описує у просторі дещо подібне до конуса (рис.1.30). Коли ці хвилі проносяться над земними радіотелескопами, їх сприймають як спалахи або імпульси (англ. *Pulse*) – тому такі **нейтронні зорі, які є джерелами потужного імпульсного випромінювання, називають пульсарами** і вони є кінцевим етапом активного життя зорі з масою не більше двох сонячних.

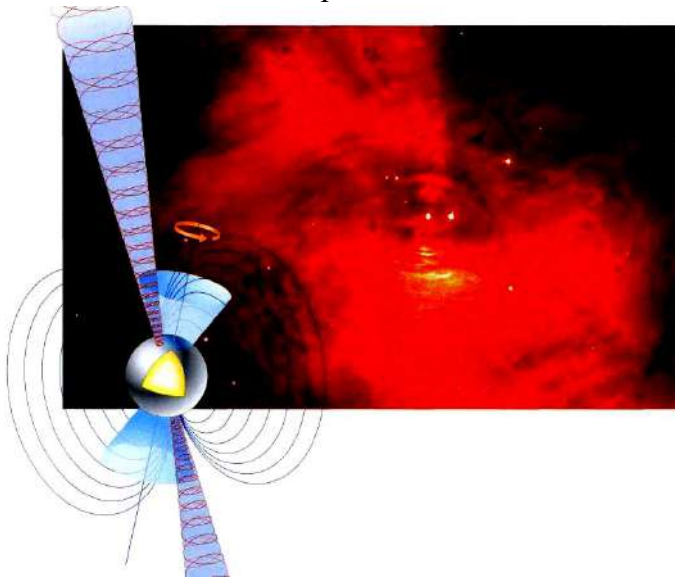


Рис.1.30. Рештки наднової зорі у глибині Крабовидної туманності (сузір'я Тільця) після вибуху в 1054 році, у центрі туманності - пульсар, який 30 разів на секунду випромінює імпульси радіохвиль, світла і рентгенівського випромінювання (фото *Hubble*).

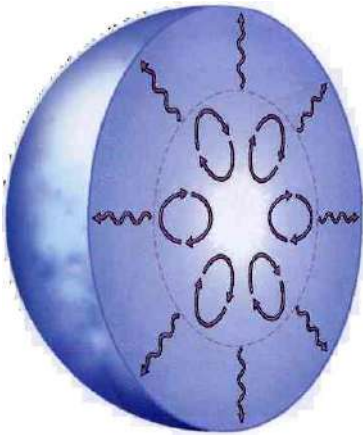
Ліворуч: схема пульсару

Зараз відомо, що багато з них випромінюють рентгенівські та світлові імпульси. Астрономи, які вивчали зорі

RX J1856.5–3754 і *3C58* визначили, що ядра цих тіл мають надзвичайну густину, що перевищує навіть характеристики нейтронних зірок – самих щільних зараз космічних тіл. Єдиним поясненням цього факту є наявність у їх складі *кварків* – субелементарних частинок, які

утворюють усі відомі зараз елементарні частинки (протон, нейтрон, електрон, позитрон тощо), що складають атоми, із яких утворена вся матерія Сонячної системи.

Пульсар, який розташований у центрі Крабовидної туманності (рис.1.30), може стати першим відомим астрономам небесним тілом, яке має більше двох магнітних полюсів – крім тих двох, що дають звичні дуже короткі та потужні радіосигнали пульсу, існують довгі і слабкі додаткові сигнали так званого *інтерпульсу*. Інтерпульси змінюють загальну картину магнітного поля пульсару, мають незвичний характер радіовипромінювання і пояснюються наявністю *додаткової пари магнітних полюсів*.

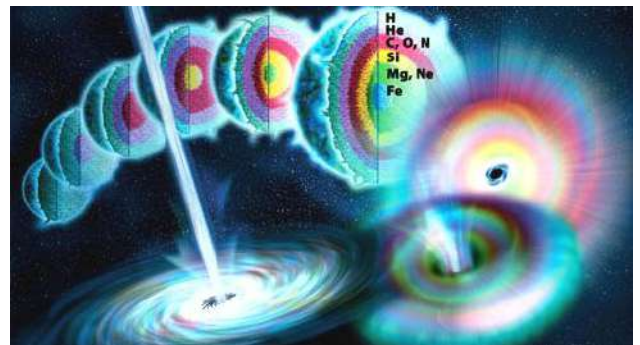


Якщо маса зірок перевищує масу Сонця від двох до декількох десятків разів, то такі зорі – **блакитні гіганти** – проживають значно більш коротке життя – біля 100 млн. років.

Рис.1.31. Схема переносу енергії у надрах *блакитних гігантів* - у масивних зірок ядра дуже розігріті, а температура поверхні всього на кілька тисяч градусів перевищує сонячну. Через великий температурний градієнт в областях навколо ядра перенос енергії відбувається за рахунок конвекції, а у зовнішніх сферах має місце променистий перенос, тобто спостерігається зворотна схема переносу, ніж у зірок сонячного типу

У цих зірок досить енергії, щоб перетворити гелій у більш важкі елементи, наприклад, у *вуглець*. Вони теж спалахують як наднові, але завдяки величезній масі їх колапс носить катастрофічний характер. Руйнівне стискання не припиняється навіть на стадії утворення *нейтронної зорі* – нейтрони розпадаються на кварки, а сила тяжіння зростає настільки, що розміри зорі стають менші так званого гравітаційного радіуса – *сфери Шварцшильда* - і вона перестає випромінювати у простір будь яку енергію і стає ізольованою від усього Всесвіту.

Рис.1.32. Утворення сферично-шаруватої будови надр зорі та чорної дірки на місці спалаху *наднової зорі*



Усередині продовжується колапс, доки зоря не стане мікроскопічно малою з практично безмежною густиною речовини. Цей стан гравітаційного колапсу приводить до того, що звичайна речовина в цій області припиняє своє існування. Час і простір навколо цієї області різко змінюють свої властивості - час зупиняється, а простір викривляється і вони міняються місцями. Залишається тільки гравітація і настільки потужна, що ніщо, навіть світло, не може вирватися із сфери її впливу.

Така область для зовнішнього спостерігача практично зникає і тому вона отримала назву

чорна дірка – це область простору-часу, в межах якої потужне гравітаційне поле не дозволяє навіть світлу покинути цю область.

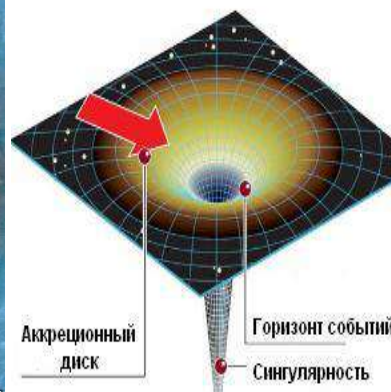
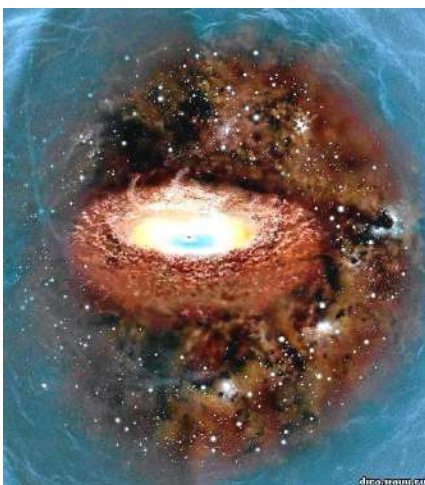


Рис.1.33. Ліворуч: найбільша із відомих чорних дірок у космосі на віддалі 3,5 млрд. світлових років (фото JAXA).

Праворуч: чорна дірка – гравітаційне поле, яке сконцентрувалося у дуже викривленій області простору-часу

Розміри чорних дірок коливаються від найменших (з протон) до сотень мільйонів кілометрів, а сила гравітації чорної дірки розміром з елементарну частинку (маса близько мільярда тонн) на віддалі декількох метрів дорівнює силі тяжіння Землі, а на віддалі декількох міліметрів - перевищить її у мільйони разів. Границя чорної дірки не являє собою тверду поверхню, вона скоріше схожа на тінь, на *межі подій* якої закінчується область простору, із якої сили гравітації не випускають нічого, навіть світло. Вчені вважають, що в самому центрі чорної дірки знаходиться специфічна область нульового об'єму і нескінченних густини, тиску і температури, яку називають **сингулярністю**; все, що попадає туди, піддається абсолютно повному руйнуванню та знищенню. Чорні дірки мають три фізичних параметри (*масу, кутовий момент обертання і заряд*) та існують у двох модифікаціях: *зоряній та галактичній*. Якщо зоряна чорна дірка утворюється у результаті колапсу масивніших за Сонце зірок, то причини існування чорних дірок у центрах галактик поки що не зрозумілі, але там концентрується речовина з масою у декілька мільярдів разів більшою за сонячну масу і яка за об'ємом може вміститися в межах Сонячної системи.

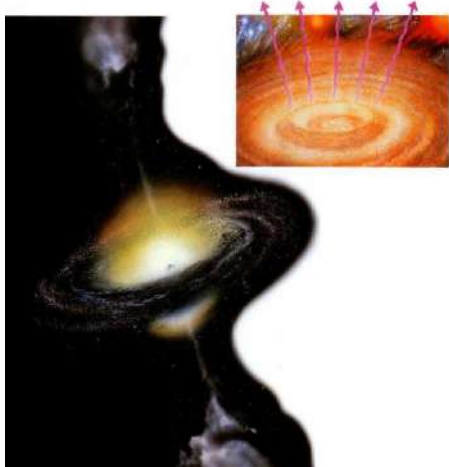


Рис.1.34. Типова активна галактика з чорною діркою в центрі. Зображення розігрітого акреційного диску, що генерує радіохвилі та рентгенівське випромінювання, з протилежно направленими *джетами* (ліворуч). При затигуванні речовини акреційного диску у чорну дірку звільнюється величезна кількість енергії (праворуч).

Вчені приходять до висновку, що гігантські чорні дірки не були такими великими при своєму народженні, але вони істотним чином впливали на розвиток галактик і росли у процесі поглинання газу та зірок материнської галактики на ранній стадії розвитку Всесвіту. **Галактики та розташовані в їх центрах чорні дірки розвивалися паралельно**, причому спостерігається чітка пропорція між їх масами - **маса чорних дірок складає 0,5% маси їх галактик**. У невеликих галактиках чорні дірки в їх центрах мають незначне поповнення речовини і тому їх маси не перевищують мільйонів сонячних. Великі чорні дірки гігантських галактик так інтенсивно поглинають матерію, що величина їх мас досягає мільярдів сонячних, а процес їх інтенсивного росту в минулому супроводжувався таким потужним виділенням енергії, що вони тоді світилися як квазари. Завдяки потужній гравітації така чорна дірка поглинає все навколо себе - вона притягує до себе газу туманностей чи найближчих зірок, які у своєму стрімкому спіралеподібному русі наближаються до *межі подій*, дуже розігріваються і починають світитися – утворюється сяючий газовий диск. Частина газу акреційного диску здувається потужним потоком радіації, який народжується в області межі подій масивної чорної дірки. Цей газ рухається зі швидкостями близько 10% швидкості світла і формує **джети** – *викиди протилежно направлених конусоподібних потоків*. Решта газів із неймовірною швидкістю падає в чорну дірку і перед своїм зникненням, при переході речовини через горизонт подій, розігріті газу розпадаються на атоми і більш мілкі частинки, виділяють енергію у вигляді рентгенівського випромінювання і частинок великої енергії, впливаючи на формування зірок і галактик. Надзвичайно потужна радіація, яка генерується гарячим газом у внутрішніх областях акреційного диску, і спостерігається астрономами як **квазар**. Чорні дірки перестають захоплювати навколишню речовину і стають пасивними тоді, коли їх розміри зростають настільки, що обсяг енергії, яка викидається у вигляді квазару, відкидає із зони досягнення надмасивної чорної дірки решту речовини галактики - **надмасивні чорні дірки перестають поглинати навколишню матерію і стають невидимими**.

Дані космічних телескопів *Hubble* і *Spitzer* свідчать, що у центрі галактики Туманність Андромеди існує скупчення досить старих червоних зірок у формі тора (бублика), а в середині цього тора, поблизу від чорної дірки (у вигляді диску радіусом менше світлового року), сконцентрована велика кількість молодих голубих зірок віком не більше 200 млн. років. Згідно розрахунків, речовина, з якої вони утворилися, повинна була втягнутися чорною діркою ще на

ранніх стадіях формування галактики – її вік, як і Молочного Шляху, оцінюється в 10-11 млрд. років. У сузір'ї Кентавра відкрили світіння газу, яке випромінювалося із прилягаючої до чорної дірки області космосу і мало потужність у десять мільярдів Сонць.

Потужність галактичних чорних дірок визначається за наявністю тільки побічних ознак: гігантського виру матерії, яка втягується із все зростаючою швидкістю під впливом всепоглинаючої гравітації (діаметр газового виру у галактиці *M87* п'ятсот світлових років); потужного рентгенівського випромінювання; різкого зростання зоряних швидкостей по мірі наближення до центрів галактик.

У результаті проведених досліджень у 14 із 15 найближчих галактик вдалося виявити розташовані в їх центрах чорні дірки, маси яких, можливо, пропорційні масам самих галактик. Так, у сузір'ї Лева дві чорні дірки еквівалентні відповідно 50 млн. та 100 млн. сонячних мас, а у сузір'ї Діви – 3 млрд. сонячних мас.

У центрі галактики *NGC 6240*, яка розташована на віддалі 400 млн. світлових років від Землі, космічним рентгенівським телескопом *Chandra* відкрито дві чорні дірки, які обертаються одна навколо іншої на віддалі у три тисячі світлових років. Така конфігурація виникла у результаті злиття двох окремих галактик і вона може бути показником майбутнього для решти Всесвіту. Ці чорні дірки рухаються назустріч одна одній і їх зіткнення обов'язкове. Викид радіації та гравітаційні коливання, які виникнуть у результаті такого колапсу, будуть мати катастрофічні наслідки для всього Всесвіту, не виключаючи Сонячну систему.

На фотографіях орбітального рентгенівського телескопу *Chandra* чітко видно, що у центрі нашої Галактики, закритому газом-пилом туманностями для візуального спостереження, знаходиться величезна чорна дірка масою в 4,31 млн. сонячних мас, навколо якої згруповані сотні нейтронних та карликових зірок. Через центр Галактики проходить неймовірний за своїми розмірами газовий шлейф, температура у якому досягає від 10 до 100 млн. градусів Цельсія. Ці гази під високим тиском направляються до периферії Галактики, щоб охолодженими знову повернутися назад.

Астрономи Кембриджського університету встановили, що чорні дірки є постійними джерелами звуку – звук „до” мінус п'ятдесятої октави – самого низького звуку у Всесвіті, який виникає через пульсацію космічного газу. Науково доказано, що чорні дірки також не вічні, але час існування чорної дірки з масою у декілька сонячних перевищує вік Всесвіту у 10^{67} .

1.4. КОРИЧНЕВІ КАРЛИКИ

КОРИЧНЕВІ КАРЛИКИ – компактні астрономічні об'єкти з масами 0,01-0,08 маси Сонця, які не можна назвати ні зорями, ні планетами. Назвати їх зорями неможливо через відсутність у їх надрах термоядерних реакцій, що спричинено їх малими розмірами, але їх досить для ініціації реакції синтезу дейтерію (H^3), що потребує менших температур та тиску.

Джерелом енергії після затухання реакцій з участю дейтерію є повільне гравітаційне стискання цих невеликих космічних тіл, а їх температури такі малі (температура надр не перевищує $+2000^{\circ}C$), що вони скоріше нагадують планети і випромінюють практично тільки тепло гравітаційного стискання в діапазоні темно-червоного та інфрачервоного світла – ту частину спектра, яка затримується земною атмосферою і спостерігається тільки за допомогою космічних телескопів. Розташовані коричневі карлики, в основному, не біля зірок, що характерно для планет, а у міжзоряних просторах космосу.

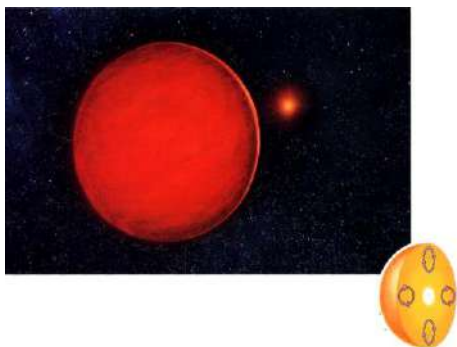


Рис.1.35. Порівняльні розміри першого відкритого у сузір'ї Зайця коричневого карлика *Глиз 229В* та темної зорі (ліворуч) і схема передачі енергії карликом із надр до поверхні за рахунок конвекції газів при відсутності зони переносу променевої енергії (праворуч унизу)

Максимальні розміри цього класу небесних тіл – **коричневих карликів** – обмежені: їх маса не може

перевищувати 7% сонячної маси (75 мас Юпітера) – інакше спалахне зоря; і не може бути меншою 13 мас Юпітера – все, що нижче цієї межі, - *планети*. **Об'єкти, маса яких знаходиться у проміжку між однією сотою та однією дванадцятою маси Сонця і називаються коричневими карликами**; вони короткий час випромінюють деяку кількість теплової енергії, але справжніми зорями стати не можуть.

Таким чином, **коричневі карлики є протозорями, яким не вдалося набрати достатню масу для початку та підтримання в їх надрах термоядерних реакцій і вони займають проміжне місце між зорями та планетами.**

Коричневі карлики можуть формуватися як і зорі – у середині газОВО-пилових дисків, на периферії яких можуть утворюватися планети. Зорі формуються із газОВО-пилової хмари, що поступово стискається. Температура і тиск в середині цього згустку поступово зростають. Коли температура досягне декількох тисяч градусів, молекули хмари розпадаються на окремі атоми, а при температурі біля $+10\,000^{\circ}\text{C}$ руйнуються електронні оболонки атомів – відбувається їх іонізація. При подальшому зростанні температури, коли центральна частина зорі прогріється до 3 млн. градусів, атомні ядра водню почнуть зливатися один з одним у процесі термоядерної реакції. Стискання припиняється і спалахує нова зоря. Маса народженої зорі повинна перевищувати 7% сонячної маси – інакше в її надрах не розпочнеться термоядерна реакція.

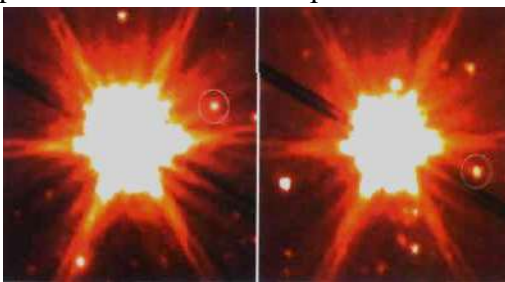


Рис.1.36. Коричневі карлики (обведені колом): ліворуч - супутник зорі HD 3651, праворуч - зорі HN Пегаса (фото Spitzer)

Якщо ж маса газОВО-пилової хмари буде складати менше 7% сонячної маси, то утворене небесне тіло, за розрахунками, повинно мати цікаві особливості - у надрах „недозрілої” зорі буде відбуватися перетворення дейтерію (H^2) в ізоотоп гелію (He^3), так як ця реакція проходить при більш низькій температурі, ніж воднева термоядерна реакція. Запаси дейтерію обмежені і вичерпаються через декілька мільйонів років, а небесне тіло почне охолоджуватися. Температура поверхні коричневих карликів не перевищує $+1200^{\circ}\text{C}$, тому їх випромінювання найкраще видно в інфрачервоному діапазоні. В оптичному діапазоні вони зоріють у сотні тисяч, а то і у мільйони разів слабкіше Сонця.

Спектральний аналіз свідчить, що в атмосфері коричневих карликів (як в Юпітера та Сатурна) існують *метан, водяні пари і, мабуть, хмари пилу* (спостерігаються незначні коливання їх яскравості); там, можливо, проходять конвекційні процеси і регулярно змінюється погода. Комп'ютерні моделі вказують на можливість утворення в атмосфері хмар та клубків туману з рідкого заліза, а спектральний аналіз показав, що ці небесні тіла вміщують *гідрид заліза*, який може конденсуватися у рідке залізо. У коричневого карлика **S Ori 45** спостерігаються коливання яскравості – це пояснюється тим, що 1/5 частина поверхні застигається *хмарною пеленою* або вона має *плями* (типу сонячних) на своїй поверхні. Деякі коричневі карлики випромінюють рентгенівські промені, тоді, враховуючи їх невисокі температури, вони повинні мати дуже потужні магнітні поля. У такому випадку на їх поверхні, як і на Сонці, повинні з'являтися плями. Спостереження за туманністю Оріона, де знаходяться коричневі карлики віком не старші 1 млн. років, показали, що більше 60% всіх їх оточені *гігантськими дисками із газу та пилу*. Кожний диск має інтенсивне інфрачервоне випромінювання, як і самі коричневі карлики, навколо яких ці диски обертаються. Подібні диски спостерігаються навколо всіх молодих зір і вони є реліктами первинної газОВОї хмари, а її колапс і породжує нову зорю.



Рис.1.37. Коричневий (інфрачервоний) карлик **2M 1207** (праворуч) та його екзопланета. Маса зорі у 42 рази менша за масу Сонця; екзопланета у 1500 разів більша за Землю та у 5 разів масивніша за Юпітер і віддалена на 230 світлових років (55а.о.) від Землі (фото обсерваторії Паранал, Чилі)

Спостереження за коричневим карликом *CFHT BD Tau-4* у сузір'ї Тільця показали, що матеріалу пилового диску навколо нього вистачить на таку планету як Юпітер. За допомогою космічного телескопа *Hubble* у коричневого карлика був відкритий супутник з масою планети, причому вага коричневого карлика не набагато більша за вагу супутника.

Поблизу зорі *Epsilon Indi* (сузір'я Індійця, Південна півкуля) – на віддалі 11,8 світлових років від Землі – був відкритий коричневий карлик, який у 1460 разів більш віддалений від зорі, ніж Земля від Сонця. Вік зорі і коричневого карлика визначений у межах 0,8–2,0 млрд. років. Незабаром біля коричневого карлика був відкритий новий коричневий карлик на віддалі, що в 2,65 разів перевищує радіус земної орбіти. Параметри цих коричневих карликів (*Epsilon Indi Ba* та *Epsilon Indi Bb*) наступні: вони обертаються навколо барицентру - спільного для них центру тяжіння, який у свою чергу обертається навколо зорі *Epsilon Indi*; світимість карликів майже в мільйон разів менше сонячної; їх розрахункові радіуси 0,091 і 0,096 радіусів Сонця, а маси приблизно в 47 та 28 разів перевищують масу Юпітера; період обертання – 16 років.

В існуючу класифікацію планет ці недавно відкриті нові об'єкти не вкладаються, астрономи запропонували умовну назву “**невеликі ширяючі об'єкти**”. Вперше їх сукупність відкрили в 1987р. у центральній частині туманності Оріона. Така велика кількість невеликих об'єктів у малому об'ємі простору свідчила, що у Галактиці їх дуже багато і незабаром їх відкрили у сузір'ях Тільця та Одрого. Зараз відомо понад 300 коричневих карликів. **Найближчий до Сонця коричневий карлик UGPSJ0722-05 віддалений всього на $9,46 \pm 1,30$ світлового року.**

1.5. МІЖЗОР'ЯНА РЕЧОВИНА

Міжзор'яний простір не пустий - він заповнений *атомарним і молекулярним газом*, який перемішаний з **пилем** (1% маси міжзор'яної речовини) і пронизується **космічними променями** (швидкими потоками елементарних частинок) та **електромагнітним випромінюванням**; крім того міжзор'яне середовище дещо **намагнічене**, а частинки космічних променів рухаються спіральними траєкторіями вздовж його силових ліній.

У межах нашої Галактики міжзор'яний простір також заповнений *гігантськими хмарами і туманностями* газу та пилу, що можуть красиво та яскраво світитися, а багато із них є місцями народження нових зірок. Відомі два типи яскравих *туманностей*: **відбивальні** - просто відбивають світло найближчих зірок і **емісійні** - світяться самотійно при опроміненні їх світлом молодих та гарячих зірок. Більша частина міжзор'яної речовини зосереджена в спіральних рукавах Чумацького Шляху. Самі масивні об'єкти Чумацького Шляху – **гігантські міжзор'яні газові хмари** із своїми *магнітними полями*, маси яких перевищують масу Сонця у мільйони разів. У цих хмарах відкрито півтори сотні хімічних з'єднань, зокрема і органічних.

Найпоширенішою речовиною у міжзор'яному просторі, і взагалі у Всесвіті, є **водень**. Атом водню має один електрон. Іноді він зривається із своєї орбіти і тоді у космічний простір посиляється радіосигнал. Кожний такий окремий сигнал дуже слабкий, але у Всесвіті стільки водню, що загальний сумарний ефект створює потужне радіовипромінювання з довжиною хвилі 21см. Водневі туманності обертаються у Галактиці так само, як планети обертаються навколо Сонця. Швидкість їх руху залежить від віддалі до центра Галактики. У глибинах космосу *хмари нейтрального атомарного водню* холодні (біля -200°C), але вже відкриті ще більш холодні, щільні та непрозорі для видимого світла *хмари молекулярного водню*. Навколо гарячих зір атоми водню переходять у збуджений стан. Довго у такому стані вони не можуть знаходитись і позбавляються надлишків енергії за рахунок випромінювання квантів світла червоної ділянки спектру. Температура міжзор'яної речовини коливається від декількох градусів вище абсолютного нуля найхолодніших хмар у глибинах космосу до мільйона градусів у найбільш розігрітих ударними хвилями вибухів наднових зірок *хмарах* дуже малої щільності **коронального газу**. Космічний телескоп *Hubble* сфотографував туманність Бумеранг, ймовірно – найхолодніше місце в дослідженому Всесвіті. Туманність являє собою хмару газу, який викидається із вмираючої зорі у її центрі. Якщо фонові температура космічного вакууму складає -270°C , то температура газу в туманності Бумеранг приблизно дорівнює -272°C .

Якщо туманність холодна, то вона може поглинати світло яскравих зір та галактик, які розташовані за нею (наприклад, *темна туманність Кінська Голова* в сузір'ї Оріона) (рис.1.38). У глибинах чорних холодних туманностей астрономи відкрили *молекули води, аміаку, спирту, мурашиної і синильної кислот та інших органічних з'єднань*. Ці молекули утворилися із атомів вуглецю, водню, кисню, азоту тощо і не руйнуються завдяки дуже низькій температурі навколишнього середовища холодних туманностей. Іноді холодна туманність стає видимою у



космічному просторі через те, що пил, із якого вона складається, відбиває світло найближчих зірок. Такі туманності на фотографіях мають блакитний колір (наприклад, туманність навколо найяскравіших зір сузір'я Плеяд).

Рис.1.38. Холодна туманність *Кінська Голова* у сузір'ї *Оріона* на фоні міжзоряного водню, що під ультрафіолетовим опромінюванням молодими зорями світиться червонуватим світлом (фото *Hubble*)

Густина речовини міжзоряного середовища дуже розріджена – біля одного атому водню в 1см^3 або декількох сотень частинок пилу розміром одна стотисячна доля сантиметра в 1км^3 простору, але у щільних туманностях концентрація речовини може бути у 1000 разів вище середньої. Можливість спостереження цієї розрідженої міжзоряної речовини із Землі пояснюється тим, що ми бачимо її з великої віддалі і у великому об'ємі простору. У звичайній спіральній галактиці міжзоряна речовина складає від 5 до 10% всієї видимої матерії.

Міжзоряний навколосонячний „вакуум” заповнений туманностями газу та пилу, які мають різноманітні форми („хмар”, „ниток”, „вузлів”, „петель” тощо), розміри (від десятих доль до сотень світлових років), температури, густини тощо. Зараз наше Сонце рухається через так звану „*місцеву міжзоряну хмару*”, що являє собою газово-пилові рештки зірок, які спалахнули як наднові мільйони і мільярди років тому. Хмара складається із *водню* (90%), *гелію* (9,99%) та *більш важких елементів* (біля 0,01%). Маса пилу складає тільки 1% від маси всієї міжзоряної хмари. Хмара досить таки прозора – її середня густина дорівнює $0,264\text{ атома/см}^3$. Сонце розташоване всередині цієї хмари у районі, який називається *Місцевим „пухирем”* та простягається в усі боки приблизно на 300 світлових років і має надзвичайно низьку густину міжзоряного газу – 1 атом/дм^3 , а біля Сонця - 1 атом/см^3 та пилу - на кожні 100млрд. атомів газу приходить всього 1 пилінка, тобто, *віддаль між пилинками вимірюється десятками метрів*.

Вчені допускають, що після вибуху великих зір у далекому минулому міжзоряна речовина із околиць Сонячної системи була винесена вибуховою хвилею у віддалені області космічного простору. Потужне магнітне поле Сонця утримує більшість частинок хмари на віддалі, але деяким з них вдається прорватися через магнітний щит до Землі, завдяки чому і був відкритий *зоряний вітер*. Дослідження супутників *ACE*, *SOHO* і *Ulysses* дозволили визначити структуру і властивості цієї місцевої міжзоряної хмари. Як виявилось, вона дуже гаряча – температура газу в хмарі досягає $+6000^\circ\text{C}$, тобто, як і на поверхні Сонця. У межі Сонячної системи проникають зі швидкістю 26 км/сек. тільки частинки міжзоряної речовини залишковою густиною $0,015\text{ атома/см}^3$ - вся решта речовини відхиляється сонячним магнітним полем ще за орбітою Плутона. Місцевий міжзоряний вітер, який проходить через нашу планетну систему, взаємодіє із сонячним вітром.

Сонце безперервно рухається у Всесвіті своєю коловою орбітою, а його видимий шлях у давнину був розділений на дванадцять рівних частин - відповідно до кількості сузір'їв, через які проходить видима траєкторія руху Сонця. Ці сузір'я називали *зодіакальними* (*зодіак* – з грецької *коло тварин*). Але після перегляду в 1922р. границь сузір'їв виявилось, що траєкторія Сонця проходить через *сузір'я Змієноця*, яке не було включене до числа зодіакальних. Як виявилось, з боку Змієноця постійно „дме” насичений гелієм міжзоряний вітер і коли Сонце розташовується між ним та Землею, сонячна гравітація фокусує вітер у бік Землі. Таким чином, Земля щорічно на початку грудня проходить скрізь конус ущільненої речовини міжзоряного гелієвого потоку, густина якого у 10^{21} разів менша густини земної атмосфери.

Крім газових туманностей у космічному просторі навіть неозброєним оком можна побачити і **хмари міжзоряного пилу**. Пилінки цих хмар (розмірами від 1 мільйонної до 1 десятитисячної долі сантиметра) складені двома видами частинок: *графітовими* (з'єднання C) і *силікатними* (з'єднання Si), які конденсуються із газоподібного стану в зовнішніх оболонках старіючих зірок при їх охолодженні. Міжзоряний пил також поповнюється за рахунок виносу у космос зовнішніх розріджених шарів гігантських зірок – червоних гігантів, а вибухи наднових зірок збагачують простір космосу *атомами* O_2 , C , Fe тощо.



Рис.1.39. Колоноподібна газопопилова хмара (один із „Стовпів творіння”) висотою в 1 світловий рік у *туманності Орла* (M16) на віддалі 7000 світлових років від Сонця. Під дією інтенсивного зоряного вітру молодих масивних зірок оточуючий простір звільнюється від газу та пилу. Більш щільні згустки газопопилової хмари здуваються повільніше і тому відбувається формування подібних структур, а на їх вершинах відкриваються більш щільні газові глобули (розмірами з діаметр Сонячної системи) із зоряними ембріонами (фото *Hubble*)

Кремній та залізо утворюють крихтіні дендритні структури, які облипаються більш легкоплавкими речовинами - замерзлими *газами, водяною кригою* і різними *органічними речовинами* (молекулами *формальдегіду, аміаку* тощо), а завдяки дендритній розгалуженій структурі на них також абсорбуються атоми *кисню, вуглецю, азоту* тощо. На поверхні атоми C та O_2 можуть з'єднуватися між собою в дуже стійкі *молекули оксиду вуглецю* (CO). Суміш цих усіх з'єднань часто позначають одним словом – «крига». Молекули криги нестійкі – вплив зовнішнього випромінювання та взаємні зіткнення пилинок між собою приводять до перетворення криги у більш стійкі органічні з'єднання, які огортають пилинки своєрідною плівкою. У надрах щільних туманностей та хмар, куди не проникає випромінювання зірок, крига на поверхні пилинок вже не руйнується і вони можуть мати тришарову структуру: *тугоплавке ядро, оболонка із органічних з'єднань та крижана мантія*.

Частинки космічного пилу розсіюють синє світло краще ніж червоне, а тому вечірнє Сонце виглядає червоним. У космосі пилові туманності роблять світло зір більш тьмяним і більш червоним, або взагалі, через велику густину пилу, не пропускають світло. Поблизу центра нашої Галактики, у сузір'ї Стрільця, пилу так багато, що світло взагалі не проходить і центр Чумацького Шляху абсолютно невидимий. Під дією зоряного світла часточки космічного пилу нагріваються, особливо поблизу молодих гарячих зірок і починають випромінювати тепло. Крім того, міжзоряний пил приймає активну участь в утворенні нових зірок шляхом сприяння більш



швидкому охолодженню газу та поглинанню енергії з перерозподілом її в інших діапазонах спектру тощо. У туманності Оріона нові зорі утворюються прямо зараз.

Рис.1.40. Одинадцять концентричних сфер планетарної туманності *NGC 6543 „Котяче Око”* – фронти розширення прозорих газопопилових оболонок зорі, які скидалися вибуховими імпульсами зорі з інтервалом у 1500 років (фото *Hubble*)

Коли під дією сил гравітації частина газових або пилових туманностей починає стискатися (колапс), то вона виділяє частину своєї енергії у вигляді інфрачервоного (теплого) випромінювання і тоді за допомогою радіотелескопів та інфрачервоних телескопів можливо заглянути у центральні області цих туманностей та до центру нашої Галактики.

Із подібних хмар та туманностей міжгалактичного простору народжуються зорі і туди ж вони повертають свою речовину, коли старіють та помирають. Основна маса хмар і туманностей не освітлена і губиться у мороці космосу.

2. БУДОВА СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Сонячна система. Резолюція 26-ї Генеральної асамблеї Міжнародного астрономічного союзу (МАС, Прага, 2006) корінним чином змінила уявлення про будову Сонячної системи. За рішенням МАС виділяють: **класичні планети**, **карликові планети** (Церера, Плутон, Ерида, Макемаке, Хаумеа), **малі планети (астероїди)** та **малі тіла Сонячної системи** (більшість астероїдів, транснептунових об'єктів, комет тощо, за винятком супутників планет).

Зараз до складу Сонячної системи входять: **Сонце - чотири планети земної групи** (Меркурій, Венера, Земля, Марс) - **головний пояс астероїдів** між орбітами Марса та Юпітера - **чотири планети-гіганти** (Юпітер, Сатурн, Уран та Нептун) - відомі зараз **207 супутників усіх планет Сонячної системи - карликові планети** (Церера, Плутон, Ерида, Макемаке, Хаумеа) - **пояс Койпера**.

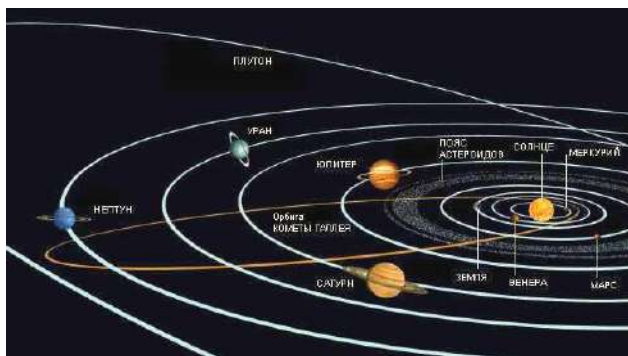


Рис.2.1. Схема будови Сонячної системи

Сонячна система знаходиться у **галактиці спірального типу з баром Чумацький (Молочний) Шлях** на краю спірального рукава Оріона на відстані близько 26 000 світлових

років від центра Галактики і 80 світлових років на північ від її площини. Сонце рухається у космічному просторі по орбіті діаметром 17 світлових хвилин зі швидкістю 16,5 км/сек. по відношенню до найближчих зірок, приблизно під кутом 25° до площини Галактики, а його політ разом із планетами направлений до точки, яка лежить на межі сузір'їв Геркулеса та Ліри.

Одночасно Сонячна система обертається навколо центра Галактики із швидкістю 270 км/сек., здійснюючи один оберт за ≈ 250 млн. років (так званий *галактичний рік*). Це обертання носить коливальний характер: кожні 33 млн. років Сонце пересікає галактичний екватор, потім піднімається над його площиною на висоту 230 світлових років і знову опускається до екватора.

Уточнений вік Сонячної системи (дані Arizona State University), за даними вмісту різних ізотопів урану в метеоритах, прийнятий за 4,5672 млрд. років. Вік Сонця – біля 25 галактичних років, тобто, воно встигло 25 разів обігнути Галактику (рис.2.2).

2.1. СОНЦЕ

СОНЦЕ – найближча до Землі зоря, яка є центральним тілом Сонячної системи і розміщена на віддалі 149,6 млн. км (одна астрономічна одиниця – 1 а.о.) від Землі. Радіус Сонця $696\,342 \pm 65$ км (109 земних радіусів), що майже удвічі перевищує віддаль від Землі до Місяця. Середня густина Сонця $1,41 \text{ г/см}^3$ (в 4 рази менше середньої густини Землі), маса Сонця $2 \cdot 10^{30}$ кг (332 900 земних мас і в 750 разів перевищує масу всіх інших планет, узятих разом). На Сонце приходить 99,866% всієї маси Сонячної системи. Прискорення сили тяжіння на поверхні сонця 274 м/сек^2 (у 28 разів більше земного). На відміну від Землі *сонячна речовина веде себе як рідина*, тобто її окремі області можуть рухатися із різними швидкостями. Обертання Сонця навколо власної осі неоднорідне за широтою та глибиною і змінюється від 25 земних діб на екваторі до 38 діб поблизу полюсів. Різні швидкості обертання характерні тільки для конвекційної зони – поверхневого шару речовини - і вони вирівнюються на глибині 200 000 км, глибоко у надрах сонячна речовина через надвисокий тиск має властивості твердого тіла.

Сонце – зоря середньої величини, жовтий карлик Головної послідовності спектрального класу G2V потужністю $3,8 \cdot 10^{26}$ ват – являє собою розжарену плазмову газову кулю, яка складається переважно з водню і гелію (відношення 5:1). Кількість всіх атомів решти елементів у 10 000 разів менша. Усього в спектрі Сонця на сьогодні виділено лінії поглинання 72 хімічних елементів, які іонізовані - їх атоми позбавлені електронів на зовнішніх орбітах - і які стають вільними частинками іонізованого газу – *плазми*. Сонце – потужне джерело енергії, яка постійно випромінюється у всьому спектрі електромагнітного випромінювання, максимум

якого приходить на діапазон довжин хвиль 400-700 нм, що відповідає *видимому світлу*. Потік енергії із надр Сонця передається до зовнішніх сфер і поширюється на все більшу і більшу площу; при цьому температура закономірно зменшується по мірі віддалення від центра; спочатку поступово, а у зовнішніх сферах – дуже швидко.

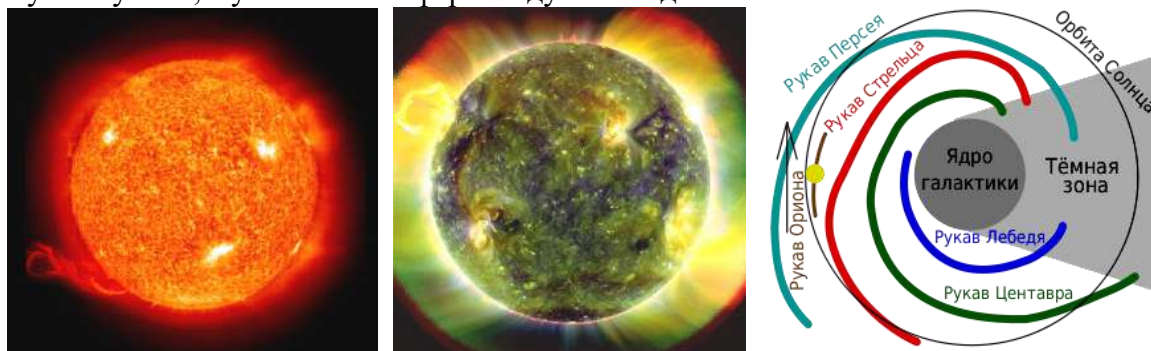


Рис.2.2. Ліворуч: центральне тіло Сонячної системи - жовта зоря *Сонце* з протуберанцем. У центрі: *Сонце* в ультрафіолетовому діапазоні з петлевидними структурами у сонячній короні – результатами руху іонізованих газів вздовж силових ліній магнітного поля Сонця (фото *Solar Dynamics Observatory, NASA*). Праворуч: *орбіта Сонця* у межах Чумацького Шляху протягом одного галактичного року

Внутрішні області Сонця знаходяться у стані нестійкої рівноваги - під дією сили тяжіння речовина прямує до середини, а тиск з боку розжареного ядра і випромінювання виштовхують її назад. Сонце умовно поділяють на 4 області (рис.2.3):

1. внутрішня центральна область (ядро) – зона *термоядерних реакцій* від центра *Сонця* на 1/3 його радіуса. Ядро обертається як тверде тіло; існує єдине спостереження гравітаційних мод, яке свідчить, що *внутрішнє ядро* обертається майже в 5 разів швидше *зовнішнього ядра*.

Розрахунки показують, що у центрі Сонця густина речовини досягає 150г/см³ (в 13 разів більше, ніж у свинцю), а тиск досягає 2000 млрд. атмосфер при температурі 15 млн. градусів. У цих умовах атоми водню розпадаються на протони та електрони і утворюють плазму. При зіткненнях на великих швидкостях (сотні кілометрів за секунду) *ядра атомів водню* (протони), у результаті термоядерних реакцій, утворюють *гелій* із виділенням *гама-випромінювання*, тому кількість гелію у ядрі Сонця поступово збільшується, а водню – зменшується;

2. промениста зона (в інтервалі від 1/3 до 2/3 радіуса Сонця) – зона *переносу променевої енергії* з високою густиною плазми, де *гама-кванти* відразу наштовхуються на перепони, що зумовлює зменшення енергії квантів та нагрівання речовини зони і підтримує існування зорі. Кванти подорожують променевою зоною біля 100 тис. років і втрачають значну кількість енергії до моменту їх виходу на поверхню. На глибині 196 тис. км існує *тахоклін* – малопотужний шар речовини надр, який виконує роль змащування між ядром та нижньою частиною конвекційної зони і, ймовірно, відповідає за магнітну активність Сонця;

3. конвекційна зона – *протягається від верхньої частини променевої зони до глибини ≈ 130 000 км від поверхні*, де температура сягає 1млн.°С і вже недостатня для існування плазми. Зона конвекції *двоповерхова*, на глибині ≈ 125 тис. км іде теплопередача поміж двома замкнутими потоками.



Рис.2.3. Схема сферичної будови *Сонця*

Цей водневий шар – конвекційна зона – *непрозорий* і поглинає енергію надр. Нагріваючись, внутрішні частини шару стають більш легкими, піднімаються угору зі швидкістю 15м/с і проходять через більш холодну речовину з температурою біля +5500°С.

Вище густина речовини падає і відновлюється її

прозорість. Випромінювання, спектр якого охоплює інфрачервону, видиму і ультрафіолетову області, проходить через газ і викидається у космос;

4. атмосфера – надзвичайно динамічна, широка та неоднкова за висотою *дуже розріджена і розігріта до стану плазми газова оболонка*, яка оточує Сонце і в свою чергу ділиться на:

а) **фотосферу** – *прозору нижню частину сонячної атмосфери товщиною близько 300км*, яка випромінює світло і в якій спостерігаються сонячні плями. Її нижня межа, де атмосфера Сонця стає непрозорою, і є *тією видимою поверхнею Сонця*, від якої визначаються розміри Сонця, вимірюються віддалі від Сонця тощо.

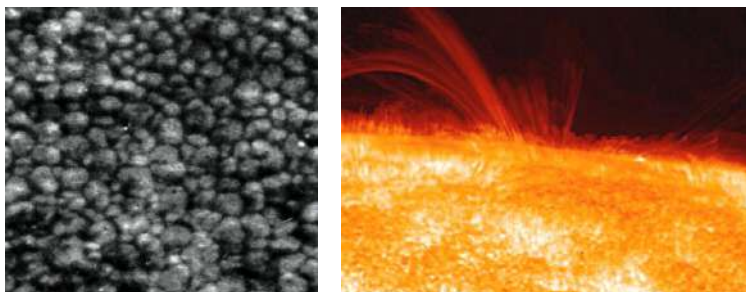


Рис.2.4. Пухирчаста структура сонячної фотосфери – *грануляція* (ліворуч) та оптичне фото тонких структур (взаємодія іонізованого газу з магнітним полем Сонця) у хромосфері над *гранулами* – верхніми частинками конвекційних комірок (фото *Hinode JAXA/NASA*)

Характерною особливістю фотосфери є її *грануляція* – наявність світлих гранул (плям) розмірами близько 1000км, які розділені темними вузькими проміжками. Яскравість гранул на 35-40% більша, ніж у проміжках між ними, а це значить, що температура в гранулі вища на 80-150°C. Середня тривалість існування гранули 7 хвилин, після чого вона розпадається і на її місці утворюється нова. Дослідження показали, що *гранули* – це потоки гарячого газу, які піднімаються вгору з середніми швидкостями 0,5 км/сек., тоді як у темних проміжках більш холодний газ опускається вниз. Якщо на поверхні Сонця температура досягає +5500°C, то у верхній частині фотосфери, із-за випромінювання у космічний простір, вона знижується до +4000°C, маса Сонця при цьому зменшується за кожну секунду на 4,3млн. тонн. У верхній частині фотосфери, при температурі + 4000°C та густині 10^{-6} – 10^{-7} г/см³, водень стає практично нейтральним, іонізовано тільки близько 0,01% атомів, які належать головним чином металам. Явище грануляції свідчить, що в глибинних шарах Сонця речовина перебуває у стані конвекційної рівноваги за рахунок підймання гарячих і опускання (конвекції) охолоджених мас газу із виносом теплової енергії із нижніх шарів у фотосферу, надаючи їй пінистої будови;

б) **хромосферу** – *область випромінювання плазми товщиною 10-15тис. км*, в якій з висотою зростають хромосферні виступи – *спікули* – *рухливі в дугах силових ліній магнітного поля газові колони порівняно холодного газу в оточенні ще більш гарячої речовини*. Поперечник спікули до 1000км, швидкість підйому біля 20км/сек. (понад 50 000км/год.), час підйому – 1,5хв., час існування - до 5хв., нижня межа їх утворення – 2000км над поверхнею Сонця.

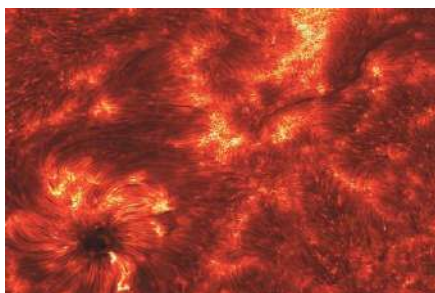


Рис.2.5. Спікули в магнітному полі хромосфери Сонця (фото *IBIS*)

Надзвукова швидкість струменів плазми аж до висоти 5000км, пов'язана із звуковими хвилями (рис.2.14), що проникають із глибин Сонця в її атмосферу і перетворюються в ударні хвилі,

які піднімають бризки плазми;

в) **сонячну корону** – *зовнішній дуже розріджений шар плазми сонячної атмосфери температурою до 1млн. градусів* (іонізованих атомів Н і He з потужним магнітним полем), який досягає висоти від 1,6 до 215 радіусів Сонця. Сонце стабільно випромінює у космос енергію – це світло, тепло, γ-промені, рентгенівські і ультрафіолетові промені та радіохвилі. Із сонячної корони енергія з матерією поширюється у космос простір у вигляді *сонячного вітру*.



Рис.2.6. Яскраве гало сонячної корони при сонячному затемненні

Сонячний вітер – *безперервний потік заряджених частинок гарячої плазми (протони, ядра гелію і електрони) з потужним магнітним полем*,

який постійно викидається із сонячної корони силою тиску світла зі швидкістю до 900км/сек. і заповнює простір навколо Сонця протяжністю до 100а.о., утворюючи геліосферу.

Сонячний вітер формує міжпланетне магнітне поле (рис.2.8). Віддалі до Землі потік плазми долає приблизно за 4,5 доби, його швидкість у районі орбіти Землі 450км/сек., концентрація частинок від 1 до 100 в 1см^3 , а склад сонячного вітру відповідає вмісту хімічних елементів у сонячній короні. Сонячний вітер діє постійно і Земля буквально „купається” в ньому, а космічні кораблі *Voyager-1,-2* встановили наявність сонячного вітру аж у районі орбіти Плутона, де він зустрічається із міжзоряним вітром.

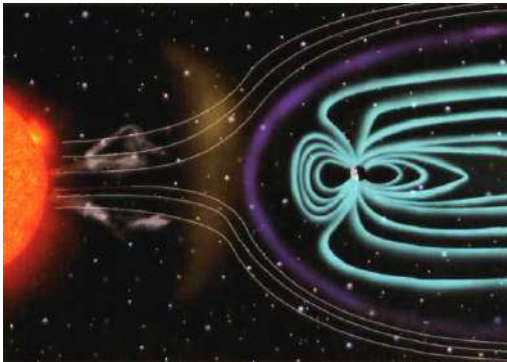


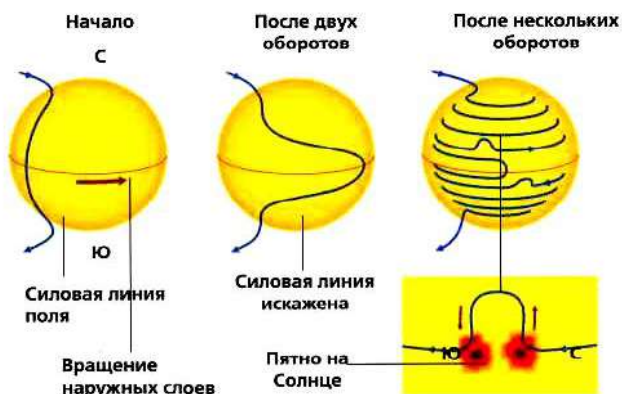
Рис.2.7. Взаємодія сонячного вітру з магнітним полем Землі

При наближенні до границь Сонячної системи густина і швидкість сонячного вітру зменшуються. На відстані 80-100а.о. формується ударна зона, утворення якої пов'язане із переходом швидкості сонячного вітру з надзвукової у дозвукову. Остаточна зупинка сонячного вітру відбувається на віддалі 130-150а.о. від Сонця. Сучасна модель геліосфери схожа на краплинку води і зумовлена в основному обтіканням міжзоряним вітром плазми сонячного вітру. Потік електричних заряджених частинок сонячної плазми не може подолати опір магнітного поля Землі і обгинає його, утворюючи своєрідну порожнину (її називають *магнітосфера*), у якій сонячна плазма відсутня, а магнітне поле Землі з сонячного боку дуже стиснуте. Границя магнітосфери – магнітопауза - захищає Землю від прямого впливу сонячної плазми. Сонячний вітер викликає *магнітні бурі*, а проникнення заряджених частинок у більш низькі шари атмосфери Землі приводить до утворення *полярних сьвів* (рис.2.8).



Рис.2.8. Полярне сьвів (ліворуч); протуберанець (у центрі); токовий шар геліосфери – створена впливом обертання магнітного поля Сонця на міжпланетне середовище спіральна поверхня (праворуч)

Але в сонячній атмосфері періодично виникають деякі явища, що істотним чином змінюють потік сонячної енергії в рентгенівському та ультрафіолетовому діапазонах, що створює значні зміни фізичних умов у навколосезному просторі та безпосередньо на Землі.



Сонячна активність пов'язана із змінами магнітного поля і характеризується інтенсивністю процесів виникнення та розвитку на активних областях сонячного диску - на ділянках його поверхні із плямами (понижена яскравість) та факелами (підвищена яскравість) - *сонячних плям, сонячних спалахів, факелів і протуберанців*.

Рис.2.9. Схема формування петель ліній магнітного поля на Сонці - причина появи сонячних плям

У результаті того, що речовина конвекційної зони Сонця біля екватора обертається швидше, ніж біля полюсів і вона переміщує магнітне поле, то після декількох обертів відбувається немов би намотування магнітних силових ліній на поверхню Сонця із утворенням вигинів та петель, які ведуть або до утворення зон більшої потужності поля, або до зон його самознищення. Ненадовго магнітне поле Сонця падає до нуля і виникає знову. Подібний цикл триває близько 11,3 років, за цей час магнітні полюси міняються місцями. Температура сонячної корони $+1\text{млн.}^{\circ}\text{C}$, але південний полюс Сонця холодніший на 7-8% (на $80\,000^{\circ}\text{C}$) за північний (рис.2.11), причому ця різниця температур не залежить від магнітного поля Сонця та його циклічних інверсій. Максимум активності приходить на місця виходу силових ліній поля на поверхню, де у фотосфері утворюються ділянки з низькою густиною – *сонячні плями*.

Сонячні плями – *темні утворення на поверхні Сонця з дуже сильними магнітними полями*, температура яких приблизно на 1000°C нижче температури фотосфери. Діаметр плям від 1000 до 100 000 км, час існування – до 100 днів. Сонячні плями появляються парами – передня ближче до екватора, а задня рухається ближче до полюса слідом за нею. Плями мають протилежні магнітні полюси - в одній із плям магнітна силова лінія виходить на поверхню, а в іншій входить у середину. Через те, що густина і температура речовини у плямі менша ніж поза нею, сама пляма має вигляд подібного до кратера заглиблення глибиною до 1500 – 2000 км.

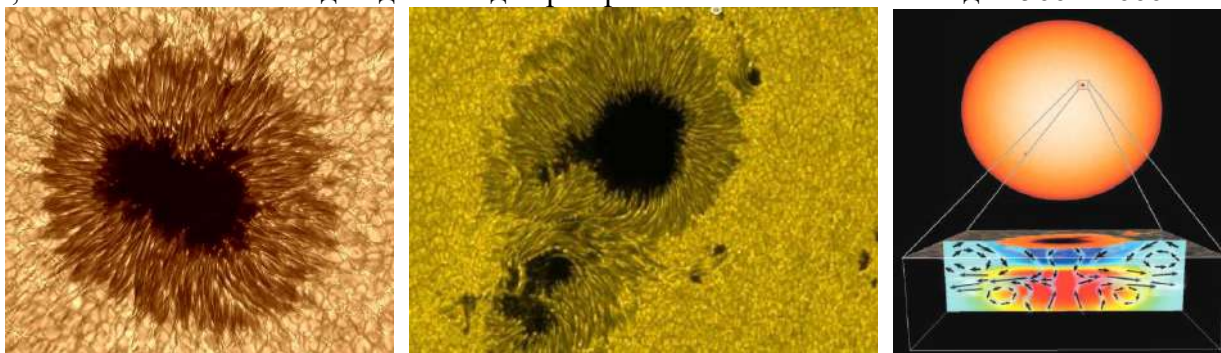


Рис.2.10. Сонячна пляма крупним планом із видимою взаємодією волокон *напівтіні* із *гранулами* – конвекційними потоками гарячого газу (фото *Dunn Solar Telescope*, США). У центрі: *зіткнення двох сонячних плям*, яке приводить до утворення *сонячного спалаху* (відео *Hinode JAXA/NASA*).

Праворуч: структура *сонячної плями* та схема руху речовини у поперечному розрізі плями

Дно кратера утворює *тінь*, а похилі стінки – *напівтінь*. Газ фотосфери рухається від центра плями назовні, утворюючи *протуберанці*, тоді як у розташованій вище хромосфері над плямою газ рухається до центру плями.

Протуберанці – *дуже різноманітні за формою і характером свого руху викиди плазми із фотосфери в сонячну корону* (рис.2.2, 2.8), які характеризуються значними розмірами (довжиною до 200 тис. км, товщиною до декількох тисяч кілометрів), значно більшою густиною (у сотні разів більшою від щільності навколишньої корональної речовини, що і зумовлює їх більш яскравий вигляд), температурою від $+6000^{\circ}\text{C}$ до $+8000^{\circ}\text{C}$, залежністю від магнітних силових ліній (іонізований газ рухається лише намотуючись на магнітну силову лінію, тобто, він ніби “вморожений” у магнітне поле і підіймається разом з ним). Швидкість викидів протуберанців досягає 700 км/сек., висота викидів – до 1,5 млн. км.

Одним із найпотужніших і швидких у часі проявів сонячної активності є – **сонячні спалахи** – *результат анігіляції (руйнування) магнітного поля та потужних токів при зближенні полів, які мають протилежні полярності*. Спалахи виникають у місцях зустрічі двох петель магнітного поля або в його сплутаних лініях – відбувається „коротке замикання” і виштовхування у космос, подібно пружині, гелієво-водневої суміші із величезною швидкістю. Розміри зони, охопленої спалахом, можуть переважати діаметр нашої планети. Процес розвитку спалаху триває від 5-10 хв. до декількох годин і залежить від його потужності. При цьому виділяється енергія, еквівалентна одночасному вибуху 1 млрд. мегатонних водневих бомб або енергії, яку випромінює вся поверхня Сонця за 1 сек. Під час спалахів, крім виділення великої кількості теплової енергії, виникає потужне прискорене випромінювання в ультрафіолетовому,

рентгенівському та радіодіапазонах; прискорюються до надвисоких енергій потужні потоки швидких електронів, протонів і альфа-частинок (рис.2.9, 2.11, 2.13).

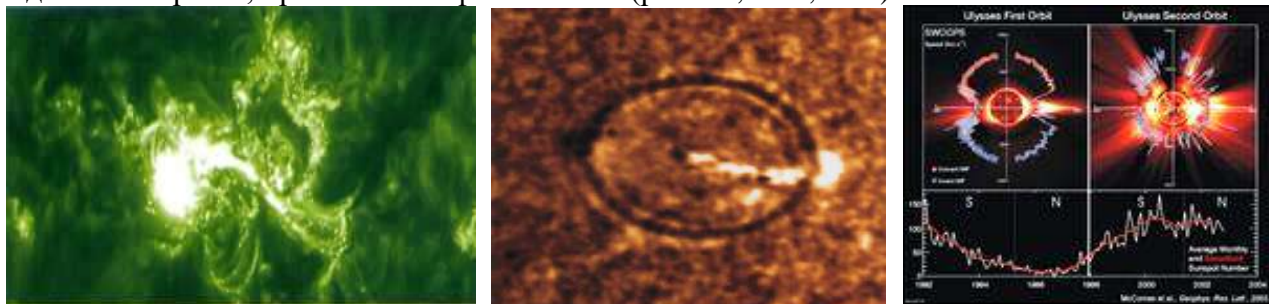


Рис.2.11. Сонячний спалах (28.10.2003р.), який викинув у космос у напрямі Землі велику масу газів корони зі швидкістю 2000км/сек. (ліворуч). Ударна хвиля-цунамі від сонячного спалаху із гарячої плазми та магнетизму висотою до 100 тис. км поширюється по поверхні Сонця від місця коронального викиду зі швидкістю 250км/сек (у центрі). Праворуч: результати досліджень полюсів Сонця (дані *Ulysses*)

Із області спалаху з великою швидкістю (до 1000км/сек.) викидаються колосальні за розмірами та масою (до декількох мільярдів тонн) високо енергетичні *згустки плазми*. Ударні хвилі (рис.2.11), які при цьому генеруються, здатні поширюватися через усю сонячну корону і в атмосфері Сонця вони піднімають фонтани „плазмових бризок”. Відбувається випаровування розігрітої плазми, яка рухається вздовж силових ліній магнітного поля і утворює щільні, гарячі і дуже яскраві *видимі петлі* (рис.2.12).



Рис.2.12. Фотографії спалахів в активній зоні Сонця із випаровувань розігрітої *плазми*, яка рухається у вигляді петель вздовж силових ліній магнітного поля (фото проекту *TRACE*, NASA)

Збурення сонячного вітру є результатом грандіозних викидів речовини із корони Сонця – **корональних викидів маси** – у вигляді відірваних від Сонця замкнутих петель магнітного поля, які несуть у космос із швидкістю 400-1000км/сек. до 10 млрд. тонн високо енергетичної плазми у формі замкнутих утворень (*магнітних хмар*), які можна порівняти із земними хмарами. В основному вони і викликають сильні, іноді екстремальні, збурення *магнітосфери Землі*. Першим, за 8 хвилин, до Землі приходить *електромагнітне випромінювання* спалаху, а інтенсивне рентгенівське випромінювання поглинається у верхніх шарах атмосфери і приводить до збільшення концентрації електронів у іоносфері та *порушує радіозв'язок* на середніх та коротких радіохвилях. Пізніше (від 20 хвилин до декількох годин) приходять *високо енергетичні електрони і протони* (сонячні космічні промені), які несуть *радіаційну небезпеку космонавтам*, виводять з ладу *електронну апаратуру*, викликають *полярні сяйва* тощо. Через 3-5 діб приходять *ударні хвилі та коронарні викиди*, але магнітосфера надійно захищає Землю.



Рис.2.13. Ліворуч: S-подібна конфігурація магнітного поля – попередник *сонячного спалаху* та складні структури розігрітих до 2 млн. градусів гігантських корональних викидів газу (фото *JAXA/NASA/SAO*)

Нестационарні явища на Сонці є справді великомасштабними. Потік випромінювання в рентгенівському та ультрафіолетовому діапазонах зростає у 100-400 разів. За електромагнітним випромінюванням рухається потік частинок високих енергій – протонів і електронів, які рухаються із швидкістю декілька тисяч кілометрів за секунду і досягають Землі, де взаємодіють із магнітосферою, впливають стан атмосфери і на біосферу, зокрема на організм людини: на мозок, серцево-судинну систему та систему кровообігу людини, на її фізичний, нервовий та психологічний стан. Високий рівень сонячної радіації збуджує людину і суспільство. Посилюється амбіційність, скандальність, революційність без достатніх причин – періоди посиленої сонячної активності часто співпадали із війнами та періодами суспільних хвилювань. Безпосередньо під час спалахів відбувається порушення радіозв'язку, а спалахи епідемії чуми, холери, скарлатини тощо припадають переважно на роки максимумів активності Сонця.

Активність Сонця поновлюється кожні 11,1 років. Підвищення активності триває 4,1 року, спад – 7 років. У кожному 11-річному циклі головні плями у всіх групах мають магнітне поле однієї полярності, а наступні за ними – протилежної, тобто, кожні 11 років картина розподілу полярності магнітного поля змінюється на протилежну – вона завершується *переворотом магнітних полюсів* (змінюю напрямку магнітного поля), а останній переворот відбувся у 2001 році, що, можливо, зумовило серію катастрофічних землетрусів на Землі.

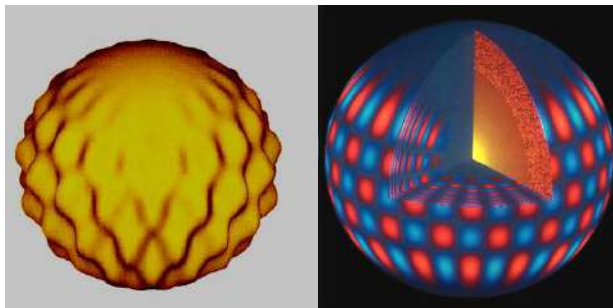


Рис.2.14. Ліворуч: модель однієї з мільйонів *нерадіальних мод коливань* на поверхні Сонця, які утворюють постійно рухливі по поверхні зорі хвилі висотою у десятки км. (вертикальні зміщення збільшені на моделі більш ніж у 1000 разів). Праворуч: *резонансні акустичні коливання* у надрах Сонця (одні області газу піднімаються, інші - опускаються) (за *Global Oscillation Network Group*)

Крім термоядерних реакцій, у надрах Сонця ідуть процеси обертання і конвекційного перемішування величезних мас речовини, які пов'язані з генерацією магнітного поля, а глобальна вібрація речовини Сонця породжує *акустичні хвилі стиснення та розширення газу* (р-моди коливань), які, через зміну параметрів речовини з глибиною, багатократно повертаються до поверхні, відбиваються від неї та зумовлюють вібрації кожної ділянки сонячної поверхні. Гравітація ядра Сонця утворює *вертикальні хвилі підняття та опускання газу* (g-моди коливань) у надрах, які на поверхні зорі майже не проявляються (рис. 2.14).

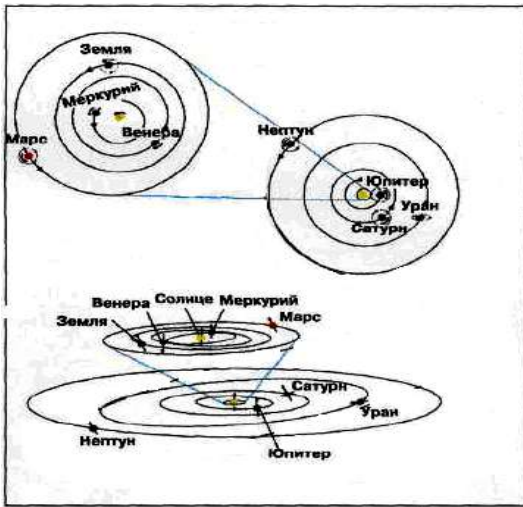
Щосекунди Сонце перетворює біля 600 млн. тонн водню у 4 млн. тонн гелію. За період свого існування – 4,65 млрд. років - Сонце використало половину свого водневого палива. У майбутні 5 млрд. років температура та об'єм Сонця будуть поступово зростати по мірі перетворення водню у гелій. Енергія Сонця збільшиться багатократно і воно перетвориться у червоний гігант. Коли весь водень у ядрі буде використано, Сонце стане значно більшим ніж зараз - вмираюче Сонце проковтне Землю і перетворить її в розплавлену лаву. У надрах Сонця ядра гелію будуть комбінуватися, утворюючи ядра вуглецю та більш важких елементів, проте в кінцевому результаті Сонце охолоне і перетвориться у шар ядерних відходів, так званий білий карлик.

Контрольні запитання

1. Охарактеризувати поняття «сингулярність», «Великий Вибух», «інфляція».
2. Яке значення перших зірок Всесвіту?
3. Охарактеризувати будову Галактики та вказати її місце в камертоні Хаббла та у Всесвіті.
4. Яка послідовність космічних об'єктів у Всесвіті за спектром їх мас?
5. Охарактеризувати життєві цикли зірок, які покинули Головну послідовність.
6. Чому були виділені коричневі карлики?
7. Охарактеризувати сучасну будову Сонячної системи.
8. Будова Сонця та його вплив на біосферу Землі.

2.2. ПЛАНЕТИ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Згідно рішення 26-ї Генеральної асамблеї Міжнародного астрономічного союзу (Прага, 2006) класична планета – *любє небесне тіло на власній орбіті навколо Сонця, яке є досить масивним для набуття сферичної форми та підтримування гравітації на своїй поверхні, проте недостатньо масивне для початку термоядерного синтезу, і яке змогло очистити околиці своєї орбіти від планетезималей.*



За фізичними характеристиками планети Сонячної системи, на які приходитьсся 0,135% її маси, діляться на три групи: **планети земної групи, планети-гіганти та карликові планети.**

Рис.2.15. Области орбіт внутрішніх твердих планет земної групи та зовнішніх газових планет-гігантів

Планетам земної групи – Меркурію, Венері, Землі і Марсу – властиві невеликі розміри (рис.2.16) і маси, тверда поверхня та сферична будова надр. Вони складені гірськими породами з великими середніми густинами (у Меркурія, Венери, Землі і Марса вони відповідно $5,43\text{г/см}^3$, $5,25\text{г/см}^3$, $5,52\text{г/см}^3$ і $3,95\text{г/см}^3$) із тугоплавких мінералів (таких як *силікати*, що утворюють їх *мантію* та *кору*) та *металами* (такі, як *залізо* та *нікель*, які формують їх *ядро*). Цим планетам притаманні *повільне обертання навколо власних осей*, невелика кількість (0-2) *супутників*, *спільні риси геологічного розвитку*. У трьох внутрішніх планет – Венери, Землі і Марса – існують *атмосфери*; в усіх планет наявні *ударні кратери* та *тектонічні риси поверхні* (*рифтові западини* і *вулкани*), проте у них відсутні *кільця*.



Рис.2.16. Порівняльні розміри планет земної групи

Планети-гіганти – Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун - знаходяться на більших віддальх від Сонця, вони мають великі *радіуси* і *маси*, малу *густину* (в Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна відповідно $1,33\text{г/см}^3$, $0,69\text{г/см}^3$, $1,29\text{г/см}^3$ та $1,64\text{г/см}^3$) та 99% маси речовини, яка обертається навколо Сонця. Юпітер і Сатурн складені переважно із *водню* (H_2) та *гелію* (He) з домішками *аміаку* (NH_3) та *метану* (CH_4), які переходять з глибиною у *рідкий* та, можливо, у *твердий стан* у центрі планет. Уран і Нептун мають більший вміст *криги* у їх складі. Для планет-гігантів типовим є *швидке осьове обертання*, наявність *кілець* та багатьох (відповідно 63, 62, 29 і 13) *супутників*.

До категорії **карликових планет** зараз відносять **5 невеликих космічних тіл**: колишній астероїд **Церера** з Головного поясу астероїдів між орбітами Марса і Юпітера, колишню 9-у планету **Плутон** (густина $2,03\text{г/см}^3$) та представників поясу Койпера – **Ерида** (2003 UB313, неофіційна назва *Ксена*), **Макемаке** (2005 FY9, неофіційна назва *Істербанні*), **Хаумеа** (2003 EL61, неофіційна назва *Санта*).

2.2.1. МЕРКУРІЙ

МЕРКУРІЙ – *найближча до Сонця і найменша за розмірами планета земної групи, яка обертається дуже витягнутою еліптичною орбітою (ексцентриситет $e=0,206$) на мінімальній відстані - перигелій – 45,9 млн. км та максимальній віддалі - афелій – 69,7 млн. км зі швидкістю 47,89км/сек. і робить один оберт за 88 земних діб (тривалість меркуріанського року). Діаметр планети 4879км; найбільша серед планет (крім Землі) густина 5,43г/см³; маса Меркурію $3,303 \cdot 10^{23}$ кг (6% маси Землі), причому 80% маси зосереджено у великому залізному ядрі планети. Сила тяжіння на поверхні 0,38 земної (прискорення вільного падіння 3,72м/сек²).*

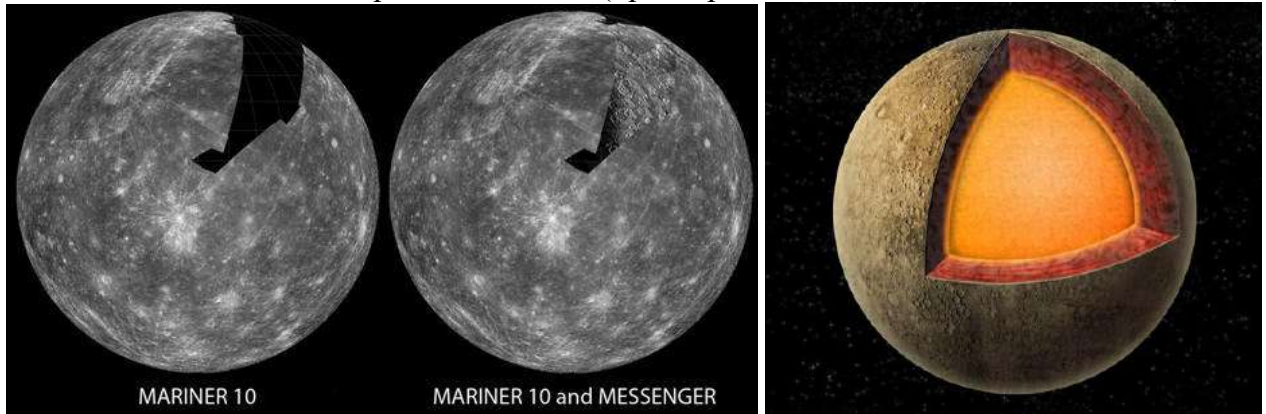


Рис.2.17. Поверхня Меркурія, яку дослідили *Mariner-10* та *MESSENGER* (США) та схема сферичної будови його надр

Напряв повільного обертання планети навколо своєї осі (один оберт за 59 земних діб – *меркуріанська доба*) співпадає з напрямом обертання планети власною орбітою. За один оберт навколо Сонця Меркурій встигає зробити рівно півтора оберти навколо власної осі, а по відношенню до Сонця – тільки півоберта, таким чином, *сонячний день на Меркурії (від одного сходу Сонця до наступного) триває рівно два меркуріанські роки (176 земних діб)*. Вісь планети майже перпендикулярна до площини орбіти, тому у районі полюсів існують зони із високим коефіцієнтом відбиття, де у вічній темноті глибоких кратерів можливе існування водяної криги.

Спостерігати Меркурій із Землі можна низько над горизонтом на фоні вечірньої або ранкової зорі, бо планета не віддаляється від Сонця більше ніж на 28°, так як орбіта Меркурію лежить глибоко у межах орбіти Землі. У цю пору фаза планети – кут на Меркурії між напрямками на Сонце і на Землю – близька до 90° і освітленою буде тільки обернена до Сонця половина диска планети, а сам Меркурій буде мати вигляд вузького серпа чи півкола.

Атмосфера Меркурія настільки розріджена, що її складові нейтральні атоми ніколи не зштовхуються (це так звана **екзосфера**), а тиск біля поверхні планети в 500 млрд. разів менший за земний. Меркурій захоплює іони сонячного вітру (водню і гелію) та атоми, які цей вітер та удари метеоритів „вибивають” з поверхні планети, але, через малу гравітацію та високі денні температури, приблизно через 200 днів вони відриваються від планети у космос, а на їхнє місце надходять інші.

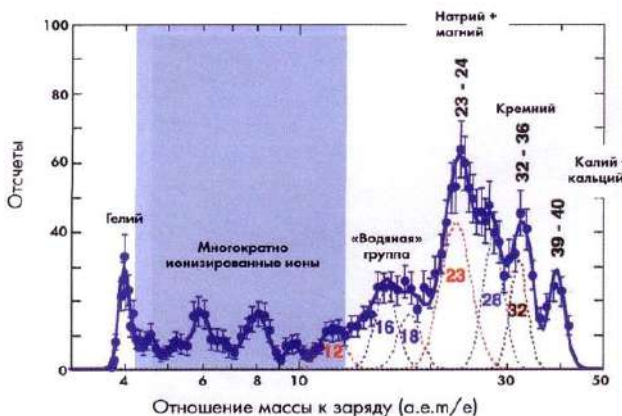


Рис.2.18. Спектр іонів в екзосфері Меркурія

Крім цього невелика кількість атомів гелію, кисню і лужних металів може утворюватися у результаті радіоактивного розпаду розжарених твердих порід поверхні планети, так що **навколо Меркурія існує тонкий надзвичайно розріджений шар** (всього у 30 разів густіший за космічний фон) переважно гелієвої екзосфери з великою натрієвою хмарою (причини появи хмари

незрозумілі), який складається з *гелію* (39%), *натрію* (41%), *водню* (15%) та домішок *калію*, *кальцію*, *кремнію*, *неону*, *аргону* і, можливо, *ксенону* (до 5%) (рис.2.24, праворуч). Помітний пік в області 16-19 атомних одиниць маси відповідає *атомарному кисню* O^+ , *молекулам води* H_2O^+ та її похідним типу *іонів гідроксилу* OH^- , а їх концентрація тільки в 3 рази поступається концентрації *іонів натрію*, тобто *сумарна кількість іонів водняної групи в екзосфері планети надзвичайно велика*, а причина цього поки ще не зрозуміла (за рахунок гіпотетичних льодовиків у вічно темних кратерах полюсів або за рахунок криги, що поступає на Меркурій з ядрами комет, чи від бомбардування поверхні планети частинками сонячного вітру). Сонце на Меркурії у 2,5 рази більше за його вигляд із Землі, а **небо чорного кольору** - тонкий шар екзосфери не розсіює сонячне світло.

Поверхня Меркурія *темно-бурого кольору* має *рівнинний та височинний характер* і покрита **метеоритними кратерами** розмірами від 100м до 1300км, які знаходяться на різних стадіях збереження. *Молоді кратери* мають гострі краї з яскравим радіально-променевим обрамленням, а *древні* – згладжені краї під впливом метеоритного бомбардування.

Кратери Меркурія нагадують місячні, багато маленьких чашоподібних кратерів і кратерів побільше з гострим піком у центрі. У більшості кратерів дно часто плоске. Удари метеоритів або астероїдів руйнують породи кори планети, а витікаюча з надр лава формує нову плоску і гладку поверхню. На поверхні планети помітні сліди активної *вулканічної* і *тектонічної діяльності* – застигли *лавові потоки*, *тектонічні розломи* та *ескарпи (уступи)*.

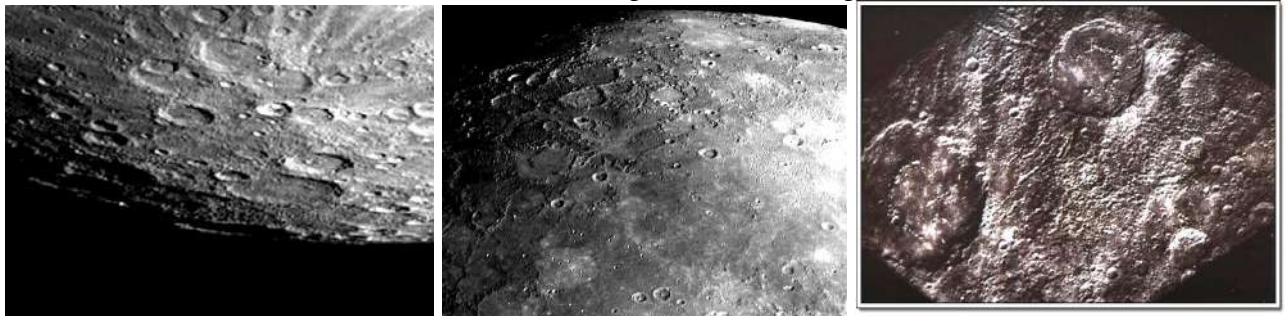


Рис.2.19. Ліворуч: *південний полюс* Меркурія (фото *Mariner-10*). У центрі - *північний полюс* планети (фото *MESSENGER*). Планета повністю покрита кратерами і нагадує деякі ділянки Місяця, але на Меркурії немає великих рівнин, які подібні до місячних морів. Праворуч: *кратери Стріндберг* (діаметр 175км) і *Ахмад-Баба* (діаметр 115км) із внутрішніми сегментами концентричних кільцевих гірських хребтів. Радіальні ланцюжки вторинних кратерів утворені викинутою при ударі речовиною.

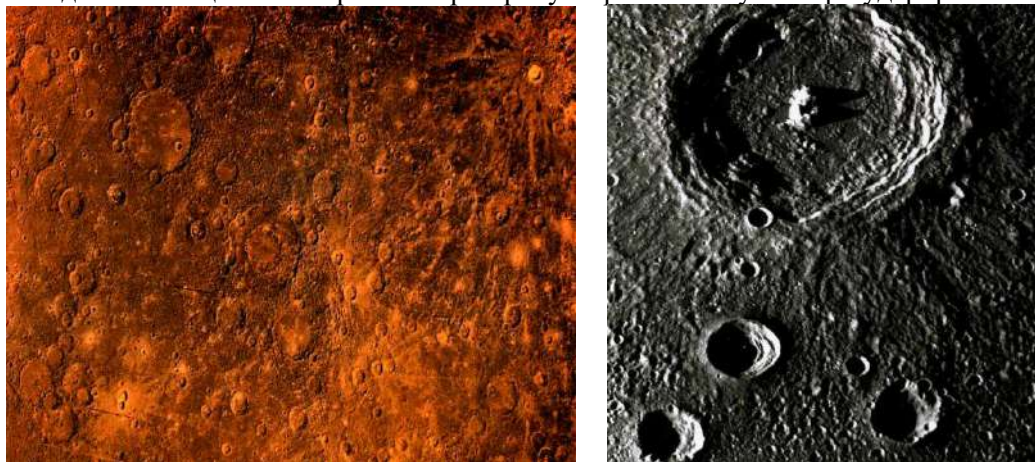


Рис.2.20. Ліворуч: природний темно-бурий колір поверхні Меркурія з численними ударними кратерами — *древні деформовані кратери* із згладженими краями та *молоді* (угорі на фото) оточені високими крутими валами з яскравим радіально-променевим обрамленням із викинутих порід. Праворуч: кратер з *центральною піком* та *терасоподібними стінками* (фото *Mariner-10*)

На Меркурії існують також **рівнинні області** з відносно гладенькими поверхнями. Деякі з них можуть бути утвореннями давнього *вулканічного процесу*, інші – результатом *нагромадження речовини*, що була викинута з ударних кратерів. *Рівнини типу місячних морів*

заповнені застиглою базальтовою лавою, вкриті численними кратерами і порізані характерними *крутими схилами обривів - ескарпами* – висотою до 2-3км і протяжністю в сотні і навіть тисячі кілометрів, які розділяють два райони поверхні і утворилися або в результаті стискання кори планети у періоди проявів тектонічної активності, чи, ймовірно, під час припливних деформацій на ранньому етапі геологічної історії Меркурія, коли його періоди обертання навколо осі та навколо Сонця не ввійшли в резонанс (рис. 2.21, праворуч; 2.25; 2.28; 2.30).

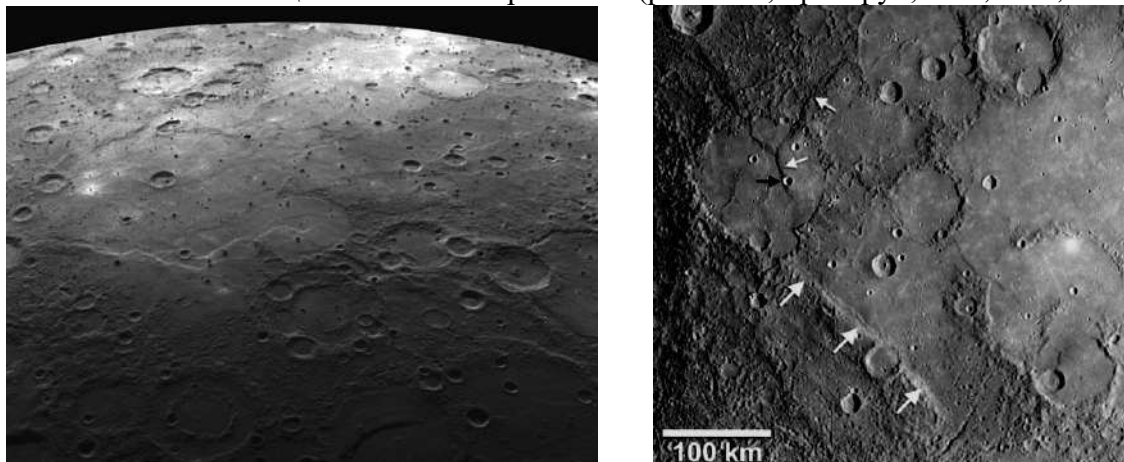


Рис.2.21. Ліворуч: затоплені лавою кратери та великі вулканічні рівнини; праворуч: насуви – ескарпи - на поверхні Меркурія, як результати активних тектонічних процесів (фото *Mariner-10* та *MESSENGER*)

Наближеність Меркурія до Сонця і практично відсутня атмосфера викликають різкі зміни температури на сонячній та нічній сторонах планети, які коливаються **на освітленому боці – пекельно гаряча кам'яна пустеля** - від $+290^{\circ}\text{C}$ в афелії до $+500^{\circ}\text{C}$ у перигелії (досить, щоб розплавити олово, свинець та цинк) і спричиняють активні процеси температурного вивітрювання на його поверхні. *Реголіт* – шар дуже подрібнених порід, що утворився у результаті зіткнень метеоритів з поверхнею супутника - покриває планету, є чудовою теплоізоляцією і вже на глибині кількох десятків сантиметрів приблизна температура $+80^{\circ}\text{C}$. Зонд *MESSENGER* (США) відкрив на поверхні Меркурія багаті поклади заліза в оксидних з'єднаннях з титаном.

Нічний бік планети – **заморожена пустеля**, яка, можливо, *покрита замерзлими газами* - з температурою поверхні до -210°C . Через високу температуру та низький тиск вода у рідкій формі на Меркурії існувати не може, але у вічному мороці глибоких кратерів полярних областей, куди ніколи не заглядає Сонце і постійна температура може бути на відмітці -148°C , радіолокаційні спостереження виділили зони з високим коефіцієнтом відбиття, що свідчать про можливе існування там водяної *криги*.

Меркурій не має супутників, що значно ускладнює вивчення його **внутрішньої будови**. За сучасними уявленнями (рис.2.17), Меркурій має *залізне, частково розплавлене, ядро* радіусом 1800км (75% діаметра планети, 80% маси планети) та густиною $9,8\text{г/см}^3$, до складу якого входить *залізо* і, можливо, *нікель*. Для підтримання ядра невеликого Меркурія у розплавленому стані протягом мільярдів років необхідна наявність у ядрі „легких” елементів, зокрема *сірки*, яка істотно знижує температуру плавлення ядра та блокує швидке зниження його температури.

За сучасними даними, у зовнішніх шарах ядра планети суміш заліза і сірки охолоджується, залізо конденсується у вигляді кубічних „сніжинок”, які холодними падають до центра ядра, а назустріч їм із нижньої частини піднімається рідка, збагачена сіркою, фракція. Ці конвекційні потоки і формують слабе магнітне поле планети. Потужність зовнішньої кам'яної оболонки планети (аналогічної кори та мантії Землі) складає всього 700-800км, причому товщина **кори** може досягати 50–100км (з густиною поверхневих порід близько $3,3\text{г/см}^3$), а **мантії** біля 700км. Велика середня густина планети ($5,43\text{г/см}^3$) при її невеликих розмірах вказує, що Меркурій на 60-70% складений металами і на 30% силікатними породами.

Потужність дипольного (в основному) **магнітного поля** Меркурія складає 0,7% від земного - на екваторі $3,5\text{мГс}$, а біля полюсів 7мГс , магнітний момент 230–290нТл. (рис.2.22). Наявність

дипольного магнітного поля, яке нахилене на $5-12^\circ$ до осі обертання Меркурія, служить додатковим доказом існування залізного, частково розплавленого ядра планети, у якому при повільному обертанні планети конвекційні потоки утворюють кільцеві електричні струми, що генерують слабе магнітне поле. Підтвердженням існування розплавленого ядра є крихітні завихрення у русі планети орбітою навколо Сонця. Крім дипольного (двохполюсного) в магнітосфері планети присутні ще поля з чотирма та вісьмома полюсами. З боку Сонця магнітосфера дуже притиснута до поверхні планети впливом сонячного вітру.

Меркурій схожий на решту твердих планет земного типу – він також пережив у своїй історії чітке розширення надр на концентричні сферичні оболонки, а відсутність густої атмосфери та рідкої води сприяли збереженості елементів древнього рельєфу від ерозії.

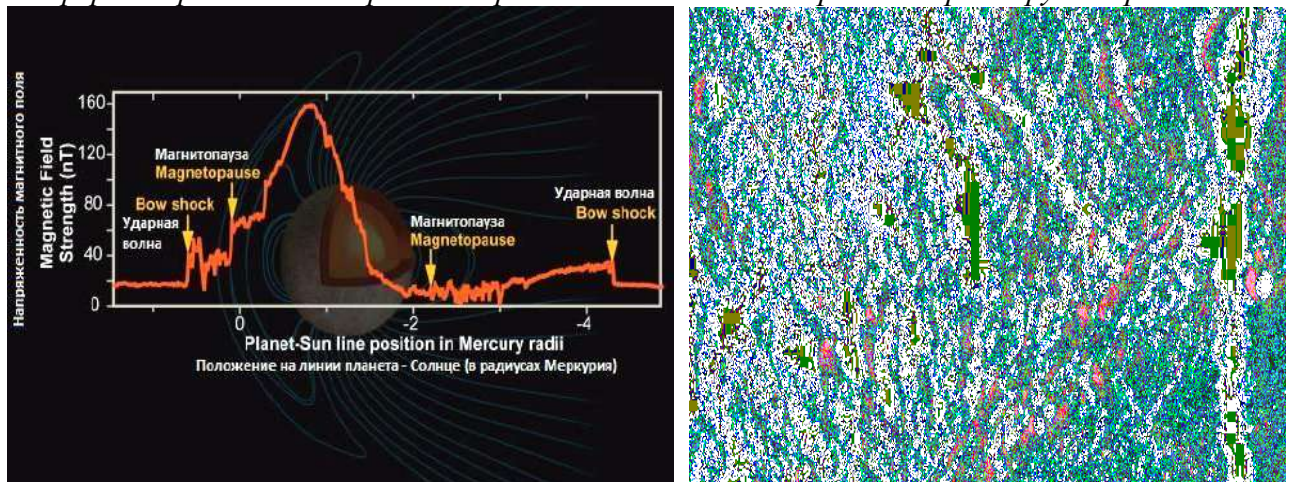


Рис.2.22. Ліворуч: величина магнітного поля Меркурія (створеного електричними токами у ядрі із розплавленого металу) з відсутніми радіаційними поясами та характерні для поверхні Меркурія протяжні скелясті гряди (праворуч) (дані та фото MESSENGER)

Історія геологічного розвитку Меркурія подібна до земної – близько 4,5 млрд. років тому планета сформувалася в результаті акреції. Це був час інтенсивного бомбардування планет космічними тілами із решток первинної туманності, що утворила сонячну систему, але поверхня Меркурію сформувалася під впливом дуже потужного вулканізму (рис.2.31) на ділянках розломів та тріщин, які утворилися в результаті потужних тектонічних процесів та формування ескарпів в умовах активних тектонічних процесів (рис.2.21). Речовина надр Меркурія розділилася на щільне **металеве ядро** та його **силікатну оболонку** (рис.2.17).

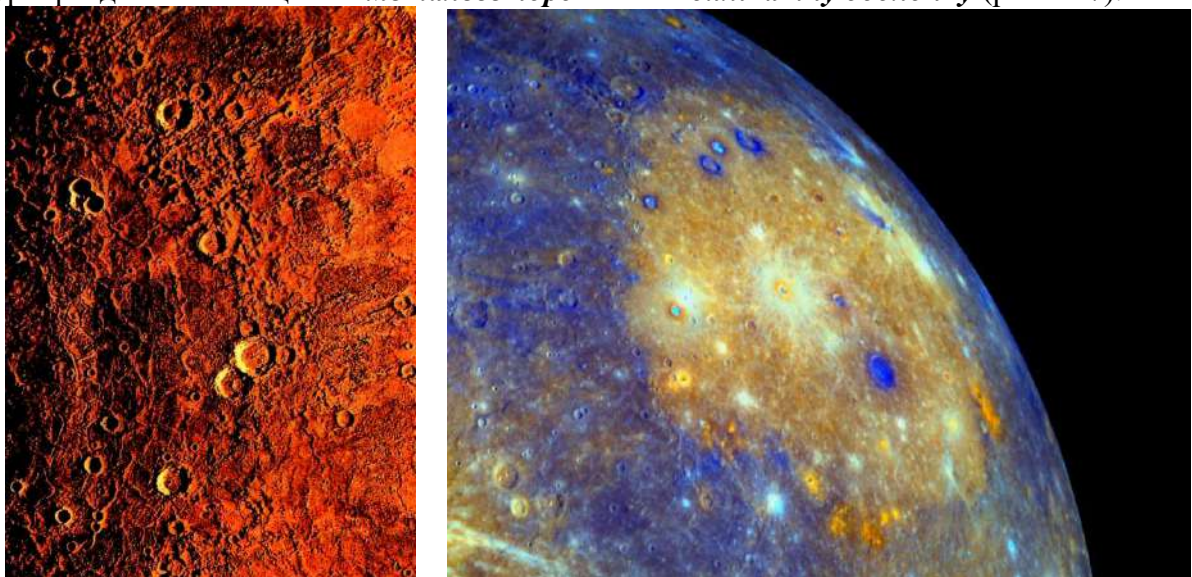


Рис.2.23. Ліворуч: фрагмент найбільшого, заповненого потоками лави, ударного кратера на Меркурії - Рівнини Снеки (Caloris Planitia), який обрамлений розломами та звивистими гребенями гірських хребтів гір Снеки. Праворуч: загальний вигляд ударного басейну Рівнина Снеки (фото Mariner-10, MESSENGER)

У період так званого „важкого бомбардування” метеоритами (біля 3,8 млрд. років тому) на його поверхні утворилися „басейни” – залиті лавовими потоками меркуріанські „моря” і покриті кратерами *гірські райони*. Більше 2/3 вивченої поверхні Меркурія утворилися дуже давно і ці області покриває велика кількість кратерів.

Найбільший кратер (діаметр 1550км, уточнені дані *MESSENGER*) – *Рівнина Снеки* (*Caloris Planitia*) – являє заповнену потоками лави кільцеву ударну западину, що має концентричні кільця та радіальні риси своєї будови (рис.2.23; 2.30). Це другий за величиною кратер у Сонячній системі і поступається тільки *кратеру Ейткінса* на зворотному боці Місяця. *Рівнина Снеки* оточена кільцевим гірським хребтом - *горами Снеки* - висотою до 3км і утворилася у результаті падіння 3,9 млрд. років тому гігантського метеорита більше 100км у поперечнику, що викликало лавові виверження навколо у радіусі 600-800км. а фокусування ударних хвиль від цього падіння утворило на протилежному боці планети хаотичний ландшафт рельєфу (рис.2.24) із брил зруйнованої кори у вигляді численних горбів висотою до 1-2км та діаметром підніжжя до 5-10км - ця *горбисто-лінійна область тектонічних руйнувань* досягає 100км впоперек і пересічена декількома прямими лінійними долинами вздовж ліній тектонічних розломів кори.

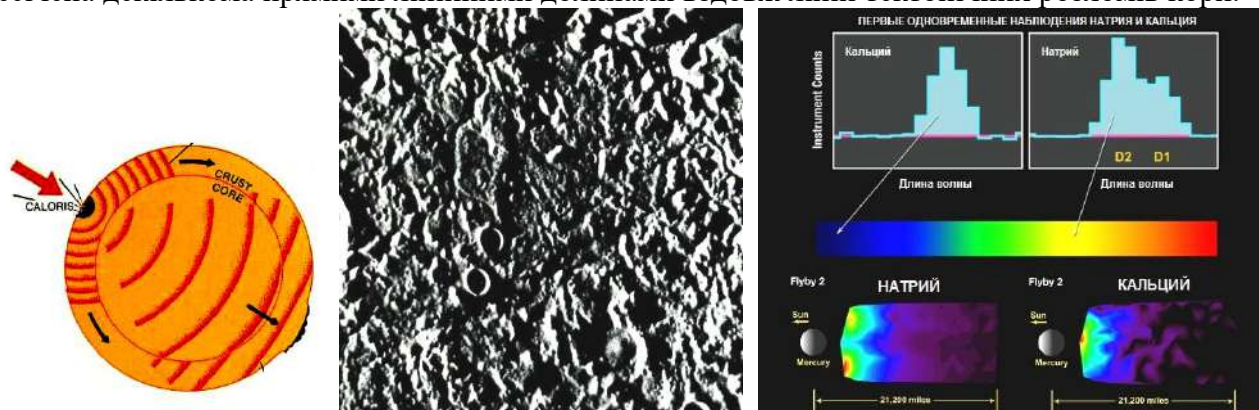


Рис.2.24. Схема утворення ударного кратера *Рівнини Снеки* (ліворуч) і хаотичного рельєфу області тектонічних руйнувань на діаметрально протилежному боці Меркурія та фото *Mariner-10* цього ландшафту. Праворуч: Na^+ і Ca^{++} в асиметричному у напрямі північ – південь „хвості” екзосфери Меркурія довжиною 40 000км (комбінація даних двох спектрометрів *MESSENGER*)

Ці катаклізми, можливо, дуже розігріли Меркурій, а коли інтенсивне метеоритне бомбардування скінчилося, планета почала швидко охолоджувалася, а потужні тектонічні процеси чи зменшення об’єму планети при охолодженні її ядра спричинило формування “зморшкованої” кори планети із утворенням великих тектонічних розломів, переміщеннями блоків кори по розломах із утворенням *великих обривів* насувів – *ескарпів* - висотою від кількох сотень метрів до 3км та протяжністю у сотні і тисячі кілометрів (рис.2.21, 2.25, 2.28, 2.30).

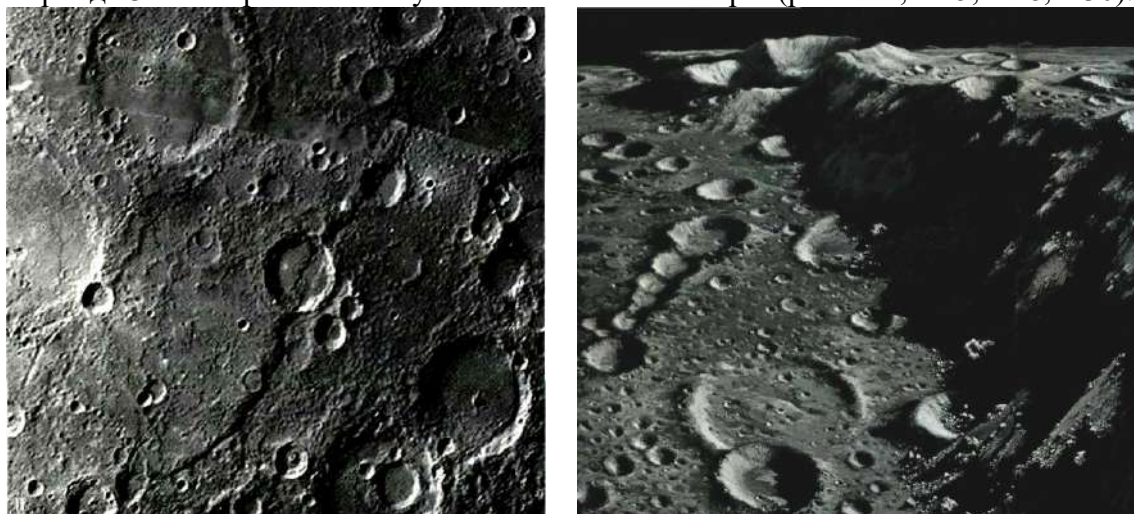


Рис.2.25. *Ескарп Дискавері* – уступ на поверхні древнього материкового району планети довжиною до 550км і висотою 1,5-3км (фото *Mariner-10* ліворуч) та перспективний вигляд цього ескарпу (праворуч)

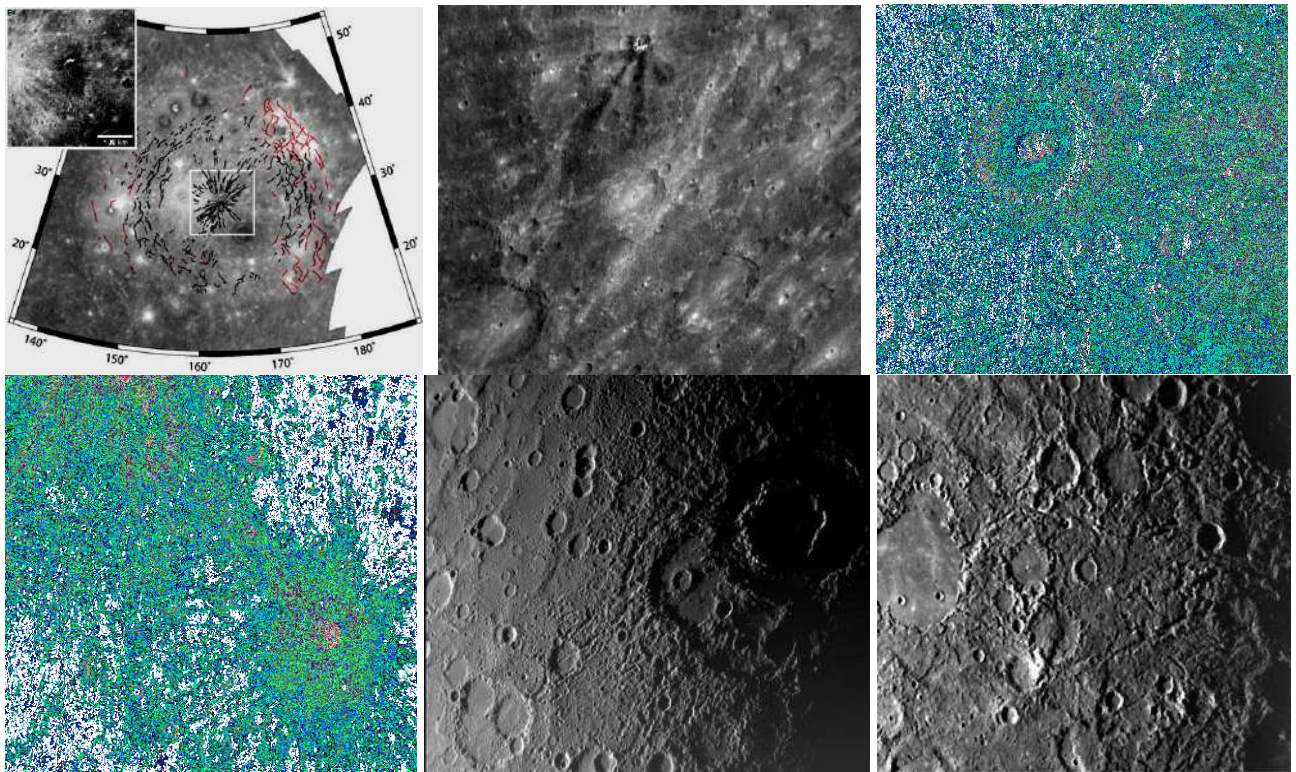


Рис.2.26. Верхній ряд: ліворуч – тектонічна схема лінійних змін від потужного удару на дні ударного басейну Рівнини Спекі в районі структури «Павук» із сотнями *грабенів* (чорні лінії), які по краях басейну набувають форму концентричних заокруглень, в оточенні утворених в умовах стискання та насувів поверхні *ескарпами* (червоні лінії); у центрі – різного кольору викиди з ударних кратерів вказують на різну глибину цих кратерів та на складну будову порід надр планети; праворуч - відносно молодий, діаметром 125км (у його центрі майже немає інших ударних кратерів) *ударний кратер Емінеску* із центральним піком у вигляді кільця та в оточенні ланцюжків вторинних кратерів, які утворилися при викиданні речовини надр планети під час зіткнення з нею астероїда. Нижній ряд: ліворуч - *кратер Вівальді* діаметром до 200км; у центрі - характерні для поверхні планети *групи кратерів*; праворуч – *гірські вершини на Меркурії* (фото *MESSENGER*)

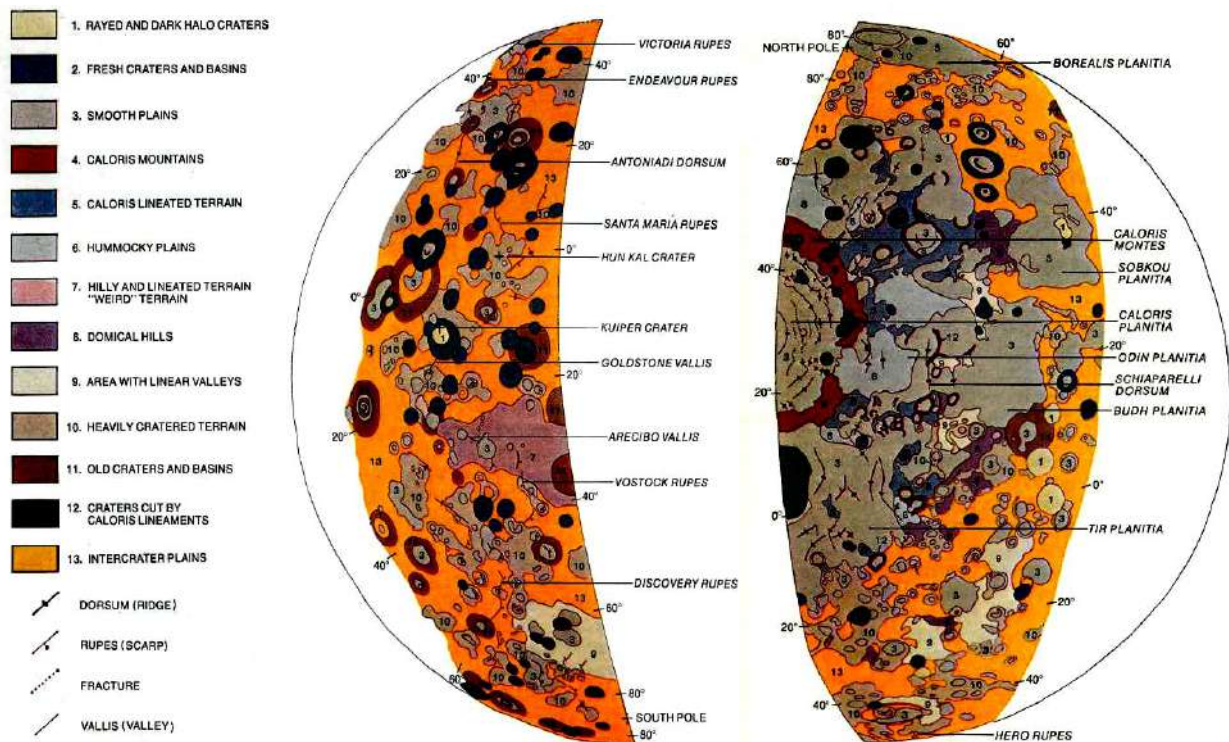


Рис.2.27. Геологічна карта поверхні Меркурія (*U.S.Geological Survey*) за результатами дешифрування фотографій *Mariner-10*

У деяких місцях ескарпи пересікають стінки кратерів і розділяють собою ділянки поверхні, що нічим не відрізняються між собою. Вважають, що ескарпи утворилися як *насуви* при тектонічних процесах в умовах стискання кори планети. Одночасно на супутнику формувалися менш кратеризовані рівнини з кратерами менше 15км у поперечнику.

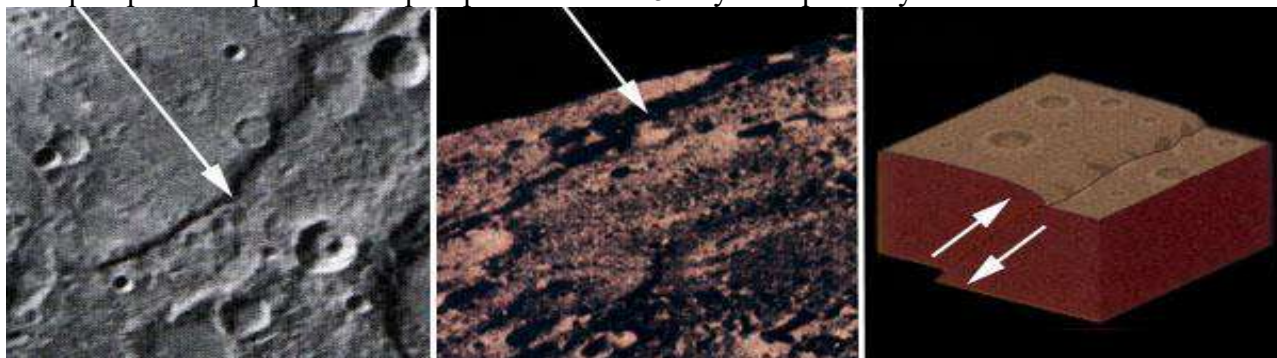


Рис.2.28. Ескарпи на поверхні Меркурія (фото *Mariner-10*) та механізм їх утворення

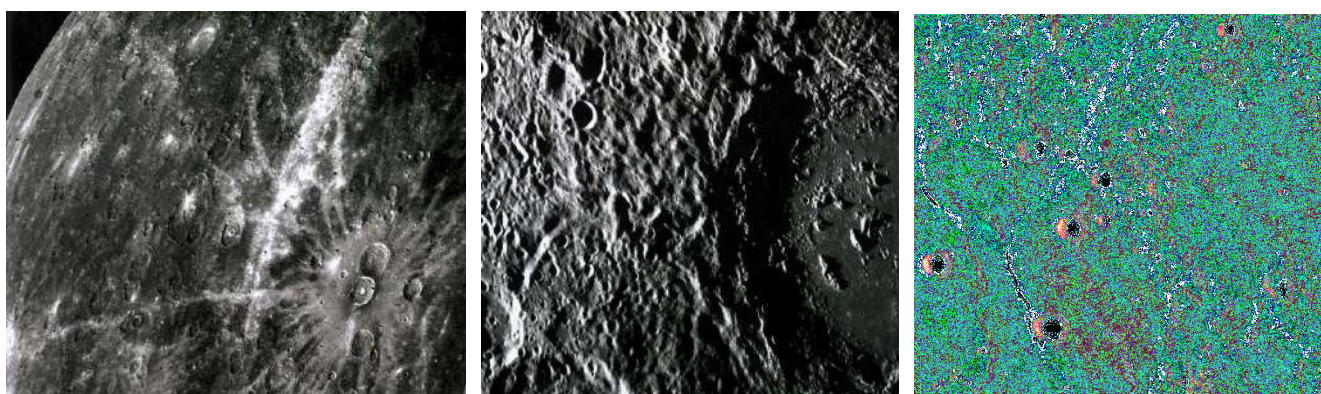


Рис.2.29. Світлі породи на поверхні Меркурія (ліворуч) і фрагмент складної структури його поверхні (фото *Mariner-10*). Праворуч: Y-подібний хребет (чи обрив) на дні великого кратера та його тіні (сонце праворуч) свідчать про умови стискання кори планети при її охолодженні та про сучасне східчає опускання рельєфу місцевості у лівому напрямі (фото *MESSENGER*)

Протягом третього етапу розвитку планети лава затоплювала низовини і створювала гладкі рівнини, на яких під час четвертого етапу бомбардування мікрометеоритами був сформований шар *реголіту*, що покриває поверхню планети, а також відбулося декілька зіткнень з великими метеоритами, які утворили великі кратери. Пізніше, крім випадкових зіткнень з метеоритами, тектонічно неактивна поверхня Меркурію залишалася незмінною протягом мільйонів років.

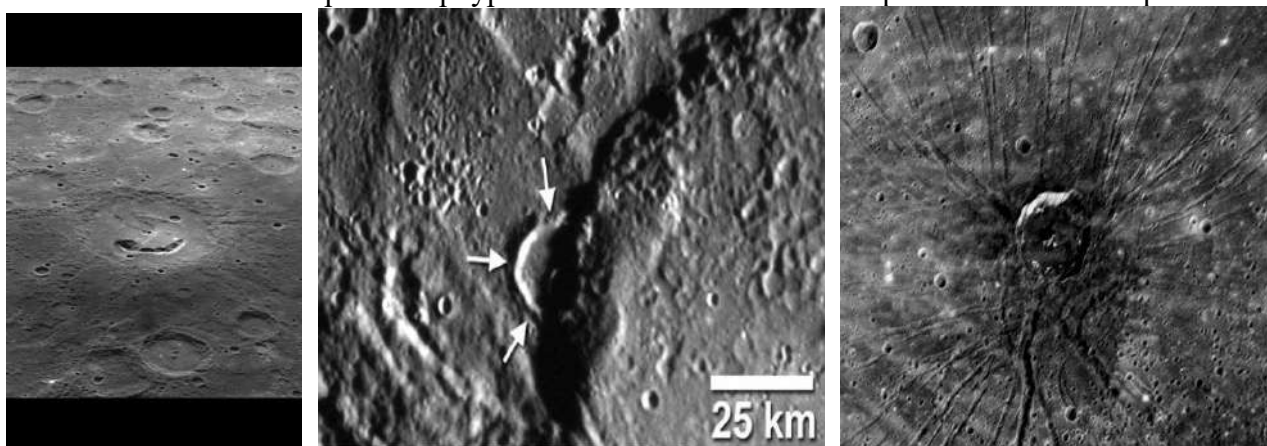


Рис.2.30. Ліворуч: дуга *провалу* (обрушення склепіння над спустошеним магматичним осередком чи тунелем) на дні кратера. У центрі: руйнування *давніх* кратерів при формуванні уступу більш *молодшого* ескарпу. Праворуч: структура „Павук” – понад *сто* радіально розташованих вузьких та дуже довгих грабенів з плоским дном – з центральним ударним кратером (41км) на дні западини Рівнина *Спеки* (фото *MESSENGER*)

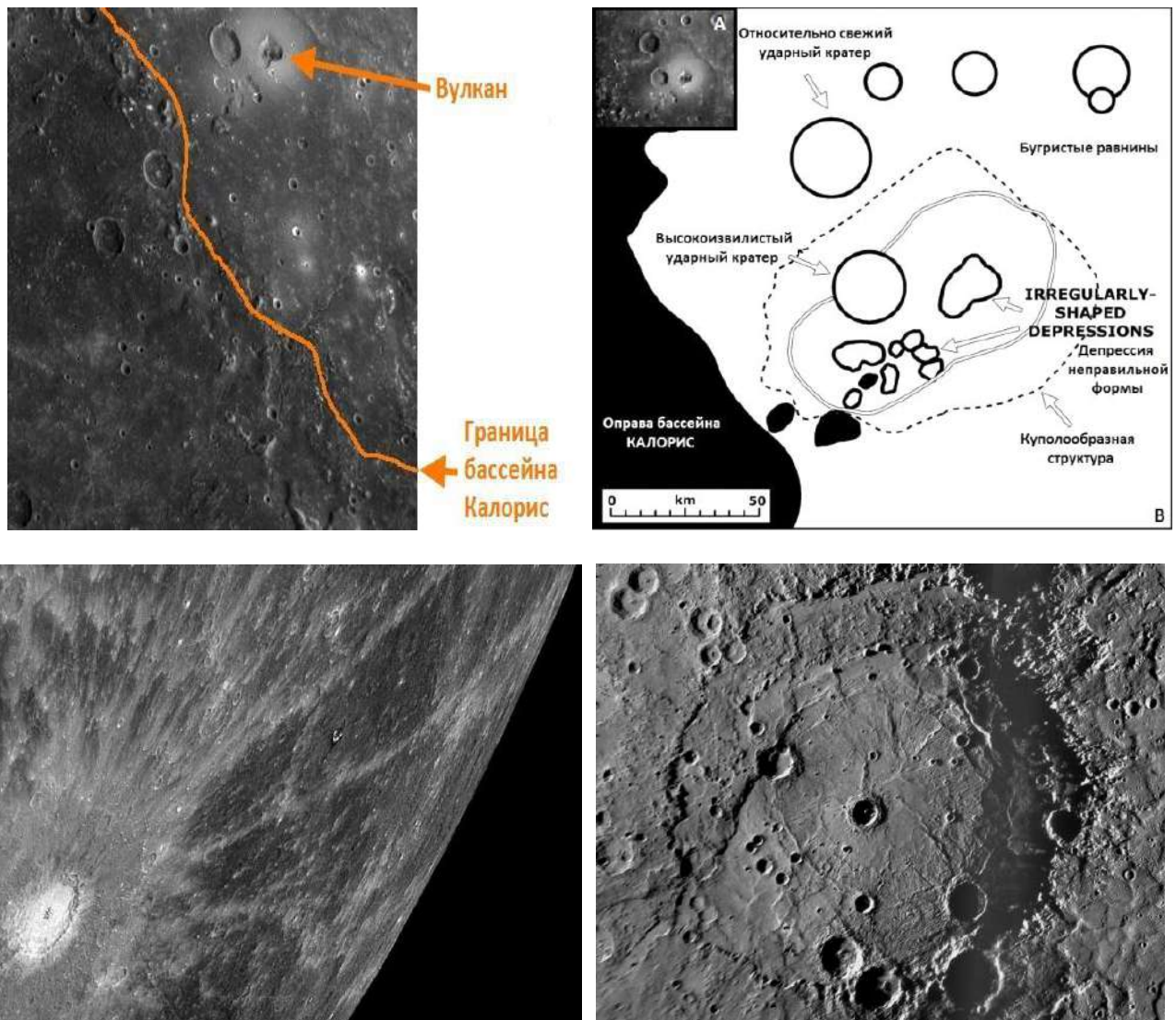


Рис.2.31. Угорі: перший відкритий на Меркурії вулкан з широким конусом (ліворуч) та геологічна схема його будови (праворуч): «депресія неправильної форми» - вулканічне жерло, «куполоподібна структура» - зовнішні межі потоків лави, обмежена подвійною лінією яскрава речовина – викинуті під час виверження із жерла пірокластичні потоки. Унизу: ліворуч – ударний кратер на поверхні Меркурія із радіальними викидами речовини надр довжиною біля 80км; праворуч – один з наймолодших (вік 4млрд. років) ударних басейнів (діаметр 715км) планети – Рембрандт – з виходами багатих на Fe та Ti порід надр, які не перекриті більш молодими потоками лав (фото MESSENGER)

Меркурій досліджувався за допомогою КА *Mariner-10* (США, 1974). 03 серпня 2006 року до Меркурія відправлена АМС *MESSENGER* (від англ. **ME**rcury **S**urface, **S**pace **EN**vironment, **GE**ochemistry and **R**anging), яка, після складної траєкторії у межах Сонячної системи з двома обертами навколо Венери та трьома навколо Меркурію (у січні і жовтні 2008 та у вересні 2009 років), вийде на орбіту планети 18 березня 2011 року.

Контрольні запитання

1. Навести загальну характеристику та спільні риси планет земної групи.
2. Охарактеризувати особливості екзосфери Меркурія.
3. Визначити геологічні процеси та вказати їх результати на поверхні Меркурія.
4. Охарактеризувати зовнішні та внутрішні сфери Меркурія.
5. Які особливості стану ядра Меркурія?.
6. Визначити характеристики магнітного поля Меркурія, його особливості та походження.

2.2.2. ВЕНЕРА

ВЕНЕРА – друга за віддаллю від Сонця планета Сонячної системи, яка схожа на Землю за розмірами (радіус Венери 6052км, Землі – 6378км), масою ($4,87 \times 10^{24}$ кг, що складає 81,5% земної), силою тяжіння на екваторі 8,76 м/сек² (89% земної) при середній густині 5,24 г/см³ і є другим, після Місяця, яскравим об'єктом на нічному небі – товстий хмарний покрив планети відбиває значну частину сонячного світла.

Фігура Венери - тривісний еліпсоїд обертання, в якого полярне стискання на 2 порядки менше земного (полярна піввісь 6051,54+/-0,1км, екваторіальні півосі 6052,02+/-0,1км та 6050,99+/-0,14км відповідно). Центр мас зміщений відносно центра планети на 430+/-120км.

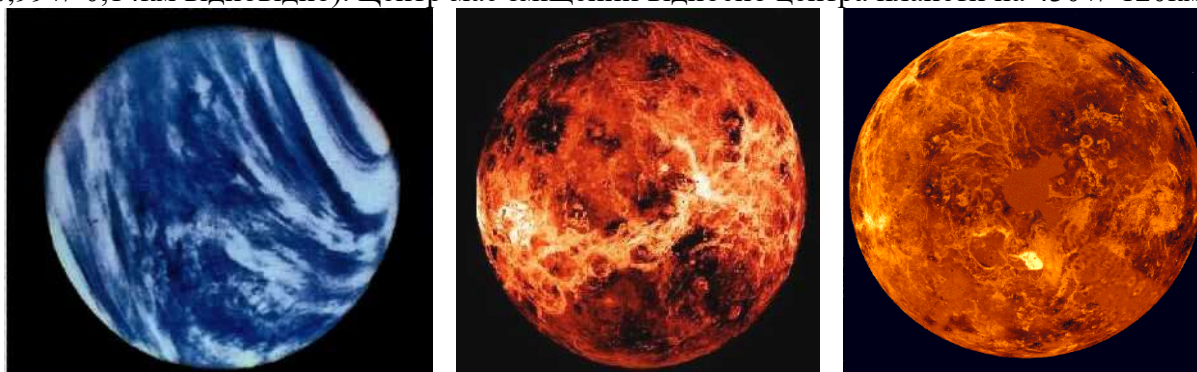


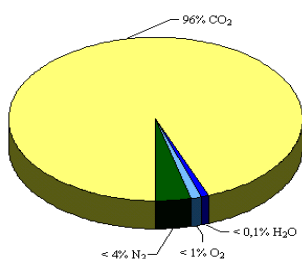
Рис.2.32. Вигляд Венери в ультрафіолетових променях із смугами хмар (ліворуч) та радіолокаційні зображення поверхні планети з яскравою областю (у центрі) – найбільшою висотиною Венери - *Землею Афродіти* посередині диску планети та північної півкулі (праворуч) з яскравою областю нижче центру – *горами Максвелла* (фото AMC *Mariner-10*, *Magellan* (США); *Pioneer-Venus-1*(ЄКА))

Планета рухається навколо Сонця майже коловою орбітою зі швидкістю 35,02 км/сек. за 224,7 земних діб (*венеріанський рік*) на віддалі 108,2 млн. км, але **Венера обертається навколо власної осі у протилежний бік** по відношенню до більшості планет - за годинниковою стрілкою (зі сходу на захід), ніж рухається навколо Сонця орбітою. Орбіта Венери лежить між орбітами Меркурія та Землі у їх площині з найкоротшою віддаллю до Землі біля 40 млн. км. Вісь планети майже перпендикулярна до площини орбіти і тому на Венері немає змін пори року, а тривалість *венеріанського дня* (117 земних діб) постійна, як, мабуть, і погода. Через дуже повільне обертання навколо власної осі (один оберт за 243,16 земних доби, що перевищує венеріанський рік) у **Венери немає сплющення біля полюсів і майже немає магнітного поля**.

У Венери повністю відсутнє **магнітне поле** глибинного походження – її слабкий магнетизм (менше земного на 5 порядків) утворений взаємодією між іоносферою та сонячним вітром. Через відносну близькість до Сонця планета піддана значному припливному впливу і над поверхнею Венери виникає **електричне поле**, напруга якого зростає при наближенні до поверхні. Електромагнітні імпульси електричних розрядів концентруються (рис.2.67) на незначних висотах (до 12км, під нижньою межею хмар) у районах гравітаційних аномалій *гір областей Бета і Феба* та у східній частині *Землі Афродіти* і, на Землі, вони супутні молодим **потужним вулканічним виверженням**. На поверхні планети *Венера-11* зареєструвала 25 розрядів за секунду, а *Венера-12* – близько тисячі, а один гуркіт грому тривав 15 хвилин. Блискавки фіксуються за магнітними сигналами, які супроводжують електричні розряди (магнітні сплески бушували 25% часу 500-денних спостережень Венери європейським КА *Venus Express*), проте блискавки пов'язані не з хмарами, а з потужними виверженнями вулканів.

Розташована ближче до Сонця Венера отримує від нього удвічі більше світла та тепла ніж Земля. Середня **температура** на поверхні Венери досягає +485°C (у районі посадок AMC *Венера-13,-14* температури були +457°C та +465°C відповідно, незважаючи на те, що хмари відбивають 3/4 сонячного світла). Максимальна зареєстрована температура +530°C, проте добові коливання температури незначні ($\pm 10^\circ\text{C}$) і відсутня значна різниця у температурах поверхні Венери на екваторі та в приполярних областях (до $\pm 12^\circ\text{C}$). З висотою температура істотно падає – на вершинах високих гір вона майже на 100°C нижче, ніж на рівнинах Венери.

Атмосфера Венери непридатна для дихання і різко відрізняється від земної (рис.2.67). Вона складається з *вуглекислого газу* CO₂ (96,5%), *азоту* N₂ (біля 3,5%) – разом 99,99%, *діоксиду сірки* SO₂ (0,15%), *кисню* O₂ (0,01%), *водяної пари* (0,02%), *чадного газу* CO (0,017%), інертних газів – *гелію* He (0,012%), *аргону* Ar (0,07%), *неону* Ne (0,017), парів *хлорної* HCl та *плавикової* HF *кислот* тощо. Верхні шари атмосфери Венери (до висоти 5500км) складаються майже повністю із водню. На висоті 100км, у „поясі” атмосфери товщиною 10км, знайдені *гідроксильні групи*, які, ймовірно, пов’язані із *озоном* O₃. Атмосфера Венери дуже щільна - маса (5×10^{20} кг) у 35 разів, а густина - у 50 разів перевищує земну і вона лише в 15 разів менша за густину води – це стан *надкритичної рідини* і вміщує в 105 разів більше газу, ніж атмосфера Землі. На поверхні Венери (район посадок *Венера-13*, *-14*) **атмосферний тиск 89 та 94 атмосфери** відповідно.



Щільна атмосфера утримується тільки за рахунок гравітації, вона поглинає всі короткохвильові сонячні промені і тому постійно захмарене небо Венери завжди має яскравий жовто-зелений відтінок біля горизонту та оранжево-червоно-багряний у зеніті.

Рис.2.33. Хімічний склад атмосфери Венери

Вуглекислий газ (CO₂) в умовах Венери практично не агресивний по відношенню до гірських порід, що не дозволяє йому накопичуватися на поверхні Венери у вигляді *карбонатних порід* (вапняків, доломітів тощо), а, виділяючись у процесі дегазації речовини надр Венери, він залишається у вільному стані і ще більше насичує атмосферу. У верхніх шарах атмосфери планети, над потоками газу, що циркулює у режимі «суперротатії», спостерігається інша циркуляція (рис.2.41). УФ-випромінювання Сонця розкладає *вуглекислий газ* венеріанської атмосфери на *чадний газ* (CO) і атомарний *кисень* (O), який транспортується «сонячними» потоками у термосфері планети на її нічний бік, де атомарний кисень спускається нижче, у мезосферу, і рекомбінує у молекулярний, випромінюючи на довжині хвилі 1,27мкм.

Зафіксовано надходження в атмосферу планети величезної кількості *сірчистого газу* (SO₂) від локальних вивержень *численних вулканів* Венери (рис.2.34). Спектрометром *SOIR (Venus Express)* був визначений вміст *тяжкої води* (D₂O) в атмосфері планети, де зараз її відношення до звичайної води (H₂O) показує наявність такої кількості водяної пари, що її зараз вистачить для покриття всієї поверхні Венери шаром води у 3см. Кількість *тяжкої води* також свідчить, що **у геологічному минулому води на Венері було значно більше і гіпотетичний океан планети міг бути глибиною у декілька сотень метрів**. У хмарному покриві Венери на висоті 20км, крім аерозольної, зафіксовані (дані *Venus Express*, 2006) **краплини сірчаної кислоти**, а **тумани із завислих краплин сірчаної, соляної і фтористоводневої кислот викликають кислотні дощі**.

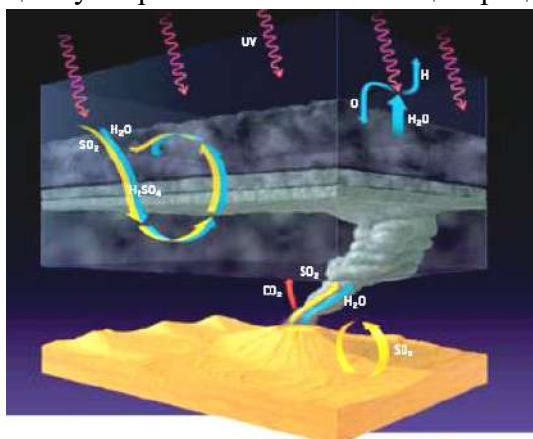
На Венері зафіксовані (*Венера-13*) короткі інтенсивні пориви **твердих опадів** типу земного снігу, які за півгодини «танули» на половину, а поверхня під цією масою потемніла подібно зволоженому земному ґрунту. При температурі +457⁰С і тиску 89 атмосфер критичну *pT*-точку (існування одночасно у трьох фазах) мають небагато речовин, зокрема **анілін і нафталін**.

Потужні вітри діють у верхніх шарах атмосфери, а її маси роблять один оберт навколо Венери всього за чотири земних дні. Це швидке обертання атмосфери (рис.2.32, 2.41) навколо планети, разом із природною циркуляцією теплого повітря, утворили над **південним полюсом** Венери постійно діючий гігантський атмосферний **подвійний вихор** (кожний оберт якого проти стрілки годинника займає 2,79-3,21 земних днів) і форма якого змінюється з висотою (рис.2.35, 2.36). Аналогічний *парний циклон* раніше зафіксували і на **північному полюсі** планети (рис.2.35), де він обертається за годинниковою стрілкою з періодом 2,48+/-0,05 днів. **Швидкість вітру** біля поверхні Венери не перевищує 1м/сек., але через велику густину атмосфери **дія вітру майже близька до дії земних ураганів**.

Хмарний покрив Венери має **3 шари**: на висотах від 70 до 90км знаходиться розріджений **стратосферний серпанок**; на 50-70км – дуже стабільний, місцями густіший, місцями - з більш прозорими ділянками **основний хмарний покрив оранжево-жовтого кольору** через розсіювання цієї частини сонячного світла крупними молекулами CO₂; а на 30-50км –

підхмарний серпанок. Проведені дослідження (АМС *Венера-9,-10*) свідчать, що над *основним шаром хмар*, який сягає висоти 65км і інтенсивно поглинає ультрафіолетові промені, розташований *другий шар хмар* (так званий *надхмарний* чи *стратосферний серпанок*), який складається із мілких частинок, досягає висоти 75км і розсіює ультрафіолетові промені. Дослідження європейського зонда *Venus Express* (2006) показали, що над нічним боком планети непроникливий для світла зірок хмарний покрив піднімається до висоти 90км, а легкий серпанок присутній до 105км.

Постійний хмарний покрив існує тільки вище рівня 50±2км, повністю приховує поверхню планети, “плаває” в її густій непрозорій атмосфері і інтенсивно поглинає половину сонячної енергії, яка поступає на Венеру. Хмари на Венері дуже яскраві (відбивають до 80% світла) і вміщують діоксид сірки (SO_2), аерозольні частинки та краплинки 75-80%-ої сірчаної кислоти (H_2SO_4), водяну пару з домішками соляної (HCl) та плавикової (HF) кислот. Температура у цьому шарі – біля +10°C. Концентрація водяної пари зростає з висотою і досягає максимуму на



висоті 50км, де її у 100 разів більше (до 1%), ніж поблизу поверхні планети. Температура і тиск спочатку падають із зростанням висоти. Мінімальна температура (-100°C – -120°C) зафіксована на висоті 100-120км, при подальшому підйомі вона зростає і на висоті 12 000км складає +300-550°C. Температура хмарних шарів коливається від -70°C до -40°C.

Рис.2.34. Схема атмосфери Венери та процеси у її межах

Дані космічних станцій вказують, що навіть у найгустішій частині основного шару хмар (висоти 57-61км) видимість складає 1-3км (схоже на слабкий земний туман). Структура хмарного покриву на денному та нічному боках планети різна. Найбільш різка межа зміни фізичних параметрів у хмарному покриві Венери (освітленість, густина, прозорість) лежить на висоті 50км, де знаходиться нижній край хмар.



Рис.2.35. Ліворуч: фотомонтаж подвійного атмосферного вихору над південним полюсом Венери та його зміни в інфрачервоних променях. У центрі: атмосферні вихори над північним полюсом Венери (фото *Venus Express*, 2006). Праворуч: комп'ютерна модель перспективного вигляду одного з нагір'їв Венери

На отриманих в ультрафіолетових променях фотографіях видно (рис. 2.32), як спіральні світлі смуги хмар верхнього шару спускаються від полюсів, сходяться над екватором і утворюють характерну Y-подібну форму, а у розривах цих хмар видно темний (в ультрафіолетових променях) нижній шар хмар. Нижче хмарного покриву розташована область *гарячого ідокого туману*, у межах якого на висоті 14км була зафіксована атмосферними зондами *Pioneer-Venus* температура +360°C. Розташований нижче шар – **підхмарний серпанок** – має інший хімічний склад, з'являється тільки у нічний час і поширюється опівночі до рівня 37км і на світанку - до 30км. У полудень серпанок розсіюється. Вважається, що сірчана кислота в атмосфері Венери утворюється з діоксиду сірки (SO_2) вулканічного походження.

Хмари мають складну морфологію і характеризуються тонкими витягнутими смугами. Хмарний покрив стрімко переміщується (у 60 разів швидше, ніж планета обертається навколо осі) над поверхнею планети і за 4 земних доби робить повний оберт навколо Венери із заходу на схід - у протилежному обертанню планети напрямі. Вітри у ньому на висоті 50-60км

досягають понад ураганних (більше 12 балів) швидкостей – 100-710м/сек. (близько 400км/год). При наближенні до поверхні планети, починаючи з висоти 20км, швидкість вітру різко зменшується і на висоті 10км складає всього 3м/сек. (біля 10км/год). На самій поверхні Венери (на висоті 1м) вітер дме зі швидкістю 1,0м/сек. (2-4км/год). Але слід пам'ятати, що на Венері цей вітер у повітрі, яке у 50 разів густіше земного, створює значно потужніший тиск. На більших широтах Венери швидкість вітру на більших висотах зменшується, а поблизу полюсів існують *полярні вихори*. КА *Mariner-10* зафіксував, що атмосфера Венери піддана постійним збуренням - вздовж екватора розташовані обширні ділянки високого тиску, де сонячний нагрів породжує *конвекційні потоки*, що порушують основний рух хмарного покриву і утворюють *вихори*, які рухаються у напрямі полярних областей. Хмарний покрив на екваторі Венери рухається зі швидкістю, характерною для струминних течій на Землі (біля 100м/сек.). У полярних областях швидкість досягає 200м/сек., а біля полюсів може бути дозвуковою.

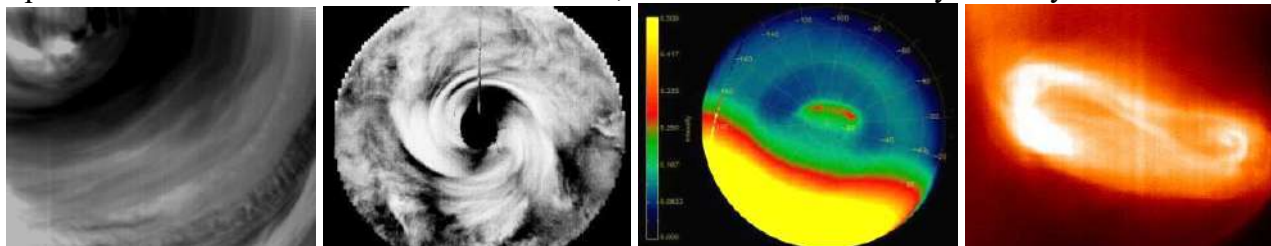


Рис.2.36. Зліва – праворуч: гігантська чорна лійка бурхливого атмосферного вихору над південним полюсом Венери (два фото *Pioneer-Venus*); лінія термінатора (лінія поділу денного – жовтий колір і нічного боків – синій колір) із зображенням подвійного ока цього вихору та інфрачервоний огляд подвійного вихору (фото *Venus Express*, 2006)

Геоморфологія поверхні. Венеру не можна вважати планетою, на поверхні якої завмерли всі геологічні процеси перетворення речовини. Венера – планета **вулканів, кратерів** та гігантських **рифтових долин**. Її поверхня відносно молода – від 300 до 500млн. років. Головні деталі рельєфу Венери – **материки** (*Земля Іштар*, *Земля Афродіти*, *область Бета*), покриті *потоками застиглої лави розлогі рівнини, гірські масиви* із слідами *тектонічної активності* тощо.

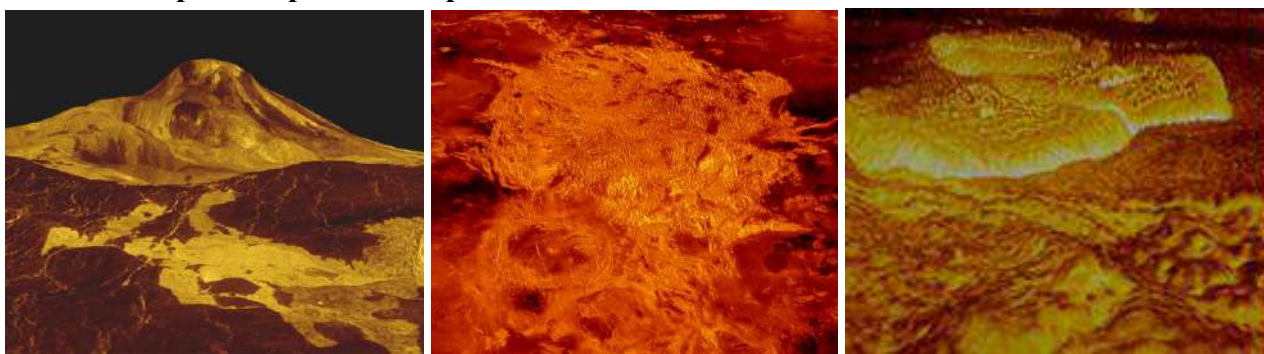


Рис.2.37. Тривимірні панорами Венери: найбільший вулкан Венери – *гора Маат* зі свіжими лавовими потоками (ліворуч); перспективний вигляд *області Альфа* (2000км упоперек) із кільцевою структурою - *вінцем* на південному заході (у центрі); екструзивний купол в'язкої лави діаметром 25км і висотою 750м на північному сході *області Альфа* (праворуч) (за радіолокаційними даними *Magellan*, *NASA*, *JPL*)

Перші радіолокаційні карти (рис.2.38, 2.41) показали, що більша частина (85%) поверхні Венери покрита **розлогими рівнинами** з коливаннями висот (від умовного нуля - поверхні сфери радіусом 6051км від центра планети) у межах $\pm 0,5$ км (51%) та $\pm 1,0$ км (81,5%), а на гірські райони (перевищення понад 2км) приходить всього 8% поверхні планети. Найнижча ділянка поверхні Венери лежить на глибині 2,5км від середнього рівня висот. Чітко виділяються кілька **високогірних масивів**, зокрема схожі на земні континенти два великі підвищення.

Найбільший гірський район – *Земля Іштар* - розташований у Північній півкулі, площею він удвічі перевищує Тибет та має найвищі на Венері *гори Максвелл* (рис.2.38, 2.56, 2.66). Гірські хребти *Землі Афродіти* (розміром з Африку) простягнулися на тисячі кілометрів вздовж екватора у Південній півкулі. Крім того, існує ряд гірських масивів, зокрема *область Бета* -

складається з двох *гір Реї* і *гір Тейї* – це великий щитовий вулкан висотою 4-5км (рис.2.43). Перепад висот вздовж екватора біля 5км. У розподілі рівнин та гір на Венері помітні елементи *широтної зональності* (рис.2.38) – існує північна полярна низовина (*рівнини Снігуроньки та Лоухи*), яка обмежена з півдня гірською країною *Землі Іштар*, а також височинами *областей Метиди і Тейї*, які обриваються найнижчою (до -1,5км) низовиною *рівнини Аталанта*.



Рис.2.38. Циркумполярна субширотна зональність крупних масштабних орографічних структур Венери (за даними *Pioneer Venus-1*)

Південніше розташована наступна широтна зона низовин (*рівнини Гіневри, Седни, Берегині, Леди, Ніоби, Велламо, Ганіки і Кавелу*) з деякими відносно невеликими областями *височин Астерії, Бети, Ейстли, Белл, Телури* і частиною *області Ульфрун*.

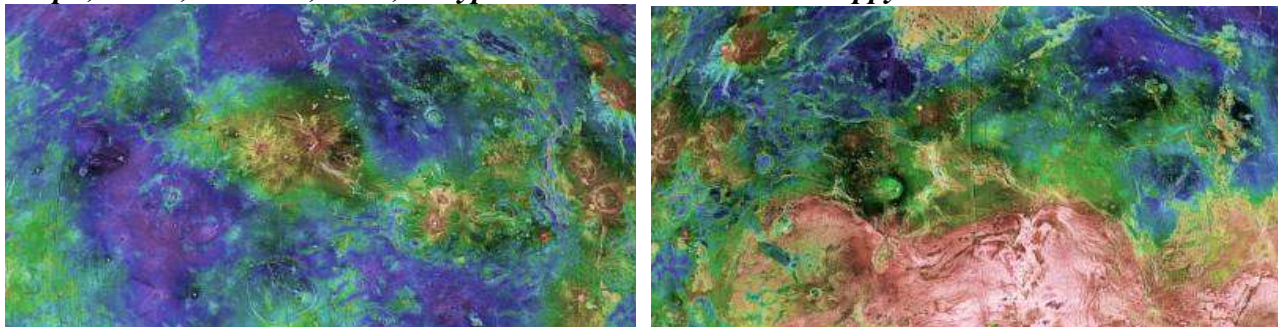


Рис.2.39. Область Метиди (ліворуч) та північно-західна частина Землі Іштар (праворуч) на Венері (радіолокаційні дані КА *Magellan*)

Зона підняття біля екватора – гірська країна *Землі Афродіти* і області *височин Феби і Альфи*.

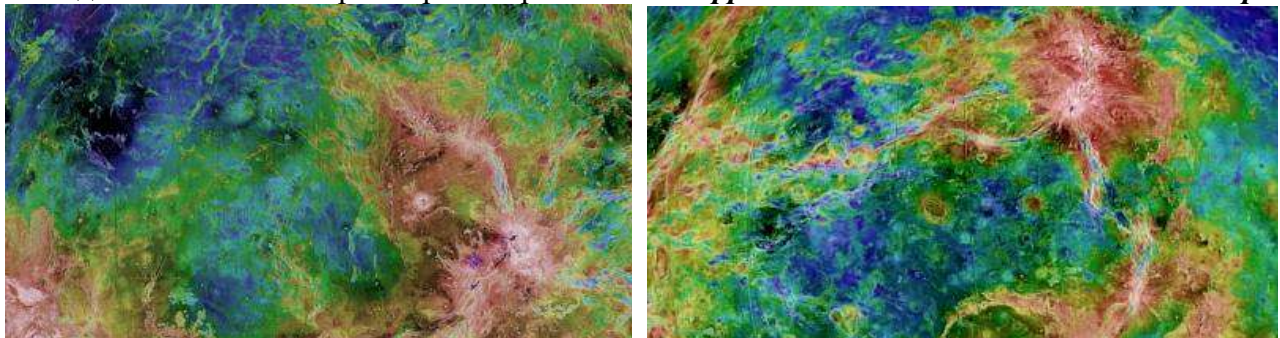


Рис.2.40. Ліворуч: Земля Афродіти із кільцевими структурами – вінцями та вузькими грабенами; у центрі – *рівнина Русалки* (місце посадки АС *Вега-1,-2*); пляма правіше центру – *гора Маат*. Праворуч: гірська область Альфа (РЛ-дані КА *Magellan*)

У південній півкулі поширена зона південних низовин – *рівнини Єлени, Лавинії і Айно*, серед яких розміщені невеликі і невисокі підняття *областей Феміди та Інд*. Південна зона підняття представлена відносно невисокою *гірською країною Землі Ладі*. Радіолокаційні карти Венери, побудовані за даними КА *Magellan* (рис. 2.39, 2.40, 2.41, 2.66), нараховують 20 рівнин, 16 долин, 27 грабенів (найдовший *Хілдр (Hildri)* тягнеться на 6680км), 42 гори та 543 кратери.

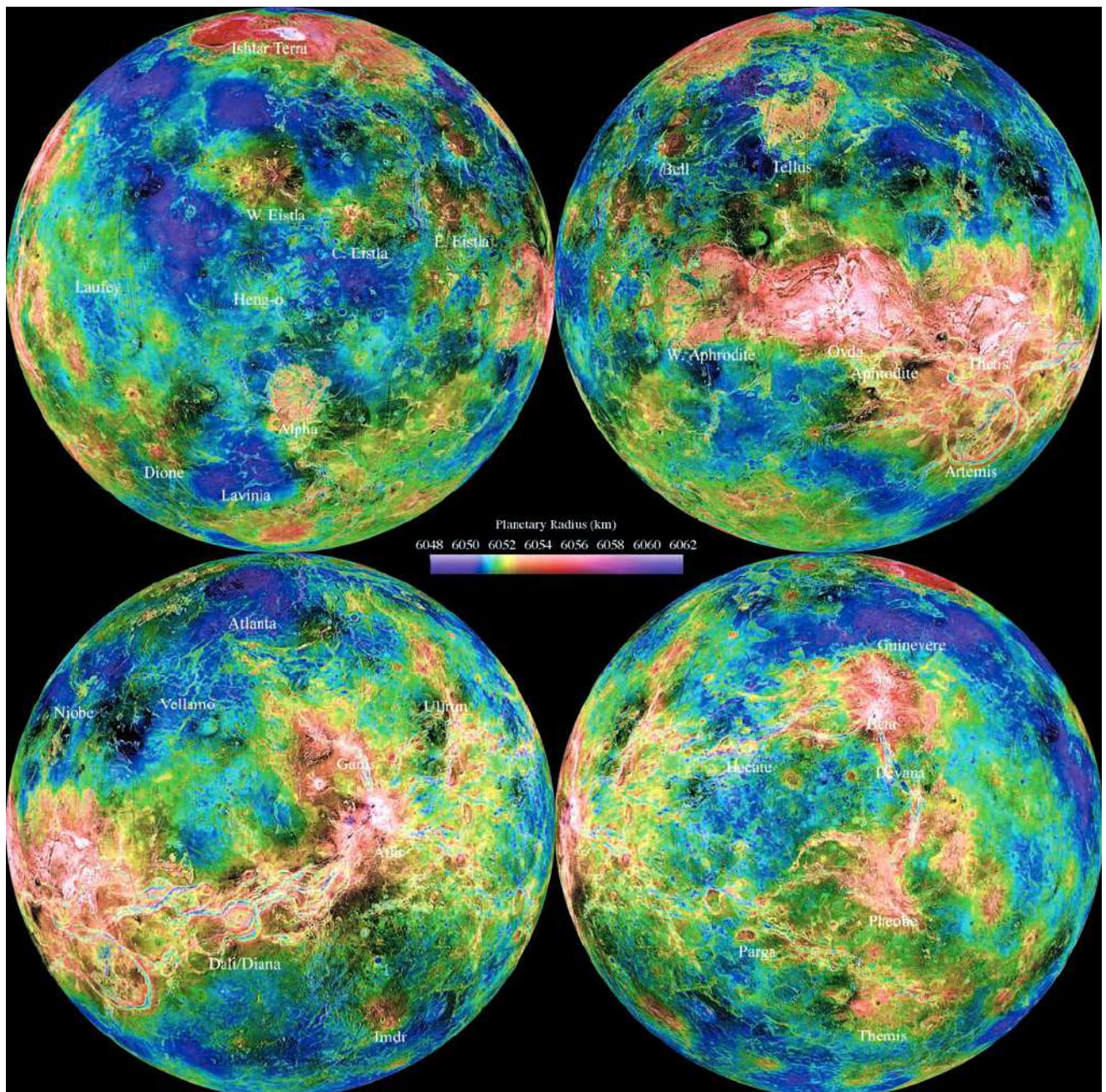
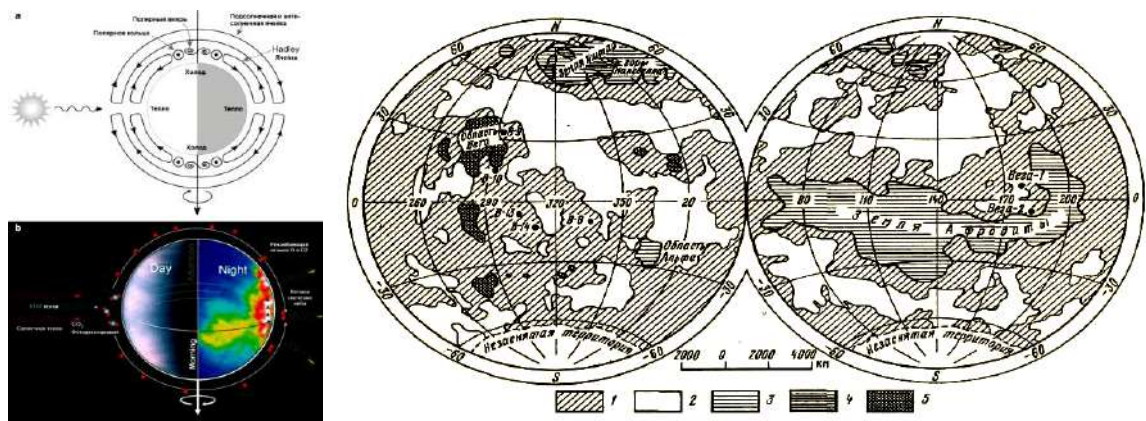


Рис.2.41. Угорі: ліворуч – схема циркуляції атмосфери Венери із подвійними вихорами полюсів та конвекційними струменями; праворуч - структурна карта поверхні Венери: 1- горбисті рівнини; 2- низовинні рівнини; 3- підвищення; 4- гірські хребти і масиви; 5- вулканічні споруди; В-1, В-2 – місця посадок *Вега-1*, *Вега-2*; В-8, В-9, В-10, В-13, В-14 – *Венера-8*, *-9*, *-10*, *-13*, *-14* відповідно. Унизу: *Венера* без хмарного покриву (найвищі ділянки Венери - гори *Максвелл* і гора *Маат*, різниця висот між низовинами і нагір'ями – 4км, гори – на 2км вищі) (РЛ-дані КА *Magellan*, 1990-1994)

Вчені США стверджують, що *через високу температуру на планеті більшість металів перебуває у стані випаровування - вони піднімаються в атмосферу і осідають на високих елементах рельєфу у вигляді піриту (FeS_2), галеніту (PbS) тощо, а утворена ними металева кірка на горах Максвелла та ін. і пояснює високу радіолокаційну відбиваючу здатність поверхні Венери.* За їх розрахунками, основними складовими металевого покриття Венери є *Pb і Bi.*

Ендогенні процеси. Тепловий потік з надр планети досить значний (10^{-5}Вт/см^2) і підтримує потужні вулканічні процеси в літосфері Венери, тектонічна активність надр планети невелика. Геологічна будова Венери характеризується *відсутністю ознак проявів тектоніки плит*, у земному розумінні цього терміну, в той же час на планеті відбувалися специфічні **вулканотектонічні процеси**, які сформували *вулканічні рівнини, віңці, арахноїди, тессери*, пояси *лінійно-гравітаційних дислокацій* на рівнинах, гігантські *кільцеві структури (овоїди)* за рахунок мантийних діапїрів та поширені *рифтоподібні* структури тощо.

Вулканічні утворення представлені перш за все *вулканічними рівнинами*, які займають 3/4 вивченої поверхні планети: сама їх рівнинна поверхня утворена, ймовірно, за рахунок проявів потужного площинного вулканізму, але апікальні частини деяких опуклих рівнин (з поверхнею явно вулканічного походження та з нахиленими схилами окраїн) посічені системою тріщин розтягування від сумісного прояву вулканічних та тектонічних процесів, що дозволяє класифікувати їх як *вулканічно-тектонічні підняття*.

Вулканічні рівнини – великі відносно рівні ділянки поверхні Венери, що часто ускладнені *грядами, валами, куполоподібними та іншими підняттями, депресіями різних форм і розмірів, які можуть мати як накладений характер, так і вигляд залишкових останців.*

Радіолокація планети (АМС *Венера-15, -16* і *КА Magellan*) дозволила виявити, що у рельєфі скелястої поверхні Венери широко поширені *сформовані нашаруваннями вулканічних лав розлогі рівнини кількох типів - гладенькі (утворені рідкими потоками базальтів) та горбисті (з численними конусами та куполами до 5-10км у діаметрі, іноді – з вершинними кратерами).*

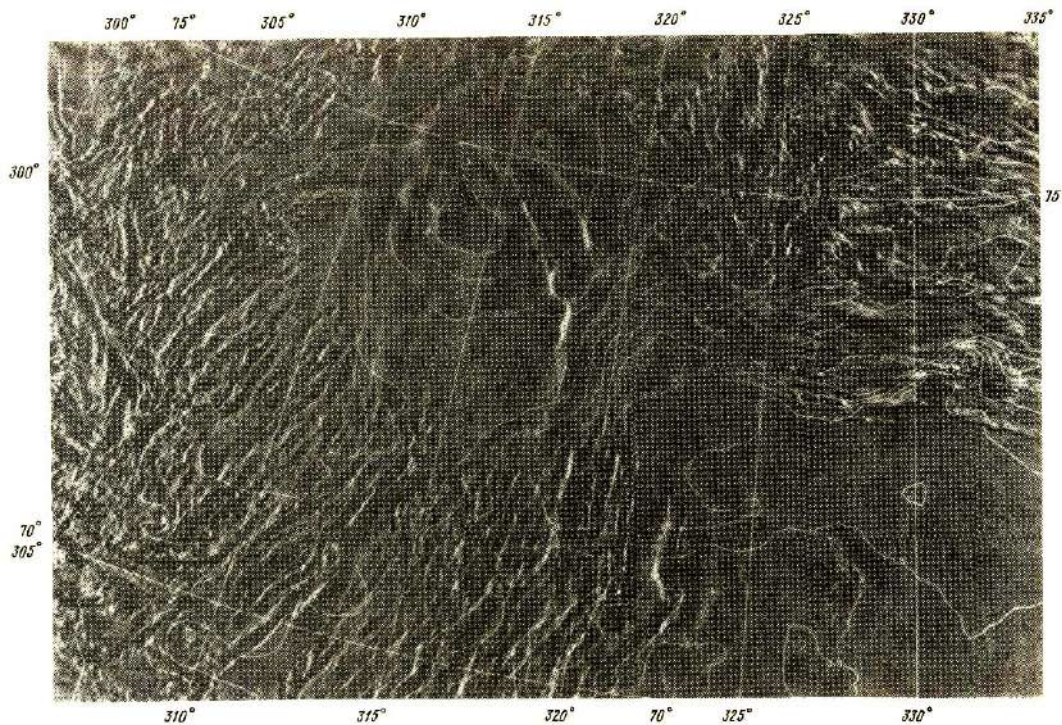


Рис.2.42. Радіолокаційне (РЛ) зображення північно-західної окраїни плато Лакімі у місці зчленування гір Акни і Фреї з депресіями вулканічних рівнин. Масштаб 1:4 000 000 (радіолокаційні дані *Венера-15, -16*)

Верхній шар планети складений переважно виверженими породами з середньою густиною $2,7 \text{г/см}^3$, а морфологія лавових потоків, у поєднанні з результатами визначення хімічного складу порід у місцях посадочних модулів АМС (*Венера-8, -9, -10, -13, -14; Вега-1, -2*), свідчать про те, що це *базальтові лави.*

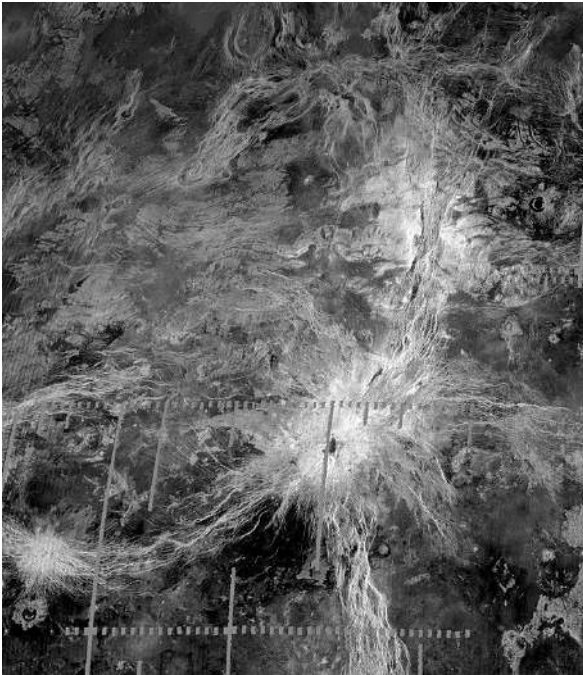


Рис.2.43. Височина області Бета з двома великими вулканічними масивами – *горами Тейї* (світлий район у центрі) та *горами Реї* (вгорі) (РЛ-дані *Magellan*)

Деякі рівнинні ділянки покриті скупченнями відносно мілких *склепінчастих підняттях* до 10-20км діаметром, які нерівномірно розподілені на поверхні, накладені на всі відомі геологічні структури, утворюють групові скупчення по кілька десятків куполів на площі до 50-80км упоперек та оточені радіолокаційними яскравими гало можливих молодих *лавових потоків*. Іноді на вершинах відносно крупних куполів (8-20км) спостерігаються *кратери вулканів* (рис.2.57). Більш крупні *вулканічні споруди* зустрічаються рідко і від земних вулканів відповідних розмірів вони відрізняються значно меншою висотою і по

суті є низькими *щитовими вулканами*. На вулканічних рівнинах поширені також депресії *кальдер*, довгі *гірські хребти*, а також *ударні кратери*.

Вулканічно-тектонічні підняття - крупні підвищення з переважно рівнинним рельєфом та похилими схилами, які утворені за рахунок підняття місцевості (переважно рівнин, вінців і тессер) у вигляді куполів. Найбільші з них – області Бета (рис.2.43), Белл, Ульфрун і Метиди.

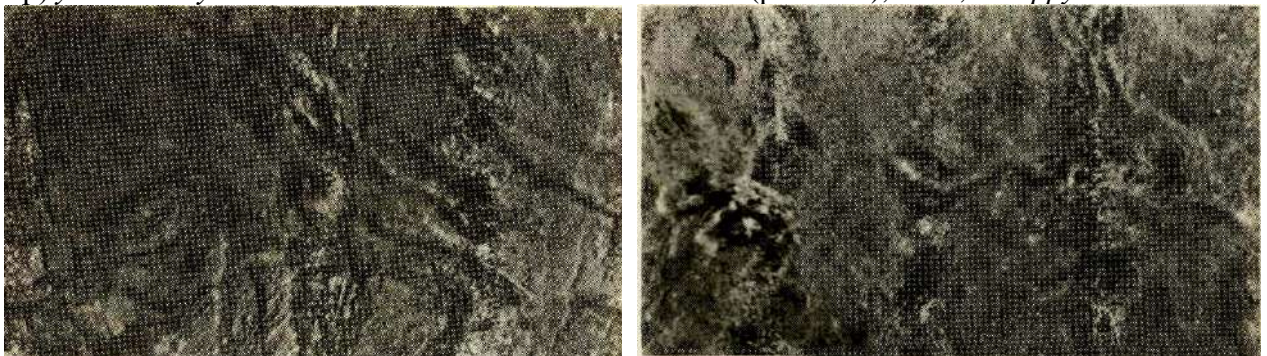


Рис.2.44. Підняття Бета: ліворуч - *гряди і вулканічний купол на рівнинній поверхні* (250×400км); праворуч – *діагональна система лінеаментів північної частини* (250×400км) *Бети* (дані *Венера-15,-16*)

Формування підняттях супроводжувалося формуванням *тріщин розтягування* у skleпінних куполів та площинними виливами *базальтових лав*, утворенням скупчень відносно невеликих *куполів* і крупних *щитових вулканів*. Характерно, що лінійні зони розтягувань, які фактично є своєрідними осями цих skleпінчастих підняттях, виходять за їх межі.

Вінці – унікальні, що не мають аналогів на інших планетах, *круглі, овальні або іншої форми вулканічно-тектонічні підвищення*, які утворилися в результаті дії підіймаючихся мантійних плюмів і складаються з кільцевої системи *гірських хребтів периферійної зони стискань та центрального плато зони розтягування* (рис.2.45, 2.46, 2.55, 2.63).

Центральне плато розташоване нижче гірських гряд, але вище за оточуючу рівнинну місцевість. Вінці формуються під впливом гравітаційної релаксації на верхні шари літосфери підіймаючихся мантійних діапирів. Розміри вінців коливаються від 150 до 600км, а найбільш вірогідним механізмом їх формування можуть бути або підйом магматичного купола над „гарячою точкою” надр і (та) його добудовування вулканічним апаратом, чи колапсовані магматичні діапіри. Кільцеве обрамлення вінців складається із систем густої чи розрідженої тріщинуватості широких або вузьких гряд із загальним концентричним або радіально-концентричним рисунком. Частина цих структурних елементів молодша за оточуючі рівнини, частина – давніша, що свідчить про багатозафазове формування цих вінців.

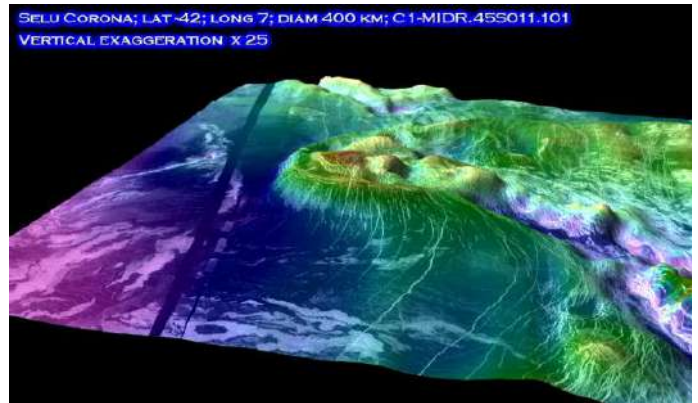


Рис.2.45. РЛ-зображення 200-кілометрового *вінця Айни* у південній частині *Землі Афродіти* з куполами виливів тріщинами лав у центрі, північніше та вздовж південного краю вінця (масштаб 1:4млн.; РЛ-дані *Венера-15,-16*). Праворуч: тривимірний модель вулканічно-тектонічної радіально-концентричної структури – *вінця Селу* – із світлими тріщинними лавовими потоками (дані NASA)

Явні аналоги вінців Венери на інших планетах земної групи невідомі. Серед кільцевих гір знаходяться низькі *щитові вулкани* і *метеоритні кратери*.

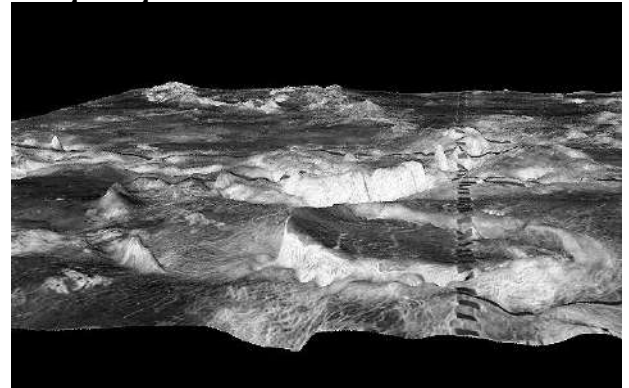
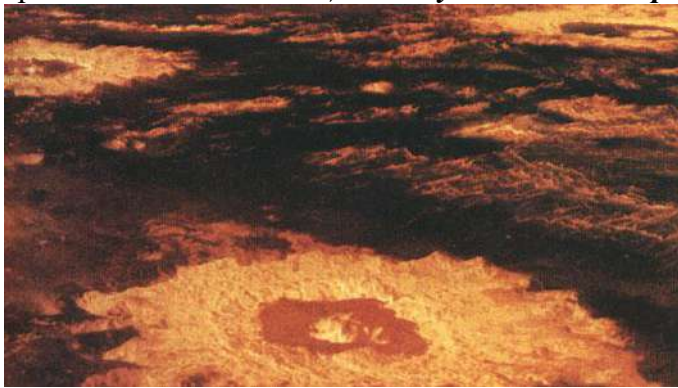


Рис.2.46. Перспективний вигляд Венери з рідкими елементами пейзажу - ударними кратерами: *Саскія* (діаметр 37,3км) на передньому плані, *Данілова* (49км) - ліворуч та *Аглаоніс* (62,7км) – праворуч. Внутрішні області кратерів заповнені *лавою*, мають *центральної гірки* та по краях оточені *масами подрібненої породи* (світлий фон), яка була викинута назовні при ударах метеоритів (дані Magellan).

Праворуч – тривимірний модель *вінця Атлети* (дані NASA)

Арахноїди (лат. *arachnoid* – павук) – *концентричні структури* від 20-40 до 150-180км *упоперек*, які оточені *сікучими навколишню поверхню* радіально розташованими *грядями* шириною 5-10км та широкими *світлими пасмами* довжиною до 100-200км, що разом формують *утворення павукоподібної форми*.



Рис.2.47. РЛ-зображення скупчення *арахноїдів* (500×500км) *гряди Аушри* і *борозни Сигрун* (ліворуч) та *ізолювані арахноїди* на північний схід від *купола Белл* (у центрі) та від *купола Телури* (праворуч) (обидва 300×300км) (радіолокаційні дані АМС *Венера-15,-16*)

Арахноїди приурочені в основному до вулканічних рівнин, де вони або піднімаються (на перші сотні метрів) над їх рівнем, або повністю занурені (місцями на 0,5-1,0км на віддаль 100-200км від центра структури) у похилих депресіях рельєфу. Один з можливих механізмів утворення арахноїдів: над відносно неглибокою проміжною магматичною камерою відбувається виверження лав із накопиченням їх у вигляді округлого склепінчастого підняття (фундамент майбутнього арахноїда) та формування системи сікучих радіальних дайок у вигляді гряд і пасм або шляхом витиснення на поверхню в'язких лав у вигляді валів, чи за рахунок зон піднятих і, можливо, змінених порід над заповненими магмою тріщинами. Після часткового спорожнення магматичного осередку у процесі виверження, з падінням у ній тиску, обрушується покрівля камери і просідає центральна частина склепінчастого підняття із формуванням у кальдері нового вулкана, лави якого покривають раніше утворені дайки, але не поширюються на край депресії. Потім цикл повторюється і одночасно із оточуючою місцевістю просідає вся вулканічна споруда. Таким чином, *відбувається нарощування вулканічної споруди, але не вгору, а у глибину.*

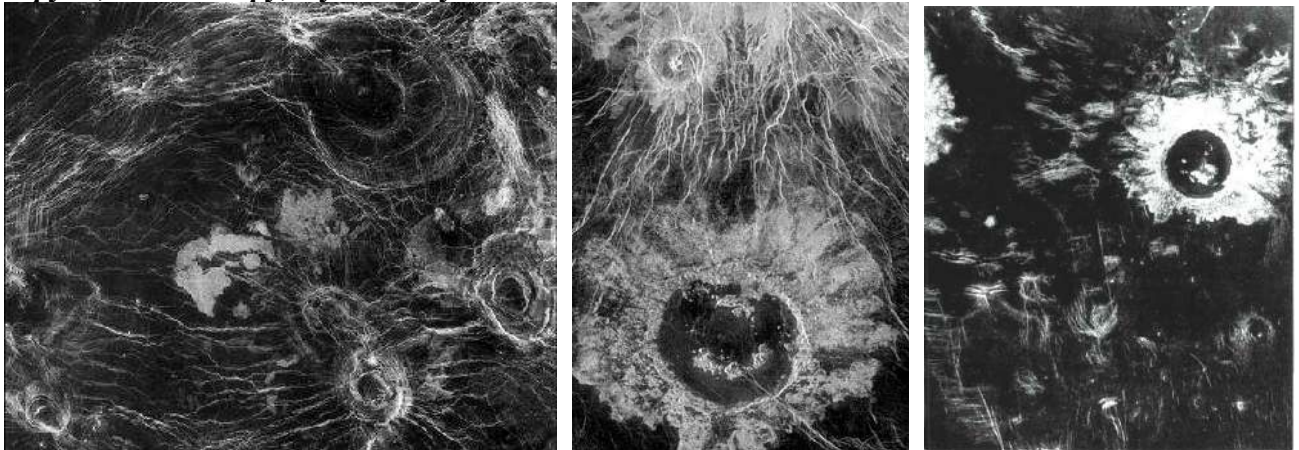
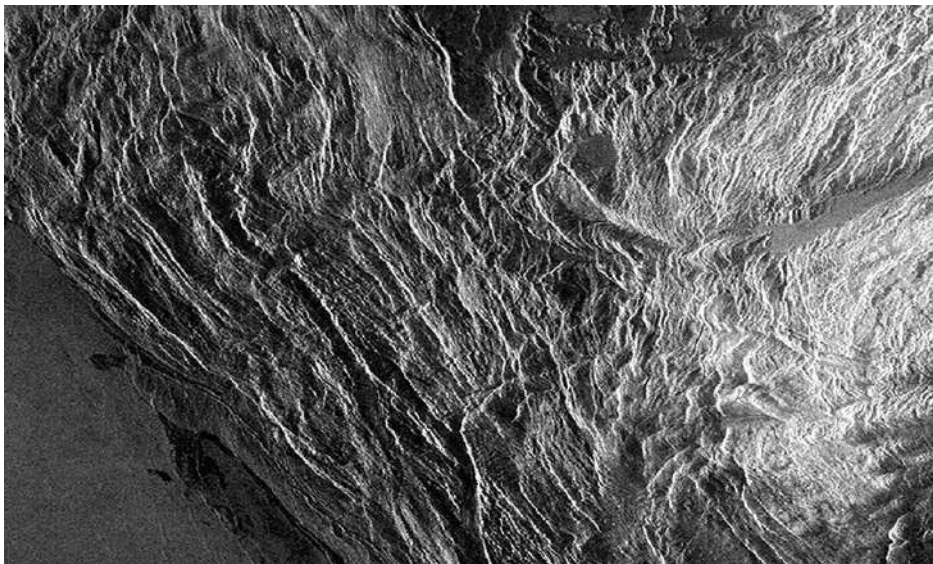


Рис.2.48. Ліворуч: мозаїка характерних тільки для Венери сотень вулканічних структур – арахноїдів (розміри від 50 до 230км) - подібної до павутини сітки тектонічних тріщин у корі планети, під якими магма намагається вирватися на поверхню і піднімає породи кори у вигляді склепінчастих підняття та куполів. У центрі і праворуч: заповнені лавою ударні кратери (до 50км шириною) на рівнині Лавинії, а світлі утворення у вигляді пелюстків навколо кратера знайдені тільки на Венері і являють собою маси подрібнених ударами та викинутих із кратерів порід (РЛ-зображення *Magellan*)

Арахноїди Венери схожі на земні вулcano-плутонічні комплекси центрального типу і відрізняються від них переважанням радіальних дайок, більшими діаметрами та меншими висотами вулканічних споруд через меншу потужність розжареної літосфери Венери, її більшу пластичність та близькість до поверхні магматичних осередків. Згідно однієї з теорій, арахноїди передували вініям.



Тектонічні утворення на Венері представлені 3-ма типами структур, які всі відповідають підняттям різних масштабів: *структура Лакимі із гірським обрамленням, тессери і пояси лінійних дислокацій на рівнинах.*

Рис.2.49. Гори Акни з північного заходу обрамляють плато Лакимі (дані *Magellan*)

Структура Лакшмі включає плато Лакшмі з його виступом аж до гір Максвелла та гірське обрамлення плато, які разом утворюють єдину грубу концентричну структуру із розвиненими в її межах генетично пов'язаними утвореннями вулканічного і тектонічного походження та накладеними на них ударними кратерами.

Поверхня плато Лакшмі безсумнівно покрита потужними виливами базальтових лав та має **структури тектонічних деформацій**, що утворені в умовах **розтягування кори** планети (кальдери тощо) та **гірські системи** обрамлення плато явно **тектонічного походження** за **умов стискування** з незначними **зсувними процесами** на границях певних сегментів.

У цілому, вся структура є результатом процесу підйому гарячої речовини надр планети із проявами потужного, що утворює плато, вулканізму в умовах розтягування кори у місцях підйому речовини та процесами її стискування по периферії. Значні розміри **плато Лакшмі** та його гірського обрамлення (1600×2300км) допускають значну вертикальну протяжність висхідного пластичного потоку речовини надр, яка порівнюється з потужністю мантії Венери в цілому, а присутність ударних кратерів на плато вказує на досить давній (не менше сотень мільйонів років) вік закладання цих структур із досить молодими останніми проявами затухаючої активності надр.

Тессери (грец. „черепиця”) – *подібні до плато підвищення і нагір'я розмірами від сотень до тисяч кілометрів, поверхня яких являє собою хаотичні нагромадження тектонічних структур – вона пересічена у різних напрямках численними гірськими хребтами та розділюючими їх жолобами-долинами із утворенням ромбічних, U-подібних, петлевидних та інших фігур, які мають вигляд черепичної покрівлі із численними східчастими перепадами висот.*



Тессери утворені в результаті багатократних складних тектонічних рухів верхніх шарів Венери, які супроводжувалися розломами, підняттями та опусканнями різних ділянок поверхні.

Рис.2.50. Одна з найдревніших форм рельєфу Венери із пересічення хребтів та долин - тессера (125×150км) в області Альфа (дані Magellan, NASA, JPL)

Головна морфологічна риса тессер – поєднання різних за формою та розмірами лінійно витягнутих на сотні кілометрів, гострих чи заокруглених з плоскими вершинами та вертикальними уступами (типу земних стрічкових грабенів і горстів) гірських пасм. Між собою пасма розташовані лінійно, іноді паралельно, подібно кулісам чи у вигляді петель. Іноді вони нагадують зморщену плівку чи канатні лави базальтів Гавайських островів, а можуть коліновидно вигинатися подібно до шевронних складок.

Лінійні пасма та їх пояси розвинуті у межах рівнинних ділянок поверхні Венери і формують протяжні (до 2000км і більше) системи вузьких валоподібних підняттяв чи пасм, які об'єднані у пояси шириною у перші сотні кілометрів. Ширина окремого пасма чи валу складає перші кілометри, рідко до 10км, а на рівнинах їх ширина скорочується до 1км. Ширина гірських пасм та борозен тессер 5-10км, іноді до 20км, а довжина – десятки, рідше перші сотні кілометрів. Висота пасм 1-2км, а уступів – до 1км.

Тессери являють собою своєрідні „острови” та „континенти” нехарактерного для інших планет, нового типу дуже пересіченої місцевості.

Один з досить поширених структурних малюнків тессер характеризується наявністю подібних до панцира черепахи, дещо припіднятих над пониженими ділянками, ромбів чи прямокутників. Такі тессери часто пересікаються тонкими лініями: розсувами, тріщинами чи грабенами. Борти грабенів часто східчасті. Місцями спостерігається ортогональна структура

тессер, утворена взаємно пересіченими пасмами, грядами чи валами, які утворені різними тектонічними силами у корі планети – від стискання до розтягування. Найпоширенішими та найдовшими є долини та *гірські пасма*.

Структури діагонального перехрещування цих лінементів на поверхні невеликих ділянок тессер із утворенням певного узору названі паркетом (рис.2.51).

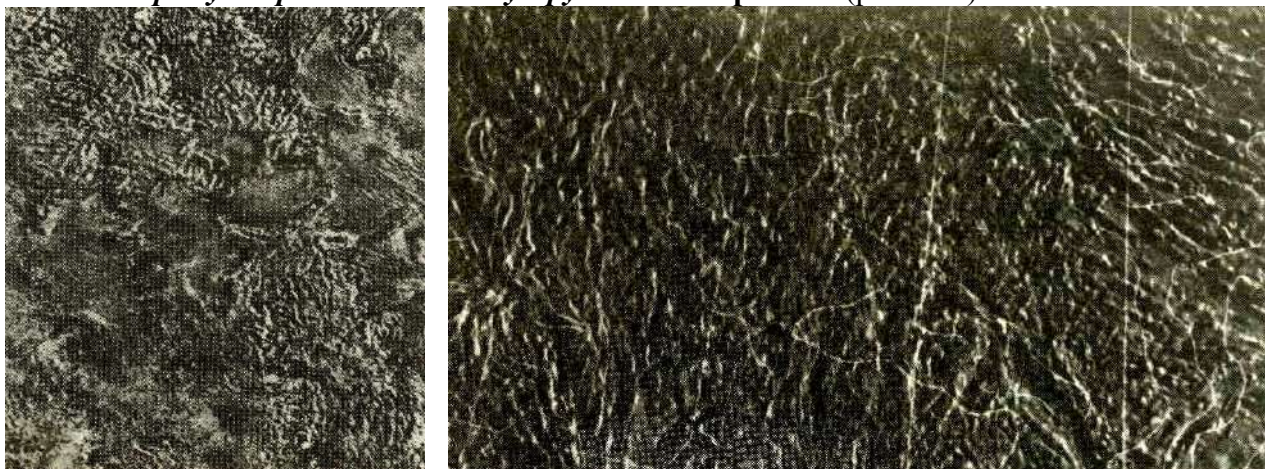
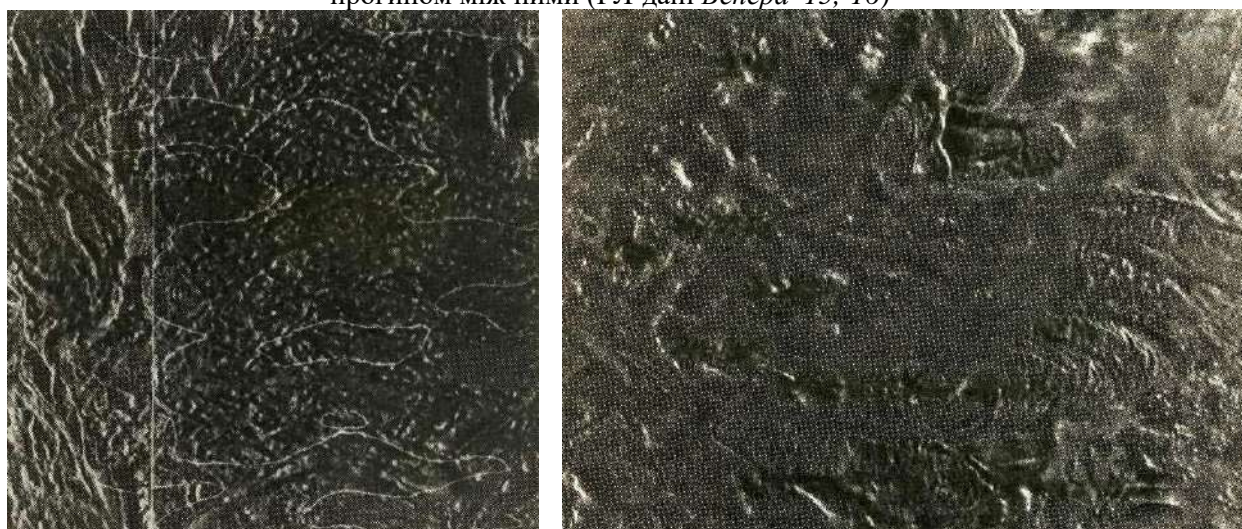


Рис.2.51. Угорі: *хаотичний паркет* південної частини (420×540км) тессери Лайми (ліворуч) та *ромбічний паркет* північно-західної частини (640×360км) тессери Фортуни. Унизу: ліворуч - *шевронний паркет* (V-подібні структури течії) купола Телури (460×460км); праворуч - *ортогональний паркет* (унизу) тессери Мешкенет (720×540км) із деформованим вінцем (ліворуч угорі) та подібним до грабена прогином між ними (РЛ-дані *Венера-15,-16*)



Структурний малюнок тессер пояснюється горизонтальними розгалуженнями потоків пластичної речовини астеносфери, коли висхідні струмені розтягуються і потоншуються в одних та скупчуються і стають більш потужними в інших місцях під літосферою. Формуються потужні підняття прогрітої венеріанської кори над цими потоками з горизонтальними напруженнями в них та процесами термічно-гравітаційного сповзання верхнього крихкого шару тонкої літосфери по пластичному нижньому шарі з попутними розколюваннями та деформаціями утворених уламків кори певних узорів. **Встановлено, що утворення тессер передувало лавовим виливам, які сформували рівнини.**

Тессери „континентів” і „островів” серед рівнин займають близько 8% поверхні планети. Тессери є древнішими за всі попередні різновиди рівнин, матеріал яких, у контакті з тессерами, заходить по пониженнях у рельєфі у межі блоків тессер. Складається враження, що **тессери утворюють фундамент під значною частиною рівнин, а, можливо, і під усіма рівнинами.** За результатами зйомки КА *Magellan* виходить, що в історії тектонічних порушень, які сформували видимий вигляд тессер, можливо виділити більш **ранній етап деформацій стискання** та наступний за ним більш **пізній етап деформацій розтягування**.

Пояси лінійно-гравітаційних дислокацій на рівнинах – являють собою смуги зближених невисоких гряд та розділяючих їх борозен, які є паралельними загальному простяганню пояса при його ширині від перших десятків кілометрів у місцях звуження пояса, до 200-250км при його розширеннях за рахунок об'єднання кількох поясів. Загальна довжина окремих поясів 1500-2000км, а вся їх система простягається на 5000-6000км від полярної області аж у південну півкулю і нагадує серединно-океанічні хребти Землі.

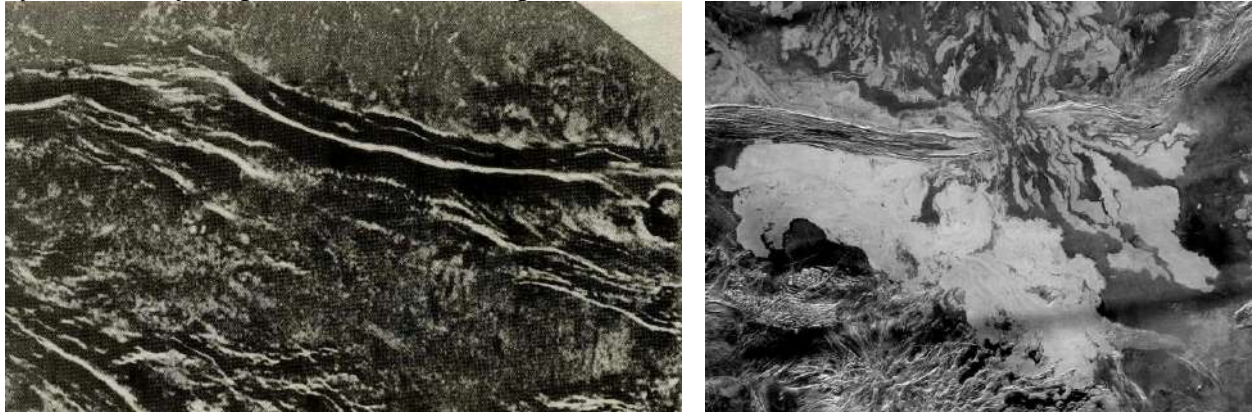


Рис.2.52. Ліворуч: субмеридіональне пасмо Лукелонг (470×825км); праворуч: лавовий потік на Венері (РЛ-дані Венера-15,-16 і Magellan)

Однозначного пояснення походженню поясів немає. Ймовірніше, вони являють собою *шовні зони* (певні системи розломів глибокого закладання) між блоками кори планети, а характер рухів, дислокацій та магматизму в їх межах змінювався і у просторі, і у часі.

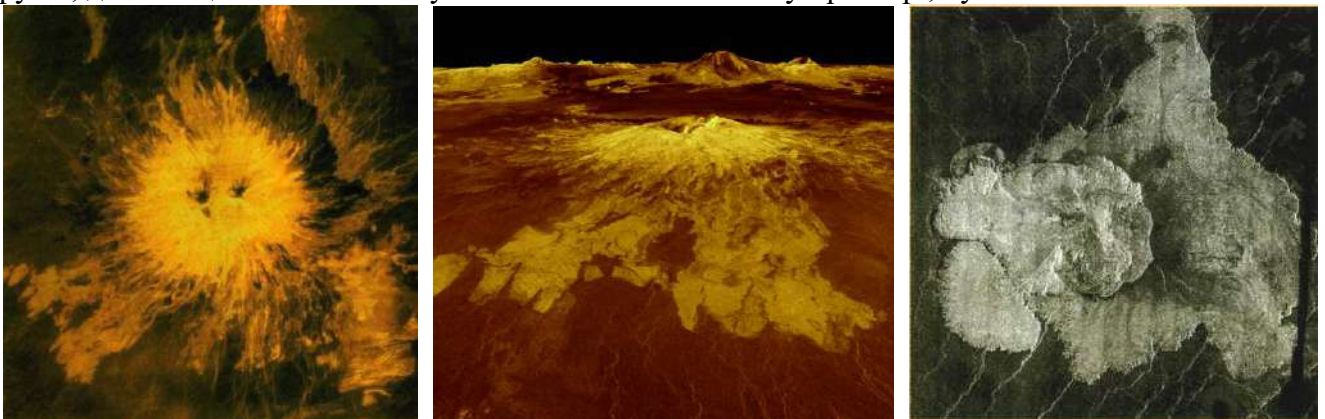


Рис.2.53. Ліворуч: щитовий вулкан Венери - *гора Шапаш* (ширина 400км, висота 1,5км) та тривимірний вигляд цього вулкану *гори Шапаш* (у центрі), на горизонті видно *гору Маат* (×10). Праворуч: вулканічне утворення *тік* – кальдера посередині рівної депресії в оточенні валу із радіальними відростками (РЛ-дані Magellan)

Ударні кратери. Радіолокація планети виявила невелику кількість *великих за розмірами* (від 1,5 до 280км), але *мільких за глибиною ударних кратерів* від падіння гігантських метеоритів, які прорвалися через щільну венеріанську атмосферу до її поверхні та *патер*. Для найбільш щільної серед планет земної групи атмосфери Венери мінімальний критичний розмір метеоритів повинен бути 1-3км. У результаті цих зіткнень з надр планети на її поверхню виливалася рідка *базальтова лава*. У багатьох ударних кратерах частина викидів веде себе як рідка текуча субстанція, яка утворює направлені в один бік від кратера потоки довжиною в десятки кілометрів. Неясною залишається речовина потоку – перегрітий ударний розплав чи суспензія твердого тонкого уламкового матеріалу та краплинок розплаву, яка підвішена в дуже щільній (65кг/м³) атмосфері планети. Венеріанські кратери умовно діляться на *великі* (діаметром понад 30км) та *малі* (до 30км). *Патери* – ударні кратери неправильної форми чи складні кратери з фестончастими краями (рис.2.55).

Радіолокаційні дослідження свідчать, що найбільше кратерів знаходиться в екваторіальному поясі планети. У районі радіолокаційної зйомки АМС *Венера-15,-16* (від 30⁰ північної широти до північного полюса – це 25% поверхні планети) було відкрито біля 150 ударних кратерів діаметрами 8-140км, що дало можливість дуже приблизно оцінити середній вік геологічних утворень району досліджень в 0,5-1млрд. років. Розміри великих кратерів коливаються у межах від 30 до 60км при глибині у декілька сотень метрів. Знайдений гігантський вулканічний кратер діаметром 2600км, правда, дуже неглибокий (до 700м). Аналіз розподілу кратерів різних діаметрів зумовив виявлення тільки однієї тенденції – **помітно більшої густини кратерів діаметром 8-11км на великих висотах**. Густина кратерів на Венері у 200 разів менша, ніж на Місяці, і у 100 разів – ніж на Марсі. Це свідчить, що **поверхня Венери молодша від поверхонь інших планет земної групи - її вік всього кілька сотень мільйонів років**.

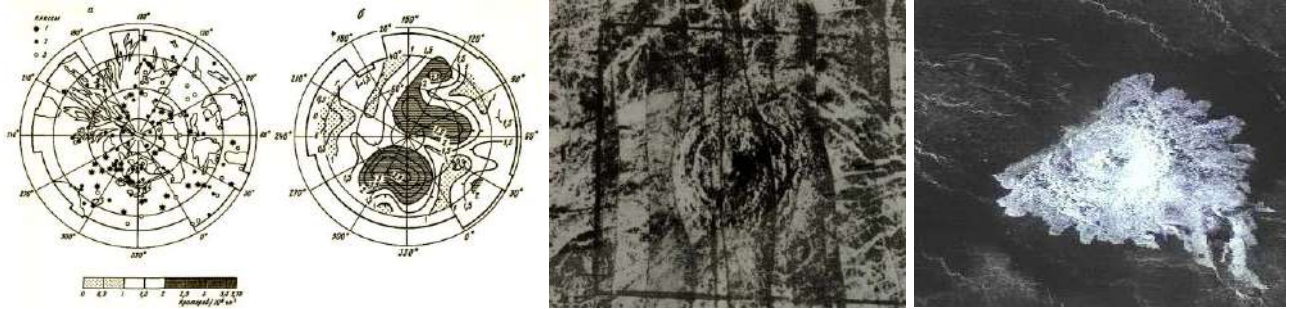


Рис.2.54. Карти розподілу кратерів та їх чисельність у районі РЛ-зйомки АМС *Венера-15,-16* (ліворуч). У центрі: багатокільцевий метеоритний кратер Кленова (діаметр 140км) (РЛ-дані *Венера-15,-16*). Праворуч: ударний кратер Аурелія з терасоподібними внутрішніми стінками, центральною гіркою, гладенькою поверхнею лавового заповнення кратера і масою шерехатих подрібнених ударом та викинутих із кратера порід; у центрі – русло від рідкого лавового потоку (ширина 2км, довжина 200км) (РЛ-дані *Magellan*)

Радіолокаційна зйомка КА *Magellan* показала, що в основних своїх рисах геологічна будова Венери не відрізняється від районів, що були досліджені *Венера-15,-16*. На планеті різко переважають різновиди **вулканічних рівнин**, ймовірно, **базальтових**, що займають **85% поверхні**, а серед них найпоширенішими (у масштабі зйомки) є **рівнини з гладкою поверхнею**, яка ускладнена системою вузьких звивистих гряд із розлогими схилами. Такі гряди відомі також на вулканічних рівнинах Місяця та Марса і вважаються структурами деформації поверхні в умовах стискання. Крім рівнин із звивистими грядами спостерігаються невеликі за площею ділянки **рівнин з густою сіткою тріщин** (структури розтягування) або ділянки **рівнин, які зім'яті у протяжні пояси широких гряд** (структури стискання) та ділянки **рівнин, що практично не порушені ніякими тектонічними деформаціями** (видимими на РЛ-знімках). Аналіз показав, що гладенькі рівнини з непорушеною поверхнею є молодшими за рівнини із звивистими грядами, а два інші різновиди рівнин – більш давніші.

І рівнини, і тессери в свою чергу розсікаються витягнутими на тисячі кілометрів жолобами складної будови, які утворені системами тектонічних розломів і схожі за морфологією на рифтові зони Землі та мають, можливо, ту ж природу.

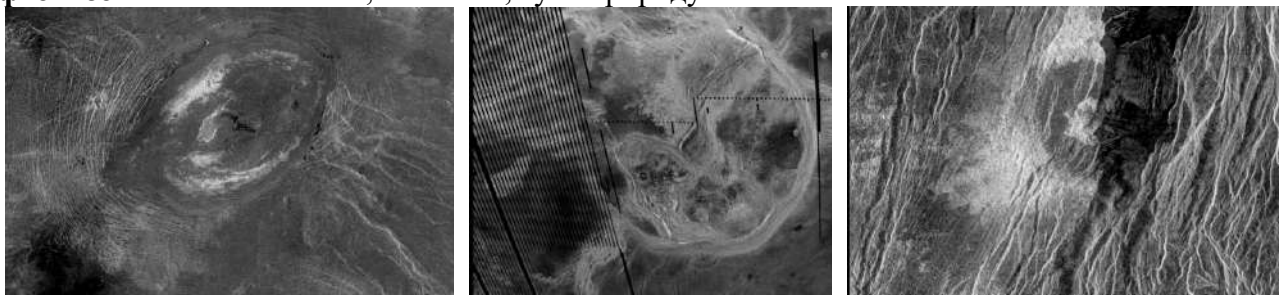


Рис.2.55. Ліворуч: кальдера (діаметр 420км, глибина 1-2км) патери *Sacaajawea* на заході Землі *Iutap*. У центрі: вінець *Artemis* із кільцевою системою гірських хребтів периферійної зони стискання та з центральним плато зони розтягування. Праворуч: ударний кратер в області *Бета* (діаметр 37км), східна частина кратера ускладнена троговим розломом і рифтовою долиною *Devana* (РЛ-дані *Magellan*)

На радіолокаційних знімках КА *Magellan* (98% поверхні Венери) вдалося виділити біля 930 ударних кратерів діаметром від 2 до 280км. Процес утворення ударних кратерів в умовах Венери має свої особливості – **у багатьох кратерах частина викидів має властивості текучої як рідина субстанції і утворює направлені, як правило, в один бік від кратера** (за напрямом падіння метеориту чи астероїда) **обширні потоки довжиною у десятки кілометрів, а іноді і більше**. Неясно, що це витікає – перегрітий ударний розплав чи суспензія з тонкої уламкової твердої речовини і краплин розплаву, яка переміщувалася у щільному (65кг/см^3) середовищі атмосфери біля поверхні планети.

Поверхня Венери відносно молода у геологічному відношенні, а формування її сучасного вигляду, за кількістю кратерів на середній вік геологічних утворень її поверхні, оцінюється, за даними КА *Magellan*, у 300-500млн. років. Розходження з оцінками АМС *Венери-15,-16* (0,5-1 млрд. років) пов'язане не з густиною кількості кратерів на поверхні планети, а з різними оцінками ймовірності ударів комет і астероїдів по Венері. Характер їх розподілу на поверхні не відрізняється від випадкового, абсолютна більшість кратерів явно не затоплена лавами оточуючих рівнин і не порушена найближчими тектонічними деформаціями, а мають вигляд накладених і на рівнини, і на тессери.

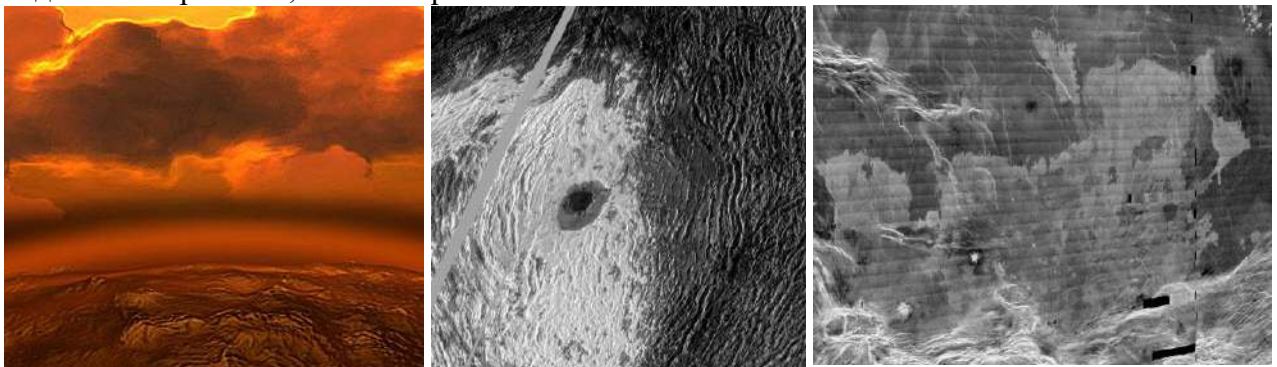


Рис.2.56. Комп'ютерна модель венеріанського пейзажу (ліворуч). У центрі: найвищі на Венері *гори Максвелла* з вершинами до 10,8-11,6км, у центрі зображення, на віддалі 350км від південно-західних схилів цих гір, знаходиться *кратер Клеопатра* складної форми – в середині великого кратера (діаметр 119км, глибина 2,5км) розміщений внутрішній (діаметр 50км, глибина 1км). Праворуч: *лавовий покрив Матараша* площею 540×900км на північно-східній рівнині Венери (дані *Magellan*, NASA, JPL)

Це може свідчити про те, що **більша частина вулканічних та тектонічних утворень на поверхні Венери сформувалася за відносно короткий час (300-500 млн. років) до початку формування кратерної популяції**. Але одночасно це значить, що **вулканічні і тектонічні утворення, на які накладені кратери, також сформувалися дуже швидко**.

На Венері відсутні дуже кратеризовані, відомі на Меркурії, Місяці і Марсі, давні поверхні.

Поверхня Венери покрита *тисячами вулканів*, але поки невідомо, чи зупинилася на планеті активна вулканічна діяльність, а це принципово для розуміння її еволюції. Хаотичність розміщення вулканів підтверджує *відсутність поділу венеріанської кори на плити*. Деякі вулкани діаметром досягають 1000км і 6км у висоту, але більшість вулканів 2-3км шириною при висоті біля 100м. Зареєстровано 150 вулканічних об'єктів розмірами понад 100км, а загальну кількість вулканів оцінюють у 1600. *Вулканічний попіл та інші мілкі матеріали вивержень залишаються у щільній атмосфері і формують товстий хмарний покрив планети*. Частина хімічних речовин вступає в реакції і випадає на поверхню у вигляді краплин сірчаної та соляної кислот. **Геологічні утворення Венери формують 3 структурних поверхні:**

- 1-ий - найдавніший, - тессери, гірські пояси, рівнини з системами розломів і пояси гряд;**
- 2-ий - проміжний за віком, - розлогі рівнинні області базальтових покривів;**
- 3-ій - наймолодший, - гладенькі рівнини і рівнини із потоками базальтових лав.**

Венера покрита *тонкою корою* із твердих розжарених магматичних порід, під якими циркулює розплавлена *магма*, яка викликає напруги в тонкому поверхневому шарі кори і постійно викидається на поверхню *лавами вулканів*, виливається із *розломів* та *тріщин*, покриваючи при цьому низовини на сотні кілометрів навколо і утворюючи обширні рівнини.

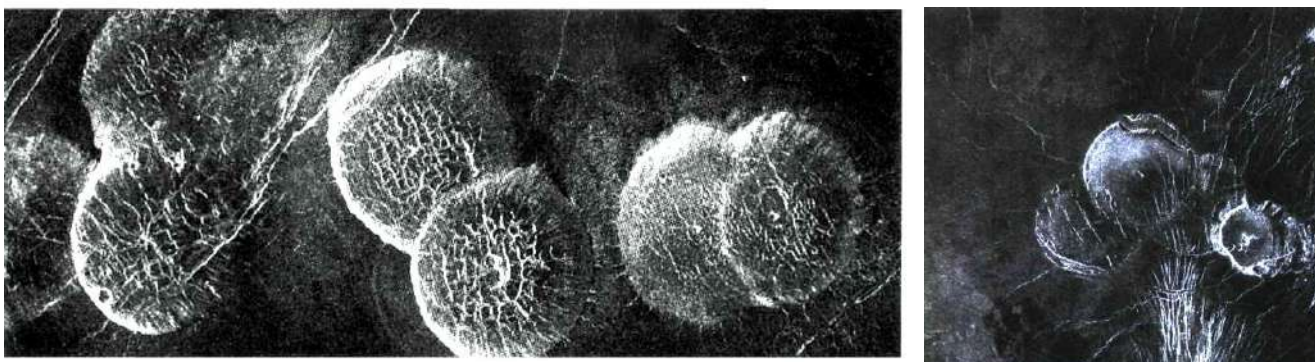


Рис.2.57. Ліворуч: товсті куполоподібні екструзивні згустки густої та в'язкої лави діаметром до 25км, яка через тріщини та розломи видавлювалася із надр на поверхню Венери в районі височини Альфа. Праворуч: три незвичних вулкани на рівнині Джиневри, у центрі – вулкан на куполі діаметром 50км з плоскою вершиною та крутими стінками, що утворився у результаті екструзії в'язкої лави із надр планети; на півночі купол вулкану обмежує вертикальна стінка гігантського зсуву; праворуч та нижче – найвища у даному районі аналогічна структура діаметром 25км (РЛ-дані *Magellan*)

Можливо, для планети найбільш характерні вулкани з близько розташованою до поверхні магмою та її інтенсивним відтоком із периферійного осередку. У деяких місцях густа лава, поступово просочуючись на поверхню, утворює *лавові озера* до 25км шириною. В інших місцях величезні *лавові діаніри* формують *склепіння*, які потім опадають.

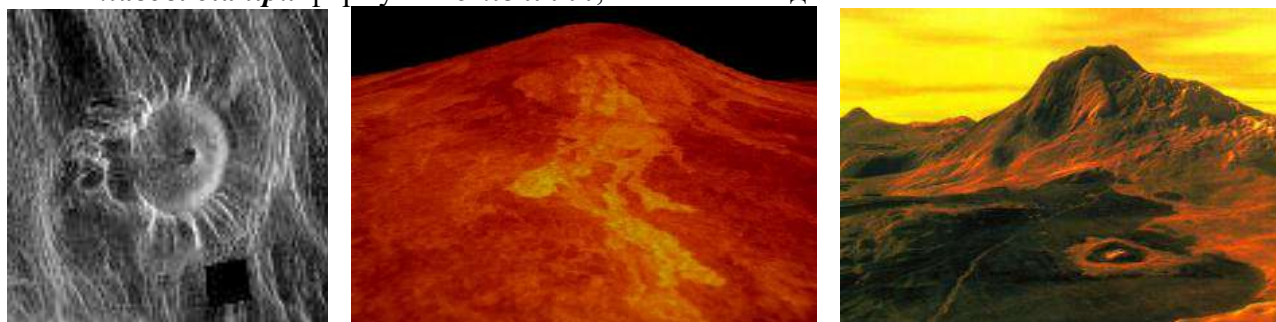


Рис.2.58. Ліворуч: лавовий купол розміром біля 100км з потужностями лавових потоків до 540м одного з вулканів на ділянці планети між розломом Артеміди та областю Імд. Комп'ютерні зображення поверхні Венери із збільшеними вертикальними масштабами: у центрі – вигляд вулкану гори Сиф діаметром 300км і висотою 2км ($\times 23$); праворуч - найбільший вулкан Венери з діаметром основи 600км – гора Маат висотою 8км над підніжжям та 11км над середнім рівнем планети; на передньому плані свіжий лавовий потік, у центрі – кратер Піскопія діаметром 26км, вузька світла лінія – тектонічний розлом; на горизонті ліворуч – крупний вулкан висотою 7км – гора Уззи (за РЛ-даними *Magellan*)

Біля 85% поверхні планети покриті вулканічними породами. *Вулкани і потоки лав зберігаються у незміненому вигляді в умовах сухої розжареної поверхні Венери мільйони років.* Венера дуже гаряча для існування води, льоду, дощів та бур, тому там не відбувається істотного атмосферного впливу (вивітрювання). **На отриманих радіолокаційних зображеннях геологи бачать такі краєвиди, які давно зникли на Землі.**

У деяких місцях на поверхні венеріанських рівнин (фотознімки КА *Magellan*) зафіксовані загадкові „*русла*” довжиною від сотень до тисяч кілометрів та шириною від 2-3 до 10-15км. Вони мають *типові ознаки долин*, які прорізалися течіями певних *рідин* – спостерігаються схожі на *меандри* звивини, *розгалуження* та *сходження проток*, а у деяких випадках – дещо, подібне до *дельти*. На початку найдовшого русла – *долини Балтис* – протяжністю до 7000км при витриманій (2-3км) ширині знаходиться типовий за морфологією базальтовий вулкан до 100км впоперек. Загадковою є речовина, яка прорізала ці русла. Розрахунки свідчать, що на віддаль до 7000км у потоку базальтової лави не вистачить енергії термічної ерозії для свого руху та прорізання русла у породах долини, при цьому частково розплавляючи ці породи на своєму шляху. Це ймовірно для дуже перегрітих *коматойтових лав* чи для *екзотичних рідин* типу розплавлених карбонатів чи розплавленої сірки.

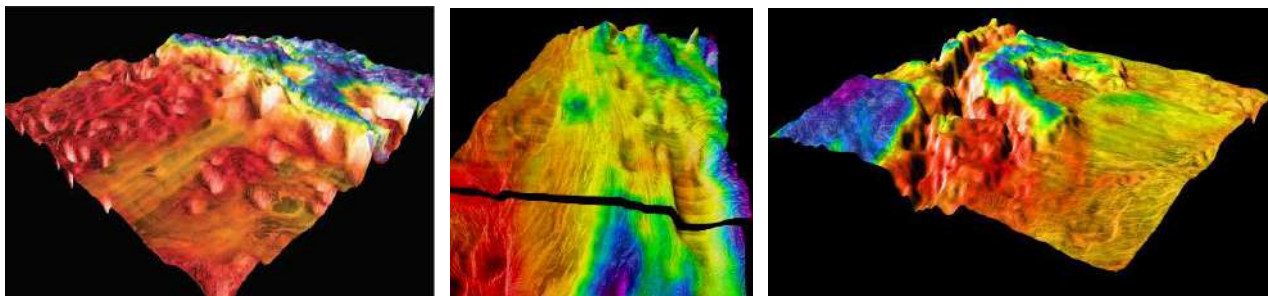


Рис.2.59. Рельєфи поверхні Венери західної частини «континенту» *Земля Афродіти* – у гористій області *Регіону Овда (Ovda)* висотою 3-4км (комп'ютерні моделі за РЛ-даними *Magellan*)

У районі екватора виявлено **гігантський розлом** довжиною 1500км, шириною 150км та глибиною біля 2км, що свідчить про **потужні тектонічні процеси у надрах планети**, але **в цілому поверхня Венери є найбільш рівною серед усіх планет земної групи**. **Мабуть, висока температура кори Венери сприяє її пластичності, при якій ізостатично вирівнюються крупні неоднорідності поверхні і зберігаються мілкі.**

Екзогенні процеси на Венері можуть бути представлені **хімічним вивітрюванням, еоловою діяльністю і схиловими процесами.**

Хімічне вивітрювання при відсутності атмосфери та біосфери на Венері визначається перш за все взаємодією атмосферних газів із свіжими виверженими породами та попелом, а наявність хімічно активних газових компонентів (CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , H_2S , COS , HCl , HF) і відносно високі тиск (92 атмосфери) та температури (від $+457^\circ\text{C}$ до $+485^\circ\text{C}$) повинні сприяти цим процесам у певному поверхневому шарі порід і можуть привести до **окислення мінералів, зв'язування сірки, хлору, фтору та вуглекислоти на поверхні у мінеральні з'єднання**. Але при такому співвідношенні температури та тиску вуглекислий газ (CO_2) та азот (N_2) перебувають у стані надкритичної рідини, а тому, фактично, газу біля поверхні Венери немає взагалі. Можливо, що **на Венері існує глобальна, але малопотужена сучасна кора вивітрювання та, ймовірно, присутні більш древні осадові утворення чи хімічно змінені породи, які перекриті еоловими наносами або молодими вулканітами.**

Еолові процеси. На підняттях рельєфу хімічній взаємодії може сприяти більш інтенсивна **еолова абразія** поверхні. Ці процеси ведуть до утворення **мілкового дисперсного матеріалу**, який може зноситися в низовини під дією гравітації або вітру. **Виключна сухість густої і гарячої атмосфери Венери, відсутність добових і сезонних коливань температури, пригнічення процесів хімічного та фізичного вивітрювання і відсутність води зумовили виключну роль вітру в екзогенній переробці венеріанської поверхні, але густа атмосфера і відсутність сильних вітрів біля поверхні планети зумовлюють рух частинок в атмосфері, що швидше нагадує їх рух у водному середовищі, ніж у повітряному. Після зіткнення посадочних модулів з поверхнею Венери тонкий шар пилу осідав на поверхню планети 15 хвилин.**

Виділення еолових форм рельєфу на знімках поверхні Венери зараз неможливе через малі розміри цих форм рельєфу.

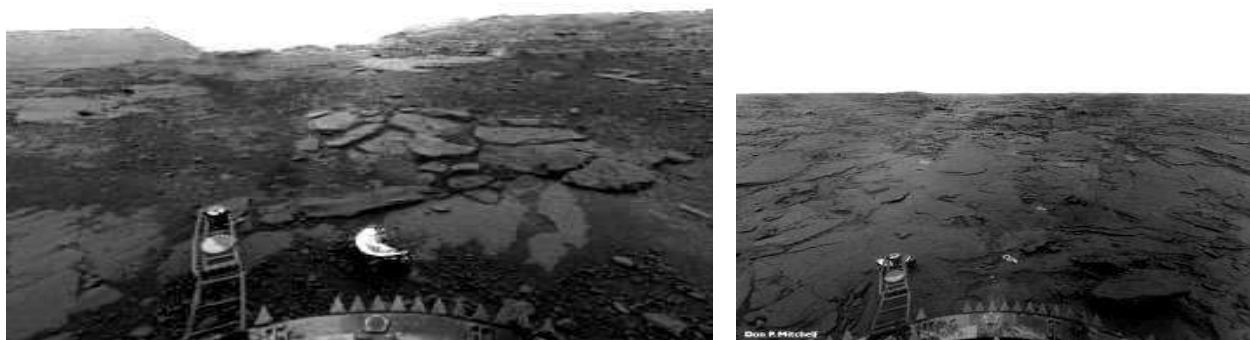


Рис.2.60. Цифрова обробка Доном Мітчеллом (США) даних зображень розпеченої поверхні Венери, які були передані *Венера-13* (ліворуч) та *Венера-14* (праворуч). Оригінали цих зображень на рис.2.62.

Панорами поверхні Венери, які були передані на землю АМС *Венера-9* (22.10.1975р.) та АМС *Венера-10* (25.10.1975р.) після посадки на Венеру у різних місцях на віддалі 2000км між собою, підвищують ймовірність того, що загальні риси цих ландшафтів будуть характерними в цілому для всієї планети. Незважаючи на надзвичайно високі густину та тиск **атмосфера Венери** (яка біля поверхні планети перебуває у стані надкритичної рідини і фактично газу біля поверхні немає взагалі) **не має надто високих властивостей заломлення світла, як передбачалося, і всі деталі ландшафтів на фотографіях були чіткими**. Суцільна хмарність пропускає сонячне світло, до поверхні планети доходить 23% сонячного випромінювання і **на поверхні Венери освітленість близька до земної у звичайний хмарний день** (для проведення фотографування на поверхні планети не знадобилися прожектори апаратів АМС *Венера-9,-10*, а викривлення зображень, отриманих з усіх АМС *Венера*, зумовлене конструкцією фотокамер).

Загальною рисою панорам двох різних у геологічному плані та віддалених між собою ландшафтів стала висока кам'янистість розжареної пустельної поверхні Венери, на якій домінують розсипані кутасті і частково вивітрілі брили, що вказує на відносно слабку роль процесів вивітрювання на її поверхні в умовах гарячої вуглекислотної атмосфери, яка по відношенню до силікатів є не агресивним газом, а нейтральним середовищем, але існують й істотні відмінності.

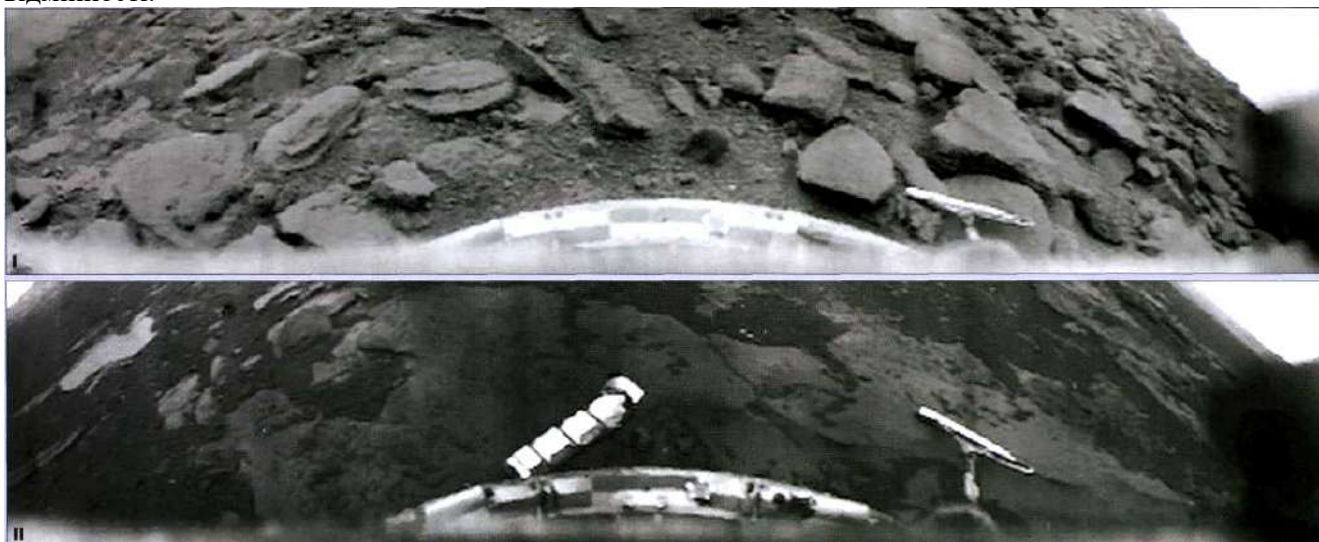


Рис.2.61. Панорами розжареної поверхні Венери у місцях посадки *Венери-9* із кутастими і частково вивітрілими уламками порід розмірами 30-40см (I) та *Венери-10* із плоскими плитами скельних порід, які частково покриті тонкозернистим матеріалом, більша плита на передньому плані розміром 2м (II). Об'єкти фотокамер знаходилися на висоті 90см, панорами 177° шириною, смугою від горизонту до горизонту (3,3км на рівній місцевості), верхня межа зображення на фото віддалена на 2м від апаратів

На ділянці посадки *Венери-9* наявність крутого схилу рельєфу (досягає 30°), покритого частково зруйнованими атмосферною ерозією уламками порід з гострими гранями, свідчить про *геологічну молодість ландшафту* та про *активний геологічний процес*, що був причиною його утворення. У потужній густій атмосфері Венери це не можуть бути процеси метеоритного утворення кратерів, а, мабуть, *це результат тектонічно-вулканічних процесів*. Результати радіолокації поверхні планети АМС *Венера-15,-16* підтвердили, що *Венера-9* здійснила посадку на схил склепінчастого **підняття Бета**, тобто, не на класичну рівнину, а на ділянку місцевості, яка в цілому нагадує рівнинний ландшафт. На цьому схилі переважають *процеси руйнування порід та утворення кутастих уламків* (розмірами 0,5-0,7м у поперечнику і висотою 0,2м) та, мабуть, *гравітаційного їх переміщення вниз по схилу*.

На “зрілому” ландшафті панорами *Венера-10* сліди руйнувань гірських порід більш *різноманітні*. На панорамі видно схожу на земний вулканічний ландшафт пустельну місцевість рівнинного типу із виступами на денну поверхню дуже згладжених плоских плит вулканічних порід, частково покритих *мільким зернистим матеріалом*. Спостерігаються окремі дуже нахилені первинні або тектонічні (вторинні) *тріщини*, а також процеси згладжування самої поверхні уламків та їх гострих ребер, що нагадує *обточування порід піском* в умовах пустель

Землі. Через густину атмосфери повітряні потоки на Венері притиснуті ближче до поверхні планети. На поверхні брил видно певні неоднорідності породи, що нагадують *комірчасту структуру*, яка утворюється в результаті хімічного вивітрювання.



Рис.2.62. Покрита чорним щебінчастим ґрунтом у заглибинах плоских кам'яних брил темна розжарена пустельна поверхня Венери на схід від *Області Феба* у районі посадки *Венера-13* (працювала понад 127 хвилин) із єдиним кольоровим панорамним (на 170^0) фото поверхні із використанням синього, зеленого і червоного фільтрів; справжній колір поверхні Венери важко визначити – атмосфера затримує синій колір. Віддаль між зубцями буферу посадки 5см, вище - кришка телекамери (діаметр 20см і висота 16см) (III). Переважно базальтові плити з мілким зернистим матеріалом у районі посадки *Венера-14* (IV). *Венера-13 та -14 мали по дві фотокамери і фотографували місцевість у протилежних напрямках.*



За допомогою фотокамер АМС *Венера-13* і *-14* було отримано 33 панорами, 14 кольорових знімків поверхні планети через синій, зелений і червоний фільтри, але важко говорити про справжню кольору гамму поверхні, адже атмосферою планети інтенсивно поглинаються сині кольори. Район посадки АМС *Вега-1,-2* був вибраний на *рівнині Русалки* у північно-східній частині *Землі Афродіти* (рис.2.40), що дозволило розширити уявлення про характер порід поверхні планети та головні типи геолого-геоморфологічних провінцій планети.

Панорамні зображення поверхні Венери та проведені аналізи показали, що в цілому **поверхня планети майже чорного кольору** зі світло-оранжевим відтінком від кольору неба, у місцях чотирьох посадок залягають розшировані основні породи базальтового складу, які характеризуються високою пористістю, низькою густиною, низьким електричним опором та високим вмістом сірки. Із врахуванням додаткової інформації, найбільш прийнятним сьогодні є тлумачення верствуватих порід венеріанської поверхні як відкладів вулканічного базальтового попелу.

У районах посадок розжарена поверхня Венери покрита уламками порід, на яких вперше було проведене буріння та аналіз венеріанського ґрунту - середня густина порід $2,7\text{г/см}^3$, вони складаються із кремнезему (SiO_2) – 45,1-48,7%, оксиду алюмінію (Al_2O_3) – 15,8-17,9%, оксиду магнію (MgO) – 8,1-11,5% та інших оксидів (CaO , FeO , K_2O , MnO тощо і подібні до **толейтових базальтів** (Венера-14) та багатих калієм і магнієм **лужних базальтів** (Венера-13) та схожі на базальти глибоководних западин земних океанів.

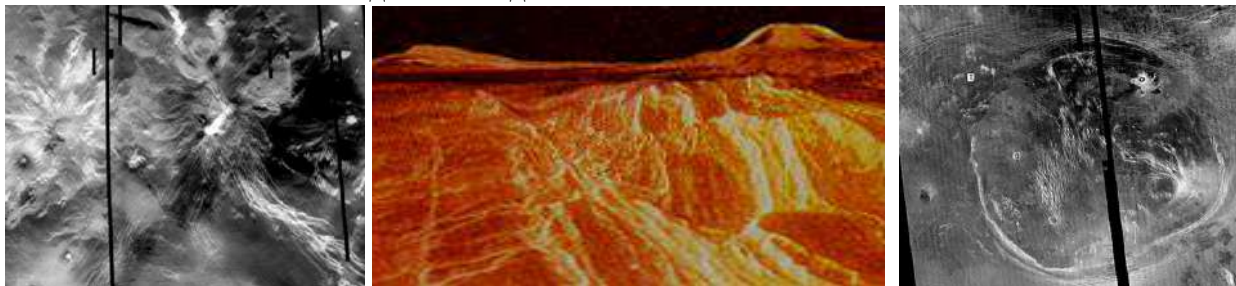


Рис.2.63. Ліворуч: височина *Західна Ейстла* (1725x1260км) із вулканами *гори Сиф* (ліворуч, діаметр 350км, висота 2км) та *гори Гула* (праворуч, діаметр 450км, висота 3км). У центрі: потоки лави довжиною у сотні кілометрів на обвалених схилах вулканів *області Західна Ейстла*, на обрії *гора Сиф* та *гора Гула*. Праворуч: *вінець Beltis* (центральна структура) та *вінець Heng-o* (на північному заході) (дані *Magellan*)

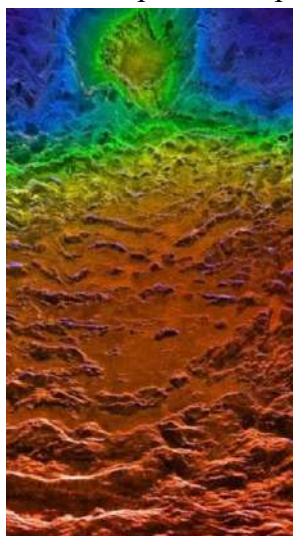
Ймовірно, що у геологічному минулому Земля і Венера були дуже схожими за своєю будовою та кліматом. 4,5 млрд. років тому, коли Земля тільки сформувалася, вона, як і Венера, набула з часом дуже густу атмосферу із CO_2 -газу. Земля була не такою гарячою як Венера, так як розташована значно далше від Сонця. Вуглекислий газ має здатність розчинятися у воді і земні дощі вимивали його з атмосфери та направляли в океани, де він приймав участь спочатку у нейтралізації кислих океанічних вод, а потім – у формуванні осадових карбонатних порід хемогенного та органогенного походження. Крім того, CO_2 -газ вилучався з атмосфери Землі і при утворенні покладів вугілля та нафти.



Рис.2.64. Ліворуч: *кратер Зоя* (діаметр 22км) – типовий малий ударний кратер Венери з гладкою поверхнею дна і шерехуватою поверхнею викинутого ударом подрібненого уламкового матеріалу валів. У центрі: суха *долина Лунанг* (довжина 250км, ширина 1-1,5км) – звивиста улоговина між гірськими відвершками *тессери Антропос* - була утворена швидким потоком рухливої лави у в'язкому матеріалі попередніх вивержень. Праворуч: зображення заходу *області Ейстла* з ударним *кратером Каніц* (48,5км) у центрі та вулканічним конусом на обрії *гори Гула* (висота 3км) *області Теміс* (дані *Magellan*)

Таким чином, за результатами проведених досліджень було встановлено, що **на поверхні Венери ендегенні геологічні процеси – базальтовий вулканізм та розломна тектоніка – панують над екзогенними процесами. Скрізь спостерігається прямий тектонічно-магматичний рельєф, який не перекривається товщами яких-небудь осадових порід еолового чи іншого походження і який протягом останнього мільярду років мало або дуже повільно змінювався поверхневими процесами при відсутності рідкої води, слідів діяльності якої на планеті не знайдено ніяких. Немає жодних ознак „тектоніки плит”, для якої характерний поділ верхньої жорсткої оболонки – літосфери – на декілька крупних плит, що переміщуються горизонтально між собою. Головною рухливою силою вулканічних і тектонічних процесів на Венері є вертикальні низхідні та висхідні рухи пластичної речовини надр планети за рахунок теплових неоднорідностей – так званих „гарячих точок”, роль яких істотна і в геології Землі, але у нас вона все-таки другорядна.**

Поверхня Венери може бути набагато давнішою ніж вважалося раніше, коли допускалося, що близько 500 млн. років тому планета пережила короткий період дуже потужного вулканізму, коли потоки лав загальною потужністю від 1 до 3км покрили всі сліди давньої поверхні планети. Повторний аналіз даних КА *Magellan*, особливо аналіз розташування точок сходження схилів паралельно розташованих гірських хребтів, які, за новими даними, лежать на глибині



менше ніж 1км під сучасною поверхнею планети, вказує на поступове зниження інтенсивності вулканізму з виділенням ряду епох його активізацій протягом 2 млрд. років замість однієї вулканічної катастрофи, причому більша частина давньої поверхні планети залишилася видимою і зараз.

Рис.2.65. Фрагмент відновленого давнього рельєфу Венери до його покриття лавовими потоками (дані *Vicki Hansen*, Університет Міннесота, США)

Диференціація надр Венери розпочалася раніше, ніж у Землі і зараз конвекція речовини в мантії, ймовірно, відсутня чи дуже слабка, а теплова енергія надр виділяється в основному діючими вулканами. Через близькість до Сонця початкова температура молоді Венери була досить високою, а склад її атмосфери, як і інших планет земної групи, визначився на досить пізній стадії її геологічного розвитку, коли початок вулканічної діяльності створив первинну атмосферу із CO_2 -газу і парів води. До складу вулканічних газів входять також з'єднання сірки у вигляді сірчаного ангідриду і сірководню, метан, аміак. За співвідношенням вмісту *тяжкої води* (D_2O) до *звичайної води* (H_2O) вчені аргументовано допускають, що колись на Венері був практично земний клімат та заповнені водою океани. Первинна атмосфера легко пропускала видимі сонячні промені, які нагрівали поверхню планети. Розжарені тверді породи поверхні у свою чергу випромінювали тепло, але довжина хвиль цього теплового випромінювання не могла подолати густий шар CO_2 -газу, що сприяло подальшому підвищенню температури атмосфери і додатково прискорювало виділення з поверхні планети води та вуглекислоти. З часом, через високу температуру водяна пара вже не могла конденсуватися, а її величезна кількість зумовила в атмосфері Венери небачений за своїми масштабами парниковий ефект, коли навіть зараз температура атмосфери перевищує точку кипіння води до висоти 50км над поверхнею планети.

Молекули води у верхніх шарах атмосфери під впливом ультрафіолетового випромінювання Сонця розпадалися на іони водню і кисню, а відсутність магнітного поля Венери дала можливість сонячному вітру вибивати ці іони з її атмосфери і зумовила нинішню сухість планети (рис.2.34). Води в атмосфері Венери майже не залишилося, а її рештки міцно зв'язані сірчаною кислотою. Якщо раніше спеціалісти притримувалися думки, що це трапилося близько 4млрд. років тому – всього через 600млн. років після появи Сонячної системи, то зараз вони вважають, що масштабні зміни відбулися набагато пізніше, так як не був врахований вплив хмар на атмосферу планети - хмари відбивають сонячні промені назад у космос і охолоджують при цьому поверхню. За розрахунками, атмосфера Венери з хмарами приблизно на сто градусів холодніша, ніж без них.

Це може означати, що *комфортна для життя температура та вологість могли існувати на Венері не менше 2 млрд. років, а глобальні зміни у літосфері відбулися приблизно 700 млн. років тому, коли після повного випаровування води могли зупинитися тектонічні рухи, а разом з ними зникли ефективні способи позбавлення від внутрішнього тепла, потоки якого поступово нагрівали кору планети і розм'якували її речовину. Тому, кора Венери періодично стає пластичною і деформується, що служить причиною глобальних змін рельєфу – це може бути продовженням все того ж парникового ефекту, який осушив планету. Відносну молодість найдревніших утворень Венери (до 500 млн. років) ряд вчених вважає результатом глобального переплавлення всієї літосфери планети біля 350 млн. років тому, коли тисячі надпотужних вулканічних виливів утворили моря і*

океани розплавленої лави. Так утворилися базальтові рівнини – основний вид венеріанського рельєфу. Активний вулканізм значно збільшив вміст парів H_2O та SO_2 в атмосфері і сформував щільну хмарність. Ефект «ядерної зими» зумовив охолодження поверхні Венери до $100^\circ C$. Дисоціація водяних парів та поглинання двооксиду сірки гірськими породами привело до знищення хмарного покриву 130 млн. років тому – небо Венери звільнилося від хмарного покриву – і до нового нагріву Сонцем поверхні планети. Сучасний хмарний покрив сформувався біля 30 млн. років тому у результаті нового спалаху вулканічної активності.

Для пояснення особливостей рельєфу, внутрішньої будови, еволюції і характеристик руху Меркурія та Венери висунута гіпотеза, згідно якої Меркурій є «втраченим» супутником Венери, що обертався навколо неї на віддалі 400 000 км 4-4,5 млрд. років тому. У подальшому Меркурій неодноразово зближувався з Венерою і ставав тимчасово (на десятки і сотні мільйонів років) її супутником. Потужне припливне розсіювання енергії викликало плавлення літосфери чи різко посилювало тектонічні і вулканічні процеси у надрах Венери, і гальмувало обертання обох планет.

Дані *Venus Express* свідчать, що високогірні плато Венери складені старими породами світлого відтінку з відбиваючими властивостями гранітів земних континентальних плит і вони можуть бути древніми континентами, які були сформовані вулканічною діяльністю, а темні області, таким чином, можуть бути ділянками дна колишнього океану, що омивав континенти.

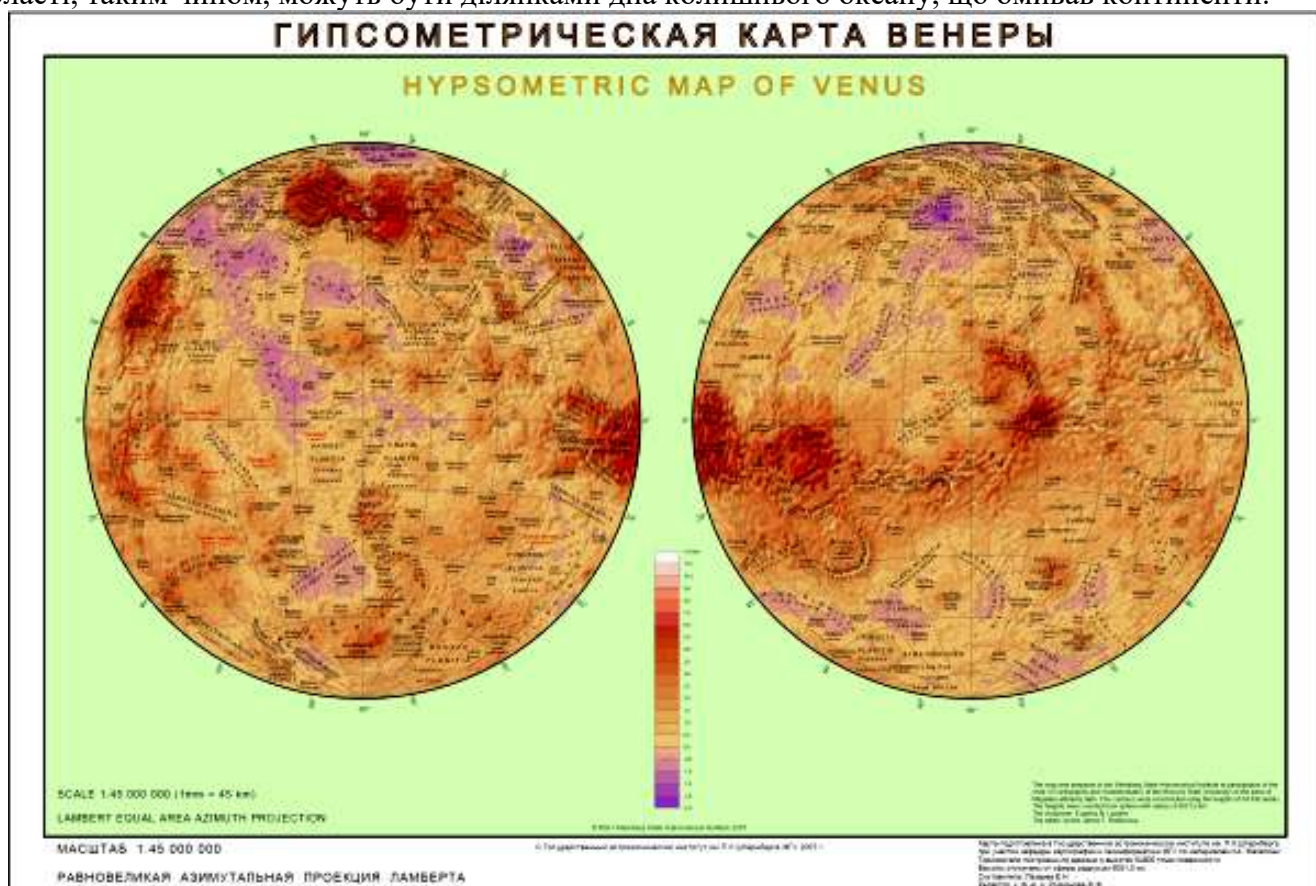


Рис.2.66. Нова гіпсометрична карта півкуль Венери масштабу 1:45 000 000 створена за даними КА *Magellan* (укладачі Є.Н. Лазарєв, Ж.Ф. Федорова; ДАШ МДУ, Москва, 2007р.)

Внутрішня будова Венери (рис.2.67), виходячи з найбільш достовірних моделей, аналогічна земній - існує залізо-нікелеве **ядро** радіусом 3300 км, проте *тверде* воно чи *рідке* – поки що точно невідомо. Найбільш ймовірно, що венеріанське ядро ще не почало твердіти і у ньому ще не почали утворюватися конвекційні потоки, які закручуються завдяки обертанню планети та генерують магнітне поле. Між **корою** планети із *кременистих порід* потужністю 16-50 км та ядром знаходиться потужний шар (3000-3500 км) *твердих порід* чи *пластичної речовини мантії*, яку умовно ділять на *нижню* і *верхню*, а її склад, мабуть, мало відрізняється від складу відповідних геосфер

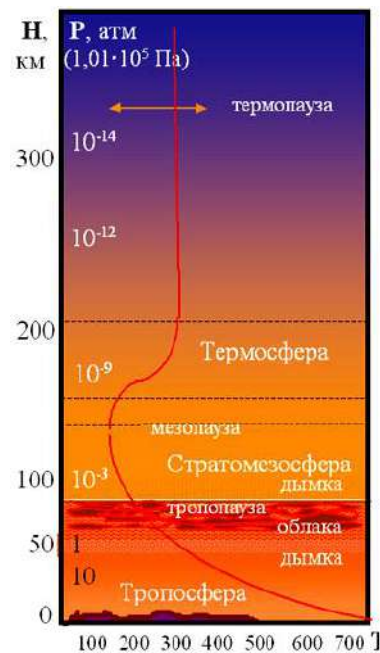
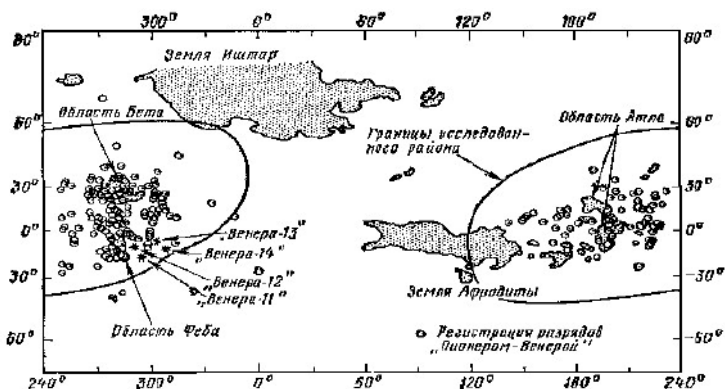
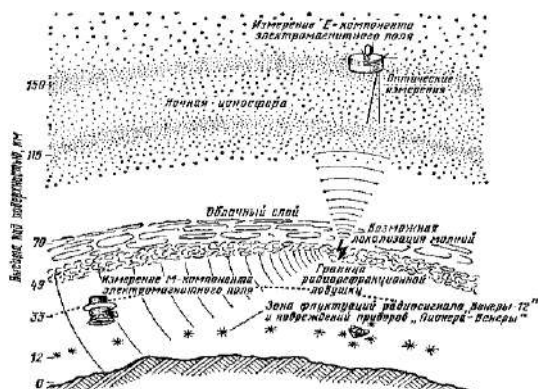


Рис.2.67. Угорі: електричні явища в атмосфері Венери спостерігалися за допомогою СА «Венера-11» - «Венера-14» як пряма електромагнітна хвиля від розряду, а також орбітальним «Pioneer-Venus» як хвиля, що пройшла іоносферу в «моді вістлерів» (ліворуч). Порівняння районів реєстрації електричних розрядів з молодими вулканічними масивами на топографічній карті Венери (праворуч).
Унизу: модель сферичної будови Венери і будова та фізичні характеристики атмосфери Венери

Таким чином, детальний аналіз панорам Венери дозволяє не тільки оцінити характер ландшафтів планети, а й зробити певні висновки про особливості геологічних процесів, що відбуваються на її поверхні, а також порівняти умови, в яких відбуваються ці процеси, із умовами Землі. Все це дає можливість оцінити специфічні особливості та загальні закономірності будови і розвитку планет сонячної системи.

Венера досліджувалася за допомогою АМС Венера-4,-7,-8,-9,-10,-12,-14,-16 і Вега-1,-2 (CPCP); Pioneer Venus-1, Mariner-2,-10 і Magellan (США); Venus Express (ЄКА).

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте особливості атмосфери Венери та її температурний режим.
2. Вказати особливості хмарного покриву на Венері.
3. Охарактеризуйте геоморфологію поверхні Венери.
4. Охарактеризуйте вулканіко-тектонічні процеси на Венері та утворені ними структури.
5. Які геологічні особливості формування арахноїдів?
6. Охарактеризувати вінці і тессери та вказати їх особливості.
7. Які специфічні особливості екзогенних процесів на Венері?
8. Охарактеризувати ймовірний процес формування парникового ефекту на Венері.
9. Порівняйте зовнішні сфери та внутрішню будову Венери та Меркурія.

2.2.3. ЗЕМЛЯ

ЗЕМЛЯ – третя за віддаленістю від Сонця планета Сонячної системи, єдина, на якій існує життя та чітко проявлена геологічна активність; рухається еліптичною орбітою навколо Сонця на середній віддалі 149,6млн. км (144,117млн. км у перигелії і 152,083млн. км в афелії) з швидкістю 29,765км/сек. за 365,242 доби (земний рік) і одночасно обертається навколо власної осі за 23год. 56хв. 4,1сек. (доба), яка нахилена до площини орбіти під кутом $23^{\circ}26'$. Перший з цих рухів, у поєднанні з нахилом осі обертання, спричиняє зміну *пори року*, другий – *дня і ночі*. Кут нахилу осі до площини орбіти коливається від 22° до $24,5^{\circ}$ з періодом 41тис. років - *кліматичний цикл Міланковича*, що зумовлює глобальні кліматичні зміни на поверхні Землі.

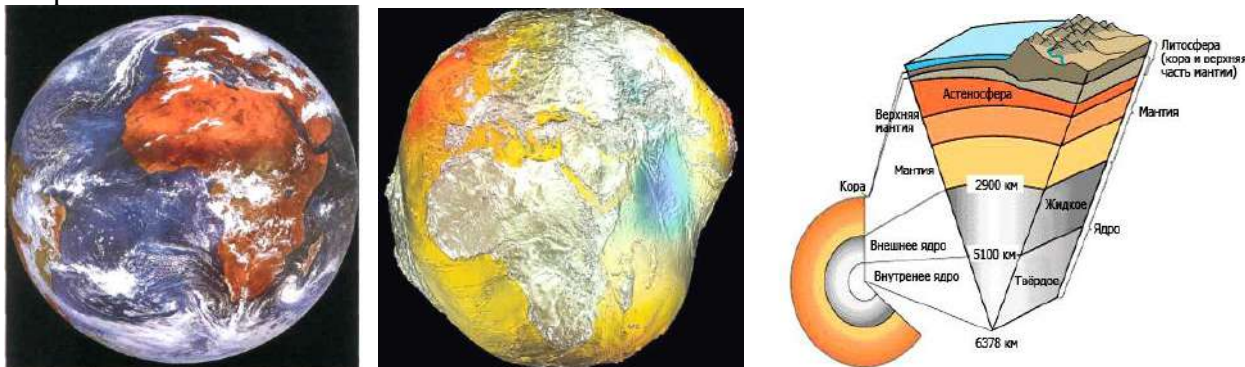


Рис.2.68. Земля із космосу, форма геоїда Землі (відхилення геоїда збільшено у 10тис. разів) та схема сферичної будови надр Землі

Положення осі обертання Землі ускладнене *прецесією* – повільним рухом осі круговим конусом (повний оберт відбувається за 26 тис. років) і *нутацією* – коливанням осі (накладається на прецесію) з періодом 18,6 років. Положення осі обертання по відношенню до тіла Землі піддане змінам, середнє положення північного полюсу зміщується у бік Північної Америки з швидкістю 11см/рік. Середня густина Землі $5,52\text{г/см}^3$, маса Землі $5,976 \cdot 10^{24}\text{кг}$. Вік Землі 4млрд. 467млн років (раніше: 4млрд. 555 ± 2 і 4млрд. 537млн. років).

Планета Земля, як космічне тіло, є складовою частиною Сонячної системи, яка в свою чергу входить до складу нашої Галактики і Всесвіту взагалі, тому Земля підпорядковується всім їх законам розвитку та існування. Космічні закони та явища викликають на Землі силу тяжіння, припливно-відпливні течії та рухи як у Світовому океані, так і у надрах Землі; впливають на періодичність та хід **різноманітних геологічних процесів**; регулюють появу, розвиток та існування живої матерії тощо.

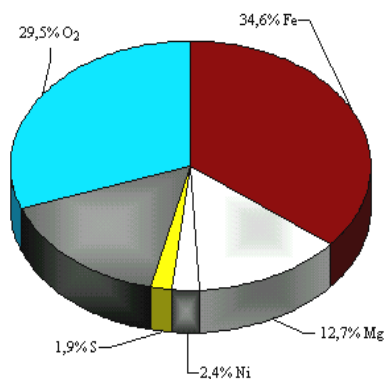


Рис.2.69. Склад Землі за хімічними елементами

Разом з цим Земля проходить ряд “чисто” земних процесів, які не властиві іншим космічним тілам нашої Сонячної системи. Це фізико-хімічні особливості існування і діяльності земної атмосфери, специфіка формування різноманітних форм рельєфу, прояви різноманітних геологічних процесів у надрах Землі та на її поверхні, виникнення і функціонування життя в його різноманітних формах і проявах.

За допомогою сейсмологічних досліджень у надрах Землі виявлено кілька концентричних шарів (так звані *геосфери*) з різними фізичними властивостями: **земну кору, мантию і ядро**, які утворилися в результаті хімічної та густинної диференціації (розподілу) речовини надр, тобто більш важка речовина сформувала більш глибокі сфери (рис.2.68, 2.73). Верхня частина мантиї (субстрат) та земна кора називаються **літосферою**; вона поділяється на низку літосферних брил (плит), які безперервно повільно рухаються по поверхні Землі (*нова глобальна тектоніка*). Після утворення Земля охолоджувалася на $70\text{-}100^{\circ}\text{C}$ за мільярд років.

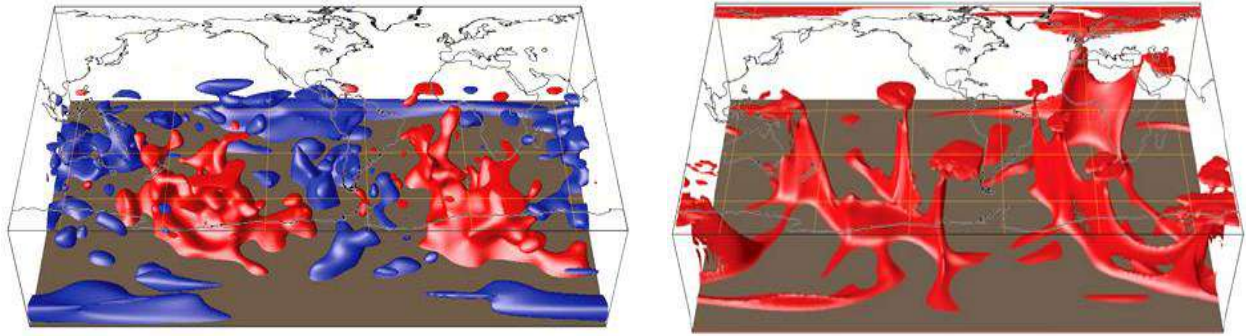


Рис.2.70. Ліворуч: тривимірна карта сейсмічної томографії мантії Землі до глибини 660км із областями швидкого (сині) і повільного (червоні) поширення сейсмічних коливань; праворуч – модель областей конвекції потоків – **плюмів** - у мантії на глибині до 660км (за E.J.Garnero і A.K.McNamara)

За межами твердої Землі знаходяться **зовнішні геосфери** – **гідросфера**, яка є унікальним явищем серед планет земної групи та **атмосфера**, яка радикальним чином відрізняється від атмосфери інших планет – змінена наявністю *життя*, вона вміщує *вільний кисень*. Зовнішні геосфери сформувалися із парів та газів, що виділилися з надр Землі при дегазації мантії.

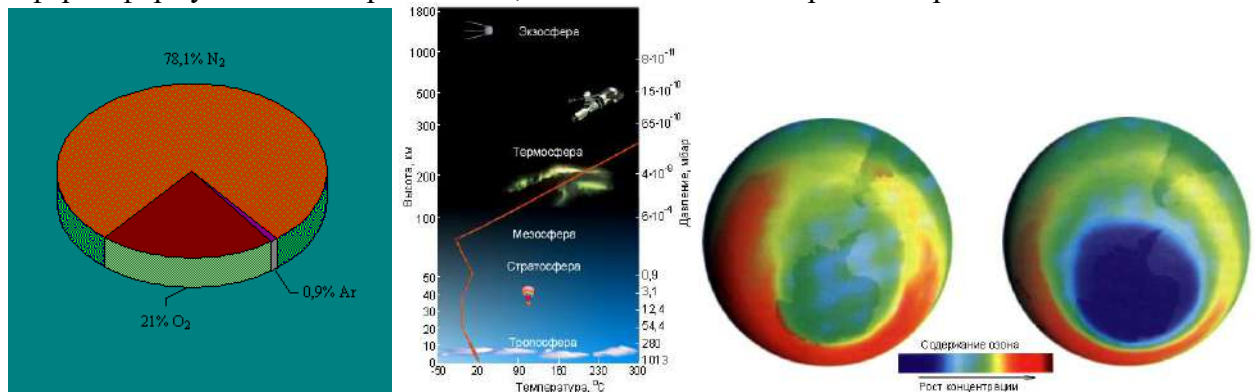


Рис.2.71. Хімічний склад атмосфери Землі та її будова. Озонова дірка над Антарктидою

Диференціація речовини мантії Землі і поповнення продуктами диференціації земної кори водяної та газової оболонок відбувалося протягом всієї геологічної історії та триває і зараз.

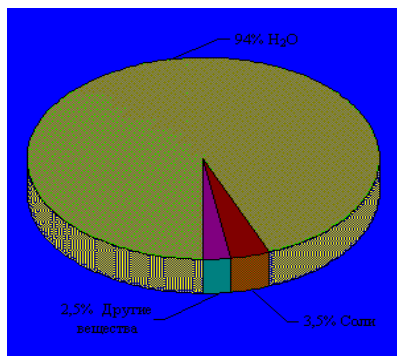


Рис.2.72. Хімічний склад океанів Землі

Поверхню Землі, гідросферу, прилягаючі шари атмосфери і верхню частину земної кори об'єднує закономірна диференціація, яка проявляється у послідовній зміні географічних поясів і зон, що пов'язано із змінами кількості сонячної енергії, яка падає на поверхню Землі в залежності від географічної широти. Ця зона (оболонка) – **біосфера** - стала ареною виникнення та розвитку життя, чому сприяли наявність на Землі певних фізико-хімічних умов, які необхідні для синтезу складних органічних молекул. Безпосередньо пряма чи побічна участь живих організмів у багатьох геохімічних процесах з часом набула глобальних масштабів і якісно змінила цю оболонку.

Земля має **гравітаційне, магнітне, електричне і геотермічне поля**. **Гравітаційне притягування** Землі утримує на навколоземній орбіті Місяць та космічні апарати. Дією гравітацій його поля зумовлені сферична форма Землі, багато рис рельєфу земної поверхні, течії річок, рух льодовиків та інші процеси.

Магнітне поле Землі напругою 50 мікротесла утворюється у результаті складного руху речовини в ядрі Землі. У міжпланетному просторі воно займає об'єм, який набагато перевищує об'єм Землі, а його форма нагадує комету з хвостом (у декілька сотень земних радіусів), який направлений від Сонця. Із магнітосферою Землі тісно пов'язане її

електричне поле. “Тверда” Земля несе від’ємний електричний заряд, який компенсується об’ємним додатковим зарядом атмосфери і в цілому Земля, мабуть, електрично нейтральна.

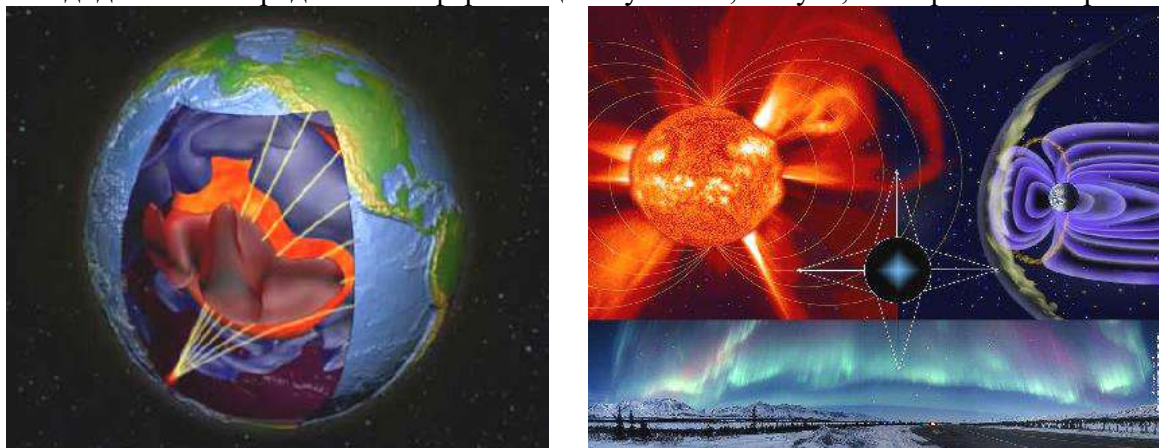


Рис.2.73. Ліворуч: аномальне скупчення речовини мантії під Тихим океаном із областями *швидкого* (центральна частина) та *повільного* (крайові частини) поширення сейсмічних хвиль (прямі лінії) від району землетрусу (крапка); у глибині центру – ядро (ілюстрація AAAS/Sciense). Праворуч: взаємодія частинок сонячного вітру із магнітним полем Землі; більшість частинок обгинає Землю завдяки магнітосфері, але деякі частинки проникають скрізь бар’єр і утворюють полярні сйива (праворуч унизу) та попадають в області тороїдальної форми - *пояси Ван Аллена* або *радіаційні пояси*, де магнітне поле змушує їх рухатись та зумовлює виникнення потужного електричного струму

Джерелом **термічного поля**, можливо, є в основному розпад радіоактивних елементів у надрах Землі, процеси хімічно-гравітаційної диференціації речовини надр і, в меншій мірі, сонячна радіація (біля $0,9 \cdot 10^{17}$ Дж/сек.), яка проникає на глибину декількох метрів.

У просторі, обмеженому головним чином магнітосферою і атмосферою, відбувається поглинання та перетворення космічних променів, сонячного вітру, рентгенівського, ультрафіолетового, оптичного та радіовипромінювання Сонця, що має важливе значення для процесів, які відбуваються на поверхні Землі. Затримуючи жорстку електромагнітну і корпускулярну радіацію, магнітосфера і, особливо, атмосфера з її озоновим шаром захищають від їх впливу живі організми.

Земля має 1 супутник – Місяць.

2.2.3.1. МІСЯЦЬ

МІСЯЦЬ – супутник Землі, який обертається навколо неї еліптичною орбітою на середній віддалі 384 401 км (афелій – 406 700 км, перигелій – 356 400 км) із середньою швидкістю 1,2 км/сек. Діаметр Місяця 3476 км (0,273 діаметра Землі), маса $7,35 \times 10^{22}$ кг (у 81,3 разів менше земної), густина 3,342 г/см³ (0,6 густини Землі), атмосфера відсутня і тому місячне небо завжди чорного кольору.

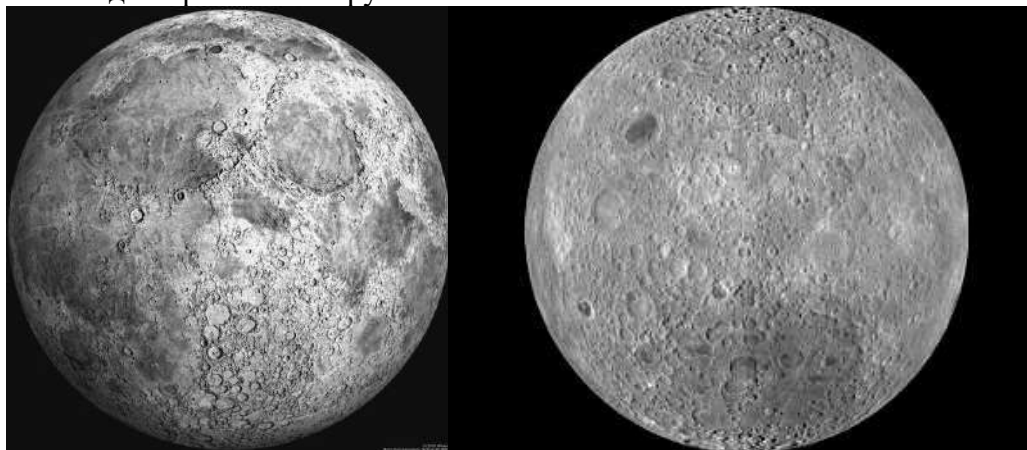


Рис.2.74. Супутник Землі – Місяць

Поверхня Місяця сірого кольору із буруватим відтінком, а сила тяжіння на його поверхні складає: 0,165 сили тяжіння на поверхні Землі. Період обертання Місяця навколо власної осі дорівнює періоду обертання навколо Землі (27дів 8 годин), внаслідок чого із Землі завжди видно один і той же бік Місяця. Сонячна доба на Місяці складає 29,5 земних діб. Температура на поверхні Місяця коливається від +120°C до -150°C.

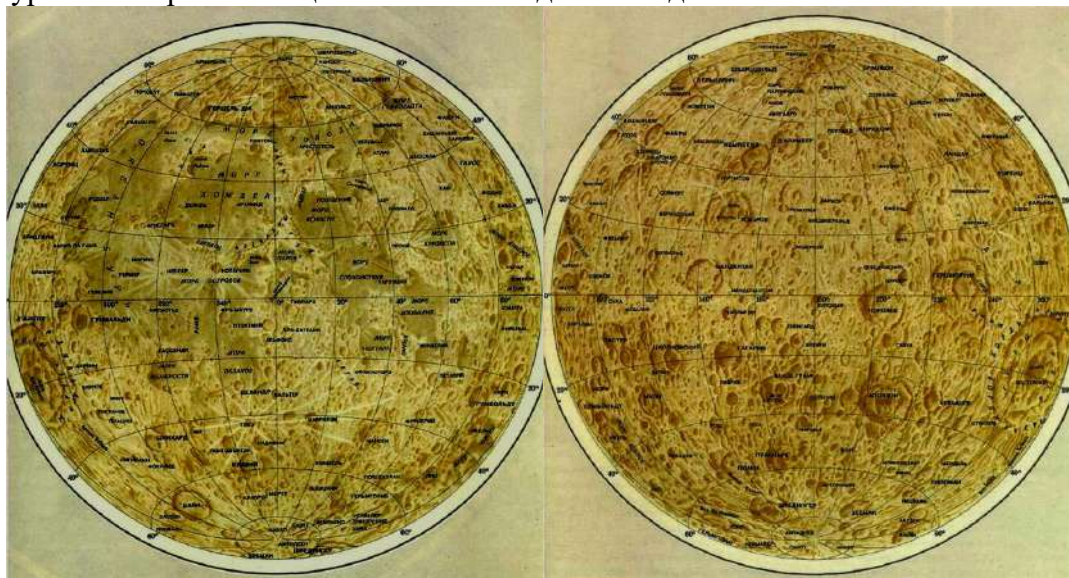


Рис.2.75. Структури видимого та зворотного боків Місяця на схематичній карті

Основні **форми рельєфу** Місяця: **материки** – світлі області (60% поверхні), **моря** – темні області (40% поверхні), **гори** і **хребти** – розмежовують моря і материки, або витягнуті пасмами на материках і досягають 9км висоти (гори *Лейбніца*). Материкові і морські області відрізняються між собою віком, геологічною будовою і, мабуть, матеріалом утворень. Місячні моря являють собою рівнини, заповнені застиглою базальтовою лавою, розташовані приблизно на 1,5км нижче рівня материків і покриті новітніми кратерами, які оточені насипними викидами.

У рельєфі Місяця також виділяють: **цирки** – кільцеві гори (до декількох сотень кілометрів у поперечнику) з рівним темним дном; **кратери** – кільцеві гори менших розмірів із пониженням дном і центральним конусом; **піки** – окремі круті або зубчасті підвищення; **тріщини** або **борозни** – вузькі довгі заглиблення з гірськими кряжами в середині; **вали**

(морські хребти) – вузькі, видовжені похилі підвищення на дні морів.

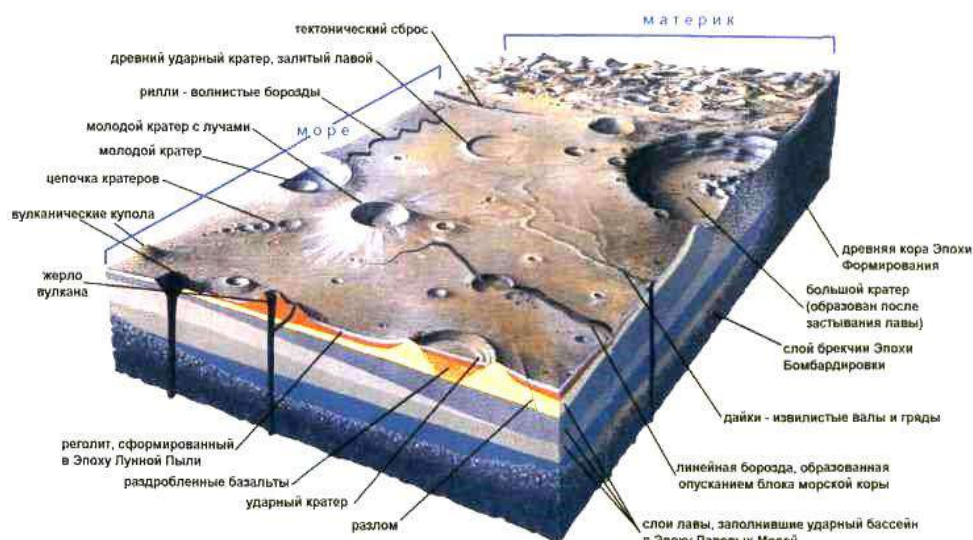


Рис.2.76. Форми рельєфу і розріз місячної кори

Моря – величезні рівнини, які покриті лавою – поділяються на дві групи: **циркові моря** (море *Дошів* – найбільша і найдревніша структура поверхні

місячної кори; моря *Ясності*, *Кризисів*, *Нектару*, *Вологості*) і **моря розтікання** (*Родючості*, *Спокою*, океани *Бурі* і *Хмар*). Циркові моря оточені крутими дуговими схилами, в середині

спостерігаються дугові і радіально-променеві гірські хребти. Обрамлення моря *Доців* асиметричне, інші циркові моря – відносно симетричні.

Рельєф зворотного боку Місяця переважно материковий, в основному покритий горами, і в ньому виявлено новий тип утворень – **талосоїди** – великі світлі западини із материковою (сильно зруйнованою) будовою дна.

Основні гіпотези утворення місячного рельєфу: *екзогенна* (метеоритна) і *ендогенна* (вулканічна). Результати досліджень, які отримані автоматичними місячними станціями та експедиціями *Apollo* (США) підтверджують вулканічну точку зору на утворення рельєфу.

Коли Місяць був молодим, його зовнішній шар був у розплавленому стані, але з часом він остивав і формувалася тверда місячна кора, частини якої зараз складають райони місячних гір і мають вік 4,4 млрд. років. У наступні півмільярда років місячна кора була піддана безперервному бомбардуванню астероїдами. Місячна кора остивала з часом, а під дією радіоактивності розігрівалися внутрішні області. У проміжках часу між 4,2 та 3,1 млрд. років тому лава витікала через розломи та вулкани на поверхню і затоплювала гігантські астероїдні та метеоритні кратери, утворюючи місячні моря. Виливання лав на місячну поверхню тривало біля 1 млрд. років. Близько 2 млрд. років тому вулканічна діяльність на Місяці завершилася, а всі зміни поверхні відбуваються тільки за рахунок падіння метеоритів.

Ці дані отримані в результаті аналізів 385кг місячних порід та реголіту, які були доставлені на Землю екіпажами 6-и космічних кораблів *Apollo*. Зразки місячних порід намагнічені. Отримані за допомогою термохронологічних методів дані свідчать, що біля 4,2 млрд. років тому **Місяць мав постійне глобальне магнітне поле** потужністю не менше 1 мікротесла (у 50 разів слабкіше земного).

Поверхня Місяця покрита шаром уламкового матеріалу – **реголіту** і всяяна окремими різних розмірів великими брилами. Вони представлені (*Луна-16, -17; Apollo*) повнокристалічними, різноманітними за структурою та мінеральним складом, **основними породами** – базальтами, габро, діабазами та їх **мінералами**: *плагіоклазами, піроксенами, олівіном, низькотемпературним кристобалітом, ільменітом, санідіном, шпінеллю, самородними залізом та міддю*. Магматичні породи Місяця піддаються фізичному (температурному) вивітрюванню, а також іншим факторам ерозії поверхні – сонячному вітру, космічним променям, ударам метеоритів та явищам вулканізму. У результаті їх комплексної дії на поверхні Місяця і переважає **реголіт** – **тонкий і мілкий уламковий матеріал із розміром складових частинок до декількох міліметрів, який легко злипається та складається переважно з мілких подрібнених мінералів первинних магм: піроксенів, плагіоклазів, олівіну, значно менше – ільменіту, нікелистого заліза тощо**.

До 20% реголіту представлено *радіоактивними округлими утвореннями вулканічного скла*, доля *метеоритної речовини* близько 1%. Потужність шару реголіту непостійна і змінюється

в залежності від віку та характеру рельєфу, від віку покриву і прямо пропорційна ступеню збагачення реголіту компонентами сонячного вітру. Під реголітом залягають скельні гірські породи місячної кори густиною 2,5-3,3г/см³.

Рис.2.77. Маскони - локалізовані концентрації мас - під місячними морями

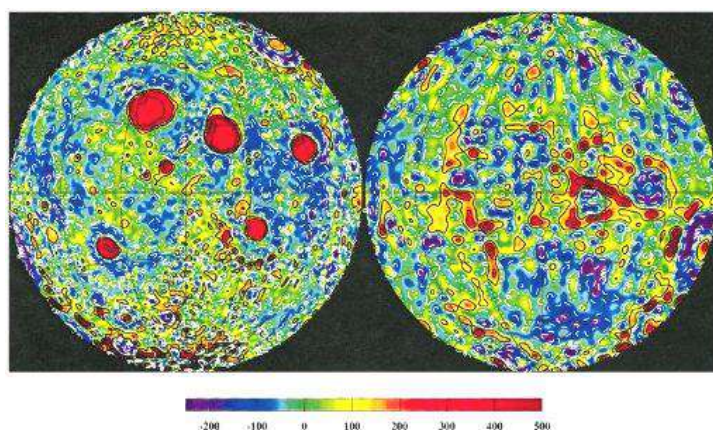


Fig. 8. View of a contour of the lunar surface for the 3-PPM satellite. The color scale is in units of magnetic intensity (nT). The left map shows the front side of the Moon, and the right map shows the back side. The color scale ranges from -200 to 500 nT.

Абсолютний вік досліджених магматичних порід, відібраних у різних місцях поверхні Місяця, коливається від 1,7 до 4,6 млрд. років,

наймолодші породи складають райони *місячних морів*, а найдревніші – *гірські райони*.

Структура **гравітаційного поля** Місяця свідчить про неоднорідності внутрішнього розподілу мас у надрах: значні надлишки мас – *маскони* – зафіксовані під морями Доців, Кризисів, Ясності, Нектару, Вологості, що, можливо, пояснюється *мантійно-коровими утвореннями* або похованими *метеоритними тілами* (рис.2.77).

Про **внутрішню будову** Місяця існували різні точки зору: холодний приповерхневий шар кори, потужністю від 200 до 100км, перекриває розігріті до температури плавлення надра Місяця, речовина яких і заповнила базальтові місячні моря; Місяць має холодну і тверду внутрішню будову, при якій особливості поверхні місячної кори пов'язані із процесами зіткнень супутника Землі з космічними тілами.

Американські астронавти встановили в чотирьох, віддалених між собою, точках поверхні Місяця *сейсмографи* – прилади, які фіксують дуже слабкі місяцетрясіння. Спостерігаючи за коливаннями кори, які викликаються місяцетрясіннями у цих різних точках, вчені роблять висновки про будову надр Місяця.

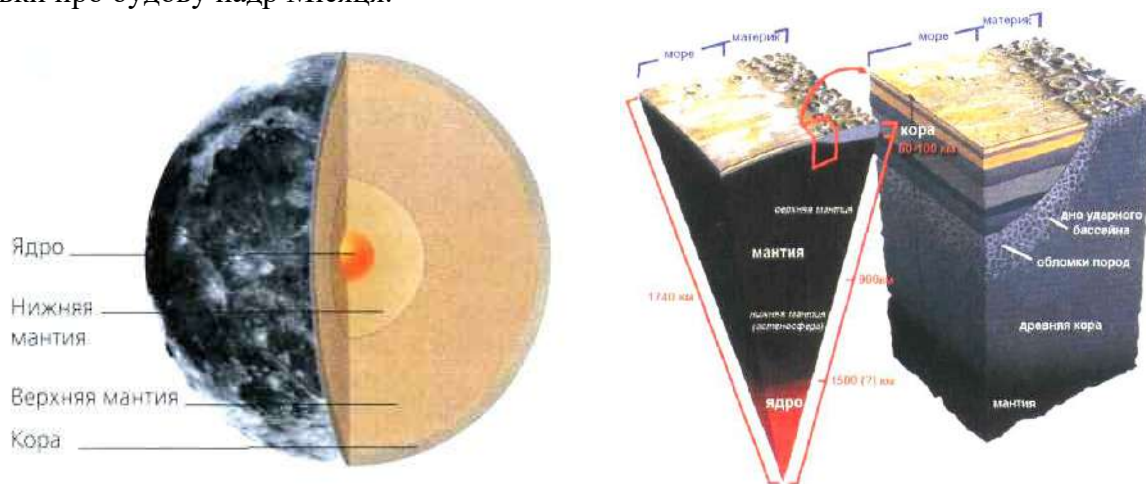


Рис.2.78. Сферична схема внутрішньої будови Місяця

Характер поширення сейсмічних хвиль свідчить, що **місячна кора** (40-60км на видимому і дещо більше – на зворотному боці) значно простіша за будовою ніж земна - вона має лише один (твердий) агрегатний стан, характеризується значною роллю екзогенних космічних факторів у її формуванні в умовах низьких температур та малого гравітаційного поля. Сейсмічні дослідження за програмою *Apollo* на поверхні Місяця, не встановили різких границь у його надрах до глибини 15-20км, виявлена дуже неоднорідна і верстувата будова тільки приповерхневої частини місячної кори: верхній шар, потужністю в декілька сантиметрів підстиляється шаром потужністю в декілька метрів, нижче якого спостерігається розсіювання, багатократне заломлення і зростання швидкості сейсмічних хвиль, яке на глибині 20км складає 4,8-5,6км/сек. і відповідає підвищеному тиску на цій глибині.

Сейсмічні прилади, залишені на поверхні Місяця, на протязі декількох років фіксували місячні “землетруси” силою 0,3-0,5 балів за шкалою Ріхтера, які пов'язують з ударами метеоритів. Зафіксована аномально висока тривалість сейсмічних коливань від падіння частин конструкцій космічних апаратів, які стартували з поверхні Місяця, що може свідчити про високу неоднорідність речовини місячної кори до глибини в декілька кілометрів, або про заломлення поверхневих сейсмічних хвиль на границі реголіту та скельних порід, що залягають нижче.

Встановлений на Місяці відбивач лазерних променів дозволив вченим зафіксувати, що обернений до Землі бік Місяця немов би дихає, наближуючись та віддаляючись від Землі приблизно на 10см. Ці рухи безпосередньо пов'язані із гравітаційним впливом Землі і свідчать про наявність м'якого, частково розплавленого **ядра**. На відміну від земного ядра воно не вміщує заліза і тому Місяць не має магнітного поля. Зафіксували сейсмографами також слабкі “місяцетруси” на глибинах 700-900км від поверхні (це приблизно половина радіуса Місяця). Але повторний аналіз даних (*NASA* та Університет Тулузи), які були зібрані сейсмографами на поверхні Місяця в 70-і роки минулого століття, засвідчив про **розплавлене**

ядро радіусом 330 ± 20 км з переважно залізною **твердою серцевиною** радіусом 240 ± 10 км, яке оточене потужним шаром частково розплавленої на межі з ядром кам'яної маси протяжністю до 480 км - **мантією**, яка покривається місячною **корою**. Існують дві основні гіпотези формування і розвитку місячної кори – як *результат зіткнень Місяця з космічними тілами* при максимумі інтенсивності приблизно $3,5 \times 10^6$ років тому і як *результат внутрішніх процесів диференціації (розподілу) первинної розплавленої речовини Місяця*.

Основні **гіпотези походження** Місяця: захоплення Землею Місяця, який сформувався *раніше* в умовах, які були відмінні від земних (автор *Юра*); формування Місяця *одночасно із Землею* в її навколишньому просторі, на її орбіті або ближче до Землі (*Шмідт*); формування Місяця *одночасно з планетами* із первинної, єдиної з Сонцем, матерії (*Фесенков*); *після формування Землі* Місяць відокремився від неї (*Дарвін*) тощо.



Рис.2.79. Модель *гіпотези імпактного утворення Місяця* та зразки доставлених на Землю місячних гірських порід: ліворуч - 1,5-кілограмовий базальт одного з місячних морів; у центрі - анортозит, схожий за складом на місячну кору підвищених регіонів. Праворуч - гірські породи з дна ударного кратера на Місяці. Хімічний склад місячних порід у різних місцях поверхні різний, проте зразки місячних порід схожі на земні базальти і мають такий же вміст Si, Al, Fe тощо, але в місячних породах більше тугоплавких Ti, Zr, Cr та ін. і менше легкоплавких Pb, K, Na тощо

Не так давно виникла *нова гіпотеза гігантського зіткнення*, яка зараз прийнята за найбільш ймовірну і модель якої була прорахована на комп'ютерах. Основна її ідея в тому, що *незадовго після утворення Землі космічне тіло розміром з Марс врізалось у бокову частину Землі під кутом. Більш легка речовина зовнішніх шарів Землі була викинута у космос і утворила навколо Землі кільце із уламків, а залізне ядро Землі збереглося. З часом кільце уламків злилося і утворився Місяць*.

Уточнений на даний момент вік Місяця 4,47 млрд. років, що узгоджується із віком метеоритів, а також із оцінками віку Сонця. Теорія гігантського зіткнення пояснює, чому на Землі багато з'єднань заліза, а на Місяці їх майже немає. Крім того, із речовини, яка повинна була пізніше утворити Місяць, у результаті зіткнення виділилося в космічний простір багато газів, включаючи кисень. За даними дослідницької місії *LCROSS*, радара *Mini-SAR* та зонду *Chandrayaan* (Індія) на Місяці відкрито **3 типи води**: майже чиста крига у кратерах району полюсів, суміш кристалів води із гряззю, тонкий шар на поверхні супутника.

Контрольні запитання

1. Охарактеризувати прецесію і нутацію осі Землі та вказати їх значення.
2. Охарактеризувати зовнішні та внутрішні сфери Землі та порівняти їх із аналогічними сферами Меркурія та Венери.
3. Охарактеризувати гравітаційне, магнітне, електричне і геотермічне поля Землі.
4. Проаналізувати дані тривимірної сейсмічної томографії надр Землі та модель плюмів у межах її мантії.
5. Вказати основні форми рельєфу на Місяці та дати їм характеристику.
6. Проаналізувати мінерально-петрографічний склад поверхні Місяця та реголіту.

2.2.4. МАРС

МАРС – четверта за віддаллю від Сонця планета Сонячної системи; остання, *найкраще досліджена – крім Землі - з малих планет земної групи*. Марс виконує один оберт еліптичною орбітою навколо Сонця на віддалі від 206 до 249млн. км із середньою швидкістю 24,2км/сек.. *Марсіанська доба (сол)* – триває 24год. 37хв. 23сек., а *марсіанський рік* має 687 солів. Марс менший за Землю: його діаметр 6788км (0,53 діаметра Землі), екваторіальний радіус 3394км, полярний радіус 3376,4км, маса $6,421 \times 10^{23}$ кг (0,107 маси Землі), середня густина $3,95 \text{ г/см}^3$ (0,7 земної), прискорення вільного падіння на екваторі $3,72 \text{ м/сек}^2$ (0,375 земного), об'єм планети 0,15 від об'єму Землі. *Фігура планети Марс має глобальну асиметрію – південна півкуля вища за північну на 3-4км.*

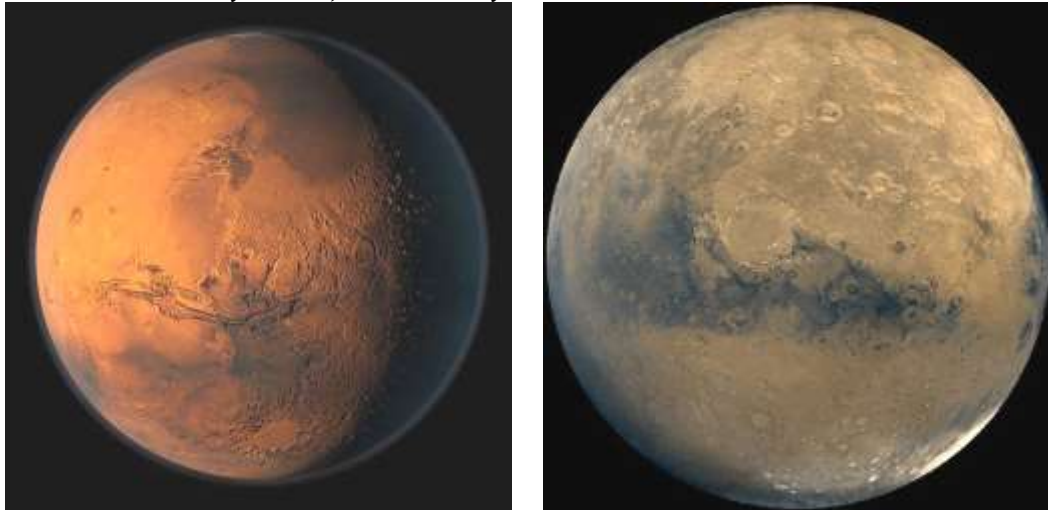


Рис.2.80. Східна півкуля Марса з Долиною Маринера і гігантськими вулканами (фото Viking-1) та зворотній бік планети з ударним кратером Скіапареллі (фото Mars Global Surveyor)

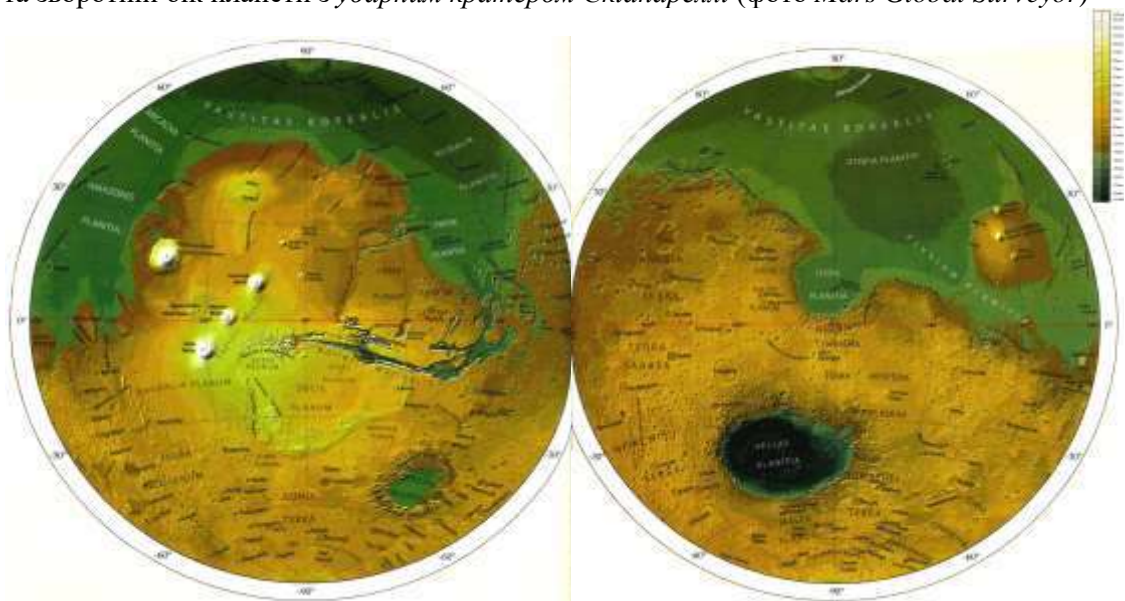


Рис.2.81. Топографічна карта півкуль Марса створена за даними марсіанського орбітального лазерного висотоміру (*Mars Orbiter Laser Altimeter-MOLA*) космічного апарату *Mars Global Surveyor*

Атмосфера і поверхня Марса сформувалися в результаті тривалої та складної історії геологічного розвитку планети.

Атмосфера Марса *розріджена* (атмосферний тиск на поверхні Марса 0,7% земного – близький до 65мм ртутного стовпчика - і він залежить від віддалі між Марсом і Сонцем під час його руху еліптичною орбітою та істотно змінюється протягом марсіанського року через випаровування та замерзання частини атмосфери) та *задушлива* - переважає вуглекислий

газ (95,32%), молекулярний азот (2,6%), аргон (1,9%), кисень (0,16%), оксид вуглецю (0,06%) і водяна пара (0,03%), решта – домішки неону, криптону, ксенону, озону.

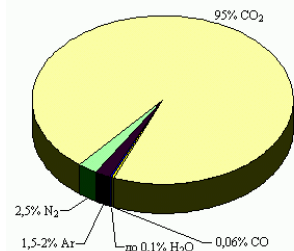


Рис.2.82. Хімічний склад атмосфери Марса

Дані аеродинамічного гальмування в атмосфері Марса КА *Mars Reconnaissance Orbiter* показали, що рух апарату на більш високій орбіті проходив згідно теоретичних розрахункових даних, але по мірі зниження реальні дані стали дуже розходитися із розрахунковими - у деяких точках орбіти реальний атмосферний тиск перевищував на 30% розрахунковий, а у районі південного полюса він у 4,5 рази перевищував теоретичний. В атмосфері Марса панує тиша. Рокіт ракети при посадці, який на Землі був би чути на віддалі кількох кілометрів, на Марсі, за даними комп'ютерного моделювання, пошириться не далі 100-150м.

КА *Mars Express* відкрив в атмосфері Марса метан, вміст якого змінюється від 10 ± 5 часток (із коливаннями 0-30 часток у різних місцях Марса) до 70 часток на 1 млрд. літом у Північній півкулі. Молекули CH_4 в умовах атмосфери Марса нестабільні і без постійного поповнення існують менше 1 року. Викиди струменів метану із локальних джерел пов'язані з теплим сезоном і відомі в районах: Земля цариці Савської (*Terra Sabae*), Великий Сирт (*Syrtis Major*) і Долина Нілу (*Nili Fossae*), проте найбільші концентрації метану зафіксовані над вулканічними провінціями Фарсида (*Tharsis*), Елізій (*Elysium*) і над великими запасами підземної криги в нагір'ї Землі Аравійської (*Arabia Terrae*) (рис.2.84). Літній ріст вмісту метану в Південній півкулі можливо пов'язаний із природною циркуляцією атмосфери.

Безперервне руйнування метану в атмосфері за рахунок фотодисоціації передбачає наявність джерел його поповнення загальною продуктивністю до 300 т/рік або за рахунок залишкового магматизму чи геотермальної активності (на даний момент не зафіксовані), або за рахунок можливих запасів газогідратів на нижній межі кріолітосфери на глибині понад 2км чи існування там бактерій-метаногенів, подібних до знайдених в глибоких екосистемах Землі. Фахівці допускають і комбіноване походження метану - як від бактерій, так і від геологічних процесів.

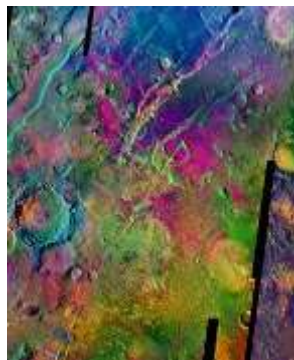


Рис.2.83. Багаті олівіном (пурпурні та фіолетові) області на Марсі (інфрачервоне фото *Mars Odyssey*)

Інфрачервоні фотографії орбітального зонду *Mars Odyssey* свідчать (рис.2.83), що поверхня Марса в південних широтах північної півкулі надзвичайно багата олівіном $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$ – мінералом, який утворюється при дуже високих температурах і дуже швидко кристалізується із магматичних розплавів. При низьких температурах, у присутності води, олівін швидко розкладається із виділенням водню, що вступає у реакцію з атмосферним вуглекислим газом і утворює метан. Ймовірно, що високий вміст метану в атмосфері планети і пояснюється цими реакціями, а не життєдіяльністю мікроорганізмів.



Рис.2.84. Захід Сонця на Марсі (ліворуч); у центрі : світанкові рожеві хмари на висоті 16км із намерзлої на червоних частинках пилу молекул води (фото *Pathfinder* за 40 хв. до сходу Сонця); праворуч: розподіл метану та його концентрації в атмосфері Марса (дані NASA)

Небо на Марсі **жовтого кольору**, так як сонячне світло проходить через хмари тонкого пилу, який піднімається в атмосферу з поверхні планети потужними вітрами і тільки у вечірніх сутінках воно набуває звичного нам синього кольору (рис.2.84). На висоті 36-40км існує слабкий **озоновий шар** потужністю до 7км, який у 250 разів слабкіший за земний.

Вісь планети нахилена до площини орбіти на 25° (майже як у Землі) і на Марсі змінюються **пори року** та виділяються **кліматичні пояси** (*тропічний, помірні і полярні*). Вісь Марса періодично збільшує кут нахилу ще на 10° протягом свого сотиссячолітнього циклу.

Середня **температура** поверхні Марса близько -63°C при великих добових, сезонних та широтних коливаннях: від обмеженої конденсацією атмосфери температури -128°C , яка досягається у високих широтах у період полярної ночі і до $+17^\circ\text{C}$ та більше – опівдні влітку в середніх широтах. Найнижча температура була відмічена в районі південної полярної шапки, де вона досягла -150°C і, в умовах низького тиску, вона близька до точки замерзання вуглекислого газу (CO_2). У тропічній зоні Марса марсіанським літом опівдні температура досягає $+20^\circ\text{C}$, а вночі опускається до -90°C , так як розріджена атмосфера планети не здатна утримувати тепло. На більшій частині поверхні Марса температура -23°C . На протязі 70-90-х років ХХ століття температура на Марсі зросла на $0,65^\circ\text{C}$ за рахунок впливу сонячної радіації на марсіанський ґрунт. Великий діапазон температур та їх максимум не у тропічній зоні, а у середніх широтах, пояснюється низькою густиною атмосфери та відсутністю стабілізаційного впливу океану. Взимку основний компонент марсіанської атмосфери – вуглекислий газ – конденсується і випадає на поверхню планети у вигляді **снігового покриву** (CO_2 -сніг) **сезонних полярних шапок**.

Поверхня Марса змінювалася як від **метеоритного бомбардування**, так і під впливом **ендогенних** (вулканічних, тектонічних) та **екзогенних процесів** (еолових, локально-флювіальних, гравітаційних, мерзлотних, еолово-гляціальних), особливо денудаційно-ерозійних. **Найбільших катастрофічних змін ландшафт Марса зазнавав від вулканізму.**



Рис.2.85. Ліворуч та у центрі: панорами поверхні Марса. Праворуч: біля підніжжя **горбів Колумбії** – кінцевої мети подорожі марсохода-геолога *Spirit* на Марсі (фото *Spirit*)

Зараз встановлено, що важливу роль у формуванні рельєфу поверхні відігравали **гідрогеологічні процеси**, але сучасні кліматичні умови – низький тиск і мінусові температури – виключають можливість зараз вільного існування на поверхні Марса води у рідкому стані.

Вода на Марсі існує у великій кількості, але там вона у вигляді: криги постійних полярних шапок (рис.2.90, 2.96), **льодовиків** (рис.2.134, 2.140), **промерзлих до дна морів і озер** (рис.2.142), **крижаних кристалів кріолітозони („вічної мерзлоти“)** (рис.2.94), **тимчасових потоків води, суміші води із сульфатами заліза ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)** (рис.2.147, 2.150) та **парів води в атмосфері планети** (рис.2.94). На Марсі існують **полярні шапки** – **північна і південна**, розміри яких з рухом планети орбітою навколо Сонця змінюються (рис.2.86–2.90).

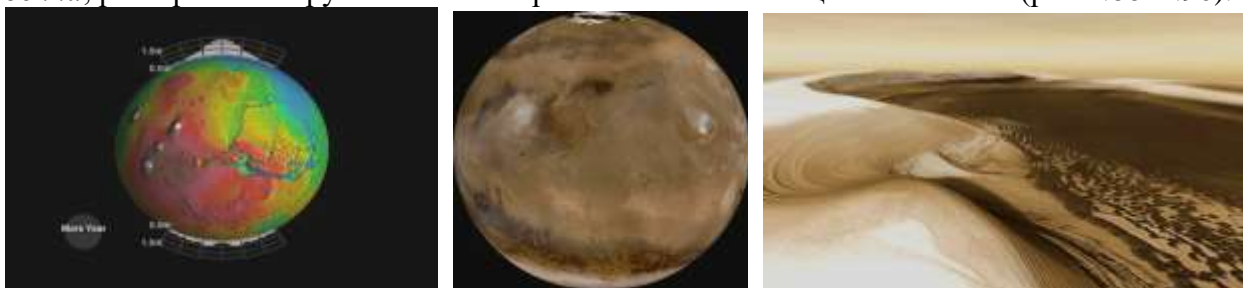


Рис.2.86. Схема максимальних розмірів і потужностей **полярних шапок** Марса (дані *MOLA MGS*), фото Марса з полярними шапками на полюсах та піщаними дюнами (фото *Mars Global Surveyor*)

Шапки збільшуються у холодні сезони і зменшуються у теплі - відповідно до пори марсіанського року в кожній півкулі, тобто, крім **постійних** полярних шапок, які істотно відрізняються між собою, на Марсі існують і **сезонні** полярні шапки.

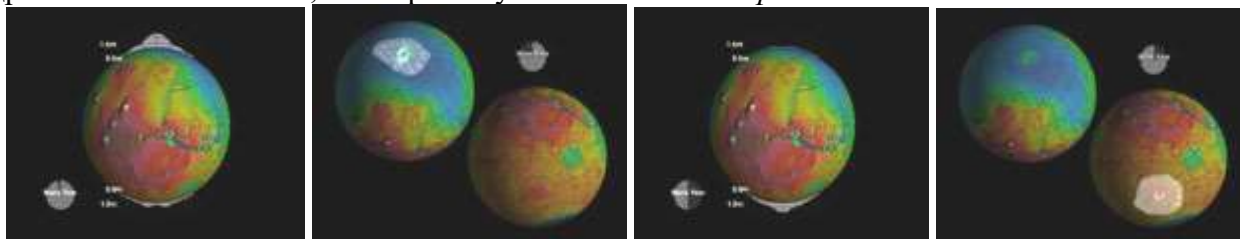


Рис.2.87. Схеми розмірів, площ і потужностей *північної та південної* полярних шапок (за даними MOLA Mars Global Surveyor)

Температура та тиск у помірних широтах такі, що влітку водяна крига сублімує в атмосферу і її водяні пари переносяться на полюси, де вони випадають у вигляді твердих осадків. Водяні сніг та крига формують велику частину *постійних полярних шапок Марса*.

За рахунок глобальної циркуляції атмосферного вуглекислого газу між полюсами, там, на їх поверхні, формуються сезонні (осінь-зима) осадки „сухого CO_2 -снігу” *сезонних полярних шапок*, які весною випаровуються. Марсіанська крига являє собою *водяну кригу та заморожений двооксид вуглецю (CO_2 -сніг)*, який у теплий сезон переходить із твердого стану в газоподібний (сублімація) і поповнює тонкий шар атмосфери, а у холодний період близько 25% атмосфери знову “примерзає” до полюсів планети. Різкі перепади тиску в атмосфері Марса виникають при замерзанні вуглекислого газу над полюсами та його випадінні у вигляді CO_2 -снігу. На його місце від екватора до полюсів спрямовуються потужні атмосферні потоки – нові порції вуглекислого газу. Весною CO_2 -сніг у нагрітих областях поверхні починає випаровуватися, тиск атмосфери тут різко зростає і знову виникають потужні вітри від екватора до полюсів, де температури ще низькі і випаровування немає. Вуглекислий газ атмосфери також формує велике **снігове покриття** у приполярних широтах, яке випаровується знову із приходом весни у кожен півкулю.

Марсіанський рік майже удвічі більший за земний, тому і пори року на Марсі більш тривалі, але через відносно великий ексцентриситет орбіти Марса вони мають різну тривалість - літо у південній півкулі (Марс найближче до Сонця) коротше та жаркіше за північне літо, а зима тут значно більш холодна і триваліша, в результаті чого CO_2 -сніг не встигає повністю розтанути і водяна крига південної полярної шапки постійно покрита шаром замерзлої вуглекислоти. З приходом весни у кожен з півкуль полярні шапки швидко зменшуються у розмірах, а на їх краях з’являється темна смуга шириною у декілька сот кілометрів – *зона зволоження*.

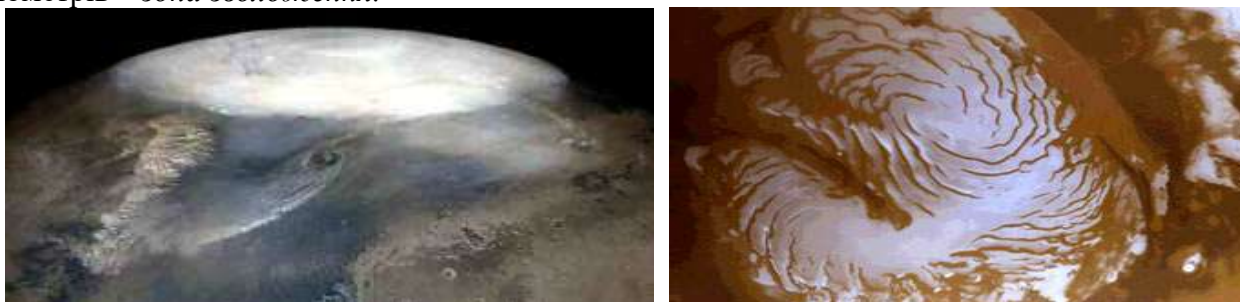


Рис.2.88. *Сезонна* взимку (ліворуч) та *постійна* влітку (праворуч) *північні полярні шапки* Марса зі складною верстуватою та спіралью закрученою за годинникову стрілку структурою крижаних і снігових відкладів, які покриті еоловим пилом (фото Mars Global Surveyor)

Взимку у південній півкулі південна полярна шапка розростається до половини віддалі між полюсом та екватором, а зима у північній півкулі збільшує північну шапку тільки до третини аналогічної віддалі. Важливу роль у формуванні полярних шапок відіграють пилові бурі, які переносять величезні хмари пилу вздовж усієї планети.

Північна полярна шапка (діаметр 1200км, площа 800 000км², товщина до 3км) істотно більша південної за потужністю і складається переважно із *звичайної водяної криги* (H₂O) з невеликими *домішками* (менше 1%) *пилу*, а запаси води в ній складають майже 4% від запасів води в антарктичному льодовику на Землі (рис.2.88-2.90). У будові шапки радіозондуванням виділяють біля **40** пластів, які діляться на **4 групи** тонких та товстих шарів *дуже чистої криги*, розділених прошарками *лесового матеріалу*. Формування „забруднених” та „чистих” пластів криги зумовлене теплими та холодними кліматичними періодами Марса.

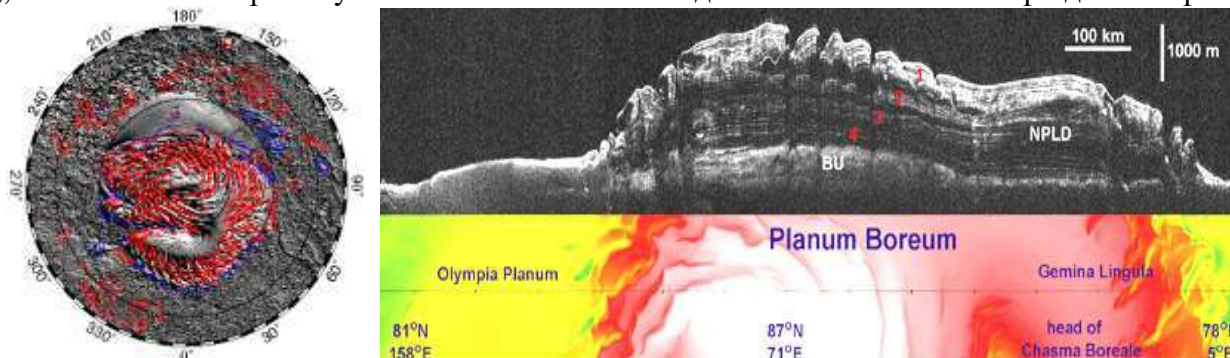


Рис.2.89. Рельєфна карта північної полярної шапки Марса (синім контуром – сезонна шапка, червоним – постійна шапка) (за даними *MOLA Mars Global Surveyor*) та її внутрішня будова (глибинне зондування радаром *SHARAD* на *Mars Reconnaissance Orbiter*)

Полярна область оточена рядами *піщаних дюн*, а межа між кригою північної шапки та поверхнею планети являє собою ступінчастий обрив висотою до 500м з окремими уступами висотою до 50м, а глибина каньйонів та западин на поверхні шапки досягає 1км (рис.2.89).



Рис.2.90. Поверхня покритої пилом сезонної CO₂-криги північної полярної шапки взимку в оточенні темних піщаних дюн (ліворуч) та постійна північна полярна шапка з H₂O-криги з глибоким *Північним каньйоном* (у центрі) (фото *Mars Global Surveyor*) та її тривимірне зображення (праворуч)

З приходом весни у північну півкулю піщані дюни починають розмерзатися. Більш тонкі крижані прошарки тануть першими і оголюють пісок, на темних ділянках якого розмерзання проходить більш інтенсивно. До літа плями розширюються до розмірів окремих дюн, які повністю розмерзаються і темніють.



Рис.2.91. Крижані пласти у стінці каньйону північної полярної шапки перекриваються верствами осадових відкладів, що свідчить про коливання клімату аналогічно льодовиковим періодам на Землі (фото *Mars Reconnaissance Orbiter*)

На фотографіях чітко видно характерну для всієї північної полярної шапки *спіральну структуру крижаних та пилових гребенів*, яка сформувалася під впливом потужних вітрів та сонячного світла. Характер верстуватості утворень шапки та аналіз її відкладів свідчить про періодичні коливання планетарної *осі Марса* (вона може відхилятися від свого звичного положення на цілих 47°) із змінами орбіти, що виникають через відсутність стабілізаційного гравітаційного впливу великого супутника (як Місяць у Землі), що приводить до настання „льодовикових періодів”.

Максимальна потужність північної полярної шапки близько 3км, прогинання кори Марса під її вагою біля 100м, а вік, за оцінками вчених, майже 5млн. років і саме тоді відбулося останнє зміщення Марса по орбіті, через яке розпочався останній льодовиковий період.



Рис.2.92. Ліворуч: танення північної полярної шапки Марса за 5 місяців – з початку весни до початку літа (сезони на Марсі удвічі довші за земні) (фото *Mars Global Surveyor*). У центрі: покриті пилом яруси червоних уступів між пластами криги в обривах Північного каньйону північної полярної шапки (перепад висот справа ліворуч до 1км). Праворуч: весняні лавини із каміння та криги на крутому схилі північної полярної шапки (фото *Mars Reconnaissance Orbiter*)



Рис.2.93. Водяна крига (світлі пласти) та пил верхньої частини північної полярної шапки (ліворуч) та збільшена верхня частина лівого фото з вертикальними обривами (до 2км) льодовика та сірими ділянками, можливо, вулканічного попелу (фото *Mars Express*)

Радар глибинного зондування *MARSIS* орбітального апарату *Mars Express* (2005) визначив у надрах планети поблизу північного полюса пласт майже чистої H_2O -криги товщиною понад 1км, який перекритий ще більш потужним шаром марсіанського реголіту з базальту, а також відкрив резервуари з кригою під полярними шапками Марса.

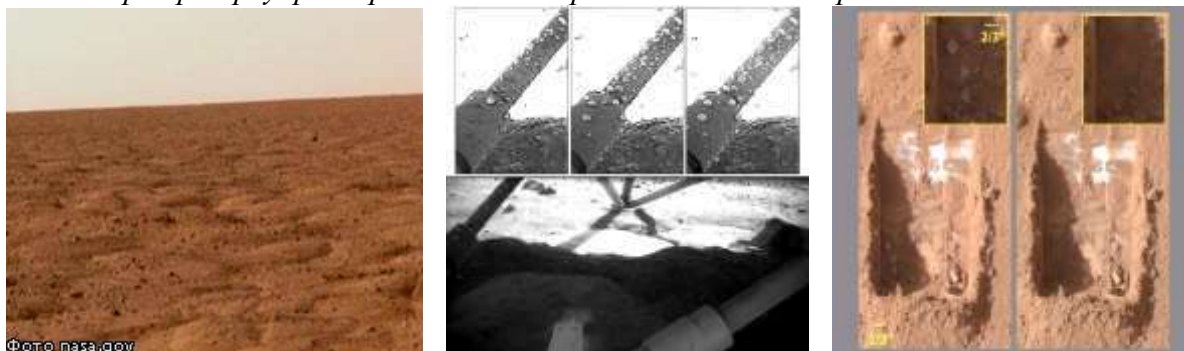


Рис.2.94. Ліворуч: полігональні структури зони багатолітньої мерзлоти біля північної полярної шапки Марса в районі посадки зонда *Phoenix* ($125,75^{\circ}$ з.д., $68,22^{\circ}$ пн.ш.) свідчать про наявність H_2O -криги. У центрі: очищений струменями гальмівних реактивних двигунів *Phoenix* від солового піску та пилу суцільний шар водяної криги та краплини рідкої води чи її соляних розчинів на опорі *Phoenix* (на 8-й, 31-й, 44-й соли). Праворуч: сублімація H_2O -криги в розрідженій атмосфері Марса (фото *Phoenix*)

Дані орбітального зонда *Mars Odyssey* (2002) свідчать, що Марс переживає ще більш різкі щорічні перепади клімату, ніж це допускалося раніше. Сезонні перетворення на Марсі залежать не від води, снігу чи криги, а від вуглекислого газу.

Південна полярна шапка має температуру конденсації вуглекислого газу та складена нашаруваннями тонких прошарків замороженого вуглекислого газу (CO_2 -крига) з домішками водяної криги і пилу, причому їх розподіл нерівномірний - ділянки водяної криги розташовані на крайових частинах більш значних площ CO_2 -криги (рис.2.95, 2.96).

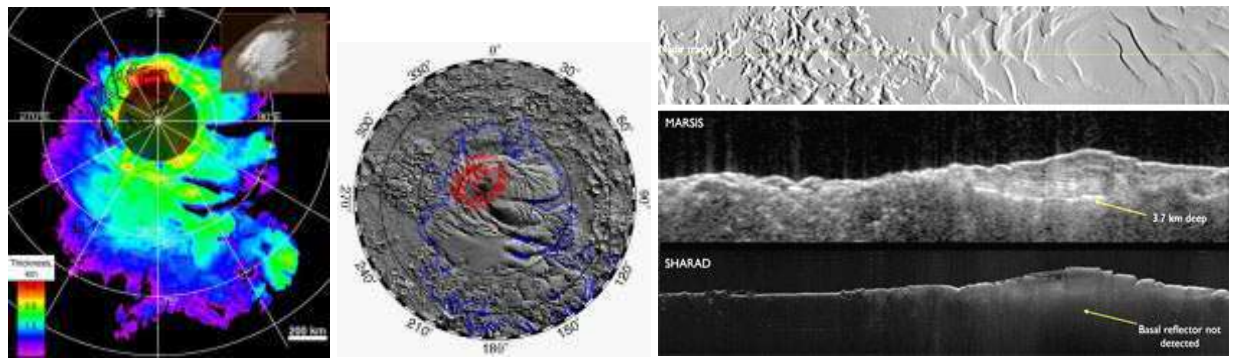


Рис.2.95. Карта південної полярної шапки Марса (кольорова шкала потужності в км). Рельєфна карта південної полярної шапки Марса (синім контуром – велика сезонна шапка, червоним – мала постійна шапка) (за даними MOLA Mars Global Surveyor) та її внутрішня структура (глибинне зондування радаром MARSIS на супутнику Mars Express та SHARAD на супутнику Mars Reconnaissance Orbiter)

Потужність білої сезонної шапки замороженого вуглекислого газу не перевищує метра, а під нею знаходяться затемнені високим вмістом пилу, великі та глибокі багатшарові постійні утворення похованої водяної криги (90% - замерзла вода), можливо, еквівалентні постійній північній полярній шапці. Швидкість накопичення відкладів постійних шапок 0,1мм/рік. Потужність південної полярної шапки 3,7км, на більшій частині шапки – понад 2км, а запасів води у ній вистачить для покриття поверхні Марса шаром води глибиною 11м.

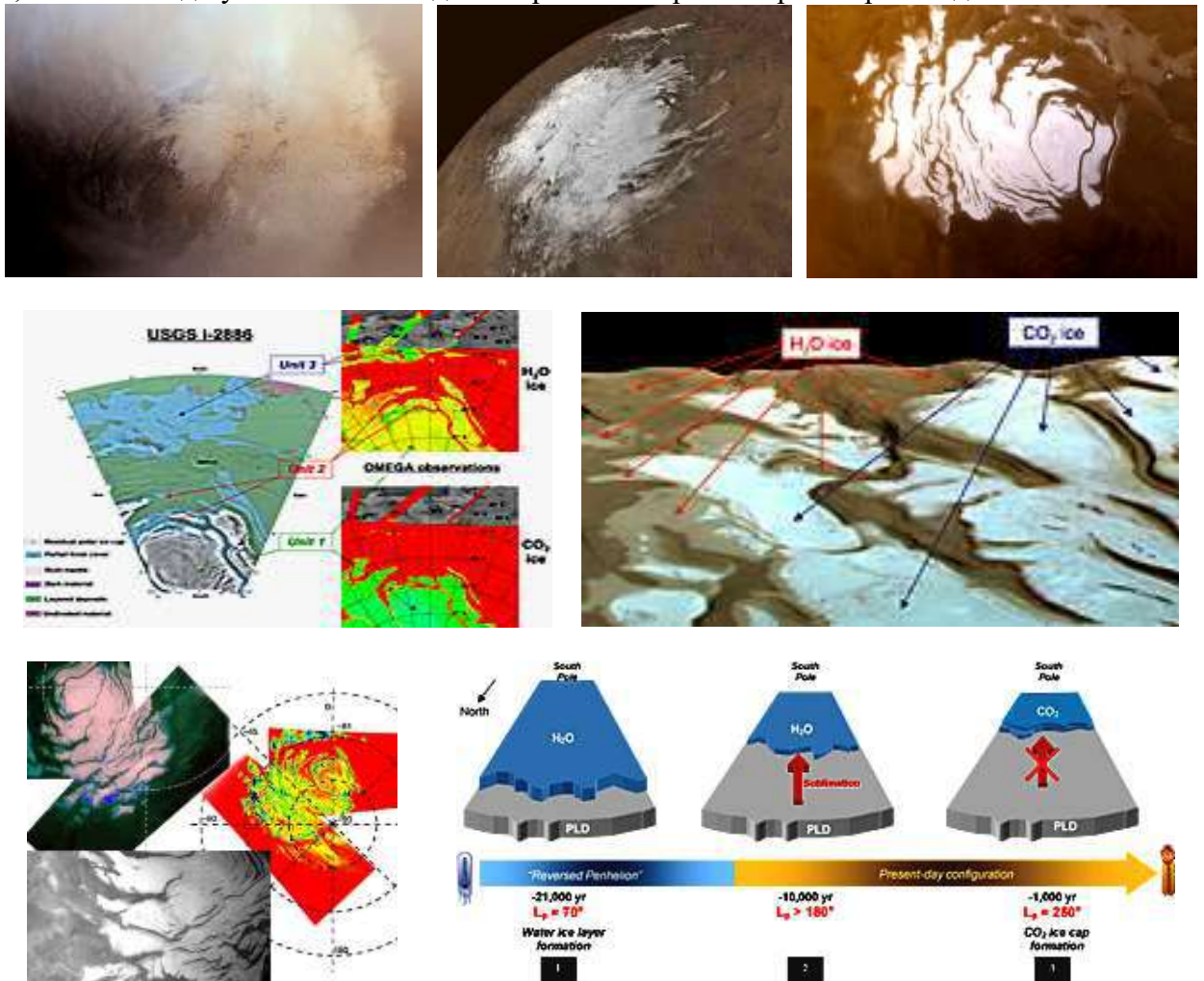


Рис.2.96. Верхній ряд: ліворуч –сезонна CO_2 -крижана південна полярна шапка взимку; у центрі і праворуч – постійна південна полярна шапка діаметром 420км влітку (фото Mars Global Surveyor). У центрі - поширення H_2O -криги та CO_2 -криги на південному полюсі Марса. Нижній ряд: положення полярної шапки на південному географічному полюсі та модель впливу прецесії осі Марса 21 000, 10 000 і 1000 років тому на формування H_2O -криги на південному полюсі



Рис.2.97. Ліворуч: унікальний ландшафт південної полярної шапки із плоскими височинами висотою 4м та округлими западинами понад 100м упоперек після сублімації CO_2 -криги; детальний вигляд нашарувань CO_2 -криги південного льодовика (у центрі) та уступ південної полярної шапки (праворуч) зі світлими виходами крижаних пластів (фото *Mars Global Surveyor*)

Великі запаси криги поширені за межами видимої полярної шапки, де вони поховані під зовнішнім шаром пилу. Постійна крижана південна полярна шапка розташована в 150км на захід від географічного Південного полюса, що зумовлено ландшафтами двох величезних кратерів у південній півкулі Марса, які створюють область низького тиску біля західного краю шапки із частими там опадами для нарощування снігово-крижаної шапки.



Рис.2.98. Засніжена окраїна південної полярної шапки – рівнина Прометей – покрита крижаним льодовиком з крутими схилами висотою від 900 до 1100м; праворуч: вигляд окраїни полярної шапки із космосу (фото *Mars Express*)

Мерзла вода на Марсі співіснує із замерзлою вуглекислотою і тому властивості марсіанської криги істотно відрізняються від земної криги. Рідка вода на Марсі може існувати в інтервалі температур від $-1^{\circ}C$ до $+2^{\circ}C$. Нижче вона замерзає, вище – закипає. Зараз встановлено, що розчини води з солями можуть бути рідкими і нижче $-70^{\circ}C$ Льодовики Марса утворені із H_2O -снігу та CO_2 -снігу, які разом з піском переносяться над поверхнею Марса під час пилових бур. Різні розміри полярних шапок взимку свідчать про те, що триваліша зима у південній півкулі зв'язує в її полярній шапці більше вуглекислого газу у вигляді тимчасової прозорої CO_2 -криги і тому тиск у атмосфері Марса різко падає.

Весною промені Сонця нагрівають через менш летку та прозору H_2O -кригу гірські породи ложа льодовика або забруднені пилом льодовикові нашарування, зумовлюючи сублімацію CO_2 -криги у крижаному покриві. Утворений вуглекислий газ створює величезний тиск у середині льодовика чи кріолітозони та проривається через тріщини на поверхню вибухами із утворенням численних каналів потужних **газових гейзерів** (віддалі між гейзерами сягає сотень метрів) з **фонтанами викидів пилу** на висоту декількох сотень метрів (рис.2.99).

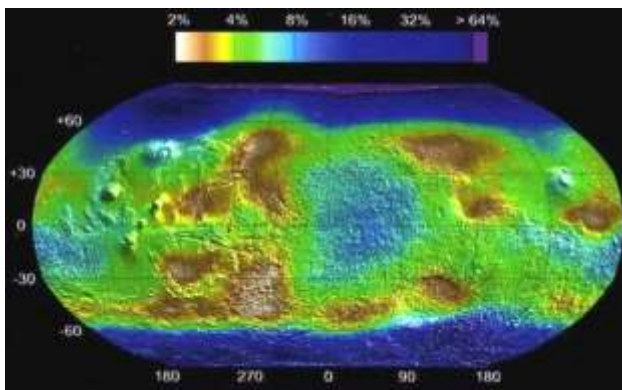


Рис.2.99. Ліворуч: **мереживні узор**и («павуки») відкладів газово-пилових **гейзерів** на крижаних покривах полярних шапок (фото *Mars Reconnaissance Orbiter*). У центрі: **газово-пилові гейзери** у районі південної полярної шапки на початку марсіанської весни (художнє оформлення Рона Міллера) та можливі форми знаходження замерзлої води в областях **багатолітньої мерзлоти** (праворуч)

Потім мілкі частинки пилу осідають на поверхню полярної шапки і формують характерні *мереживні сліди-узори* довжиною 15-50м у вигляді *віяла, шлейфу* чи „*навука*”. „Постійність” дії на протязі багатьох років окремих марсіанських гейзерів пояснюється наявністю під сезонною шапкою CO_2 -криги постійно існуючої H_2O -криги, яка майже нечутлива до променів далекого і низького над горизонтом Сонця *марсіанського полярного дня*, а прогрів CO_2 -криги відбувається у тих місцях, де на звичайній водяній кризі існує шар темного пилу попередніх минулорічних вивержень. Частина вирв-кратерів із оточуючими їх шлейфами викидів має аналогічне утворення. **Марс став п'ятим космічним тілом Сонячної системи, на якому безпосередньо спостерігалась активна діяльність гейзерів.**

Одночасно починає рости північна полярна шапка, але в атмосфері залишається більше вуглекислого газу і тиск зростає. Південний полюс Марса майже на 6,5км вище за північний і такий рельєф змінює циркуляцію атмосфери у цій частині планети. Влітку у південній півкулі полярна шапка тане і вологий вуглекислий газ як з гірки скочується до екватора і звідти направляється до північного полюса, де добавляється до водяної пари та вуглекислого газу, які є над північною полярною шапкою. Ці процеси зумовлюють *значні коливання атмосферного тиску* і викликають *глобальні переміщення атмосферних мас, гігантські пилові бурі та урагани*. Полярні шапки Марса – відносно молоді утворення, які відносять пізньої епохи амазонійського періоду геологічної історії Марса. За кількістю ударних кратерів вчені визначають вік південної полярної шапки в 7-15 млн. років, а північної – від 100 тис. до 10 млн. років. Загальний об'єм полярної криги полюсів 2-3 млн. км³, домішок пилу не більше 5%. Дослідження приладу *HEND* (Росія) орбітального апарату *Mars Global Surveyor* дозволили надійно встановити наявність великої кількості води в ґрунтах Марса у вигляді **багатолітньої (вічної) мерзлоти** на великих ділянках північної і південної півкуль та в **гігантських льодовиках**, які покриті еоловими наносами, у гористих районах *середніх широт* – рештках гігантського зледеніння (рис.2.100, 2.129, 2.134).

Північна область мерзлоти поширена на 1300-1500км від 60° північної широти до північного полюса і місцями фіксується на 40° північної широти. В її верхніх 1-3м ґрунту вміст замерзлої води складає 35-50% і не змінюється з глибиною, хімічний аналіз ґрунту засвідчив вміст з'єднань Mg^{++} , Na^+ , Cl^- і потужного окисника - перхлорату (ClO_4^-).



Атмосферна температура коливається від -30°С опівдні до -80°С вночі (дані *Phoenix*).

Рис.2.100. Карта розподілу підповерхневої криги на Марсі (за даними *THEMIS Mars Odyssey*)

Південна область мерзлоти розташована навколо південного полюса і простягається до 60° південної широти, місцями - до 40°, але вона має *двошарову будову*: шар *вічномерзлих порід* надр зверху перекритий шаром непостійної потужності *сухого ґрунту* щільністю 16-35г/см³. Вміст H_2O -криги в нижньому мерзлотного шару за 70° південної широти понад 40%, а на 60° південної широти – 20%.

Доля водяної криги в ґрунті *вічної мерзлоти* на півночі та півдні приблизно однакова, але на півдні вічномерзлі породи не виходять на денну поверхню і перекриті відносно тонким шаром *сухого ґрунту*. Під цим тонким шаром замерзлої *вуглекислоти* південної полярної шапки *залягає така ж кількість водяної криги, що і в оточуючому її ґрунті вічної мерзлоти*.

Присутність вічної мерзлоти на *двох* діаметрально протилежних *ділянках екваторіальної зони* (провінції *Аравія* та *Борозна Медузи*) важко пояснити – лід повинен був би швидко сублімувати в атмосферу. Він може існувати тут тільки в умовах низької теплопровідності *глинистих осадових утворень* чи *відкладів з високим вмістом хімічно зв'язаної води*, або при наявності у ґрунтах *вільної водяної криги*. Сучасний Марс – *суха і морозна планета, проте у деяких його районах присутні діючі джерела і, ймовірно, стійкі канали ґрунтових вод*.

Через тонку та розріджену атмосферу **хмарність на Марсі рідкісне явище**, проте спостерігаються різні форми **хмар** і **туману**. Вранці **туман** згущується у долинах, а по мірі того, як вітри піднімають повітряні маси на підвищені плато, хмари починають формуватися над горами. **Хмари** найчастіше спостерігаються над **вулканічним плато Фарсіда**, коли тепле повітря з водяними парами піднімається вздовж схилів вулканів. На великій висоті воно ще більше охолоджується і з водяної пари утворюються крижані кристалики хмар. Взимку північна полярна шапка укутується завісою **туману** із мілких крижаних частинок і пилу. Подібне, але дещо менше за розмірами, явище спостерігається і на півдні, що ще раз підтверджує наявність води на Марсі, причому хмари утворюються коли Марс знаходиться в **афелії** – найвіддаленішій точці орбіти, де планета отримує на 40% менше сонячної енергії, ніж при проходженні **перигелію** – найближчої до Сонця точки орбіти. Також на висоті 80км була зафіксована **щільна хмарність** потужністю до 3-4км із гранул CO_2 -криги діаметром до 0,5мм, яка пропускала до 40% сонячного світла та утворювала тінь на поверхні Марса.



Рис.2.101. **Хмари** високо в атмосфері Марса – рідкісне явище через майже повну відсутність вологи в атмосфері планети влітку (фото *Pathfinder*) та вони часті гості взимку; **туман** і **денні хмари** із дрібних частинок водяної криги стеляться вздовж каньйонів *Долини Маринера* (фото *Mars Global Surveyor*)

Крім цього, *Mars Express* відкрив на висотах 20-50км водяну пару (20 частинок на 1млн частинок) і між 80 та 100км **сріблясті хмари**, які, можливо, складені із найдрібніших CO_2 -кристаликів. Температура атмосфери на таких висотах складає $-193^{\circ}C$. Центрами конденсації і кристалізації вуглекислого газу для утворення хмар були найдрібніші (соті долі нанометра) частинки пилу в атмосфері Марса на висотах вище 60км, винесені туди потужними вітрами, або це рештки від вибухів метеорів в атмосфері Марса.

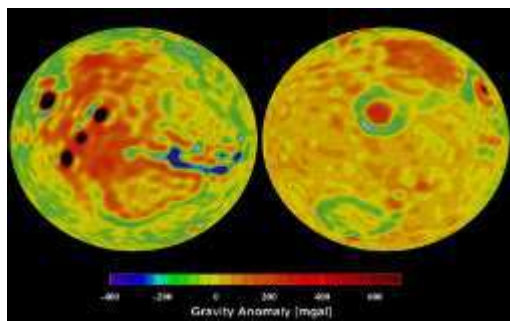


Рис.2.102. Гравітаційна карта Марса

За орбітальним рухом космічного апарату *Mars Global Surveyor* вдалося відтворити **гравітаційне поле** Марса із достатньою точністю, щоб встановити локальні концентрації маси та інші гравітаційні неоднорідності. Глобального **магнітного поля** (у вигляді «пухиря» навколо планети) Марс не має, але спостерігається, особливо у південній півкулі, чергування багатьох направлених із заходу на схід потужних смуг **магнітних аномалій** протилежної полярності шириною біля 100км і довжиною до 2000км (ознаки тектоніки літосферних плит), які **своєрідним узором покривають більшу частину півкулі і поступово зникають поблизу границі північних рівнин** (рис.2.103).

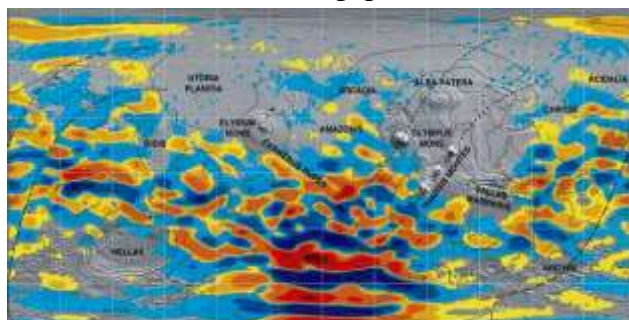


Рис.2.103. Карта Марса з лінійними магнітними аномаліями протилежних полярностей свідчить про ознаки тектоніки літосферних плит на Марсі у далекому минулому (дані *Mars Global Surveyor*)

Космічний апарат *Mars Global Surveyor* відкрив **залишкову намагніченість** порід кори Марса. Магнітне поле Марса у 800 разів менше ніж земне та в 6 разів менше від меркуріанського і, під дією сонячного вітру,

деформоване подібно до земного. Орбітальні магнітометричні вимірювання показали, що це поле не дипольне, з чіткими північним та південним полюсами, як на Землі, а воно має характер *шарів із чергуванням знаків*, що нагадують *домени* (області з однаковою намагніченістю) у феромагнетиках. **Невеликі, але потужні джерела магнітних полів, в одних місцях захищають атмосферу, а в інших, навпаки, сприяють її втратам під дією сонячного вітру.** Локальні магнітні аномалії спостерігаються у місцях розломів марсіанської кори (рис.2.103) і побічно свідчать, що вони є рештками раніше існуючого *глобального планетарного магнітного поля* Марса, але при падінні астероїда, що утворив кратер Еллада, ударна хвиля проникла в ядро Марса і, ймовірно, викликала там незворотні зміни, так як в утворенні планетарних магнітних полів достовірно приймають участь електричні струми, що утворюються у розплавленій частині ядра за рахунок конвекційних потоків і яких зараз немає, ймовірно, через повністю тверде ядро планети. Над цими областями поверхні Марса із зафіксованими змінами у магнітних властивостях кори планети у 2004р. зафіксовані в ультрафіолетовому діапазоні зеленого кольору „*полярні сяйва*” типу полярних, природа яких така ж, як і на Землі (рис.2.104). Відсутність у Марса, на відміну від Землі, потужного магнітного поля, яке б захищало планету від потоків заряджених частинок сонячного вітру, що глибоко проникають в атмосферу планети, безпосередньо взаємодіють на молекули газів атмосфери і передають їм імпульс енергії, зумовлює покидання молекулами атмосфери через незначне гравітаційне тяжіння планети і розсіювання їх у космосі. Прилади *Mars Express* визначили склад цих відлітаючих частинок – іони кисню, водню, двооксиду вуглецю тощо.

За підрахунками вчених, кожну секунду з Марса відлітає близько 1кг речовини. Саме завдяки слабкому магнітному полю і сонячному вітру марсіанська атмосфера за мільярди років втратила більшість своєї початкової маси, причому найбільш катастрофічних наслідків їй завдавали потужні сонячні магнітні бурі. Нові дані орбітального зонду *Mars Odyssey* свідчать, що **радіація** на аероцентричній орбіті у 2,5 разів перевищує рівень радіації на навколоземній орбіті, що підтверджує припущення вчених про інтенсивну радіацію на поверхні Марса.

Марс – планета із **активними геологічними процесами**. Раз у два роки Марс максимально наближається до Сонця і дещо нагрівається. Температура червоної поверхні Марса під час марсіанського літа стає значно вищою за температуру прилягаючого шару атмосфери, тому вдень, коли атмосфера планети прогрівається до плюсових температур, у її нижній частині виникають сильні *висхідні конвекційні потоки*, які приводять, в умовах невеликої гравітації, до утворення потужних **еолових процесів - пилових смерчів та бур**.

Пилові бурі здійснюють в атмосферу величезну кількість пилу (іноді сотні мільйонів тонн) на висоту до 20км і тоді умови для спостереження Марса погіршуються, а видимість падає до нуля. Цьому процесу сприяє випаровування приморзлої до полярних шапок частини атмосфери. З початком танення полярної шапки виникає різниця температур між холодною мерзлою кригою та областю, де вона вже розтанула, що і викликає ураганні вихори у прилягаючих областях, коли швидкість вітру досягає 100км/год (рис.2.104).

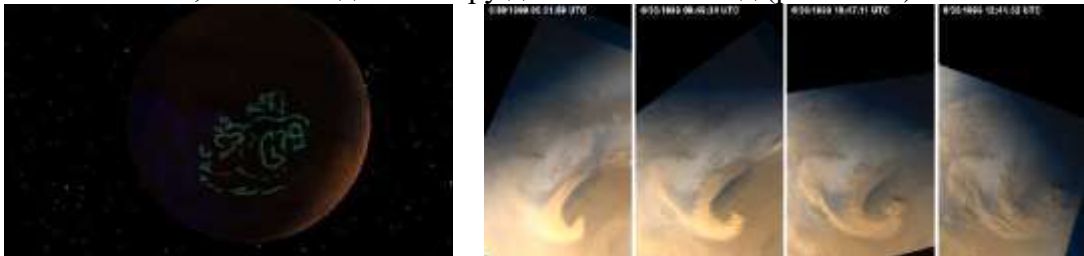


Рис.2.104. Ліворуч: карта *полярних сяйв* (в ультрафіолетовому діапазоні) на Марсі в регіонах з досить потужним магнітним полем (за даними *Mars Express*). Праворуч: розвиток *пилової бурі* у районі північного полюса Марса 30.06.1999р. (фото *Mars Global Surveyor* через 2 години)

Пилова буря в південній півкулі Марса (1971р.) тривала три місяці, аналогічні події були при наближенні Viking (1976р.) до планети. Viking-2, при виконанні сейсмічних спостережень, відмітив добові і сезонні зміни напрямів та швидкості вітрів на рівнині Утопія: ночами з

18 год. (через 2 год. після заходу Сонця) і до 4 год. ранку швидкість вітру не переважала 1-2 м/сек. Зі сходом Сонця його сильні пориви тривали 1-3 хв. із затишшям між ними 10-50 хв. Вітряна погода переважала всі 1,5 роки спостережень, тільки 3 місяці в сумі були тихими.

Пилові бурі Марса електрично активні та схожі на грозові хмари Землі. Статична електроенергія, яка утворюється у результаті тертя частинок пилу в крупних вихорах та невеликих смерчах, супроводжується блискавками. Виникнення **електричних полів** високих напруг зумовлює формування супутніх з ними потужних **магнітних полів**.

У розрідженій атмосфері на Марсі утворюються сильні **горизонтальні вітри**, зафіксовані **переміщення хмар** із швидкістю 10-15 м/сек, а через рельєф поверхні вітри можуть досягати до 30-40 і навіть 100-200 м/сек. Ці вітри **переносять** **мілький уламковий матеріал** і формують на поверхні Марсу піщані **еолові** (вітрові) **форми рельєфу** (бархани, дюни тощо). Грунт на поверхні планети **когезійний**: можливо, він являє собою пил, частинки якого зв'язані електростатичними силами, або слабо зцементовану „кірку”, подібну до знайденої Viking.

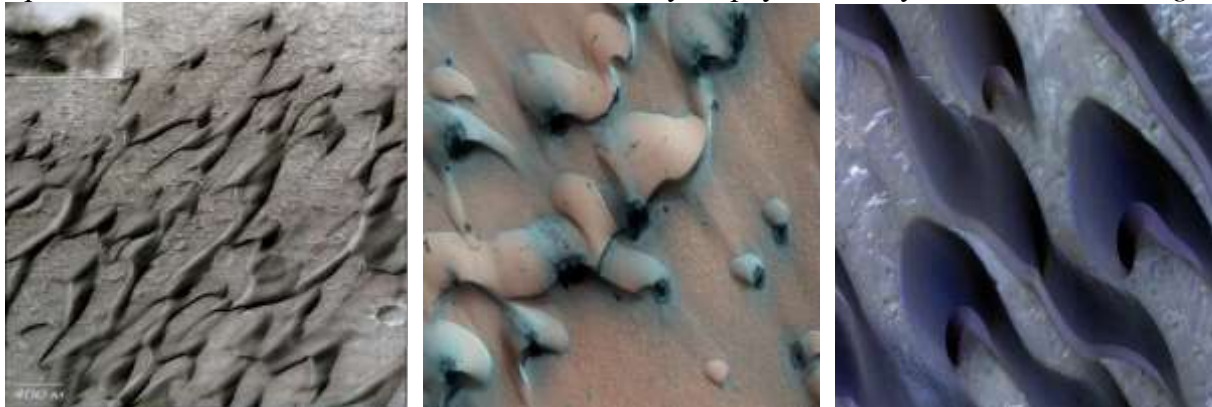


Рис.2.105. Різні форми дюн у *кратері Гершель* (ліворуч) і у північній приполярній частині Марса (у центрі) (фото Mars Global Surveyor) та піщані дюни Марса (фото Mars Reconnaissance Orbiter)

Дюнні поля на Марсі зустрічаються повсюдно на усіх широтах, їх можна спостерігати на рівнинах, на дні кратерів та каньйонів. Навіть північна полярна шапка оточена темним поясом дюнних утворень з темними плямами на їх поверхні від більш інтенсивного танення навколо піщаних включень. Переміщення величезної маси піску дюн та барханів на Марсі можливе не стільки вітром, скільки шляхом **сальтації** – **стрибкоподібного переміщення частинок у повітрі**, коли в умовах дуже розрідженої атмосфери та малої гравітації планети рухливість піщинок та їх здатність вибивати інші частинки зростає в десять разів.

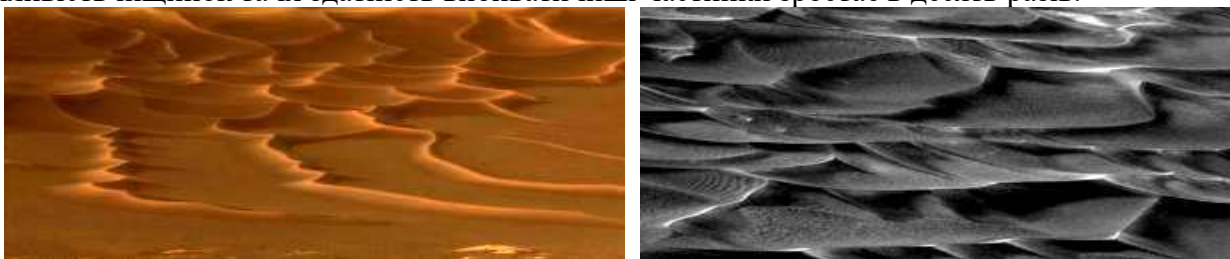


Рис.2.106. Бархани на дні *кратера Венералості* з еоловими брижами на їх поверхні (праворуч) свідчать про їх рухливість (фото Opportunity)

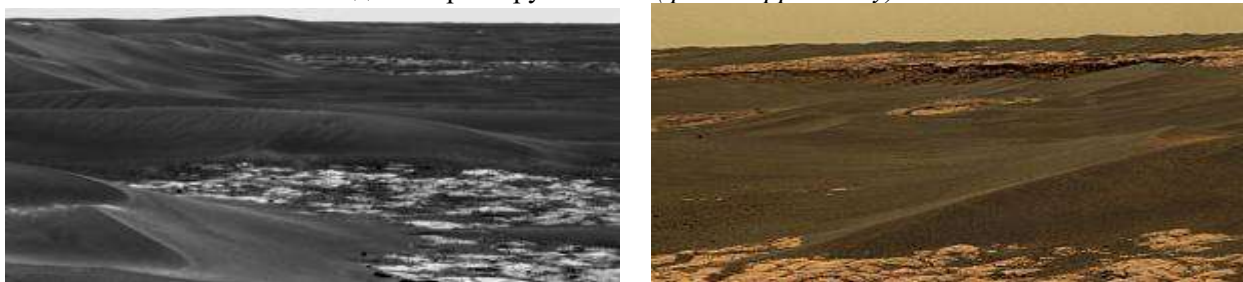


Рис.2.107. Насування сірих мігруючих еолових пісків на корінні породи дна *кратера Еребус* (фото Opportunity)

Марсіанські смерчі виникають з 10 ранку до 3 годин дня, коли Сонце найбільш активно нагріває поверхню. Ранньою весною смерчі чи пилові вихори переміщувалися з південного заходу на північний схід (орбітальні спостереження), але у розпалі сезону стали рухатися з північного заходу на південний схід. Одинокі або групові смерчі утворюють лійкоподібні вихори із наелектризованого червоного марсіанського піску та пилу висотою до 8км та шириною у сотні метрів, що шалено (до 30м/сек) обертаються і можуть рухатися по самому різноманітному рельєфу поверхні – пересікати горби, поля дюн і барханів, переміщуватися по дну кратерів та їх схилах – і скрізь вони зривають тонкий верхній шар пилу і залишають за собою темні сліди у вигляді смуг, спіральних закручень, завихрень та петель (рис.2.109).

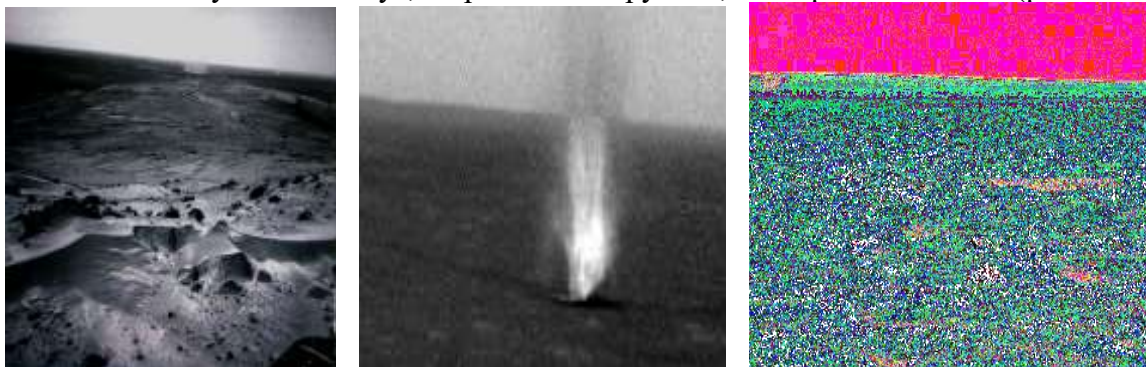


Рис.2.108. Пилові вихори на схилі *горба Хасбенд* (ліворуч) і у *кратері Гусева* (фото *Spirit*) та у зоні північної багатолітньої мерзлоти (праворуч) (фото *Phoenix*)

Великі смерчі здатні утворювати побічні більш менші вихори, які рухаються паралельно та синхронно з ними. Смерчі та вихори (діаметр 2-5м) існують до тих пір, доки їх живлять нагріті біля самої поверхні Марса теплі атмосферні маси - від декількох хвилин до кількох годин (рис.2.108). Сліди від пилових смерчів (рис.2.109) утворюються протягом весни і літа, а восени та взимку вони зникають - поверхня планети покривається новим шаром осідаючого пилу і стає готовою для появи на ній, під час теплого періоду наступного року, нових „візерунків”. **Основну частину поверхні Марса займають еолові абразійні та акумулятивні форми рельєфу. Марс – майже суцільна, але дуже різноманітна пустеля, місцями піщано-суглиниста, місцями - кам'яниста та гірська, за винятком покритих шапками криги та снігу полярних областей.**

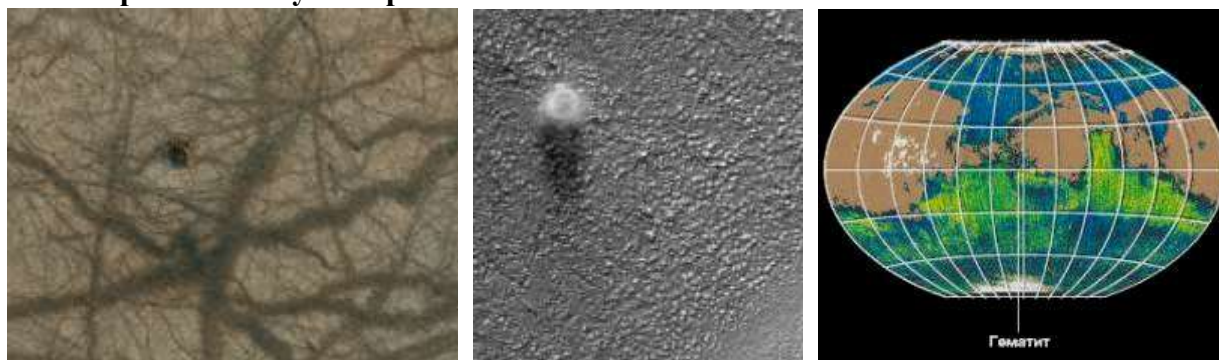


Рис.2.109. Ліворуч: сліди *вихорів* і *смерчів* на пиловатій поверхні Марса у вигляді дуг, завихрень, петель та спіральних закручень, а спіралеподібні траєкторії утворюються при сумісному русі кількох смерчів. У центрі: вигляд пилового *смерчу* з орбіти . Праворуч: у південній півкулі серед гірських порід поверхні переважає базальт (зелений колір), на півночі – андезит (синій колір), а поблизу екватора – гематит (червоний колір) (склад порід за інфрачервоними спектрами *Mars Express*)

Червонуватий колір Марса зумовлений тим, що більша частина його кам'янистої рівнинної поверхні з уламками базальтів покрита **червоно-оранжевими пустелями** (рис.2.85, 2.110, 2.111, 2.113), піщані відклади яких збагачені *оксидами заліза*. Вчені прийшли до висновку, що колір Марса зумовлений **гематитом** (Fe_2O_3) і **магнетитом** ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ – *магнітний оксид заліза із структурою магнетиту*), які присутні у великих

кількостях на поверхні планети. Мілкі частинки пилу у тонкій атмосфері з вуглекислого газу фільтрують сонячне світло, що і надає ландшафтам Марса червонуватого відтінку.

На Марсі переважають темні магматичні породи – **андезити** і **базальти** з високим вмістом *закису заліза* (до 10%). Ці магматичні породи перекриваються продуктами їх вивітрювання із різко підвищеним вмістом *сірки* та *оксидів заліза* – до 20%, що вказує на склад марсіанського ґрунту - *оксиди трьохвалентного заліза червоного кольору з домішками залізистих глин і сульфатів Ca^{++} та Mg^{++}* (рис.2.109). Ґрунт північного арктичного району (дані *Phoenix*) має рівень кислотності (pH) 8-9 (7 вважається нейтральним середовищем, pH води земних океанів 8,2), не дуже лужний, у ньому багато необхідних для рослин поживних речовин, біля поверхні відкриті Mg^{++} , Na^{+} , K^{+} , хлорид-іони і пари CO_2 .

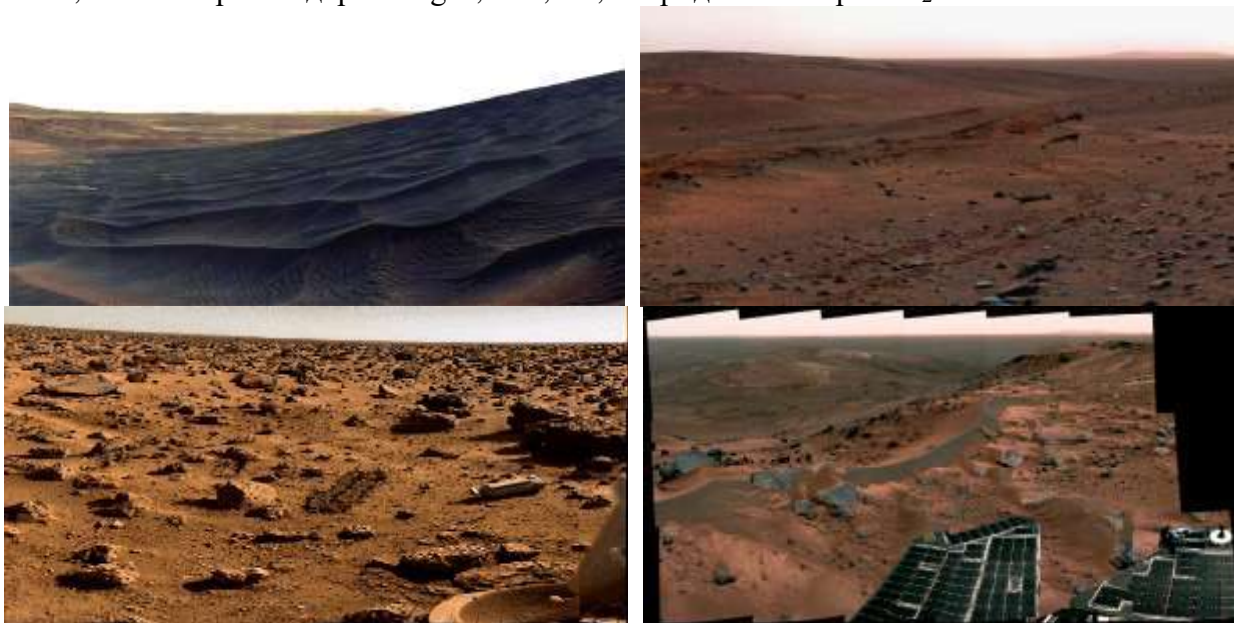


Рис.2.110. Пустельні ландшафти рівнин Марса із розсипами гематитових синіх кульок („чорниць”) (фото *Opportunity* і *Spirit*)

Такі **червоноколірні латеритні кори вивітрювання** глибинних порід у Сонячній системі існують тільки на Землі і на Марсі, але, на відміну від Землі, на Марсі вони набули магнітних властивостей. На Землі магнітні оксиди зустрічаються тільки у зонах метеоритних кратерів, так як їх утворення потребує високих температур, що необхідні для переходу оксидів заліза у магнітну форму. Широке поширення їх на Марсі свідчить про гігантські масштаби катастрофи при його зіткненні з астероїдом. Крім *заліза* (12,7%) у марсіанському ґрунті знайдені *кремній* (21%), *магній* (5%), *кальцій* (4%), *сірка* (3,1% – майже в 100 разів більше, ніж у земних породах, причому у сульфідах *кратера Хотон* ізотопу ^{32}S на 7% більше за ^{34}S , що побічно свідчить про їх біогенне походження, бо земні мікроорганізми надають перевагу сульфатам з ізотопом ^{32}S). Піски складені мінералами: *польовими шпатами*, *піроксенами* та *олівіном* – які утворюють основні породи, зокрема найпоширеніший на Марсі *базальт*.



Рис.2.111. Ударний кратер Бігль (35м) серед латеритних утворень Марса (фото *Opportunity*)

Червоні піски Марса, що переносяться ураганами - рештки **давної латеритної кори вивітрювання** глибинних порід, яка утворюється в умовах *теплого клімату, надлишку води та при наявності в атмосфері вільного кисню* і у межах Сонячної системи існує ще тільки на Землі.

Для перетворення Марса в Червону планету нинішньої кількості кисню в його атмосфері явно недостатньо. У планетології відомо, що планети, на яких немає життя, мають безкисневу атмосферу. Історія Землі свідчить, що киснева атмосфера виникла на ній у результаті екологічної катастрофи, яка була зумовлена особливостями метаболізму первинних бактерій – виділенню ними кисню у якості „відходів” життєдіяльності у безкисневій атмосфері. На Землі кисень атмосфери в умовах теплого клімату та наявності води зумовив окислення заліза. За аналогією можна зробити висновок, що еволюція життя на Марсі у минулому дійшла до етапу фотосинтезу існуючими організмами та до формування ними кисневої атмосфери - інакше Марс не зміг би стати Червоною планетою.

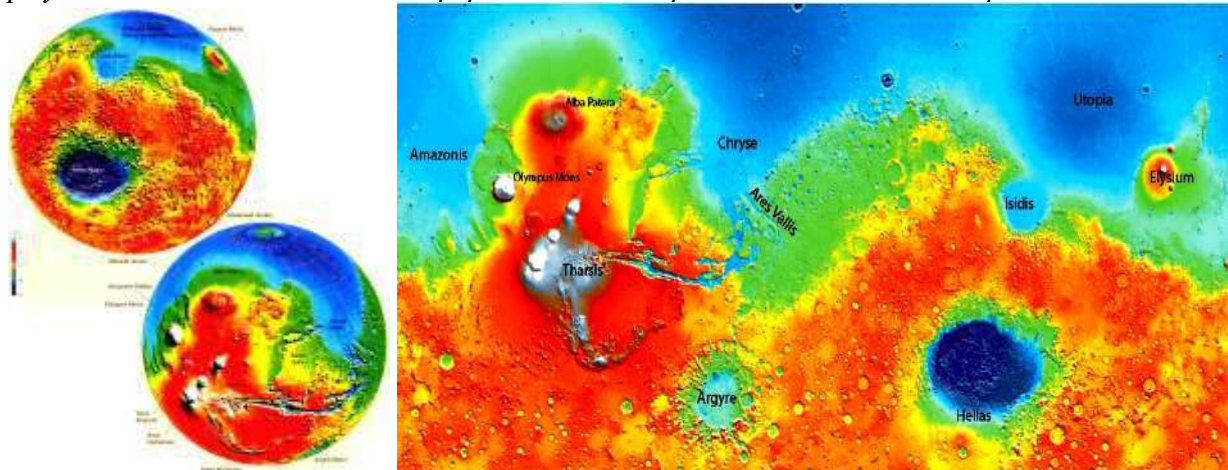


Рис.2.112. Топографічна карта Марса створена за даними марсіанського орбітального лазерного висотоміру (Mars Orbiter Laser Altimeter - MOLA) космічного апарату Mars Global Surveyor

Рельєф поверхні Марса досить своєрідний і складається з двох контрастних частин: більш світлих ділянок **древніх високогір'їв червоно-оранжевого кольору** („материків”), які покривають південну півкулю і утворюють **гігантський материк**, і третина поверхні планети - більш **молоді рівнини сіро-зеленого кольору** („моря”) північних широт у вигляді гігантської депресії – **дно давнього океану** (рис.2.112, 2.156). Перепади висот досить значні і складають в екваторіальній області біля 14-16км, а максимальний перепад висот сягає до 32км. Крім того, виділяються **два великих вулканічних райони – нагір'я Фарсіда та Елізій**. Навколо цих вулканічних піднятих зосереджені численні **системи ерозійно-тектонічних розломів, тріщини** тощо – сліди **тектонічних процесів** у марсіанській корі. Можливо, такий поділ викликаний дуже давньою катастрофою – падінням на Марс великого астероїда.



Рис.2.113. Угорі: панорама ударного кратера Ендуранс; унизу: відслонення осадових верств в обривах його бортів - скеля Вумпей (ліворуч) і скеля Бернса (праворуч) (фото Opportunity)



На перший погляд поверхня планети нагадує місячну, але рельєф Марса більш різноманітний. На протязі тривалої геологічної історії Марса його поверхню змінювали

виверження вулканів, марсотруси, метеорити, вода і крига. *Високогірна частина* зберегла сліди активного метеоритного бомбардування, яке відбулося біля 4 млрд. років тому.

Метеоритні кратери покривають 2/3 поверхні планети, а на старих високогір'ях їх майже стільки ж, скільки на Місяці. *Північні рівнини* виглядають зовсім по-іншому. Катастрофічна подія знищила аналогічний рельєф на цій третині поверхні планети і він почав формуватися знову. Окремі метеорити падали тут і пізніше, але ударних кратерів на півночі мало. Вигляд цієї півкулі визначила вулканічна діяльність. Деякі рівнини неодноразово повністю покривалися давніми дуже рухливими лавовими потоками. Віддалені від вулканів ділянки північної півкулі покриті піщаними дюнами, особливо навколо північної полярної шапки.

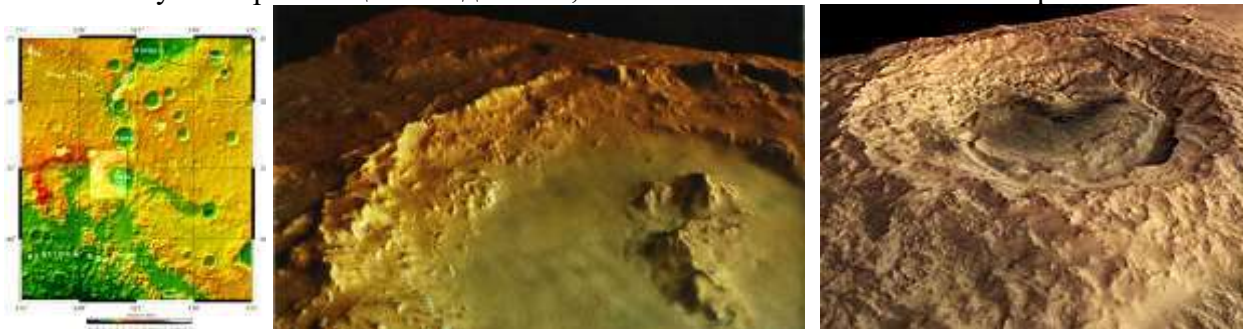


Рис.2.114. Ліворуч: ударний *кратер* (діаметр 150км) *Hale* з двома кільцями, терасовими схилами і центральним гірським масивом. Праворуч: ударний *кратер* *Maander* (діаметр 90км, глибина 0,9км) (фото *Mars Express*)

У межах материка відомі головні **ударні структури** – *багатокільцеві басейни Еллада* (діаметр 2000км), *Аргир* (900км) та *Ісіда* (1100км). Поверхня материка покрита численними **кратерами** вулканічного і метеоритного походження діаметрами до 400км, деякі з них оточені *кільцевими горами*; відомі *розлогі рівнини*, *гірські хребти*, існують широкі *каньйони* і *гігантські ущелини* (ущелина *Копрат* розмірами 500×120км і глибиною 5км).

Гігантський **кратер Еллада** діаметром по поверхні 2000км, по дну - до 1500км і глибиною 8км утворився у результаті зіткнення Марса з астероїдом. Кратер оточений валом викинутих подрібнених порід кілометрових потужностей, які покривають майже всю південну півкулю Марса (рис.2.120). На діаметрально протилежній, від кратера Еллада, ділянці поверхні північної півкулі Марса знаходиться **вулканічне гірське плато Фарсіда** (рис.2.115, 2.112), яке піднімається на 6км над оточуючою місцевістю та має протяжність 4000км з півночі на південь і 3000км зі сходу на захід – *це наслідок від проходження створеної падінням цього астероїда ударної вибухової хвилі через надра планети з утворенням на протилежному боці планети цього вулканічного плато („антикратер”)* з найвищим вулканом Сонячної системи.

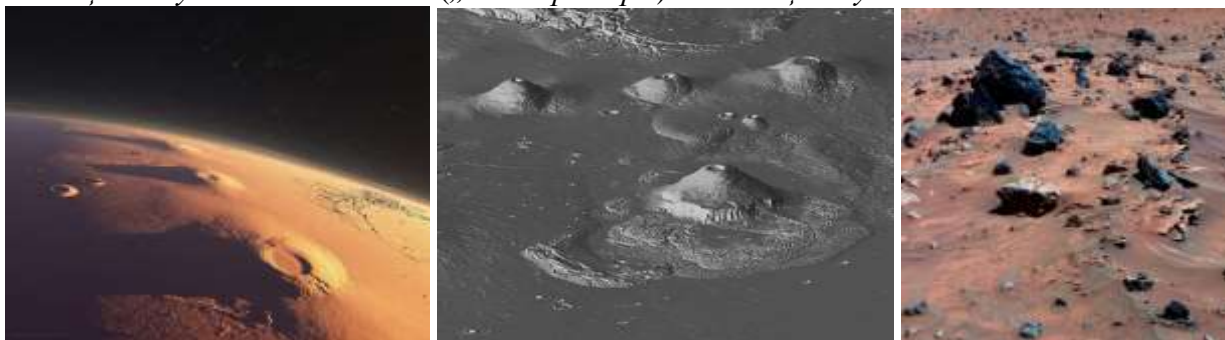


Рис.2.115. Свідчення геологічної активності Марса – *гігантські вулкани* і *тектонічні розломи кори* північної півкулі (ліворуч); *вулканічне нагір'я Фарсіда* з найбільшими вулканами Марса (фото *Mars Global Surveyor*); *продукти вулканічних вивержень – базальти* – на поверхні Марса (фото *Spirit*)

Вулкани Марса можуть бути поділені на три типи: **щитові вулкани, куполи і патери**. На плато Фарсіда розташовані чотири *гігантські щитові вулкани*, розміри яких не мають собі рівних у Сонячній системі. Найбільший з них – **вулканічний конус Олімп** - височить на 27км, поперечник його підніжжя біля 600км повсюдно оточений обривом висотою до 4км

(рис.2.116, 2.117). На вершині Олімпу розташована велика *кальдера*, що включає ряд утворених від повторних провалів поверхні кратерів і досягає 90км упоперек при глибині 3км. Гора Олімп покрита товстим шаром пилу.

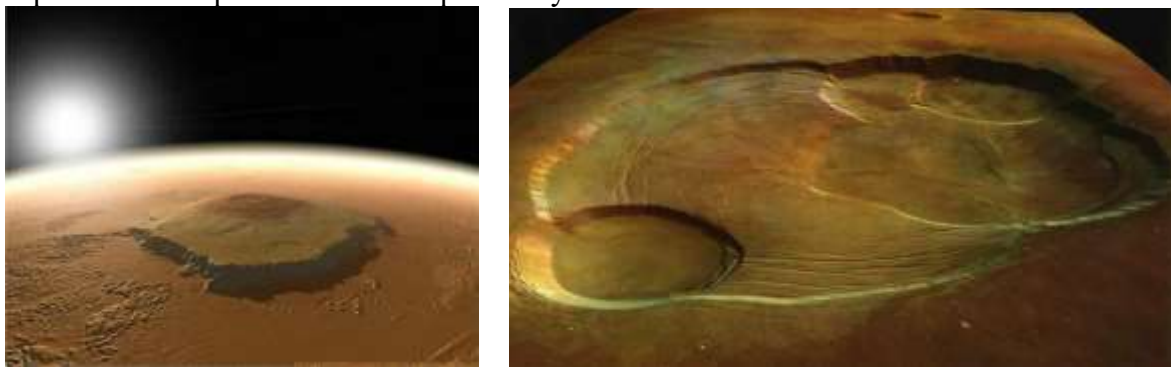


Рис.2.116. Гора *Олімп (Olympus Mons)* – найбільший вулкан Сонячної система та його кальдера (фото *Mars Express*)

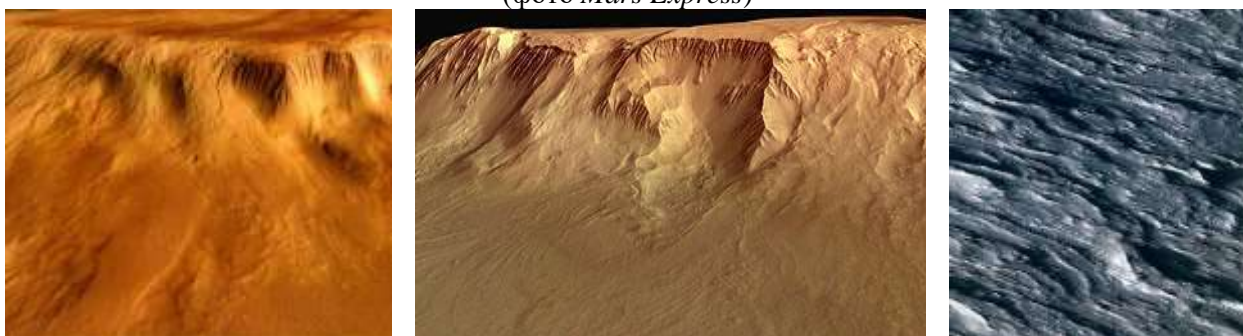


Рис.2.117. Перспективний вигляд оточуючого вулкан *Олімп* уступу; обрив на ділянці західного схилу вулкана (у центрі) та складна структура поверхні західного схилу із нашарувань численних лавових потоків (фото *Mars Express*)

Цей гігантський вулканічний конус має *похилі схили* (середній нахил від 2^0 до 5^0), які складені численними нашаруваннями *потоків рідких лав*, а майже по всьому периметру основи цього вулкану простежується *уступ* висотою у декілька кілометрів, що відрізняє його від інших марсіанських вулканів. Ще три розташованих на одній лінії (розлом?) **вулкани: Арський, Павліній і Аскрійський** – мають висоти від 14,5 до 18,2км (рис.2.112, 2.115, 2.118).

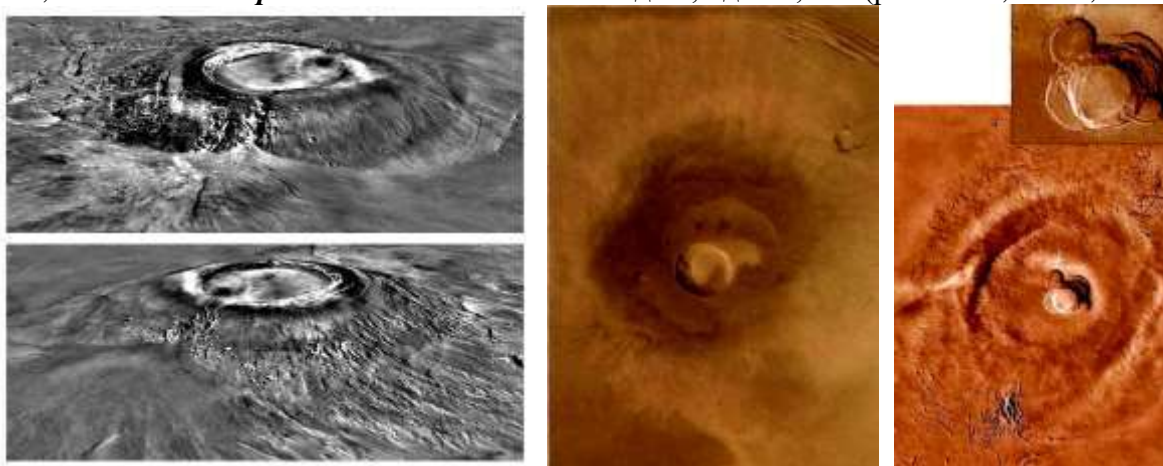


Рис.2.118. Вулкани *Арський* (тривимірне зображення із структурою кальдери, зруйнованим схилом та великим боковим виносом), *Павліній* і *Аскрійський* із вставкою кальдери (фото *Viking* і *Mars Express*)

Вершина *гори Арсія* височить над оточуючим рельєфом більш ніж на 9км, а кальдера на вершині має діаметр приблизно 110км. Вулканічний конус *гори Павліна* піднімається на 14км відносно нульового – *ареодезичного* - рівня висот Марса і має центральну кальдеру діаметром біля 45км та глибиною до 4,5км. Глибина складної за формою кальдери *Аскрійського вулкану* сягає 3км. Поверхні схилів щитових вулканів Марса буквально порізані

радіальними системами лавових потоків, каналів і гряд шириною у декілька та довжиною у сотні кілометрів. Морфологія лавових потоків свідчить про низьку в'язкість (від 3-5 до 60 пуаз) вивержених лав основного складу, а в умовах невеликої сили тяжіння Марса виверження набували площинного характеру – формувалися залиті базальтами рівнини.

Кількості метеоритних кратерів на схилах найбільших вулканів Марса побічно вказують на їх дуже молодий вік: *Олімпу* – 300 ± 70 , *Арському* – 400 ± 70 , *Аскрійському* – 400 ± 40 і *Павлінію* – 300 ± 90 млн. років. У кальдерах п'яти інших марсіанських вулканів знайдені сліди періодичних вивержень *недавньої вулканічної діяльності*, яким не більше 2 млн. років. Все це може свідчити, що вулканічна активність на Марсі не затихла і у наші дні.

Другою за величиною вулканічною областю на Марсі є **вулканічна височина Елізій** – велике вулканічне плато шириною 1500км, яке піднімається над оточуючими рівнинами на висоту 4-5км. Вулкани *купол Гекати*, *Елізій* і *купол Альбор* розташовані на цьому плато ланцюжком з півночі на південь. Найбільший вулкан цієї області – *гора Елізій*, піднімається над оточуючими рівнинами на 14км, ширина основи вулкану приблизно 500км, а діаметр кальдери до 14км (рис.2.119). *Купол Гекати* має діаметр підніжжя 170км і діаметр кальдери до 10км. Підніжжя *куполу Альбор* на 10км менше при діаметрі кальдери біля 30км.

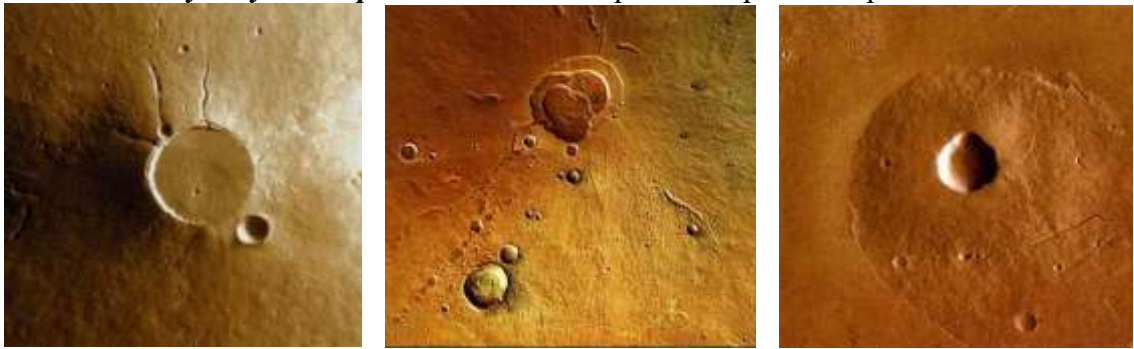


Рис.2.119. Зліва праворуч: вулкани *Елізій*, *купол Гекати* і *купол Альбор* (фото *Mars Express*)

Вулкани Марса і Землі істотно відрізняються між собою за розмірами. Вулкани Фарсиди більше земних за об'ємом на один-два порядки, а їх лавові потоки покривають значно більші площі. Причина в тому, що магматичні осередки для вулканічних вивержень у мантії Марса сотні мільйонів років залишалися фіксованими відносно поверхні планети над гарячими точками (тоді вже були відсутні процеси тектоніки плит), а на Землі горизонтальні рухи літосферних плит над гарячими точками мантії не дають сформуватися вулканам таких розмірів. Крім того, вулкани на Землі мають більш короткий час існування.

Крім щитових вулканів і провальних кальдер на Марсі відомі більш численні **вулканічні куполи** – менші розмірами, але більш опуклі за щитові, вулкани із більш крутими схилами, з більшою щільністю ударних кратерів та багатоярусними депресіями типу кальдер, і **патери** (латин. *patera* – блюдце, зруйнований щит) – вулкани, які мають дуже похилі схили, дуже зруйновані та змінені ерозією розтікання вивержених лав фестончасті стінки кальдер і радіальні канали лавових потоків на схилах.



Рис.2.120. *Патера Альба* - найбільша вулканічна структура Марса і Сонячної системи (фото *Mars Express*)

Наявні дані свідчать, що матеріал вивержень куполів був більш в'язкий, виверження були меншими за об'ємом і потоки лави залягають ближче до осередків вивержень, а частина куполів Фарсиди, ймовірно, являють собою рештки більш давніх і крупних вулканічних структур, які були частково поховані під більш молодими лавами. Дуже сильна ерозія патер свідчить, що вони складені, ймовірно, з пористих та мало зв'язаних відкладів потоків вулканічних попелів і є найдревнішими вулканічними утвореннями Марса.

Патера Альба, яка розташована на північ від плато Фарсиди і на північний схід від Олімпу, є найбільшою за площею та об'ємом вулканічною структурою Марса та всієї Сонячної системи - діаметр її основи перевищує 1500км, вона більша за гору Олімп у 10 разів, але її висота всього 3км. У центрі патери є кальдера діаметром 100км, яка оточена кільцями розломів (рис.2.120).

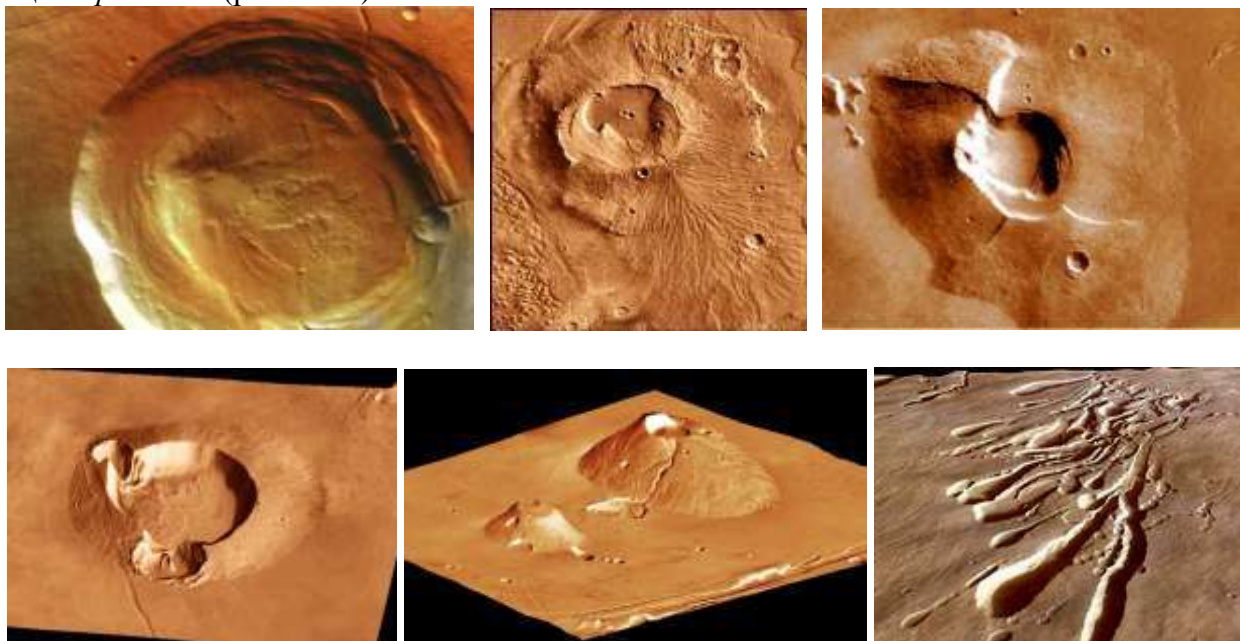


Рис.2.121. Угорі (зліва-праворуч): *патера Бібліда* (вулкан 170×100км, висота 3км над ландшафтом, діаметр кальдери 53км при її глибині 4,5км); *патера Аполлонова* (висота 5км, підніжжя 400км, кальдера центральна 180×280км) із слідами вивержень; *купол Фарсиди* (діаметр 150км, висота 8км). Унизу: *патера Урана* (висота до 3км); два вулкани - *купол Керавнський* (120×95км, кальдера 25км, висота до 2км) та *купол Урана* (діаметр 57км); провали лавових труб (канали лавових потоків під твердою поверхнею, довжина до 2км, ширина до 280м) на схилі вулкану *Павліній* (фото *Mars Express*)

Гірські породи древньої материкової області південної півкулі з численними кратерами представлені **базальтами**, а породи північних низовин дна западини океану нагадують **андезит** - вони вміщують більше вулканічного скла і багатих кремнієм мінералів, і менше тих, що вміщують залізо. На Землі андезити формуються у зонах опускання тектонічних плит в умовах водного впливу на магматичні розплави. Андезити Марса можуть вказувати на більш рідкий стан мантії, або на інші термодинамічні умови свого формування, у порівнянні з базальтами. *Допускають, що ці андезити є зміненими, в умовах колишніх густих водних чи кислотних марсіанських туманів, базальтами.*



Рис.2.122. Розвали базальтів на дні *кратера Гусева* та мікрофотографія (3см) результатів солового препарування порожнин у базальтах (фото *Spirit*)

Поблизу марсіанського екватора розташований структура діаметром 1100км – **вулкан Великий Сирт**. На його вершині є декілька обрушених *кальдер*, конус складений **базальтами**, а схили усяні конусами та потоками **дацитів**, які формувалися у верхній

частині магматичних осередків вулканічних камер із збагаченого кремнієм та алюмінієм залишкового розплаву, після ліквідаційної диференціації у ньому олівіну та піроксенів.

Вершини деяких кратерів на схилах Великого Сирту складені із **граніту**, який міг утворитися при дуже високому ступені кристалізації або при переплавленні раніше утворених базальтів. Сам вулкан пройшов кілька стадій розвитку: спочатку базальтова лава утворила вулканічний конус, а потім, по мірі хімічних змін лав і повторних вивержень, проходили обрушення вершини вулкану та виверження на його схилах.

Рівнина Амазонія розташована у північній екваторіальній області Марса, досить молода і складена породами віком 10-100 млн. років. Частина цих порід являє собою застиглу вулканічну *лаву*, яка виливалася із тріщин кори Марса. Знайдені сліди багаторазових обширних виливів лав, які рухалися по тій же системі потоків, що і вода. Велика кількість *опалу* (результату взаємодії вулканічних порід з водою) на краях та дні Долини Маринера тощо свідчать про існування водних басейнів ще 2 млрд. років тому (рис.2.123).



Рис.2.123. Ліворуч: поклади *опалу* віком 2 млрд. років на великих ділянках поверхні Марса свідчать про існування водойм (фото *Mars Global Surveyor*). Праворуч: високі (до 4км) обриви *каньйону Ехус* (довжина 100км, ширина 10км, розміщений на північ від *Долини Маринера*), який в минулому був великим водним басейном, а його потоки сформували *долину Казей* (довжина 3000км, на фото угорі).

Пізніше ці долини заповнила лава, яка утворила дивовижно гладеньке їх дно (фото *Mars Express*)

Поверхня Марса дуже нерівна – крім уже розглянутих структур існують **западини давніх океанів** (*Південного і Кімерійського*), площі яких перевищували Середземне море у 20 та 10 разів; довгі **глибокі каньйони** (система пересічення грабенів **Лабіринт Ночі** на південний схід від вулкану Павлінії переходить у систему каньйонів *Долини Маринера* довжиною 4500км, шириною – до 700км, глибиною до 8км і являє собою субширотного простягання *гігантський тектонічний розлом* у корі Марса), **глибокі котловини** (середня глибина западини *Еллада* до 4км), а окремі вершини **гірських хребтів** здіймаються на висоту 11км.

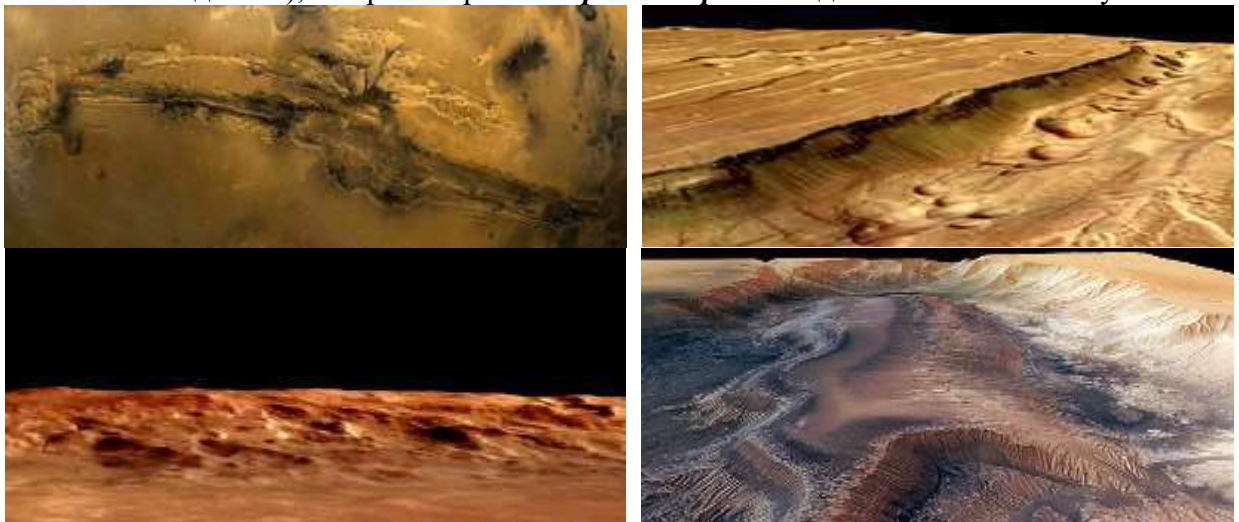


Рис.2.124. Зліва праворуч: угорі – система каньйонів *Долини Маринера* на Марсі та *грабени* шириною до 10,5км із западинами діаметром від 0,3 до 2,3км *зони Phlegethon* між *патерою Альба* та вулканічним плато *Фарсіда*; унизу – перспективний вигляд викидів із ударного *кратера Еллада* (ліворуч) та найглибший каньйон *Геби* в північній частині *Долини Маринера* в минулому був величезною водоймою глибиною до 8км із островом посередині водойми, який складений верстуватими осадовими породами з гіпсом (фото *Mars Express*)



Рис.2.125. Ускладнений зсувами і паралельний ущелині Coprates каньйон глибиною 2,5-3км південної частини каньйону Долина Маринера із світлими виходами сульфатів на його дні. Різні глибини окремих ділянок каньйону свідчать про їх провальне формування після танення ґрунтового льоду чи зникнення підземних вод, або як результат розсуву блоків кори Марса (фото Mars Express)

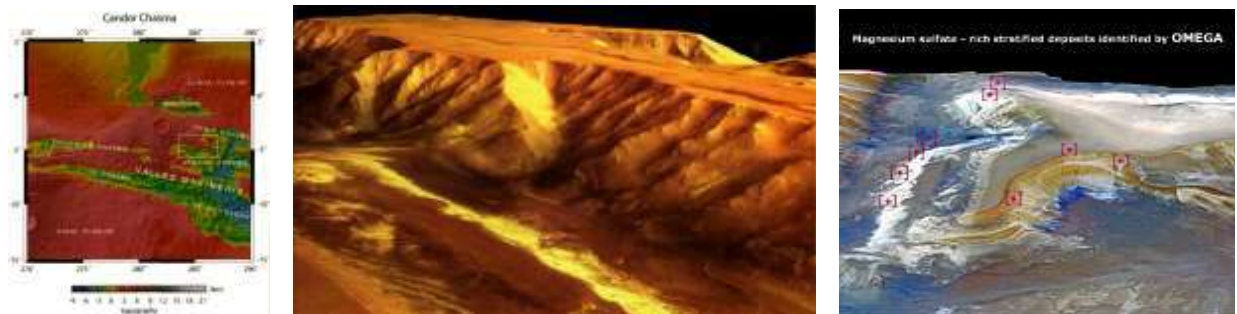


Рис.2.126. Одна із найбільших ущелин – Каньйон Відвертості (Candor Chasma) - глибиною 6км у системі каньйонів Долини Маринера, утворена на рівному плато із базальтових покривів, ймовірно, за рахунок розходження літосферних блоків (грабен) або при таненні ґрунтової криги з відтоком води у північному напрямі та обрушенням поверхневих утворень (ліворуч). Праворуч: ущелина цього каньйону з виходами філосилікатів – глинистих водних мінералів ноахійського періоду та сульфатів більш кислого водного середовища гесперійського періоду (фото Mars Express)

Найбільш цікавими деталями марсіанського рельєфу, крім вітрової ерозії та вулканічної діяльності, є сліди **тектонічних рухів** (розломи, зсуви, провали тощо) і сліди потужної **водно-ерозійної діяльності** – численні долини сухих русел широких річок з островами та із розгалуженою системою річкових притоків, рештки зруйнованих ерозією річкових терас тощо. Річкові долини мають глибину приблизно 1км і ширину від 8 до 40км.

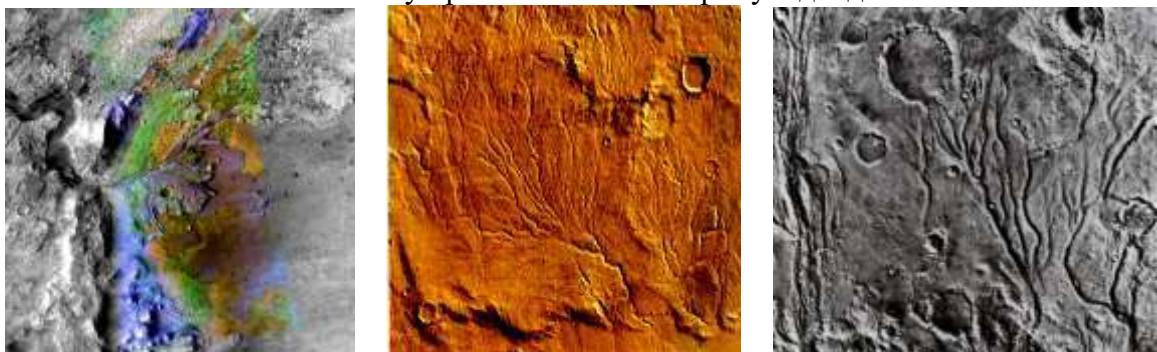


Рис.2.127. Ліворуч: хімічний склад верствуватих глин відкладів річкової дельти в кратері Цезеро з часом змінювався: нижній шар багатий на Fe і смектити Mg (результат впливу води на вулканічний базальт), середній шар насичений відновленим Fe (робота мікроорганізмів або зміна складу води чи осадок швидко висох та не встиг окислитися), верхній шар опалу та багатий на Al глини (кислотність води не давала формуватися відкладам Fe і Mg). У центрі та праворуч: русла давніх річок на Марсі (фото Mars Global Surveyor і Viking)

Рідка вода на Марсі нестійка, хоча існуючі тиск та температура близькі до потрібної точки (пара-вода-крига) (рис.2.128), що допускає утворення та просочування через ґрунт рідкої води. Майже вся вода на Марсі знаходиться в ґрунті у вигляді **вічної мерзлоти**, причому водяна крига служить істотною складовою гірських порід марсіанського ґрунту.

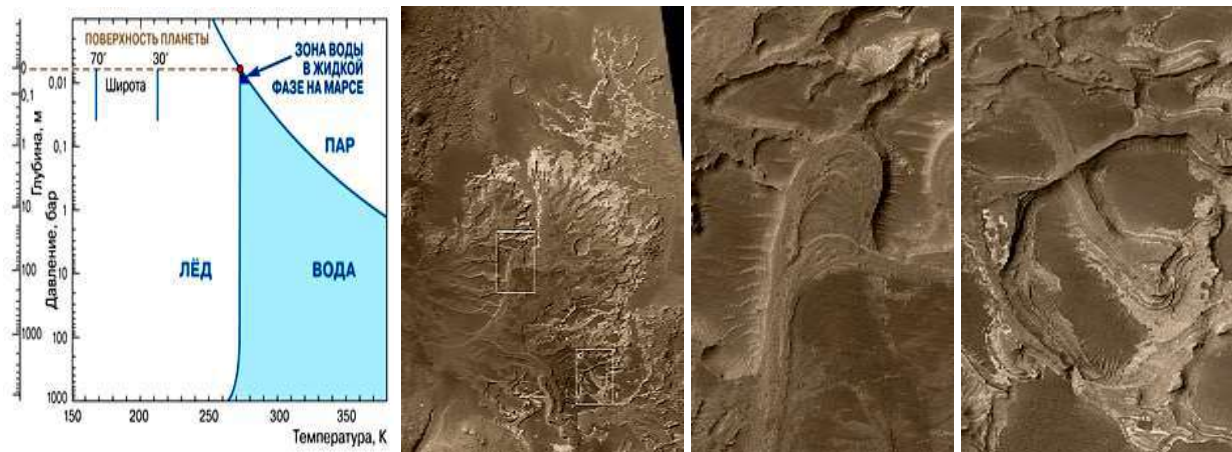


Рис.2.128. Области існування *криги-води-пари* на Марсі у залежності від температури та тиску (ліворуч). Руслові відклади та меандри давніх річок Марса (фото *Mars Global Surveyor*) .

Марс на протязі своєї еволюції мав досить великі водні ресурси, які в одні періоди розвитку утворювали *ріки, моря і океани*, а в інші – приховувалися в надрах планети, виринаючи час від часу на поверхню і залишаючи після себе сліди водної ерозії. Крім долин і русел твердо встановленого водного походження, існує чимало надто глибоких та прямих марсіанських русел, щоб бути руслами річок у нашому звичному розумінні - вони значно більше схожі на *долини льодовиків*.



Рис.2.129. Ліворуч і в центрі: район долини *Reull* шириною 20км і глибиною 1800м з паралельними структурами донних відкладів потоків із суміші пухких порід та криги (фото *Mars Express*). Праворуч – *моренні утворення* в *Martian Box Canyon* віком біля 100 млн. років (амазонійський період) поясу глобального зледеніння потужністю 1-2,5км у середніх широтах Марса (фото *Mars Reconnaissance Orbiter*)

Інша гіпотеза щодо утворення марсіанських русел пов'язана з припущенням про недавню гідротермальну активність, коли в товщі вічної мерзлоти могли утворюватися крупні, товщиною 30-100м і діаметром до 10км, *лінзи рідкої води*, які підігрівалися локальною тектонікою.

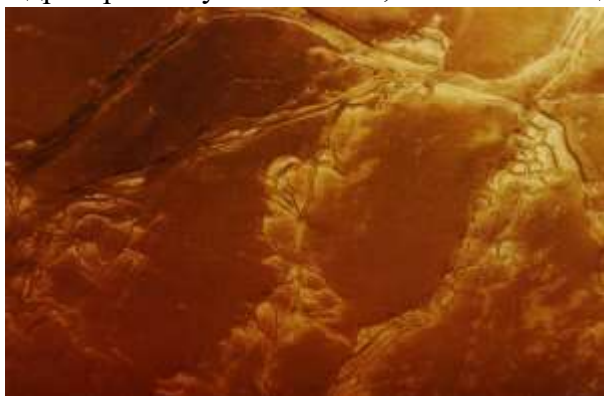


Рис.2.130. Долини по системі тектонічних розломів рівнини *Утопія* були вироблені лавовими потоками вулкана *Елізіум* та, можливо, розігрітими глибинними водами (фото *Mars Express*)

У деяких випадках така лінза могла перегрітися та закипіти, а об'єм витісненої на поверхню води привести до утворення катастрофічного *селевого потоку* - *суміші гязі, криги та водяних парів*, який і формував глибокий каньйон русла. Сучасні умови на планеті такі, що при низькому атмосферному тиску вода там може закипіти навіть без будь-якого нагрівання. Крім того існують і інші гіпотези. Зокрема, багато прикладів вказують на неводне

формування подібних структур - деякі з них на північно-східному схилі вулкану Аскрійський є долинами лавових потоків; існують долини тектонічного походження глибиною до 2км та окремі мілкі переривчасті западини, що утворені в результаті розтріскування кори тощо.

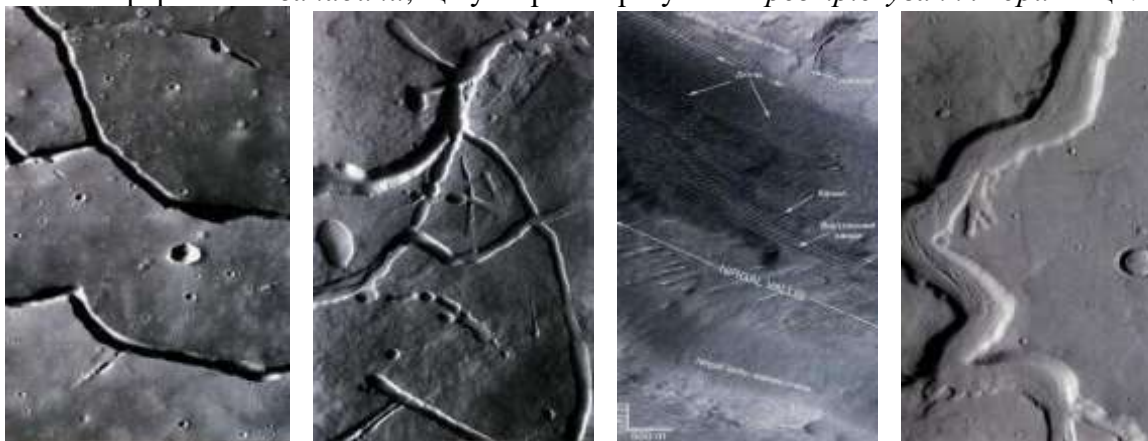


Рис.2.131. Формування різних систем долин на Марсі у результаті (зліва праворуч): розтріскування кори на глибину до 2км у 1000км західніше вулканічної височини Елізій; потоками виверженої лави на північно-східному схилі Аскрійського вулкану; тимчасовим водяним потоком у північній стінці долини Nirgal із утворенням молодого яру та покривом винесеними наносами прилягаючого поля дюн на дні долини із внутрішніми каналами (фото 3х6,5км); дії „річок” або селевих потоків (фото Viking, Mars Express, Mars Global Surveyor)

Часто русла частково зруйновані та занесені еоловими пісками, які формують великі поля дюн. **Які б не були механізми утворення русел та долин, які б не існували уявлення та гіпотези про їх утворення, на даний момент у науки недостатньо інформації для висновків. Однозначне вирішення проблем „марсіанських річок” – справа майбутнього.**

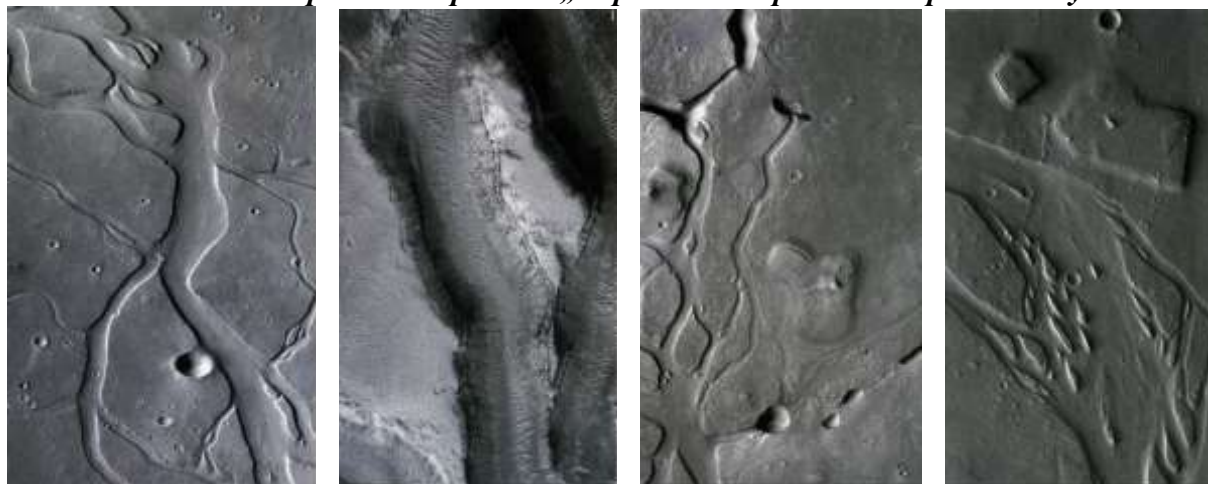


Рис.2.132. Острови в руслах давніх річок Марса (фото Viking, Mars Express, Mars Global Surveyor)

Якщо деякі долини і западини можуть мати різне походження, то різних розмірів **острови** явно свідчать про те, що в місцях їх присутності русла були однозначно сформовані потоками води (рис.2.132, 2.133). Острови мають краплиноподібну форму, їх орієнтація вказує на напрям руху потоків і часто вони формувалися за перепонами (за плоскими горами чи валами ударних кратерів тощо), які обмивалися потоками води.

Крім того, існують численні **молоді яри**, сліди глибоких і великих **водойм** і, навіть, **дно безводного океану**, а також сліди діяльності **льодовиків** (трогові долини, гряди морен тощо).

Знайдені ознаки **періодичних льодовикових епох** на Марсі з утворенням льодовиків та їх рухом у недалекому минулому, а також **міжльодовикових потеплінь**, коли льодовики в екваторіальних широтах танули. Нахил осі обертання планети змінюється з періодом 125 тис. років. Коли нахил стає найбільшим, полюси стають найхолоднішими місцями на планеті, що приводить до посиленого накопичення тут льоду.



Рис.2.133. Вузький канал долини *Tiu Vallis* водними потоками (стрілки) перетворився нижче „за течією” у згладжений ландшафт (ліворуч); острів у долині *Mangala*, утворений водним потоком за плоскою горою; сформовані катастрофічним водним потоком острови в *Ares Vallis*, їх орієнтація вказує на напрям потоку рідини; острів у системі долин *Marte* між областями *Elisium* і *Amazonia* утворився під прикриттям двох ударних кратерів (фото *Viking*, *Mars Express*, *Mars Global Surveyor*)

Коли нахил осі зменшується, полюси отримують більше сонячного світла у порівнянні з середніми широтами. Вода перетікає від полюсів до екватора, а якщо поверхня покрита снігом, то вона сочиться тонкими потоками чи струмками. **На території Землі Прометей алювіальні відклади дельти були утворені водними потоками не пізніше 1,25 млн. років тому.** Зараз у середніх широтах тепліше і снігового покриву немає. У місцях понижень у рельєфі відкриті скупчення криги віком від 5 до 24 млн. років. Останній наступ льодовиків з полярних у екваторіальні широти відбувся від 350 тисяч до 4 млн. років тому. При цьому формувалися масивні скупчення криги біля підніжжя найбільших вулканів і гір у районі *Еллади* поблизу екватора. Біля 0,5 млн. років тому лід в середніх широтах почав танути, але у більшості випадків він сублімував безпосередньо в пару. Рештки льодовиків знайдені на також на західному схилі найбільшого вулкану Сонячної системи – *гори Олімп*. Черговий льодовий період на Марсі наступить, за підрахунками, через 25-50 тис. років.



Рис.2.134. Провальні западини зруйнованого лавового каналу під поверхнею рівнини на північний захід від *вулканічної височини Елізій* (ліворуч). Приховані ґрунтом *гігантські льодовики* кілометрової потужності в западині *Еллада* (у центрі) та в *гористих районах* середніх широт Марса (праворуч) (фото *Viking*, *Mars Express*, *Mars Reconnaissance Orbiter*)

Крім того зустрічаються зруйновані канали під поверхнею планети, які могли бути утворені або лавою, або водою і пізніше відбулося обрушення поверхні над ними з утворенням ланцюжка западин вздовж їх простягання. Можливо, їх утворення пов'язане з марсіанською „вічною мерзлотою” (рис.2.121, 2.134).

Поблизу вулканів *плато Фарсіда* розташована **розгалужена система каньйонів**, яку прорізали потоки води, що стікали з плато і водоспадами обрушувалися в долину.

Вертикальні стінки неотектонічних каньйонів Марса, вік яких значно молодший за навколишній пенепленізований рельєф з напівзруйнованими долинами річок, підіймаються вгору на тисячі метрів. Дослідження фотографій обривів каньйонів свідчать, що **верхня частина марсіанської кори до глибини 3-4км представлена ідеально витриманими за простяганням верстуватими осадово-вулканогенними відкладами з потужністю**

верств до десятків метрів, а біля підніжжя цих обривів формуються акумулятивні обвальньо-гравітаційні, та зсувні чи осипні конуси (500-700×200-300м), які об'єднуються у слабо нахилені приєднані тераси.

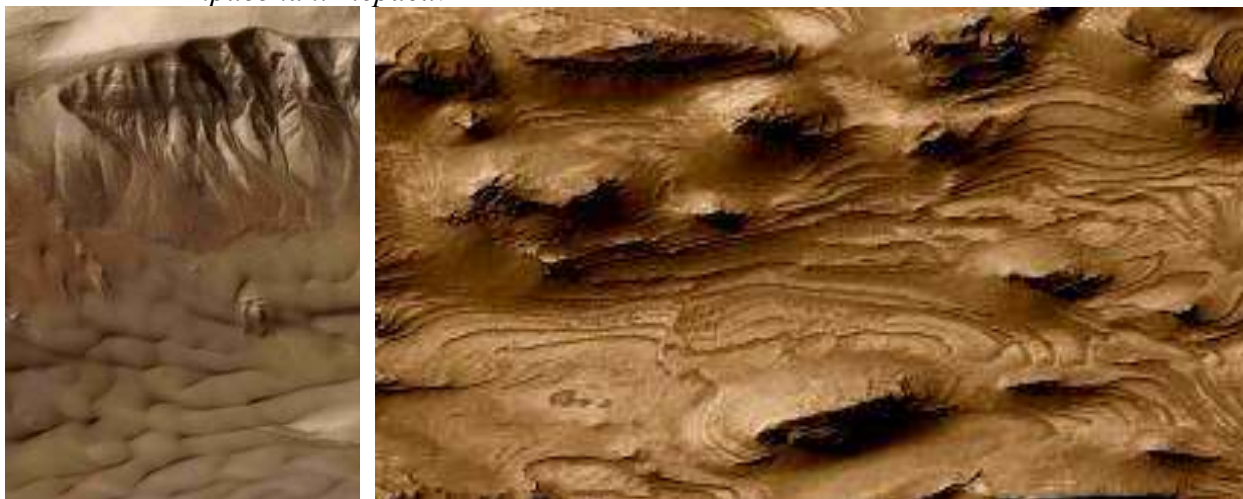


Рис.2.135. Осипання ґрунту та типові марсіанські яри просідання (розмивання?) у результаті сублімації (танення?) крижаних лінз чи жил у верстуватих відкладах з піщаними дюнами біля підніжжя схилу; яри, що схожі на сліди земних гірських річок, але на відміну від земних ярів вони завжди розширюються вгору по схилу (ліворуч) та осадові верстуваті відклади (виділено 100 пластів) потужністю 10-11м на дні каньйону Кандор системи Долини Маринера чи пил від циклічних осадових процесів (фрагмент дна 1,5×2,9км) (фото Mars Global Surveyor)

Достовірно встановлено, що у далекому геологічному минулому Марс огортала щільна і тепла атмосфера із вуглекислого газу та кисню, що створювала певний парниковий ефект - на поверхні Марса існували моря, в які впадали бурхливі ріки і потоки, а у північній півкулі існував величезний океан. Лазерний висотомір MOLA орбітального апарату Mars Global Surveyor відкрив у північних районах Марса структури рельєфу, схожі на берегові лінії давнього океану (рис.2.156). Одна з них дійсно співпадає з лінією постійної висоти поверхні – це результат рівномірного накопичення опадів у великому об'ємі води, який знаходився у гідростатичній рівновазі. Крім того, гамма-випромінювання поверхні Марса під дією космічних променів вказує, що концентрації Fe^{++} , K^+ , Th^{4+} значно вищі на дні колишніх океанів, ніж на суміжних площах колишньої суші (дані Mars Odyssey).

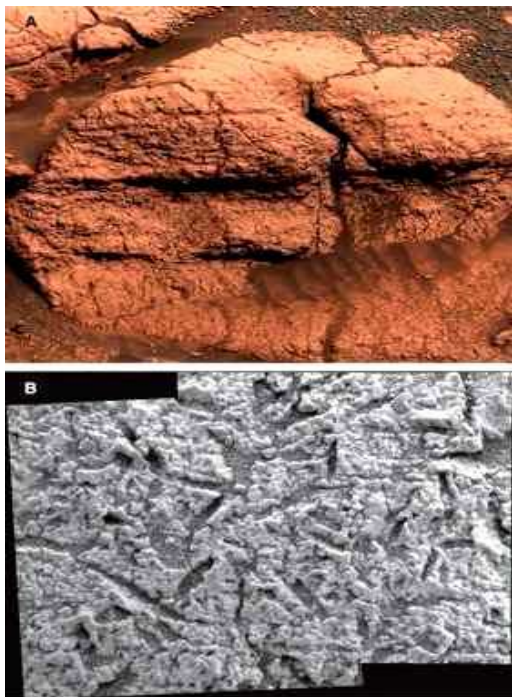


Рис.2.136. Ущільнені та насичені сульфатами відклади марсіанського теплого соленого водяного басейну з кристалами в текстурних пустотах породи відслонення *El Capitan*, які перекриваються піщаними утвореннями з невеликими гематитовими кульками („чорниці”) (А) та порожнини в породах відслонення (В) (фото Opportunity)

Марсоходи *Spirit* і *Opportunity* знайшли прямі і переконливі свідчення існуванню на планеті великих водойм у минулому: *верстуваті осадові відклади плато Меридіана* – однієї з найбільш плоских форм рельєфу на Марсі - складені *опалом* (вік 2 млрд. років), який формувався у *водяному середовищі* із великою кількістю (від 30 до 40% їх маси) **сульфатів** *магнію* (віком 3 млрд. років), *бромідів* і *хлоридів*, які відклалися при *випаровуванні* багатих на сірку *морських вод* (дуже високі концентрації з'єднань сірки є не тільки в тріщинах порід, а і в самих породах), а такі мінерали як *ярозит* (рис.2.137), *гетит* і *ооліти гематиту* або

безпосередньо формувалися у водяному середовищі, або випадали в осадок з розчинів, що циркулювали в осадових породах у періоди різких підйомів рівня кислих підземних вод, які були збагачені залізом. У середніх широтах Марса (біля підніжжя *горбів Колумбії* у кратері Гусева та у регіоні *Nili Fossae*) знайдені перші відклади **карбонатів** (їх за масою до 25% у відкладах багатих на олівін), частина яких утворилася із хімічно *нейтральних вод*. Ці дані свідчать про **епізодичні затоплення території неглибокими водами та їх випаровування з процесами хемогенного накопичення осадків**, а тонкі верстви осадків заповнювали русла та інші пониження рельєфу, залягали на еродованій (розмитій?) більш давній поверхні і свідчать про формування їх під водою, а визначені з орбіти розміри ділянки поширення гематиту вказують на *велике ізольоване озеро* чи навіть *море*. На Землі *ярозит* утворюється у вологому кислому середовищі. Аналіз нашарувань вказує на *еолове* та *водне* переміщення матеріалів. Діагенетичні зміни включають появу збагачених **гематитом** конкрецій та формування *порожнин* у породі. Відслонення глибоких марсіанських ущелин свідчать, що потужність аналогічних осадових відкладів морського походження може сягати 500м.



Рис.2.137. Ліворуч :відслонення корінних виходів верстуватих осадових відкладів у західному борту *кратера Еребус* на *плато Меридіана* були сформовані під впливом вітру та водного середовища; у центрі: розмита поверхня корінних порід у цьому кратері; праворуч: марсіанський *ярозит* (фото *Opportunity* і *Spirit*)

У районі посадки марсохода *Opportunity* (у кратері на *плато Меридіана*) на поверхні широко поширені «**чорниці**» – *специфічний, схожий на ягоди, сферичної будови гематит, який формується в марсіанському ґрунті в періоді підвищення рівня ґрунтових вод*. На місці посадки розміри цих оолітів гематиту досягали 5мм, на всьому 7-кілометровому шляху поступового підняття марсоходом по плато до кратера Вікторія *чорниці* зустрічалися рідше і вони були значно менших розмірів (до 1мм) (рис.2.110, 2.145). Навколо *кратера Вікторія* знову були зафіксовані розкидані великі та численні *чорниці*, які викинуті ударом на поверхню із глибинних шарів, що свідчить про підняття у минулому ґрунтових вод майже до поверхні *Меридіанного плато*. Раніше в *кратері Витривалість (Endurance)* марсоходом *Opportunity* були знайдені сліди *поверхневих потоків води*.

У південній півкулі Марса супутником *Mars Odyssey* відкрито біля 200 низинних ділянок із підвідними сухими руслами, які покриті різними з'єднаннями *хлоридів* (натрію, магнію тощо) площами від 1 до 25км², які накопичилися після випаровування або *солоних озер*, або *солоних підземних вод*. Вік хлоридів оцінюють у 3,9-3,5 млрд. років (рис. 2.138).

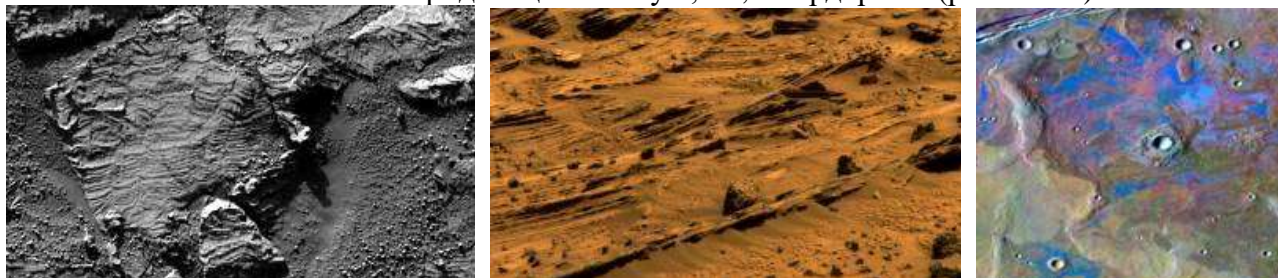


Рис.2.138. Ліворуч: коса верстуватість прибережно-морських піщаних відкладів дна мілководної океанічної затоки рівнини *плато Меридіана* із добре збереженими (низ фото) рештками крихтеного підводного валу (фото *Opportunity*). У центрі: характер косої верстуватості відкладів свідчить про непостійність умов формування осадків та їх інтенсивну еолову чи водну ерозію (фото *Spirit*). Праворуч: ділянки із хлоридами (сині) (фото *M. Osterloo/NASA/JPL – Caltech/ASU/U of Hawaii*)

Марсоходами були досліджені *косої верстуваті дрібнозернисті осадові відклади* прибережної зони давнього солоного марсіанського **океану**, які утворилися в умовах рухливого (швидкістю від 10 до 50см/сек.) водяного середовища. Цікаво, що поведінка води на Марсі вивчалася за допомогою комп'ютерних моделей, які чітко вказували: на такій невеликій планеті як Марс, для визначення напрямів руху водних потоків необхідно враховувати гравітаційні аномалії, які створюються нерівностями рельєфу. Наприклад, оточений океаном гігантський вулкан Олімп силою свого тяжіння утворив би навколо себе „водяну гору” висотою майже півтора кілометри над поверхнею океану.

Які катаклізми привели до різкої зміни умов на Марсі – поки що невідомо, але приблизно 2,0 млрд. років тому (епоха катастрофічного метеоритного бомбардування Землі, Місяця і Марса) рідка вода на поверхні Марса за незрозумілих причин зникла.

Радар **Marsis** (Марсіанський Удосконалений Радар для Глибинного та Іоносферного Зондування) орбітального апарату *Mars Express*, що здатний вивчати будову планети до глибини 3км, відкрив декілька своєрідних „прихованих” кратерів – ударних утворень у корі

Марса (рис.2.155), які завалені уламками і занесені пилом у більш пізні епохи.



Рис.2.139. Панорама рівнини Хриса – місця посадки *Viking-1* (фото *Viking-1*, 20.07.1976р.). Склад ґрунту (дані рентгенівського спектрометру): 12-16% - Fe; 13-15% - Si; 3-8% - Ca; 2-7% - Al; 0,5-0,2% - Ti

Можливо, що падіння астероїда, із утворенням кратера Еллада та гігантської тектонічної тріщини Долини Маринера і вулканічного плато Фарсіда на діаметрально протилежному боці планети з найбільшими у Сонячній системі вулканами, було катастрофічним для Марса - змінився характер та потужність магнітного поля планети, що зумовило втрату значної кількості атмосфери; при цьому набули магнітних властивостей оксиди заліза у латеритних корах вивітрювання; зникли моря, океани і планета набула звичного вигляду.

Діаметр деяких з кратерів досягає 470км, але тільки один явно виділяється на поверхні в оптичному діапазоні. Крім цього, в області **рівнини Хриса** (15⁰ північної широти, 55⁰ західної довготи) у надрах планети водяна крига заповнює метеоритний кратер діаметром



250км і глибиною 2,5км, який перекритий відносно тонким шаром кам'янистих утворень. Радаром також визначені ознаки потужних крижаних покладів під поверхнею у полярних областях планети. Недавно геологам вдалося виділити єдину краплину води із знайденого на Землі марсіанського метеориту - зразок води тих океанів, які колись існували на зараз сухій планеті.

Рис.2.140. „Бронюючі” льодовики плато Меридіана Марса (фото *Mars Global Surveyor*)

Марс є величезним *резервуаром замороженої води*, розподіл ресурсів якої не залежить від кліматичних змін. Потужності криги або багатих кригою відкладів на обох полюсах досягають кількох кілометрів, а в областях між полюсами та широтами 60⁰ вміст води у ґрунті складає понад 50%. Така висока концентрація льоду не могла утворитися просто при дифузії водяної пари з атмосфери в пори ґрунту. Скоріш за все лід акумулювався при випадінні снігу чи інею. Незвичні форми рельєфу в обох півкулях у середніх широтах між 30⁰ та 50⁰, де поширені відклади з комірчастою структурою, свідчать про можливість їх формування при випаровуванні льоду з нагрітого ґрунту. Ретельне

вивчення фотографій полярних шапок і прилягаючих до них “каналів” дозволило астрономам аргументовано допустити існування потоків талих вод на Марсі. Товстий шар снігу, з якого, за останніми даними, складені полярні шапки, служить своєрідною ковдрою, під якою сніг починає танути. Потоки талих вод витікають з-під льодовиків і утворюють промоїни та яри на сонячних сторонах схилів гірських хребтів.

Їх аналіз свідчить, що вони формувалися на внутрішніх схилах ударних кратерів (1/3 усіх спостережень), або на стінках глибоких улоговин у південній полярній зоні (1/4 спостережень). Біля половини подібних промоїн розташовані на південних схилах і тільки 20% - на північних. Аналіз рельєфу свідчить, що це геологічно досить молоді утворення, їх вік складає не більше декількох мільйонів років.

У рідкому виді вода на Марсі може існувати в інтервалі температур від -1°C до $+2^{\circ}\text{C}$. Тільки на дні найглибшого каньйону Марса – *Долини Маринера* – тиск атмосфери достатній для того, щоб вода знаходилася у рідкому стані при температурі $+10^{\circ}\text{C}$, а, можливо, і більше. Поза каньйоном вода кипить при $+2^{\circ}\text{C}$. Проведені дослідження свідчать, що водойми з талою водою льодовиків можуть існувати на поверхні Марса тривалий час, так як вода не замерзає навіть при температурі нижче 0°C через дуже низький атмосферний тиск (0,007 атмосфери) на планеті. Талі води контактують з ґрунтом і збагачуються солями. Експериментальні дані свідчать: якщо талі воді збагатилися розчиненими калієм і кальцієм - то точка замерзання такої води в марсіанських умовах складає -21°C для солоної води і -50°C для води, яка вміщує хлорид кальцію. Температура на Марсі коливається від -125 до $+21^{\circ}\text{C}$ у залежності від широти, пори року і часу доби. Відповідно, **рідка вода може існувати на Марсі досить тривалий час, а епізодична гідротермальна діяльність на Марсі відбувається і зараз.**

Крім того, недавно на Марсі знайдені дюни, які вміщують воду, а у рельєфі спостерігаються форми **термокарстових процесів**, що утворюються при сезонних таненнях **багатолітньої мерзлоти** і свідчать про великі запаси води у породах надр планети.

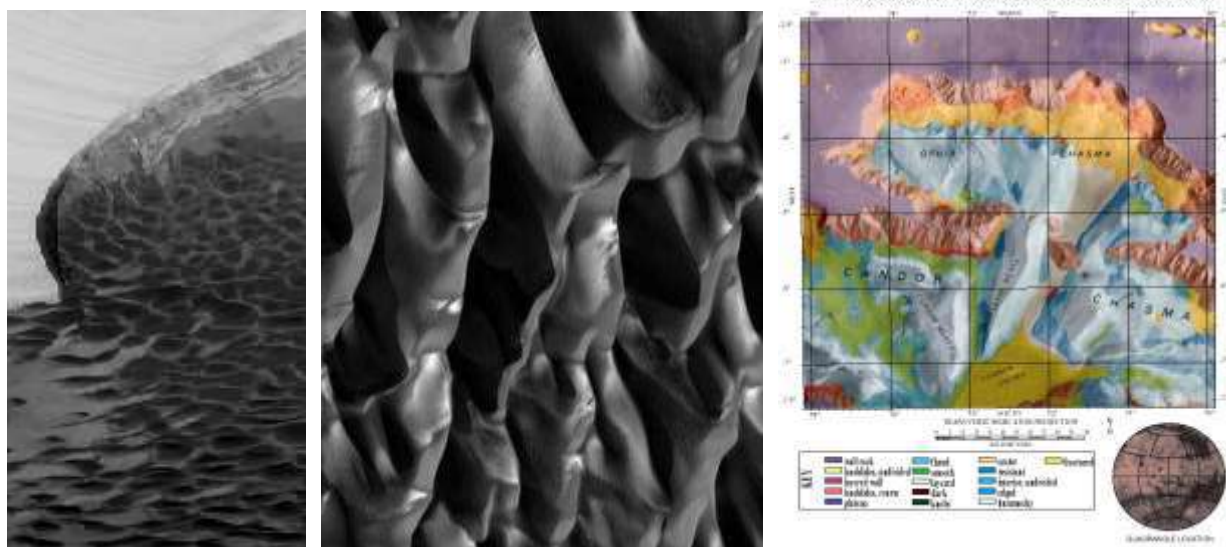


Рис.2.141. Ліворуч: не характерні для Землі структури марсіанських дюн південних приполярних широт – вони утворені при сублімації CO_2 -криги із кріолітозони чи льодовика при збереженні каркасу із H_2O -криги або мерзлого ґрунту. У центрі: намерзання води чи вуглекислоти на вершинах дюн кратера Проктор взимку (фото *Mars Reconnaissance Orbiter*). Праворуч: геологічна карта каньйонів Кандор та Офір ($280 \times 280 \text{ км}$) у центральній частині Долини Маринера (дані MGS)

Прилади *Mars Odyssey* (2001) зафіксували на Марсі південніше 75° південної широти величезні поклади криги (розмірами з Північне море на Землі), які занесені піском і залягають на глибині 30-60 см під поверхнею планети. Температура цих широт така низька, що замерзає не тільки вода, а і вуглекислий газ атмосфери. Запаси останнього дуже великі – приблизно 75% від загальної маси мерзлоти. Решта (25%) приходить на воду, але, згідно попередніх аналізів, кількість водяної криги під нанесеними продуктами вивітрювання

марсіанських порід така, що у рідкому стані талі води покрили б всю поверхню планети потужним шаром води.

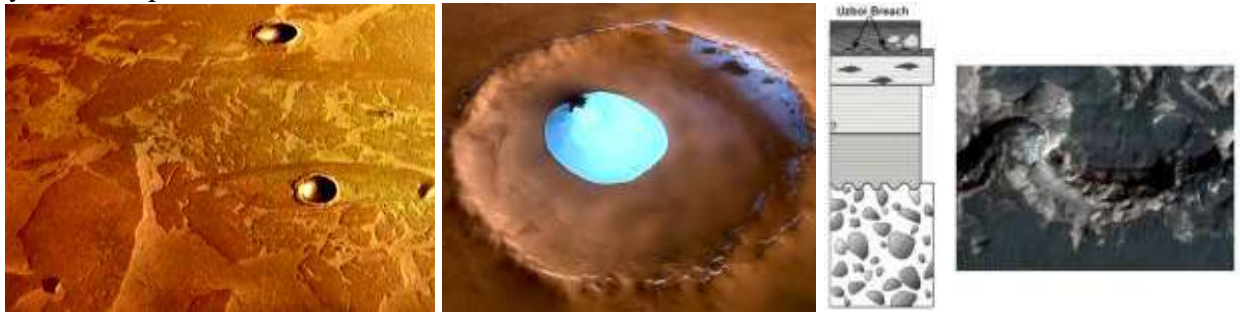


Рис.2.142. Ліворуч: покриті пилом і вулканічним попелом *пакові крижини* (ширина 30м-30км, товщина 45м) *замерзлого марсіанського моря* (800×900км) південної частини *вулканічного плоскогір'я Елізій*. У центрі: *лінза замерзлої води* у кратері зі слідами її конденсації на схилах; вода порціями виливалася на дно кратера і замерзала у вигляді крижаного купола товщиною до 200м, а темна маса зліва угорі – викинута із жерла *водяного вулкана* замерзла *грязь* (фото *Mars Express*). Праворуч: *берегова лінія озера* у *метеоритному кратері Холдена* із суміші уламків битої гальки ударної *мегабрехчії*, яка перекривається привнесеними водою *мілкозернистими глинистими* (з можливими слідами життя) *осадками* і шаром *гравію* з темними утвореннями та *еоловими наносами* (фото *NASA/JPL/University of Arizona/J.Grant et al*)

В екваторіальній області, у районі древнього *вулкану Елізій*, орбітальний апарат *Mars Express* сфотографував *замерзле море* розміром 800×900км, у межах якого видно *плоскі крижини*, нагромадження *уламків криги* та *тороси*, які покриті *наносами пилу, грязі* і *вулканічного попелу* товщиною у декілька сантиметрів (рис.2.142). Товщина самої криги, чи глибина крижаного моря, оцінюється у 45м. Раніше ця область була покрита рідкою водою, потім вона замерзла, а крига поступово була занесена пилом та вулканічним попелом при виверженнях недалеких вулканів, завдяки чому лід зберігся до наших днів. Невелика кількість ударних кратерів на поверхні замерзлого моря свідчить про утворення цієї крижаної структури біля 5 млн. років тому.

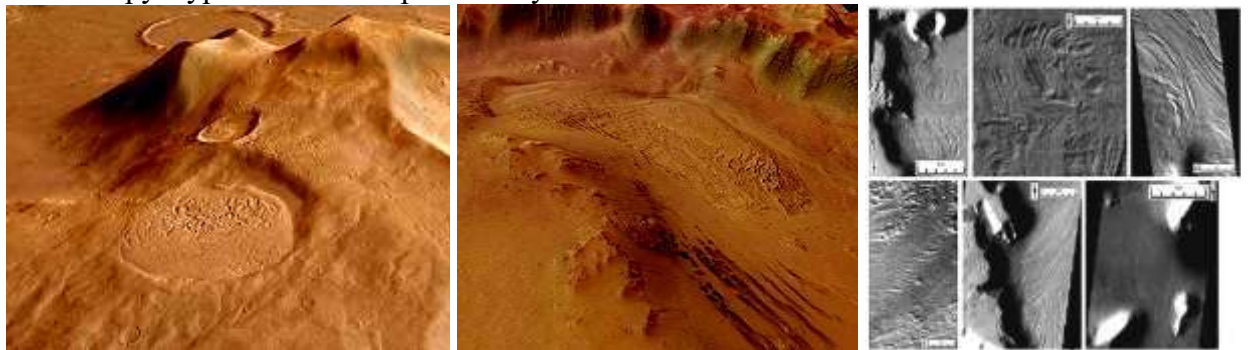


Рис.2.143. Ліворуч: заповнені виверженою масою кратера ймовірного *грязьового вулкана* кільцеві структури на *схилах гір*; у центрі: *обрушення крижаної стінки* та *сповзання її частин на водяну кригу* дна кратера із *випаровуванням CO₂-криги* (фото *Mars Express*); праворуч: *сліди сублімації* на поверхні *льодовиків середніх широт Марса* (фото *Mars Odyssey* і *Mars Global Surveyor*)

Отримані численні дані від *Mars Express* можна трактувати як результат прояву льодовикової діяльності у тропіках Марса і вони вказують на існування крижаного поясу, який приблизно 5 млн. років тому обперізував по екватору Марс. Походження поясу пояснюють у значній мірі відсутністю масивного супутника та його стабілізуючого впливу, через що великі відрізки геологічного часу нахил осі Марса коливався від 15° до 40°. За твердженнями астрономів, приблизно 5 млн. років тому зміни нахилу осі зумовили випаровування води на полюсах та її випадіння потужними снігопадами в районі екватора, де з часом сформувався крижаний пояс. Рештки цього поясу зараз і фіксують фотокамери та інші прилади міжпланетних станцій США і Європи, які обертаються навколо Марса

(рис.2.143). У високих широтах Марса на *рівнині Vastitas Borealis*, на дні кратера діаметром 35км і глибиною 2км, знайдене велике *замерзле озеро із чистої водяної криги* (рис.2.142). Слабкі сліди криги знайдені на стінках кратера і його схилах, а орбітальний апарат *Mars Express* зафіксував *перетікання молодих льодовиків* через гірські кряжі і кратери.



Рис.2.144. Сліди перетікання льодовика із верхнього кратера діаметром 9км у нижній кратер діаметром 17км у східній частині *Басейну Геллас* (фото *Mars Express*)

Важливо не тільки те, що є на Марсі, але і те, чого на ньому немає. *Кварц* поширений на Землі, але його дуже мало на Марсі - значить і *гранітів*, до складу яких він входить, теж мало. Немає свідчень про наявність *метаморфічних порід*, таких як сланці чи гнейси, що утворюються за рахунок впливів високого тиску та температури. Можливо, на Марсі не було потужних *тектонічних рухів*, що могли занурити породи на великі глибини у надра, де вони були б піддані процесам метаморфізму, а потім знову підняті на денну поверхню.

На Землі великі запаси *карбонатних порід*, що формувалися у теплих насичених вуглекислим газом океанах, але на Марсі їх знайдено мало. Вода, що існувала на Марсі на ранніх стадіях його розвитку, могла мати високу кислотність через викинуту вулканами сірку, а таке середовище перешкоджає формуванню карбонатів. Крім того, океани могли існувати досить короткий час, бути холодними або покритими кригою чи іншим чином перешкоджати широкому формуванню карбонатів. Відклади водного походження – *глини*, також рідко зустрічаються на Марсі, що свідчить на користь того, що планета тривалий час була сухою, а широко поширені *олівін* та *піроксени* легко розкладалися наявною водою.



Рис.2.145. Вигляд схилу *кратера Ендуранс* (ліворуч) із розсипами гематитових сферичних синіх кульок („чорниць”) та фрагмент (праворуч) розкритих кратером п'яти, збагачених сульфатами, пластів водного походження із відкладами *берегової лінії*, гематитовими „чорницями”, тріщинами та порожнинами від розчинених солей, які були виповнені вторинними кристалами (фото *Opportunity*)

Але існує ще більше доказів (*форми рельєфу, мінералогічні ознаки* - оксиди заліза, сульфати, хлориди, карбонати, опали; *текстурні ознаки* – сфероїдальні окремістості, верстуватість та знаки водних брижів у корінних породах), що переконливо доказують факт *існування води* протягом тривалого часу (ділянки глинистих мінералів віком понад 3,5 млрд років на всій планеті і сульфатів – 3,5-3 млрд. років (рис.2.126), опалового кремнезему – 2 млрд. років). Походження води пояснюють сумісним впливом геотермального нагріву, великої кількості солей (які знижують температуру замерзання) та захисного крижаного покриву. Потім, як вважають, вода почала випаровуватися, про що свідчать сульфати на поверхні Марса. На *плато Меридіана* інфрачервоний спектрометр *Mars Express* відкрив потужні (сотні метрів) поклади гіпсу, які свідчать, що океани на поверхні Марса були значно глибокими та обширними, ніж вчені вважали раніше.

У *кратері Гусева* над оточуючим рельєфом, складеного переважно із базальтів, дна піднімається на кілька метрів *Домашнє плато (Home Plate)*, яке утворилося у результаті *вибухового вулканічного виверження при контакті лави з морською водою*, про що

свідчать особливості нашарування утворень зі змінами потужностей верств згори донизу по розрізу, окремі кристали та сліди від падіння *вулканічних бомб*. Нижня частина видимого розрізу плато складена нагромадженнями *пірокластичного матеріалу*, а верхня – ці ж відклади, але оброблені вітром та піском. Про вибуховий характер виверження при контакті лави з морською водою свідчить і високий вміст хлору в оточуючих виходах корінних порід.



Рис.2.146. Ліворуч: кам'яні глобули на кінцях крихких „стебел” у породі з великою кількістю вкраплень *гематиту*, який формується при наявності води. У центрі: білі, насичені солями *морські мілководні відклади* дна кратера Гусева, які перекриваються жовтими сульфатними осадами. Один з аналізів спектрометра засвідчив, що концентрація аморфного *кремнезему* в світлих осадах дна досягає 90%, а його утворення можливе тільки у присутності великої кількості води чи в середовищі, яке сформоване гарячими розчинами, або при взаємодії ґрунтів з кислими газовими виділеннями вулканічного походження (мікрофото і фото *Spirit*). Праворуч: верстуваті *пірокластичні відклади* (нижня частина відслонення – скупчення пірокластичного матеріалу, верхня – оброблений вітром та піском той же матеріал) *Домашнього плато (Home Plate)* – геологічного утворення у *кратері Гусева*, яке було сформоване експлозивною вулканічною діяльністю при контакті лави з морською водою (монтаж фото *Spirit* виконаний *NASA/JPL/Caltech/USGS/Cornell*, ліве нижнє фото з *вулканічною бомбою* у штучних кольорах, решта - у природних)

Але гіпотеза про те, що раніше Марс був схожий на Землю, під впливом нових фактів старіє. Створені карти мінеральних ресурсів доказово свідчать, що древня поверхня Марса, на якій збереглися вулканічні породи, мало піддавалася впливу води. Навіть на Меридіанному плато піски (базальтові), які залягають на озерних відкладах, свідчать про існування засушливих умов вже 2 чи 3 млрд. років. Водяні потоки та водойми могли існувати тільки протягом геологічно короткого часу. Можливо, що вода більшу частину часу була заморожена, іноді крига танула, а потім знову швидко замерзала. Залишається таємницею, як такий безводний світ міг бути таким водним у певних місцях і у відповідні періоди.



Рис.2.147. Молоді яри довжиною 3км із слідами водних потоків та чашоподібним басейном унизу на схилі *кратера Noachis Terra* в області кріолітозони (ліворуч) та в області довжиною 1500м *басейну Ньютона* (праворуч) в середніх широтах Марса були утворені ґрунтовими водами із окремих джерел, потоки яких дуже швидко замерзали на ложі промерзлого ґрунту (фото *Mars Global Surveyor*)

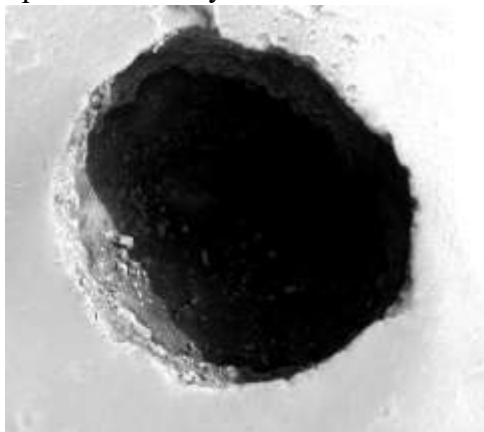
Вивчення розрізу осадових утворень (висотою 10-12м) у корінному відслоненні борту кратера Витривалості (скеля Бернса) за допомогою марсохода Opportunity показало, що на **базальтових пісках континентального походження** нижньої частини розрізу (дно кратера) залягають тонкі і потужні верстви, які складені сумішшю гематиту із складовими мінералами основних порід (базальтів), що швидко руйнуються водою. Ймовірно, що це **древні дюни біля великої водойми**, але більшу частину часу вони були сухими. Верхня частина розрізу представлена багатими на сульфати та солі утвореннями, які сформувалися у процесі чергування **періодів затоплень (повеней) та засух**. У цілому, відслонення - це дюни, які збереглися від розмивання поверхневими та ґрунтовими водами.

Якщо раніше вчені вивчали сліди діяльності рідкої води на Марсі і зосереджували свою увагу на деталях марсіанського рельєфу, які могли бути дном озера чи моря, меандруючою рікою з особливостями та деталями будови її долини, а також вивчали яри з явними ознаками водної ерозії, то зараз у каньйоні Candor знайдені **тектонічні розломи, зсуви та скиди**, вздовж поверхні розлому чи дзеркала зміщення яких циркулювали насичені мінеральними речовинами **підповерхневі води** або **рідкий вуглекислий газ з водою**.



Рис.2.148. Фото „залікованих” тектонічних порушень шириною 0,5м (підпис *Joints*) та світлих (*Halo*) смуг мінералізованих гідротермальними розчинами шириною 5-10м зон тектонічних порушень (фото NASA/JPL). Праворуч: відклади парових *фумарол* чи *гарячих джерел* (гідрати кремнезему) ранньої епохи гесперійського періоду на схилах вулканічного конуса, утвореного після обвалу покрівлі магматичного осередку майбутньої кальдери Нілі Патера в області Великого Сирту (фото MRO)

Мінеральні речовини випадали із розчинів в осадок на стінках тектонічних порушень і цементували породи, в яких вони циркулювали. Зараз ці утворення відпрепаровані процесами денудації і на денній поверхні Марса представлені виступаючими над поверхнею



своєрідними „хребтами” та подібними до дайок тілами, протяжністю до декількох кілометрів (рис.2.148). Породи навколо цих порушень збагачені мінеральними з’єднаннями і набули дещо інших кольорів та відтінків.

Рис.2.149. Отвір у стелі однієї з *марсіанських печер* (фото NASA/JPL)

Поблизу екватора, у районі вулкану *Арсійський*, знайдені круглі отвори діаметром від 100 до 152м у стелях перших **марсіанських печер** (рис.2.149). Вони не мають повністю освітлених Сонцем стін та дна (це не ерозійні ями) та ореолів викидів (це не ударні кратери), їх температура цілу добу постійна, а глибина близько 80м. Отвори печер в поверхні Марса отримали власні імена: *Дена*, *Хлоя*, *Венді*, *Енні*, *Еббі*, *Ніккі* та *Джейн*. Можливо, що це можуть бути *провальні отвори частин холодної лавової поверхні над спустошеними лавовими камерами чи потоками* (рис.2.121).

Марс – планета з незвичною геологічною будовою, з дивовижно динамічним сучасним і парадоксально незрозумілим минулим. Вулканічні породи тут такі ж різноманітні як і на Землі, результати геологічної діяльності вод проявлені повністю. На ранній стадії своєї історії планета переживала потужні повені і, можливо, рясні дощі, але її древні породи зберегли мінерали, які могли б швидко зруйнуватися в умовах вологого середовища. Зараз

клімат сухий і холодний, але дослідження відкладів дна древнього моря, які зроблені марсоходом *Opportunity*, свідчать про зміни клімату у часі. Рідка вода не може зберігатися в сучасних умовах, але існують недавно утворені нею яри і цей процес буде тривати.

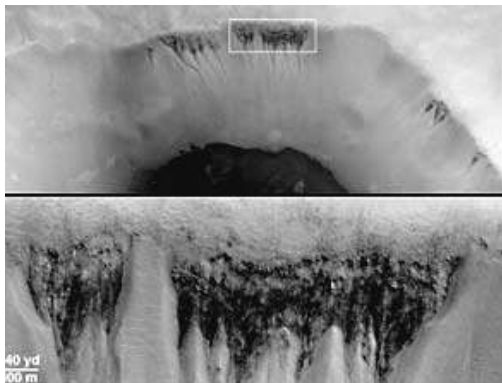


Рис.2.150. Басейн на дні 50-кілометрового ударного кратера Аерогальмування на півдні Землі Нохіс з виходами ґрунтових вод (фото MGS)

Особливу цікавість викликає той факт, що відкриття великих запасів криги на Марсі було зроблене раніше, після проведеної останнім часом ревізії наукових результатів, що були отримані AMC *Viking*, коли одним з поставлених завдань був пошук слідів біологічного життя на Марсі. AMC *Viking-1, -2* підтвердили, що Марс – холодна та безжиттєва

планета, мертвий пейзаж якої іноді оживляють потужні піщані бурі. Там майже немає атмосфери, на поверхні немає рідкої води. Було чітко встановлено, що Марс більш сухий ніж пустеля Сахара і більш холодний, ніж крижані береги Антарктиди.



Рис.2.151. Відполіровані рухливими еоловими наносами піску і мілкої щєбінки багаті на сульфати відклади, під якими залягають прошарки хлоридних солей (фото *Opportunity*) та обкатані зерна піску еолових дюн (мікрофото *Spirit*, ширина поля зору 3см)

Результати хімічних тестів *Viking-1, -2* були неоднозначними: чотири різних тести свідчили про наявність живих організмів, а біохімічні експерименти – на повну відсутність не тільки життя, а навіть органічної матерії взагалі – поверхня Марса виявилася стерильною.

Фотокамери *Mars Global Surveyor* зафіксували на поверхні Марса русла висохлих річок, дно давнього океану, численні яри, вимоїни, воду у полярних шапках (вважалося, що там присутня тільки CO_2 -крига). Найбільшим відкриттям була знахідка величезних запасів ґрунтової криги. Результати сучасних досліджень показують, що статична електроенергія пилових бур Марса може розкладати вуглекислий газ та водяну пару – головні складові марсіанської атмосфери – на окремі атоми, допускаючи їх рекомбінацію у *перекис водню* та більш складні *пероксиди*. Під час сильних бур концентрація окислювачів в атмосфері може досягати значень, при яких вони починають конденсуватися, випадають у вигляді осадків, просочують поверхневий ґрунт планети, активно взаємодіють з органікою, яка могла існувати на планеті раніше і марсіанська поверхня зараз являє собою непристосоване для життя місце. Крім того, пероксиди не тільки могли стерилізувати поверхню Марса, але і прискорити скорочення кількості метану в його атмосфері.

Зараз спеціалісти НАСА впевнені, що переглянуті результати роботи *Viking* слід рахувати запізнілим доказом життєносності Марса. Існує надія, що мікроорганізми законсервувалися і збереглися на глибині 1-5м між брилами замерзлої води та поверхневим ґрунтом.

Проблема існування життя на Марсі не перестає хвилювати вчених усього світу. У 1984р. в Антарктиді був знайдений метеорит *ALH 84001* (рис.2.151), який ударом був викинутий з Марса, як встановлено, із району каньйону *Eos*, де серед інших існує 20-кілометровий ударний кратер віком 17 млн. років. Метеорит являє собою невеликий кусок породи вагою

близько 1,9кг і віком біля 4,5 млрд. років. Найбільш вірогідною версією його попадання на Землю є наступна: біля 4,5 млрд. років тому розплавлена магма утворила тверду марсіанську кору. Через 700 млн. років марсіанські породи були зруйновані, можливо, метеоритом чи астероїдом. Вода проникла у тріщини порід і тим самим дозволила бактеріям існувати в цих тріщинах. Приблизно 3,6 млрд. років тому ці мікроорганізми стали викопними (вікові дані отримані в результаті вивчення радіоактивних ізотопів у тріщинах марсіанського гостя). 16 млн. років тому, після падіння ще одного метеорита на Марс, значний кусок породи кори планети був вибитий за межі атмосфери планети у космічний простір (про таку давність подій свідчать результати вивченого впливу на метеорит космічних променів за час його перебування у космосі). Космічна подорож завершилася падінням метеорита в Антарктиді біля 13 тис. років тому, а 07.08.1996р., після 15 років ретельних досліджень вченими різних країн і НАСА була зроблена сенсаційна заява – у метеориті були знайдені поліциклічні ароматичні вуглеводні та об'єднані у довгі ланцюжки нанокристали магнетиту, які своєю структурою та чистотою свідчать, що вони були **вирощені бактерією** (рис.2.152), а також знайдені мікроскопічні карбонатні диски, які свідчать про контакт речовини метеориту з рідкою водою на древньому Марсі.

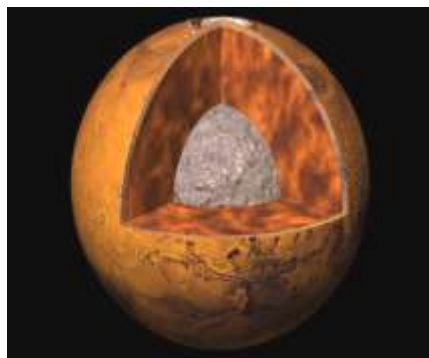
Одночасно вчені Палеонтологічного інституту Російської Академії Наук повідомили, що у деяких аналогічних марсіанських метеоритах ними також знайдені скам'янілі *рештки мікроорганізмів та найпростіших грибів*, які можуть легко переносити космічний холод.



Рис.2.152. Загальний вигляд марсіанського метеориту ALH 84001 (ліворуч) та мікроскопічні особливості його будови – зображення в середині марсіанського метеориту *одиної скам'янілості*, отримане за допомогою скануючого електронного мікроскопа (у центрі) та скам'янілостей цілої „колонії” древніх марсіанських примітивних бактерій (праворуч)

Тобто, за існуючими на сьогоднішній день даними, Марс у минулому був планетою з океанами, річками та озерами. Марс мав вулканічне тепло, воду і мікроорганізми – на ньому існувало життя, яке, можливо, з'явилося одночасно із життям на Землі.

Хімічний склад Марса типовий для планет земної групи, проте є і специфічні особливості. На Марсі також відбувався ранній перерозподіл речовини надр під дією гравітації, на що вказують збережені сліди первинної магматичної діяльності. Структура гравітаційного поля Марса вказує на невеликі відхилення від однорідного розподілу густини у надрах планети.



Теоретичні моделі **внутрішньої будови Марса** дають планету із сферично побудованими надрами, яка у мініатюрі нагадує Землю (рис.2.153). Невелике **ядро** радіусом 800-1000км (складає біля 10% загальної маси Марса), яке багате, мабуть, на чисте залізо чи сплав $Fe-FeS$ (залізо-сульфід заліза) і, можливо, розчиненого в них водню, має низьку густину і відносно низьку температуру (біля $+1000^{\circ}C$).

Рис.2.153. Схема сферичної будови надр Марса

Формування ядра, згідно сучасних теоретичних оцінок, тривало біля 1 млрд. років і співпало з періодом раннього вулканізму. Ще такий за тривалістю період зайняло плавлення мантійних силікатів, що супроводжувалося інтенсивними вулканічними і тектонічними явищами. Ядро оточене **мантією** потужністю у декілька сотень кілометрів.

Силікатна мантія Марса збагачена залізом, помітні кількості оксидів якого відкриті у досліджених породах на поверхні і вони зумовлюють колір планети, тоді як вміст металевого заліза значно менший, ніж у інших планет земної групи. Приблизно 3 млрд. років тому завершився і цей період, проте глобальні тектонічні процеси (зокрема, формування величезних вулканів) тривали ще на протязі понад мільярда років і вони супроводжувалися поступовим охолодженням планети, що триває і нині. Потужність *літосфери* Марса не менше 250-300км. Порівнюючи топографічну карту планети з даними вимірів її поля тяжіння вченим вдалося визначити потужність *кори* Марса, яка складає до 40км під північними рівнинами та біля 70км під височинами на півдні. Найпотужніша кора під *гігантськими вулканами плато Фарсіда*, а найтонша – під *западиною* (ударним кратером) *Еллада*.



Рис.2.154. Ліворуч: перший марсохід *Sojourner* („Мандрівник”) на поверхні Марса (1997р.) і вигляд (у центрі) марсоходів-геологів *Spirit* („Дух”) і *Opportunity* („Можливість”) та посадочний зонд (праворуч) *Phoenix* („Фенікс”) автоматичної міжпланетної станції *Phoenix Mars Lander* (фото NASA)

Невизначеність у розмірах внутрішніх сфер зумовлена недостатньою вивченістю планети. Якщо магнітне поле Марса повністю індуковане магнітним полем сонячного вітру – то ядро планети повністю тверде. В іншому випадку слід допустити рідкий чи напіврідкий стан ядра Марса. Важливо інше – як і решта планет земної групи, Марс своєю будовою нагадує горіх із його сферичними *твердою корою*, чітко відокремленим *ядром* та проміжною, більш м’якою, оболонкою *мантії*. Тобто, **формування сфер планетних надр і диференціація (розподіл) речовини у ході еволюції всіх планет земного типу відбувалися у подібних умовах.**

Завершення мінералогічного картування поверхні Марса за допомогою інфрачервоного спектрометра *OMEGA* на орбітальному апараті *Mars Express* та результати досліджень двох марсоходів-геологів свідчать, що невелика маса Марса та віддаленість від Сонця зумовили виділення в геологічному розвитку планети **трьох ер** (названі грецькими іменами мінералів, що тоді формувалися), змінюючись при цьому від багатой на воду планети до кислого середовища після активного вулканізму (за іншими даними – **трьох періодів**, названих іменами регіонів Марса за ступенем розвитку на їх поверхні імпактних структур).

Перша геологічна ера – Phyllosian (філосилікатна ера) або **ноїв період** (англ. Noachian – *ноахій*, 4,1-3,8 млрд. років тому; 4,5-4,1 - *преноахій*). У преноахії утворилися найбільші кратерні басейни, гідротермальні підповерхневі системи та Fe- і Mg-сметити. Після завершення акреції протягом 1-ого млрд. років інтенсивно відбулося формування залізо-сульфідного ядра та охолодження Марса на 30-40°C за мільярд років. У пізньому ноахії (3,8млрд. років) зросли виливи гідротерм на поверхню із формуванням системи озер.

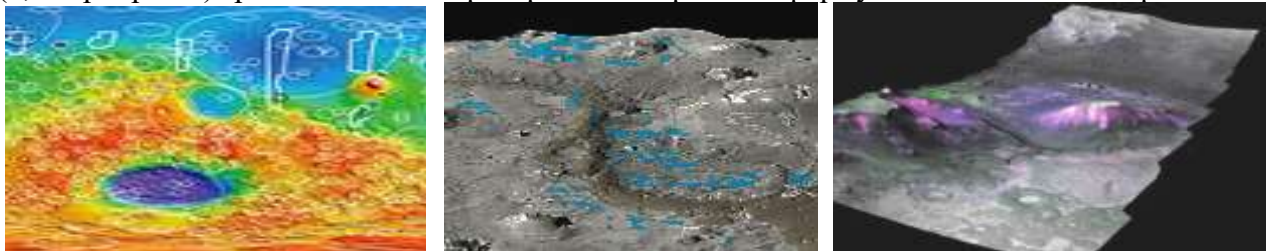


Рис.2.155. Ліворуч: поховані під північними рівнинами ударні кратери діаметрами 130-470км *епoxy раннього ноахію* геологічної історії Марса (дані *Mars Express*). У центрі: ділянки Марса із древніми *філосилікатами* (вік понад 3,5млрд. років) та *гідратованими сульфатами* (блакитні на фото, вік 3млрд. років), які залягають як у сухому руслі, так і на суміжних вододілах. Праворуч: тривимірне зображення западини із відкладами філосилікатів на плоских схилах каньйону (NASA/JPL/JHUAPL)

Проте гравітаційна диференціація речовини надр була не такою глибокою та повною, як у решти планет земної групи - мантія Марса насичена сірчанним залізом, а літосфера - вміщуючими залізо породами, хоча концентрація заліза у хімічному складі планети на 25% нижча, ніж на Землі. Марс пережив потужне бомбардування астероїдами. Процеси плавлення речовини в мантії супроводжувалися інтенсивною тектонічною і вулканічною діяльністю із формуванням на поверхні Марса *вулканічних щитів і базальтових рівнин*.

Атмосфера Марса перші сотні мільйонів років складалася із H_2 та He , а після втрати водню – з CO_2 , N_2 та інших газів (CO , NH_3 , CH_4 , H_2O тощо). У небі яскраво світили 2 зорі – жовте Сонце та червоний Юпітер, який інтенсивно формувався. Останні 300 млн. років ймовірного водяного циклу ери (з вологими періодами та рясними дощовими потоками із різкими підняттями ґрунтових вод південніше екватора) Марс мав більш щільну, ніж зараз, атмосферу та великі маси води на поверхні, а *клімат планети був вологим і теплим*.

Породи поверхні Марса руйнувалися та вивітрювалися в умовах великої кількості води, середніх температур та низької кислотності (лужне оточуюче середовище) з утворенням із магматичних порід, при їх тривалому контакті з водою, товщ *алюмінієвих філосилікатів, залізо-магнієвих філосилікатів, гідрооксидів кремнію чи опалів* віком понад 3,5 млрд. років, багато з яких збереглися дотепер, а також таких мінералів як *залізна руда (шамозит) і нонтроніт*, які свідчать про різні типи водяних середовищ Марса, в яких вони формувалися.

Друга геологічна ера – Theiikian (сульфатна ера) або **гесперійський період** (англ. Hesperian – *гесперій*, 3,8-3,0 млрд. років тому) – дуже відрізнялася геологічними умовами.

Три мільярди років тому Марс досяг вершини своєї еволюції. У гесперії Марс мав постійну гідросферу – північну рівнину покривав солоний океан глибиною 0,7-1 км та об'ємом до 15 млн. км³, який періодами розпадався на два басейни – один, округлий, заповнював ударний басейн у районі рівнини Утопія, а другий, неправильної форми – покривав район Північного полюса. У середніх та низьких широтах існувало багато озер та річок, на Південному плато – льодовики (рис.2.156). Марс мав щільну атмосферу, аналогічну тогочасній земній, з температурою біля поверхні до +50°C і тиском понад 1 атм. Підвищення температури у надрах Марса через розпад радіоактивних ізотопів зумовило підняття мантійних „плюмів”, *активний вулканізм*, зокрема із формуванням вулканічного нагір'я Фарсиди із застиглих лавових покривів та формуванням потужних водяних потоків, які переміщувалися через плато Меридіана у північному напрямі. Потужний вулканізм понад 500 млн. років перекривав змінені водою відклади ноахію на поверхні планети потоками лав та *насичував атмосферу діоксидом сірки (SO_2)*, який забезпечував парниковий ефект, реагував з вологою атмосферою і утворював кислотні дощі із сірчаної кислоти. Кислотно-лужний баланс оточуючого середовища став зміщуватися, а мінерали поверхні, вступаючи у реакції з кислим середовищем, формували водні *сульфати* (вік 3 млрд. років), які також могли випадати в осадок при випаровуванні на поверхні виходів підземних вод. Ці події поступово зумовили нейтралізацію водяного середовища, початок формування *карбонатів* на Марсі і значно осушили клімат планети. Марс втратив більшу частину своєї атмосфери у кінці цієї ери, коли ядро Марса перестало генерувати магнітне поле (через зіткнення з астероїдом та відповідні зміни у ядрі?), а вулканізм уже затих. Допускається, що до кінця гесперидію вода на поверхні Марса зустрічалася тільки у замороженому стані. Планета переживала умови засухи, про що свідчать наявність *ginsu* та *сірого гематиту*.

Рис.2.156. Давній (світлий) та молодший (темний) океани геологічно юного Марса (берегова лінія за Viking-1,-2 та Mars Global Camera, NASA)



Третя геологічна ера – Siderikian або **амазонський період** (англ. Amazonian – *амазоній*, від 3,0 млрд. років і донині) - період перезволоження закінчився приблизно тоді, коли на Землі появилось

примітивне життя. Клімат Марса став катастрофічно нестабільним. Відбувалися потужні, але поступово затухаючі глобальні тектонічні та вулканічні процеси, у ході яких виникли марсіанські вулкани. Кілька разів дуже змінювалися характеристики атмосфери і гідросфери, появлявся та зникав *Північний океан*. Катастрофічні повені від танення кріолітосфери зумовили формування великих каньйонів: у долину *Арес* з південних нагір'їв Марса стікав потік води більший за Амазонку; проток води в долині *Касей* перевищував 1млрд. м³/сек. Мільярд років тому активні процеси в літосфері, гідросфері та атмосфері Марса зупинилися і поступово він набув сучасного вигляду. Зараз вже існують докази, що і пізніше на Марсі випадали потужні *опади* - французькі вчені відкрили густу мережу зараз сухих річкових русел, які утворилися після того, коли планета вже повинна бути повністю *скованою кригою*, характеризувалася *холодним кліматом* та існуванням *потужної товщі мерзлоти*.

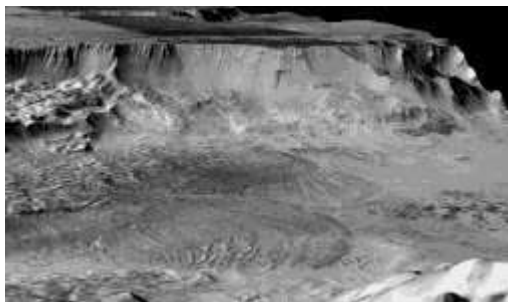


Рис.2.157. Крайовий обрив льодовика віком *ранній-середній амазоній* (біля 1,8млрд. років тому) висотою 2км із обвалами фронтальної частини після випаровування CO_2 -криги, танення H_2O -криги та замерзання води біля підніжжя із подальшою пластичною течією цієї наледі

Поклади опалу віком 2 млрд. років свідчать про існування рідкої води значно триваліший час, ніж вважалося раніше. Після втрати магнітного поля Марсом сонячний вітер отримав повний доступ до поверхні планети і вона стала втрачати свою атмосферу, що спричинило до замороження Марса. Вода випарувалася чи перетворилася у кригу двох полярних шапок та зон мерзлоти.

Решту років Марс знаходився у такому стані та набував червоного кольору через формування *оксидів заліза* від реакції багатой залізом поверхні із атмосферою, яку планета поступово втрачала.

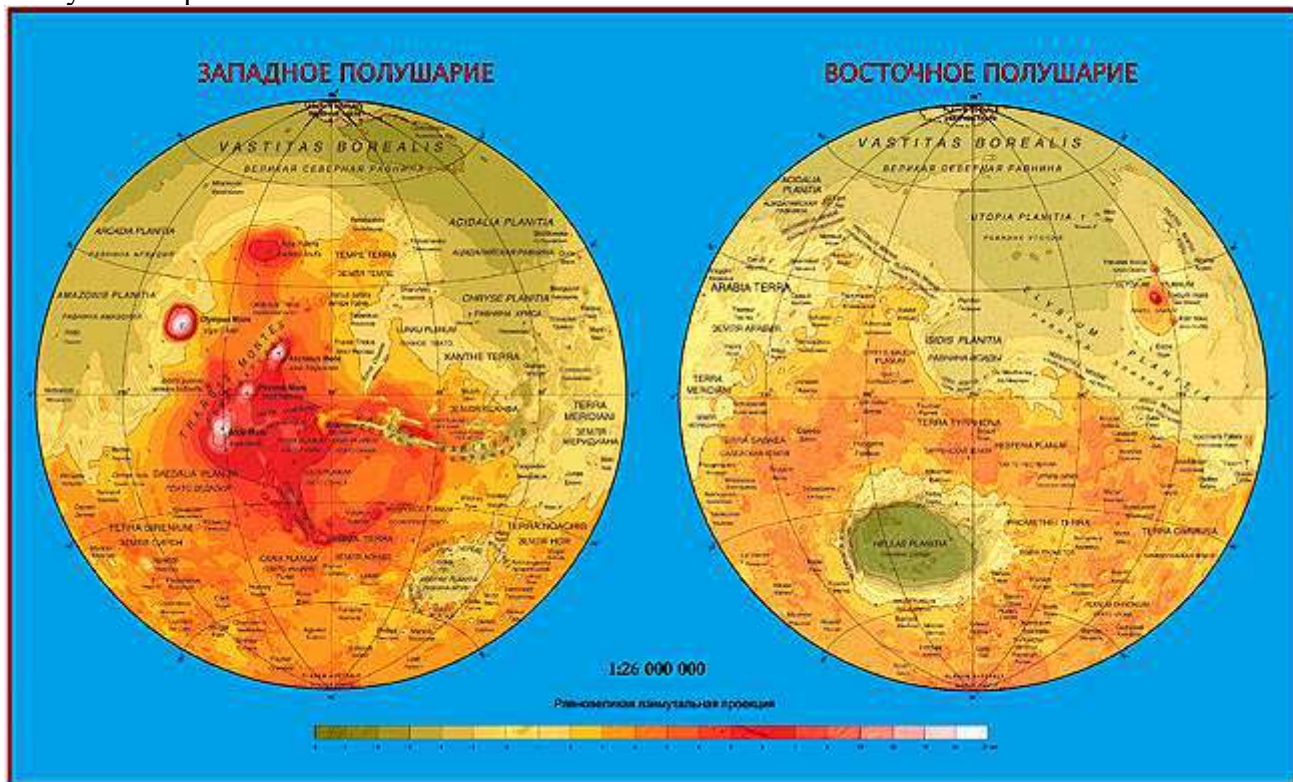


Рис.2.158. Гіпсометрична карта Марса створена за даними високоточного висотного лазерного альтиметра (*Mars Orbiter Laser Altimeter-MOLA*) АМС *Mars Global Surveyor*, автори Ж.Ф. Родіонова, Ю.А. Ілюхіна (ДАІШ МДУ) за участю кафедри картографії та геоінформатики МДУ (Москва, 2004р.)

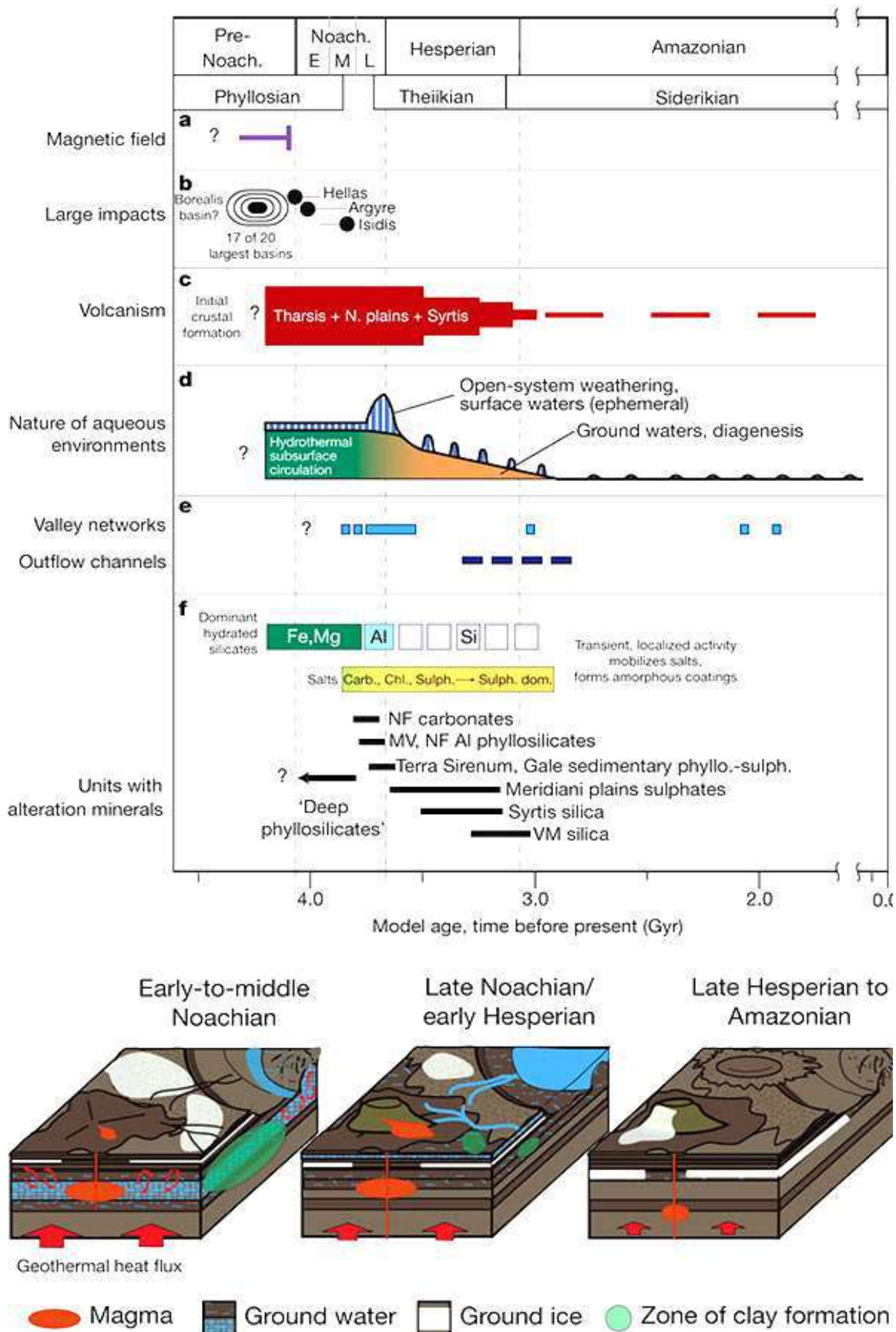


Рис. 2.158-1. Підсумкові схеми даних про історію геологічних подій на Марсі.
NF (*Nili Fossae*) – система так званих *Нільських розломів*; **MV** (*Mawrth Vallis*) – *долина Морт*;
VM (*Vallis Marineris*) – *долини Маринера*; Carb. - карбонати; Chl. - хлориди; Sulph. - сульфати
 (за Nature, 2011)

Ландшафт Марса змінювався стрибкоподібно під час **5 періодів потужної вулканічної діяльності** – 3,5 млрд., 1,5 млрд., 800-400 млн., 200 млн. і 100 млн. років тому, коли після зникнення ознак тектоніки плит (див. рис.2.103) нагрівання кори Марса його гарячим ядром зумовило формування в ній розломів із проявами потужного вулканізму.

Зараз вчені стверджують - на Марсі існувала вода, яка у перший мільярд років заповнювала його западини та ущелини, а потужні потоки (збереглися долини) прорізали численні кратери. Сприятливі для появи та розвитку життя умови існували на Марсі протягом 700 млн. років і вони були не стільки кислотними, скільки нейтральними чи лужними, проте значно солоними. Велика кількість *опалу* (від взаємодії вулканічних порід з водою) віком 2 млрд. років свідчить про існування басейнів рідкої води значно триваліший час – від 4 до 1,8 млрд. років тому. Пізніше періоди теплого і вологого клімату на Марсі, ймовірно, були короткочасними і наступали тільки після глобальних катастроф через зіткнення із астероїдами.

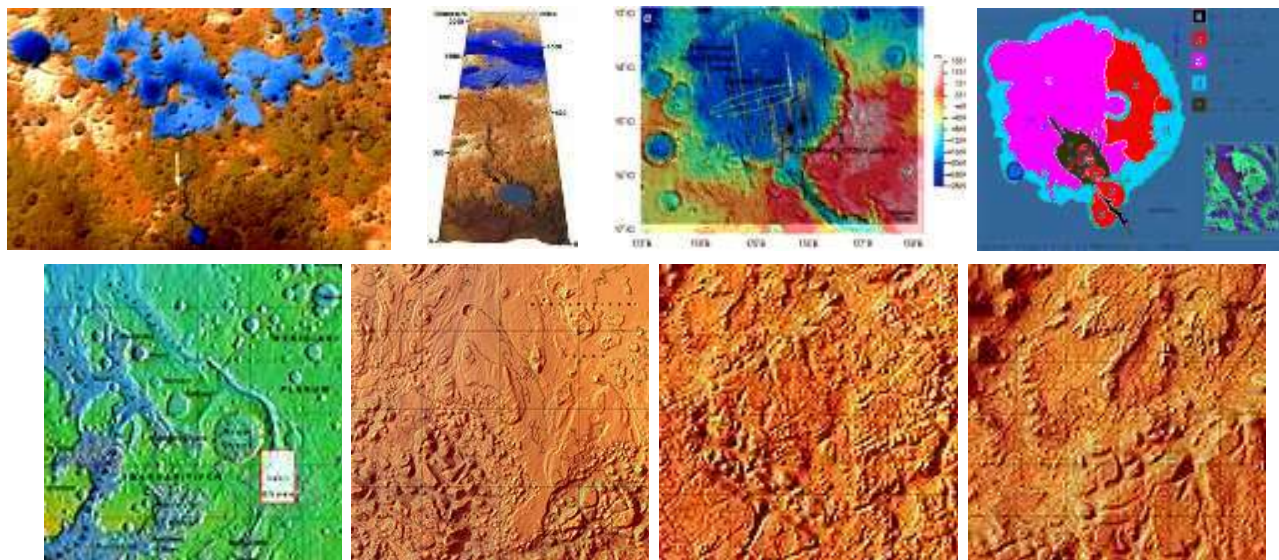
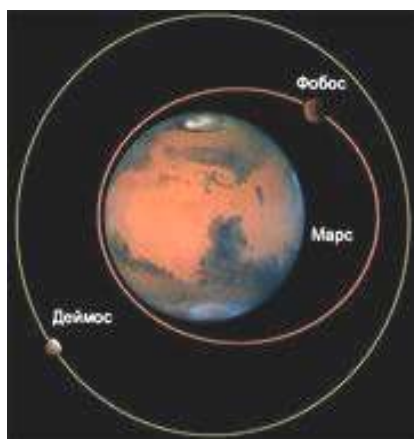


Рис.2.159. Угорі: синім кольором показані області південного полюса *Марса* з великим скупченням атомів водню (можливо, вода у твердій фазі – потужні водні льодовики замерзлих морів) - ймовірний у минулому грандіозний комплекс озер на південному високогір'ї із формуванням повеневим водним потоком (вказано стрілкою) одного з найбільших каньйонів Марса - долини *р.Маадим* та затопленням кратера *Гусева* – місця посадки марсохода *Spirit*; праворуч: схематична геологічна карта району кратера *Гусева* (за даними *MOLA Mars Global Surveyor*). Унизу: перші топографічні карти Марса району *Іані Хаос* масштабів 1:200тис., 1:100тис. і 1:50тис. (за даними *Mars Express* створені *Freie Universität, Інститутом геодезії та геоінформатики, Німецьким аерокосмічним центром*)



Супутники Марса: Фобос (грец. *φοβος* – «страх») і **Деймос** (*Δείμος* – «жах») – природні малі небесні тіла неправильної форми, які обертаються коловими орбітами навколо планети із заходу на схід майже в площині екватора Марса і завжди повернуті до нього одними і тими ж сторонами.

2.2.4.1. ФОБОС

ФОБОС – космічне тіло неправильної форми: розміри 26,6×22,2×18,6км, густина $1,86 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$, маса $1,072 \times 10^{16} \text{ кг}$. Фобос обертається коловою орбітою навколо Марса на віддалі 9378км з періодом 7год. 39хв., тобто в три рази швидше, ніж сама планета обертається навколо осі (24год. 39,5хв. – *марсіанська доба*). На протязі марсіанської доби Фобос двічі сходить на заході і два рази пересікає небосхил Марса. Поверхня Фобоса покрита *метеоритними кратерами* в 100 разів

густіше, ніж поверхня Марса. Найбільші на Фобосі кратери – **Стікні** (діаметр 10км), **Холл** (6км) і **Рош** (5км). Поверхня Фобоса, мабуть, покрита шаром **реголіту** – *подрібнених порід*, які утворилися у результаті зіткнень метеоритів з поверхнею супутника. Матеріал навколо країв кратера Стікні своїм блакитним відтінком відрізняється від решти поверхні і, ймовірно, є більш молодим та менше часу піддавався впливу космічного середовища.



Рис.2.160. Супутник Марса Фобос з найбільшим кратером Стікні та сіткою борозен (фото Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Global Surveyor і Mars Express)

Спостереження свідчать, що Фобос неоднорідний за складом і має відносно щільне ядро, яке оточене потужним шаром **реголіту** меншої щільності. Формування шару реголіту пояснюється невеликою швидкістю випадання уламків та пилу, які утворюються при падінні метеоритів на Фобос (сила тяжіння на Фобосі 1/1000 земної). Ці уламки залишаються у гравітаційному полі Марса на орбітах, близьких до орбіти Фобоса. Через деякий час (від 1 до 10тис. років) Фобос знову їх захоплює. Цей процес повторюється багатократно. Цікавими утвореннями на Фобосі є **сітка борозен** 10-20м глибиною, шириною 100-200м та довжиною десятки кілометрів, які з регулярним інтервалом (на відстані 200-300м між собою) покривають всю поверхню. Найбільша борозна безпосередньо прилягає до кратера Стікні, має довжину до 30км, ширину 700м та глибину 90м. На діаметрально протилежному боці Фобоса борозен немає. Основна система борозен розміщена концентрично відносно великої півосі Фобоса, що направлена у бік Марса. Утворення борозен вчені пояснюють тріщинами від удару метеорита. Сучасний аналіз даних КА Фобос-2 (1989р.), свідчить, що цей крихітний супутник Марса має незначний та стійкий витік газу; таке ж потужне, як і Земля, **магнітне поле**, тобто, **Фобос більше ніж на 1/3 повинен бути складений магнітною речовиною** (густина заліза 4,5-4,7г/см³) із внутрішніми порожнинами, бо його густина (1,86±0,02г/см³) відповідає астероїдам класу D (пов'язані гравітацією скупчення багатих на сполуки Si та S уламків порід з H₂O-кригою та порожнинами всередині), проте орбіта Фобоса у площині екватора Марса не свідчить про його захоплення гравітацією Марса.

Проліт Mars Express (04.03.2010р.) у 67км від Фобоса не виявив з'єднань C на ньому, проте відкрив **філосилікати** водного походження, що є головним доказом «марсіанського», а не астероїдного походження Фобоса.

Рис.2.161. Гіпсометрична карта Фобоса (дані USGS)



У 1945р. В.Шарплесс (США) встановив, що Фобос повільно по спіралі наближається до Марса і через 50 млн. років зіткнеться з планетою. Це пояснюється близьким розташуванням супутника до поверхні Марса і утворенням у надрах планети припливного виступу (горба), який викликаний тяжінням Фобоса. Швидке обертання Фобоса навколо Марса викликає рух у надрах планети припливного виступу, який не встигає за швидким обертанням Фобоса і гальмує швидкість його руху орбітою, у результаті чого радіус орбіти Фобоса зменшується на 4см/рік. Космічний апарат Mars Express (2004) установив, що зменшення радіуса орбіти Фобоса прискорює швидкість його орбітального руху.

2.2.4.2. ДЕЙМОС

ДЕЙМОС – космічне тіло неправильної форми, розмірами $15 \times 12,4 \times 10,4$ км, густиною $1,471 \text{ г/см}^3$ і масою $1,48 \times 10^{15}$ кг, яке обертається навколо Марса ідеально круглою орбітою на віддалі 23 459 км за 30 год. 21 хв. Орбіта Деймосу близька до синхронної орбіти, коли рухаючись по ній супутник немов би висить над певною точкою екватора Марса і його переміщення по небосхилу дуже повільне – зійшовши над горизонтом Деймос перебуває на небосхилі близько 65 годин, тобто понад 2,5 сонячної доби. *Можливо, що Фобос і Деймос є останніми із багатьох існуючих раніше супутників Марса, які припинили своє існування і при падінні на Марс утворили поблизу екватора планети численні кратери.*

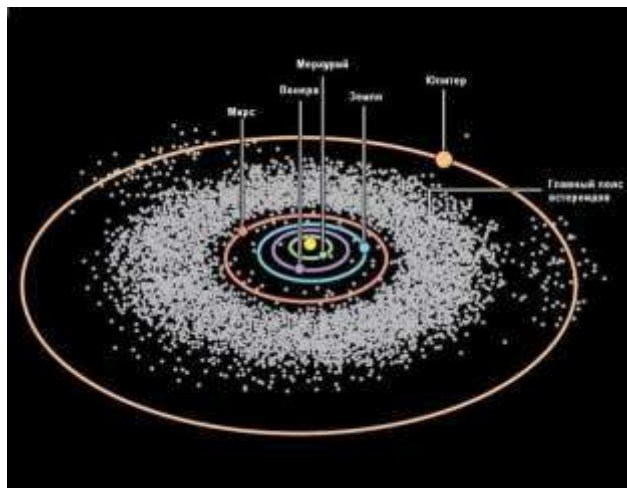


Рис.2.162. Супутник Марса Деймос з кратерами Свифт і Вольтер та ділянка його поверхні ($1,2 \times 1,5$ км) з деталями розміром до 3 м (фото Mars Reconnaissance Orbiter і Viking-1)

Наявні дані про фізичні та хімічні характеристики Фобоса та Деймосу не дозволяють однозначно зробити вибір між різними гіпотезами походження цих супутників Марса – або це *аккумуляовані тіла* на марсіанських орбітах, або *результат зіткнення* великого космічного тіла з Марсом на ранніх стадіях його еволюції чи, через невеликі розміри та неправильну форму, *захоплені* із головного поясу астероїди.

Марс та його супутники досліджувалися автоматичними космічними апаратами *Mariner*, *Viking*, *Mars*, *Pathfinder*, *Фобос*, *Mars Global Surveyor (MGS)*, *Mars Odyssey*, *Mars Express*, *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Phoenix Mars Lander* з посадочним зондом *Phoenix* та марсоходами *Sojourner*, *Spirit*, *Opportunity*.

2.2.5. АСТЕРОЇДИ

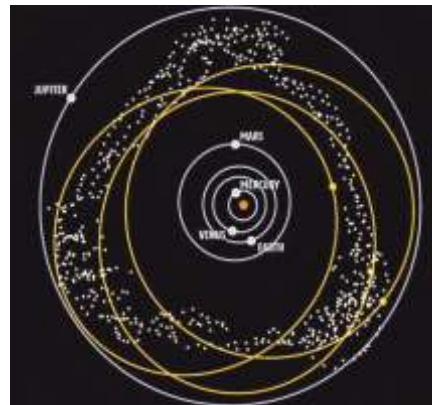
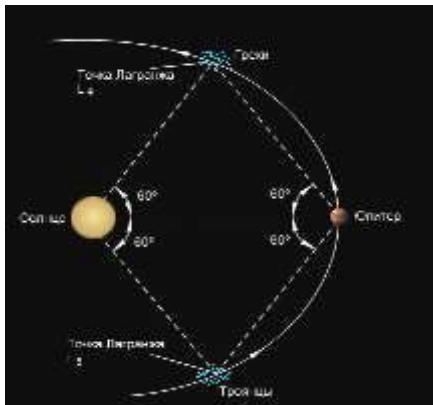


АСТЕРОЇДИ - від грец. *aster* – „зірка” і *eidos* – „вигляд”, **планетоїди** або **малі планети** – невеликі тіла, більші за метеороїди і менші від планет, що обертаються навколо Сонця у кільцевому головному поясі астероїдів між орбітами Марса та Юпітера на віддальх від 2,0 до 3,6 а.о. (у діапазоні від 254 до 598 млн. км).

Частина астероїдів групується у так званих точках лібрації – вузлах Лагранжа, які розташовані на орбіті планети або попереду, або позаду її на кутовій віддалі в 60° . У цих точках гравітаційні поля планет і Сонця утримують астероїди на синхронізованих з рухом планет орбітах. Передня група астероїдів називається **греками** (астероїди *Ахілл*, *Одісей* тощо), задня – **троянцями** (*Пріам*, *Еней* тощо) (рис.2.163), але всі вони рухаються орбітою планети.

Основна маса астероїдів (98%) – їх **Головний пояс** - розташовані між орбітами Марса та Юпітера, де, відповідно до закону математичних прогресій Тіціуса-Бодє про міжпланетні віддалі, повинна була б існувати ще одна планета (гіпотетичний *Фаєтон*). Усі астероїди, як і

планети Сонячної системи, рухаються в одному напрямі навколо Сонця зі швидкостями близько 20км/сек. і виконують один оберт від 3 до 9 років, у залежності від віддалі до нього. Орбіти багатьох з них помітно витягнуті. Більшість орбіт астероїдів розташована близько до



площини орбіти Землі, а їх нахили коливаються у межах декількох градусів і відомі ще більш нахилені орбіти.

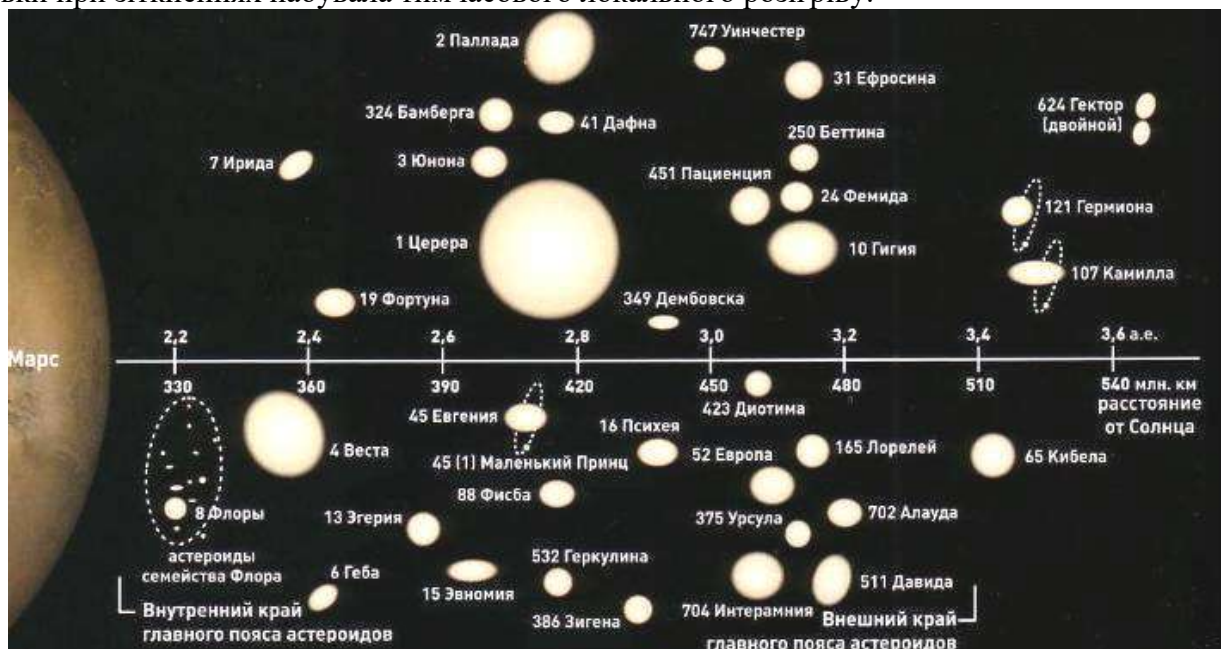
Рис.2.163. Астероїди *Греки* і *Троянці* в гравітаційних пастках лагранжевих точок Юпітера (ліворуч) та група астероїдів *Хільди* (праворуч)

Об'єм простору **кільця-тора**, у межах якого рухається 98% усіх астероїдів головного поясу, величезний - біля $1,6 \times 10^{26} \text{ км}^3$ (для порівняння – об'єм Землі всього 10^{12} км^3). Теоретично підраховано, що в поясі астероїдів знаходиться понад мільйон тіл, розміри яких у поперечнику перевищують 1км, а кількість більш мілких не піддається підрахунку.

Станом на 26 вересня 2008р. було зафіксовано 460 271 астероїд, у 219 018 з них точно визначені орбіти і їм надано офіційні власні номери. Решті ще належить "пройти" відповідну процедуру нумерації. Офіційні назви мають 15 361 астероїд. Загальна маса всіх астероїдів менше однієї тисячної маси Землі.

Найбільший астероїд діаметром 913км (на 1400км менше, ніж у планети-карлика Плутона) – **Церера** – віднесено до нової категорії карликових планет у Сонячній системі.

Астероїди – наскрізь холодні і безжиттєві тіла, що сформувалися на межі гарячої та холодної зони протопланетного диску. У далекому минулому їх надра могли бути теплими і навіть гарячими за рахунок радіоактивних та інших джерел енергії, але вони вже давно охолонули. Їх внутрішнє тепло ніколи не зігрівало поверхню, вона завжди була холодною і тільки при зіткненнях набувала тимчасового локального розігріву.



ис.2.164. „Сімейний портрет” найбільших астероїдів (діаметр більше 200км) із порядковими номерами перед ними та зі збереженням їх форми та розмірів у порівнянні з Марсом

Незважаючи на невелику ширину поясу астероїдів (біля 1а.о.), різниця умов у його межах була достатньою для формування несхожих один на одного за спектрами відбитого

сонячного світла **S-** та **C-астероїдів**. У складі ближньої до Сонця частини поясу астероїдів переважають кам'яністі тіла із залізо-нікелевими включеннями і відносно високими альбедами (так звані **S-астероїди**). По мірі віддалення від Сонця збільшується число тіл із збагаченими водою мінералами і з певною кількістю летких речовин (**C-астероїди**, від "carbonaceous" - вуглисті), які є надзвичайно темними. Взагалі, 75% астероїдів представлені дуже темними вуглистими астероїдами типу C; 15% - сіруваті кременисті астероїди типу S, а решта 10% включають **M-астероїди** (металеві) і ряд інших рідких типів.

Найтемніші астероїди відбивають 3-4% падаючого на них сонячного світла, а найяскравіші - до 40%. Єдиним постійним джерелом тепла для астероїдів залишається Сонце, але воно далеке і гріє дуже погано. У **C-астероїдів** на віддалі 2,76 а.о. від Сонця (середня віддаль планети-карлика *Церери*) максимальна температура поверхні досягає -100°C, на відстані 5,2 а.о. (середня віддаль *астероїдів-„троянців”*) -150°C. Світлі **S-астероїди** нагріваються ще гірше, із-за великого альбеда вони поглинають приблизно на 10% менше сонячної енергії. Із-за власного обертання астероїдів температура їх поверхні швидко змінюється - ранковий бік астероїда не встигає добре нагрітися і він завжди дещо холодніший ніж повинен бути, а вечірня сторона залишається дещо теплішою, не встигаючи добре охолонути. У результаті по поверхні астероїда біжить теплова хвиля. Вона швидко затухає з глибиною, не проникаючи у надра навіть на кілька дециметрів. Глибше температура речовини залишається практично постійною, такою, як і у надрах астероїда – на декілька десятків градусів нижче за середню температуру освітленої Сонцем поверхні.

S-астероїди утворилися у більш теплій зоні на менших, ніж **C-астероїди**, віддалях від Сонця. Зараз ці групи астероїдів повільно переміщуються, але їх початковий розподіл ще зберігається.

2.2.5.1. ЦЕРЕРА

Карликова планета ЦЕРЕРА - найбільший представник головного поясу астероїдів - має форму сфероїда розмірами 975×909 км і масою $9,5 \times 10^{20}$ кг. Орбіта Церери слабо еліптична (перигелій – 2,54 а.о., афелій – 2,98 а.о., ексцентриситет 0,08) та має незначний нахил (10°) до площини екліптики. Період обертання Церери навколо Сонця складає 4,6 років, навколо власної осі - 9,07 год., а нахил осі обертання до площини орбіти менше 4° . Деталі поверхні вказують на можливу наявність у минулому процесів близьких до вулканічних. На поверхні виділяються кілька світлих та темних структур, ймовірно, кратерів.



Рис.2.165. Карликова планета Церера (ліворуч, фото *Hayabusa*); вигляд Церери в телескопі *Hubble* (NASA) (у центрі) та схема сферичної будови її надр (праворуч): 1- кора із суміші криги з пилом, 2- мантія із водяної криги, 3- залізо-кам'яне ядро

Найяскравіша структура Церери називається **Piazzi**. Можливо, це кратер, який розкрив крижану мантію, чи кріовулкан. Середня температура поверхні -107°C, а у перигелії вона може досягати -33°C. Радіолокація Церери вказує на її досить гладку поверхню, мабуть, за рахунок еластичної крижаної мантії. На відміну від решти астероїдів, значна маса Церери зумовила диференціацію речовини надр та формування залізо-кам'яного ядра і крижаної мантії (рис.2.165), яка складає 20-30% її маси, що еквівалентно 60-100 км її потужності.

На початковому етапі існування ядро Церери могло розігріватися за рахунок радіоактивного розпаду і, можливо, певна частина крижаної мантиї знаходилася у рідкому стані. Ймовірно, що значна частина поверхні і зараз покрита *кригою* чи певним різновидом *крижаного реголіту*. За аналогією з крижаними супутниками Юпітера і Сатурна допускають, що під впливом ультрафіолетового випромінювання Сонця частина H_2O -криги дисипує та формує надзвичайно розріджену «атмосферу» Церери. Залишається відкритим питання про наявність на Церері процесів кріовулканізму. Вчені відкрили «кометні» викиди H_2O -пари (бкг/сек.) у космос через вузькі тріщини на поверхні Церери зі швидкістю сотень метрів за секунду.

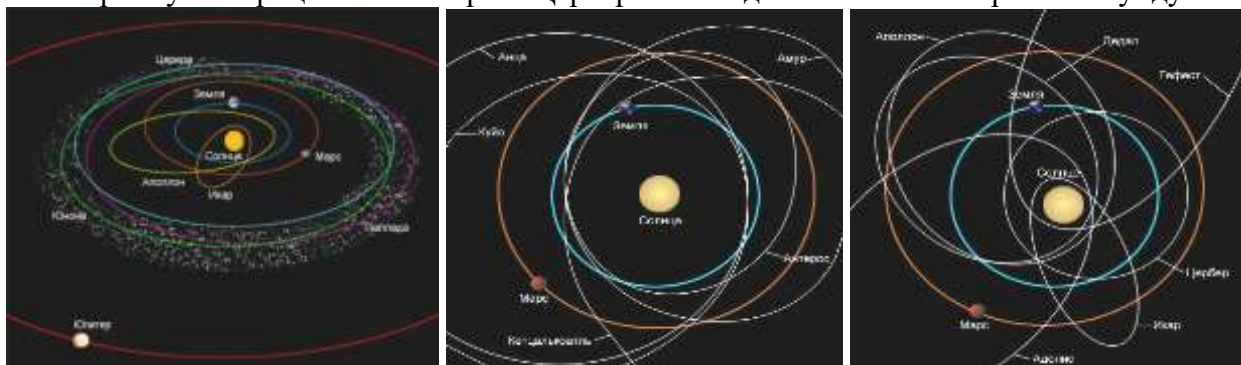


Рис.2.166. Ліворуч: Головний пояс астероїдів. У центрі: Земля, Марс і п'ять астероїдів групи Амура, які не заходять глибоко в межі орбіти Землі. Праворуч: Земля, Марс і п'ять астероїдів групи Аполлона (входять 66% астероїдів, що зближуються із Землею), які глибоко проникають у межі орбіти Землі.

Астероїди групи Атона обертаються в середині орбіти Землі і рідко виходять за її межі

Сила тяжіння Юпітера змінює орбіти астероїдів і вони можуть або попадати у внутрішні області Сонячної системи та навіть пересікати орбіту Землі, або набувають дуже витягнутих орбіт, які виходять за межі Сонячної системи. Треті попадають на орбіту Юпітера і рухаються групами на безпечній віддалі від планети-гіганта.

Решта астероїдів рухається дуже видовженими еліптичними орбітами, наближаючись удвічі ближче ніж Меркурій до Сонця і виходячи за межі орбіти Сатурна.

Малі планети (10 найбільших і 7 періодично наближуючихся до Землі)

№ п/п	Назва	Середня віддаленість від Сонця (в астрономічних одиницях)	Період обертання	Діаметр або розміри, км	Найменша віддаль від Землі, млн. км
1	Церера	2,78	4,60	975×909	
2	Паллада	2,77	4,61	608	
4	Веста	2,37	3,63	578×560×458	
10	Гігія	3,15	5,59	450	
31	Ефросина	3,16	5,62	370	
704	Інтерамнія	3,06	5,40	350	
511	Давида	3,19	5,69	323	
65	Кибела	3,42	6,35	309	
52	Європа	3,10	5,45	289	
451	Патієнтія	3,06	5,37	276	
-	Гермес	1,29	1,47	1	0,6
-	Адоніс	1,97	2,76	0,3	1,5
1620	Географос	1,24	1,39	3	2
-	Аполлон	1,49	1,81	1	3
1566	Ікар	1,08	1,12	1	6
1221	Амур	1,92	2,67	2	15
433	Ерос	1,47	1,76	17,5 x 6,5	23

Примітка: 1 астрономічна одиниця – віддаль від Землі до Сонця – $1,495998 \times 10^{11} \text{ м} \approx 149,6 \text{ млн. км.}$

У 1977р. був відкритий астероїд, який обертається навколо Сонця між орбітами Сатурна та Урана, а в 1993р. ще один подібний пояс астероїдів був відкритий за Нептуном – так званий *пояс Койпера*, а еліптична орбіта Плутона проходить у межах цього поясу.

Відкриття уже чотирьох астероїдів-троянців у Нептуна дозволяє зробити висновок: *у Сонячній системі існує 4 стійких групи астероїдів - головний пояс астероїдів між орбітами Марса та Юпітера, астероїди-троянці Юпітера, недавно відкриті астероїди-троянці Нептуна та астероїди поясу Койпера.*

Астероїди не випадково інакше називаються *малими планетами*. Тільки 16 із них у поперечнику більше 240км. Решта тільки за формою орбіт нагадують крупні планети і більшість з них мають неправильну уламкову форму. По суті метеоритами називають ті із астероїдів, які падають на поверхню Землі. Астероїди поражають різноманітням розмірів та форм. Багато астероїдів регулярно змінюють свою яскравість при обертанні, що свідчить про їх неправильну форму. Розміри близько 250 астероїдів перевищують 100км, а тіл з діаметром понад півтора кілометри може бути до півмільйона, але *значна більшість астероїдів являють собою каміння розміром з валун або крупну гальку*. За формою астероїди можуть бути майже ідеально круглі, схожі на гантелі тощо, але найчастіше вони мають різкі неправильні кутасти форми подріблених після зіткнень уламків.

Астероїд 25143 *Ітокава*, який у вересні-грудні 2005р. був досліджений японським зондом *Hayabusa* (Сокіл) із посадкою на його поверхню та відбором зразків ґрунту, не має кратерів і являє собою пухке скупчення піску та мілкого каміння (рис.2.167), що, за думкою вчених, є уламками раніше зруйнованого крупного небесного тіла, які були зібрані разом силами гравітації. Багато валунів на поверхні астероїда мають багатошарову структуру. За новими даними, складений астероїд, в основному, силікатами – *олівіном* та *піроксеном* та *металевим залізом*, але густина астероїда $1,95\text{г/см}^3$ і тому він на 40% об'єму повинен мати порожнечу.

Вважається, що диференціація і відокремлення легких порід від важких компонентів можливі тільки у надрах крупних планетоїдів чи планет, а зустрічатися поруч ці різні компоненти можуть тільки після їх руйнування та наступної акреції уламкового матеріалу. Астрономи вважають, що розмір первинного тіла не перевищував 200км, бо при таких розмірах важкі складові частинки концентруються у центрі без розігріву та плавлення.

За підрахунками, всі астероїди вмістилися б у кубі із стороною близько 500км. Тобто, об'єм речовини астероїдів досягає 10^8км^3 . При середній густині цієї речовини $3,5\text{г/см}^3$ загальна маса астероїдів мала б бути $3,5 \times 10^{20}\text{кг}$ – це у 200 разів менше за масу Місяця, а створена з них планета могла б мати діаметр до 1500км.

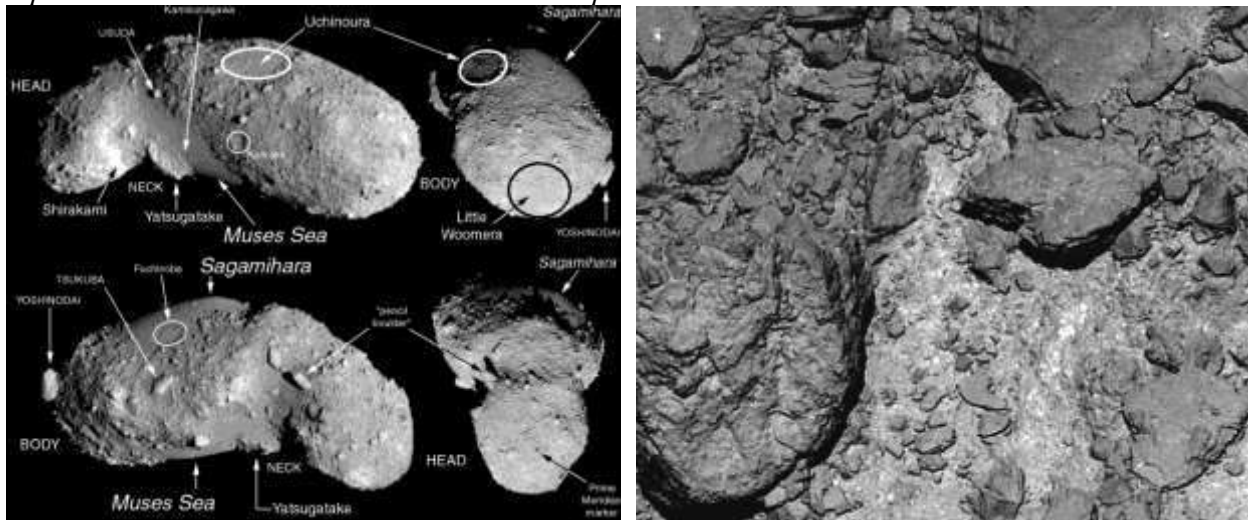


Рис.2.167. Карта астероїда (ліворуч) типу S сім'ї Аполлона 25143 *Ітокава* ($535 \times 294 \times 209\text{м}$, густина $1,9\text{г/см}^3$) за даними КА *Hayabusa* («Сокіл») (Японія), який здійснив посадку на астероїд. Фото поверхні астероїда 25143 *Ітокава* (праворуч). Зонд *Hayabusa* повернувся на Землю 13.06.2010р. із близько 1500 мікрочастинками зразків речовини астероїда 25143 *Ітокава*

З початку XIX століття існує гіпотеза, за якою астероїди – це уламки *планети Фаєтон*, зруйнованої внаслідок вибуху, швидкого осьового обертання чи зближення з Юпітером. Також є теорія, за якою в поясі астероїдів від початку сформувалося не одне, а декілька тіл, які згодом, унаслідок зіткнень, роздроблювалися. Однак, ймовірнішою є *сучасна точка зору*,

згідно якої гравітація Юпітера просто не дозволила мілким об'єктам об'єднатися у планету під час формування Сонячної системи і астероїди є „космічним сміттям”, яке залишилося після її формування 5 млрд. років тому.

Якщо на макеті Сонячної системи орбіти астероїдів показати дротяними кільцями, то утвориться ажурний тор з хаотично перепланих у просторі еліпсів. У цьому хаосі відсутні астероїди з великими півсями орбіт, що дорівнюють 3,3; 2,1а.о. та деякими іншими – на їх місці чітко видно пробіли (так звані *люки Кирквуда*). Виявилось, що в цих місцях періоди обертання астероїдів входять у резонанс з періодом обертання найбільшої та наймасивнішої планети – Юпітера і, за рахунок багатократного впливу його гравітаційних сил, орбіти астероїдів розкачуються і з часом вони покидають ці області простору. Гравітаційний вплив планет зумовлює безперервне перемішування орбіт астероїдів. Нахили та ексцентриситети орбіт зумовлюють їх не паралельний взаємний рух і приводять до зіткнень. Швидкість, з якою астероїди проносять один повз другого, в середньому складає біля 5 км/сек., а зіткнення з такими швидкостями приводять до руйнування цих космічних тіл. Таким чином, *астероїди (малі планети) – уламки більш крупних космічних тіл, деякі з них можливо порівняти за розмірами з карликовими планетами, або планетами земного типу, причому процес дроблення астероїдів при взаємних зіткненнях продовжується і зараз.*

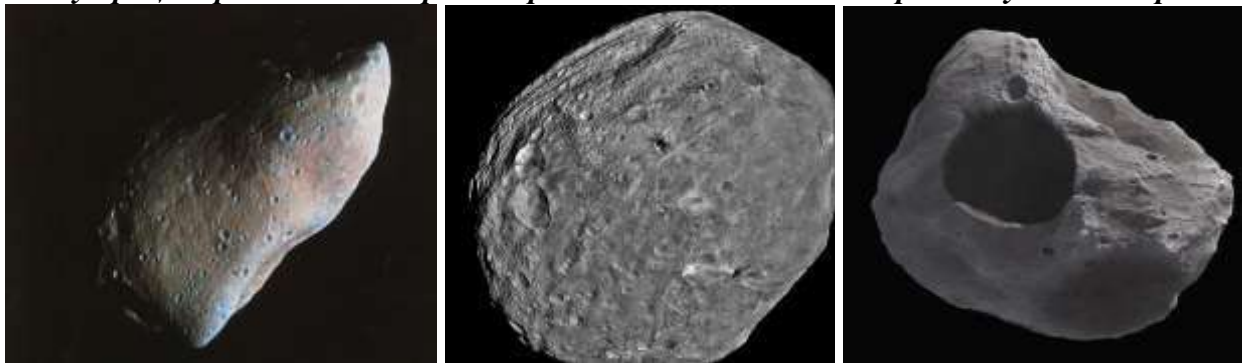


Рис.2.168. Ліворуч: астероїд 951 *Гаспра* довжиною 19км (фото *Galileo*). У центрі: астероїд 4 *Веста* – наймасивніший (із залізо-нікелевим ядром і кам'яною мантією) і другий за розмірами астероїд (578×560×458км) із більш кратеризованою північною частиною та гігантським ударним кратером (діаметр 460км, глибина 13км, висота центрального піка 18км) на південному полюсі, що розкрив, за спектрометрією, кілька шарів *кори* і, частково, *мантію*. *Веста* обперезана по екватору борознами і жолобами незрозумілого походження (фото *Dawn*). Праворуч: астероїд 2008 TS 26 (фото *Rosetta*).

Вчені недавно відкрили ледь помітну, але теоретично дуже важливу силу негравітаційного походження – так званий *ефект Ярковського*, що впливає на всі тіла Сонячної системи, зокрема на астероїди, і зумовлює їх крихітне власне прискорення. Прискорення викликане тим, що *сонячна енергія, яку поглинає астероїд своїм сонячним боком, нагріває його більше, ніж він випромінює теплової енергії цим же боком у сутінках.*

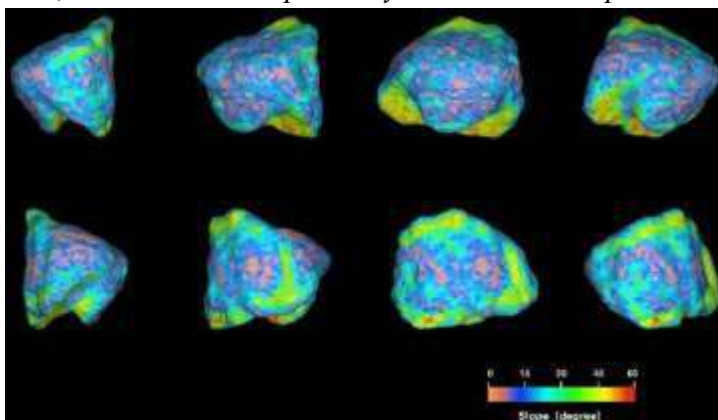


Рис.2.169. РЛ-зображення астероїда 6489, за даними трьох центрів далекого космічного зв'язку – Голдстоун (США), Євпаторія (Україна) і Касіма (Японія). Із перших складів назв цих центрів і було складене ім'я цього нового астероїда – *Голєвка*

Ця неврівноважена теплова енергія створює крихітне прискорення астероїдів, яке зумовлює невелику зміну їх орбіти, а за мільйони років приводить не тільки до переміщення астероїдів із зовнішньої боку поясу астероїдів на внутрішній, а і до того, що астероїди з орбіт між Марсом та Юпітером (пояс астероїдів) можуть направлятися у внутрішню частину Сонячної системи.



Рис.2.170. Зліва праворуч: дві півкулі астероїда 433 *Ерос* (на його поверхню у 2001р. зробив посадку КА *NEAR*) – великого суцільного кам'яного ядра (33×13км) із товстим (кілька десятків метрів) шаром реголіту; кратер *Психея* (5км) на поверхні астероїда *Ерос* з віддалі 50км; *реголіт* на дні цього кратера з висоти 250м; *структурні особливості* астероїда (фото зонда *NEAR*, *NASA*)

Наприклад, у астероїда 6489 *Голівка* (діаметр біля 0,5км, густина $2,7\text{г/см}^3$, вага 210 млрд. кг) за 12 років вимірювань орбітального шляху відмічена зміна орбіти на 15км.

Деякі астероїди мають **власні супутники**. Так навколо астероїда *Іда*, довжиною 56км і діаметром 21км, на віддалі 100км обертається супутник *Дактил* (1,2×1,4×1,6км). Аналіз їхнього інфрачервоного випромінювання свідчить про те, що *Іда* та її крихітний місяць належать до групи малих планет *Короніс*, котрі, на думку вчених, є фрагментами однієї велетенської брили, що розлетілася на друзки.

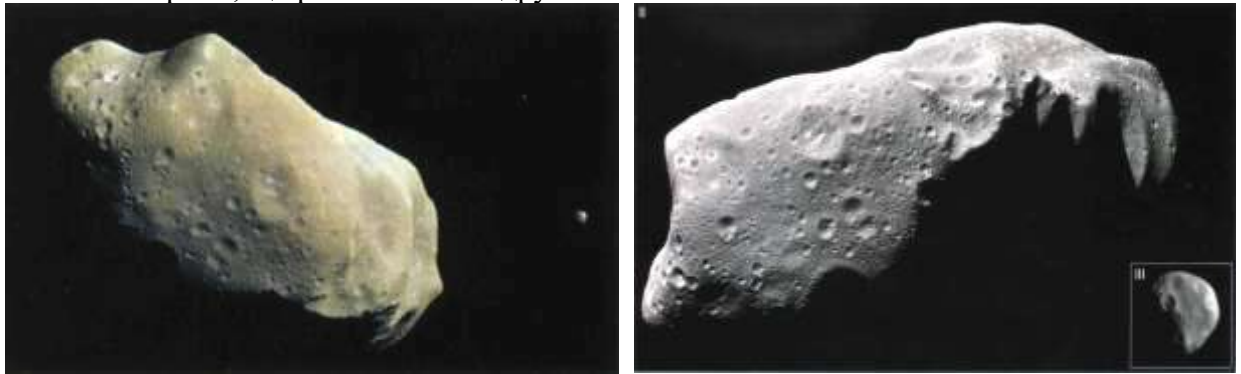
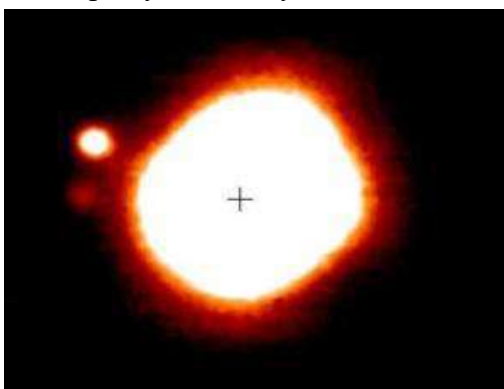


Рис.2.171. Ліворуч: астероїд 243 *Іда* з власним супутником *Дактил*; праворуч: зворотній бік *Іди* (II); астероїд-супутник *Дактил* крупним планом (III) (фото *Galileo*)

Наявність супутника, або *мультиплетність*, у астероїдів – це закономірне та поширене явище. Власні супутники існують у астероїдів *Діонісій*, *Сільвія*, 2000 *DP 107*, 2000 *UG 11*. Існують спостережені дані про існування супутників у астероїдів *Палада*, *Метида*, *Клеопатра*, *Гектор*, *Тутатіс*, *Касталія* тощо. Список бінарних (або подвійних) малих планет зараз нараховує 60 об'єктів у різних частинах Сонячної системи. Це явище підтверджується існуванням на поверхні планет та їх супутників великої кількості подвійних



та мультиплетних кратерів, походження яких пояснюється падінням на них астероїдів з одним або декількома супутниками.

Рис.2.172. Потрійна астероїдна система - астероїд 87 *Сільвія* із астероїдами-супутниками *Ромулом* і *Ремом* (телескоп *VLT*)

Недавно стало відомо, що астероїди можуть мати не тільки один, а і **два супутники**. Першим це явище відкрите в астероїда 87 *Сільвія* розмірами 380×260×230км, яка має два власні супутники *Рем* і *Ромул*, що обертаються навколо астероїда в одному напрямі за майже коловими орбітами.

Сама Сільвія робить один оберт за 5 годин 11 хвилин, а Рем має розмір 7км і обертається навколо Сільвії за 33 години на середній віддалі біля 710км. Радіус орбіти Ромула складає 1360км, період обертання – 87,6 години, його поперечник – приблизно 18км. Астероїд Сільвія має густину $1,2 \text{ г/см}^3$ і, мабуть, являє собою не єдине тверде тіло, а скупчення (з 60% вакуумних пустот), кам'яних та крижаних брил, що утримуються силами гравітації. Сільвія розташована у зовнішній частині кільця астероїдів між орбітами Марса та Юпітера, приблизно в 3,5а.о. (523 млн. км) від Сонця.

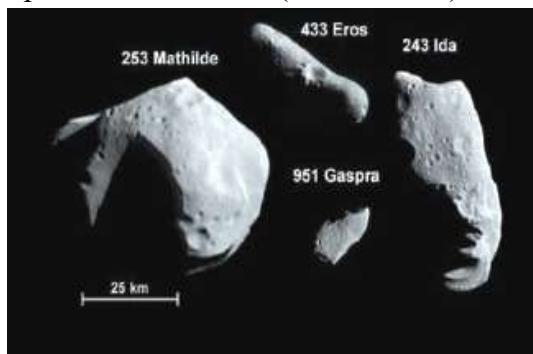


Рис.2.173. Астероїди 253 *Матильда*, 433 *Ерос*, 243 *Іда* і 951 *Гаспра* (фото *Galileo* і *NEAR*)

Про **внутрішню будову астероїдів** поки що мало відомо. Без сумніву їх надра не мають сферичної будови. Скоріше за все, вони схожі на метеорити і за складом і густиною. Одні з них мають густину біля 2г/см^3 і нагадують *кам'яні метеорити*, інші схожі із *залізо-нікелевими метеоритами* ($7\text{--}8\text{г/см}^3$) або із

вуглистими хондритами – різновидом кам'яних метеоритів, що збагачені органічною речовиною. У 1992р. на віддалі всього 2,5 млн. км від Землі пронісся *астероїд S-типу 4179 Тутатіс* (розміри $4,5 \times 2,4 \times 2 \text{ км}$, густина 2г/см^3 , маса $5 \times 10^{13} \text{ кг}$, обертання: хаотичне у різних напрямках, 1 оберт навколо довгої осі - 5дб 9год, склад: брили різних розмірів із численними пустотами між ними). Астероїд складають дві брили розмірами 2 і 3км – так

появився термін **контактно-подвійні астероїди**.

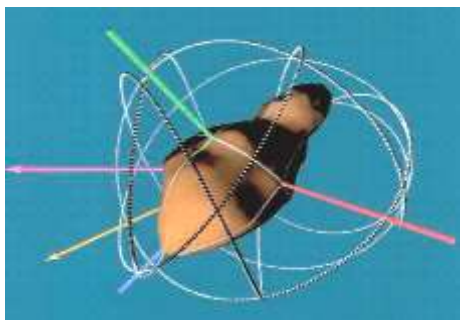


Рис.2.174. Контактно-подвійний S-астероїд 4179 *Тутатіс* (РЛ-зображення)

Головний пояс астероїдів – основний постачальник мілкого твердого пилу у Сонячній системі.

Дослідження АМС *Pioneer-10* (1972р.), що вперше вивчала ступінь небезпеки об'єктів поясу астероїдів для

космічних апаратів, показали, що густина у небезпечних ($0,01\text{--}0,1 \text{ мм}$) космічних частин на міжпланетній траєкторії значно менше очікуваної. Кількість частинок розміром 1 мкм зменшується по мірі віддалення від Сонця і біля зовнішньої межі поясу (3,5а.о.) падає практично до нуля. У межах поясу також не зросла концентрація частинок розміром біля 10 мкм , але кількість частинок розміром $0,1\text{--}1 \text{ мм}$ ($100\text{--}1000 \text{ мкм}$) збільшилася в майже в три рази у порівнянні з космічним простором між орбітою Землі та внутрішньою межею поясу астероїдів. Частинок більше 1 мм бортовий комплекс АМС *Pioneer-10* взагалі не зафіксував. *Якщо розміри пилинок не перевищують 10^{-5} см , то вони виносяться за межі Сонячної системи під дією тиску сонячного вітру, а якщо більше - то сонячні промені гальмують швидкості їх обертання навколо Сонця і з часом вони падають на Сонце.* Зараз до астероїдів відносять тіла з поперечником не менше 1 км . Дрібніші тіла названо **метеороїдами**.

Контрольні запитання

1. Які відомі місця та форми збереження запасів води на Марсі?
2. Охарактеризувати полярні шапки та області багатолітньої мерзлоти Марса.
3. Які особливості результатів та продуктів водної діяльності на Марсі?
4. Порівняти атмосфери (рис.2.309-1), рельєф поверхні, будову надр та геологічні процеси на планетах земної групи; їх спільні риси, особливості та специфіка.
5. Що таке *типи астероїдів* та які принципи їх виділення?
6. Охарактеризуйте значення ефекту Ярковського для об'єктів поясу астероїдів.
7. Порівняйте історії геологічного розвитку планет земної групи.

2.6. ЮПІТЕР

ЮПІТЕР – п'ята за віддаллю від Сонця *найбільша планета Сонячної системи*, яка належить до групи *газових планет-гігантів* (входять Сатурн, Уран і Нептун) і обертається навколо Сонця на середній віддалі 778,3 млн. км із орбітальною швидкістю 13,07 км/сек за 11,86 земних років (*юпітеріанський рік*). Маса Юпітера ($1,9 \times 10^{27}$ кг) удвічі більша від маси всіх інших разом узятих планет Сонячної системи, вона в 318 разів більша від маси Землі і в 1047,6 разів менша від сонячної. Середня густина планети $1,311 \text{ г/см}^3$ свідчить про те, що *Юпітер являє собою газovo-рідинну кулю з малим твердим ядром* із порід та металів.

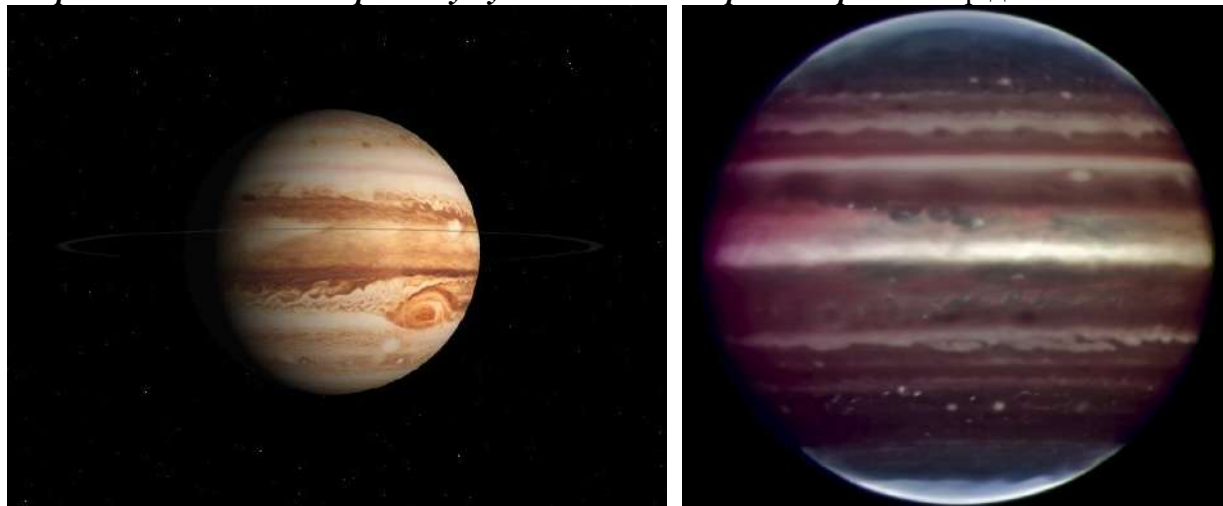


Рис.2.175. Найбільша планета Сонячної системи – *Юпітер* із системою кілець, циклонами та смугами хмар в атмосфері (фото *Cassini* ліворуч) та найчіткіше зображення газового гіганту із Землі (інфрачервоне фото *Південної Європейської обсерваторії, Чилі*)

Екваторіальний діаметр Юпітера 142 584 км, а полярний – 134 140 км, тобто *планета дуже сплюснена* за рахунок дуже швидкого (у 2,5 рази швидше ніж Земля) обертання навколо своєї осі. Юпітер обертається навколо власної осі не як тверде тіло – в районі екватора доба триває 9 год. 50 хв., а у високоширотних зонах – 9 год. 55 хв., що по швидкості власного обертання переважає любу іншу планету. Кожна точка екватора рухається зі швидкістю 45 000 км/год. *Вісь Юпітера майже не має нахилу* (всього 3°) до площини орбіти, *тривалість дня і ночі однакові, немає кліматичних зон*. Крім того, період обертання південної півкулі дещо менший від північної.

Юпітер випромінює у космос більше теплової енергії, ніж отримує від Сонця, що свідчить про інтенсивне нагрівання, яке зумовлене гравітаційним стисканням планети. Незважаючи на те, що Юпітер отримує від Сонця у 27 разів менше тепла ніж Земля (всього 51 Вт/м^2), у надрах його атмосфери відбуваються процеси, що нагрівають її до значних температур. Аналіз інфрачервоного випромінювання Юпітера засвідчив: якщо на поверхні хмарного покриву температура -160°C , то на деяких ділянках вона коливається від -70°C до 0°C , а одне вимірювання зафіксувало навіть $+33^\circ\text{C}$. Якщо це так, то з надр юпітеріанської атмосфери часом випромінюється удвічі більше тепла, ніж їй дістається від Сонця. Це і дає підстави вважати, що крім відбитого сонячного світла Юпітер випромінює у космос і своє власне.

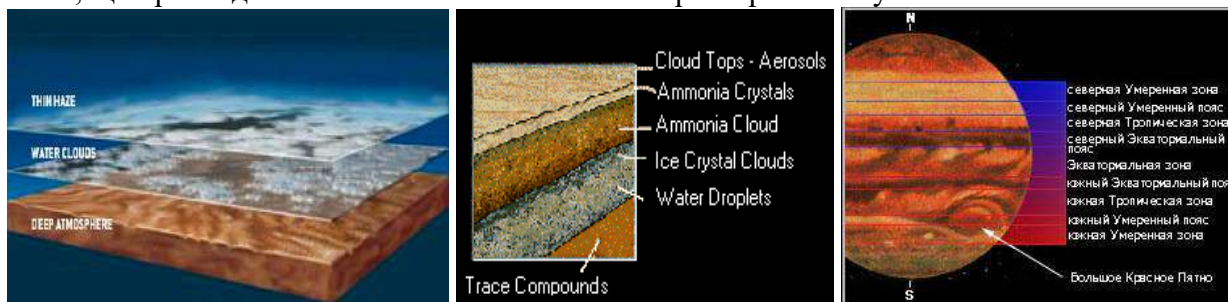


Рис.2.176. Модель будови хмарного покриву Юпітера та його пояси і зони (праворуч)

Юпітер має потужну (біля 6000км) газову воднево-гелієву **атмосферу** (водню H_2 – 81%, гелію He – 18%) з невеликими домішками (1%) *аміаку* NH_3 , *метану* CH_4 , *етану*, *пропану*, *ацетилену*, *чадного газу*, *синильної кислоти*, *гідриду германію*, *фосфіну* і *парів води*, яка ззовні має **суцільний хмарний покрив**, верхній шар якого на фотографіях може показатися поверхнею планети. Прискорення вільного падіння на рівні поверхні хмар Юпітера перевищує земне у 2,53 разів. **Атмосфера охоплена конвекційним рухом.**

Верхня частина (потужністю до 8км) суцільного багатшарового різнокольорового **хмарного покриву** (рис.2.176) складається із *кристаликів аміаку*, під яким в атмосфері (до 40км потужністю) плавають *крижані частинки* (кристали) *гідросульфиду амонію*. Нижня частина хмарного покриву (до 40км) складена із *крижаних кристалів*, які покриті *краплинами води*. У **білих хмарах** знаходяться кристали *замерзлого аміаку* та *водяної криги*. **Кольорові хмари** (блакитні, коричневі, жовті і червоні), можливо, завдячують своїми кольорами *хімічним з'єднанням-барвникам* або *хімічним реакціям* за участю *сірки*.

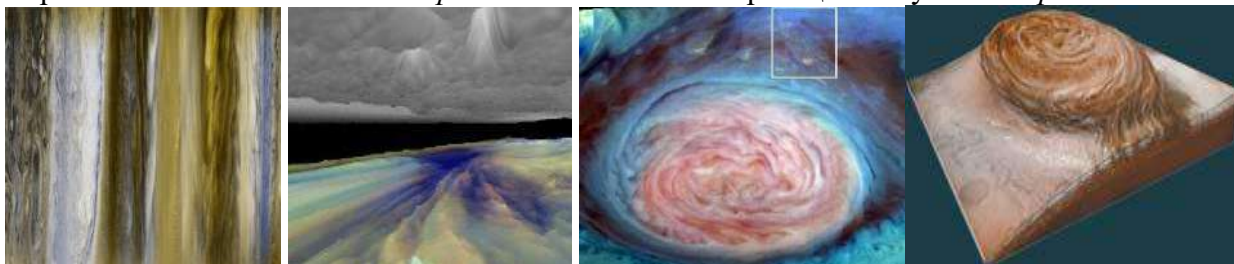


Рис.2.177. Зліва праворуч: різноманіття форм хмар на *Юпітері* (фото *New Horizons*); тривимірне зображення моделі панорами хмарних шарів Юпітера; грозові хмари циклону на Юпітері (верхній шар – туман потужністю в десятки кілометрів; нижній шар – світло-блакитні хмари – високі і тонкі, білі – високі і товсті, червоні – низькі) та об'ємна модель цього циклону (за даними *Galileo*)

Різнокольорова оболонка хмар, завдяки дуже швидкому обертанню планети, утворює *темні і світлі смуги* на фоні *оранжевого диску планети*, у межах яких дмуть *вітри* зі швидкістю сотні кілометрів на годину: **темні пояси** безперервно простягаються вздовж екватора на десятки тисяч кілометрів і є *областями низького тиску*, куди „стікають” присутні в атмосфері гази, а **світлі зони** найчастіше утворюють *пунктирні лінії ізольованих конгломератів* і є *місцями виносу висхідними потоками газів з глибин атмосфери планети на її поверхню*. У місцях стикання атмосферних потоків закручуються **гігантські вихори**. Структура цих смуг дуже часто змінюється. *Північна і Південна екваторіальні смуги* зникають та появляються з періодом біля 4 років.

В атмосфері планети виділяються різнокольорові **овальні області** – коричнева, оранжева, червона, блакитна, біла – які являють собою, скоріше за все, *атмосферні бурі та вихори*, бо зникають вони досить швидко. Серед атмосферних утворень Юпітера існують досить стабільні утворення, які спостерігаються із Землі сотні років.



Рис.2.178. Ліворуч: бурхлива атмосфера *Юпітера* з битвами циклонів (фото *Galileo*); у центрі: *Велика Червона Пляма* (фото *Voyager-1*) та її зміни у часі (мозаїка фото *Hubble* праворуч)

Велика Червона Пляма в південній півкулі планети на широті біля 22° , що існує понад 300 років; за сто років спостережень вона удвічі зменшила (до $13\,000 \times 40\,000$ км) свої розміри

і є *гігантським вихором* в атмосфері планети, який робить один оберт проти годинникової стрілки (антициклон) приблизно за 6 земних діб із швидкістю 300км/год. Тут найбільш яскраво проявляється неспокійний характер Юпітера – відбуваються *зіткнення хмар*, спалахують *блискавки*, гримлять *грози*. Прямі спостереження зафіксували над нічною півкулею Юпітера численні гігантські блискавки постійних гроз в атмосфері планети. Видимі розміри, яскравість та колір цього темно-червоного овалу незначно змінюється у часі, а його місце розташування на планеті піддане незначним коливанням. За підрахунками, час існування таких вихорів у атмосфері Юпітера може вимірюватися тисячоліттями.

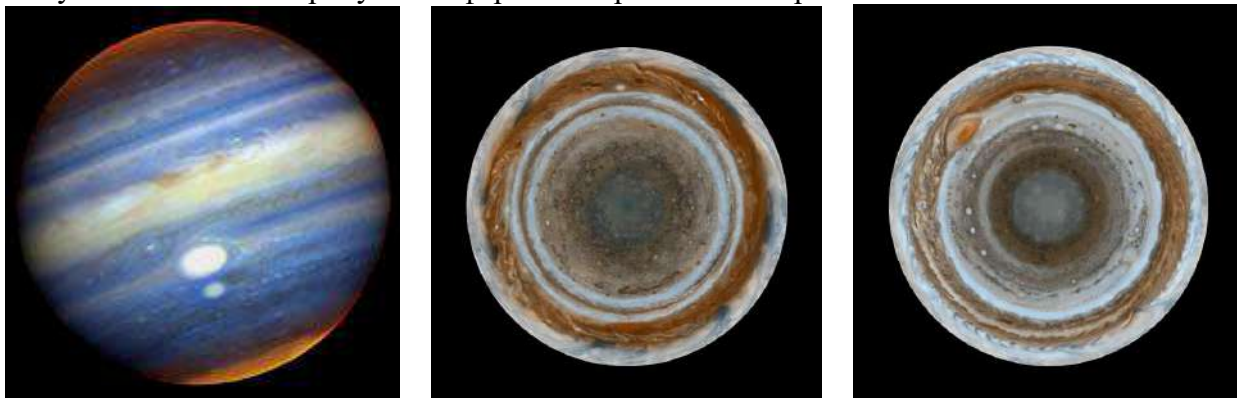


Рис.2.179. Ліворуч: зближення гігантських штормів *Великої Червоної Плями* та *Червоної Плями-молодшої* (Юпітер на фото телескопа *Gemini* на Гавайях в інфрачервоному світлі). Північний (у центрі) та Південний (праворуч) полюси Юпітера (фото *Galileo*)

У 2000р. у південній півкулі Юпітера, у результаті зіткнення трьох менших блідо-жовтих штормів, почала рости **нова біла пляма**, яка у грудні 2005р. раптово стала коричневою, а на початку 2006р. вона досягла розмірів половини *Великої Червоної плями* (тобто, з нашу планету) і на початку березня набула червоного кольору. Гіпотеза про те, що зафарбування у цегляно-червоний колір цієї **Червоної Плями-молодшої** (рис.2.184) зумовлене хімічними з'єднаннями, які були підняті з глибин атмосфери на її поверхню після збільшення потужності шторму понад певну критичну величину, підтверджується. Під дією сонячного випромінювання ці з'єднання вступають у реакції, що приводять до появи кольорових продуктів, схожих на ті, які надають оранжевий колір хмарам на Титані (найбільшому супутнику Сатурна) (рис.2.178, 2.179). У третьому тисячолітті в атмосфері планети-гіганта стали відбуватися незвичні речі – активність процесів неясної природи в атмосфері Юпітера зростає, у 2008р. на Юпітері виникла третя червона пляма – **2008 Oval 2** (рис.2.184), а самі плями є джерелами випромінювання енергії в космос.

Серед інших стабільних плям виділяється **Біла Пляма** (16 000км у поперечнику). Раніше деякі невеликі білі овали в атмосфері Юпітера демонстрували дуже незначні і короточасні почервоніння.

У результаті зіткнень 25 фрагментів (діаметр найбільшого до 3км) *комети Шумейкерів-Леві 9* з Юпітером (16-22.07.1994р.) зі швидкістю 70км/сек. в його атмосфері спостерігалися гігантські вихори до 5000км діаметром із грибоподібними викидами газів (температура «атомних грибів» у перші моменти падіння перевищувала +15 000⁰С) на висоту до 1000км, які осідали і зникали через 10 хвилин після зіткнення. Але наслідки вибухів („рани” глибиною 150-200км) спостерігалися ще на протязі декількох тижнів. Від падіння кожного із фрагментів комети розбігалися хвилі зі швидкістю 450м/сек. Судячи з усього, це „важкі” хвилі, пружність у яких створюється силою плавучості (рис.2.180). Результати зіткнень допомагають виявити склад газового гіганта. Після падіння фрагментів комети було зареєстровано потужне випромінювання в атмосфері Юпітера ліній *металів*. У місці падіння кожного з крупних уламків комети вчені зареєстрували 100млн.т. *оксиду вуглецю* (CO), 3млн.т. *сульфіду вуглецю* (CS₂) і 300тис.т. *моноссульфіду вуглецю* (CS), що у багато тисяч разів перевищує їх стандартний вміст. Падіння фрагментів зумовило ряд високотемпературних реакцій з утворенням *ціаніду водню*. Були відкриті (*Galileo*, 2000-01pp.) дві нові речовини в

атмосфері – *діацетилен* та радикал *метилу*. Також комета доставила в атмосферу Юпітера величезну кількість *води* та *чадного газу* (CO), який під дією ультрафіолету перетворився у *вуглекислий газ*. Останні поширюються в атмосфері і вже зафіксовані на великих віддальх.



Рис.2.180. Ліворуч: фрагменти *комети Шумейкерів-Леві 9*, яку розірвала гравітація *Юпітера*, а їх падіння на Юпітер в 1994 році (праворуч) викликало багатокілометрові цунамі в атмосфері планети (фото та інфрачервона зйомка *Hubble*)

Характер поширення хвиль вказує, що відношення кисню до водню в атмосфері Юпітера може бути в 10 разів більше, ніж на Сонці. Але якщо Юпітер сформувався у результаті гравітаційної нестійкості первинного газопопилового диска, то його склад повинен був би відповідати складу диска, тобто відповідати хімічному складу Сонця – відповіді на це протиріччя зараз немає.

Воднево-гелієва **газова атмосфера** Юпітера, ущільнюючись, простягається від поверхні хмарного покриву до глибини біля 100км і без чіткої межі переходить у **газово-рідинний стан**, під яким без чіткого переходу розташований потужний шар *рідкого молекулярного водню з гелієм* – своєрідний бездонний **глобальний водневий океан**, який покриває всю поверхню Юпітера (рис.2.181). При великих тисках на поверхні водневого океану утворюється газопопинна суміш, яка зумовлює безперервне „кипіння” всієї поверхні глобального океану. На глибині біля 10 000км при температурі близько +11 000°C та тиску біля 3млн. атмосфер *рідкий водень* втрачає електрони і поступово переходить у *рідку металічну фазу* – він перетворюється в електропровідний (генерує планетарне магнітне поле) *одновалентний рідкий метал* з лужними характеристиками (схожий на земну ртуть), у якому протони і електрони існують окремо. Різкої межі переходу від рідкого водню до металічного, мабуть, не існує, спостерігається тільки збільшення густини від 1260 до 1400кг/м³ та концентрації металічного водню у бік ядра.

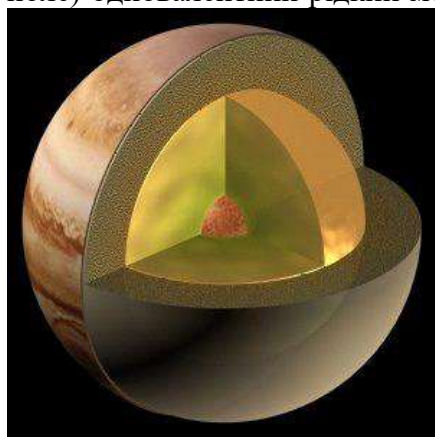


Рис.2.181. Схема внутрішньої будови *Юпітера*

Нижче, на глибині біля 67 000км (0,94 радіуса Юпітера), де температура досягає +30 000°C, а тиск 100млн. атмосфер, розпочинається невелике ($\approx 8 \times 10^{22}$ кг, тобто, 14-18 мас Землі або 1/20 повної маси планети)) **ядро** Юпітера. Тут речовина перебуває у надщільній фазі, хоча, існує невелике кам'яне **тверде внутрішнє ядро** діаметром 30 000км, яке обертається за 9год. 55хв. 29,71сек і має, мабуть, центральну область підвищеного вмісту *Fe+Ni*. Зовні ядро покрите сумішшю високотемпературних модифікацій метанової, водяної та аміачної криги масою до 4 мас Землі. Тепло у надрах зумовлене повільним гравітаційним стисканням газопопинної планети, а не за рахунок ядерного синтезу. Це внутрішнє тепло, можливо, викликає конвекцію в глибоких рідких шарах Юпітера, результатом якої є складні рухи в атмосфері. Допускається, що відносно неглибоко під хмарним покривом існує певна таємнича тверда оболонка, властивості якої ще не зовсім зрозумілі – але про її наявність свідчать, зокрема, зміни магнітного поля планети, які жорстко пов'язані з її обертанням навколо власної осі. Швидке обертання Юпітера навколо власної осі сприяє виникненню в металізованому водні планети **електричних струмів**, які генерують планетарне **магнітне поле** (рис.2.182).

Юпітер оточений надзвичайно потужним (в 4000 разів перевищує магнітне поле Землі і біля поверхні Юпітера дорівнює 4Гс) та протилежним за напрямом (орієнтацією диполя) складної структури магнітним полем та потужними **радіаційними поясами** (рис.2.183).

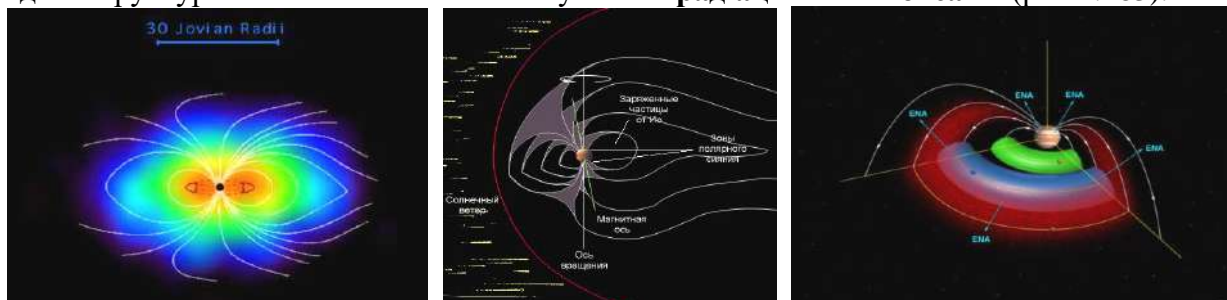


Рис.2.182. Схема магнітосфери *Юпітера* (за даними *Galileo*)

Магнітне поле і радіаційні пояси мають чітко виражені зовнішню та внутрішню області. З денного боку *зовнішня границя* магнітного поля може віддалятися на 16млн. км і “притискатися” до планети на відстань до 4млн. км під впливом сонячного вітру, а з нічного боку “хвіст” магнітосфери простягається на віддаль 690млн. км від Юпітера (між орбітами Сатурна і Урана). *Внутрішня область* магнітного поля нахилена під кутом 15° до осі обертання планети і зміщена відносно центра планети на північ. Це можливо пояснити наявністю в надрах Юпітера не одного, а декількох „генераторів” поля. Магнітосфера Юпітера складається із трьох зон. Дипольне магнітне поле переважає і простягається приблизно на віддаль до 1,2млн. км. Ця частина магнітосфери обертається разом з планетою з періодом 10 годин і подібна до збільшених земних радіаційних поясів.

Радіаційні пояси мають складну структуру, а складові частини утворюють немов би ізольовані сфери навколо планети. Магнітосфера і радіаційні пояси Юпітера - це гігантський природний *прискорювач заряджених частинок*, а також *джерело потужного дециметрового радіовипромінювання*.

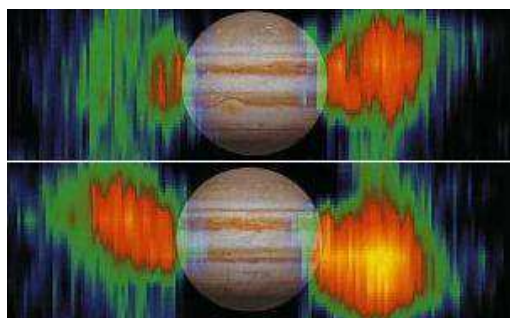


Рис.2.183. Радіаційні пояси *Юпітера*

На процеси у внутрішній частині пояса активно впливає супутник планети *Іо* і, частково, *Європа*. Орбіта *Іо* знаходиться у межах радіаційного поясу планети. Магнітні силові лінії Юпітера безпосередньо проходять через *Іо*. Коли *Іо* рухається своєю орбітою і пересікає магнітне поле Юпітера, іоносфера супутника „сортує” накоплені там заряди: позитивні накопичуються на одному боці *Іо*, а негативні – на протилежному. Так між ними утворюється електричний потенціал до 400 кіловольт. Коли *Іо* займає відповідне положення на своїй орбіті, то виникає потужний розряд і струм у мільйони ампер спрямовується магнітними силовими лініями від супутника до планети. Іоносфера Юпітера відбиває цей потік до *Іо*, а звідти він знову мчить назад, замкнувши електричний контур.

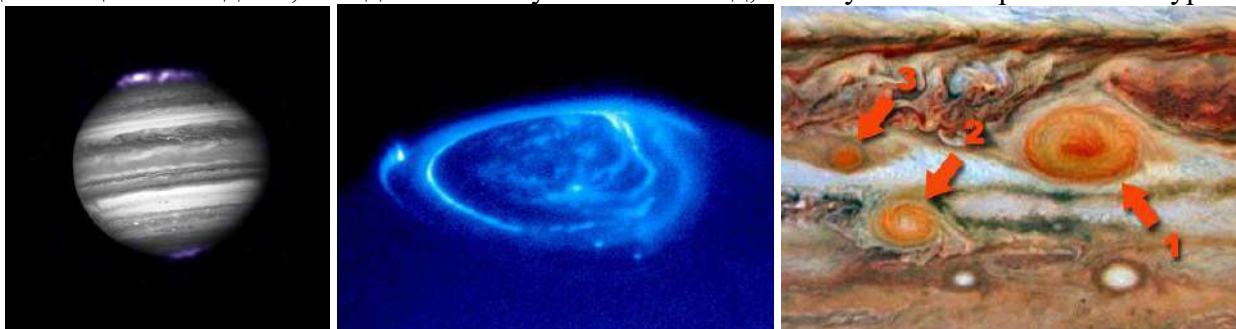


Рис.2.184. Потік заряджених частинок *Іо* викликає полярні сйва – *аврори* - на планеті-гіганті; праворуч: *Велика Червона Пляма* (№1); *Червона Пляма-молодша* (№2) – шторм-вихор розміром до 70% діаметра Землі; *третья червона пляма 2008 Oval 2* (№3) (фото *New Horizons* та *Hubble*)

Виникає буря енергетичних електронів і спалах у дециметровому діапазоні радіохвиль. Потужність цієї енергосистеми в 20 разів перевищує сумарну потужність усіх земних електростанцій і є причиною потужного дециметрового радіовипромінювання Юпітера.

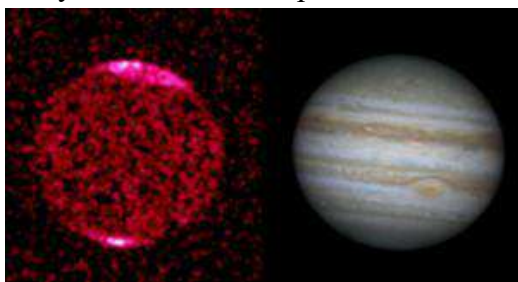


Рис.2.185. Рентгенівське зображення Юпітера з пульсуючими рентгенівськими випромінюваннями у районі полюсів (дані телескопу *Chandra*)

Загалом інтенсивність радіаційних поясів Юпітера в 40 000 разів більша за земні. Тут генерується потужне радіовипромінювання, яке приводить до надзвичайних за масштабами та інтенсивністю **полярних сьайв** на Юпітері (рис. 2.184). Вони явно виникають там, де коло іонізованої сірки *Io* проектується на атмосферу Юпітера вздовж його магнітних ліній. У верхніх шарах атмосфери полярних районів орбітальний рентгенівський телескоп *Chandra* відкрив таємниче **пульсуюче** (інтервал 45хв.) **джерело рентгенівського випромінювання** (рис.2.185).

На відміну від складних кілець Сатурна, Юпітер має просту систему з **3-ох вузьких кілець** у площині екватора (рис.2.186, 2.220-2) та **нововідкритого кільця** (рис.2.187). Потрійне кільце Юпітера радіусом 129 000км і потужністю до 30км дуже розріджене, складається з **темного пилу та мілких кам'яних уламків** і, на відміну від Сатурна, **не має криги**:

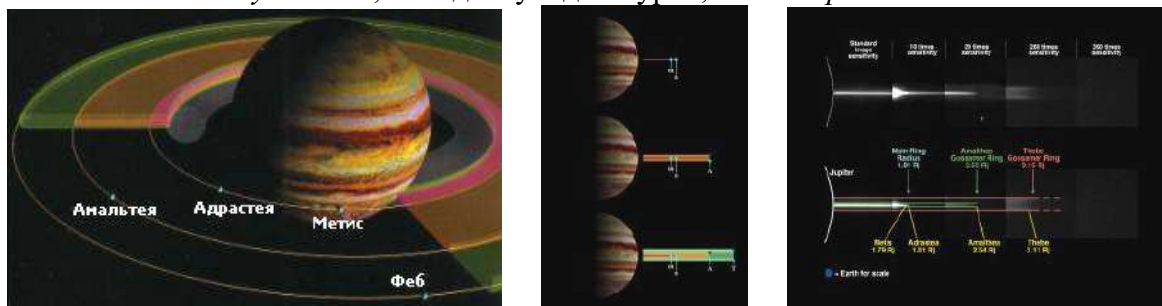


Рис.2.186. Структура темних (альbedo 0,05) кілець Юпітера: *гало* – найближче до планети сіре кільце, *основне кільце* – червоне, *зовнішнє кільце* („павутинка”): *внутрішнє* – жовте, *зовнішнє* – зелене (за даними та із використанням фото *Voyager-1*)

внутрішній ореол (гало) – розташоване на віддалі від 30 000 до 50 000км над поверхнею (хмарним покривом) планети при товщині кільця до 20км;

сплюснене і найбільш яскраве **основне кільце** – товщиною до 30км, поширене від границі гало до орбіти *Адрастеї* (від 50 000 до 58 000км), у районі *Метиди* яскравість головного кільця зменшується;

тонке **зовнішнє кільце („павутинка”)** – складається з двох вкладених одне в одне слабких кілець: *внутрішнього* – від орбіти *Адрастеї* до орбіти *Амальтеї* (58 000-110 000км) і *зовнішнього* – від орбіти *Амальтеї* до орбіти *Феба* (110 000-150 000км).

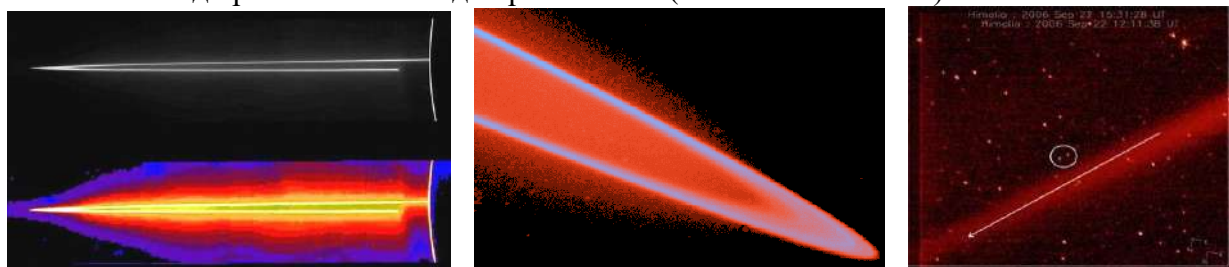


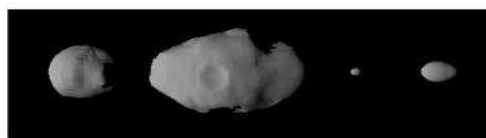
Рис.2.187. Ліворуч: мозаїка чотирьох зображень Юпітера; вище і нижче основного кільця видно *легкий серпанок* із частинок кільця, а вертикальне *гало* – незвичне явище для планетарних кілець – може бути зумовлене впливом електромагнітних сил, які виштовхують мілкі частинки з кільця; у центрі: фото кільця у різних діапазонах (фото *Galileo*); праворуч: *нове, ймовірно розірване, кільце* Юпітера від зіткнення його супутників - *Гімалії* (170км) та *S/2000 J 11* (4км), який після цього зник (фото *New Horizons*, вересень, 2006р.)

Кільця дуже тонкі і часто складені мікроскопічними за розмірами частинками пилу, що утворилися в результаті ударів метеоритів, астероїдів тощо об поверхню чотирьох маленьких внутрішніх супутників Юпітера - *Метиди*, *Адрастеї*, *Амальтеї* і *Теби*. Ці супутники від таких постійних ударів оточені пилюватими хмарами, які і залишають за собою на орбітах навколо Юпітера тонкий та непомітний із Землі слід, а *Метида* і *Адрастея* „тягнуть” за собою частинки їх кілець.

Юпітер – найбільша планета Сонячної системи і його потужне гравітаційне поле утримує на орбітах навколо планети **відомих зараз** (на 01.10.2019р.) **79 супутників** та понад **1800 астероїдів-троянців** (рис.2.190). Усі супутники Юпітера умовно розподіляються на **чотири групи**.



Рис.2.188. Порівняння розмірів внутрішніх супутників Юпітера – *Теби*, *Амальтеї*, *Адрастеї* і *Метиди* (фото *Galileo*)



Коловими орбітами в екваторіальній площині планети, у межах системи слабких кілець, рухаються **4 внутрішні невеликі супутники-уламки неправильної форми** (*Метида*, *Адрастея*, *Амальтея*, *Теба*), які є залишками раніше існуючих великих космічних тіл і утворені при їх зіткненнях. Найбільші **4 галілеєвих супутники** – *Іо*, *Європа*, *Ганімед*, *Калісто* - відкриті Галілео Галілеєм (1610р.) утворилися, мабуть, одночасно із формуванням самого Юпітера (рис.2.189). Вони також обертаються коловими орбітами навколо планети у площині її екватора проти годинникової стрілки (у напрямі обертання Юпітера навколо Сонця), а періоди обертання *Іо*, *Європи* і *Ганімеда* навколо власних осей та навколо планети співпадають як 1:2:4 (синхронне обертання) і тому *галілеєві супутники завжди, подібно Місяцю, повернуті до Юпітера одним боком*.

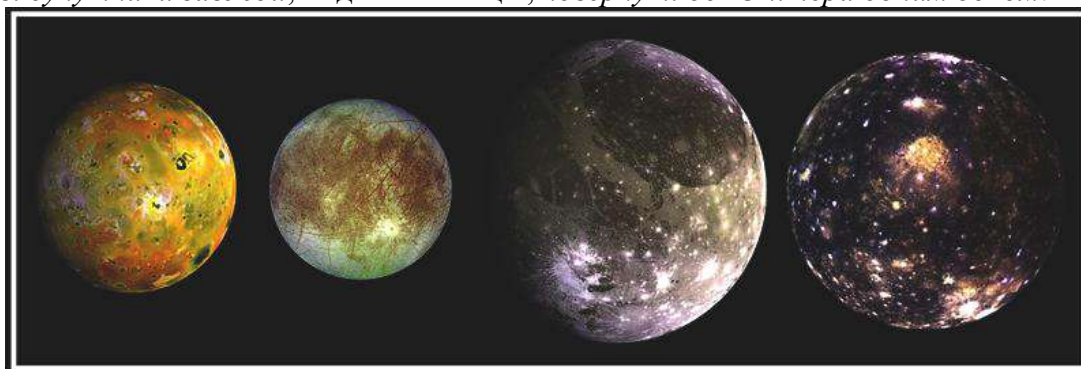


Рис.2.189. Галілеєві супутники (зліва праворуч) – *Іо*, *Європа*, *Ганімед* і *Калісто* (фото *Galileo*)

Найближчі супутники – *Іо* (густина $3,48 \text{ г/см}^3$) і *Європа* ($3,07 \text{ г/см}^3$) – мають розміри приблизно з Місяць і, скоріше за все, близькі до нього за складом – вони є внутрішніми збагаченими силікатами супутниками. Зовнішні супутники - *Ганімед* і *Калісто* з густинами $1,94 \text{ г/см}^3$ і $1,65 \text{ г/см}^3$ відповідно - розмірами більші за Меркурій, але значно менші його за масою і тому вважають, що вони складаються головним чином із води та криги.

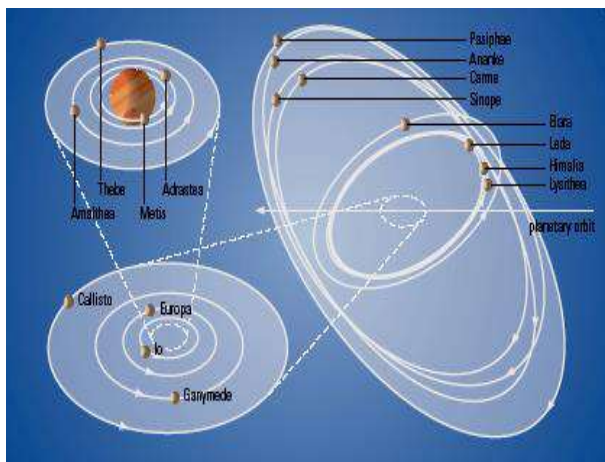


Рис.2.190. Система супутників *Юпітера*

Крім того, існують **8 нерегулярних супутників** (2 групи по 4 малих супутники у кожній, не рахуючи недавно відкритих), які роблять оберти навколо планети-гіганта на великих відстанях і, мабуть, були захоплені гравітацією планети або утворені в результаті декількох

зіткнень поблизу зовнішньої межі сфери впливу Юпітера; *третья група* (Леда, Гімалія, Лісітея і Елара) – маленькі супутники, колові орбіти яких нахилені до екваторіальної площини Юпітера під кутом 25-29⁰ на віддалі 11-12млн. км від нього; *четверта група* - зовнішні супутники (Ананке, Карме, Пасіфе, Сінопе) – невеликі супутники, які обертаються у протилежному (ретроградному), ніж Юпітер, напрямі, істотно нахиленими до екваторіальної площини еліптичними орбітами на віддалі 21-24млн. км. (рис.2.190).

На протязі наступних століть були відкриті і отримали власні назви ще **12 супутників**. *Решта супутників* були відкриті в 1999-2005рр. і отримали буквено-цифрові позначки, але офіційно вони не підтверджені і не названі. 9 невеликих супутників (до 4км) знаходяться на відстані 21-24млн. км від Юпітера і обертаються еліптичними орбітами з нахилом від 15 до 30⁰ у зворотному напрямі, а один супутник обертається на відстані 13млн. км у прямому напрямі навколо планети. **Площина орбіти Юпітера всього на 3° не співпадає з площинами орбіт його супутників, що зумовлює їх взаємні затемнення та покриття.**

Супутники Юпітера

№ п/п	Назва супутника	Радіус або розміри (км)	Віддаль (мінімальна і максимальна), км	Період обертання
1	Метида	23	колова орбіта 127 960	7год 06хв
2	Адрастея	12,5x10x7,5	колова орбіта 128 980	7год 09хв
3	Амальтея	135x84x75	колова орбіта 181 300	11год 57хв
4	Теба	55x45	217 460 – 226 340	16год 12хв
5	Іо	1821	404 740 - 438 460	42год 28хв
6	Європа	1565	664 610 - 677 610	3доби12,5год
7	Ганімед	2634	колова орбіта 1 070 000	7діб 4год
8	Калісто	2403	1 864 170 – 1 901 830	16діб 11,5год
9	S/1975 J1	4	5 948 000 - 8 922 000	130 діб
10	Леда	5	9 429 900 - 12 758 100	239 діб
11	Гімалія	85	9 643 200 - 13 316 800	251 доба
12	Лісітея	12	10 480 800 – 13 009 200	259 діб
13	Елара	40	9 272 230 - 14 201 770	260 діб
14	S/2000 J11	2	9 870 120 – 15 437 870	290 діб
15	S/2000 J10	2	17 115 000 – 26 635 000	591 доба
16	S/2000 J3	2,5	15 135 090 - 26 330 910	605 діб
17	S/2000 J5	2,5	16 815 200 - 25 222 800	618 діб
18	S/2000 J7	3,5	17 987 700 - 24 336 300	626 діб
19	Ананке	15	17 596 000 – 24 894 000	631 доба
20	S/2000 J9	2,5	16 300 500 - 21 167 500	652 доби
21	S/2000 J4	1,5	14 266 200 - 29 629 800	661 доба
22	Карме	20	17 854 000 - 27 346 000	692 доби
23	S/2000 J6	2	16 420 320 - 29 191 680	704 доби
24	Пасіфе	25	14 570 000 - 32 430 000	735 діб
25	S/2000 J8	2,5	11 054 870 - 35 987 130	733 доби
26	Сінопе	18	17 064 000 - 30 336 000	758 діб
27	S/2000 J2	2,5	16 431 520 - 31 896 480	766 діб
28	S/1999 J1	2,5	21 137 520 - 27 454 480	774 доби

Міжпланетна станція *Galileo*(2002) пролетіла у безпосередній близькості від *Амальтеї* і на підставі проведених нею визначень густини, щільності, об'єму, форми, сил внутрішньої гравітації супутника і його розташування (181 400км від Юпітера, що значно ближче ніж Місяць від Землі), та разом з комп'ютерними моделями формування системи внутрішніх супутників Юпітера, астрономи зробили висновки: *середня густина червонуватого кольору Амальтеї не перевищує густини льоду; супутник являє собою крихку, дуже пронизану порожнечами і покриту кратерами велику (131×73×67км) брилу (рис.2.188), що великою віссю постійно „вказує” на планету і складена уламками та щебіркою порід, які з'єднані кригою із*

замерзлих газів та води. Найбільша западина супутника Сковорода має діаметр 90км. Червоний колір Амальтеї пояснюється наявністю привнесених з Іо з'єднань сірки.

Аномально низька густина Амальтеї не відповідає загальноприйнятій теорії утворення супутників - чим ближче до планети супутники, тим більша густина їх речовини. Ранній Юпітер мав досить високе теплове випромінювання, яке не дозволяло речовині малої густини ущільнюватися у близьких небесних тілах. Чотири найбільших супутники Юпітера відповідають цій моделі, зокрема найближчий Іо має найбільшу густину порід і згідно теорії Амальтея повинна була бути силікатним тілом великої густини. Вчені допускають, що Амальтея, ймовірно, сформувалася набагато пізніше за основні супутники і у більш холодному навколишньому середовищі. Місце її формування було істотно далі від Юпітера, воно знаходилося за орбітою Європи чи взагалі далеко від планети-гіганта. Пізніше Амальтея була захоплена Юпітером і (або) переміщена на її сучасну орбіту поблизу планети.

Зроблені відкриття побічно можуть підтверджувати гіпотезу, що околиці Сонячної системи колись були піддані інтенсивному метеоритному бомбардуванню і Амальтея, яка спочатку могла бути єдиним геологічним тілом, розкололася на окремі брили. Зараз навколо Амальтеї обертається 9 власних малих об'єктів менше 5км діаметром кожен. Слабка гравітація була недостатньою для їх об'єднання у моноліт і зараз пустоти займають більший, ніж породи, об'єм Амальтеї. Ймовірно, що багато небесних тіл – малих супутників планет та астероїди – також являють собою „купи хаотичного каміння”, які літають у космосі на власних орбітах. У 1992р. космічний зонд Ulysses зафіксував пилові потоки в Юпітера, джерелом яких, як виявилось пізніше, були численні діючі вулкани Іо – одного із супутників Юпітера. Через постійні викиди мікроскопічних частинок Іо втрачає до одного кілограма маси за секунду, а пилові потоки можна вважати характерною рисою планет-гігантів.

2.2.6.1. ІО

ІО – найближчий галілеєвий супутник Юпітера (діаметр 3643км, густина $3,55\text{г/см}^3$, маса $8,92 \times 10^{22}$ кг), який виконує один оберт на віддалі 421 700км від центра Юпітера за 1,77 доби.

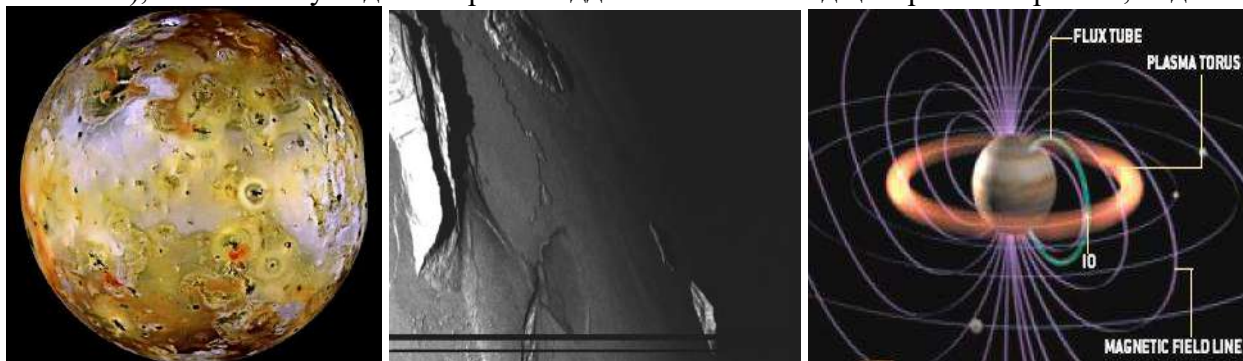


Рис.2.191. Супутник Юпітера – Іо; структури на поверхні Іо (фото Galileo) та орбіта навколо планети у своєрідному плазмовому торі із іонізованих атомів та молекул сірки з домішками інших речовин

Радіус та форма Іо постійно змінюються, а надра супутника розігріваються через гравітаційний вплив Юпітера з одного боку, та Європи з Ганімедом - з іншого боку. Ця енергія проявляється у постійній **потужній вулканічній діяльності**. Активні тектонічні і вулканічні процеси постійно змінюють **жовто-червону** (від насичених сіркою жовто-оранжевих лавових потоків та випадання SO_2 -інею із газових фонтанів) відносно **рівнинну поверхню Іо** за рахунок формування **нових розломів, ескарпів, вулканів, фонтанів і виливів розплавленої сірки і сірчаної лави, викидів газів та вулканічного попелу** тощо. Крім гір у центрі **комплексу Пеле**, на Іо існують інші невулканічні **гірські масиви**, а гори в полярних районах мають висоту до 10км та площу 150×80 км.

Voyager-1 відкрив 8 діючих вулканів. Зараз уже відомі **71 вулкан** та більше **100 кальдер** глибиною у кілька кілометрів, які заповнені вогняними озерами рідкої сірки температурою у кілька сотень градусів, одночасно можуть вивергатися понад 10 вулканів. Висота вивержень

сягає 100-500км з початковою швидкістю 0,6-1,0км/сек. Найбільший у Сонячній системі потік рухливої сірчаної лави простягся на 500км від діючого вулкану *Амірані*. Найпотужніший вулкан Сонячної системи – *Локі* – та інші лавові озера Іо схожі на земні океанічні хребти, але, через відсутність на Іо літосферних плит, викиди тепла і лави тут можуть бути круглими, як у Локі (рис.2.190). Лавові озера на Іо працюють як земні океанічні хребти – через них на поверхню викидається велика маса лави, яка формує нову кору.

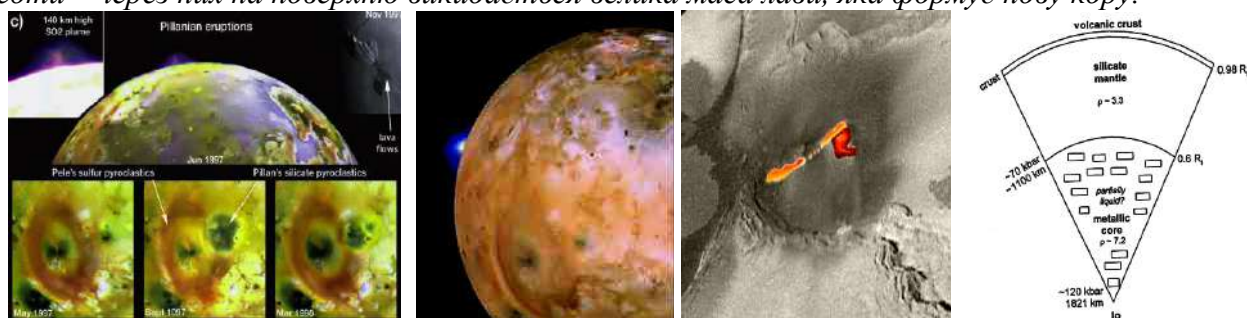


Рис.2.192. Активні вулканічні процеси на Іо.

Ліворуч: фонтани виверження висотою 140км над кальдерою *Патери Пілан* (збільшено на верхній вставці). У центрі – фонтан виверження вулкану *Локі* на лімбі супутника та вигляд вулкану *Локі* з орбіти (фото *Galileo*). Праворуч: ймовірний склад внутрішніх сфер Іо

Вулкан *Локі* є напівкруглою, розташованою на розломі, западиною лавового озера із островом посередині (рис.2.199). Острів зникає та відтворюється кожні 15-18 місяців через періодичні виверження вулкану, а лава стікає донизу по схилу острова у лавові канали. В інтенсивні періоди свого виверження Локі викидає близько 1000м²/сек лави.

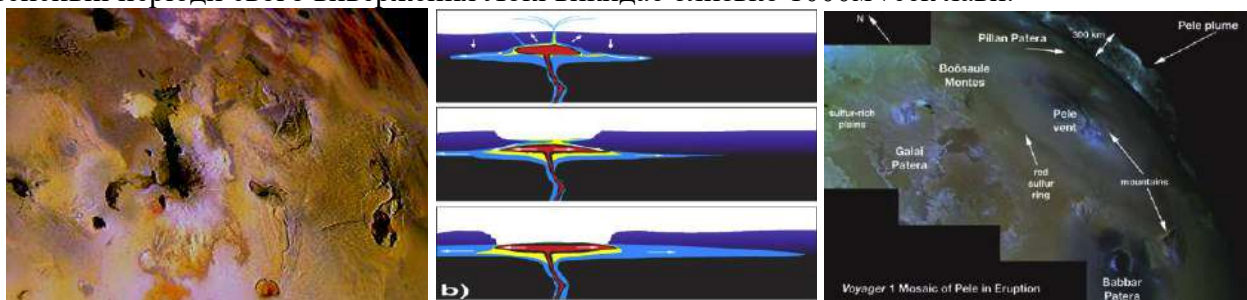
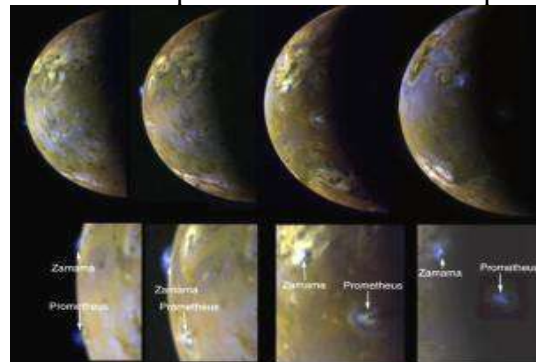


Рис.2.193. Ліворуч: витягнута вниз *Патера Монан* із чорними озерами розплавленої сірки, червоними потоками сірчаної лави та білим ореолом SO₂-інею від вивержень вулкану *Амірані* (висота гір 8км - на фото праворуч унизу та 4км - на північ від неї). У центрі: схема виверження на Іо із утворенням і розвитком кальдери та формуванням озера розплавленої сірки. Праворуч: виверження вулкану *Пеле* на висоту 300км у космічний простір над обрієм Іо (фото *Voyager*)

Деякі з діючих вулканів фонтанують гейзерами розплавленої лави із сірки на висоту до 300км зі швидкістю викидів 1км/сек, а діяльність вулкану *Прометей* залишається дуже активною протягом останніх 20 років. Найбільша загадка цього вулкану – відсутність у



Прометей жерла чи любого іншого джерела викидів. Можливо, що постійно присутні над Прометеем викиди породжені взаємодією гарячих потоків лави із двооксидом сірки, яка складає оточуючі рівнини.

Рис.2.194. Фонтани вулканів *Прометей* і *Замам* (фото *Galileo*)

Вулкан *Пеле* – найбільший із вулканів на Іо - фонтанує на висоту 300км (рис.2.193) зі швидкістю 1800км/год., а його виливи покривають навколо вулкана площу понад 1млн. км². Вулкан являє собою розташоване на тектонічному розломі плато *Danube Planum* озеро силікатної лави температурою +1100⁰С. Навколо озера розміщені темні плями пірокластичних викидів

із вулканічного попелу та переважно червоних з'єднань сірки. Деяка кількість фонтануючих розплавлених з'єднань сірки виринає з поля тяжіння Іо і утворює в космосі кільце (тор) уздовж орбіти супутника навколо Юпітера (рис.2.189). Коли *Galileo* (27.07.1996р.) фотографував Іо, там йшло виверження вулкану **Pa**, а висота фонтану сірчаної лави температурою $+347^{\circ}\text{C}$ сягала 100км.

У залежності від того, знаходиться поверхня Іо у нічній п'ятні або освітлюється Сонцем, відбуваються виверження вулканів чи ні, сірка, якою покрита поверхня супутника, набуває різноманітних відтінків – бежевого, коричневого або зовсім чорного.

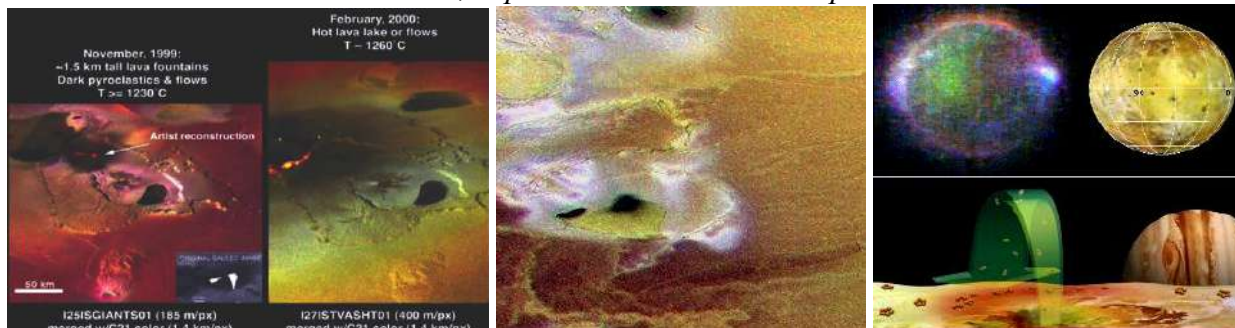


Рис.2.195. Активні процеси вулкану *Тваштар* (подвійне фото ліворуч): 1- яскравий край свіжого потоку лави довжиною 60км у витягнутій кальдері та чорні озера розпавленої сірки, 2- викиди лавових фонтанів на висоту 1,5км та лавовий потік; краї плато висотою 1км обрушені підточуванням постійними виділеннями рідких двооксидів сірки. Зонд *New Horizons* (2007р.) зафіксував викиди вулканічного попелу та газів вулкану *Тваштар* на висоту 320км. У центрі: південні полярні області Іо з потоками лави. Праворуч: хмари нейтральних Na , K , O_2 і S над Іо і їх формування із продуктів вивержень вулканів та інтенсивного бомбардування Іо частинками орбітального тору (фото *Galileo*)

Температура віддалених від вулканів ділянок поверхні Іо не перевищує -50°C , відомі теплі ділянки від 0 до $+30^{\circ}\text{C}$ і лавові озера з температурами понад $+1000^{\circ}\text{C}$, що свідчить про наявність силікатної лави із розплавлених гірських порід з домішками сірки. Продукти деяких вивержень температурою $+3100^{\circ}\text{C}$ значно перевищують температури лав на Землі.

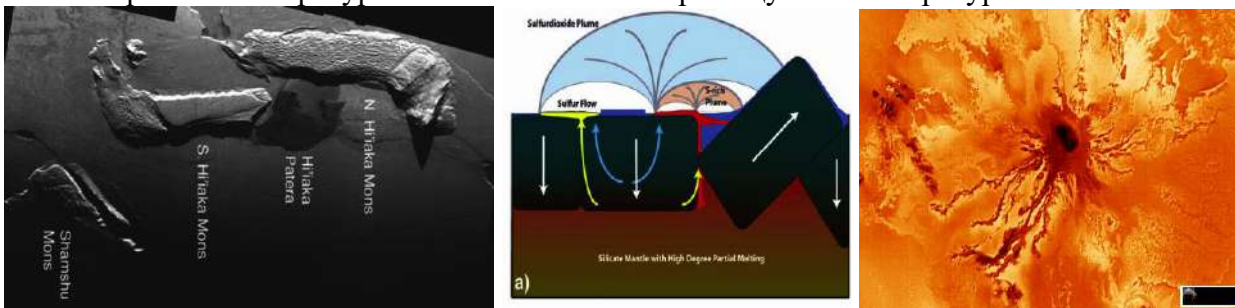


Рис.2.196. Брилові гори (ліворуч), механізм їх утворення (у центрі) і вулкан (праворуч) (фото *Galileo*)

Навколо Іо існує розріджена газова **атмосфера** (зафіксовані SO_2 , O_2 , а також *натрієві хмари* з Ca , Mg і Fe) з її зарядженою електрикою верхньою частиною (іоносферою). Проліт *Galileo* через газовий фонтан висотою 500км вулкану **Тор** (прокинувся у 2001р.), зафіксував хімічний склад викидів - це SO_2 -іній із малих пластівців розмірами у 15-20 молекул кожен.

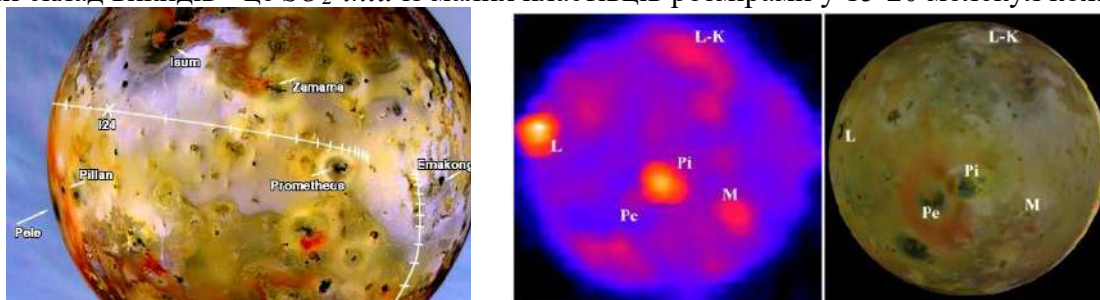


Рис.2.197. Основні центри вулканічної діяльності на Іо (фото та температурно-радіаційна зйомка *Galileo* нічного боку Іо): вулкани Pe – Пеле, M – Мардук, L – Локи, Pi – Pillan, L-K – Lei-King Fluctus

Густина атмосфери Іо в 10млн. разів менша за земну, її тиск нерівномірний і збільшується в центрах вулканічної діяльності. Газова оболонка супутника постійно поповнюється вулканічними газами, а в нічний час у ній утворюються різнокольорові ефекти під впливом заряджених частинок магнітного поля Юпітера при їх взаємодії з газами атмосфери. Натрієві хмари були знайдені уздовж орбіти Іо на відстанях до 34 радіусів Юпітера (до 4,9млн. км).

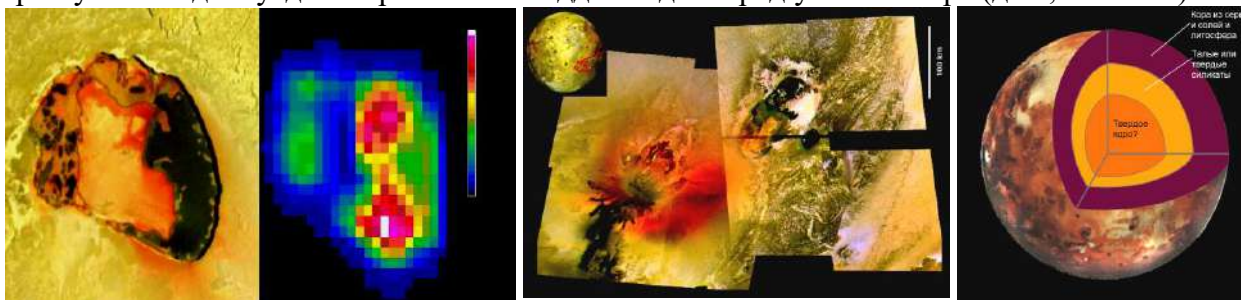


Рис.2.198. Ліворуч: кальдера (розмір до 75км, висота скель до 900м) вулкану *Патера Тупан* на Іо в інфрачервоних променях. У центрі: фрагмент типової поверхні Іо з різнокольоровими продуктами виверження навколо вулкану. Праворуч: схема внутрішньої будови супутника (фото і дані *Galileo*)

Іо має **магнітне поле**, у якому спостерігаються *полярні саява*. За зміною частот радіосигналів *Galileo* вчені зробили висновок, що Іо має **металеве ядро** радіусом не менше 900км із розплавленого сірчаного заліза густиною до 5г/см^3 , яке оточене **мантією** із звичайних гірських порід густиною $3,28\text{г/см}^3$ та твердою **корою** потужністю біля 20км, під якою вже ймовірний шар розплавленої речовини (рис.2.192, 2.198). Під поверхнею Іо можливе існування маси розплавленої сірки, а на поверхні – *річок та озер* із рідкої сірки.

Активний вулканізм зумовлений деформацією та розігріванням надр Іо потужною гравітацією Юпітера через формування двох припливних горбів, які, при обертанні супутника навколо власної осі, переміщуються по ньому з амплітудою коливань поверхні до 100м. Цей ефект значно посилюється впливом інших супутників Сатурна, особливо Європи. Поверхня супутника геологічно дуже молода, активні геологічні процеси повністю змінюють рельєф Іо за кілька століть і на його поверхні немає ударних кратерів.

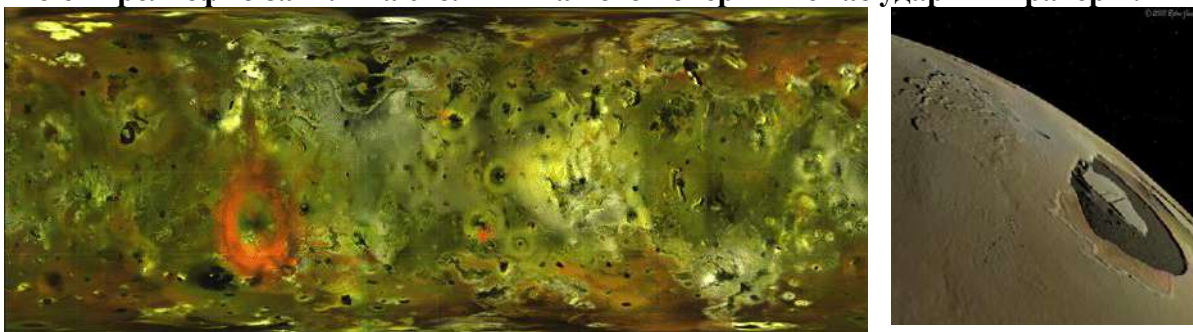


Рис.2.199. Ліворуч: карта поверхні Іо у проекції Меркатора із найбільшими регіонами, що покриті різнокольоровими з'єднаннями сірки у вигляді „снігу”. Праворуч: вулкан *Локи* з чорним озером розплавленої сірки в кальдері (інфрачервоне фото *Galileo*)

Геологічні процеси на Іо подібні, мабуть, до процесів ранньої геологічної історії на Землі.

2.2.6.2. ЄВРОПА

ЄВРОПА – найменший (діаметр 3122км, густина $3,03\text{г/см}^3$, маса $4,8 \times 10^{22}\text{кг}$) *галілеєвий* супутник Юпітера, який обертається на віддалі 671 034км від центра планети за 3,55 доби та завжди обернений до Юпітера одним боком. Дослідження гравітаційного та магнітного полів (*Galileo*, 1996-2003рр.) засвідчили, що Європа пройшла через *стадію диференціації* надр із утворенням суцільної світлої водяної **крижаної кори** потужністю 10-30км, що відбиває світло так же сильно, як і хмари Венери; солоного **водяного океану** глибиною в 30-100км, який вміщує набагато більше води, ніж є на Землі (на 1/5 Європа складається з *води*); **силікатної мантії** та невеликого **металевого ядра** із важких хімічних елементів (рис.2.207).

Galileo відкрив на Європі надзвичайно тонку та незначну (тиск до 1×10^{-6} Па) **атмосферу** (екзосферу) - газову оболонку кисневого складу з іонами і частинками нейтральних газів, які вільно дисипують у відкритий космос. Наявність у ній кисню пояснюється впливом на крижану поверхню Європи сонячного світла та заряджених частинок із утворенням водяної пари, яка розділяється на *водень* (H_2), який звітрюється у космос та *кисень* (O_2), який залишається. Проте надлишкова кількість утворення атомарного H_2 і O_2 , особливо над південним полюсом, може бути пояснена, крім випаровування криги, тільки наявністю там *гейзерів*. На поверхні Європи *Galileo* знайшов сліди вуглекислого газу (CO_2).

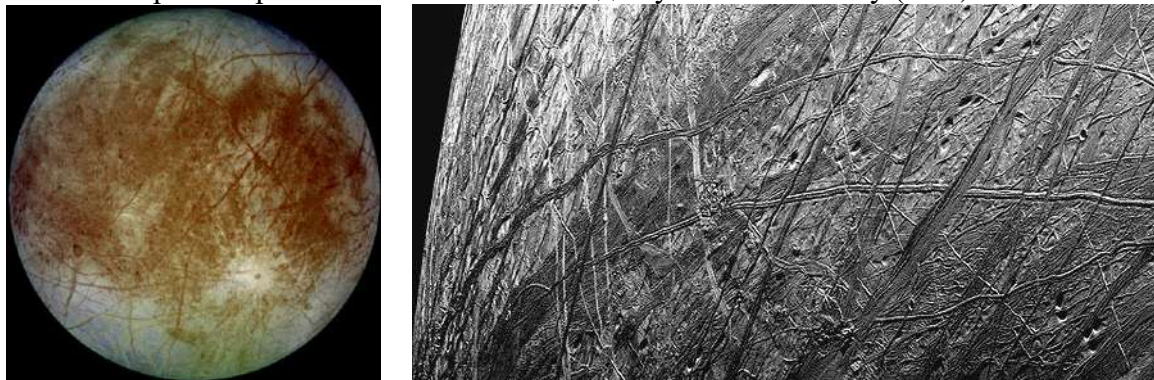


Рис.2.200. Супутник Юпітера – *Європа* та структури на його поверхні (праворуч). Темні структури – кам'яністі породи, світлі області районів полюсів складені брилами чи мілкими кристалами водяної криги. Темні лінії – тисячокілометрові розломи у крижаній корі. Темна пляма у центрі яскравої області (на фото ліворуч) – молодий ударний кратер *Pwyll* діаметром біля 80км. (фото *Galileo*)

На поверхні супутника повинна бути висока радіація, бо орбіта Європи проходить через потужний радіаційний пояс Юпітера.

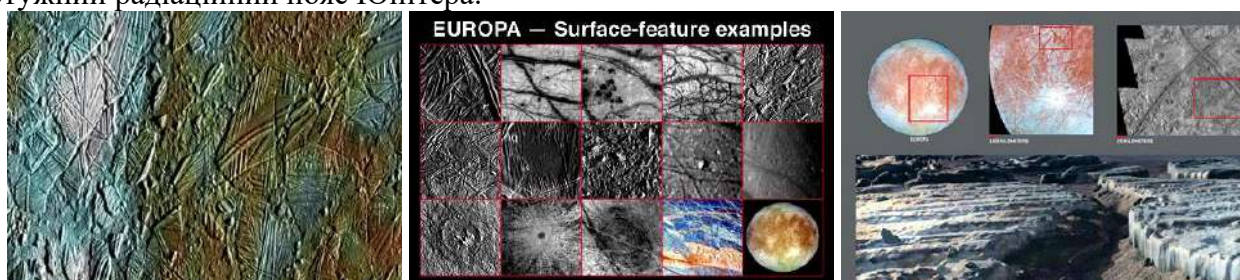


Рис.2.201. Ліворуч: розколений на брили крижаний панцир *Європи* (регіон *Conamara*, 70×30км) над солоним рідким океаном. У центрі - різні форми утворень на поверхні *Європи* (фото *Galileo*).

Праворуч: аналоги тріщин серед крижаних полів на *Європі*

Незважаючи на те, що температура поверхні Європи доходить до 150-190°C нижче нуля, супутник піддається настільки потужному гравітаційному впливу Юпітера, що виникаючі припливні деформації не тільки розігрівають внутрішні сфери Європи до існування під покривом криги рідкої води або крижаної шуги, а й ламають суцільний крижаний покрив припливним виступом (горбом) висотою 30м і надають доступ рідкій воді надр на поверхню супутника. На отриманих фотографіях Європи видно області, які нагадують *тороси* крижаної поверхні та *поля айсбергів*, що ламалися на частини, а потім знову вмерзали в лід.

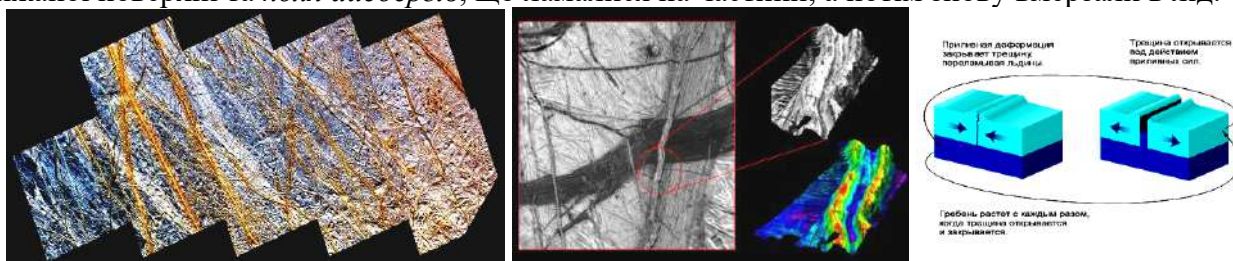


Рис.2.202. Подвійні хребти (вали) мінералізованих розколів (ліворуч), темні плями і гладенький лід крижаної поверхні супутника в області *Трейс* (фото *Galileo*), подвійні хребти рифтів крижаного покриву та механізм їх утворення (праворуч)

Крім того, на фото видно крижані поля, які розкололися і відходять один від одного. Ширина цих тріщин протяжністю у тисячі кілометрів досягає 100км. У місцях розломів на крижану поверхню Європи виливалася вода, яка зразу ж замерзала у вигляді валів (хребтів), що знову неодноразово розколювалися та віддалялися (рис.2.201, 2.202).

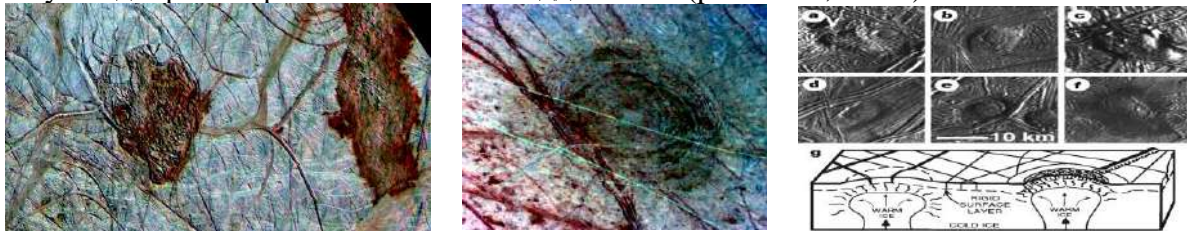


Рис.2.203. Мінералізовані домішки у тріщинах подвійних хребтів крижаної кори Європи (ліворуч) і у «плюмах» - брилах більш теплої криги надр, які прориваються через крижаний покрив (або теплих водних припливів океану, що проплавляють кригу) в областях Тера (70×85км) і Трейс (у центрі) та різні форми на крижаній поверхні Європи від плюмів (праворуч) і схема їх впливу (фото Galileo)

Цей процес зумовив формування на поверхні Європи крижаних торосів та паралельних подвійних і, навіть, потрійних хребтів, які нагадують земні хребти рифтових зон.

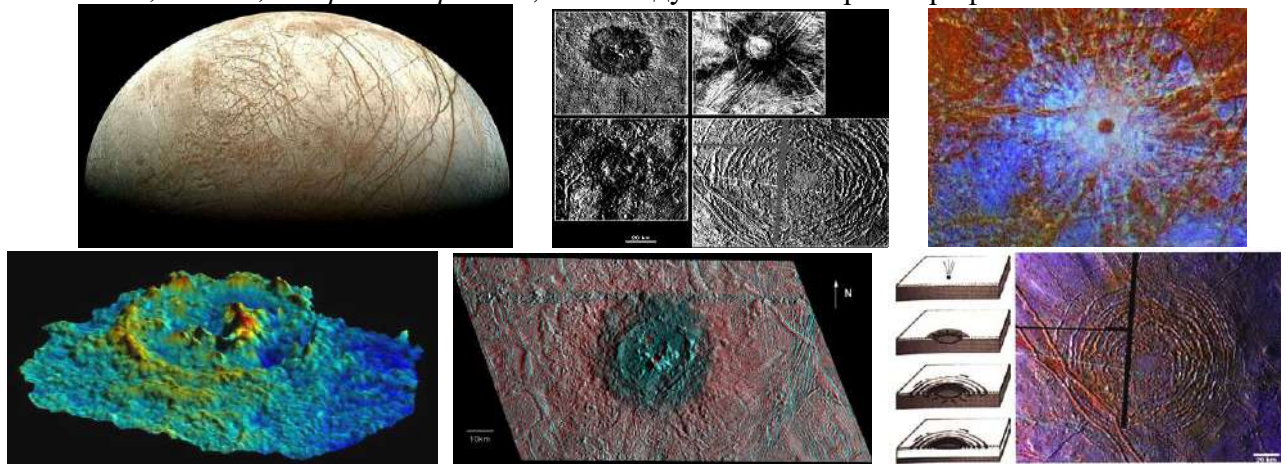


Рис.2.204. Поверхня Європи помережена каньйонами та хребтами (угорі ліворуч). Ударні структури на крижаному панцирі Європи: кратери Pwyll, Cilix, Tyre, Mannann'an; загальний вигляд (праворуч) та тривимірні зображення кратера Pwyll діаметром 80км з вищою за краї центральною гіркою від виходу м'якої криги надр чи води через пробитий метеоритом отвір у крижаному покриві супутника; кратер Mannann'an (унизу праворуч) та ймовірна схема його утворення (фото Voyager-1 та Galileo)

Спостерігаються опуклі склепіння і темні червонуваті плями до 80км шириною (області Тера і Трейс), які могли утворитися у результаті процесів типу лавових вивержень (під впливом ендегенних сил брили напівталого криги із нижніх шарів поступово спливають, а холодні занурюються – ще одне побічне свідчення існування рідкого океану). Торосистий ландшафт Європи формувався невеликими блоками і нагадує розбите скло, яке склеєне кригою внутрішнього походження. Глобальна сітка ліній на супутнику – тріщини у товстій крижаній корі від дії тектонічних процесів, що не супроводжуються якими-небудь рухами крижаних брил, а заповнюються швидко затверділими мінералізованими розчинами надр.

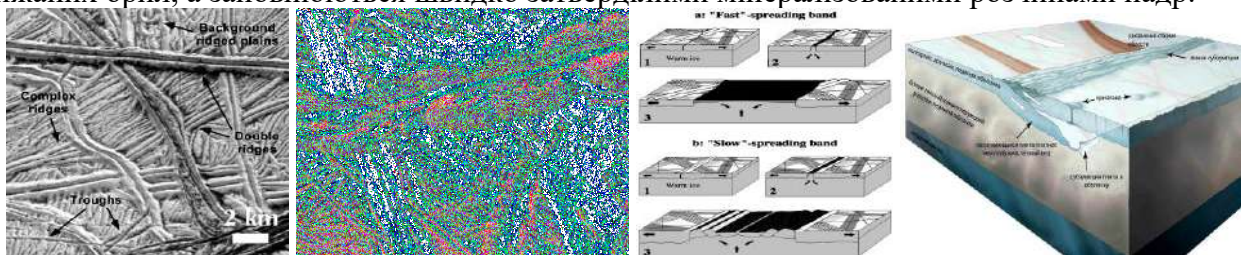


Рис.2.205. Подвійні хребти (ширина 2,6км, висота до 300м) у рухливих зонах рифтів та лінеamentів крижаної поверхні Європи та ймовірні механізми їх утворення (фото Voyager-1 та Galileo). Схема тектоніки плит на Європі – всування (субзупмція) зовнішньої, крихкої і холодної криги у більш теплу внутрішню і її поглинання

Коричневі смуги тріщин мають ширину до 70км, тягнуться іноді на тисячі кілометрів і утворилися при випаровуванні води з мінеральними домішками (спектрально зафіксовані солі $MgSO_4$, сліди *перекису водню* і сильних *кислот*, сірчаних та залізистих речовин(?), яка піднімалася з глибин океану. Рідка вода на поверхні миттєво закипає та замерзає, а частина її парів випадає на поверхню у вигляді снігу та інею в радіусі сотень кілометрів від тріщин. Гейзери, як на Енцеладі, на Європі ще не знайдені. На крижаному панцирі Європи також видно сліди від падіння метеоритів або комет - відкрито 5 кратерів діаметрами 10-30км (рис.2.204). Незважаючи на численні тріщини в крижаному покриві Європи, на айсберги та тороси, горбиста поверхня супутника з космосу виглядає досить гладенькою, так як всі нерівності льодяного рельєфу в цілому не перевищують 100м.

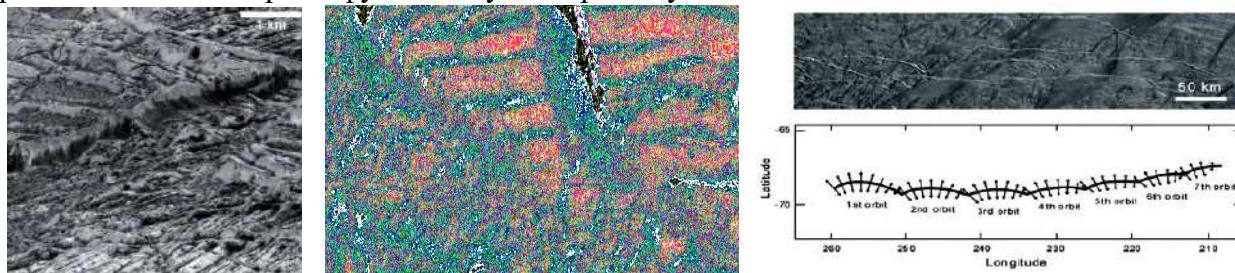


Рис.2.206. Вертикальні стінки обривів глибоких западин і ділянки хаотичних торосів області *Конамара* (1,7×4км) з паралельними крижаними хребтами висотою понад 100м. Праворуч: вигнуті розломи на крижаній поверхні Європи та механізм поступового їх утворення (фото *Galileo*)

Таким чином, *надра Європи складені гірськими породами, які аналогічні породам Іо, ззовні покриті кригою із суцільним шаром рідкої води (глобальний океан) між цими сферами.*

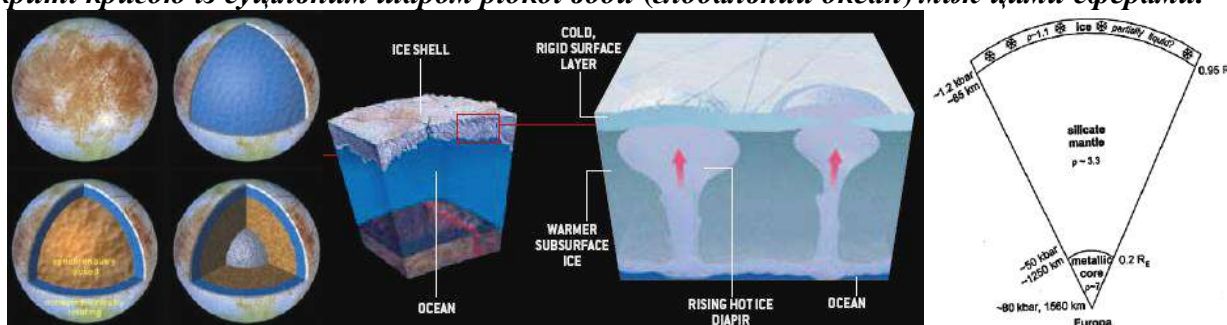


Рис.2.207. Схема сферичної будови Європи (ліворуч) та її верхньої частини – під крижаною корою знаходиться рідкий океан та можлива схема прогрівання океану із формуванням структур у крижаному покриві Європи (у центрі); праворуч: ймовірний склад внутрішніх сфер Європи

Про наявність рідкого океану, солоність води та повний склад розчинених солей якого ще невідомі, свідчить структура магнітного поля Європи, напрям якого, за даними *Galileo*, змінюється із періодом біля 10 годин, що близько до періоду обертання Юпітера навколо власної осі. Це можливо у тому випадку, коли під видимою поверхнею (крижаним покривом) існує електричний провідник (солоний океан), у якому виникає вихоровий струм. Його потужність залежить від дії юпітеріанських електромагнітних полів та хвиль, які утворюються в океані солоної води гравітацією планети-гіганта.

Поєднання на супутнику рідкої води, активних припливно-відпливних сил і періодичного поверхневого нагрівання та органічних речовин, які заносяться кометами і метеоритами, свідчать про наявність на Європі всіх ключових інгредієнтів для можливої появи та розвитку певних форм життя – ендобіосфери.

2.2.6.2. ГАНІМЕД

ГАНІМЕД – найбільший галілеєвий супутник Юпітера і взагалі *найбільший супутник у Сонячній системі* (більший за Меркурій та за *плутон* Плутона), має діаметр 5262км, малу густину ($1,94\text{г/см}^3$), масу $14,8 \times 10^{22}\text{кг}$ і власне досить потужне магнітне поле, обертається на

віддалі 1 070 412 км від центра Юпітера з періодом обертання 7,2 доби. Один бік супутника – „морський”, інший – „материковий”, якщо ці характеристики можна застосувати для крижаних тіл. Завдяки своїм розмірам Ганімед повинен мати більш гарячі, ніж Іо та Європа, надра, адже велика віддаль від Юпітера позбавляє його енергії припливних рухів у надрах.



Рис.2.208. Ганімед із світлими тріщинами, ударними кратерами та темними „материками”. Ліворуч – геологічна схема супутника. Фото у центрі в натуральних кольорах - сіро-коричневе забарвлення поверхні надають суміші криги із скельними породами (фото *Voyager-2* та *Galileo*)

Поверхня Ганімеда біля 40% – потужна темна древня поверхня коричневого кольору - **крижана кора** з численними метеоритними кратерами. Ця кора була частково розламана і оновлена активними геологічними процесами 3,5 млрд. років тому. Ці ж процеси утворили покриті **борознами ділянки поверхні** (решта 60% поверхні Ганімеда).

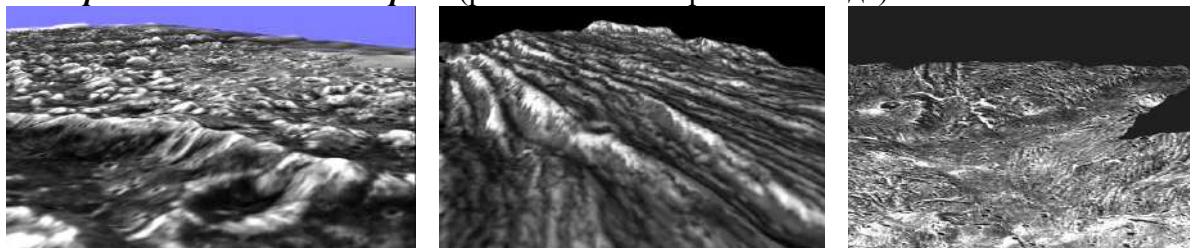


Рис.2.209. Перспективні види різних ділянок крижаної поверхні Ганімеда з рядами численних субпаралельних долин і хребтів (фото *Galileo*)

Дві найбільші темні області на поверхні Ганімеда отримали назви **область Галілея** (4000 км упоперек) та **область Сімон Маріус** (він відкрив найбільші супутники Юпітера практично паралельно з Галілеєм). Поверхня Ганімеда покрита світлими молодими **ударними кратерами** в оточенні радіально-променевих викидів світлого крижаного матеріалу (альbedo їх до 100%) і припорошена шаром пухкого кам'яно-крижаного пилу потужністю до декількох десятків метрів. Кратери Ганімеда – це, скоріше за все, сліди зіткнень з астероїдами - зараз відслонюють чисту крижану поверхню супутника.

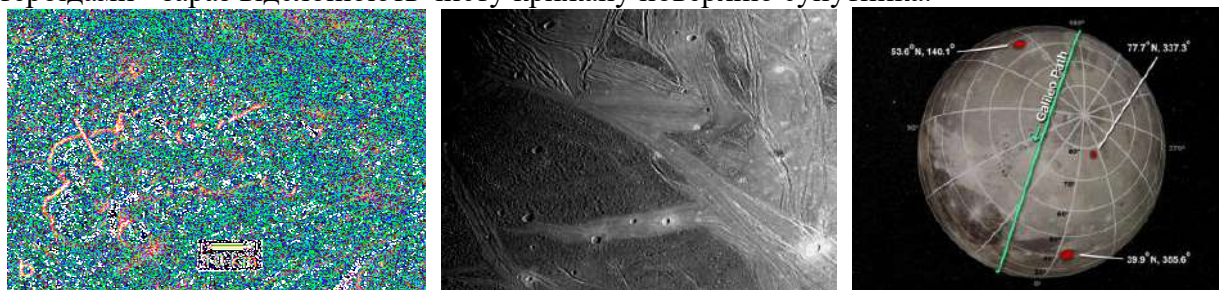


Рис.2.210. Ліворуч: депресії типу земних вулканічних кальдер, утворені, ймовірно, в результаті проявів „водно-крижаного” вулканізму на Ганімеді, на дні депресії знаходиться **складчастий язик** типу застиглих земних лавових потоків. У центрі: типові елементи поверхні Ганімеда: широкі світлі смуги більш молодшої крижаної поверхні, утворені, ймовірно, крижаним вулканізмом в умовах періодичних тектонічних стискань та розтягувань кори супутника (фото *Galileo*). Праворуч: **маскони** Ганімеда – локалізовані концентрації мас речовини під крижаною поверхнею супутника (дані *Galileo*)

Товстий шар інею покриває розбиту тріщинами і здіблену грядками поверхню Ганімеда і не маскує численних слідів крупних **тектонічних рухів**, **метеоритних бомбардувань**, а також результатів **зіткнення з гігантським астероїдом** близько 4 млрд. років тому.

Спостерігається дивовижна різноманітність тектонічної будови геологічно древніх та молодих поверхонь: **древньої** – більш темної, частково покритої викидами від численних ударних кратерів (*палімпсестів*) на поверхню Ганімеда, «геологічна поведінка» якої тоді істотно відрізнялася від сучасної і **молодшої** – світлих, збагачених кригою площ, які немов би обривають структури древніх поверхонь, “розірвані” на окремі райони з поверхневими деформаціями значної амплітуди та борознами неясного походження. На Ганімеді чітко простежуються ні на що не схожі **ряди численних субпаралельних долин і хребтів**, які утворюють дивну структуру на поверхні супутника - вони концентруються у світлих областях, де їх ширина сягає десятків кілометрів, а висота хребтів (глибина долин) - сотень метрів (при простяганні на тисячі кілометрів) із пересіченнями навіть ударних кратерів та змінами напрямів у місці пересічень – все це нагадує **глобальну тектоніку плит** на Землі.

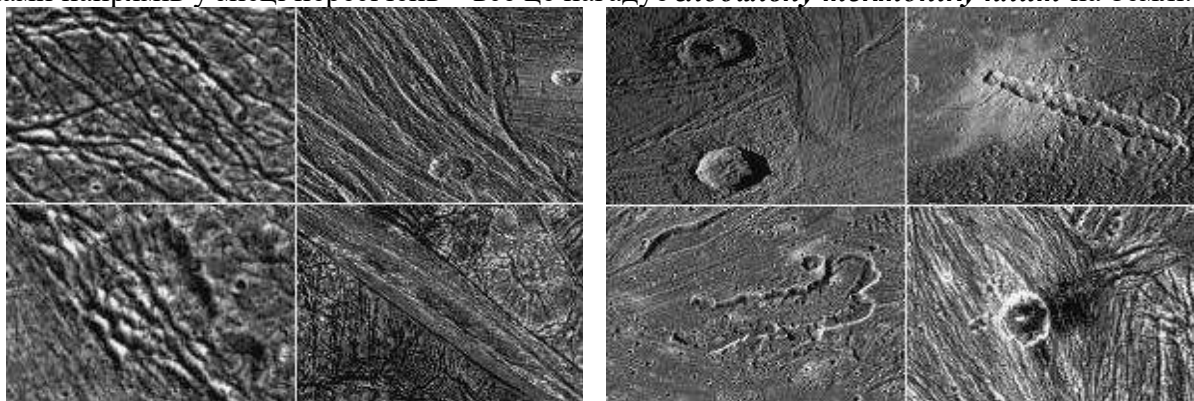


Рис.2.211. Особливості рельєфу крижаної поверхні Ганімеда з системами тріщин, ударними кратерами на древніших та молодших ділянках поверхні та ланцюжком ударних кратерів від фрагментів комети (угорі праворуч) (фото *Galileo*)

На підставі вимірювань гравітаційного поля та теоретичних розрахунків із врахуванням маси ($1,48 \times 10^{23}$ кг), розмірів (діаметр 5262 км) та густини ($1,94 \text{ г/см}^3$) була створена спрощена модель **силікатно-крижаної внутрішньої будови Ганімеда**: вважають, що він складається із потужної **крижаної мантії**, яка оточує невелике **кам'яне ядро**.



Рис.2.212. Ліворуч: фрагмент молодшої борозни Арбела шириною 20 км (результат тектонічних зсувів) у південній півкулі Ганімеда, яка розділяє дві більш древні поверхні – без ударних кратерів паралельно-складчасту (результат стискання кори в складки) північну та покриту давніми ударними кратерами південну. Праворуч: ударний кратер (150 км) з радіально-променевими крижаними викидами на поверхні Ганімеда (фото *Galileo*)

Фотографії *Voyager* і *Galileo* вказують на ознаки геологічного та тектонічного руйнування кори супутника у далекому минулому за рахунок **ендогенних процесів**. Через кількість метеоритних кратерів вік найдревніших ділянок поверхні Ганімеда оцінюють у 3-3,5 млрд. років. Відносно великі розміри та невисока середня густина (вдвічі більша за густину води) свідчать про значну потужність **крижаної кори** супутника (водяна крига займає 50% маси

Ганімеда). Внизу знаходиться **мантія** (до 500-600км потужністю) із рухливої криги, тому поверхня плит при їх зіткненнях покривається немов би зморшками, а активні геологічні процеси супроводжуються *виверженнями* не лави, а *водно-крижаних мас (гляціовулкани)*, які і сформували подібні до каналів форми рельєфу. Поняття „водяна крига” стосовно Ганімеда та інших супутників Юпітера має незвичне значення – в умовах низьких температур та високого внутрішнього тиску водяна крига може існувати в декількох модифікаціях з різними типами кристалічних ґраток. Крижана мантія Ганімеда визначена складними переходами між цими різновидами криги.

Більш детальні розрахунки свідчать про існування наступних шарів-оболонки (рис.2.213): надра Ганімеда складаються із **залізного ядра** в оболонці **кам'яної мантії**, але вимірювання гравітаційного поля супутника підтвердили наявність **розплавленого металевого** чи **металево-сірчаного ядра** (джерела **радіаційного внутрішнього тепла**), а зовнішній шар **крижаної кори** може мати потужність до 900-950км. Згідно останніх даних, у верхньому шарі криги можуть бути *скельні острови* чи *скупчення скельних брил (маскони)*, які нічим не виділяються у сучасному рельєфі, вмерзали в кригу мільярди років тому і в гравітаційному полі супутника виділяються аномаліями (рис.2.210). Між мантією та кригою повинен існувати під тиском шар охолодженої значно нижче нуля *рідкої води* потужністю в кілька кілометрів, глибина залягання якого біля 170км. Розраховані дві моделі формування **магнітного поля** Ганімеда: за рахунок *розплавленого ядра* та за рахунок *електропровідної соленої води* під крижаним панциром. Характер зміни магнітного поля Ганімеда в потужній магнітосфері Юпітера (дані *Galileo*) допускає наявність рідкого електропровідного прошарку.

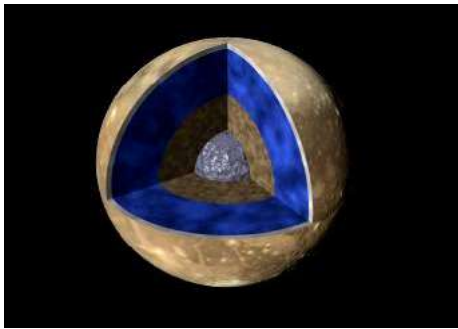


Рис.2.213. Схема внутрішньої будови Ганімеда

Таким чином, Ганімед наполовину складається з води, а його ядро (розміром з Місяць) вміщує силікати та оксиди різних металів. Про кам'яні надра супутника свідчать розвали порід, які подекуди залягають на крижаному покриві Ганімеда. Ганімед, мабуть, багатий на радіоактивні речовини і це підтримує його високу тектонічну активність.

У геологічно більш теплого минулого Ганімед був досить розігрітим, щоб його надра були у рідкому стані. Кора супутника тріскалась, деякі її частини опускалися, а частина залишалася на плаву. Між сегментами древньої кори утворювалися світлі крижані границі.

Вчені за допомогою спеціальної комп'ютерної програми скомбінували багато фотознімків Ганімеда і отримали трьохмірні стереозображення, які підтвердили, що у „*каналах*” – *дивних жолобах вулканічного походження* – *знаходиться не лава, як думали раніше, а підталій лід. Це значить, що у надрах супутника існує вода, яка постійно викидається на поверхню планети з її гляціовулканів. Контакт рідкої води з холодною поверхнею Ганімеда і розжареним руслом “каналів” підтримує її у стані мокротечі – лід не може повністю ні замерзнути, ні повністю розтанути.*

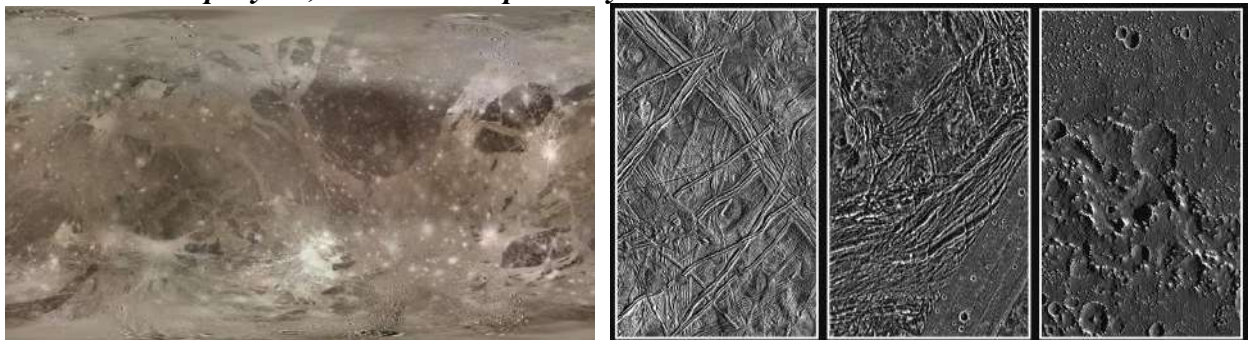


Рис.2.214. Карта поверхні Ганімеда у проекції Меркатора. Порівняння рельєфів поверхні супутників Юпітера (зліва праворуч) – Європи, Ганімеда і Калісто (фото *Galileo*)

2.2.6.4. КАЛІСТО

КАЛІСТО – найвіддаленіший галілеєвий супутник Юпітера, який замикає групу внутрішніх супутників планети-гіганта. Діаметр супутника 4821км, густина $1,83\text{г/см}^3$, вага $10,8 \times 10^{23}\text{кг}$ і він обертається на віддалі 1 882 709км від центра Юпітера за 16,7 доби та завжди повернений до планети одним боком. Температура поверхні на екваторі Калісто в місцевий полудень сягає -130°C , але після заходу Сонця вона швидко падає до -170°C . Нічна температура на постійно оберненому до Юпітера боці на $5-10^{\circ}\text{C}$ вища.

Калісто складений *гірськими породами* (силікати і залізо - 40%) та *кригою* (60%) і має дуже розріджену **атмосферу** із *вуглекислого газу*. Крижана червоно-бура поверхня супутника дуже древня, а її формування завершилося приблизно 4млрд. років тому. Наступні зміни рельєфу в основному пов'язані з інтенсивним метеоритним бомбардуванням і зараз **Калісто - найбільш кратеризоване тіло Сонячної системи без вулканів та високих гір.**

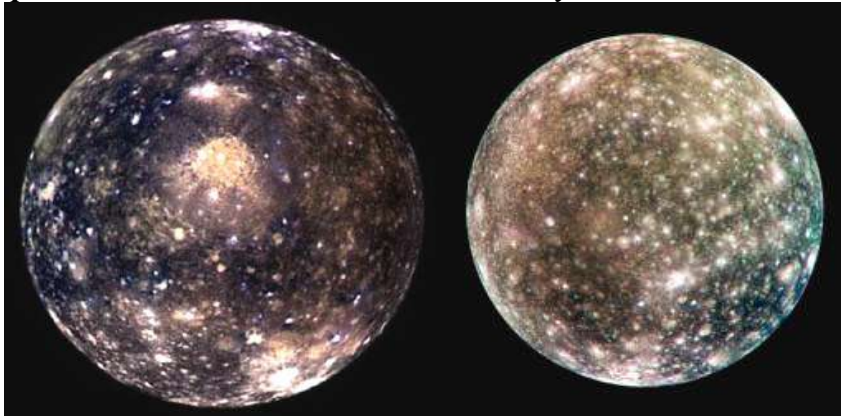


Рис.2.215. Зовнішній вигляд *Калісто* (фото *Voyager-2* і *Galileo*)

Крижана поверхня Калісто скрізь покрита *ударними кратерами* та *тріщинами* від зіткнень з космічними тілами, які переходять у *багатокільцеві ударні структури*, що обперізують супутник. Як і на Ганімеді, на Калісто древні кратери дуже згладжені - у них відсутні високі кільцеві вали, радіальні промені і центральні заглиблення. В основному, розміри кратерів складають десятки кілометрів, а характерною їх особливістю є наявність центрального згладженого підвищення замість горбистої депресії або центрального піку, які характерні для більш крупних утворень. Така внутрішня будова кратерів може виникати у результаті досягнення ударним тілом підповерхневого шару напівталих крижаних порід.

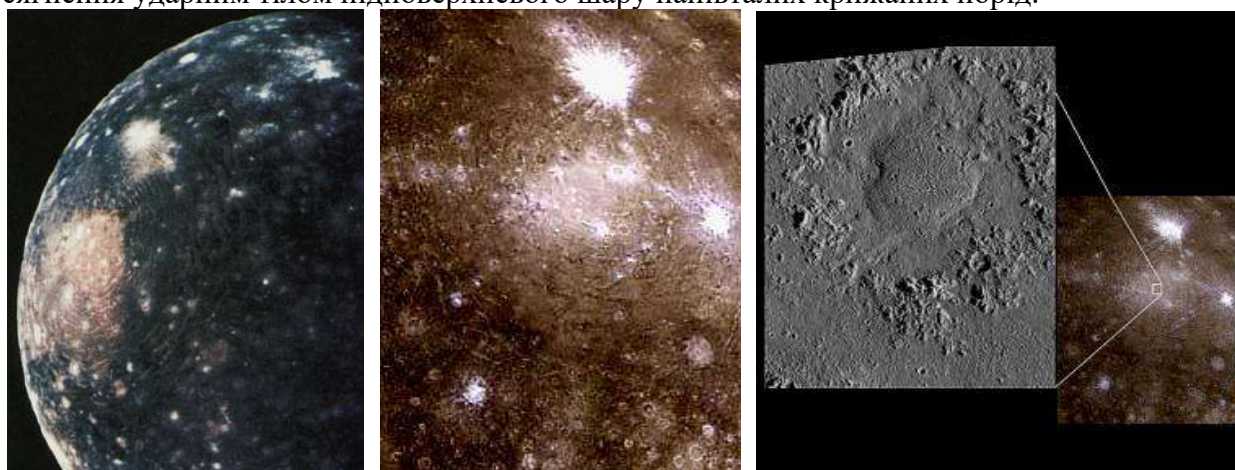


Рис.2.216. Ліворуч: система концентричних розломів багатокільцевого метеоритного *кратера Вальхалла* (діаметр 3000км). У центрі: ударний *кратер Асгард* (1700км) та кільцева структура на північ від неї із більш молодим ударним *кратером Бурр* в оточенні світлих крижаних радіально-променевих викидів діаметром 500км. Праворуч: куполоподібний *кратер До* (55км) у центрі *структури Асгарда* з центральним згладженим підвищенням (замість ударної депресії чи піка) за рахунок підйому підповерхневих рідких фракцій речовини надр (фото *Voyager-2*, *Cassini* і *Galileo*)

Найбільші кратери оточені серіями концентричних валів, що нагадують величезні, згладжені за тривалий час повільними рухами криги, тріщини. Найпомітніші на супутнику *три* великі ударні басейни з численними кільцями - найбільший з усіх відомих метеоритних кратерів *Вальхалла* (діаметр 3000км; центральна область кільцевої структури - з системами розломів та крутими обривами - розміром біля 300км; оточена серією 10 концентричних гірських гряд, з ланцюжком кратерів від падіння фрагментів зруйнованої тяжінням Юпітера комети, і простягається на 2000км від центру), *Асгард* (1700км) і *Адлінда* (800км) (рис.2.216).

Поверхня Калісто характеризується невеликими перепадами висот і не несе слідів вулканічної діяльності – на ній повністю відсутні протяжні, покриті продуктами вивержень (типу „морських областей” Місяця чи Ганімеда) рівнини. Поверхня складена м'якою, покритою пилом, речовиною, що легко піддається денудації та вирівнюванню. На детальних знімках космічного зонду *Galileo* з висоти 138км видно, що більша частина поверхні Калісто покрита *реголітом*, вона має гостроверхі піки із забрудненої криги висотою від 80 до 100м, які поступово руйнуються і дуже постраждала від ударів метеоритів, які утворили безліч кратерів. Механізм ерозії не зовсім зрозумілий; можливо, це пов'язано з «випаровуванням» (сублімацією) криги під дією сонячної радіації.

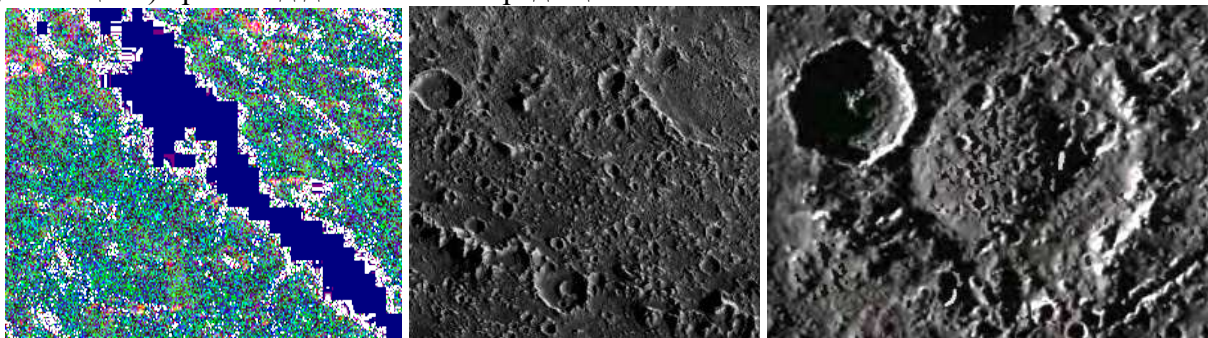


Рис.2.217. Ліворуч: розлом з крутим обривом у кільцевій структурі середини *кратера Вальхалла*. У центрі: місцевість у *кратері Асгард* - фрагмент хребта (лівий нижній кут фото) одного з гігантських концентричних кілець зони переходу від внутрішньої частини кратера до „оточуючих рівнин”. Праворуч: центральне згладжене підвищення оточеного подвійним валом dna 50-кілометрового ударного *кратера Хар* за рахунок досягнення ударним тілом підповерхневого шару з рідкими фракціями та їх виходу на поверхню (фото *Cassini* і *Galileo*)

Астрономи вважали, що на поверхні Калісто повинно бути багато кратерів різних розмірів, але космічні знімки поверхні дуже здивували вчених - на поверхні супутника було багато великих кратерів, але в окремих районах більшість мілких кратерів знищена.

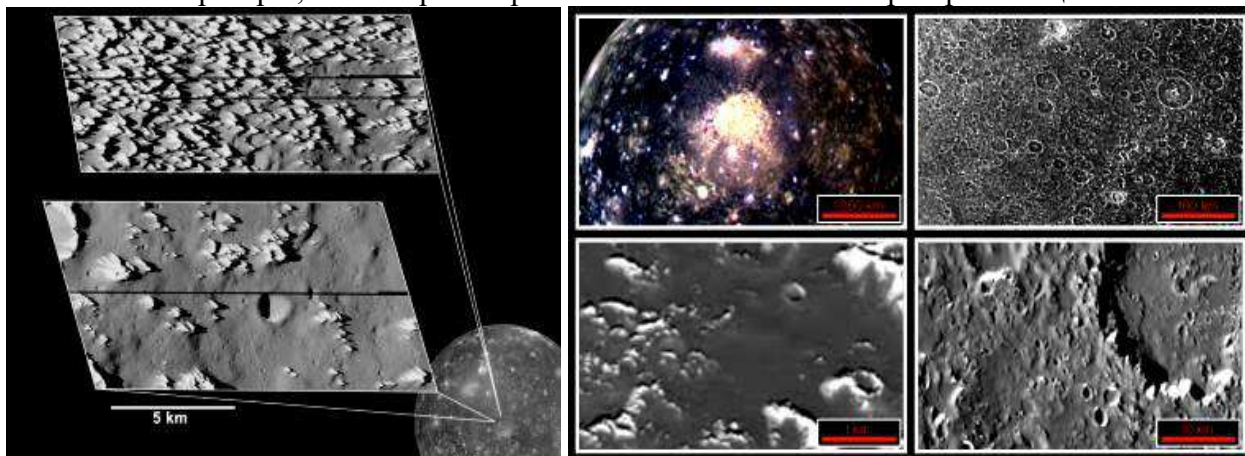


Рис.2.218. Ліворуч: крижани, з домішками більш темних порід, яскраві ерозійні піки висотою 80-100м на південь від *басейну Асгард*; праворуч: зміна уявлень про рельєф поверхні при збільшенні масштабу фотозйомки: від багатокільцевих ударних басейнів (угорі ліворуч) та ділянок інтенсивного метеоритного бомбардування (угорі праворуч) до деталей структур великих ударних кратерів (унизу праворуч) та згладжуючого мілкі деталі рельєфу покриву із темного матеріалу (унизу ліворуч) (фото *Voyager-1,-2*, *Cassini* і *Galileo*)

Це було дивно, адже поверхню Калісто бомбардують астероїди та комети, що повинно приводити до утворення кратерів різних розмірів. Калісто, як і Місяць, вважається з геологічної точки зору “мертвим” тілом віком близько 3млрд. років, що виключає прояви вулканічної та тектонічної діяльності, яка могла б затягувати небесні “рани”. Чому зникають невеликі кратери на Калісто - поки не відомо нікому, але можливо, що на Калісто деякі рухи поверхні відбулися зовсім недавно. Крім того, зафіксовано ще одне цікаве, невідоме на інших супутниках, явище: крупні уламки порід зміщуються на декілька кілометрів. Ці уламки не просто скочуються вниз по схилах, вони іноді переміщуються на великі віддалі і по рівнинній частині поверхні. Ні вода, ні атмосфера, які б могли сприяти таким переміщенням, на Калісто не знайдені. Відсутність геологічних змін на поверхні супутника може бути основою для визначення приблизного віку решти супутників Юпітера.

Накопичення у вигляді “загострених горбів” астрономи схильні вважати брилами криги, які викинуті на поверхню мільйони років тому при падінні метеоритів, або краями кратерів, які зазнали ерозії. Кожен такий горб оточений темнішим матеріалом, який неначе сповзає з нього. Припускають, що це пил, який раніше знаходився в крижаних брилах і залишився на поверхні після випаровування (сублімації) льоду. Можливо, процес випаровування триває, оскільки Сонце нагріває його, а згодом передає тепло навколишнім масам льоду. Крім того, на фото видно райони, в яких лід вже повністю випарувався.

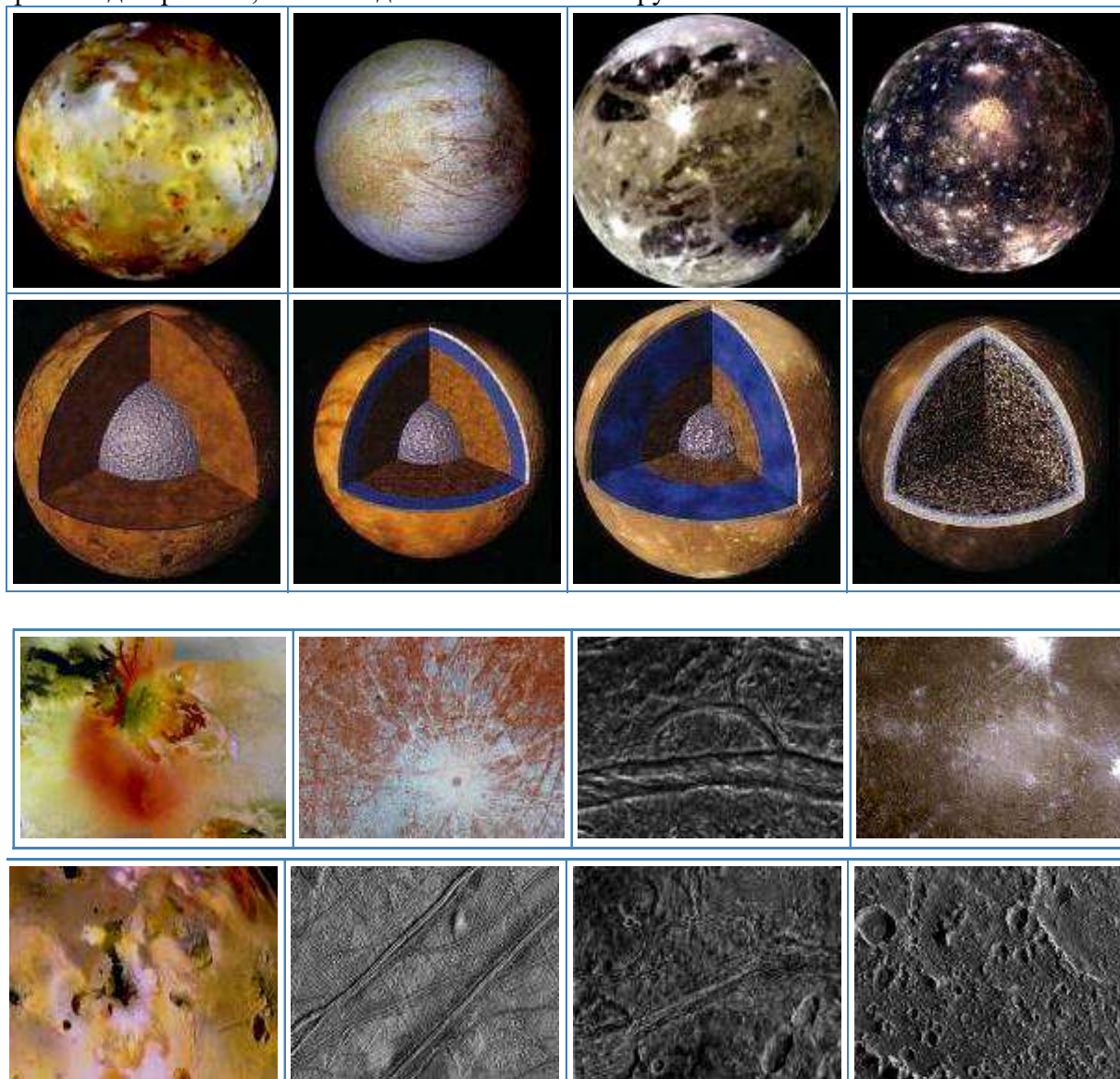


Рис.2.219. Порівняння характеристик (зовнішнього вигляду, сферичної будови надр та геоморфологічних особливостей рельєфів поверхні з проявами геологічних процесів) галілеєвих супутників Юпітера – *Іо*, *Європи*, *Ганімеда* і *Калісто* (фото *Voyager-1,-2*, *Cassini* і *Galileo*)

Поверхня супутника стара і має найбільшу густину ударних метеоритних кратерів у всій Сонячній системі. Поверхня Калісто являє собою єдиний крижаний материк з численними тріщинами і кратерами, які утворилися мільярди років тому під час зіткнень з протопланетними тілами. Але навіть найбільші ударні структури не мають своїх „проекцій” (антикратерів) на протилежному боці Калісто, які відомі на Меркурії та Місяці і викликані сейсмічними хвилями, що передалися через щільну речовину надр всього об'єму небесного тіла. Така особливість Калісто свідчить про існування під його крижаною корою *великого океану* з рідкої води. Наявність рідкого океану пояснюється характеристиками магнітного поля Калісто, яке утворене електричними токами в солоній воді. Магнітне поле Калісто змінюється у залежності від орієнтації відносно магнітного поля Юпітера, а це допускає наявність високої електропровідності рідини у надрах супутника. Тобто, *на Калісто присутні великі маси електропровідної рідини – мабуть, океанічної води з розчиненими у ній солями.*



Рис.2.220. Модель сферичної внутрішньої будови Калісто

За прийнятою моделлю внутрішньої будови під *силікатно-крижаною корою* Калісто потужністю близько 75км розташований шар *крижаної мантиї* товщиною приблизно 200км

(рис.2.220). Нижче крижаного шару знаходиться рідкий *солоний океан* глибиною понад 10км. Під шаром рідкої води структура надр Калісто відносно однорідна, матеріал *ядра* являє собою спресовану суміш криги та кам'яних порід, причому до центра супутника вміст гірських порід та заліза зростає.

У Калісто немає металевого ядра, а у Іо, Європи та Ганімеда воно існує.

Юпітер та його супутники досліджувалися за допомогою зондів НАСА (США) *Pioneer-11* (проліт); *Voyager-1,-2* (проліт); *Ulysses* (проліт); *Cassini* (проліт) і *Galileo* (1995-2003).

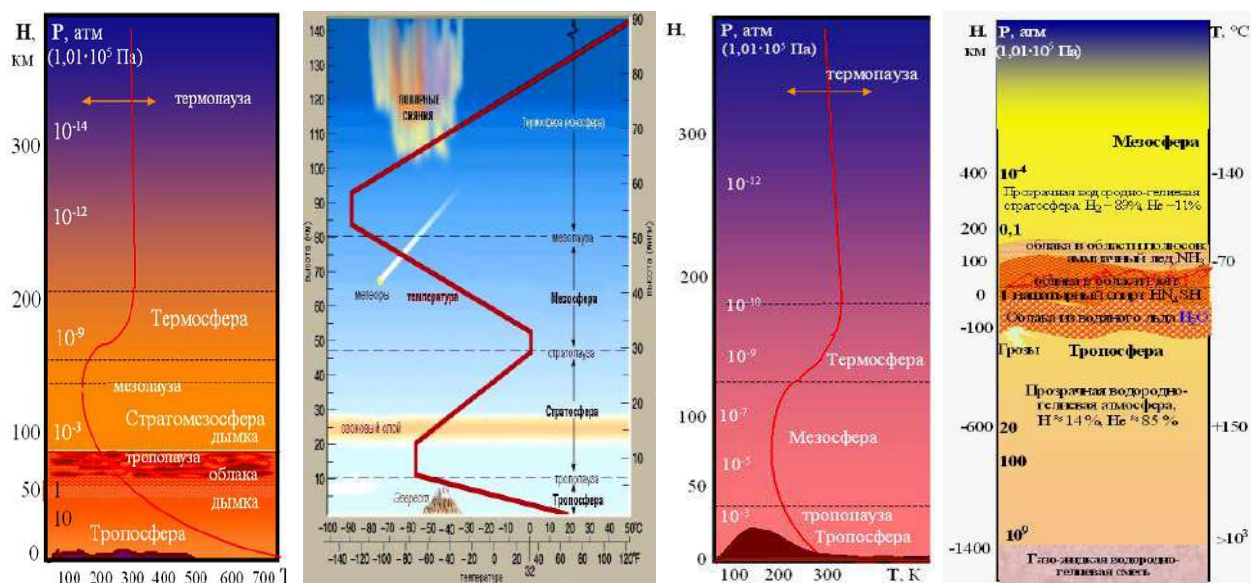


Рис.2.220-1. Схема будови та основні характеристики атмосфери Венери, Землі, Марса і Юпітера.

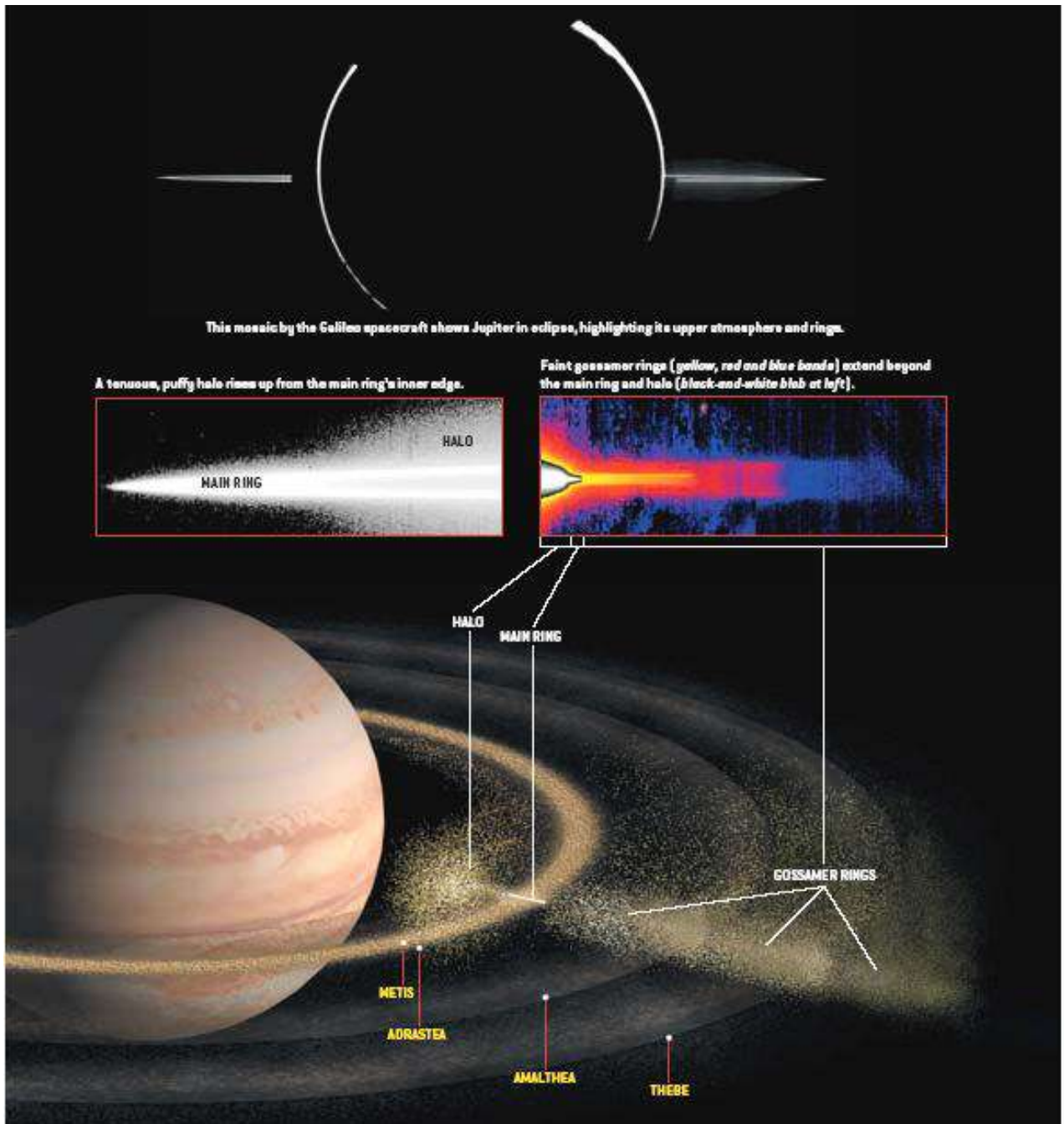


Рис.2.220-2. Схема кілець Юпітера та орбіти обмежуючих кільця супутників

Контрольні запитання

1. Дайте характеристику кільцям Юпітера.
2. Які особливості електричного, радіаційного та магнітного полів Юпітера?
3. Яка модель внутрішньої будови Юпітера?
4. Навести розподіл супутників Юпітера за групами.
5. Які геологічні процеси проходять на Іо?
6. Охарактеризуйте особливості сфер Європи та специфіку процесів на її поверхні.
7. У чому проявляється специфіка вулканізму на Ганімеді?
8. Проаналізуйте основні геологічні процеси на кожному з галілеєвих супутників.
9. Порівняйте основні характеристики галілеєвих супутників Юпітера.

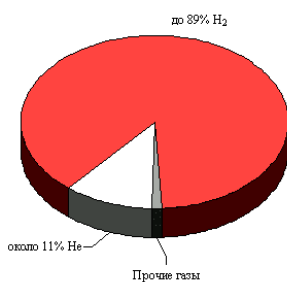
2.2.7. САТУРН

САТУРН – шоста за віддаллю від Сонця і друга за розмірами планета-гігант Сонячної системи, яка обертається навколо Сонця еліптичною орбітою (ексцентриситет 0,056) на віддаль: максимальній (афелій) – 1,513 млрд. км (10,07а.о.) і мінімальній (перигелій) – 1,354 млрд. км (9,01а.о.) за 29,46 земних років із орбітальною швидкістю 9,69км/сек. Діаметр планети 120 536км (у 9,5 разів більший за земний), нахил екватора до орбіти $26,73^\circ$, альbedo 0,47, маса $5,68 \cdot 10^{26}$ кг (у 95 разів більша за масу Землі) при середній густині планети $0,687\text{г/см}^3$, тобто, **Сатурн є легкою газопо-рідинною кулею і планета могла б втримуватися на поверхні води.**



Рис.2.221. Планета Сатурн із системою кілець та затемнення Сонця Сатурном (фото Cassini)

Швидкість обертання надр Сатурна (тривалість доби) 10 год. 47 хв. 6 сек. В обох полярних областях планети – і «під гексагоном» - доба триває 10 год. 39 хв. 22 сек., а на екваторі – 10 год. 33 хв. 59 сек. – тобто, світло-жовтий Сатурн немов би розірваний на частини, які живуть власним життям. Внаслідок швидкого обертання планети і дуже малої густини газу атмосфери



„витискаються” в екваторіальні області і **зовні Сатурн являє собою неправильну кулю, яка сплюснута біля полюсів навіть більше ніж Юпітер** (стискання 1/10), а полярний радіус ($R_{\text{пол}}=54\,364 \pm 10\text{км}$) на 10% (на 6000км) менший за екваторіальний ($R_{\text{екв}}=60\,268 \pm 4\text{км}$).

Рис.2.222. Хімічний склад атмосфери Сатурна

Атмосфера Сатурна потужніша (через його меншу гравітацію) ніж у Юпітера, дуже схожа на юпітеріанську і містить 96% водню (H_2), 3% гелію (He), метану (CH_4) 0,4%, аміаку (NH_3) 0,01%, дейтериду водню (HD) 0,01%, етану (C_2H_6) 0,0007%, ацетилену (C_2H_2) і фосфіну (PH_3), але, через розташування планет на різній віддалі від Сонця, у більш віддаленого Сатурна температура верхніх шарів атмосфери нижча. Аміак і вода утворюють крижані кристали і формують з них тонкий суцільний **хмарний покрив**, під яким розташований, схожий на Юпітера, бурхливий строкатий світ атмосфери з менш контрастними, ніж на Юпітері, ділянками **темнішого** та **світлішого кольорів (пояси та зони відповідно).**

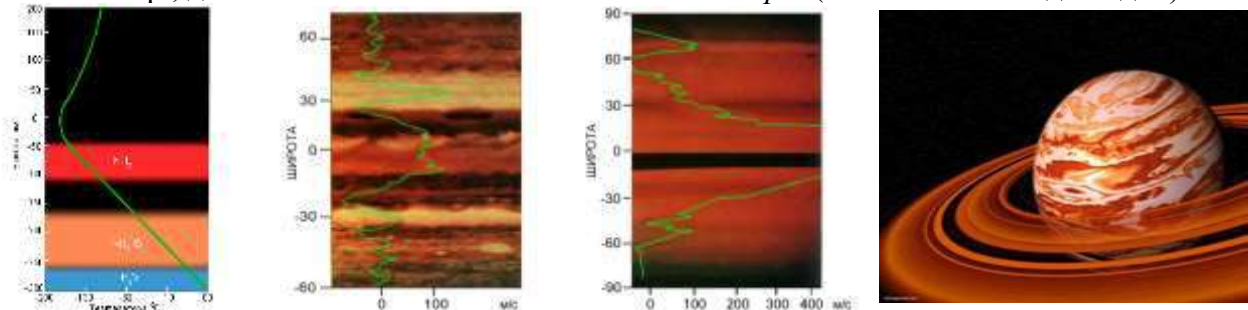


Рис.2.223. Температура та залежність швидкості вітрів від широти у межах атмосфери Сатурна; праворуч – інфрачервоне фото циклонів та вихорів в атмосфері планети (фото Cassini)

Середня **температура** верхніх шарів хмар (-180°C) свідчить про внутрішнє нагрівання за рахунок повільного гравітаційного стискання газового гіганта, так як Сонце не може нагріти атмосферу до такої температури, але температура екваторіальної зони Сатурна нижча ніж на суміжних ділянках, де, мабуть, більша висота хмарного покриву Збільшення тиску з глибиною

в атмосфері зумовлює розподіл гелію та водню в її суміші, формування краплин рідкого гелію та їх випадіння *гелієвим дощем* у напрямі центра планети, що додатково вивільнює енергію, яка і відповідає за надлишок випромінюваної Сатурном енергії. **Сатурн світиться м'яким золотистим сяйвом** в екваторіальних широтах і **блакитним** – у полярних областях.

В атмосфері Сатурна із **сильними вітрами** існують різні *динамічні структури* (струмені, смуги, плями, вихори, блискавки тощо) гігантських розмірів, але на відміну від Юпітера, швидкість **екваторіального струменя** вчетверо вища (500м/с), а його ширина – вдвічі більша. Встановлено, що вітри вихорів, які обрамляють з обох боків *постійні атмосферні потоки*, служать своєрідними „моторами”, які приводять ці потоки в рух і підтримують його, віддаючи свою енергію і втрачаючи власний обертальний момент через підживлення струменів. Розміри **плям** на Сатурні менші, **вихори** - більш ізольовані, займають менші площі і час їх існування всього декілька днів, а їх походження пов'язане з процесами взаємодії атмосфери планети з її внутрішніми областями. На фоні планети виділяються: **Велика біла пляма**, яка існувала протягом декількох місяців, а потім відродилась через три десятиліття; **Велика коричнева пляма** – гігантське овальне утворення розміром із Землю недалеко від північного полюса тощо.

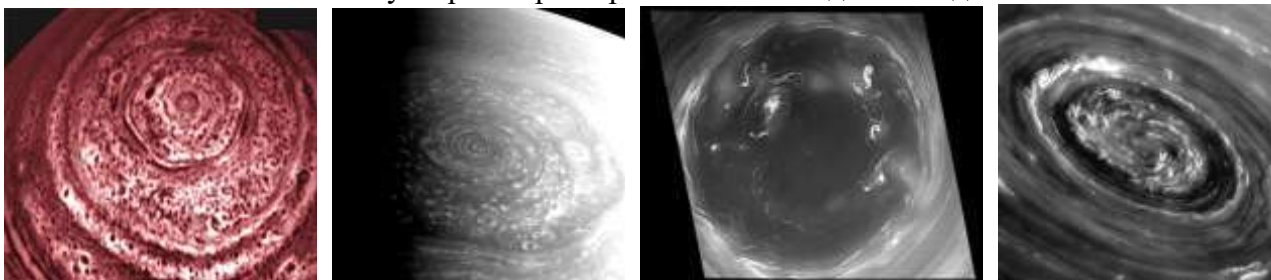


Рис.2.224. Зліва праворуч: 1- інфрачервоне фото атмосферного *гексагона* над північним полюсом; 2- *гексагон* у видимому світлі ; 3- внутрішні області гексагону - „око” - із *конвекційними структурами* транспортування, зокрема, тепла з надр; 4- полярна буря на північному полюсі 27.11.2012 (фото *Cassini*)

Над північним полюсом Сатурна, на 100км нижче тонкого верхнього шару хмар, зонд *Cassini* зафіксував *правильне шестикутне хмарне утворення* – **гексагон** - із довжиною кожної сторони 13 800км та тепловою аномалією у центрі, що обертається синхронно із глибинними шарами атмосфери за 10год 39хв. і, можливо, із внутрішніми сферами планети, а орієнтація осей гексагону не змінилася після прольоту *Voyager* (1980р.). Світлі (в інфрачервоних променях) ділянки гексагону є гігантськими дірками глибиною понад 75км, а глибина «стінок» до 100км.

Дослідження атмосфери в інфрачервоному та видимому світлі також показали дивний *ланцюжок* із понад двох десятків **яскравих „перлин”** в атмосфері північної півкулі Сатурна, які розташовані вздовж 40⁰ північної широти на однакових віддальх між собою у 3,5⁰ по довготі. Вважають, що „*перлове намисто*” утворене ритмічно розташованими **низхідними та висхідними атмосферними потоками**, причому, висхідні потоки формують **хмари**, а низхідні їх руйнують. „*Перлове намисто*” разом із іншими атмосферними феноменами, зокрема, **хмарами у вигляді тороїдів, щільними хмарними смугами** тощо свідчать про те, що у Сатурна атмосфера така ж активна як і у Юпітера і більш, ніж це вважалося раніше.

На осі південного полюса Сатурна, як і на Венері, постійно існує **гігантський вихор-шторм** діаметром до 8000км також із тепловою аномалією та напрямом обертання газів у протилежний обертанню планети бік зі швидкістю понад 150м/сек. (500км/год). „Око” шторму діаметром 4200км відносно вільне від хмарності і оточене зовнішньою „стіною” із хмар висотою 40км (рис.2.226).

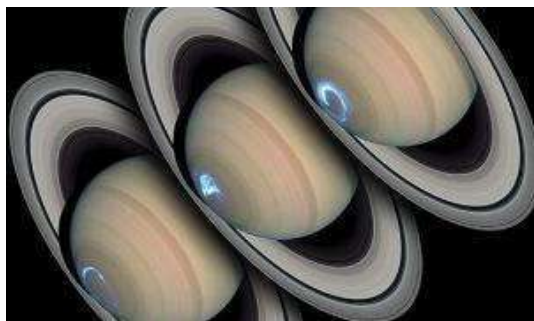


Рис.2.225. *Полярні сяйва* навколо магнітних полюсів Сатурна (колаж фото *Hubble* з інтервалом у 2 дні)

У глибині цієї структури розташована мигдалевидної форми *внутрішня „стіна”* хмар висотою понад 70км та діаметром 2400км, у межах якої

швидкість вітру падає до 70м/сек.. Центр полярного вихору більш темний на фото, що свідчить про незвичайно чисту атмосферу, в якій на таких висотах звично присутні яскраві хмари із гідросульфату амонію чи аміаку.

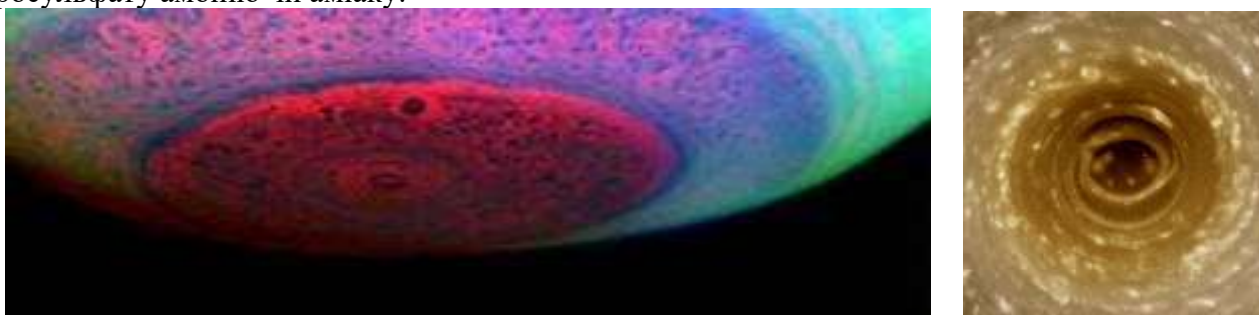


Рис.2.226. Ліворуч: інфрачервоне фото теплового випромінювання ураганного шторму на південному полюсі нічного Сатурна; праворуч: „око” постійного ураганного шторму на південному полюсі Сатурна з тепловою аномалією із висоти 340 тис. км (фото *Cassini*)

Космічний апарат *Cassini-Huygens* (2004р.) відкрив в атмосфері Сатурна **надпотужні блискавки**, які в мільйон разів сильніші за земні (напруга в земних блискавках від ста мільйонів до мільярда вольт) та **полярні сяйва**, які тривають по декілька днів і дуже залежать від інтенсивності сонячного вітру.

Головні відміни між найбільшими і схожими планетами Сонячної системи – Юпітером і Сатурном - наступні: *Сатурн випромінює значно менше тепла ніж Юпітер; має меншу силу тяжіння* (1,13 земної проти 2,64 в Юпітера) і, відповідно, *має більш потужну атмосферу з меншими вітрами*, хоча швидкість вітру на екваторі у верхніх шарах атмосфери досягає 500м/сек., а в середніх широтах – близько 150м/сек., що і зумовлює повний оберт хмар навколо Сатурна над екваторіальною зоною на 26 хвилин швидше, ніж у більш високих широтах; *число поясів та зон в атмосфері Сатурна значно більше, але вони більш вузькі; хмарний покрив на Сатурні більш потужний, його верхня частина спокійніша, у ній менше чітко виражених деталей ніж на Юпітері; хмари складені інеєм і твердими частинками аміаку* (NH₃).

Система кілець Сатурна (послідовно від планети *D, C, B, R/2006 S3, R/2006 S4, A, R/2006 S1, R/2006 S2, F, G, E, суперкілець*) загальним діаметром 480 000км від центра планети робить її одним із найяскравіших об'єктів у Сонячній системі. Це раніше відомі *найбільш яскраві (C, B, A)*, відкриті пізніше *більш вузькі і темні (D, F, G, E)* та відкриті недавно *R/2006 S1, R/2006 S2, R/2006 S3 і R/2006 S4 кільця*. Площина кілець Сатурна нахилена до площини орбіти на 29°. Лінійна швидкість обертання кілець 21,1 і 15,5км/сек. у внутрішній та зовнішній частинах, проходячи тінь від планети частинки кілець охолоджуються – до 15⁰ вище абсолютного нуля.

За рахунок дії сил тяжіння численних супутників, що примушують кільця розщеплюватися, між ними утворюються *проміжки*, які називаються **щілинами** (наприклад **Щілина Кассіні** шириною 4800км між кільцями *A і B*; **Щілина Енке** шириною 325км у межах кільця *A*, що утворилася завдяки супутнику *Пан*, орбіта якого лежить у його площині тощо) (рис.2.295-1).

Раніше вважали, що **Щілина Кассіні** пуста, але *Voyager-2* відкрив в її межах більше 100 дуже тонких, майже прозорих кілець. Відносно невеликі супутники-місяці планети (тіла, розміри яких досягають 10км) досить рідкі і рухаються у системі кілець (їхня назва „*настухи*” і вони гравітацією утримують кільця на своїх орбітах, зокрема, супутники *Атлас і Прометей*, між якими розташоване зовнішнє кільце *F*, не дають можливості розлетітися у космосі його складовим частинкам).

Найближче **кілець D** (рис.2.227) майже прозоре, сягає поверхні хмар Сатурна, його ширина 7490км (в інтервалі 67 000-74 490км від центра планети), складене найменшими серед усіх кілець частинками. Дослідження *Cassini* засвідчили, що за останні 25 років, після першого фотографування кільця *D* міжпланетною станцією *Voyager* (1981р.), деякі частини кільця *D* втратили свою яскравість, а одна із його смуг наблизилася до планети на 200км. Крім того, кільце *D* продовжує змінювати форму – у його зовнішній частині відкрита структура, що схожа на *світлі кільця з пустотами*, які зменшили свій розмір з 60км (у 1995р.) до 30км (у 2006р.).

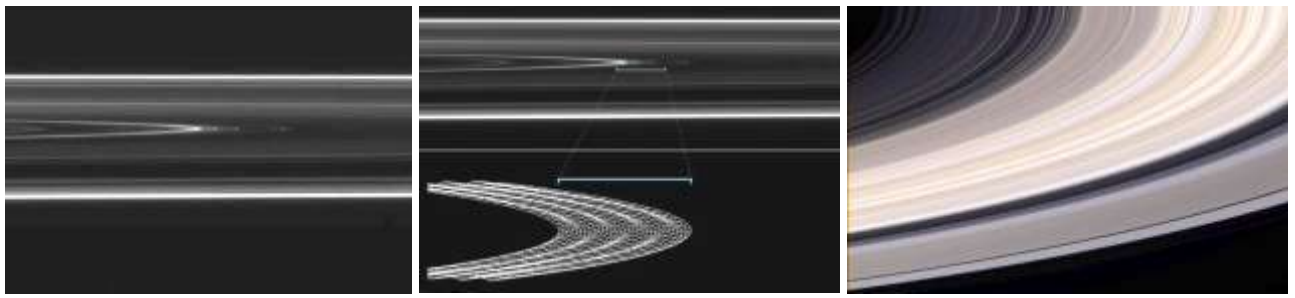


Рис.2.227. Ліворуч: внутрішнє, найближче до Сатурна кільце *D*. У центрі: хвиляста структура в кільці *D* (угорі) та її модель (фото та ілюстрації NASA). Праворуч: загальний вигляд кілець Сатурна (фото *Cassini*)

Крім того, над кільцем існують складені скупченнями мілкою пилу *виступи* від зіткнень частин кільця між собою чи зі „стороннім” метеором. Порівнюючи дані 1995 і 2006рр., вчені вважають, що таке зіткнення могло відбутися у 1984р.

Кільце В найширше (інтервал 91 980-117 500км), найгустіше і найяскравіше із складною внутрішньою структурою («хвилі» і радіальні «шпиці» із мілких частинок, які «зависли» над площиною кільця) (рис.2.228) у порівнянні з простою будовою **кільця А** (інтервал 122 050-136 770км) чи волокнисто-хвилястою структурою ледве помітного із Землі голубого **кільця С** (інтервал 74 490-91 980км). Вважали, що кільця складаються із більш-менш однорідної „хмари” пилу та мілких частинок, але нові дані вказують на групування цих частинок у кільці *В* під дією власної сили тяжіння у щільні грудки, які розділені більш-менш пустими проміжками, тобто *матерія у кільці В розподілена нерівномірно*. Гравітація Сатурна не дозволяє утворюватися в кільцях тілам понад 30-50м, потужні припливні сили планети-гіганта розривають такі грудки на частини і процес їх формування починається знову. Схожі щільні об’єкти вперше були відкриті у яскравому кільці *А*, а тепер їх наявність підтверджена і для кільця *В*, тільки проміжки між ними тут менші і помітити їх складніше: віддаль між окремими грудками декілька метрів.

У **Щілині Кассіні** (інтервал 117 500-122 050км) відкриті нові кільця - *R/2006 S3* і *R/2006 S4* (рис.2.228) та понад 100 тонких кілець. Кільце *R/2006 S3*, шириною біля 50км, має дифузійну структуру, а ширина кільця *R/2006 S4* всього 6км, але його яскравість помітно зменшується протягом всього периметра. Супутники *Атлас* і *Пан* порушують кільце *А* і утворюють у ньому хвилі двох типів: *щільні хвилі* – частинки речовини кільця коливаються у площині диска і утворюють ділянки згущення та розрідження, які, відповідно, не пропускають та пропускають світло; *спіральні хвилі* – спричинені нахилом орбіт супутників по відношенню до площини кільця, коли гравітація супутників штовхає частинки кільця вгору і вниз та утворює в межах кільця багатокілометрові хвилі. Крім того було встановлено, що кільце *А* постійно викидає в космос потоки пилу розміром від 2 до 50 нанометрів із швидкістю понад 100км/сек. Ці заряджені сонячною енергією мікроскопічні частинки відхиляються магнітним полем Юпітера і потім під впливом електромагнітних сил немовби вистрілюються у космос. Цей потік уперше детектори КА *Cassini-Huygens* зафіксували ще на віддалі 70 млн. км від Сатурна.

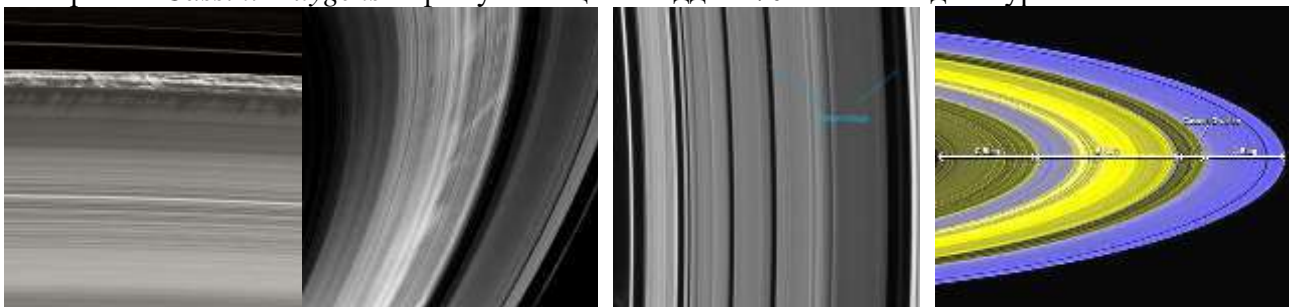


Рис.2.228. Ліворуч: незалежні між собою *хвильоподібні коливання* (як від руху *Мімаса* орбітою, так і від проходження галактичних хвиль) зовнішнього краю кільця *В* та його «шпиці» (витягнуті у магнітному полі Сатурна по радіусу кільця *В* поперечні смуги із наелектризованого сонячним вітром дрібного крижаного пилу). *Щілина Кассіні* між кільцями *А* і *В* з двома новими, непоміченими *Voyager-2*, кільцями (у центрі). Праворуч: внутрішня структура кілець Сатурна *С*, *В* і *А* із детальною картиною щільного заповнення кільця *В* згустками речовини (фото *Cassini*)

Завдяки унікальному положенню *Cassini* (у тіні від закритого Сатурном Сонця, рис.2.221) між кільцями *A* і *F* було відкрите нове тьмяне кільце ***R/2006 S1***, яке коорбітальне із супутниками *Янус* та *Епіметій*. Через тиждень на фотографіях було відкрите ще одне кільце (***R/2006 S2***), яке співпадає з орбітою супутника *Палена*, відкритої *Cassini* у 2004р.

Кільце *F* розміщене на віддалі 140 224км від центра планети, складене із двох переплетених кілець (завдяки гравітації *Прометей* - внутрішнього і *Пандори* - крихке (дірчастий лід) крижане тіло з низькою густиною та покритою мілким зернистим крижаним матеріалом поверхнею із не менше ніж 2-а великими кратерами діаметром 30км - зовнішнього супутників-„пастухів”), має ширину 30-500км і від кільця *A* відокремлюється **Щілиною Піонера** шириною до 3000км



Рис.2.229. Ліворуч: супутники *Прометей* (на кільці *F*) та *Пандора* серед крижаних частинок кільця *F*. У центрі: *Діона* перед Сатурном, *Тефія* і *Мімас* – праворуч, *Енцелад* і *Рея* – ліворуч, а *Титан* – угорі на своїй віддаленій орбіті (монтаж фото *Voyager-1*). Праворуч: гладенькі та покриті мілкими борознами ділянки поверхні серед кратерів та горбів 30-кілометрового айсберга-супутника *Єлени*, яка розміщується попереду *Діони* в стабільній точці Лагранжа системи Сатурн–*Діона* (фото *Cassini*)

Сумісний вплив зовнішніх супутників-„пастухів” *Прометей* і *Пандори* заганняє частинки кільця *F* у вузьку область хаотичних орбіт і фактично кільце *F* являє собою спіраль (рис.2.230).

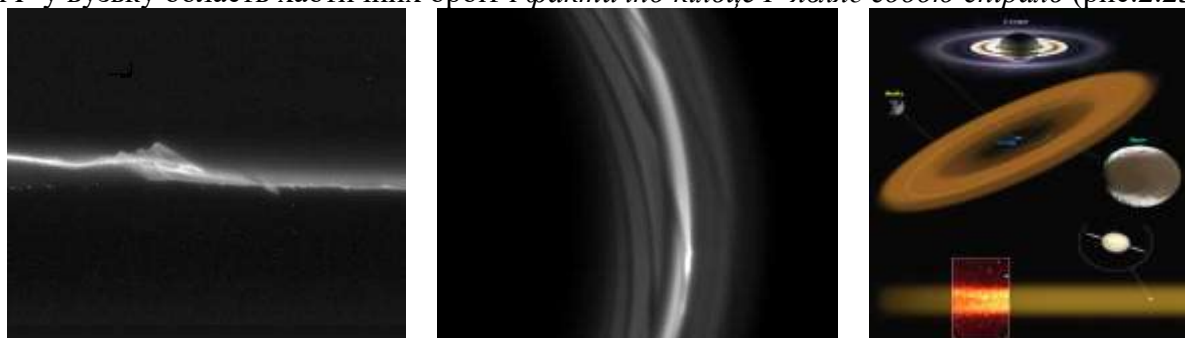


Рис.2.230. Гравітаційні збурення («гори» 4км висотою) у кільці *F* при прольоті супутника *Прометей* та структура цього кільця (фото *Cassini*). Праворуч: **суперкільце** Сатурна (інт. 6-18млн.км над поверхнею, товщина кільця понад 2 млн. км, кут нахилу 29° до площини решти кілець), унизу – загальний вигляд суперкільця з ребра та фрагмент його інфрачервоного фото *Spitzer* (ілюстрація NASA/JPL – Caltech/Keck)

Коли *Прометей* рухається дещо еліптичною орбітою з періодом 14,7 години і періодично наближається до кільця *F*, в останньому з’являються і потім зникають направлені до супутника прямолінійні утворення у вигляді слабкого шлейфу. На фото *Cassini* видно, що у такі моменти *Прометей* перекачує собі речовину з кільця *F* і нарощує власну масу та створює перепади в густині кільця *F* - формує спіральні „закручення”, вузли, хвилі і звивисті петлі у самому кільці.

Кільце *G* розташоване значно далі (інтервал 165 800-173 800км від центра планети) і має яскраву „дугу”. У середині кільця *G* розміщений міні-супутник діаметром всього 650м.

Зовнішнє найрозрідженіше та найширше з усіх **кільце *E*** (інтервал 180 000-480 000км) має яскравий блакитний колір, що свідчить про субмікронний розмір його складових порошинок, які відбивають блакитну частину діапазону світла і воно створене крижаними фонтанами супутника Сатурна – *Енцелада*. Більші за розмірами частинки кільця, що відливають червоним, захоплені гравітацією супутників.

Нове дуже розріджене **суперкільце** (рис.2.230) Сатурна із зовнішнім діаметром 72 321 600км було відкрите телескопом *Spitzer* (2009р) у межах орбіти *Феба*, яка ділить суперкільце пополам,

за інфрачервоним світінням нагрітого до 80^0K (-193^0C) його складового мікроскопічного пилу і крижинок. Кільце обертається (як і *Феба*) у протилежний бік ніж сам Сатурн із рештою його кілець та супутників. **Кільця Сатурна складені із тисяч більш мілких кілець.**

Проведені дослідження вказують на наявність у кільцях Сатурна *власної атмосфери* із *молекулярного кисню*, густина якої близька до густини атмосфер супутників Юпітера - *Ганімеда* і *Європи*, а це теоретично значно більше, ніж можуть утримати кільця. Таким чином, **атмосфера кілець – динамічне утворення: одночасно із розсіюванням у космічному просторі відбувається її постійне поповнення за рахунок випаровування крижаних частинок та розкладання водяної пари під дією ультрафіолетового випромінювання Сонця (процес фотодисоціації) на кисень та водень.** Леткий водень швидко покидає сферу тяжіння Сатурна, а кисень затримується у площині кілець.



Рис.2.231. Ліворуч: найвіддаленіше нове (виділене плюсом) кільце *E* з видимими довгими – на десятки тисяч кілометрів – викидами речовини *гейзерами* з *Енцелада* (у центрі), яка формує це кільце Сатурна (фото *Cassini*). Праворуч: за новими даними, складові частинки кілець у вигляді пухнастих сніжків регулярно скупчуються у великі *пористі грудки* (мікромісяці, розміри $30 \times 50\text{м}$) та швидко руйнуються, щоб дати матеріал новим „мікромісяцям-кішкам” (ілюстрація *NASA/JPL/University of Colorado*)

Нові спостереження *Cassini* підтвердили, що **кільця Сатурна існують майже стільки ж, скільки існує Сонячна система, але їх формування ще не закінчилося, деякі кільця можуть зникати і відроджуватися знову.** Цей процес пов'язують з геологічною активністю супутників планети, які постачають у космос речовину для формування або нарощування кілець. Крім того, мілкі супутники мають слабку гравітацію і не можуть утримувати на своїй поверхні частинки речовини, які при метеоритному бомбардуванні попадають на орбіту Сатурна і поступово формують розсіяні кільця вздовж траєкторії супутників.

Товщина кілець Сатурна від 10 до 20м, розміри більшості складових частинок, в основному, від 1 до 5см, але в кільцях є і більш крупні об'єкти – кам'яні брили до сотень метрів уперек. Швидкість обертання всіх частинок навколо Сатурна біля 10км/сек., між собою сусідні частинки повільно переміщуються у різних напрямках зі швидкістю 1-2мм/сек. У кільці *C* та у зовнішній частині кільця *A* переважають уламки менше 5см, але у внутрішній частині кільця *A* і у кільці *B* їх дуже мало, проте в них багато нових хвиль згущення речовини (дані *Cassini*). Центральна частина кільця *B* (шириною 5000км) вміщує декілька окремих смуг із матеріалу, що майже в 4 рази більш щільний за матеріал кільця *A* і майже в 20 разів – ніж у кільці *C*.

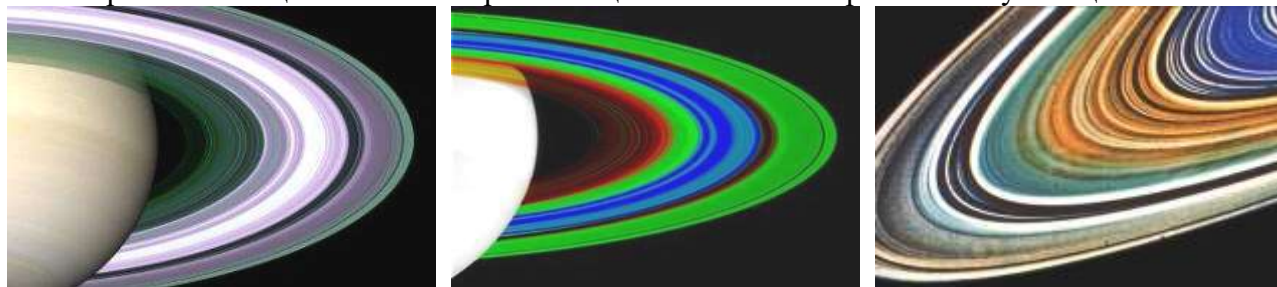


Рис.2.232. Ліворуч: визначення розмірів складових частинок кілець *Сатурна* методом просвічування радіохвилями (зелений колір на краях диску – частинки до 1см, бузковий більшості зовнішньої частини – довжиною понад 5см, білий у центрі – розміри частинок не визначені через їх велику щільність у кільці). У центрі: кольорове фото кілець Сатурна (кольорами виділені різні температури ділянок кілець: від -230^0C біля Сатурна до -220^0C у середині) (фото *Cassini*). Праворуч: слабкі кольорові відмінності між кільцями Сатурна відображають різний хімічний склад кілець (кольори посилені) (фото *Voyager-2*)

Мільярди мілких складових частинок кілець рухаються навколо Сатурна власними майже коловими орбітами, причому явна їх більшість являє собою *різні за складом яскраві кусочки криги*, що добре розсіюють світло, але деякі області кілець складені *космічним пилом*.

Аналіз нових даних *Cassini* свідчить, що частинки кілець Сатурна, скоріше за все, є пухнастими сніжками, ніж щільними крижинками, як це вважалося раніше, а за рахунок рециркуляції речовини кілець (рис.2.229) вони мало „забруднені” відносно темним пилом.

Походження та еволюція кілець залишається невирішеною; вважають, що частинки кілець є рештками допланетної хмари, з якої утворилися всі тіла Сонячної системи, але ці частинки не були піддані злипанню та нагріванню. Дані *Voyager-2* посилили інтерес до альтернативної (імпаکتної) теорії утворення кілець, згідно з якою речовина кілець – це рештки великих супутників, які зруйновані метеоритним бомбардуванням. Внутрішні супутники могли бути неодноразово розбиті на окремі фрагменти, які потім знову могли злипатися. Можливо, що самі кільця якраз і є уламками, які пізніше не об'єдналися. Частина речовини кілець складена продуктами специфічної вулканічної діяльності на супутниках Сатурна.

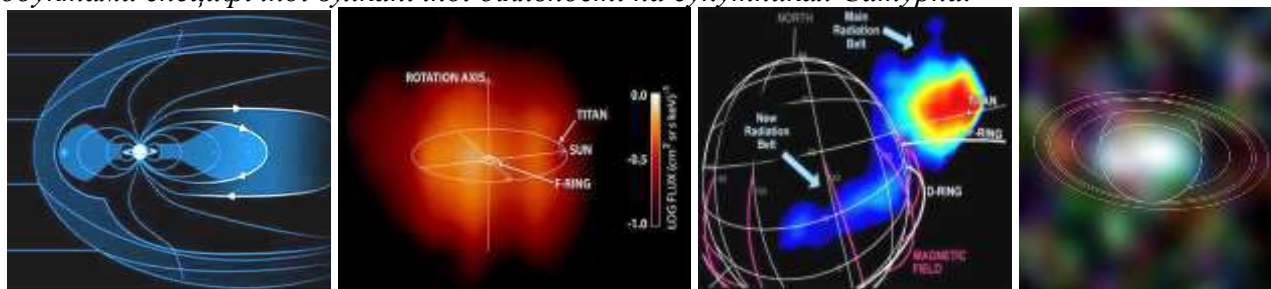


Рис.2.233. Зліва праворуч: схема магнітосфери Сатурна; фото повної магнітосфери Сатурна; новий радіаційний пояс у межах кілець Сатурна; рентгенівське випромінювання Сатурна близьке до сонячного і зосереджене у районі екватора планети, а кільця планети зовсім не проявляються у рентгенівському діапазоні хвиль (на рентгенівське фото *Chandra* для ясності накладені контури Сатурна в оптичному діапазоні) (фото *Cassini*)

Навколо Сатурна існує **магнітосфера, магнітне поле і радіаційні пояси**, але вони менш потужні ніж у Юпітера. Якщо магнітосфера Сатурна за формою та динамікою схожа на юпітеріанську (рис.2.233), то плазма між магнітними силовими лініями має принципово інший склад: тут вона складена іонізованими молекулами води і цим нагадує плазму навколо ядер комет. Магнітосфера планети з сонячного боку фіксується на віддалі 1,5 млн. км від планети, з нічного боку вона витягнута на відстань до 6 млн. км і залежить від потужності сонячного вітру, а за структурою вона подібна до магнітосфери Землі. Вісь магнітного поля співпадає з віссю обертання, центр диполя - з центром мас Сатурна, а напруга на екваторі на рівні хмар 0,2 гауса (57% земної) і воно поділяється на поля від *зовнішніх та внутрішніх джерел*.

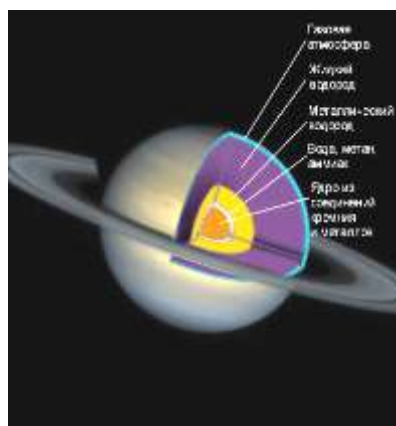


Рис.2.234. Внутрішня сферична будова Сатурна

Магнітне поле планети направлене вздовж осі її обертання. У зовнішній магнітосфері, за межами десяти радіусів Сатурна, магнітне поле вже не є симетричним відносно планети. Зовнішні джерела утворюють шар плазми високої густини, а також групи захоплених енергетичних частинок, які активно взаємодіють із внутрішніми супутниками та кільцями. Якщо на Землі процеси магнітосфери черпають свою енергію від сонячного вітру, а на Юпітері від обертальної енергії системи планети, то магнітосфера Сатурна займає проміжне положення, хоча ззовні (за своєю структурою) вона схожа на магнітосферу Землі. Сатурн випромінює слабкі радіохвилі, що свідчить про наявність біля планети *нового* (крім головного, межі 139 000-362 000км від центра Сатурна) *радіаційного поясу*, який відкрила станція *Cassini* (2004) у межах кілець планети (рис.2.233), що стало для вчених несподіванкою.

Сферична будова планети (рис. 2.234) допускає, що потужність *атмосфери* Сатурна біля 1000км, а під нею приховані *два шари рідкого водню*: першим є *глобальний океан* рідкого молекулярного водню у суміші з гелієм. Нижче, з глибини 0,46 радіуса Сатурна (біля 30 тис. км, де температура підіймається до +10 000°C, а тиск до 3 тис. Мпа.) і до його ядра, залягає шар рідкого *металізованого водню*, в якому і виникають, при обертанні планети навколо осі, *електричні струми*, що утворюють магнітосферу Сатурна. У центрі планети, за однією із моделей будови, під величезним тиском при температурі +20 000°C знаходиться *розплавлене силікатно-металеве ядро* радіусом близько 0,3 радіуса Сатурна, що обертається з періодом 10 год. 45,75 хв. і підігріває всю планету та її атмосферу, або, за іншою моделлю, *ядро є великою сферою із гірських порід і криги* (із H_2O , CH_4 і NH_3 з модифікованими кристалічними ґратками), маса якого до 20 мас Землі.

Загальна кількість відомих супутників Сатурна досягла 82 (2019р.).

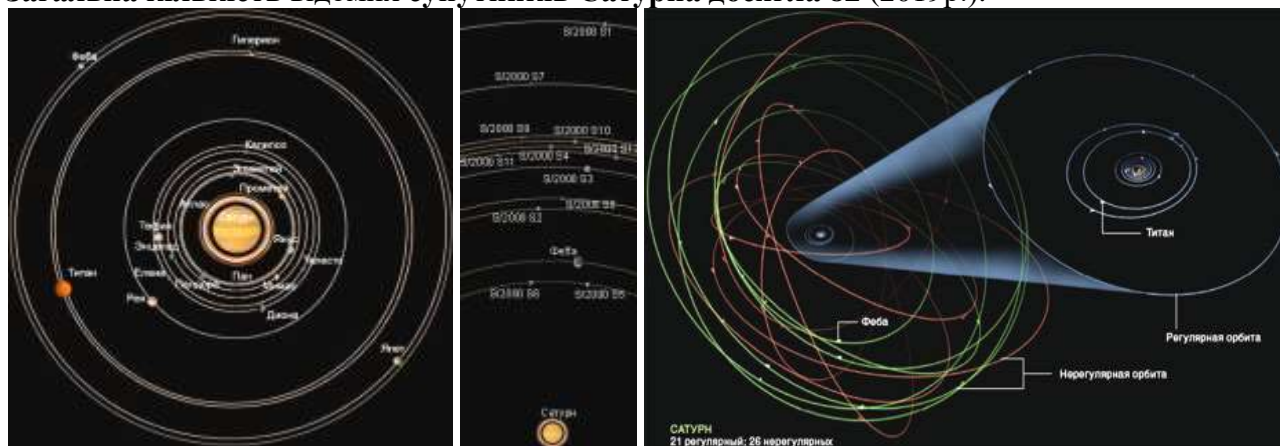


Рис.2.235. Внутрішні (ліворуч) та зовнішні (у центрі) супутники *Сатурна* та їх траєкторії (праворуч)

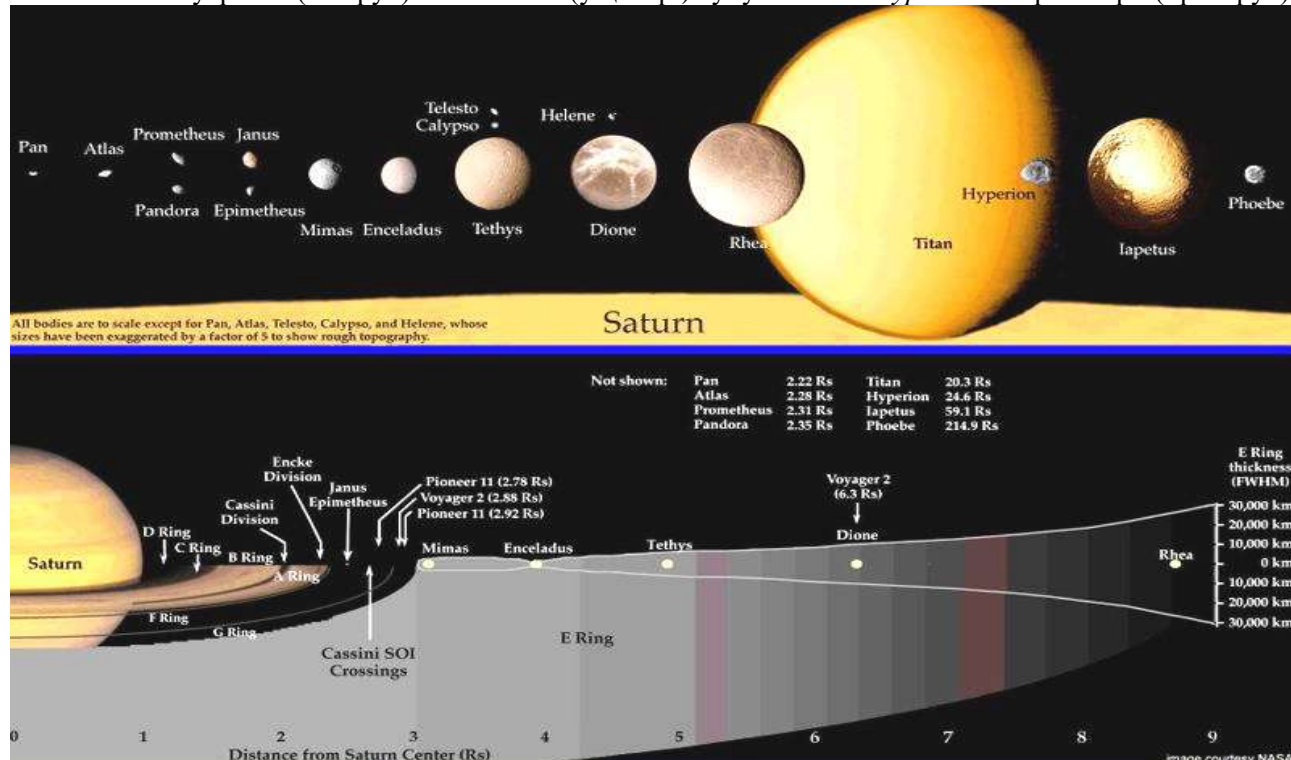


Рис.2.236. Розташування системи супутників *Сатурна* у межах кілець (за даними NASA)

Нові супутники, відкриті японськими вченими в 2009р., являють собою космічні тіла неправильної форми діаметром від 3 до 7км, які були захоплені тяжінням Юпітера і Сатурна із поясу астероїдів. Версію про захоплення підтверджує велика витягнутість та надзвичайно великий – близько 20 млн. км – діаметр їх орбіт і те, що 11 із 12 тіл обертаються навколо планети у напрямі, протилежному обертанню „основних” супутників.

Попередню групу супутників Сатурна відкрив *Cassini*, зокрема у 2004р. *Cassini-Huygens* відкрив новий супутник – **Полідевкт** - діаметром біля 5км на відстанях 141 тис. км від Сатурна і 1000км від зовнішнього краю кільця *F* та за 300км до орбіти *Пандори*. Полідевкт рухається у гравітаційно стабільній лагранжевій точці лібрації тією ж орбітою, що і *Діона*. У 2005р. *Cassini* відкрив ще один супутник Сатурна - *S/2005 S1* – діаметром 7км, який знаходиться на віддалі 136 505км від планети у щілині *Кілера* та на віддалі 250км від зовнішнього краю кільця *A* і є другим (крім *Пана* у щілині *Енке*) розміщеним безпосередньо у межах основних кілець супутником. Пізніше були відкриті **Мефона**, **Палена** і **Френка** (рис.2.237).

Супутники Сатурна

Назва супутника	Радіус, розміри (км)	Період обертання	Віддаль (мінімальна і максимальна), км	Густина (г/см ³)
Пан	10	13год48хв	колова орбіта 133 570	-
Атлас	40(?)×30	14год27хв	137 230 - 138580	-
Прометей	148×100×68	14год43хв	139 070 – 139 670	-
Пандора	110×88×62	15год 06хв	141 130 – 142 270	0,6
Епіметій	135×108×105	16год41хв	150 060 – 152 790	-
Янус	220×190×160	16год41хв	150 410 – 152 530	-
Мімас	199	22год37хв	181 810 – 189 230	1,17
Енцелад	250	32год52хв	237 070 – 238 970	1,24
Каліпсо	530	45 год19хв	колова орбіта 294 660	1,26
Телесто	35×39×25	45 год19хв	колова орбіта 294 660	-
Тефія	35×20×20	45 год19хв	колова орбіта 294 660	-
Діона	560	2доби17,5год	колова орбіта 377 400	1,44
Єлена	36×32×30	2доби17,5год	373 630 - 381 170	-
Рея	764	4доби 12,5год	колова орбіта 527 100	1,24
Титан	2575	15діб 22,4год	1 185 190 - 1 258 500	1,88
Гіперіон	360×250×225	21доба 07год	1 332 990 - 1 629 210	-
Япет	1494×1498×1425	79діб 08год	3 454 460 – 3 668 140	1,27
Ківіок	8	453 доби	9504 850 - 13 234 030	
Іджирак	7	453 доби	7 208 240 - 15 530 650	
Феба	110	550 діб	10 685 400 - 15 218 600	-
Паліак	12,5	683 доби	8 048 370 - 21 871 210	
Скаді	4	712 діб	12 157 370 - 18 659 790	
Сіарнак	22,5	804 доби	11 457 700 - 21 7530 030	
Альбіорікс	15	887 діб	11 019 530 - 24 584 760	
Сутгунг	3,5	880діб	16 146 550 – 19 457 750	
Тарвос	8	899 діб	6 534 440 – 29 369 050	
Еррипо	5	906 діб	6 878 510 – 29 324 170	
Мунділфарі	3,5	928 діб	13 432 390 – 23 368 680	
Трюм	3,5	1037діб	9 969 200 – 30 721 420	
Імир	10	1326 діб	14 352 450 – 32 322 120	

Таким чином, у **систему Сатурна** входять: **Титан** – єдиний супутник у Сонячній системі з власною потужною складною атмосферою, який можна порівняти з великими супутниками Юпітера; **8 супутників** – тіла із силікатно-крижаними надрами та крижаними поверхнями, які добре видно із Землі і для яких за допомогою *Voyager-1,-2* отримані геологічні дані і **решта супутників** – малі космічні об'єкти, які відкриті або *Voyager-1,-2*, або за допомогою телескопічних спостережень, що були виконані в той час, коли кільця Сатурна було видно на Землі з ребра і розсіяне ними сонячне світло не створювало перешкод. Серед нових супутників, відкритих *Voyager*, були так звані *супутники-“пастухи”*, що своєю гравітацією утримують

кільця на місці. Періоди обертання і радіуси кожної з трьох груп супутників Сатурна – коорбітальних *Телесто*, *Тетії* і *Калінсо*; *Діони* та *Слени*; *Януса* і *Епіметія* – однакові.

Усі супутники Сатурна, крім *Гіперіона* та *Феба*, обернені до планети одним боком, а супутники *Рея*, *Анфа* (діаметром 2км) і *Мефона* (3км) оточені власними кільцями.



Рис.2.237. Ліворуч: пористий крижаний супутник-«пастух» *F*-кільця *Пандора* (110×88×62км, густина 0,6г/см³, альbedo 0,6) з двома ударними кратерами до 30км діаметром. У центрі: супутники *Прометей* – крихітна крапка усередині *F*-кільця і *Діона* – ліворуч унизу. Праворуч: яскравий і великий *Мімас*, відкриті *Cassini* малі супутники *Мефона* і *Палена* та нововідкритий *Френка* (S/2007 S4) (фото *Cassini*)

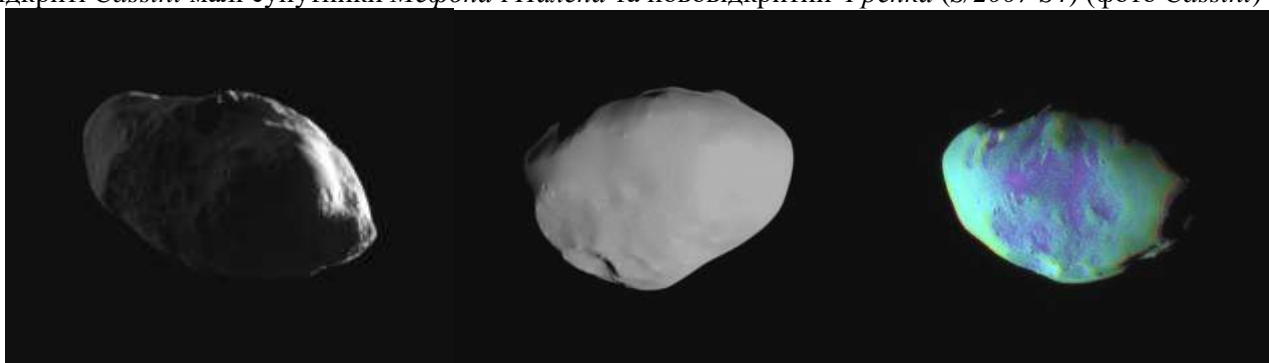


Рис.2.238. Супутник-«пастух» *Прометей* (густина 0,6г/см³, альbedo 0,6, ударні кратери до 20км) постійно вказує довгою віссю на Сатурн (ліворуч); крижаний пил на поверхні *Телесто* (фото *Cassini*)

2.2.7.1. ЯПЕТ

ЯПЕТ третій за величиною (діаметр 1495км) – після Титана та Реї - і найбільш таємничий із супутників Сатурна, який обперезаний по екватору **гірським хребтом** (його довжина 1300км, ширина до 160км, висота майже 20км) з трикутною морфологією схилів із нахилами до 40°. Гірський хребет має екзогенне походження і, ймовірно, є частиною того матеріалу кільця, яке утворилося одночасно із супутником та пізніше під дією гравітації випало на його поверхню.

Орбіта Япета радіусом 3561тис. км нахилена під кутом 15,5° до площини екватора планети, в якій обертається більшість великих супутників Сатурна, має прецесію („покачується”) з амплітудою до 7,5°. Період обертання Япета орбітою 79,3 доби.

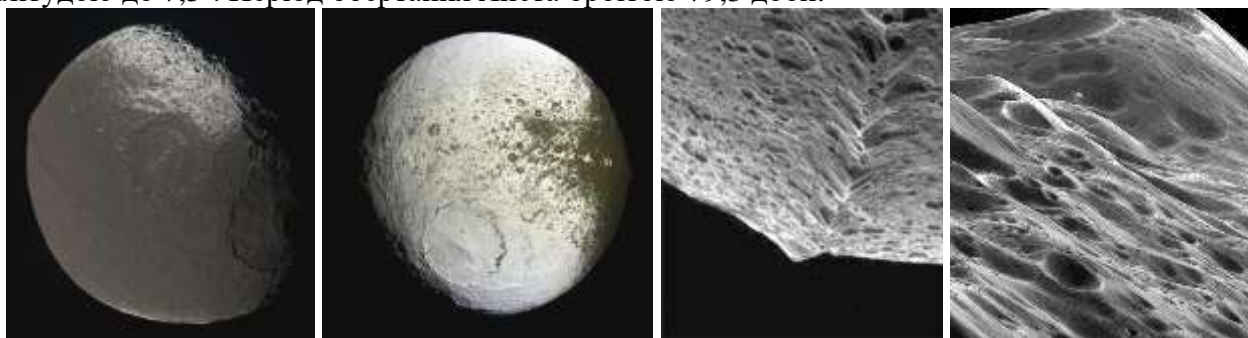


Рис.2.239. Зліва праворуч: передня чорна та зворотна біла, з ударними кратерами *Engelier* (504км) та *Gerin* (445км), півкулі супутника Сатурна *Япета*, який обперезаний по екватору гірським хребтом.. Гірський хребет крупним планом (фото *Cassini*)

Існують різні версії утворення хребта: він утворився у результаті швидкого обертання небесного тіла ще в епоху його формування під дією приливних сил з боку *Юпітера* на ще

гарячі і рідкі надра молодого Япета із різким уповільненням його обертання і швидкою зміною форми із утворенням надлишкової „кірки” в районі екватора, що підтверджується великим сплюсненням Япета, чи хребет складається із виверженої речовини надр або формування гірської гряди відбулося за рахунок повільного випадіння на поверхню зібраних супутником у минулому уламків давніх кілець Сатурна, коли його орбіта проходила в їх площині.

Густина Япета $1,2\text{г/см}^3$, що істотно нижче за густину інших супутників та відповідає густині брили водяної криги тисячокілометрового розміру. Япет має одну **яскраво білу** (Область Кассіні – *Cassini Regio* – із альбедо 0,5) і другу – **чорну** (Земля Ронсельвадська – *Ronsevaux Terra* - із альбедо 0,03-0,05 та температурою -146°C) **півкулі** із досить чіткою межею між ними та без будь-якої різниці у внутрішній будові. Первинний колір супутника – білий і ця крижана частина його поверхні покрита **кратерами**, а чорна речовина є більш пізнім утворенням – осадженим пиловим матеріалом **суперкілля** (рис.2.230). За даними радіолокації із Землі та із борту *Cassini* потужність збагаченого **вуглецем** (велика кількість органічних з'єднань, яких також багато на найбільшому супутнику Сатурна – Титані) темного покриття біля 20см.

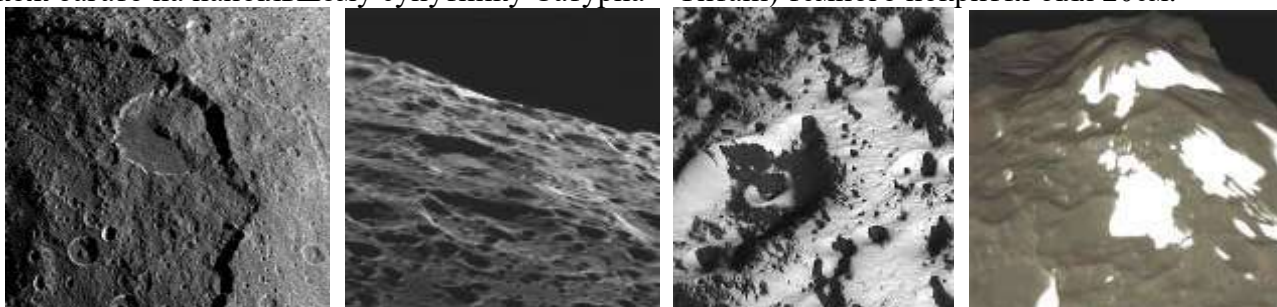


Рис.2.240. Зліва праворуч: великий зсув у *Cassini Regio* шириною 60км у малому кратері (120км) біля стінки висотою 15км великого 580-кілометрового ударного кратера *Turdis*; протяжність зсуву заставляє допустити, що ґрунт у цьому місці дуже пухкий і дрібнозернистий, а причиною формування зсуву міг бути невідомий механічний процес. Зсуви – загальне геологічне явище на усіх тілах Сонячної системи. Кратеризована поверхня Япета. Ландшафт в області переходу між півкулями Япета. Один з найвищих піків екваторіального гірського хребта Япета (фото *Cassini-Huygens*)

Ймовірно, що ця темна речовина – шар вибитого з поверхні Феба *пилу* (або з інших, ще не відкритих супутників, які рухаються орбітами у зворотному напрямі), чи *продукти вулканічної діяльності* на Фебі, які дрейфують під впливом гравітації до Сатурна через орбіту Япета і осіли на поверхні цього, завжди оберненого у напрямі його орбітального руху навколо Сатурна, боку супутника. Але цій гіпотезі суперечить різкий контраст червонуватої поверхні Феба з чорною речовиною Япета. Можливо, це *основна речовина надр* супутника, яка *ендогенними процесами* (наприклад, гляціовулканізмом) була винесена на його поверхню, де її сконцентрували *екзогенні процеси*. У цьому випадку походження речовини, ймовірно, зумовлене геологічним процесом, що утворив екваторіальний хребет Япета.

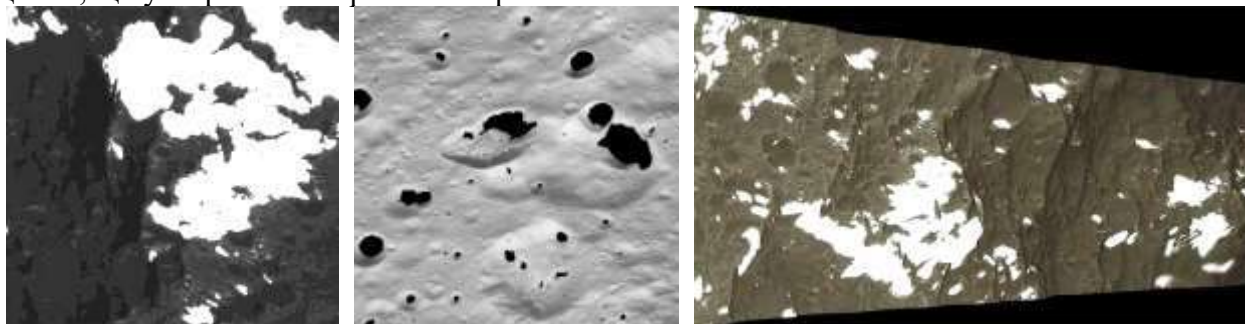


Рис.2.241. Зліва праворуч: ділянки чорних, збагачених вуглецем, відкладів мають чіткі межі і накладені на білу крижану поверхню Япета та екваторіальний гірський хребет Япета (фото *Cassini*)

Після проведених *Cassini* досліджень у системі кілець Сатурна зараз вчені вважають, що Япет зруйнував одне з цих кілець, а його рештки осіли на поверхні супутника у вигляді валу 13-кілометрової висоти. Відсутність перехідної „сірої” зони (перемішування різних шарів при

падінні метеоритів) між цими півкулями пояснюють *термосегрегацією* – випаровуванням частинок білої криги на більш нагрітій поверхні темної речовини чорної півкулі із утворенням навколо Япета розрідженої „парової” атмосфери, яка в свою чергу частково конденсується над дещо холоднішою білою півкулею і робить її більш білою та покриває на ній мілкі частинки „сажі”, які вибиті метеоритами з темного боку супутника.

2.2.7.2. ТИТАН

ТИТАН – *другий за величиною у Сонячній системі* (після юпітеріанського Ганімеда) *супутник* радіусом 2576км (він більший за Меркурій та карликову планету Плутон) робить один оберт навколо Сатурна зі швидкістю 5,58км/сек за 16 діб на середній віддалі 1 221 870км, має нахил осі обертання 27° , прискорення вільного падіння $1,3584\text{м/сек}^2$, густину $1,9\text{г/см}^3$, масу $1,35 \times 10^{23}\text{кг}$ і є *другим* (після Тритона) *супутником у Сонячній системі із щільною, покритою хмарами, атмосферою та другим космічним тілом* (після Землі) *із рідкими водоймами на поверхні*.

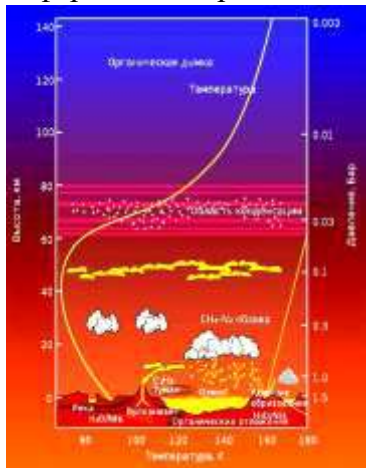
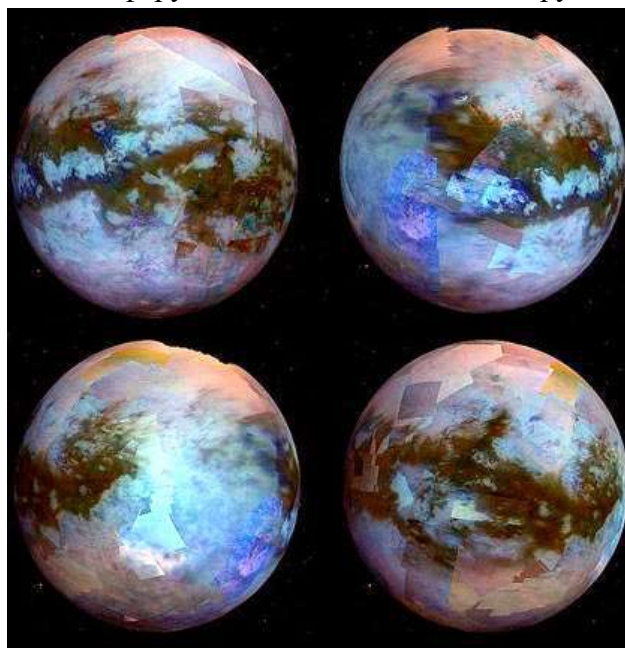


Рис.2.242. Зовнішній вигляд найбільшого супутника Сатурна *Титана* та невеликого *Теміси* (фото *Cassini*)

Безкиснева атмосфера Титана (основна потужність 400км) – N_2 в середньому 98,4%, біля поверхні 95%; CH_4 в середньому 1,6%, біля поверхні 5%; сліди *етану*; *ді-*, *метил-* і *ціаноацетилену*, *пропану*; *аргону*, CO і CO_2 , *аміаку*, *гелію* - густіша за атмосферу будь-якої із планет земної групи (крім Венери), її тиск біля поверхні складає 1,5 атмосфери (146,7кПа), ззовні вона має **зеленкуватий відтінок** і завдяки малій гравітації простежується над поверхнею Титана аж до висоти 1270км, а потужність частини атмосфери, що поглинала рентгенівські промені при перекриванні Титаном Крабовидної туманності, складала 880км.

Рис.2.243. *Титан* (інфрачервона фотомозаїка *Cassini*)

На висоті біля 300км в атмосфері існує *шар аерозолів* із кольорових полімерних з'єднань з великими молекулярними масами – *толінів* - із „уламків” молекул метану, що зруйновані ультрафіолетовим випромінюванням Сонця. Атмосфера Титана виникла не при внутрішній диференціації речовини надр, а має імпактне



походження в епоху «пізнього метеоритного бомбардування» (біля 4млрд. років тому). На Титані **небо оранжевого кольору**. Маса атмосфери Титана в 10 разів переважає масу атмосфери Землі, причому атмосфера виділяє у космос атомарний і молекулярний *водень*, *азот* та *інші з'єднання*. Азоту в атмосфері Титана в 15 разів більше, ніж на Землі. Ізотопний склад азоту (N_2) на Титані різко відрізняється від ізотопного складу земного азоту – в атмосфері Титана відношення вмісту ізотопів $^{15}\text{N}_2/^{14}\text{N}_2$ утричі перевищує земні відношення і в 6 разів більше по відношенню до Юпітера (його ізотопи збереглися у початковому стані).

Рис.2.244. Будова атмосфери *Титана*

Якщо земна атмосфера зазнала значних втрат, то втрати атмосфери Титаном повинні бути катастрофічними, адже гравітація на Титані складає тільки 1/7 земної, проте завдяки низькій температурі атмосфера утримується замість того, щоб подолати відносно слабку гравітацію і розсіятися у космосі. В атмосфері Титана **grimлять грози**, а *електрична активність атмосфери сприяє формуванню попередників життя – органічних молекул*.

Свого **магнітного поля Титан не має**, але більша частина його орбіти пролягає у межах потужної магнітосфери Сатурна, яка і захищає атмосферу свого супутника від сонячного вітру.

Метанові аерозолі щільної суцільної **оранжевої хмарності** Титана поглинають майже все світло Сонця (поверхні досягає 10% світла), але пропускають з поверхні інфрачервоні промені, які виносять з собою тепло – в результаті формується *антипарниковий ефект* і на поверхні Титана на 10⁰ холодніше, ніж в його атмосфері. Мінімальна температура атмосфери (-203⁰С) зафіксована на висоті 50км, а температура верхньої частини хмарного покриву не вище -200⁰С, що вказує на відсутність внутрішнього джерела теплової енергії, яке могло б розігріти поверхню Титана. Верхня частина хмар складена *метановими крижинками*, а нижня – із *рідкого метану та азоту*. Про конденсацію свідчить *метановий туман*, який спостерігався при посадці зонда *Huygens* на Титан.

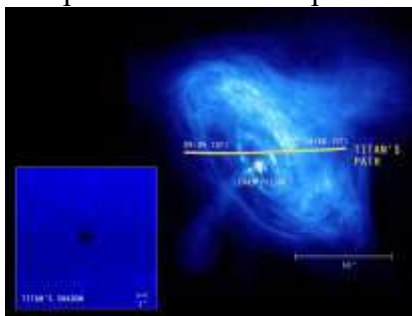


Рис.2.245. Атмосфера *Титана* у космосі на фоні рентгенівського випромінювання пульсара у Крабовидній туманності (дані *Chandra*)

Видимості поверхні Титана перешкоджають не тільки **метанові хмари, імла і тумани**, а й глобальний **темно-оранжевий серпанок**, ймовірно, із мілких частинок *толіну* – синтезованої на Землі речовини із суміші азоту і метану – *складного ланцюжка гідридів з'єднань вуглецю*. Через нього з висоти 25-23км поверхня Титана проглядалася погано (дані *Huygens*). На висоті 20км над поверхнею, де атмосферний тиск 380мм ртутного стовпчика, існує густий **метановий туман із 12 окремих шарів**, під якими туман поступово розсіюється і зникає на висоті 19км, проте з'являються досить щільні **хмари**. Зонд *Huygens* при посадці пересік 2 шари хмар – угорі *хмари із метановими крижинками*, а під ними – *хмари із краплинами метану та рідкого азоту*. Нижче 18км видимість стала відмінною – хмари повністю пропали. **На поверхні Титана постійні сутінки: через шар метану не видно не тільки Сонце, а і Сатурн.**



Рис.2.246. Ліворуч: тонкий шар стратосферного серпанку вище основної атмосфери *Титана*; у центрі: атмосфера Титана, де молекули *метану* розкладаються під дією сонячного ультрафіолету, а продукти цього процесу об'єднуються в *етан* та *ацетилен*; праворуч: гігантська хмара над північним полюсом Титана (фото *Cassini-Huygens* і *Cassini*)

Цікавим фактом є мала кількість хмар на середніх висотах у небі над Титаном і їх швидке зникнення. У кінці 2006р., при черговому прольоті над Титаном, *Cassini* зафіксував величезне хмарне утворення діаметром біля 2400км із метану, етану та інших органічних з'єднань, яке повністю закривало весь північний полюс супутника і досягало 62⁰ північної широти. *Метанові хмари* існують тільки біля полюсів та у смузі між 40-вими паралелями, в інших місцях їх не зафіксовано. Вважається, що в „хмарних” областях регулярно ідуть *метанові дощі* та формуються *озера*, випаровування яких сприяє появі клубів *туману*, які не піднімаються вище 750м над поверхнею і хмар. Вчені порівняли цей *метановий цикл* із земним *гідрологічним циклом*. Вважають, що хмарна структура буде спостерігатися на протязі кількох років,

поступово зміщуючись у південні широти. Але у речовин, що складають хмари, повинні бути і інші джерела. Багатолітні спостереження показують, що хмарні системи на Титані утворюються і зникають відповідно до зміни пори року. Згідно моделювання, постійне активне формування подібних хмарних структур може продовжуватися на протязі 25 років, затухаючи на 4-5 років після закінчення циклу і повторюючись знову. Рік на Титані триває 29,5 земних років, а сезони в півкулях змінюються кожні 15 земних років. Влітку озера випаровуються в одній півкулі Титана та випадають вуглеводневими дощами в іншій, де і формують місцеві озера.

Вчені вважають, що в місцевості біля екватора розташована більшість **кріовулканів**, які викидають в атмосферу *воду, метан і аміак*. Усі ці компоненти разом складають не більше 5% від загального складу атмосфери, але хмари можуть утворюватися тільки з них. Решта атмосфери представлена *азотом*, для конденсації якого на Титані недостатньо холодно. Протяжні хмари формуються з декількох невеликих „смерчів”, кожен з яких виникає завдяки виверженню кріовулкана. Потім вихори уповільнюються, речовина всередині хмари розподіляється рівномірно, а сама хмара піднімається на висоту до 40км. Біля поверхні супутника **вітер слабкий**, на висотах 40-50км у широтному напрямі несуться постійні *ураганні вітри* зі швидкістю до 30м/сек., проте вже на висоті 80км панує практично *мертвий штиль*.

Таким чином, **деталі ландшафтів поверхні не можуть заважати руху хмар, але самі хмари нестабільні і не встигають зміститися далеко від місця утворення.**

Метан в атмосфері Титана під впливом сонячного ультрафіолету розпадається на *водень і більш важкі вуглецеві з'єднання (етилен, ацетилен)*. Проміжними продуктами дисоціації є активні радикали *метилу (CH₃) і карбену (CH₂)*, які сприяють утворенню складних молекул вуглеводнів, із яких складаються хмари, але складні молекули в атмосфері не випадають на поверхню Титана у вигляді метанового дощу. Також у результаті хімічних реакцій в атмосфері Титана формується *триацетилен (C₆H₂)*, який може виконувати роль земного озону і захищати поверхню Титана від ультрафіолетового випромінювання та приймати участь в інших складних реакціях в атмосфері супутника. Прилади *Voyager-1* зафіксували у верхніх шарах атмосфери Титана *дев'ять органічних з'єднань* важчих за метан, а спектрометри *Cassini* зареєстрували різноманітні *вуглеводні* (довжина ланцюжка яких до семи атомів вуглецю), зокрема молекули *бензолу (C₆H₆)*, та *з'єднання вуглецю з азотом*. Вчені здивовані численністю складних молекул (серед з'єднань азоту ідентифіковані **нітрили – своєрідні попередники амінокислот**), а також наявністю позитивного та від'ємного зарядів великих молекулярних іонів. На висотах до 1000км в атмосфері Титана частинки від'ємних зарядів приймають участь у формуванні атмосферних аерозолів у процесі електричної нейтралізації зі своїми позитивно зарядженими антиподами, а гази атмосфери, крім сонячного випромінювання, тут піддані впливу космічних частинок, які також приймають участь у процесі синтезу органічних молекул.

Ймовірно, що аналогічним чином виникли перші органічні з'єднання і на Землі. Вчені вважають, що атмосфера Титана може бути своєрідною лабораторією, що нагадує клімат Землі на початку її геологічної історії і моделює органічну хімію, яка передувала появі життя на Землі та забезпечила стандартні будівельні блоки для неї, а фізичний і хімічний склад атмосфери Титана аналогічний тій, що існувала на Землі до появи біологічного життя 3,8 млрд. років тому.

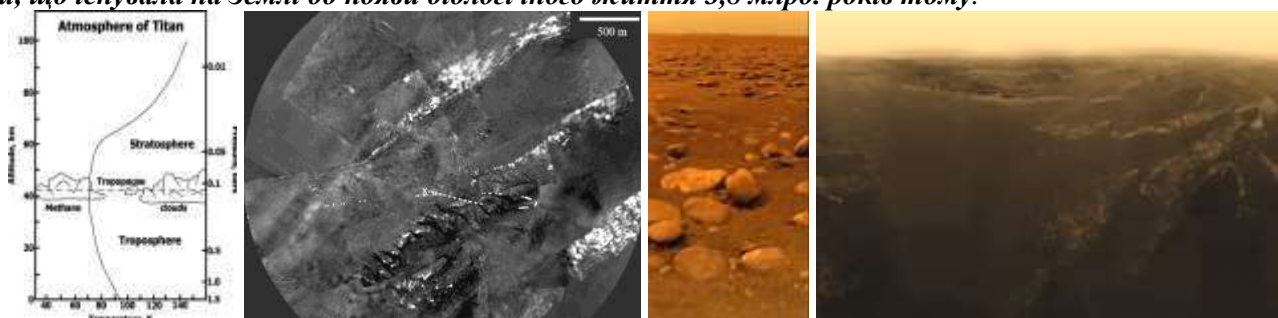


Рис.2.247. Зліва праворуч: особливості структури атмосфери *Титана*; виконана зондом *Huygens* при посадці на супутник мозаїка зображень поверхні *Титана* з висоти 7-0,5км (буква Х – місце посадки); перше зображення крижаної поверхні *Титана* із округлими уламками крижаної гальки 2-20см уперек на місці посадки *Huygens*, освітленість поверхні 0,1% сонячного полудня на Землі; панорама *Титана* з висоти 8км (фото *Huygens*)

Але за час існування Титану весь метан атмосфери повинен був розкластися, продукти полімеризації – випасти на поверхню супутника, а водень – розсіятися у космічному просторі. Відповідно, *у надрах Титана повинне існувати джерело постійного поповнення атмосферного метану, інакше ультрафіолетове випромінювання повністю би знищило метан на протязі десяти мільйонів років*. Запаси метану в атмосфері поповнюються за рахунок виділення із надр супутника – аналіз ізотопного складу вуглецю та аргону свідчить про наявність геологічної активності на Титані. Можливі два шляхи утворення метану: *різноманітні неорганічні процеси у надрах Титана чи продукти життєдіяльності бактерій*. На самій поверхні супутника через дуже низьку температуру (-180°C) життя неможливе.

Титан схожий на Землю: на ньому існують атмосфера, хмари і туман; змінюється погода, ідуть дощі та сніг; наявні гори, горби, піщані дюни із крижаного піску, що забруднений складними органічними речовинами і каньйони; у низинах течуть струмки і ріки, а багато екзогенних геологічних процесів схожі на земні, тільки роль води тут відіграє рідкий метан (етан, пропан), а гірських порід – покрита інесм водяна крига з органічними домішками та аміаком. При температурі на світло-оранжевій поверхні Титана -178°C метан може існувати у вигляді газу, рідини і як тверда речовина – у залежності від конкретних місцевих умов, а звична на Землі водяна крига тут набуває міцності гірських порід. Для конденсації азоту на Титані недостатньо холодно.

Поверхня Титана має *блідий оранжевий колір*, складена *водяною кригою* з домішками *гірських порід* та покрита *крижаними уламками і брилами* зі слідами рідинної ерозії. Зонд *Huygens* здійснив посадку на *гравійно-піщану поверхню*, яка складається із забруднених частинок криги діаметром до 8мм (рис.2.247). Зонд занурився на 10см у ґрунт поверхні і дещо нахилився. За своїми механічними властивостями поверхня району посадки нагадує «мокрый пісок» або трохи присипану снігом «вологу глину», які покриті якоюсь тонкою кіркою, а інфрачервона спектрометрія визначила основний компонент поверхні – *H_2O -кригу* з наявністю на її поверхні в момент посадки *калюж рідкого метану* – незадовго до цього тут пройшов метановий дощ.

Подальші орбітальні спостереження *Cassini* показали, що *хмари і дощі на Титані - рідкі явища, опади схожі на потужні земні зливи у засушливих регіонах, а найпотужніші бурі відбуваються коли „вологість” (концентрація метану) в середніх широтах атмосфери Титана досягає 80%, що викликає висхідні потоки зі швидкістю 70км/год. і формування щільної хмарності. Крупні дощові краплини із скраплених вуглеводнів випадають зливами на поверхню Титана, виливаючи за годину до 300кг опадів на квадратний метр його поверхні.*

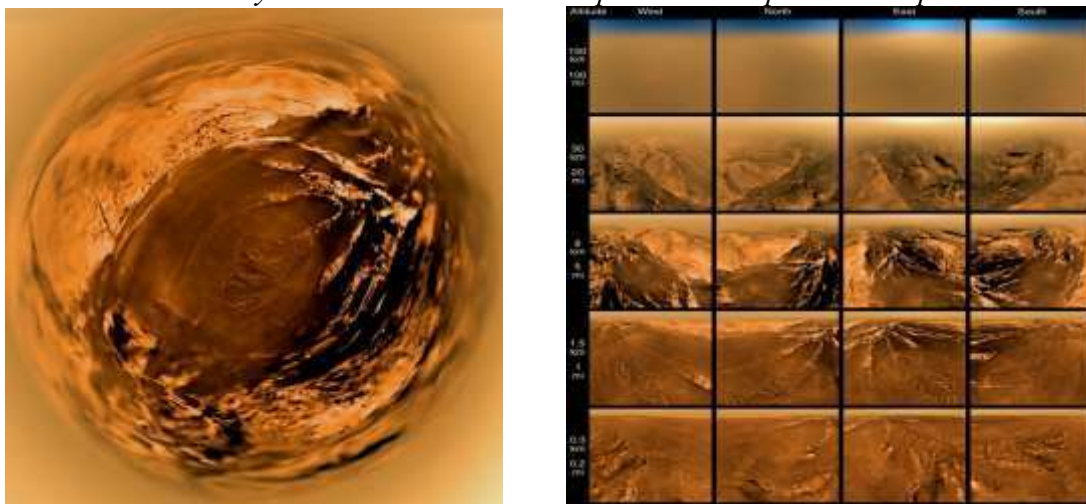


Рис.2.248. Одна із панорам поверхні Титана з висоти 5км (ліворуч) та комбінація зображень його поверхні (захід, північ, схід і південь) з висот 150км, 30км, 8км, 1,5км і 0,3км (фото *Huygens*)

Під зледенілою поверхнею супутника, на глибині декількох сантиметрів, існує химерна система каналів, басейнів, „колодязів”, печер тощо від ерозійної дії потоків рідкого метану. Сама крижана поверхня також піддається «карстовій» ерозії (рис.2.259), але із застосуванням

дуже екзотичних матеріалів. Орбітальні фотознімки *Cassini-Huygens* свідчать про існування слідів потоків рідкого метану, які пробрили собі **каньйони** та звивисті **річкові русла** у крижаних чи кам'яних скелях і утворили **долини**, причому виділяються русла (канали) *двох типів*: довгі і глибокі з невеликою кількістю притоків та більш розгалужені (рис.2.253, 2.255, 2.256). Живлення річок, струмків і озер відбувається, ймовірно, за рахунок осадків сезонних метанових дощів. *Русла річок у місцевості посадки Нюгенса більшість часу залишаються сухими.*

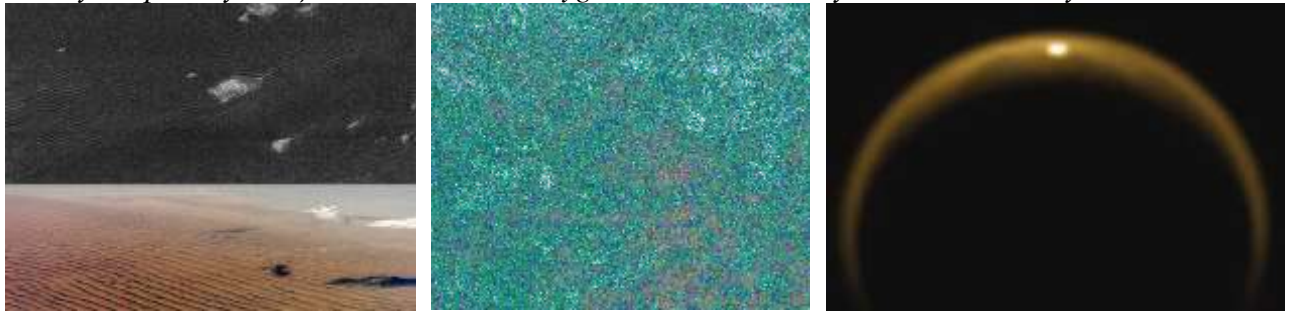


Рис.2.249. Ліворуч: унизу – кілометрові дюни пустелі Наміб (Африка), угорі – область аналогічних дюн на Титані шириною 1500км поблизу екватора. У центрі – *регіон Ксанаду* з темними дюнами на заході, вузькою річковою сіткою з пасмами численних горбів та численними каналами на сході, які обмежені гірським хребтом (РЛ дані JSC/NASA). Праворуч – сонячний відблиск від поверхні рідкого вуглеводневого Моря Кракена (довжина 1200км, площа 400 тис. км²) на початку полярного дня у районі північного полюса Титана (інфрачервоне фото *Cassini*)

З інших екзогенних процесів на Титані спостерігаються: процеси кругообігу рідких органічних з'єднань - **випаровування рідкого метану** із формуванням туманів (рис.2.257) і потужних хмар (рис.2.246) та **випадіння** рідкого метану **осадками**; **розмивання поверхні** зливами, **формування потоків** та їх подальша руйнівна **геологічна діяльність**, **рідинна** та **вітрова ерозії** «ґрунтів», **карстовий рельєф**. На Титані знайдені структури (смуги широтного простягання), що могли утворитися при **стіканні рідини** або **мігруючих крижаних покривів** по його поверхні. Утворення орієнтованих зі сходу на захід широких смуг **дюн** можна пояснити дією приповерхневих вітрів переважно західних напрямів зі швидкістю до 7м/сек. Поверхня суші прорізана звивистими каналами, видно навіть *сліди виходів річок з берегів*, сліди „повеней” у світі рідкого метану. Звивисті канали направлені до рівнинних темних ділянок поверхні - до *берегів озер (моря)*. Темні ділянки мають велику протяжність, а у прибережних „водах” видно навіть *острови*. Результати деяких експериментів свідчать, що темні ділянки це – скоріше за все, *рівнини*, які покриті темними атмосферними осадками невідомого складу. Ймовірніше всього, це пов'язано із сезонними явищами - русла річок наповнюються рідким метаном, який потім заповнює великі басейни. На відміну від земної води, метан швидко випаровується і знову переходить в атмосферу. Наступний сезон злив і повеней змиває темні осадки і зносить їх у низини. Дані зонда *Huygens* (2006р.) свідчать, що **на Титані постійно мрячить дощ із мілких краплин рідкого метану, який, схоже, ніколи не закінчується.**

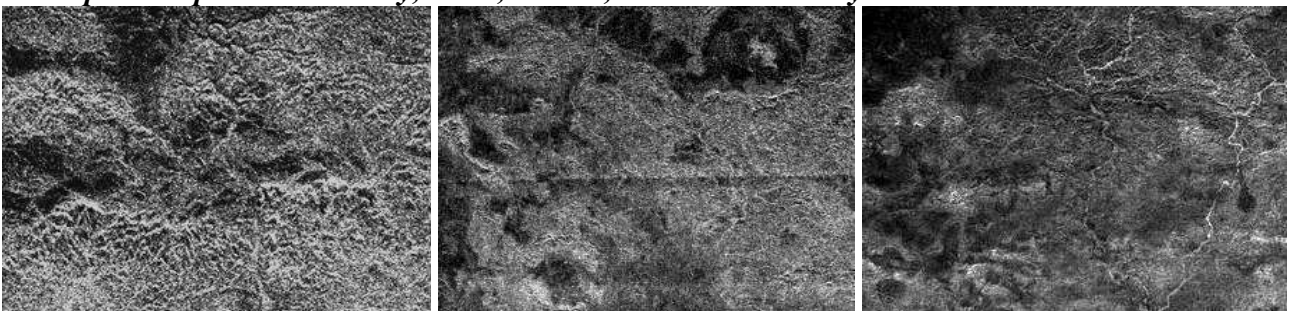


Рис.2.250. Радарні зображення континенту Ксанаду (дані *Cassini*): ліворуч – горбистий ландшафт та ерозійні канали області (200×200км) частини цього континенту. У центрі – район з двома кратерами: верхній кратер з центральним піком діаметром 70км, нижній кратер без центрального піка. Праворуч – західна частина Ксанаду з темними ділянками більш згладженої поверхні та меандруючими руслами метанових річок - праворуч, екваторіальними дюнами – ліворуч, у центрі – підвищення у рельєфі

Радарні знімки поверхні Титана орбітальним *Cassini* свідчать, що на супутнику є **континенти** і значні ділянки **рідкої поверхні**. У цілому, *горбистий рельєф* супутника не перевищує висоти 100м, він складається із розчленованих та плоских ділянок, а вздовж екватора вузькою світлою смугою простягнувся на 4,5тис. км великий, схожий за геологічною структурою на континент, *регіон Ксанаду* (рис.2.249, 2.250, 2.254), який є *розлогим гірським плато розміром з Австралію*, де відносно чисті крижані вершини високо здіймаються над темними, „забрудненими” *вуглеводневою органікою, рівнинами Титана*. На ранковому, сонячному, боці Титана формуються хмари із рідкого метану, які у західній частині передгір'їв Ксанаду проливаються постійною мрякою (інфрачервоні фото телескопів *Keck* у Чилі та *VLT*).

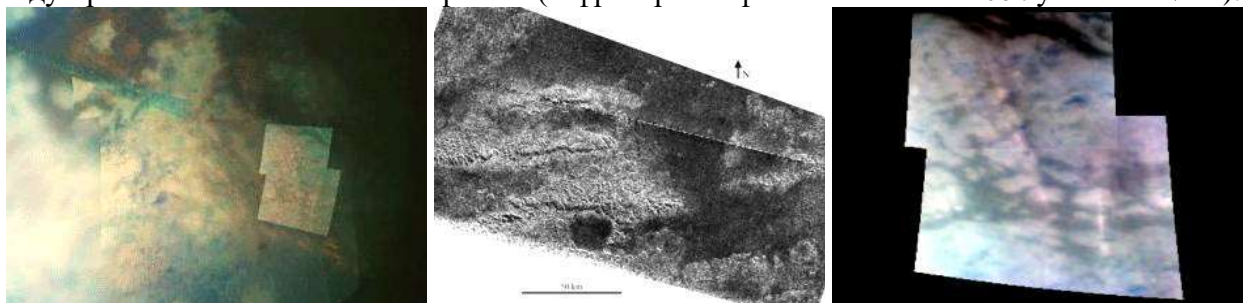


Рис.2.251. Ліворуч – ударний кратер та гірські пасма Титана. У центрі – три паралельні гірські хребти на поверхні Титана від зіткнення різних областей його крижаної кори. Праворуч – крижана та покрита метановим снігом *гірська система* протяжністю з південного сходу на північний захід (довжина 150км, ширина 30км, висота 1,5км) південніше екватора Титана із речовини надр, яка піднялася розломами між тектонічними плитами кори в умовах їх розсування (інфрачервоні та радарні фото *Cassini*)

Відкрито *гірський хребет* протяжністю понад 150км, шириною біля 30км та висотою 1,5км, який схожий на гори Сьєрра-Невада (США). Вершини цих гір покриті шаром білої речовини - метанового снігу чи іншого органічного матеріалу (рис.2.251).

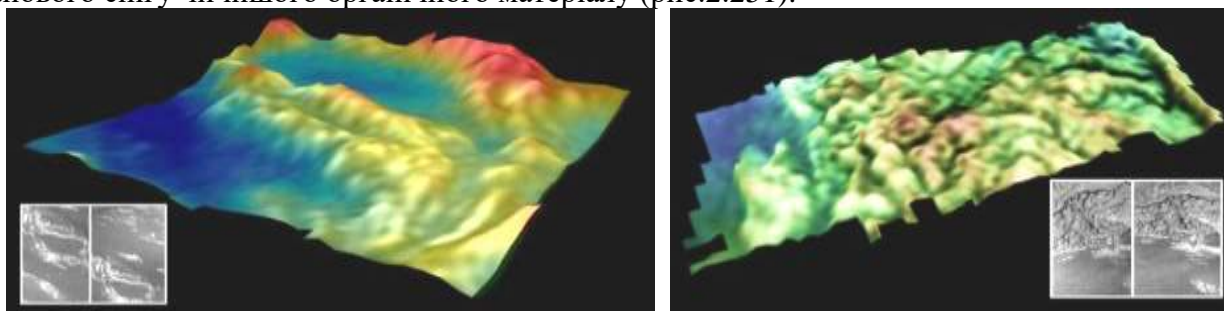


Рис.2.252. Комп'ютерні моделі ландшафтів Титана: ліворуч - ділянка поверхні у радіусі 2,5км від місця посадки *Huygens* (висота горбів до 50м); праворуч - одна з річкових систем (стереозображення *Cassini*)

Інші *гірські хребти* (розмірами з Аппалачі, середні висоти біля 120м, найвищий пік 1930м) складені пронизаною пустотами H_2O -кригою з численними *печерами* та *кавернами* типу карстових (рис.2.259), а утворені порожнини, ймовірно, були вимиті метановими дощами. Завдяки останнім появились і протяжні *річкові долини*, які звиваються між горбами ближче до окраїн континенту.

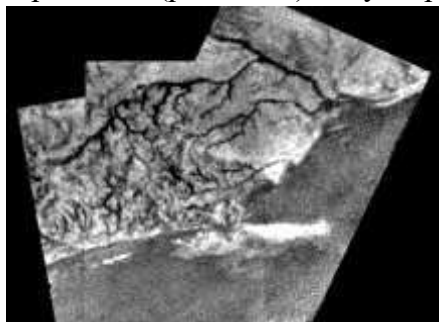


Рис.2.253. Розгалужена річкова система і дно озера (дані *Cassini*)

Ці річки могли зносити з гір крижані крихти на прилягаючі рівнини, у результаті чого сформувалися *дюни* висотою 100-150м на віддалі 1-2км між собою, що спостерігаються на всій поверхні темних екваторіальних областей Титана і чітко направлені вздовж паралелей (рис.2.249, 2.254). Дюни не розсипаються через невелику силу тяжіння супутника. Склад їх поки що неясний: з однаковою ймовірністю це можуть бути *замерзлі частинки вуглеводнів* чи *водяної криги*. Ширина області поширення дюн 1500км. Раніше вважалося, що віддаленість Титана від Сонця не сприяє нагріву його атмосфери і

формуванню сильних вітрів та елементів ландшафту. Орієнтація дюн вказує на те, що *головною причиною вітру на Титані можуть бути викликані гравітацією Сатурна припливні сили*.

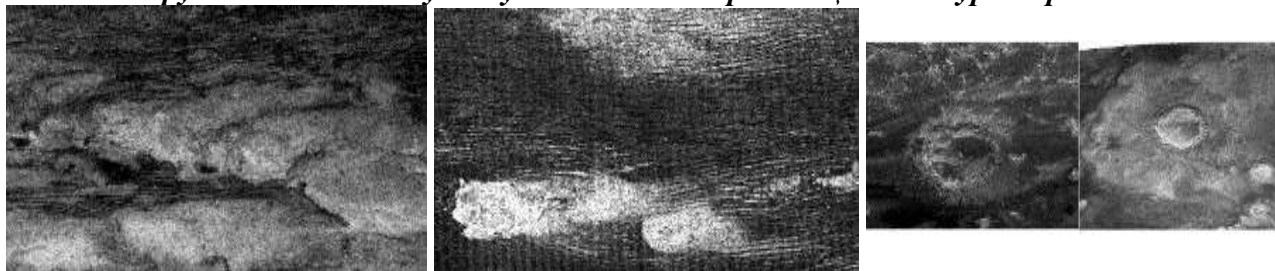


Рис.2.254. РЛ - зображення *Cassini* області посадки зонда *Huygens* із витягнутими пасмами орієнтованих зі сходу на захід крижаних дюн – так званими „подряпинами kota” (ліворуч), які свідчать переважно про західні вітри - та їх більш крупними зображеннями (у центрі); світлі «острови» серед дюн, ймовірно, є горбами із чистої криги. Праворуч: два із чотирьох відкритих на Титані ударних кратерів

Серед гір видно маленькі темні плями метанових озер. Достовірно гігантські *метанові озера* (рис.2.249) встановлені у найхолоднішому місці – в районі північного полюса, де низькі температури запобігають швидкому випаровуванню рідкого метану. На Титані відкрито більше чотирьохсот *озер* діаметрами 10-100км та два *моря* із суміші рідких етану, метану та азоту (рис.2.255, 2.260). Озера із відмілинами та плаваючою кригою (рис. 2.256) з'єднані протоками-каналами, якими рухаються рідкі вуглеводні, так як їх форма однозначно вказує на їх утворення під дією потоків рідини. Частина озер висохла із формуванням берегових структур типу *терас* та *фіордів*, а решта заповнена сумішшю метану (CH_4) і етану (C_2H_6), причому етану може бути значно більше, ніж метану (рис.2.256). Глибини озер на Титані можуть досягати кількох сотень метрів, а біля дна може бути ще шар рідкого ацетилену (C_2H_2). Швидкість обміління озер південної півкулі при сезонному випаровуванні до 1м/рік (дані *Cassini*, 2005-2009pp.).

Водойми вуглеводнів у високих північних широтах Титана, де закінчилася полярна зима, покривають майже у 20 разів більшу площу в порівнянні з південними широтами, де тільки в 2008р. у районі південного полюса було відкрито перше рідке озеро *Онтаріо* (рис.2.255).

Ситуація з атмосферним етаном і метаном на Титані довго була незрозумілою - в його атмосфері достатня кількість вуглеводнів, спостерігаються тумани і хмари, випадають етанові сніг та інші опади. У таких умовах повинні існувати великі етаново-метанові океани, але були відкриті вуглеводневі озера і моря, рідини в яких занадто мало для підтримування такого складу атмосфери супутника. Причому, області з великою здатністю поверхневого відбиття - озера і моря - відкриті завдяки радарним обстеженням (рис.2.255, 2.256), а перше оптичне підтвердження рідких водойм (рис.2.249) отримане у 2009р. Незначне поширення етану на поверхні пояснюють тим, що у дійсності його там достатньо, але він змішується з частинками атмосферного пилу і „прилипає” до них, замість того, щоб утворювати краплини та конденсуватися потім у великі водойми. Ця *суміш етану* та *пилу* – так званий вуглеводневий *смаст* – ймовірно, покриває поверхню Титана багатокілометровою товщею, може формувати гігантські дюни і пояснює багато загадок атмосфери, водойм та поверхні Титана. Товща *смасту* являє собою величезне „сире” сховище вуглеводнів, яке замінює океани.

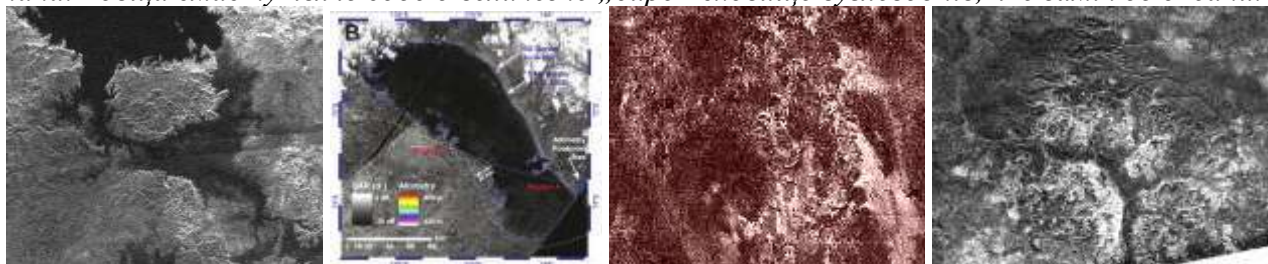


Рис.2.255. Зліва праворуч: 1. Окраїна озера (моря) (150×90км) з фіордами та островом, що при пересиханні з'єднується перешийком з материком і стає півостровом. 2. Зміни лінії берега і рельєф прибережного дна мілководного озера *Онтаріо* (площа 150 000км²) на глибині 8м біля свого південного берега та з крутим нахилом його дна біля північного берега з суміжними горами висотою до 1км. 3. РЛ-зображення *кріовулкана* на поверхні Титана. 4. *Каньйон* на Південному полюсі (РЛ-дані *Cassini*)

Група вчених (*Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, France*) на підставі даних зонду *Huygens* розробила модель фотохімічних процесів в атмосфері Титана та визначила склад інгредієнтів озер (у рідкому чи розчиненому виді) в умовах термодинамічної рівноваги між ними та «повітрям»: *етан* (C_2H_6) – 76-79%, *пропан* (C_3H_8) – 7-8%, *метан* (CH_4) – 5-10%, *ціаністий водень* (HCN) – 2-3%, *бутен* (C_4H_8) – 1%, *бутан* (C_4H_{10}) – 1%, *ацетилен* (C_2H_2) – 1% тощо. Співвідношення цих інгредієнтів в озерах Титана дуже залежить від температури на поверхні супутника (тобто, від зміни сезонів) та від широти розміщення озера.

Радіолокаційне картографування поверхні також виявило **багате різноманіття типів геологічних структур** – *ударні кратери, розломи, хребти* тощо. На північ від Ксанаду виділяється дуже темна та розчленована область, що за своєю схожістю отримала неформальну назву „**Чорний Kim**”. Межа між темними та світлими ділянками дуже чітка і схожа на **берегову лінію**. Мала кількість кратерів на поверхні свідчить про активну участь геологічних процесів у формуванні поверхні Титана, які подібні до тих, що відбуваються на поверхні Землі.

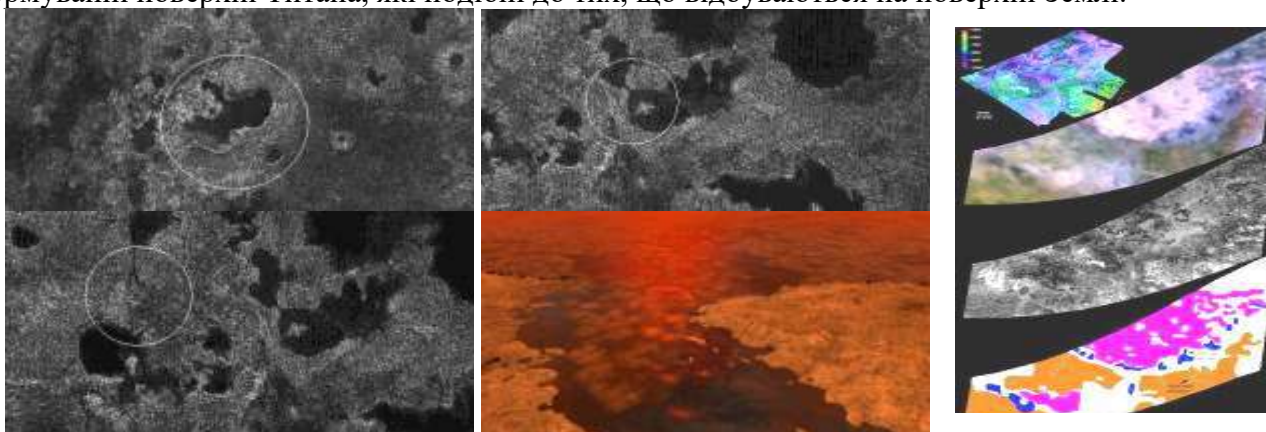


Рис.2.256. **Ліворуч:** темні і тепліші озера Титана (не відбивають РЛ-сигналів гладенькою поверхнею рідини) з островами, чіткими береговими лініями та слідами їх ерозії, метановими ріками і каналами-протоками між озерами; пересихаюче метанове озеро із східчастими уступами берегів від періодичного коливання рівня поверхні рідини через випаровування (ліворуч угорі) та метанова крига (із 5% газу) на поверхні озера (праворуч унизу). **Праворуч:** кріовулкан області *Hotei Regio* (згори донизу): 1- загальний вигляд регіону, 2- особливості мінерально-хімічного складу утворень району, 3- зображення рельєфу поверхні, 4- крижані потоки давніх вивержень в оточенні H_2O -криги та дренажні канали (дані *Cassini*)

Cassini відкрив (рис.2.257) **ударний кратер Менрва** (діаметр 440км, глибина 500м, центральне підняття висотою 450м, висота східної частини валу 300м). Сила удару була дуже потужною, адже поверхня супутника постійно оновлюється – ерозійні процеси на Титані не поступаються земним, тому і відсутні помітні газові вулкани та гейзери, через які метан повинен поступати в атмосферу. Уже відкрито 7 ударних кратерів: **Ксе** (діаметр 29км, висота валу 300-500м, плоске дно, центральний пік, радіальні викиди), **Синлап** (80км) тощо. Картографування у оптичному та інфрачервоному спектрах *Cassini* зафіксувало на південному сході від Ксанаду **червону пляму** правильної півкруглої форми шириною 483км (рис.2.257), що є постійною деталлю рельєфу і не може бути ні горами (середній перепад висот на горбистій поверхні Титана не перевищує 100м), ні хмарами (пляма не змінює форми 3 роки), ні проявом геологічно активної гарячої точки (температури плями і суміжних ділянок поверхні однакові).

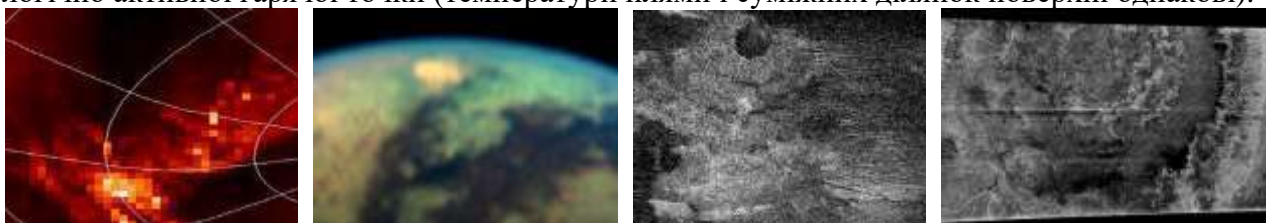


Рис.2.257. Зліва праворуч: 1- тумани у районі південного полюса Титана після тривалих літніх метанових дощів. 2- Червона пляма на Титані в інфрачервоних променях. 3-радарне зображення *Факела Шикоку* - яскраві і у видимому діапазоні області поверхні з ударним кратером діаметром 35км (темний круг), яскраві плями – підвищення рельєфу, тонкі звивисті лінії – канали. 4- гігантський кратер *Великий Цирк* діаметром 440км на Титані (фото та радарні зображення *Cassini*)

Вчені вважають, що причину необхідно шукати у відмінностях хімічного складу поверхні цієї ділянки від інших, а якщо врахувати, що поверхня Титану покрита кригою, то залишається загадкою – що ж покриває поверхню криги у цьому районі у вигляді правильної геометричної фігури?. Ізотопний склад атмосферного аргону вказує на процеси **кріовулканізму** - вулканічної діяльності, де роль силікатної лави відіграє холодна суміш розкришеної водяної криги, аміаку і метану у вигляді гязі чи суспензії, пізніше наявність кріовулканів підтвердилась радіолокацією (рис. 2.260).

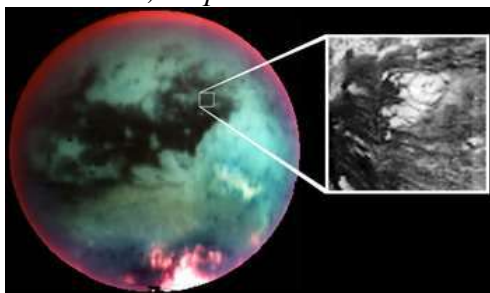


Рис.2.258. Перший кріовулкан на *Титані* (інфрафото *Cassini*)

Кріовулканічні потоки схожі на земні потоки лави, але тут їх утворює ледь підталий на великих глибинах лід, що дуже повільно видавлюється на поверхню під великим тиском і, мабуть, ці „виверження” більше схожі на переміщення земних льодовиків (рис.2.256). Два таких потоки (типу *крижаних селів*) потужністю до 200м зафіксовані в районах екватора Титана. Такі кріовулканічні потоки криги формують не гірше води чи магми *складний рельєф*, який і відбивається на радарних фото поверхні яскравими смугами (рис.2.255), що і пояснює відносну геологічну молодість поверхні Титану, на якій майже немає ударних кратерів. На інфрачервоних фотографіях поверхні виділяється темне **склепінчасте підняття** діаметром до 30км, поверхня якого покрита замерзлим метаном (рис.2.258). Ймовірно, рідкий метан поступає із „гарячих” глибин планети і перетворюється на кригу на вершині вулканічного конуса, а потім випаровується. У верхній частині вулкану існує западина типу **кальдери** – обвалена вершина вулканічного купола, а на схилах є утворення, що нагадують *русла*. Відкриття кріовулкану означає, що поверхня Титана може являти собою кору із забрудненої криги потужністю у десятки кілометрів, у межах якої відбувається повільне переміщення речовини із надр до поверхні. Радарна зйомка *Cassini* поверхні у 2005р. та повторна зйомка у 2007р. засвідчили, що 50 характерних ландшафтних реперів на Титані (озера, гори і каньйони) змістилися за цей час на 30км. Тобто, **поверхня Титана дрейфує зі швидкістю 0,36° за рік**.

Це можливо тільки тоді, коли між твердим ядром планети, яке обертається синхронно із обертальним рухом, та замороженою корою Титана на глибині 300км (товщина кори) існує глобальний океан із суміші води з аміаком, що відіграє роль своєрідного „мастила”.

Метан, як легкий газ, постійно „вивітрюється” у космос, але його концентрація не зменшується. Раніше вважалося, що джерелом метану на Титані є процес випаровування з гігантських вуглеводневих озер. Аналіз фото різко окреслених темних плям із добре помітними береговими лініями і темними звивистими каналами, які простягаються до берегової лінії, показав, що це сліди зниклих водойм і річок, довжина деяких понад 100км.

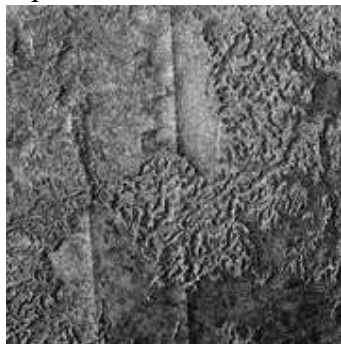


Рис.2.259. Карстовий рельєф поверхні району *Sikun Labyrinth* біля Південного полюса *Титана* (фрагмент фото *Cassini*) та 3D модель форм цього рельєфу (ілюстрація NASA/JPL/ESA/SSI)

У 2004р. *Cassini-Huygens* застав «літо» з гігантськими грозовими хмарами та рясними метановими дощами у південній півкулі Титана. Виверження кріовулканів та ці метанові дощі наповнювали там водойми, які, з часом, випаровувалися. Такі дощі в 2005р. утворили у південній півкулі нове метанове озеро площею 34 000км². У кінці липня 2006р. небо Титана було закрите масивними купчастими хмарами, спостерігалися жовтий смог, шторм і невеликий метановий дощ з краплинами сантиметрового розміру. У серпні 2009р. наступило весняне рівнодення - у північну півкулю прийшла весна, а у південну – осінь, і шторми з дощами зміщуються у середні широти супутника, а протягом 2015-2017рр. літо з грозовими зливами та дощами буде панувати у північній півкулі Титана.

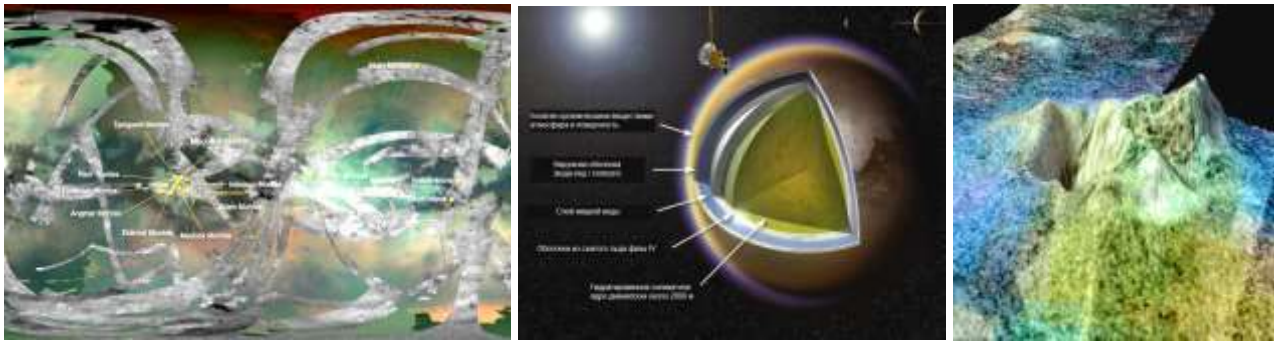


Рис.2.260. Зліва праворуч: **1.** Розміщення гірських вершин на Титані. **2.** Схема надр Титану: крижана кора (вода-лід/клатрат), суцільний водно-аміачний океан між корою та кригою високого тиску мантії, яка оточує ядро (діаметр біля 2000км) із суміші уламків силікатних порід з кригою. **3.** Два піки висотою більше 1км та кілька кратерів глибиною понад 1,5км кріовулкана регіону *Sotra Facula* з потоками крижаної «лави» від періодичних вивержень із надр H_2O -криги та розчину *аміаку* (дані NASA)

При наступних прольотах Cassini були відкриті дві схожі на кратери кільцеподібні структури чи вулканічні кальдери, гірський хребет, моря, нові ріки і озера.

Вчені Нантського університету (Франція) створили модель еволюції Титана в три етапи. **Перший етап** розпочався одночасно з формуванням Сонячної системи з протопланетної хмари. У цей час у надрах супутника пройшла гравітаційна диференціація речовини із формуванням **силікатного ядра**, яке було оточене оболонкою із водно-метаново-аміачної суміші. На **другому етапі** (біля 2млрд. років тому) верхні шари цієї оболонки замерзли і утворили **тверду кору**, під якою повинен існувати глибокий **водно-аміачний океан**. Головним матеріалом цієї кори стали **кристалогідрати метану** – так звані „з'єднання включення” (клатрати), що утворюють з водою деякі гази (зокрема інертні). Клатрати дуже чутливі до підвищення температури - тоді вони розкладаються на воду і газ (у даному випадку, метан).

Температурні аномалії на Титані стали виникати на **третьому етапі**, який триває і нині. Вони викликані процесами кристалізації в **рідкій мантії** супутника, а тепло від кристалізації зумовлює локальний нагрів **кори**, розкладання гідратів та виділення метану в **атмосферу** Титана. Там він частково може конденсуватися і проливатися на поверхню **дощами**, формуючи при цьому метанові **моря, озера і ріки**. Розрахунки показують, що тепла надр та хімічної енергії клатратів досить для подібної кріовулканічної діяльності на протязі мільйонів років.

Остання модель будови повністю диференційованих **надр** Титану наступна (рис.2.260): низька температура ($-180^{\circ}C$) на Титані утворила **тверду крижану кору** із замерзлої води, вуглеводнів та їх численних з'єднань (клатратів) потужністю до 300км, під якою існує глобальний водний **океан** (85%) концентрованого солоного розчину солей *S, Na, K*, що насичений (15%) **аміаком** (розчин „нашатирного спирту”), а точніше, гідроксидом амонію; теоретична температура океану біля $-80^{\circ}C$, яку цілком можуть витримати бактерії-екстремофіли. Зонд *Huygens* двічі зафіксував таємничі низькочастотні потужні радіохвилі із глибин цього океану, можливо, від пульсуючих вібрацій у надрах самого Титана. З глибини ≈ 500 км розпочинається крига високого тиску **мантії**, яка оточує **ядро** (≈ 2000 км) із суміші гідратованих уламків **силікатних порід** та **криги**.

У серпні 2009р. північний полюс Титана приховував тонкий серпанок перистих хмар, мабуть, із мілких CH_4 -кристалів, у південній півкулі спостерігалися густі метанові хмари.

2.2.7.3. РЕЯ

РЕЯ – другий за розмірами супутник Сатурна (майже двійник Япета) без покриву темної речовини - простий прототип крижаного супутника зовнішніх областей Сонячної системи. Екваторіальний діаметр Реї 1528,6км, маса $2,31 \times 10^{21}$ кг, середня густина $1,24 \text{ г/см}^3$, прискорення вільного падіння $0,26 \text{ м/сек}^2$, альbedo 0,65, орбітальний період синхронного обертання навколо Сатурна 4,52 доби. Температура освітленої поверхні супутника біля $-173^{\circ}C$, а неосвітленої до -200 - $220^{\circ}C$. Плазма магнітосфери Сатурна хімічно розкладає H_2O -кригу на Реї (75% її об'єму) і

утворює *надзвичайно розріджену* (в 100млн разів меншу земної на висоті 100км) *несиметричну атмосферу* із *кисню* O_2 і *вуглекислого газу* CO_2 - молекули CO_2 зосереджені майже виключно на денному боці, а більш рівномірний розподіл O_2 також підвищений на освітленому боці.

Рея, ймовірно, має три власні кільця із пилу та уламків, які рівномірно обертаються навколо неї (рис.2.261, 2.263). Кільця відкриті приладами *Cassini* за коливаннями потоків електронів при перекриванні кільцями (?) електричних токів у радіаційних поясах Сатурна.

Можливо, що варіації густини атомів O_2 навколо Реї, від руйнування молекул H_2O -криги зарядженими частинками магнітосфери, спочатку і тлумачили як наявність у Реї кільця (існування яких не підтвердилось пізніше).

За диском уламків розташована округла хмара пилу товщиною біля 900км.

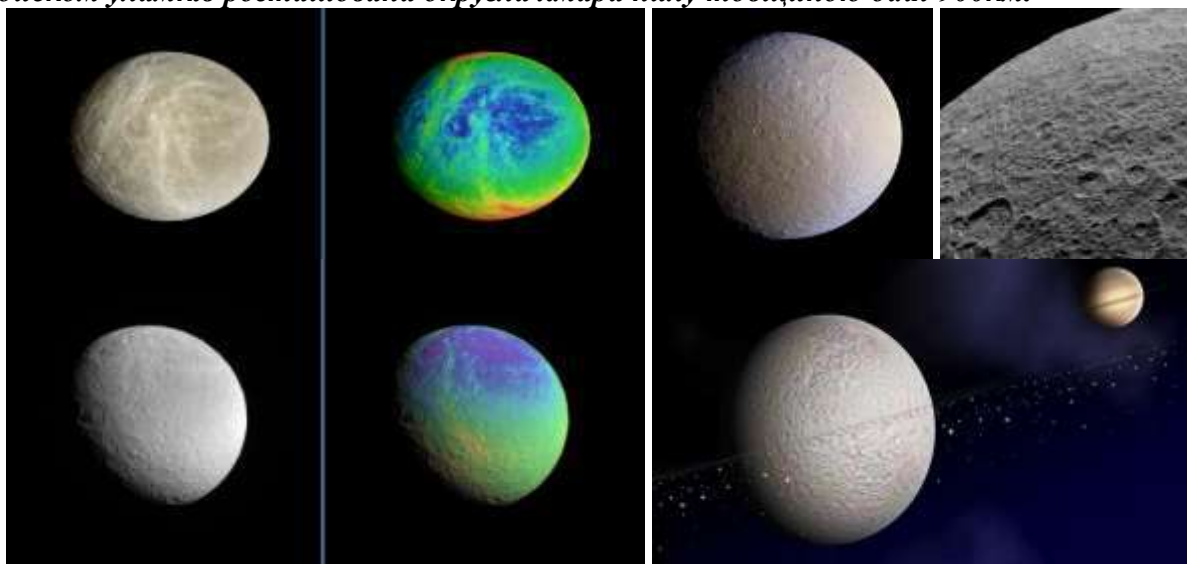


Рис.2.261. Крижана поверхня Реї і деталі її рельєфу в умовних кольорах (фото *Cassini*). Праворуч внизу: гіпотетичні *кільця Реї* - три колові смуги уламків із радіусами 2700, 2900 і 3200км, ширина кілець біля 10км при товщині в кілька метрів (художнє зображення *NASA/JPL*, товщина кілець збільшена)

Рея схожа на Діону за подібними особливостями ландшафту та хімічним складом, за однаковими альбедо і синхронним обертанням (до Сатурна постійно обернені одним боком). Поверхня супутника густо усіяна добре сформованими *ударними кратерами* та *яскравими прямолінійними утвореннями*, а невелика сила тяжіння зумовила відсутність компактних викидів навколо кратерів. Кратери на Реї не мають центральної гірки, як на Місяці чи Меркурії.

Яскраві прямолінійні деталі рельєфу можуть являти собою, як і на Діоні, заповнені кригою тріщини в корі супутника, які виникли під час активності надр супутника та діяльності вулканів, що вивергали воду. За типами поверхні на Реї можна виділити *дві геологічні області*: *перша* характеризується ударними кратерами діаметром понад 40км, *друга* – усіяна більш мілкими кратерами і займає деякі полярні та екваторіальні регіони. Це свідчить про зміну метеоритної обстановки під час формування поверхні супутника. Світлі плями на стінках деяких кратерів можуть являти собою відслонення відносно свіжої криги. Явно виділяється східний бік Реї, який немов би світиться. Можливо, це наслідок недавнього падіння на її поверхню космічного тіла, у результаті чого пил від вибуху рівномірно осів на східній поверхні Реї і є добрим відбивачем сонячного світла.

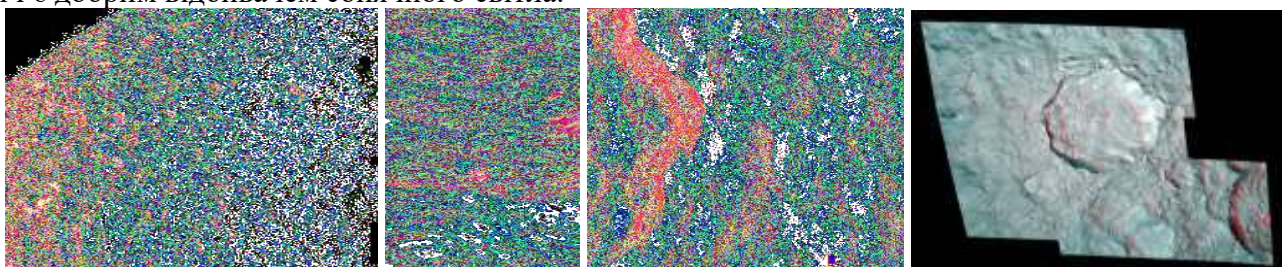


Рис.2.262. Давня кратеризована поверхня Реї та фото одного з її кратерів (фото *Cassini*)

Рея має низьку густину, що вказує на можливу наявність кам'яного ядра, що займає за об'ємом до третини діаметра супутника і яке оточене гірськими породами з великої кількістю криги. Вважають, що Рея складається з аміачної криги (5%), а решта – брили гірських порід та водяна крига, але низька густина супутника може вказувати на значно більшу (до 25%) кількість аміаку, так як NH_3 -крига значно легша за водяну.

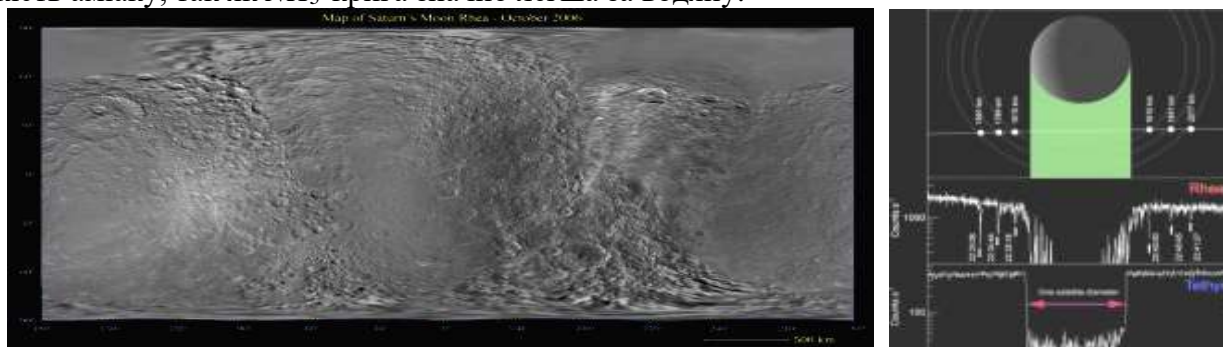


Рис.2.263. Карта Реї в проекції Меркатора та коливання потоків електронів, при перекриванні кільцями (?) Реї електричних токів, у радіаційних поясах Сатурна (за даними Cassini, NASA)

2.2.7.4. ДІОНА

ДІОНА – менша Реї за розмірами (діаметр Діони 1123,4 км) із найбільшою для внутрішніх супутників Сатурна густиною ($1,43 \text{ г/см}^3$), складена H_2O -кригою із значними домішками гірських порід у внутрішніх шарах надр та має яскраву крижану поверхню. Радіус орбіти Діони 377,4 тис. км, період обертання орбітою 66,5 години; вона постійно обернена до Сатурна одним більш кратеризованим та однорідним яскравим боком. На Діоні спостерігається значно більше ознак ендегенної активності ніж на Реї, що свідчить про її більш активну геологічну історію.

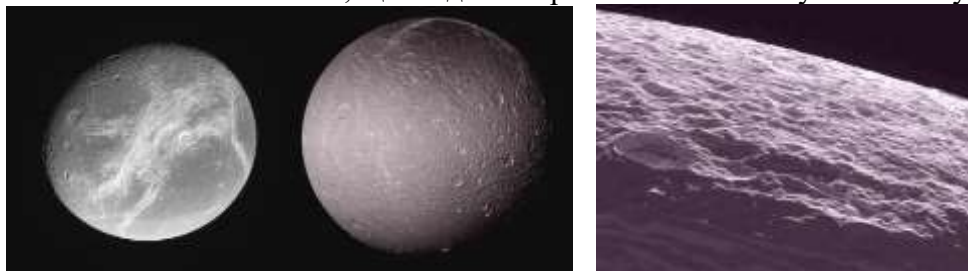


Рис.2.264. Один з найбільших супутників Сатурна - Діона та її кратеризований крижаний ландшафт (кратери без високих валів та центральних гірок через пластичність криги) (фото Cassini і Voyager-1)

Кратерів на Діоні менше ніж на Реї; виділяються дуже кратеризовані області та згладжені слабо кратеризовані рівнини із переробленою поверхнею. На „задньому” (за рухом супутника навколо Сатурна) боці супутника із темними плямами виділяються деталі глобальної тектонічної сітки розломів або зсувів (дуже схожі на крижані хребти і горсти висотою у декілька сотень метрів та грабени), що спричинили їх формування на поверхні вздовж системи розломів дегазованого льоду, який, можливо, витіснений із надр більш легкими компонентами (аміаком або метаном). Відмічаються жолоби чи долини довжиною в сотні кілометрів.

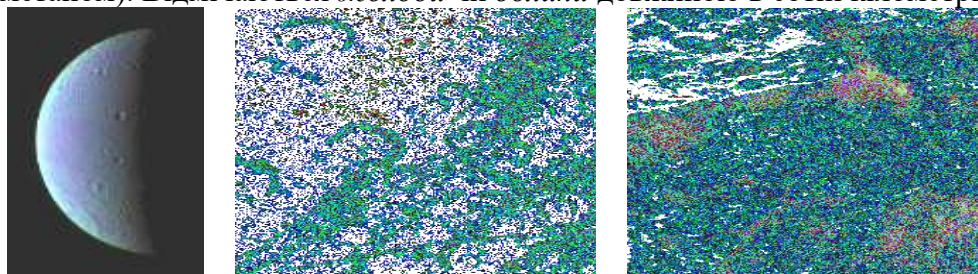


Рис.2.265. Ліворуч: Діона при накладенні фото в ультрафіолетовому, зеленому і інфрачервоному спектрах; великі розломи на крижаній поверхні Діони з глибокими кратерами (у центрі) та крупний план її крижаної поверхні із західною стінкою 60-кілометрового кратера Padua Linea (фото Cassini)

Синтезована геологічна історія Діони складається, мабуть, з процесів *тектоніки* та *вулканізму*, а також *глобального розширення*, які привели до утворення крупних за масштабами лінійних структур у кінці періоду потужного метеоритного бомбардування супутника.

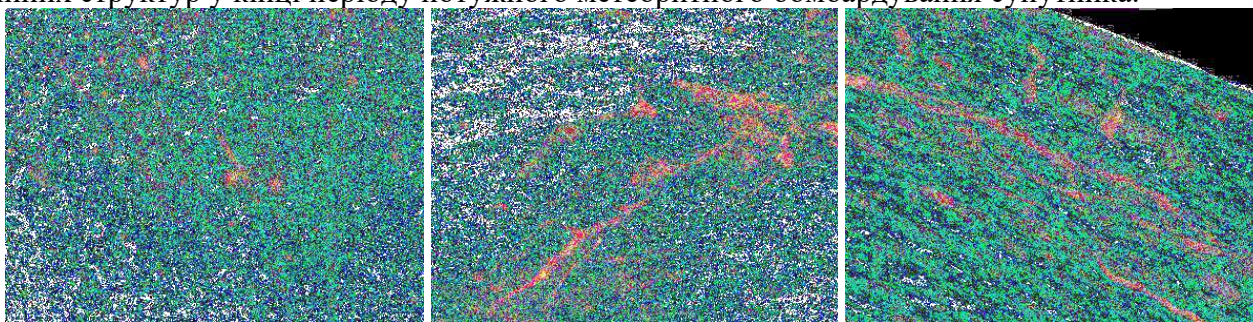


Рис.2.266. Різні ділянки поверхні Діони з численними кратерами, борознами, тріщинами і розломами (фото *Cassini*)

Пізніше відбувалися *процеси вулканічного виверження*, мабуть, аміачно-водних розплавів, які забезпечили можливість утворення мало кратеризованих рівнин. Потім допускається тривалий період *охолодження надр* і *глобального стискання кори* в горизонтальних напрямках.

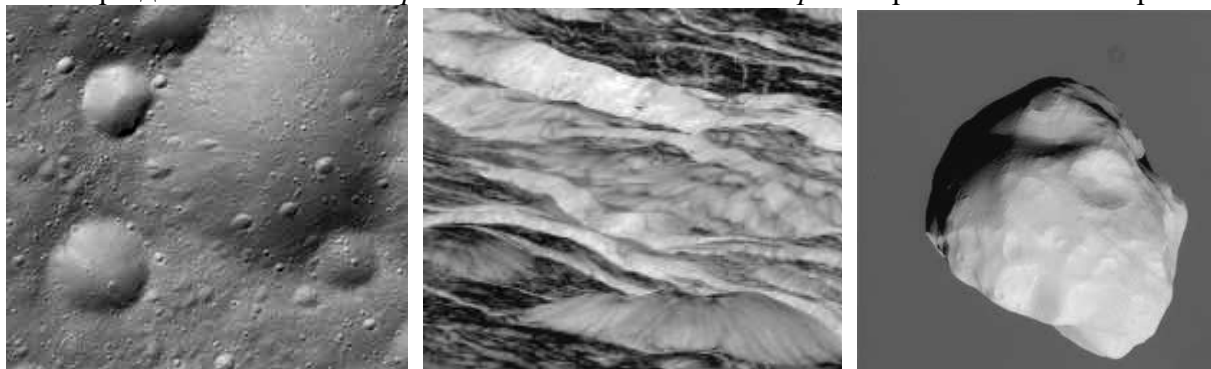


Рис.2.267. Поверхня Діони (ліворуч). Хребти і розломи на Діоні (у центрі) та коорбітальний з Діоною супутник Сатурна - *Елена* ($36 \times 32 \times 30$ км, густина $1,5 \text{ г/см}^3$, маса $2,55 \times 10^{16} \text{ кг}$) (фото *Cassini*)

2.2.7.5. ТЕФІЯ

ТЕФІЯ є майже двійником Діони за розмірами і рухається коловою орбітою радіусом 294,6 тис. км за 45,3 год., має діаметр 1066 км, густину $1,21 \text{ г/см}^3$ (в її складі переважає крига), масу $6,176 \times 10^{20} \text{ кг}$, альбедо 0,8. Поверхня Тефії густо кратеризована, у рельєфі виділяються гігантські кратер та каньйон. *Кратер Одиссей* (діаметр 400 км) – найбільший у системі Сатурна кратер із опуклим дном за рахунок в'язкої *крижаної літосфери* Тефії (рис.2.270, 2.273), розташований на протилежному боці від гігантського розлому - *каньйону Ітака* - довжиною 2000 км, шириною 1000 км та глибиною 3-5 км (рис.2.269, 2.270), який займає 3/4 поверхні Тефії по екватору.



Рис.2.268. Супутник Сатурна – *Тетфія* у справжньому та несправжньому кольорах (фото *Cassini*)

Протягом більшої частини своєї довжини каньйон Ітака є складним геологічним утворенням з великою кількістю майже паралельних стінок та жолобів, висота яких досягає декількох кілометрів. Ймовірно, що каньйон Ітака та гірські хребти навколо нього утворилися на протилежному боці Тефії при її зіткненні з астероїдом із утворенням кратера Одісей.

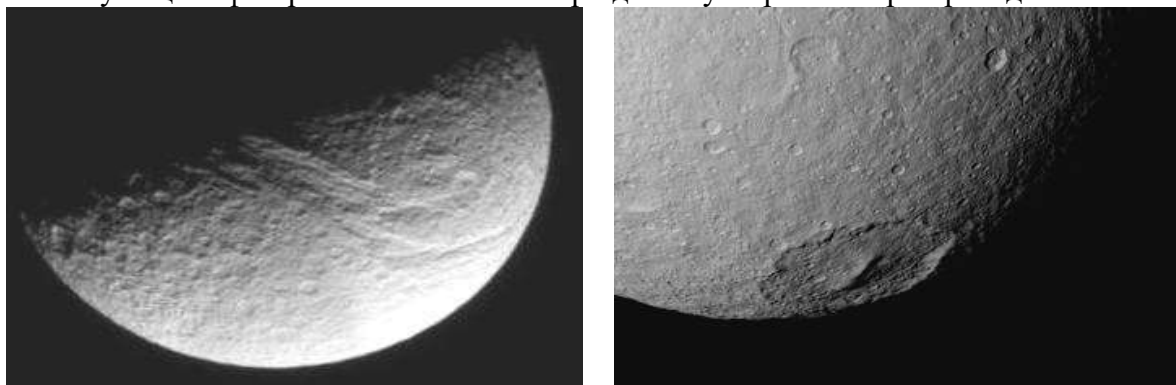


Рис.2.269. Загальний вигляд *Тефії* з каньйоном *Ітака* з боку південного полюса (ліворуч) та кратер *Melanthius* (праворуч) (фото *Cassini*)

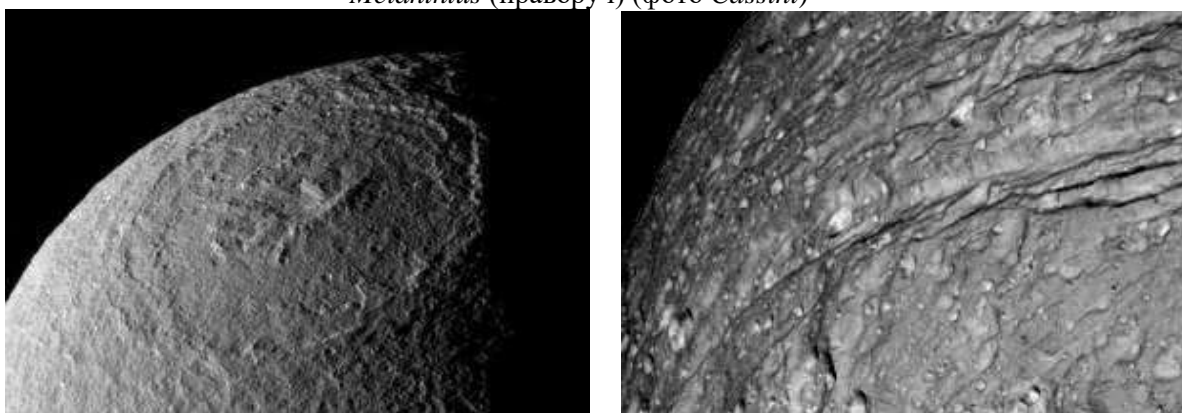


Рис.2.270. Найбільший у системі Сатурна кратер *Одісей* на *Тефії* через пластичність криги має низький кратерний вал навколо і невиразну центральну гірку (ліворуч) та крижана поверхня крутих стрімчаків *Тефії* з її найбільшим розломом – каньйоном *Ітака* (фото *Cassini*)

Каньйон Ітака є найменш кратеризованою та геологічно наймолодшою територією на *Тефії* і він також міг утворитися у результаті збільшення об'єму водяних надр при їх замерзанні, що привело до умов розтягування поверхні супутника. Можливо, що так же, як і на *Діоні*, випадки затоплення поверхні *Тефії* продовжувалися і після ери акреції. За комп'ютерними моделями, раніше на *Тефії* під поверхневим шаром криги існував водяний океан глибиною до 100км.

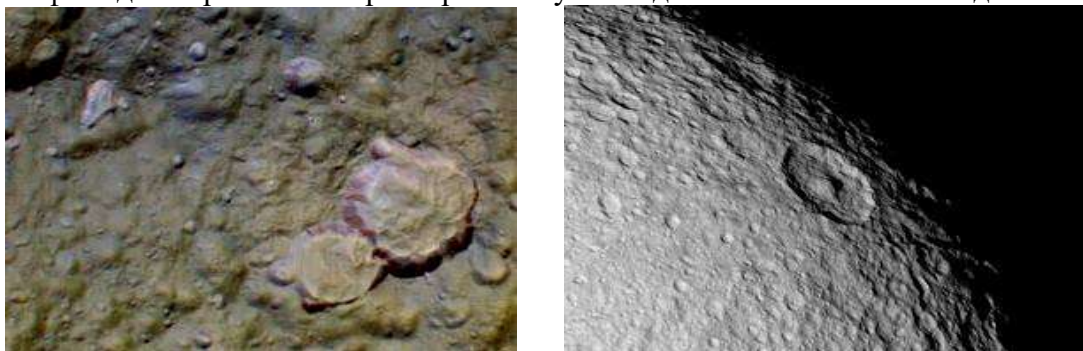


Рис.2.271. Ліворуч: ускладнений зсувами детальний ландшафт поверхні *Тефії* (у несправжніх кольорах); праворуч: еродовані рештки древнього кратера *Teiresias* (фото *Cassini*)

На *Тефії*, так же як на *Діоні* та *Реї*, видно території різного геологічного віку – *горбиста область* з густою сіткою кратерів - більша частина крупних кратерів тут дуже деградована, на стінках кратерів чітко видно зсуви, що модифікують їх форму та покривають дно великою кількістю сипучого матеріалу і *рівнинна територія* з меншою кількістю кратерів.



Рис.2.272. Темна поверхня із розломами *Діони* (ліворуч) та кратеризована поверхня *Тетії* (фото *Cassini*)

Багато більш молодих кратерів мають незвичне світле дно. Можливо, що при їх утворенні під час удару пробивався темний поверхневий шар утворень і відслонювалися більш світлі відклади чи породи більших глибин надр або ці глибинні породи є більш дрібнозернистими і відбивають більше світла, ніж стінки кратерів та оточуюча поверхня. Сьогодні Тетія має темно-сірий колір поверхні через пилове покриття на старій кризі з низьким альбедо.



Рис.2.273. Фрагмент поверхні *Тетії*; кратер *Одіссей* на півночі Тетії та її карта у проекції Меркатора (за даними *Cassini*, *NASA*)

За новими даними *Cassini* (2007р.) **Тетія та Діона, які вважалися раніше мертвими геологічними тілами, є джерелами гарячих, розжарених до стану плазми, вулканічних газів.** Потіки від'ємно заряджених електронів та позитивних іонів плазми викидаються із надр супутників та, через швидке обертання Сатурна, сплющуються у диск, від зовнішнього боку якого у космос простягаються великі пальці. Після охолодження плазми формуються нейтральні атоми, які „втікають” за рахунок відцентрових сил.

2.2.7.6. ЕНЦЕЛАД

ЕНЦЕЛАД - віддалений на 237 900км від Сатурна і постійно обернений одним боком до планети супутник із орбітальним періодом 32,9 год. та із дещо витягнутою у її напрямі формою (513×503×497км), діаметр 504,2км, густину 1,61г/см³, масу 1,08×10²⁰кг, альбедо 0,99 та **другий - крім Титана - супутник планет Сонячної системи з атмосферою та магнітним полем.**



Рис.2.274. Ліворуч: вигляд крижаного *Енцелада* з космосу. У центрі: тектонічно активний *Енцелад* з рідкими кратерами та величезними розломами (так звані „тигрові смуги”) у районі південного полюса і з ущелиною *Лебтейт* глибиною 1км, біля її верхів'я - великі гірські хребти *Ебоні* і *Куфа*. Праворуч: теплове випромінювання „тигрових смуг” із потужними гейзерами (зірочки) (фото *Cassini*, *NASA/JPL*)

Енцелад і Мімас - найближчі до Сатурна класичні внутрішні його супутники, але їх корінні відмінності є найбільшою таємницею системи Сатурна. Енцелад – **найяскравіший об'єкт Сонячної системи** - увесь покритий **білою водяною кригою** зі **слідами вуглекислоти** та **мільким крижаним пилом**, які разом відбивають понад 90% сонячного світла (альbedo земного снігу – 70-90%) та **найхолодніший супутник у системі Сатурна** (на його поверхні до -200°C).

Атмосфера Енцелада дуже розріджена, складається із найдрібніших *кристаликів H_2O -криги, парів та іонізованих молекул води* (65%) з добавками *молекулярних водню* (20%) та *азоту, вуглекислого і чадного газів* (їх разом 15%), та існує завдяки, ймовірно, періодичній діяльності **холодних гейзерів**, але незначна гравітація супутника не може довго утримувати навколо себе газову оболонку і вона поповнює **кільце E** Сатурна. Частина молекул атмосфери іонізована, а зафіксовані *Cassini* викривлення ліній магнітного поля зумовлені рухом у ньому подібних іонів.

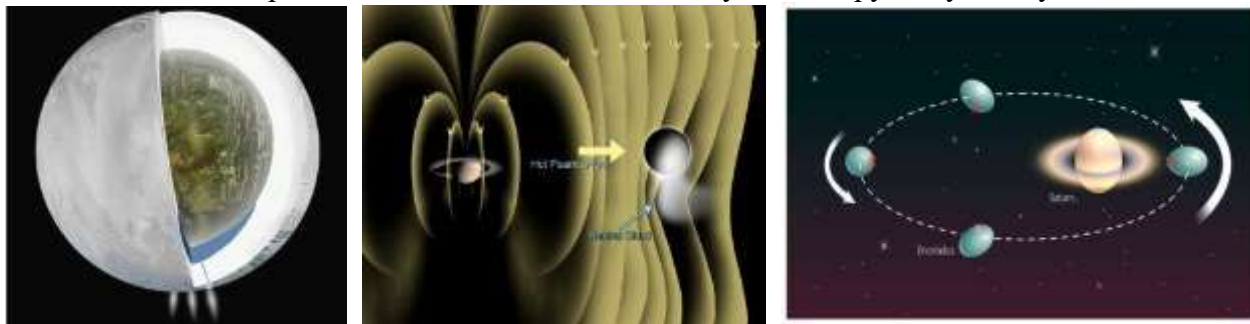


Рис.2.275. Дуже розріджена атмосфера Енцелада від дії газОВО-пилових *гейзерів* із відносно теплих підповерхневих водяних осередків (*діанірів*) геологічно активного району південного полюса. Уся південна полярна область опущена на 0,5км відносно фігури супутника, мабуть, через наявність океану під поверхнею, а циркумполярні гори піднімаються на 1км над поверхнею цієї улоговини (ліворуч). Атмосфера Енцелада у магнітному полі Сатурна (у центрі). Праворуч - деформації поверхні Енцелада (амплітуда деформацій 5м) припливними силами у його надрах під впливом гравітації Сатурна при обертанні еліптичною орбітою (ексцентриситет 0,047) навколо планети та нагрівання речовини надр із перетворенням механічної енергії у теплову (журнал *Nature*, v.447)

Супутник має 5 різних за формою та історією геологічного розвитку територій: утворені тектонічними процесами у потужному крижаному покриві **гладенькі ділянки** молодшої поверхні *без ударних кратерів* (рис.2.276, 2.282); *густо покриті кратерами* (діаметрами до 35км) області більш **давньої поверхні**, місцями - з *майже зруйнованими ударними кратерами; міжгір'я; рівнини; «зморщені» ділянки та інші деформації.*

Поверхня Енцелада покрита валунами (рис.2.278) розмірами до 10–20м і розбита **тріщинами** (із структурами типу трансформних розломів цих рифтів), ймовірно, від численних стискань та розтягувань крижаної кори супутника під впливом гравітації Сатурна та його супутників, зокрема Діоні, але валуни уникають попадання у ці тріщини. Можливо, що поверхня розтріскалася вже після формування валунів. Крім численних тріщин поверхня Енцелада покрита системами **розломів** з глибиною ущелин до 0,5км і ознаками асиметричного (однобічного) спредингу та **криволінійних хребтів** висотою від перших сотень метрів до 1,5км.

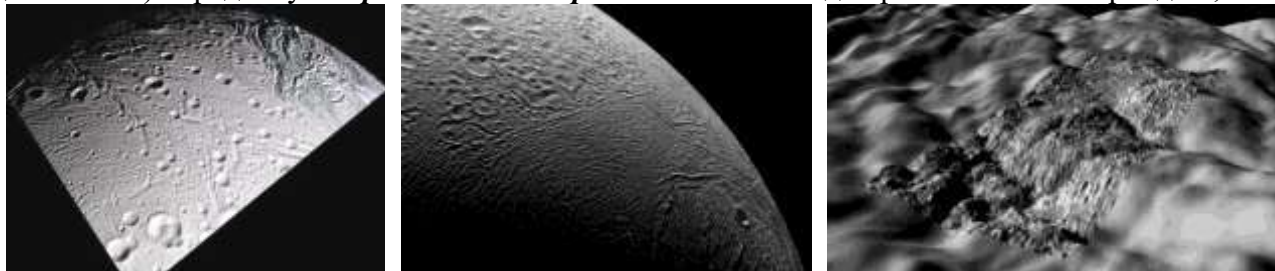


Рис.2.276. Ліворуч: *ударні кратери* (діаметр найбільшого 20км) більш давньої та *хребти і ущелини* більш молодшої і тектонічно активної крижаної поверхні Енцелада. У центрі: *давні* (покриті кратерами) та *молоді* (із складками та жолобами) *типи рельєфу* супутника (фото *Cassini*). Праворуч: деталізація перспективного вигляду рельєфу (використано техніку формування форми рельєфу за тінями) району південного полюса Енцелада поблизу одного з *гейзерів* (фото *Lunar and Planetary Institute, NASA*)

Таке геоморфологічне різноманіття територій є явною ознакою масштабної **ендогенної діяльності** супутника. Тріщини, розломи, „гірські хребти” та потужна діяльність гейзерів водяної пари та миттєво замерзаючих краплин води можуть свідчити про наявність у Енцелада певного активного *внутрішнього джерела енергії*. Нею могла б бути енергія радіоактивного розпаду в породах глибоких надр (рис.2.275а), або нагрів за рахунок звільнення енергії деформації твердих порід при гравітаційній взаємодії з Сатурном та його супутниками (рис.2.275в). Поки незрозуміло, чи існує різка межа між крижаним (або більш глибинним рідким водяним) шаром та твердим ядром, чи існує проміжний шар їх суміші. У кінці 2007 року *Cassini* відкрив джерело високої температури під кригою у районі південного полюса Енцелада.

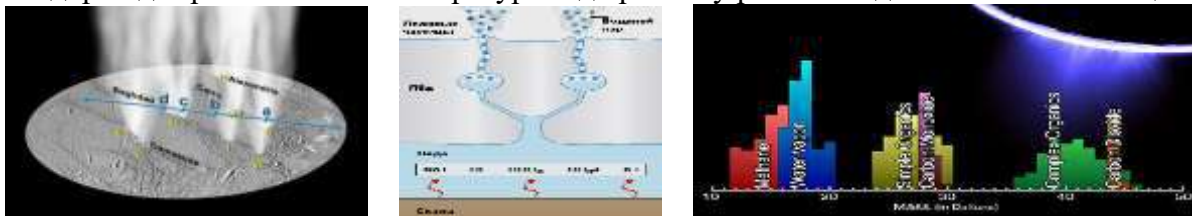


Рис.2.277. Ліворуч: місця затемнення (букви на фото) *продуктами вивержень гейзерів* (вказані цифрами) із розломів Енцелада при перекритті ними світла зорі (рух зорі вказано стрілкою) дзета Оріона (фото NASA/JPL). У центрі: *схема роботи гейзерів у «тигрових смугах»* Енцелада. Праворуч: *спектр гейзерів* Енцелада під час прольоту *Cassini* 12.03.2008р.

Поблизу геологічно активного південного полюса *Cassini* відкрив **чотири** паралельні ущелини в рельєфі супутника - великі *розломи* (так звані „*тигрові смуги*”) під власними назвами: **Олександрія, Каїр, Багдад і Дамаск** на віддаль до 30км між собою (рис.2.274, 2.277, 2.278 і 2.283). Довжина V-подібних у розрізі розломів 130км, ширина до 1км, глибина 0,3км із висотою стінок над крижаною поверхнею супутника до 0,1км. У межах цих розломів виділено **8** місць надпотужної для малого супутника *гейзерної діяльності* - з надр Енцелада у космічний простір на висоту понад 100км *безперервно фонтанують тисячі тонн води щогодини* (швидкість викидів 60м/сек. - більше 2-ої космічної швидкості на поверхні Енцелада, що передбачає наявність великого тиску і відносно високої температури в надрах; загальна продуктивність гейзерів до 5кг/сек пилу і 100кг/сек газу – дані *Cassini*. Відбувається сублімації (випаровування) криги на краях розломів зі швидкістю до 500кг/сек.) у вигляді *дуже тонкого (1,0-1,24мк) крижаного H₂O-пилу (91±3%) з бікарбонатом натрію (сода), вуглекислого газу (3,2±0,6%), азоту (4±1%) з частинками пилу та молекулами метану (1,6±0,6%); до 1% пропану, ацетилену, бензолу, синильної кислоти і формальдегіду* (рис.2.277, 2.279). Область „*тигрових смуг*” занурена на 0,5км відносно фігури супутника, мабуть, через наявність моря під поверхнею, а циркумполярні гори на 55° південної широти піднімаються на 1км над краями цієї улоговини.

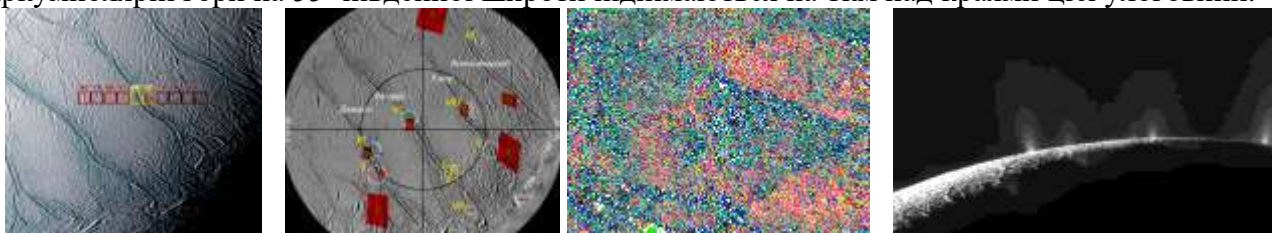


Рис.2.278. Ліворуч: „*тигрові смуги*” Енцелада з температурами по Кельвіну ($0^{\circ}\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$). У центрі: „*тигрові смуги*” Дамаск, Багдад, Каїр і Олександрія з ділянками підвищеної температури, де виділяється 60Вт/м² тепла (чотирикутники) та окремими гейзерами (кола) та розбитий розломами південний полярний ландшафт Енцелада із валунами. Праворуч: *гейзери* Енцелада (фото *Cassini*)

Численні нерівності стінок тріщин і зміна їх ширини разом зумовлюють гідродинамічне прискорення руху *газу (водяної пари)* із подоланням гравітації Енцелада та сповільнюють рух мікронних обледенілих *пилинок* через процеси їх тертя об стінки тріщин і через малу густину газу, яка не здатна підхопити їх, а тому пилінки вириваються на поверхню із значно меншою швидкістю і тільки 1/5 пилинок (до 1кг/сек) покидає супутник, але їх досить для підтримання у рівновазі *Е-кільця* Сатурна і навіть поповнення *А-кільця*, решта осідає на поверхню Енцелада.

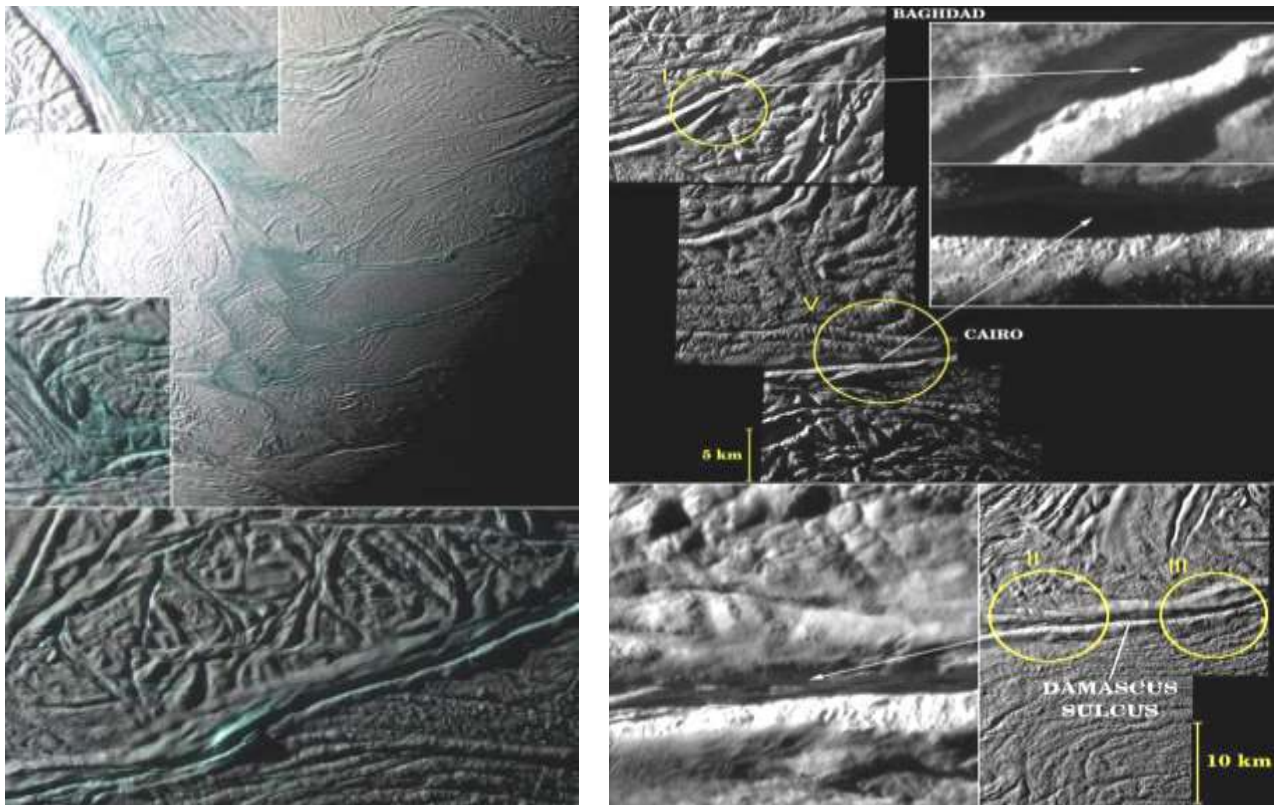


Рис.2.278-1. Ліворуч: чотири основні розломи Енцелада (Дамаск, Багдад, Каїр і Олександрія) зі збільшеними фрагментами цього ж фото свідчать, що суцільна крига та крупнозернисті осадки (більш темний фон фото) концентруються вздовж долин і стінок розломів, які можуть бути покриті викидами від вивержень, що осідають недалеко від джерел. В інших місцях Енцелада ця груба крига знаходиться поблизу схилів стрімчаків та на вершинах хребтів і може бути уламками зруйнованих активною тектонікою бескидів. Праворуч: фрагменти розломів Багдад і Каїр (верхня частина фотомозаїки) та розлому Дамаск (нижня частина фотомозаїки). Овалами виділені місця дії гейзерів (фото Cassini)

Вирішення гідродинамічної задачі формування та існування гейзерів (співпадає з даними спостережень Cassini) свідчить про існування рідкої води всього в сотні метрів під поверхнею Енцелада. Під впливом внутрішнього тиску теплих водних мас у площинах розломів формуються канали, якими водяна пара у вигляді тонкого крижаного пилу та обледенілих частинок пилу під тиском викидаються гейзерами на великі висоти над Енцеладом (рис.2.279) і формують недовговічну, локальну, надзвичайно розріджену *атмосферу* супутника. Наявність атмосфери та її густина залежать від активності водяних гейзерів у південних широтах.

Гейзери мають різні розміри. Густина газів у струменях гейзерів виявилася у 20 разів більше теоретичної, але дуже малою для їх оптичної видимості (рис.2.280). Неможливість вмісту такої кількості азоту та метану в рідкій воді під крижаною твердю Енцелада при існуючому низькому тиску – ці гази практично нерозчинні у воді - допускає їх існування у замерзлій, коли лід перебуває у стані *газових гідратів* або **клатратів** – речовин, у яких молекули сполуки-господаря утворюють просторовий каркас, а молекули сполуки-гостя розміщуються в його порожнинах.

В умовах майже повного вакууму на південному полюсі *клатрати* швидко розкладаються на гази азоту, метану, вуглекислоти та частинки криги. Певна кількість криги випаровується у вигляді водяної пари, яка спостерігається серед інших газів. Активні тектонічні процеси приводять до постійного відкривання та закривання тріщин у крижаній шапці Енцелада, через які і виринають величезні струмені гейзерів в умовах малої гравітації. Відносна амплітуда рухів країв тріщин до 0,5м. Існують *перпендикулярні до осі розлому рухи* (відкривають тріщини) та *паралельні* (викликають сухе тертя стінок тріщин, нагрів та сублимацію криги).

Потужність вивержень гейзерів може змінюватися у часі. Під час останнього фотографування (21.11.2009) Cassini зони розломів південного полюса – там настає 15-літня полярна ніч - на одній ділянці поверхні нарахували 30 окремих гейзерів, з яких 20 були новими.

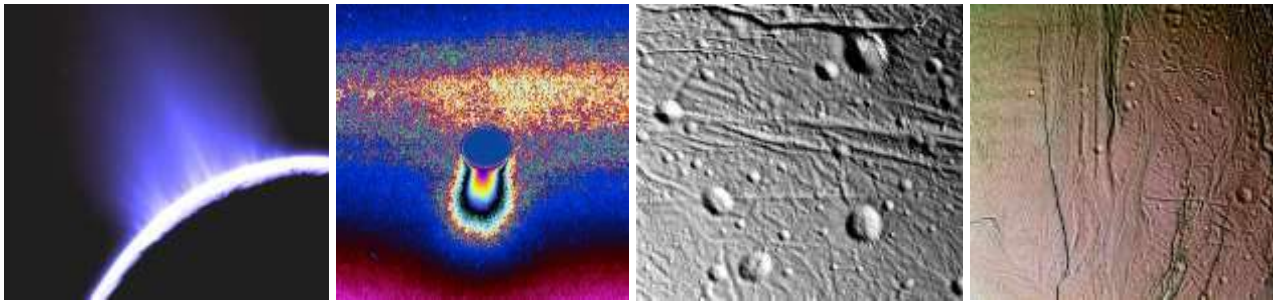


Рис.2.279. Зліва праворуч: гейзерні фонтани мілкового крижаного пилу (із „тигрових смуг”) на Енцеладі з видимими струменями; речовина кільця E, атмосфера супутника та гейзерні викиди із розломів у районі південного полюса (Сонце за Енцеладом); великий розлом біля ударного кратера (10км) та невеликі тріщини і кратери на поверхні супутника; геологічно древня зглажена і кратеризована (праворуч) та молода рівнинна з борознами (ліворуч) області (зони) поверхні зворотного боку Енцелада (фото Cassini)

Вивержена вода частково замерзає на краях розломів у вигляді інею, частково випадає на інші ділянки поверхні супутника, а решта її, разом з частинками пилу, поповнює речовину не тільки кільця E а й кільця A. Майбутній матеріал E-кільця Сатурна, у межах якого і пролягає орбіта Енцелада, зараз зосереджений у надрах супутника.

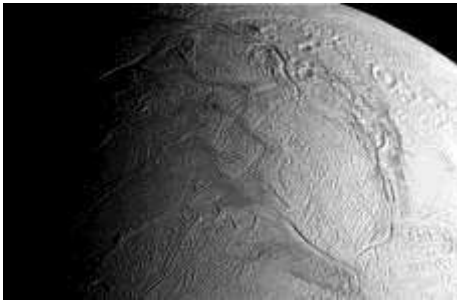


Рис.2.280. Проліт Cassini через крижані гейзери Енцелада, вертикальна сіра смуга на розломах – водяна пара(?) гейзерів (фото Cassini)

Ширина смуги тепла вздовж розлому Багдад 1км, а її максимальна температура доходить до -83°C , що різко контрастує з температурою поверхні оточуючих рівнин супутника (до -198°C) та екватора (-193°C). Цей факт не залишає сумнівів у тому, що у надрах температура наближається до 0°C – потрібної точки води, де її газоподібна, рідка та тверда фази існують у рівновазі. Така різниця температур не може бути зумовлена тільки нагріванням поверхні Енцелада слабким сонячним світлом, а вона свідчить про проникнення по розломах кори до поверхні внутрішнього тепла надр (величина теплового потоку від внутрішніх джерел складає $\approx 5,8 \pm 1,9 \text{ ГВт}$). Неясно, що за контрагент приймає участь у передачі тепла від надр до поверхні - змішана з рідкою водою солонка чи прісна крига. Нагрів також пов'язують з великим ексцентриситетом орбіти Енцелада та з потужними припливними силами.

Крім своєї морфології та підвищеної температури район розломів надав ще ряд загадок: спектральні характеристики утворень навколо розломів роблять їх схожими на звичайний земний сніг чи лід, а спектральні дані свідчать про наявність у тріщинах складних органічних молекул (включаючи CO_2 і молекули з H_2 та He - вроді метану, етану, пропану, ацетилену – побічне свідчення того, що вода на Енцеладі контактує з гарячим силікатним ядром розмірами до 100км), а також кристалічних форм криги, якої на Енцеладі не може існувати – кристалічний лід може формуватися тільки при значно вищих для Енцелада температурах.

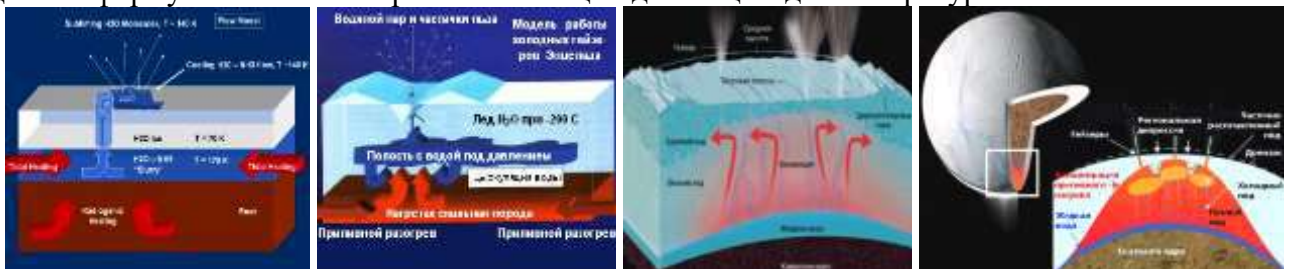


Рис.2.281. Різні моделі утворення холодних гейзерів на Енцеладі (ілюстрації NASA/JPL)

За показами спектрометрів лід на Енцеладі існує у двох формах: прозорій кристалічній та пошкодженій радіацією аморфній. Коли вода поступає на поверхню із „тигрових смуг” (у вигляді пари та дуже мілкового крижаного пилу), вона формує пласт нового прозорого льоду.

Потім під дією космічних променів цей лід „старіє” і перетворюється в аморфний, який має меншу здатність відбивати світло. Знаючи швидкість цього процесу, спеціалісти можуть оцінювати вік крижаних утворень на поверхні супутника. Проаналізувавши інформацію з *Cassini* було зроблено висновок - величезні розломи на поверхні Енцелада могли утворитися всього 10 років тому, але, можливо, що 10 років тому ці розломи кори розкрилися повторно.

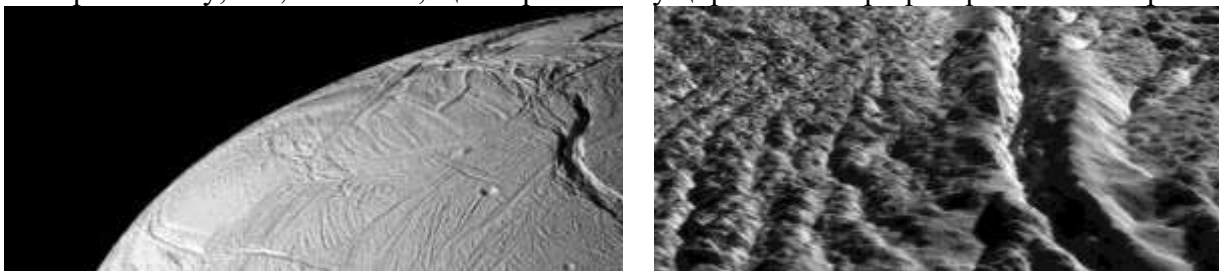


Рис.2.282. Ліворуч: розломи, ущелини і рідкі ударні кратери на молодій поверхні Енцелада свідчать про активні геологічні процеси. Праворуч: перспективний вигляд розлому Багдад шириною 5км, глибиною ущелини 200-250м та висотою обрамляючих розлом хребтів 100-150м (фото *Cassini*)

Подібність Енцелада із юпітеріанською Європою свідчить про наявність у нього під крижаною оболонкою товщиною 30-40км водяного, можливо, не глобального, океану глибиною біля 10км з внутрішнім теплом від припливних процесів, але за оцінками, припливна енергія на два порядки менша за необхідну для такого вулканізму.

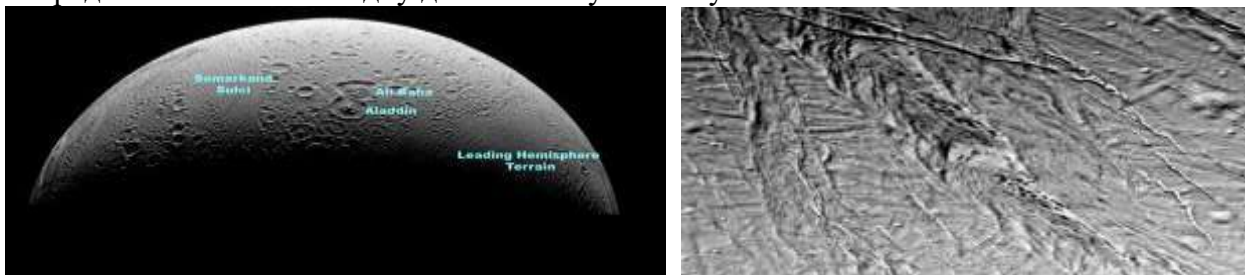


Рис.2.283. Ліворуч: кратеризована поверхня північної півкулі Енцелада із найбільшими кратерами – Алі-Баба і Аладін та розломом Самарканд (ліворуч), який пересікає ряд старих кратерів і частково руйнує їх із збереженням слідів кільцевих валів; праворуч від кратерів – крупний регіон із тектонічними розломами та хребтами - ці обидві ділянки рельєфу відносно геологічно молоді. Праворуч: ущелини пересікають древніші розломи поверхні (70×84км) північніше екватора Енцелада (фото *Cassini*, NASA)

Про унікальність геологічної історії Енцелада свідчить і його зв'язок з найширшим, але з найменшою густиною, кільцем *E* Сатурна. Дослідження показали, що кільце *E* сформувалося, мабуть, на протязі останніх декількох тисяч років, а його утворення прямо пов'язане з надзвичайно потужним процесом водяних фонтанів на Енцеладі, розпилені крижані частинки яких утворили кільце *E* навколо Сатурна та однорідну і чисту оптичну поверхню супутника.

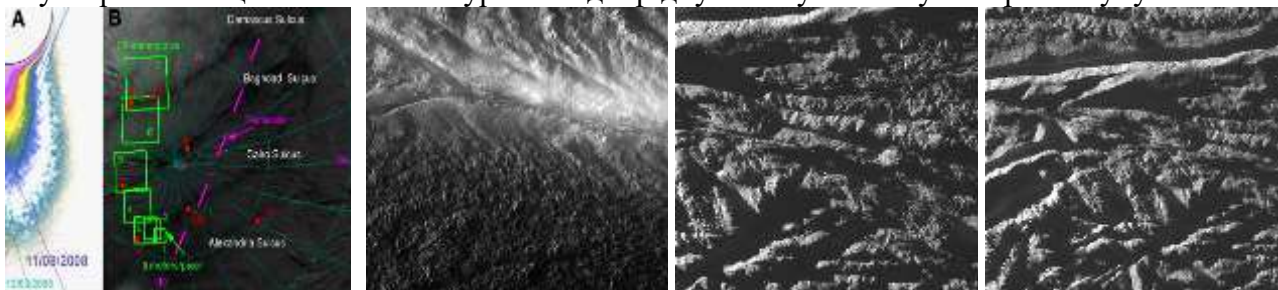


Рис.2.283-1. Фото розломів („тигрових смуг”) крупним планом (зліва праворуч): **1.** Схема прольотів *Cassini* біля Енцелада. **A** - „вигляд збоку” прольотів 12.03.2008р. і 11.08.2008р. **B** - проекція руху *Cassini* та місця (прямокутники) виконаних фото поверхні Енцелада, пунктиром показаний його термінатор (межа освітленого та нічного боків супутника), крапками – зони активних гейзерів з назвами розломів. **2.** „Тигрові смуги”, із великою чіткістю. **3.** Система молодих складок з різкими провалами між ними біля одного з гейзерів поблизу розлому *Kaïr*. **4.** Усіяна крижаними брилами поверхня поблизу одного з гейзерів *Kaïrського* розлому (густина речовини викидів недостатньо для їх видимого фіксування на фото).

Вік нерівномірно покритої різного розміру кратерами (на різних стадіях руйнування з сітками молодих паралельних тріщин) поверхні Енцелада в північній (рис.2.283) півкулі (4,2млрд. років.), на екваторі (від 170млн. до 3,7млрд. років) і на (рис.2.274, 2.278) півдні (від 10-1000 до 0,5-100млн. років) зумовлений тектонічною активністю в районі південного полюса, де, за розрахунками комп'ютером детальної моделі надр Енцелада та ознак його тектоніки плит, тепло надр формує область теплої криги, окремі найтепліші (до 0°C) зони якої, будучи менш щільними за оточуючий їх холодний (-193°C) лід, піднімаються до поверхні, починають танути і в них формується все більше і більше рідини (рис.2.281г). Тертя стінок розломів додає тепла цим «плюмам», із яких і беруть свій початок фонтани. Цей процес періодичний – епохи бурхливого оновлення 10-40% поверхні Енцелада тривають до 10млн.років кожна і вони розмежовані між собою періодами накопичення енергії тривалістю від 0,1 до 1-2 млрд. років

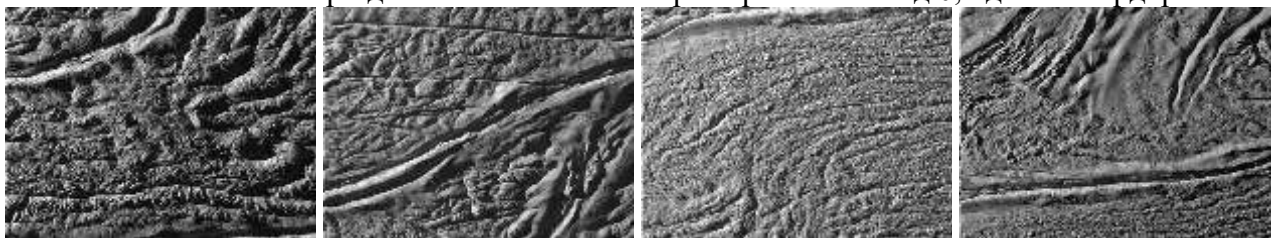


Рис.2.283-2. Зліва праворуч: 1. Ділянка поверхні між *розломом Kaïr* (внизу фото) та вигином безіменної *провальної структури* (ліворуч угорі). 2. Активна гейзерна зона *розлому Багдад* з молодими тонкими, дещо згладженими тріщинами більш давнього віку. 3. Яскрава крижана область між *розломами Багдад* та *Дамаск* (угорі на фото). 4. *Розлом Дамаск* (пересікає нижню частину фото) між двома відомими гейзерами та зі складками у крижаному покриві нижче розлому (фото *Cassini, NASA/JPL/SS Institute*)

2.2.7.7. МІМАС

МІМАС – найближчий до Сатурна і найбільший (діаметр 396км, довга вісь на 10% більша за коротку) із внутрішніх супутників планети з *надзвичайно багатою ударними кратерами поверхнею*, відносно великою їх глибиною і практично *відсутніми ознаками будь-якої геологічної активності* на цій мертвій брилі з водяної криги із включеннями уламків порід.

Мімас обертається на віддалі 185 520км від Сатурна за 22год.37хв., його гравітація формує *щілину Кассіні* – проміжок шириною до 5000км між двома найширшими кільцями *A* і *B*, а «найтепліші» ділянки його поверхні мають температуру -181°C. Густина Мімаса в 1,15 більша за густину води, маса $3,75 \times 10^{19}$ кг. Найхарактерніша особливість Мімаса – дуже добре збережений **кратер Гершель** діаметром 139км, який займає третину поверхні супутника. Висота стінок кратера до 5км, а глибина дна досягає 10км. У центрі кратера знаходиться центральний пік висотою над дном біля 6км та поперечником основи 20-30км. Кратер утворився від зіткнення Мімаса з великим астероїдом, у результаті чого тріщини з'явилися на протилежному боці супутника. Якби астероїд чи його швидкість були дещо більшими, то Мімас би неминуче загинув. На поверхні супутника спостерігається нерівномірність розташування ударних кратерів, причому багато кратерів у поперечнику перевищують 40км або менші за 20км (наприклад, *кратери Меліодас* 45км, *Лукан* 38,8км, *Мархаус* 34,5км, *Дагонет* 26км, *Неро* 24км, *Ройнс* 22,5км), дуже мало кратерів поперечником 20км і відсутні кратери понад 30км, що є доказом деяких змін поверхні супутника за період потужного метеоритного бомбардування.



Рис.2.284. Кратеризований супутник *Мімас* з гігантським ударним *кратером Гершеля* (фото *Cassini*)

Поруч з *Мімасом* обертаються маленькі супутники *Анті* і *Метона*, які мають власні кільця із речовини, яка відірвана від них через метеоритні бомбардування, а гравітаційне поле значно більшого *Мімаса* надає цим кільцям переривчастого вигляду в формі арок.

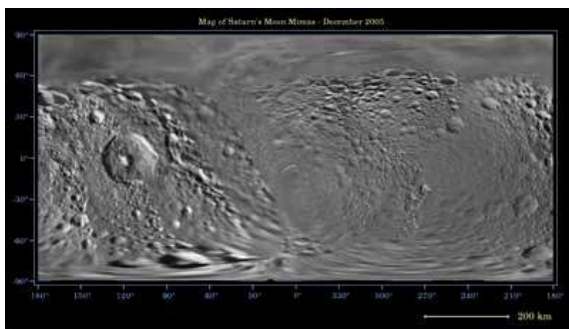


Рис.2.285. Карта *Мімаса* у проєкції Меркатора (за даними *Cassini*, NASA)

МАЛІ СУПУТНИКИ. До них відносяться класичні супутники *Гіперіон* і *Феба*, а також 10 космічних тіл, які розташовані між орбітою Діоні та зовнішнім краєм кільця *A* (це *Атлас*, супутники-“пастухи” кільця *F* тощо).

2.2.7.8. ФЕБА

ФЕБА – найвіддаленіший від Сатурна темний супутник (альbedo 0,06) густиною $1,6\text{г/см}^3$, розмірами $230\times 220\times 210\text{км}$, масою $8,3\times 10^{18}\text{кг}$, що обертається навколо власної осі за 9 год. 16хв. та навколо планети у межах *суперкільця* за 18 місяців (550,4 діб) у напрямі, зворотному напрямку обертання решти супутників навколо Сатурна та самої планети навколо власної осі, на віддалі 12,95 млн. км орбітою, площа якої нахилена під кутом 30° до площини екватора Сатурна.

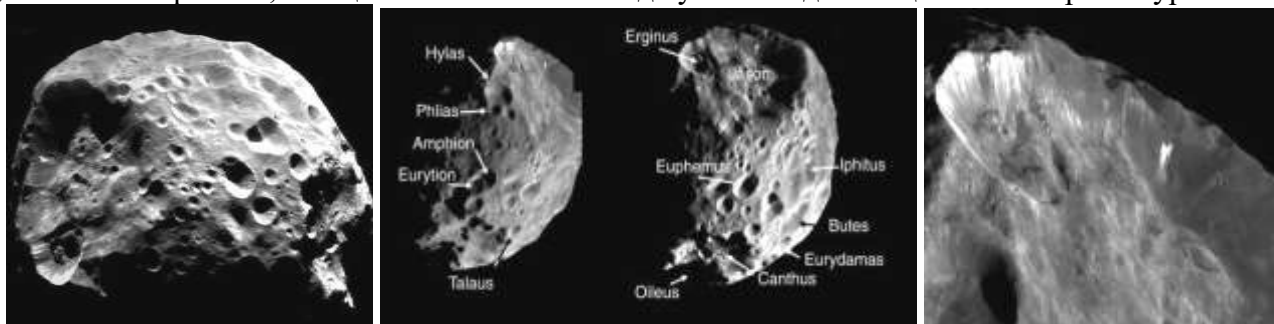


Рис.2.286. *Феба* – один із малих супутників Сатурна; ударні кратери на Фебі та найбільший з них (фото *Cassini*)

Феба є майже сферичним тілом, яке утворилося понад 4 млрд. років тому на зовнішніх границях Сонячної системи і тільки потім цей астероїд був захоплений гравітацією Сатурна і став його супутником. Відтоді супутник практично не змінився, крім потужних „шрамів” від ударів метеоритів та комет. Вчені вважають, що мілкий уламковий матеріал від цих ударів і утворив *суперкільце* Сатурна (рис.2.230), яке також обертається у напрямі руху *Феби*.

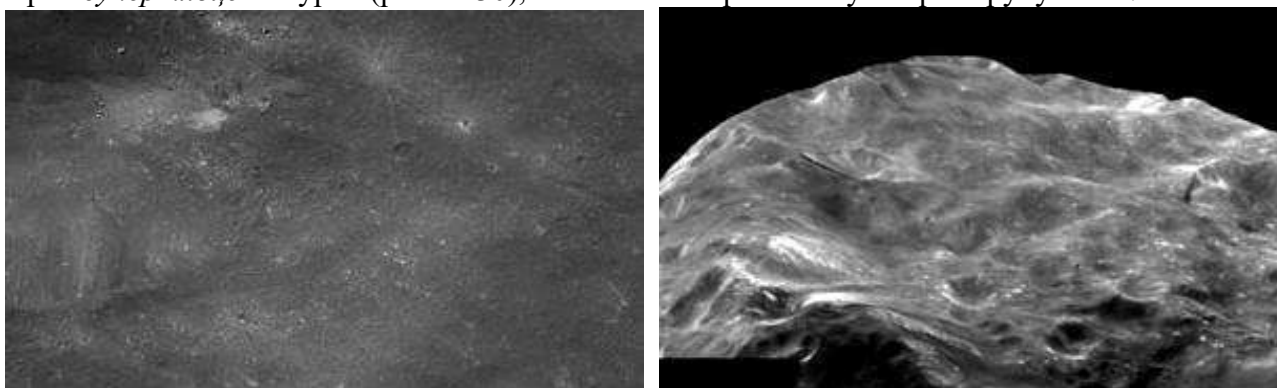


Рис.2.287. Пустельний ландшафт покритої темним матеріалом з масою маленьких кратерів поверхні *Феби* (ліворуч) та район південного полюса із світлими виступами криги та кратерами максимальною глибиною найбільших з них до 4км (фото *Cassini*)

Дослідження *Cassini-Huygens* показали, що на Фебі дуже холодно (-163°C) навіть на сонячному боці; густина $1,6\text{г/см}^3$, що набагато більше ніж у криги ($0,93\text{г/см}^3$), але менше ніж у

більшості порід. Феба складається в основному з криги із включеннями силікатних гірських порід, а її поверхня покрита шаром більш темної органічної речовини потужністю 300-500м і буквально поцяткована численними кратерами.

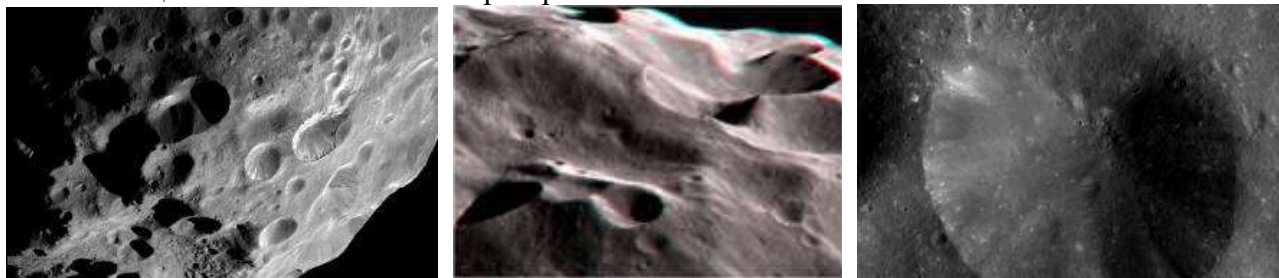


Рис.2.288. Кратеризована поверхня Феба (фото Cassini)

Допускається, що супутник складається із суміші криги і порід, чим дуже схожий на Плутон і Тритон, а за рядом хімічних показників він близький до комет, що свідчить про його формування у поясі Койпера. Аналіз фотографій та спектральні виміри показали багаті „вкраплення” різноманітних матеріалів у тілі Феба. Це *вуглекислий газ*, примітивні *органічні речовини*, ще не визначені *глини* і речовини з *молекулами води*. Крім того, вчені досліджують декілька спектральних аналізів, які ще не змогли ідентифікувати.

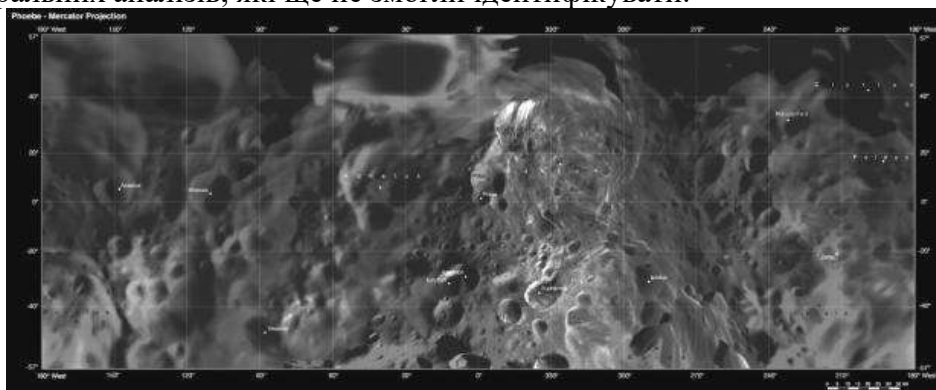


Рис.2.289. Карта Феба у проекції Меркатора (за даними Cassini, NASA)

2.2.7.9. ГІПЕРІОН

ГІПЕРІОН – найбільший із малих супутників, який обертається навколо Сатурна за дуже ексцентричною 21-денною еліптичною орбітою - коли *гігантський Титан та Гіперон зближуються, Титан гравітаційними силами змінює орієнтацію Гіперіона* - на віддалі 1,48 млн. км; має масу $1,35 \times 10^{23}$ кг і надто несферичну форму - являє собою червонуватого кольору брилу неправильної форми розмірами 360×280×225 км з гострокутними гранями та іншими деталями поверхні, на якій виділяється *група кратерів*, ймовірно, ударного походження, дно більшості яких покрите невідомою темно-червоною речовиною. Кратери найглибші, ніж на будь-якому іншому супутнику Сатурна, але найменше піддані ерозії. На фоні цієї речовини можна помітити яскраві деталі, що свідчить про невелику (декілька десятків метрів) потужність цих утворень. Особливу цікавість викликають *зсуви*, які покривають дно і формують химерні форми схилів валів ударних кратерів. Наявність цих зсувів багато в чому характеризує фізико-механічні властивості матеріалу поверхні.

Гіперіон має *дуже малу густину* ($0,6 \text{ г/см}^3$) і його надра мають *пористу структуру* типу губки з *кавернами* (печерами), що займають 42% об'єму супутника, а решта приходить на головним чином на водяну кригу. Альbedo „брудної” суміші замороженої води з органічним пилом та „сухого льоду” (твердий вуглекислий газ у суміші з іншими молекулами, зокрема води) поверхні супутника, яка місцями покрита темно-червоною органічною речовиною невідомого походження, біля 25%. Дослідники вважають, що діоксид вуглецю є тим критично важливим компонентом, завдяки випаровуванню якого Гіперіон став таким пористим. За даними Cassini (спектрометри UVIS та VIMS) на Гіперіоні присутні вмерзнені у кригу

вуглеводневі з'єднання, що включають атоми вуглецю з воднем, які відкриті в кометах, метеоритах та міжзоряному пилу. Під впливом ультрафіолетового випромінювання вони утворюють нові біологічно важливі молекули.

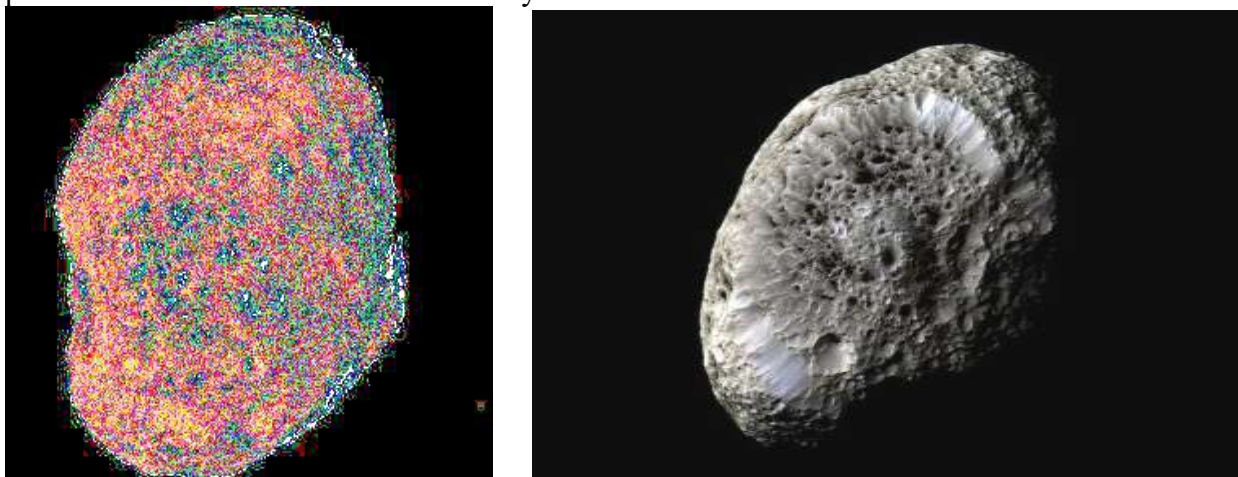


Рис.2.290. Покритий величезними кавернами супутник Сатурна – *Гіперіон* (фото *Cassini*)

На поверхні Гіперіона розташований *кратер* діаметром 120км та висотою рельєфу біля 10км, помічені також *великі скиди* (найдовший до 300км). Форма Гіперіона така, що він *не має постійної осі обертання* і може стійко обертатися у двох напрямках (асиметрична дзига). Супутник знаходиться в орбітальному резонансі з Титаном: періоди їх обертання навколо Сатурна співвідносяться як 4:3, але вплив решти супутників і спричиняє хаотичний обертальний рух Гіперіона, а тому неможливо визначити, коли наступного разу на Гіперіоні зійде Сонце, тобто регулярних „дня” і „ночі” немає. Гіперіон відбиває всього 1/4 частину сонячного світла, що падає на його поверхню.

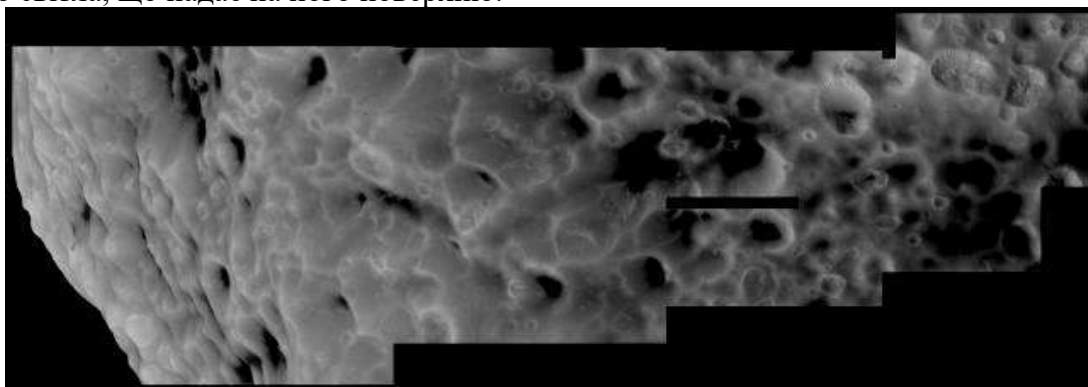


Рис.2.291. Незвичні кратери *Гіперіона* (фото *Cassini*)

Усі малі внутрішні супутники за розмірами менші за Феба, мають *неправильну форму і світлі, мабуть, крижані поверхні з кратерами*. Утворення кратерів і розтріскування, можливо, були *переважаючими процесами в їх геологічній історії* і, ймовірно, всі вони є *рештками великих тіл, які існували раніше*.



Рис.2.292. Супутники Сатурна - *Янус* (ліворуч і у центрі) та *Калісто* (праворуч) (фото *Cassini*)



Рис.2.293. Кратеризована поверхня *Епіметія* (густина $0,69 \text{ г/см}^3$, альbedo $0,73$). Праворуч: супутник Сатурна *Атлас* із екваторіальним потовщенням у площині кільця (із матеріалу якого це потовщення було сформоване), подібним до екваторіального потовщення іншого супутника – *Пана* (фото *Cassini*)

Супутники *Янус* (рис. 2.292) разом із *Епіметієм* (рис. 2.293) коорбітальні новому кільцю *R/2006 S1* і рухаються незалежно один від одного фактично по одній і тій же орбіті радіусом $151\,472 \text{ км}$ від центра Сатурна до тих пір, доки внутрішній супутник не починає наздоганяти зовнішній та під дією гравітаційних сил не виштовхується на більш високу орбіту, а зовнішній супутник переходить на більш близьку до Сатурна орбіту (рис. 2.294), тобто вони міняються місцями. Цей маневр відбувається приблизно раз у чотири роки. Віддаль між орбітами цих супутників всього 50 км - що менше радіусів самих супутників. Можливо, що ці об'єкти склали у минулому єдине космічне тіло, що на ранньому етапі формування Сонячної системи розділилося на два супутники.

Обертаються ці пористі, головним чином крижані супутники майже коловими орбітами на висоті $91\,000 \text{ км}$ над хмарним покривом Сатурна. *Янус* більший за *Епіметія* і має видовжену форму картоплини (розміри $193 \times 173 \times 137 \text{ км}$, маса $1,98 \times 10^{18} \text{ кг}$, густина $0,64 \text{ г/см}^3$, альbedo $0,71$), а розміри *Епіметія* $135 \times 108 \times 105 \text{ км}$ при масі $5,35 \times 10^{17} \text{ кг}$ та густині $0,61 \text{ г/см}^3$. Поверхня *Януса* покрита більшими кратерами (понад 30 км), а малі чомусь майже відсутні. Ймовірніше, що цей малий супутник – дуже пористе крижане тіло, яке покрите купами крижаної щебінки - вкритий шаром мілкового крижаного пилу, який може також покривати *Пандору* і *Телесто*.



Рис.2.294. Ліворуч: космічний „танок” коорбітальних *Януса* (вище) і *Епіметія* (нижче) (фото *Cassini*), які кожні 4 роки міняються місцями при наближенні до Сатурна (схема зміни їх орбіт праворуч)

Між Сатурном та Ураном розміщений недавно відкритий **пояс астероїдів** – у ньому існує понад мільярд об'єктів розмірами $10\text{-}100 \text{ м}$ і кілька десятків тисяч значно більших **астероїдів-кентаврів** (*Хірон*, діаметр $137 \pm 5 \text{ км}$; *Харікло*, $258,6 \pm 10,3 \text{ км}$ із двома кільцями на віддалі 395 км від поверхні астероїда - *Ойапоке* та *Чуй* шириною відповідно 7 і 3 км , які із розділені між собою 9 км проміжком, та із можливими супутниками-пастухами, що ці кільця сформували; *Фол*, $185 \pm 16 \text{ км}$; *Несс*, біля 58 км ; *Асбол*, $66 \pm 4 \text{ км}$; *Хілонома*, *Піленор*, *Терей* тощо), які рухаються нестабільними орбітами із великими ексцентриситетами та нахилами до площини екліптики від 0° до 25° . Існують побічні докази, що астероїдів-кентаврів тут може бути значно більше, ніж у Головному поясі та поблизу Юпітера.

Відкриття астероїдів дуже утруднене через їх віддаленість від Землі та необхідність використання надпотужних, із сучасними цифровими камерами, телескопів, але їх легко фіксують і підраховують на підставі нової методики вивчення – *перекриття навіть найменшими із них рентгенівського випромінювання далеких зірок та квазарів*.

Узагальнення та систематизація геологічних факторів на різних супутниках системи Сатурна дозволила виділити процеси, які пов'язані з внутрішньою енергією супутників (ендогенні процеси) та із зовнішнім впливом (екзогенні процеси).

2.2.7.10. ЕНДОГЕННІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ САТУРНА

Теплова еволюція системи Сатурна, особливо важлива роль невеликих кількостей метану та аміаку в стимулюванні раннього розплавлення і диференціації супутників, а також участь цих легких газів у дегазації крижаних супутників при їх розвитку, виявлена спостереженнями АМС *Voyager-1,-2*.

Один із найбільш чітких доказів *термічної еволюції* супутників Сатурна був наданий Тефією з її системою розломів каньйону Ітака. Якщо колись супутник являв собою наповнену водою кулю, яка була покрита тонкою крижаною кіркою, то *замерзання надр* зумовило збільшення об'єму і розтягування поверхні з утворенням каньйону. Незрозуміло, чому розтягування зосередилися тільки в одному вузькому витягнутому місці, а не було рівномірно розподілене по всій поверхні у вигляді системи розломів. Долини меншого масштабу або *грабени* на Діоні, яка за розмірами та густиною близька до Тефії, також могли бути утворені у результаті збільшення об'єму крижаного тіла при його замерзанні. Допускається можливість існування аналогічних жолобів на Мімасі, які були майже зруйновані наступними ударами космічних тіл.

На всіх внутрішніх супутниках Сатурна спостерігаються ознаки *декількох стадій часткової переробки поверхні*, мабуть, виливами з надр рідких водно-аміачних розплавів. Аналогічними поясненнями можливої дегазації вздовж ліній розломів допускається утворення геоморфологічно різних територій Реї та Діони, причому фіксується існування декількох різних видів внутрішньої активності, причини яких поки що незрозумілі.

Найбільш переконливі докази ендегенної активності зафіксовані на Енцеладі – активна *кріовулканічна діяльність*, існують сліди численних локалізованих подій *переробки поверхні і пластичних деформацій кори*, які потребують внутрішнього джерела тепла на порядки більшого від усіх відомих явищ. Контакти між кратеризованими областями і більш молодими рівнинами часто носять лінійний характер, різкі і руйнують кратери. Викривлені жолоби формувалися із відкритих витягнутих розломів у відносно крихкій корі. Широко поширене затоплення ділянок поверхні водяною “магмою” відбувалося, мабуть, у той же час. У деяких місцях, на контактах більш древніх і відносно молодих територій, кратери зруйновані *розривами* у корі *типу зсувів* амплітудою біля 20км. Тривалість геологічної активності на Енцеладі невідома, але ознаки постійної активності супутника потребують значно більшого теплового джерела, ніж радіоактивний розпад у можливому силікатному ядрі. Якщо унікальний рівень ендегенної активності Енцелада пояснюється джерелом високої температури у районі південного полюса і припливним нагріванням надр, то це значить, що примусовий ексцентриситет орбіти Енцелада в минулому був значно більшим, або що він епізодично посилювався резонансом з Діоною.

2.2.7.11. ЕКЗОГЕННІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ САТУРНА

Дуже кратеризовані поверхні супутників Сатурна підтверджують значну роль *ударів космічних тіл* у ході еволюції супутників. Гравітація Сатурна дуже впливає на цей процес і тому для близьких до планети супутників кількість ударів та їх енергія значно збільшуються. На інтенсивність формування кратерів також впливають маси самих супутників, але для невеликих тіл переважаючим є вплив планети.

Аналіз характеру утворення кратерів на всіх супутниках системи Сатурна вказує на *різні джерела походження утворюючих кратери тіл*. Мабуть, було по меншій мірі дві їх популяції: *перша* – відповідальна за потужне бомбардування після акреції, за утворення численних кратерів на Реї та на більш древніх ділянках Діони і на дуже кратеризованих територіях Тефії; *друга* – подібна вторинним популяціям на планетах земного типу і, можливо, утворена із уламків, сформованих при зіткненнях у середині системи. Результатом її діяльності є кратери на більш молодих територіях цих супутників, а також на більшій частині поверхні Мімаса і на всій поверхні Енцелада.

Ці два джерела відрізняються від зовнішнього сучасного метеоритного та кометного бомбардування.

Встановлено, що джерелом формування кільця *Е* Сатурна та причиною дивовижних властивостей поверхні Енцелада була, мабуть, ударна подія в недалекому геологічному минулому, коли однакові за розмірами сферичні частинки кільця *Е* почали формуватися в результаті конденсації водяної хмари із рідини, яка утворилася при ударі космічного тіла об поверхню Енцелада із утворенням ударного кратеру або тектонічних розломів. Оптичні властивості Енцелада пояснюються частковим випадінням на поверхню мікронних за розмірами частинок криги, що викидаються через розломи у корі супутника на висоту декількох сотень кілометрів. Решта крижаного пилу поповнює речовину кільця *Е*. Допускається періодичність утворення аналогічних тимчасових кілець у системі Сатурна.

2.2.7.12. ЕНДОГІДРОСФЕРИ І ЕНДОБІОСФЕРИ

Зараз встановлено, що *Земля – не єдина планета Сонячної системи, яка має гідросферу*. На супутниках Юпітера і Сатурна відкриті великі запаси водяної криги, зокрема для Європи і Калісто кількість води змінюється від 10% до 60% відповідно. На поверхні Європи практично немає ударних кратерів, які спостерігаються на четвертому галілеєвому супутнику Юпітера – Калісто. Очевидно, що зовнішня кора Європи постійно оновлюється через надходження води з мантиї, зокрема при падінні великих метеоритів на поверхню супутника. Так як температура на поверхні дуже низька, і вода швидко замерзає, то „оновлена” поверхня Європи покривається глобальними розломами криги. Дослідження галілеєвих супутників Юпітера дозволило відкрити нове явище планетології – *ендогідросфери небесних тіл*.

Ендогідросфери – це басейни рідкої води глобальних масштабів, які існують під поверхнею протягом космогонічних проміжків часу (мільйонів років). Температура в ендогідросферах галілеєвих супутників зростає з глибиною від -20°C до $+30$ – $+130^{\circ}\text{C}$, а тиск збільшується від 1-2 до 10 000 атмосфер. Вода під поверхнею також може існувати на супутниках Юпітера, Сатурна, Урана, Нептуна та на об'єктах поясу Койпера (рис.2.295).



Рис.2.295. Моделі внутрішньої будови *Титана* і деяких інших об'єктів Сонячної системи: супутників Юпітера *Європи*, *Ганімеда*, *Калісто*; супутників Урана *Титанії* та *Оберона*; супутника Нептун *Тритона* та деяких крупних об'єктів поясу Койпера - *Ериди*, *Плутона* і *Седни*.

За сучасними уявленнями, у надрах усіх крижаних тіл Сонячної системи під кригою існують океани

Екзобіологія – новий напрям науки, основною метою якого є пошук можливих форм життя поза межами Землі і аналіз умов, при яких ці форми життя можуть виникнути та розвиватися. Найперспективніший у цьому відношенні Марс, де можливі варіанти локалізації певних форм життя на окремих ділянках його поверхні або під нею – в „оазах” марсіанської біосфери. У 1984р. в Антарктиді був знайдений метеорит ALH 84001, що являє собою невеликий кусок марсіанської породи вагою близько 1,9кг і віком біля 4,5млрд. років, який після падіння метеорита на Марс був вибитий за межі атмосфери планети в космічний простір і в якому були знайдені скам'янілі рештки мікроорганізмів. Обговорюються також можливості існування простих біологічних або добіологічних форм матерії у шарах хмар планет Венери, Юпітера і Сатурна, а також на супутниках Юпітера – Європі і Сатурна - Титані. Існує гіпотеза про можливість виникнення і подальшої еволюції біосфер у ендогідросферах планет та їх супутників. Умови у верхніх шарах ендогідросфер галілеєвих супутників наближені до умов, у яких існує життя на дні земних океанів поблизу гарячих мінералізованих джерел (так званих „чорних курців”) на глибинах біля 10км. Джерела тепла, мабуть, існують на супутниках Юпітера у вигляді вулканів, вони достовірно зафіксовані на фотографіях Іо. Аналіз даних етапної добіологічної еволюції хімічних з'єднань і сучасні уявлення про появу найпростіших живих організмів свідчать, що під товстими крижаними покривами у водяному середовищі можливе виникнення і подальша еволюція ендобіосфер. Наявність для їх існування вільного кисню не обов'язкова або мало ймовірна - там повинні розвиватися анаеробні бактерії, для існування яких вільний кисень не потрібний.

Сатурн та його супутники досліджувалися за допомогою автоматичних космічних апаратів *Pioneer-11*, *Voyager-1,-2* і *Cassini* (США) та *Huygens* (ЄКА).

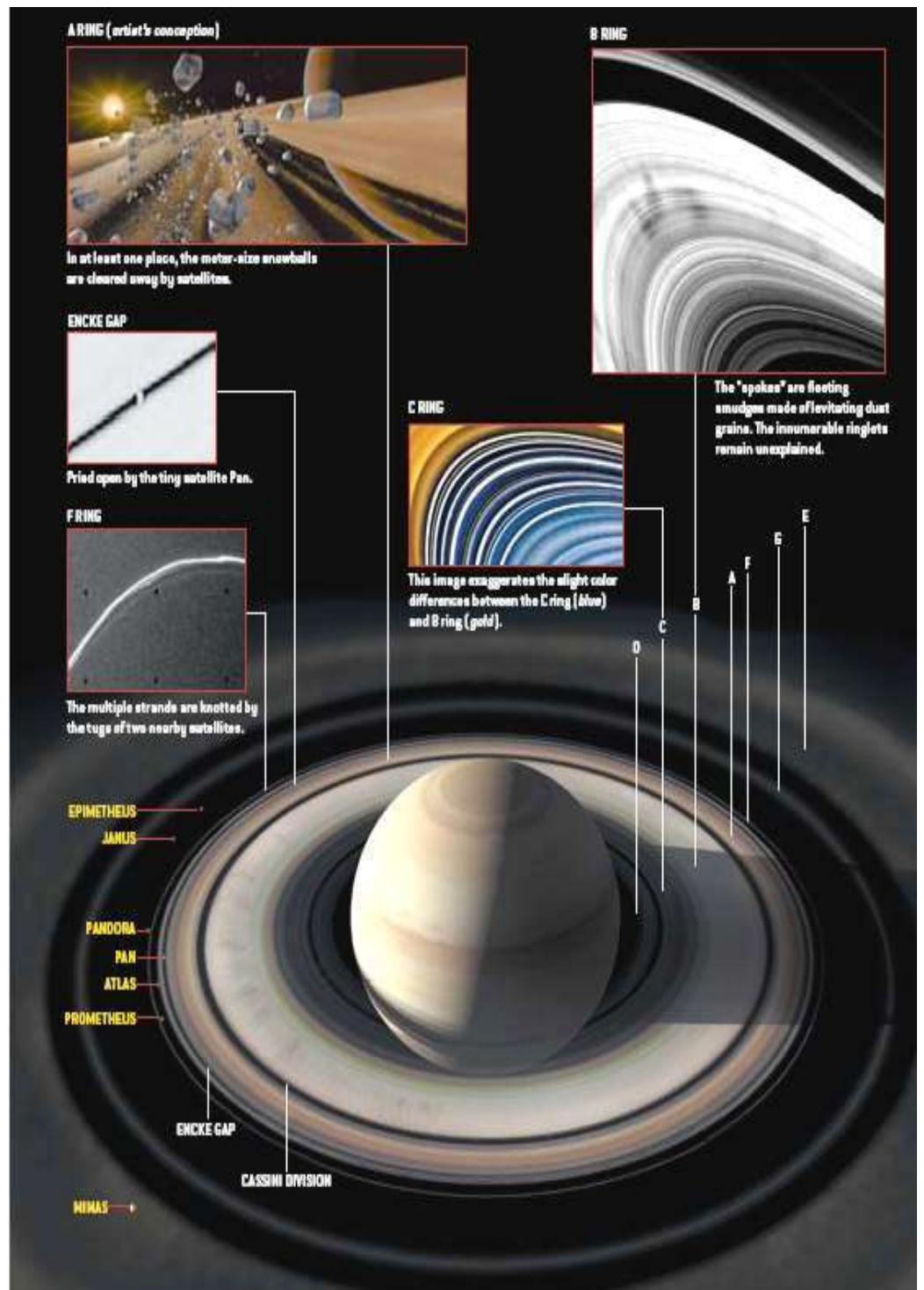


Рис.2.295-1. Система кілець *Сатурна* з особливостями їх структури (ліворуч) та супутниками-«пастухами» у межах кілець (дані *Voyager-1*, *Voyager-2* і *Cassini*)

Контрольні запитання

1. Які особливості атмосфери Сатурна та процесів у її межах над полюсами планети?
2. Зробіть порівняльну характеристику кілець Сатурна.
3. Яка причина утворення щілин у кільцях Сатурна?
4. Охарактеризуйте систему супутників Сатурна.
5. Які геологічні процеси та явища зафіксовані на супутниках Сатурна?
6. У чому полягає унікальність астероїда Харікло та супутників Сатурна - Титана та Енцелада?

2.2.8. УРАН

УРАН – сьома за віддаллю від Сонця та *третя за розмірами планета Сонячної системи, яка є найлегшою із газових планет-гігантів* з періодом обертання орбітою навколо Сонця 84,048 років зі швидкістю 6,81км/сек. на середній віддалі біля 2871млн. км. За рахунок швидкого – *ретроградного* - обертання навколо власної осі - *у протилежний за решту планет, крім Венери, бік* - Уран помітно сплюснений з полюсів: екваторіальний діаметр планети 51 120км (у 4 рази більший за діаметр Землі), а полярний – 49 950км. Маса Урану $8,7 \times 10^{25}$ кг (у 14,54 разів перевищує масу Землі) при середній густині $1,32 \text{ г/см}^3$ (0,4 густини Землі). Уран більший за розмірами, але менший за масою, ніж Нептун. Сила тяжіння біля поверхні Урана на 1/9 менша за земну (прискорення вільного падіння $8,7 \text{ м/сек}^2$), а середня температура -205°C . Мінімальна температура -220°C спостерігається на рівні 0,1 бар. Вище і нижче температура зростає. Температура атмосфери на рівні 2,3 бара досягає -173°C . **Уран – єдина планета-гігант Сонячної системи, яка не має потужного внутрішнього джерела тепла і випромінює практично стільки ж енергії, скільки отримує її від Сонця.** Причина цього поки що невідома. Вісь Урану нахилена майже на 98° , тобто *північний полюс розташований нижче власної площини орбіти і тому планета немов би “котиться” орбітою навколо Сонця та повернута до нього своїм північним полюсом, а південний полюс знаходиться в півтімі.*

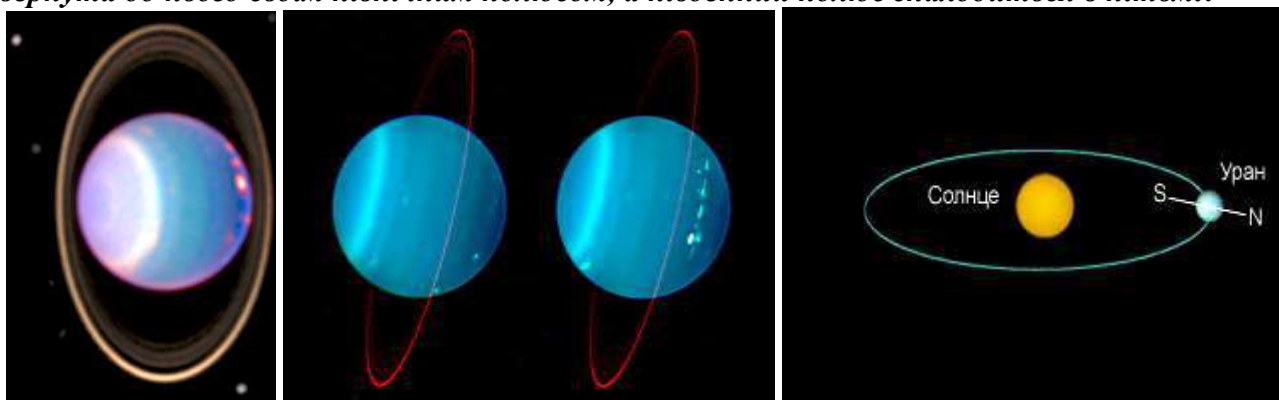


Рис.2.296. Ліворуч: система кілець та супутники *Урана* при його „боковому” положенні відносно екліптики (фото *Hubble*). У центрі: Уран в інфрачервоному діапазоні (фото наземного телескопу *Keck*) із локальними збуреннями в його атмосфері та схема орбітального руху планети (праворуч)

Пори року на Урані тривають дуже довго: на сонячному боці „літній день” триває 42 роки, а на протилежному – така ж тривала „зимово ніч”, але полюси Урана разом отримують значно більше сонячної енергії за його екваторіальні області. Освітленість на Урані в 370 разів нижча за земну - денна освітленість на Урані відповідає земним сутінкам зразу після заходу Сонця.

Атмосфера Урану потужна – біля 8000км, холодна, дуже прозора над хмарами і складається (атмосфера, а не Уран в цілому!) із *водню* H_2 (83%), *гелію* He (15%), *метану* CH_4 (2%), *аміаку* NH_3 , а також з мізерної кількості речовин від фотолізу метану: *ацетилену* C_2H_2 , *діацетилену* C_4H_2 , *етилену* C_2H_4 і *етану* C_2H_6 та інших більш складних вуглеводнів, які утворюють тонкий надхмарний серпанок – за хімічним складом вона подібна до атмосфери Юпітера, але вміщує значно більше метану та аміаку.

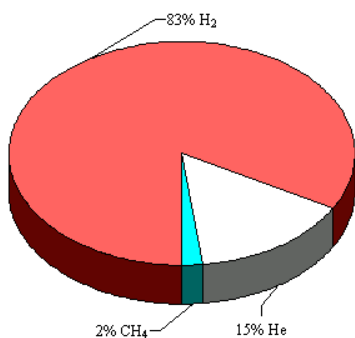


Рис.2.297. Хімічний склад атмосфери *Урана*

Висотний *фотохімічний серпанок* планети маскує її хмарний покрив, а молекули метану поглинають червону частину сонячного спектру і тому ззовні **Уран має блакитно-бірюзовий колір.**

Основний **шар хмар** на Урані розташований на рівні тиску 2,4-3,4 атмосфери при температурі -173°C і складений *замерзлим сірководнем* H_2S . Нижче **першого шару хмар** на рівні тиску 20-30 атмосфер знаходиться

другий шар хмар із *гідросульфиду амонію* NH_4SH . Ще глибше (на рівні тиску 50 атмосфер) знаходяться хмари із **водяних крижинок**. Одночасно щільний та однорідний **хмарний покрив** приховує результати незначної атмосферної активності планети, проте у верхніх шарах атмосфери середніх широт **потужні урагани** зі швидкістю до 150м/сек. невтомно гонять навколо планети у напрямі її обертання видимі **пасма хмар** довжиною у тисячі кілометрів, також видно темно-сірі **круглі плями** на полюсах. У районі екватора хмари рухаються у протилежному напрямі зі швидкістю до 100м/сек. Деякі зовнішні області атмосфери Урана виконують повний оберт значно швидше, ніж внутрішні її шари: так при періоді обертання Урана навколо осі за годинниковою стрілкою за 17год. 14хв., зовнішні хмари можуть обгинати планету за 16, а місцями – за 14,5 годин, але **гравітаційне стискання планети** (величина стискання 1/17) **служить джерелом тільки для підтримання в її надрах температури біля $+7000^\circ\text{C}$** (за іншими даними $+10\,000^\circ\text{C}$).

Космічний телескоп *Hubble* відкрив в атмосфері північної півкулі Урана на широті біля 27° **гігантський хмарний вихор** розмірами $1700 \times 3000\text{км}$, а також почав регулярно фіксувати хмарні утворення переважно оранжевого відтінку. Їх поява зумовлена наближенням Сонця до площини екватора планети – до рівнодення – та встановленням в одній з півкуль планети *весни*, а в іншій - *осені*. Хмари, ймовірно, складені із частинок *замерзлого метану*, температура



поблизу їх верхнього краю біля -218°C , газовий тиск у кілька атмосфер. Незважаючи на те, що при прольоті *Voyager-2* Уран був повернутий до Сонця південним полюсом, найвища температура хмарного покриву зафіксована біля екватора. Вона знижується на декілька градусів у середніх широтах і знову зростає до полюсів.

Рис.2.298. Модель кілець Урана

Уран має **13 дуже вузьких, тонких і густих чорних кілець** - 1986U2R/ζ, 6, 5, 4, α, β, η, γ, δ, λ, ε, ν, μ (відкриті у 1977-2005pp.), які розташовані з нахилами до площини екватора планети до $0,06^\circ$, не виходять за орбіти супутників планети та складаються із частинок розмірами від декількох сантиметрів до 20 метрів,

тобто, частинки кілець Урана більш масивні, ніж у Сатурна. У структурі кілець набагато більше *вуглецевих сполук* ніж блискучої *водяної криги* – чим і пояснюється *дуже низьке альbedo* (2%) чорних кілець Урана у порівнянні з Сатурном. Якщо кільця Сатурна симетричні, то в Урана – викривлені, деформовані та неправильно-овальні, а їх ширина різниться на десятки кілометрів – найменша у перицентрі і найбільша в апоцентрі. Форма кілець помітно відрізняється від колової (ексцентриситет до 0,01), середня ширина їх не перевищує 10км і тільки одне з них у найвіддаленішій від планети точці розширюється майже до 100км. Товщина кілець до 100м.

Кільця Урана

№ п/п	Назва кільця	Віддаль (км)	Ширина (км)	Товщина (км)
1	1986 U2R	38 000	2500	0,1
2	6	41 840	1-3	0,1
3	5	42 230	2-3	0,1
4	4	42 580	2-3	0,1
5	Альфа	44 720	7-12	0,1
6	Бета	45 670	7-12	0,1
7	Ета	47 190	0-2	0,1
8	Гамма	47 630	1-4	0,1
9	Дельта	48 290	3-9	0,1
10	1986 U1R	50 020	1-2	0,1
11	Епсилон	51 140	20-100	< 0,15

Дуже незначна кількість мілкового космічного пилу поширена у проміжках між кільцями по всій кільцевій системі. Більша частина кілець у внутрішній області гальмується потужною атмосферою Урана і пил швидко осідає на поверхню планети.

9 основних кілець Урана складені з одного шару частинок. Найтемніше *внутрішнє кільце* має радіус 40 000км і являє собою складений уламками порід диск шириною 3500км. *Зовнішнє* із кілець (еліптичне *кільце Епсилон*) найяскравіше, із внутрішнього та зовнішнього боків воно обмежене не зафіксованими в інших кільцях *супутниками-„пастухами”* (*Корделія* та *Офелія*), які утримують частинки кільця за рахунок резонансу (кратності періодів обертання супутників та частинок). Поблизу Урана ширина кільця 20км і воно майже непрозоре та у свою чергу має власну систему мілких кілець і складене, головним чином, крижаними уламками та брилами у поперечнику від 10см до одного метра, а у найвіддаленіших від планети ділянках орбіти воно розширюється до 96км, а його оптична густина відповідно зменшується.

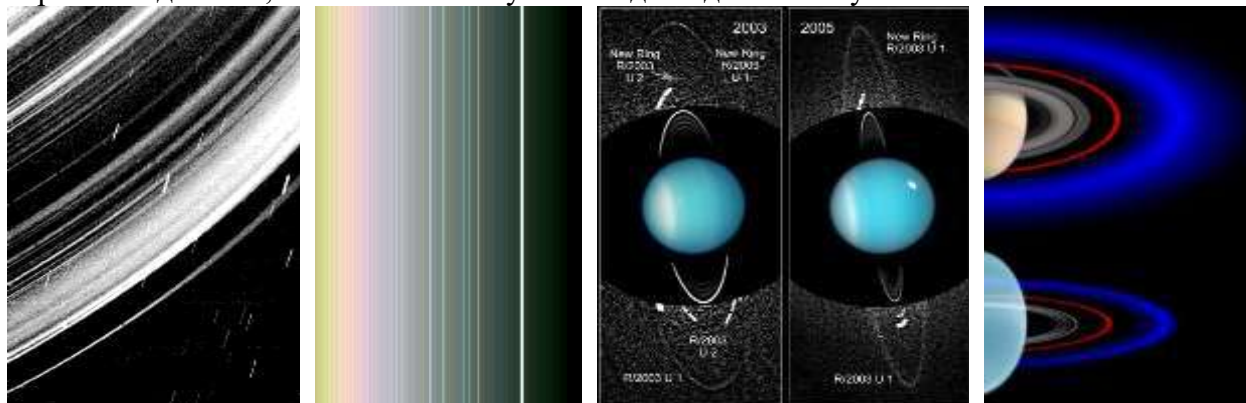


Рис.2.299. Безперервний розподіл мілких частинок у системі кілець Урана та вигляд кілець у несправжніх кольорах (фото *Voyager-2*); два нових зовнішніх кільця (центральне фото *Hubble*); порівняння кілець *Сатурна* та *Урана* (праворуч)

У процесі спостережень за Ураном за допомогою космічного телескопу *Hubble* були відкриті дуже розріджені та темні **два нових зовнішніх кільця** (*R/2003 U1* і *R/2003 U2*), які, ймовірно, складені з пилу, кам'яних тіл і вміщують мало криги (рис.2.299). Зовнішнє кільце планети Уран *яскраво-блакитного кольору*, що свідчить про субмікронний розмір його складових порошинок, які відбивають блакитну частину діапазону світла. **У 2007р. на Урані наступить рівнодення, Сонце розташується прямо у площині екватора планети, що створить найсприятливіші умови для подальших досліджень системи кілець планети.**

Магнітне поле (встановлене *Voyager-2*) складає біля 5/6 земного, має дуже складну конфігурацію і напругу (0,23Гс на рівні хмар) приблизно таку ж, як і магнітне поле Землі, проте його полярність зворотна. Поле можна вважати дипольним, його вісь зміщена від центра планети на 1/3 радіуса (на 600км) і нахилена до осі обертання на 60° (найбільший нахил серед усіх планет Сонячної системи) (рис.2.300). Спостереження за змінами інтенсивності радіовипромінювання планети і дозволили визначити **тривалість ураніанської доби в 17год. 14хв. 24сек.** (вірніше, це період обертання магнітного поля планети). Магнітне поле зумовлює існування „полярних” сьайв, які спостерігаються на рівні верхньої частини атмосфери.

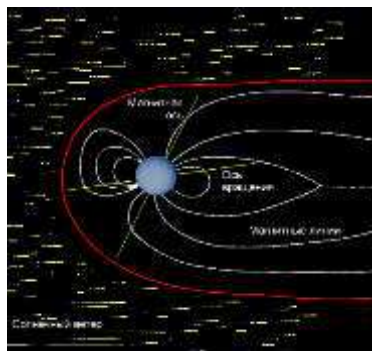


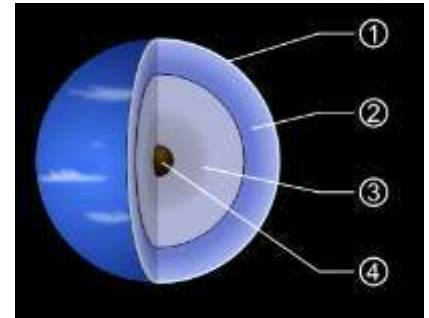
Рис.2.300. Схема магнітосфери Урана

Джерело магнітного поля Урана точно не відоме. При віддаленні від планети її протяжна магнітосфера з **радіаційними поясами**, в основному із іонів H_2 та електронів, закручується у довгу спіраль. Астрономи допускають, що **незабаром після утворення Сонячної системи відбулося зіткнення Урана з іншим, більшим космічним тілом. Не виключено, що в результаті цього зіткнення Уран був перекинутий на бік. Джерело магнітного поля невідоме. Якщо раніше вважали, що воно розташоване між атмосферою і ядром планети,**

то зараз його існування пов'язують з існуванням ядра планети. Уран має слабкіші за земні радіаційні пояси.

Уявлення про **внутрішню будову Урана** базуються на даних його діаметра, маси, періоду обертання, розподілу гравітаційного поля, хімічного складу атмосфери та видимої активності атмосферних мас (рис.2.301).

Рис.2.301. Схема внутрішньої будови Урана:
1- верхня атмосфера з хмарами; 2- атмосфера із H_2 , He, CH_4 ;
3- мантія; 4- ядро



Потужна **атмосфера** Урану (20% від всієї маси планети і перевищує масу Землі) із *молекулярного* H_2 , He та CH_4 оточує покриту **рідинною оболонкою** планету. На відміну від Юпітера і Сатурна газовий гігант Уран має **тверду поверхню** - його тверда **кора (мантія)** складена *водяною кригою*, замерзлим *аміаком, метаном, вуглекислим* (CO_2) та *задушливим* (CO) **газами**, її вага оцінюється у 10-12 земних мас і вона оточує гаряче **силікатно-металеве (Fe, Ni) ядро** невизначених поки що розмірів. Температура у центрі планети сягає $+7000^{\circ}C$, а тиск до 6 млн. атмосфер. Маса мантії і ядра 85-90% усієї маси планети, а зона твердих речовин простягається до $\frac{3}{4}$ радіуса Урана.

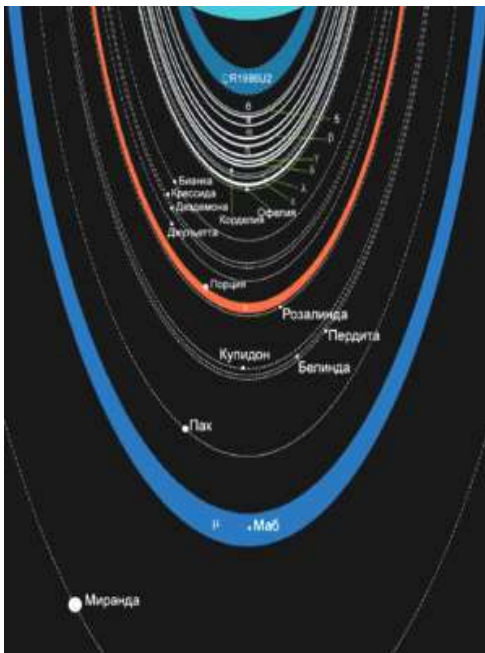


Рис.2.302. Схема супутників та кілець Урана (дані NASA)

Уран має **27 супутників**, які діляться на **3 явні групи**:

внутрішні супутники - Корделія, Офелія, Біанка, Крессіда, Дездемона, Джульєта, Порція, Розалінда, Купідон, Белінда, Пердіта, Пак і Меб - названі у порядку збільшення радіусів їх орбіт, були відкриті (крім Купідона і Меба) при проходженні АМС *Voyager-2* (1986р.) поблизу планети на віддалі 81 500км. Ці супутники - **невеликі за розмірами (50-150км) неправильної форми темні** (альbedo біля 7%) **маленькі брили (астероїди)**, які **виконують один оберт у прямому напрямі** (у напрямі

обертання Урана) **коловими орбітами практично в екваторіальній площині за кілька годин; друга група - 5 найбільших (Міранда, Аріель, Умбріель, Тітанія, Оберон)** були відомі раніше;

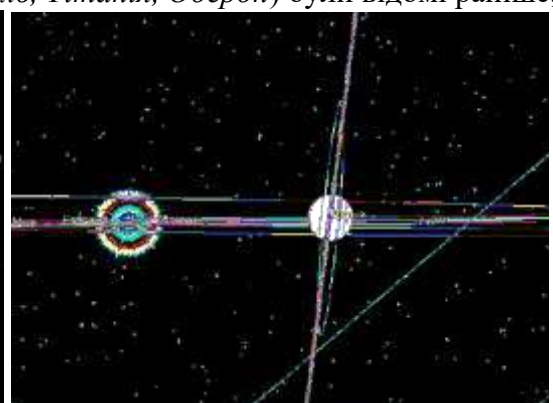
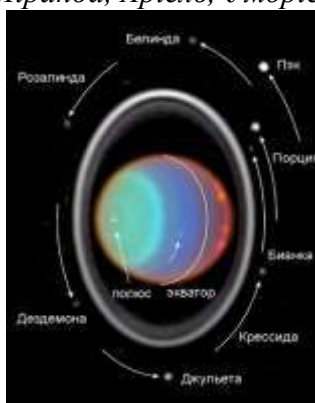
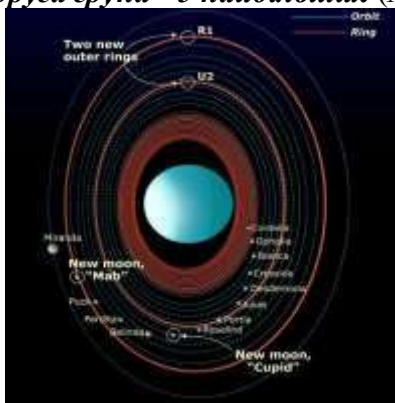


Рис.2.303. Ліворуч: нові супутники (відмічені колом) та нові кільця (відмічені червоним) Урана, орбіти великих супутників (сині). У центрі: супутники Урана (інфрачервоне фото *Hubble*). Площина орбіт супутників Урана майже перпендикулярна площині екліптики у Сонячній системі (праворуч)

третья група представлена **зовнішніми 9 супутниками** (Франциско, Калібан, Стефано, Трінкуло, Сікоракс, Маргарита, Просперо, Сетебос, Фердинанд), що обертаються на самому краю системи Урана у напрямі, протилежному орбітальному руху решти супутників, мають

ексцентричні орбіти і великий нахил до екваторіальної площини Урана та *є невеликими темними крижаними чи кам'яними брилами (кометами і астероїдами), які були захоплені гравітацією планети*, аналогічно зовнішнім супутникам інших планет-гігантів. Найвіддаленіший супутник *Фердинанд* робить один оберт орбітою навколо планети за 8 років. *Супутники Урана – по крайній мірі, 5 найбільших – завжди обернені до планети одним боком.*

Супутники Урана

№ п/п	Назва супутника	Діаметр (км)	Період обертання	Віддаль від центра Урана (км)	Густина (г/см ³)
1	Корделія	40,2	8год	49 752	1,3
2	Офелія	48,2	9год	53 764	1,3
3	Біанка	51,4	10,4год	56 165	1,3
4	Крессіда	79,6	11,1год	61 767	1,3
5	Дездемона	64	11,4год	62 659	1,3
6	Джультета	93,6	11,8год	64 358	1,3
7	Порція	136,2	12,3год	66 097	1,3
8	Розалінда	72	13,4год	69 927	1,3
9	Купідон			74 450	1,3
10	Белінда	80,6	15год	75 255	1,3
11	Пердіта	40	15год	75 260	1,3
12	Пак	162	18,3год	86 004	1,3
13	Меб	20			1,3
14	Міранда	471,6	1,4 доби	129 872	1,2
15	Аріель	1157,8	2,52 доби	190 945	1,7
16	Умбріель	1169,4	4,14 доби	265 998	1,4
17	Тітанія	1577,8	8,71 доби	436 298	1,7
18	Оберон	1522,8	13,46 доби	583 519	1,6
19	Франциско				
20	Каліббан	98	579,38 доби	7 168 879	1,5
21	Стефано	20	676 діб	7 942 450	1,5
22	Трінкуло	10	3,5 років	12 174 687	1,5
23	Маргарита				
24	Сікоракс	190	1289 діб	12 213 618	1,5
25	Просперо	30	1953 доби	16 113 485	1,5
26	Сетебос	30	2345 діб	18 205 163	1,5
27	Фердинанд		8 років		

Але не всі кільця та супутники були відкриті раніше - у процесі спостережень за планетою у



2005р. за допомогою космічного телескопу *Hubble* були відкриті **два нових супутники** Урана – **Меб** і **Купідон** (рис.2.303). Можливо, саме *Меб* постачає кільце пилом та уламками при метеоритному бомбардування своєї поверхні - в іншому випадку речовина кільця, що рухається по спіралі, повільно осідала б на поверхню планети.

Рис.2.304. Супутники *Урана* схожі на типові об'єкти пояса *Койпера*: на передньому плані *Аріель*, перед *Ураном* розташована *Міранда*, а *Умбріель*, *Оберон* і *Тітанія* на задньому плані (мозаїка фото *Voyager-2*)

Система супутників та кілець Урана дуже динамічна, у ній відбувається постійний обмін енергією і обертальними моментами між її членами. Орбіти супутників планети не стаціонарні і можуть змінюватися, а деякі розрахунки допускають можливість зіткнення супутників планети у найближчі декілька мільйонів років.

2.2.8.1. МІРАНДА

МІРАНДА – найближчий до планети і найменший з великих супутників та найцікавіший супутник Урана діаметром 471,6км, густиною $1,2\text{г/см}^3$ і масою $6,6 \times 10^{19}\text{кг}$, один оберт якого за 1,41 доби навколо планети на віддалі 129 872км співпадає з напрямом її руху орбітою, а поверхня являє собою різноманіття *гірських хребтів* з вертикальними обривами висотою 15км, *долин, глибоких ущелин* (ущелина *Верона Рупес* глибиною 20км) і *крутих скель*, *старих кратеризованих та молодих рівнинних областей* – на Міранді спостерігається набір найрізноманітніших геологічних форм рельєфів, які зустрічаються у Сонячній системі.

Температура на поверхні Міранди -187°C , а її ландшафт відносно світлої поверхні сформувався у процесі *бурхливої геологічної діяльності* і покритий нагромадженням *гігантських скель та кратерів*. Допускається, що у процесі еволюції супутника його поверхня неодноразово (не менше п'яти разів) перебудовувалася. Приблизно половина видимої поверхні супутника є *древньою дуже кратеризованою поверхнею* із хвилястими *горбками*. Три області більш *геологічно молодій території* мають різні форми *борозен, прямих долин і хребтів, розломів, западин та системи бескидів* різних напрямів, але всі вони є варіантами прояву одного і того ж ендегенного процесу. Складні системи *паралельних і крутих скидів* висотою до 20км пересікаються між собою і покривають ці молоді області. Спостерігаються утворення типу *потоків*, один із яких, мабуть, виходить із *вулканічного конусу*. Системи *розломів*, які оперізують супутник, мають вигляд *розсувів*. Виходи речовини надр на поверхню відслонюються у вигляді світлих і темних плям.



Рис.2.305. Супутник Урана – *Міранда*; у центрі - із різко пересіченою місцевістю (праворуч на фото) і більш низькою яружною територією з великим 24-кілометровим ударним кратером (унизу ліворуч). Праворуч: V-подібна („шеврон” 140×200км) область поверхні супутника біля південного полюса із хаотичним чергуванням кратеризованих місцевостей з районами різної складчастості; долини чергуються з бескидами висотою до 5км (фото *Voyager-2*)

Міранда має, у порівнянні з Місяцем, втричі більш кратеризовану поверхню, що пояснюється гравітаційним фокусуванням утворюючих кратери космічних тіл відносно Урана. Вирахувані потоки досить великі, щоб зруйнувати супутник декілька разів.

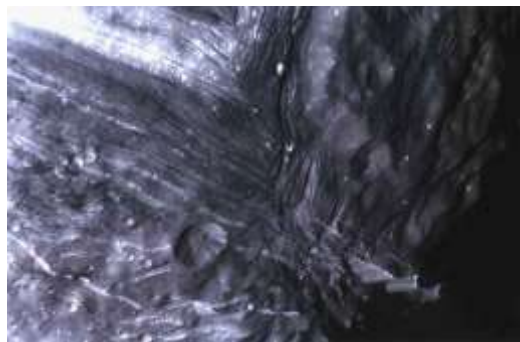


Рис.2.306. *Міранда* з гірськими хребтами і долинами, старими кратеризованими і молодими гладкими областями та затемненими каньйонами глибиною до 20км (фото *Voyager-2*)

Схоже на те, що Міранда утворена із трьох або чотирьох величезних кам'яних брил, які, можливо, є рештками попереднього супутника, що зіткнувся з астероїдом, а потім знову зібрав свої уламки в єдине ціле тіло – деякі формації можуть бути „швами” на границях блоків. Інша гіпотеза допускає формування геологічного різноманіття супутника за рахунок нерівномірного розігріву надр Міранди від припливної дії з боку Урана.

2.2.8.2. ОБЕРОН І ТІТАНІЯ

ОБЕРОН і **ТІТАНІЯ** - майже близнюки у зовнішньому вигляді (у відношенні розмірів, густин, кольорів та здатності відбивати своїми поверхнями сонячне світло). Ймовіріше, вони складені із водяної криги з силікатними (і, можливо, вуглецевими) включеннями. Температура на поверхні обох супутників Урана біля -210°C .

Крижана поверхня **Оберона** (діаметр 1522,8км, густина $1,6\text{г/см}^3$, маса $3,01 \times 10^{21}\text{кг}$) – *зовнішнього із п'яти найбільших та другого за величиною супутника Урана* – дуже покрита численними великими (діаметром 100км) ударними кратерами, багато з яких оточує система *яскравих променів*, ймовірно, від ударів метеоритів, а у середині деякі кратери покриті дуже темною речовиною; *ознаки геологічної діяльності (вулкани, розломи тощо) не спостерігаються*, а сама поверхня схожа на дуже кратеризовані підвищення у рельєфі внутрішніх планет. Оберон синхронно рухається коловою орбітою навколо Урана на віддалі понад 583 тис. км і робить один оберт за 13,5 діб.

Тітанія – *найбільший супутник Урана* діаметром 1577,8км, густиною $1,7\text{г/см}^3$ та масою $3,53 \times 10^{21}\text{кг}$, який обертається навколо планети за 8,71 доби на віддалі 436 298км та покритий *ударними кратерами* менших, у порівнянні з Обероном, розмірів (10-50км), які, можливо, утворені не ударами комет, а уламків з планетоцентричних орбіт. Існує сітка численних *тектонічних розломів та долин з ознаками давнього вулканізму*.



Рис.2.307. Ліворуч - *Оберон* з ударними кратерами і радіально-променевими викидами та горою (праворуч) до 6км висоти; його кратери більш крупні ніж на Аріелі та Тітанії, а радіально-променеві викиди подібні до аналогічних на Калісто. Праворуч - *Тітанія* з ознаками ударних слідів та минулої геологічної активності (фото *Voyager-2*)

Обертон і Тітанія (їх орбіти майже перпендикулярні площині орбіти Урана і вони обертаються у зворотному напрямі) переживають процеси *диференціації* (розподілу елементів у надрах за глибиною), у результаті чого відбулося формування *силікатного ядра, крижаної мантії* (крига водяна та аміачна) і *крижаної кори*. Тепло від диференціації речовини зумовлює істотний нагрів надр, що може викликати навіть плавлення їх речовини. На поверхні обох супутників існують деталі, схожі на *розломи кори*, що свідчить про внутрішню, можливо лише часткову, диференціацію речовини. Але на поверхні Тітанії значно більше витягнутих *скидових крутих обривів і грабенів*, ніж на Обероні.

2.2.8.3. УМБРІЕЛЬ І АРІЕЛЬ

УМБРІЕЛЬ і **АРІЕЛЬ** мають близькі діаметри (відповідно 1169,4км і 1157,8км), маси ($1,17 \times 10^{21}\text{кг}$ і $1,35 \times 10^{21}\text{кг}$) та густини ($1,52\text{г/см}^3$ і $1,7\text{г/см}^3$), але характери їх поверхонь різні.



Рис.2.308. Ліворуч: повністю покрита кратерами поверхня *Умбріеля*. У центрі: фотомозаїка *Аріеля* з численними долинами довжиною до 1500км і шириною 75км та скидами, праворуч: поверхня *Аріеля* крупним планом (фото *Voyager-2*)

Умбріель – *найтемніший* (альbedo 0,19) *серед усіх великих супутників Урана*, має діаметр 1169,4км та обертається навколо планети за 4,14 доби на віддалі 265 998км. Він майже повністю покритий шаром *темної однорідної речовини*, що навіть не видно радіальних розломів навколо численних ударних метеоритних кратерів. Схоже, що його поверхня покрилася шаром темної речовини відносно недавно за астрономічними масштабами. Відсутні жодні сліди вулканічної діяльності. Поверхня Умбріеля носить примітивний характер крупних ударних утворень з високим ступенем насиченості (багатократного накладення кратерів) та з повною відсутністю світлих викидів навколо них (тільки *кратер Вунда* діаметром 110км оточений відносно більш світлим кільцем, природа якого ще не зрозуміла) і вона (як і в *Оберона*), мабуть, найдревніша серед рельєфів великих супутників Урана – на ній переважають величезні *древні кратери*, дуже схожі на кратери на поверхні *Оберона*.

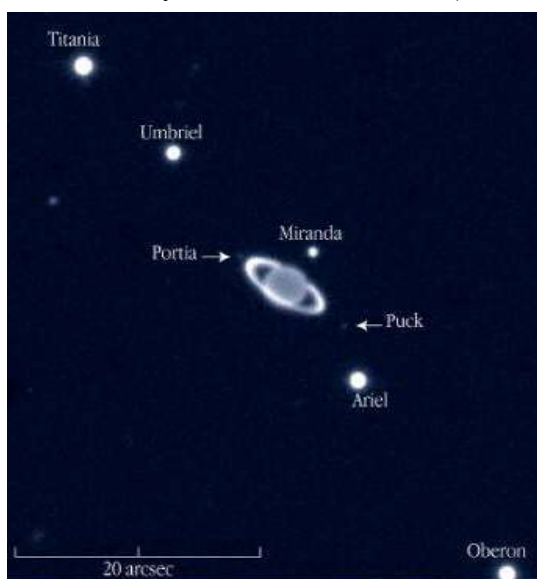


Рис.2.309. *Уран з кільцями та 7-а супутниками* (інфрачервоне фото телескопа *ANTU*, Чилі)

Аріель - *найсвітліший* (альbedo 40%) і *найменш кратеризований супутник Урана*, який має діаметр 1157,8км і обертається навколо планети на віддалі 190 945км за 2 земні доби 12год. 29хв. та має *ознаки значної геологічної діяльності - геологічно наймолодшу поверхню* серед інших супутників з паралельними грядками до 100-200км довжиною, які утворюють *смуги рифтів-каньйонів* (по 2-3 гряди у кожній смузі) довжиною у кілька сотень, шириною до 25-70км та глибиною до 10км, які пересікають поверхню супутника у різних напрямках та ділять її на своєрідні *полігони*. Каньйони мають гладеньке дно, немовби вони згладжені рідиною (при існуючій на поверхні Аріеля температурі близько -200°C у якості рідини можуть виступати аміак, метан і рідкий задушливий газ CO). Місцевість між смугами *кратеризована*, розміри кратерів сягають до 85км і навколо деяких з них спостерігаються *радіально-променеві системи викидів*. Метеоритних кратерів більше ніж на *Міранді*, але менше ніж на більших супутниках. Форма і розмір кратерів змінювалися при виверженні вулканів. Видно дуже мало кратерів діаметром більше 50км, чим Аріель схожий на *Тітанію*. Смуги та покривні поля свідчать про наявність *крижаних вулканів*, подібно до існуючих на *Міранді*. Існують і майже позбавлені кратерів *рівнини*, які лежать у пониженнях рельєфу, іноді у грабенах. Значні об'єми зовнішніх шарів поверхні Аріеля були піддані впливу витісненої з надр

речовини, а наявність грабенів, що свідчать про існування умов розширення кори та відсутність характерних для умов стискання форм рельєфу вказують на умови розширення цього супутника Урана, у складі якого, враховуючи його середню густину, багато водяної криги.

Численні дані, отримані Voyager, свідчать про прояви інтенсивних тектонічних процесів, а їх вплив на геоморфологічні зміни поверхонь вказує на неочікуваний високий рівень внутрішньої активності супутників Урана. Можливо допустити декілька причин такого розігріву надр – це і більша густина супутників Урана в порівнянні з крижаними супутниками Сатурна, що означає збільшення радіогенного розігріву; і низька відбиваюча здатність і, як результат, вища температура поверхонь. Ці два ефекти можуть привести до того, що температура надр перевищить температуру плавлення суміші аміаку з водою. Аналіз усіх отриманих даних свідчить, що система супутників і кілець Урана дуже динамічна. В її межах відбувається постійний обмін енергією та обертальними моментами між її членами, а орбіти супутників планети не стаціонарні і піддані змінам.

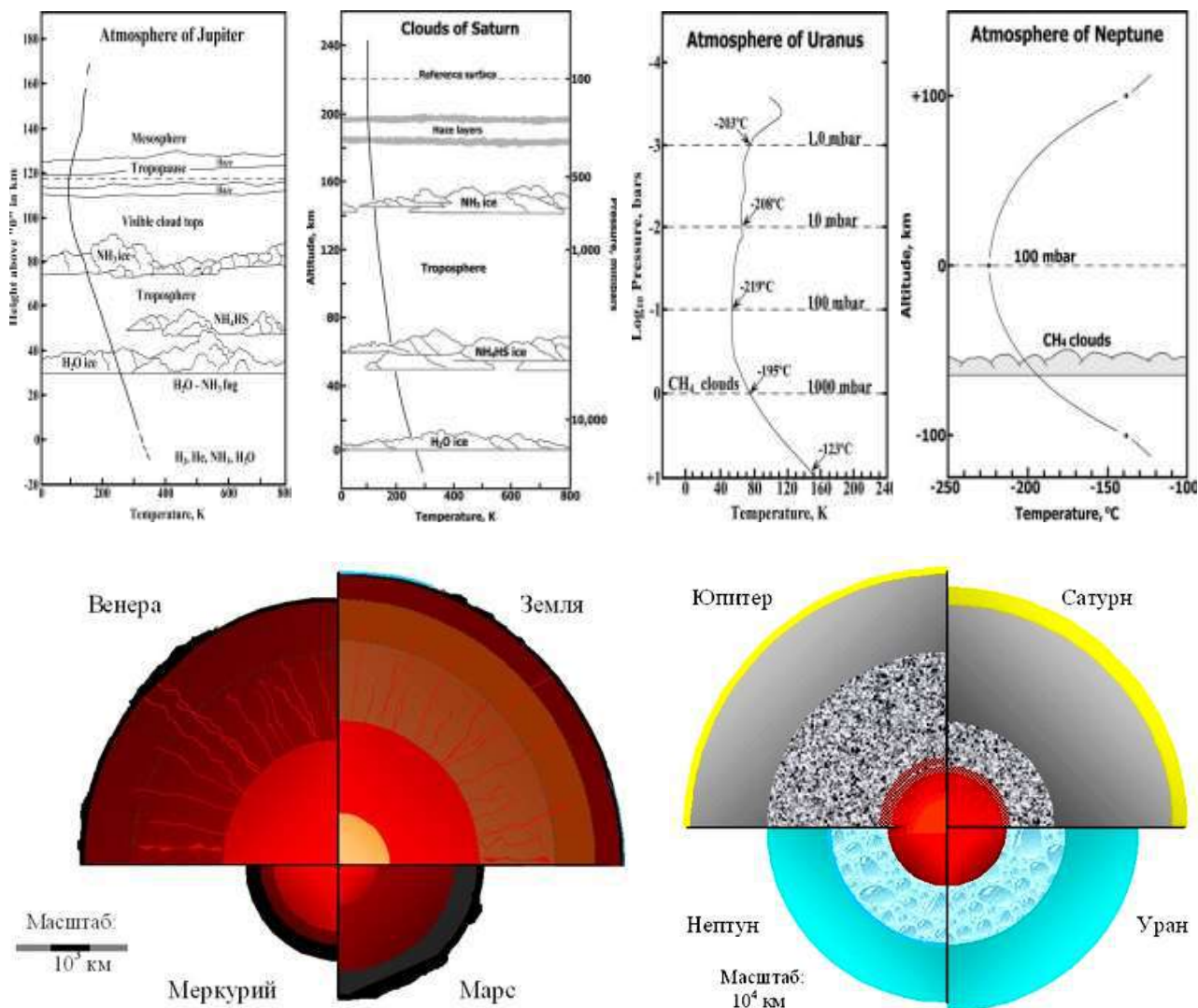


Рис.2.309-1. Угорі: будова, склад, температури і тиск атмосфер Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна.

Унизу: *ліворуч* - внутрішня будова планет земної групи: ■ - внутрішнє тверде ядро планети; ■ - зовнішнє рідке (в'язке) ядро планети. Мантия: ■ - внутрішня; ■ - середня; ■ - зовнішня. ■ - Літосфера (кора) планети. *Праворуч*: внутрішня будова планет-гігантів: ■ - внутрішнє ядро із важких елементів (Юпітер); ■ - внутрішнє силікатне ядро; ■ - оболонка з легких елементів; ■ - оболонка з твердого «металізованого» водню (Юпітер, Сатурн); ■ - оболонка з рідкого водню; ■ - крижана мантия (Уран, Нептун); ■ - гідросфера – глобальний водяний океан (Нептун). Атмосфера: ■ - Юпітера, Сатурна; ■ - Урана, Нептуна.

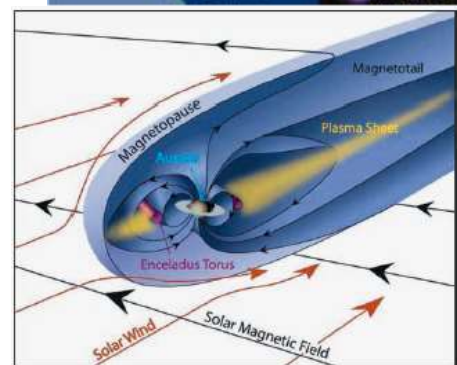
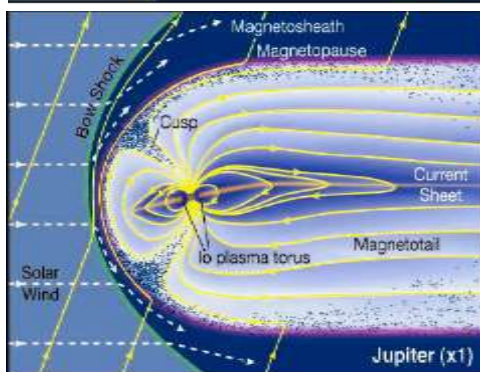
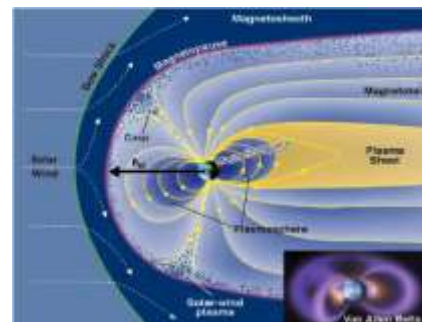
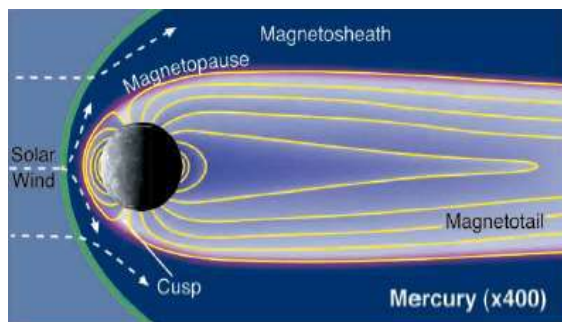
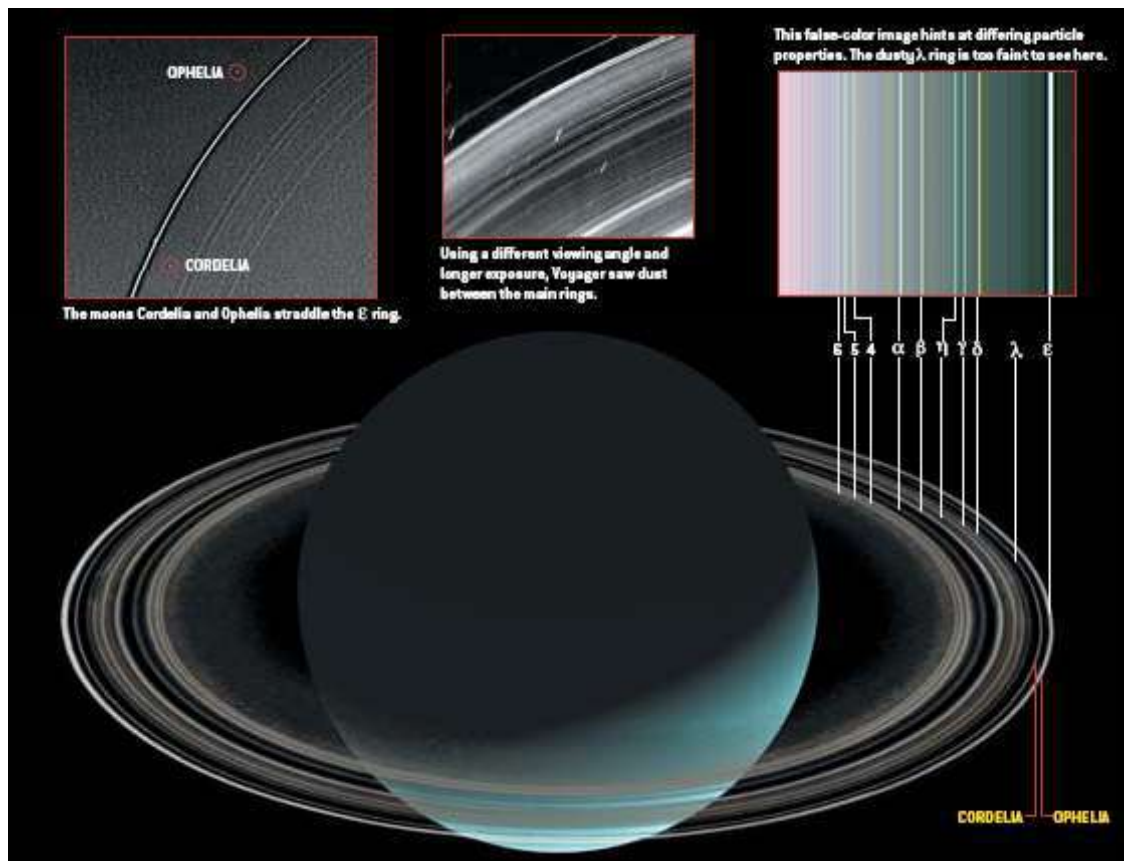


Рис.2.309-3. Угорі: схема системи кілець Урана та особливостей їх структури.
Унизу: схеми магнітосфер Меркурія, Землі, Юпітера та Сатурна

Контрольні запитання

1. Порівняйте структуру та характеристики атмосфер Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна.
2. Порівняйте внутрішню будову планет земної групи та газових планет-гігантів.
3. Охарактеризуйте та порівняйте системи кілець Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна.
4. Проаналізуйте особливості груп супутників Урана.
5. Які специфічні особливості Міранди?

2.2.9. НЕПТУН

НЕПТУН – восьма та остання планета Сонячної системи, яка є найвіддаленішою із газових планет-гігантів і обертається майже коловою орбітою навколо Сонця на віддалі від 4453 млн. км (29,77а.о.- перигелій) до 4554 млн. км (30,44а.о.- афелій) за 164,88 земних роки із орбітальною швидкістю 5,45км/сек. Нептун значно більший за Землю: екваторіальний діаметр 49 528км (3,883 діаметра Землі), густина 1,64г/см³ (0,3 густини Землі), маса $1,024 \times 10^{26}$ кг (у 17,1 більша за масу Землі). Вісь Нептуна нахилена до площини орбіти під кутом 29°, завдяки чому у кожній півкулі існують кліматичні сезони -*зима, весна, літо та осінь* – які тривають по 40 років кожен. Нептун робить один оберт навколо осі проти годинникової стрілки за 15год. 57хв. 59сек.

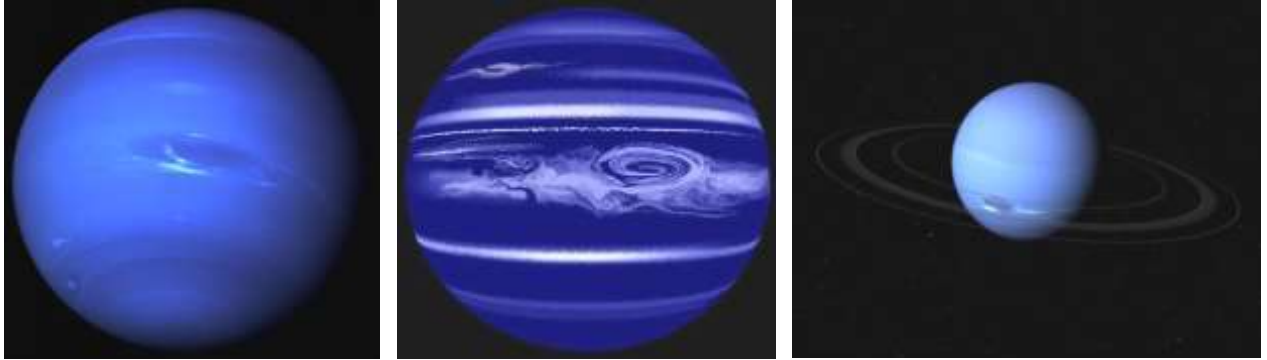


Рис. 2.310. Праворуч: найвіддаленіша планета *Нептун* (фото *Voyager-2*). Сезонні широкі світлі хмарні зони і пояси та плями штормових ураганів (у центрі). Система кілець *Нептуна* (праворуч) (фото *Hubble*)

Грозова **атмосфера** Нептуна потужністю 7000-8000км складається на 80% із *водню* (H₂), 18% *гелію* (He) і 1,5% *метану* (CH₄), а також із слідів *аміаку* (NH₃), *ацетилену* (C₂H₂), *ціаніду водню* (HCN), *задушливого газу* (CO). Температура верхніх шарів атмосфери мінус 200-220⁰С, але на південному полюсі, який вже майже 40 років обернений у бік Сонця та освітлюється ним, атмосфера «прогрівається» до -190⁰С. Енергії Сонця недостатньо для нагрівання атмосфери, а внутрішні джерела енергії дискусійні.

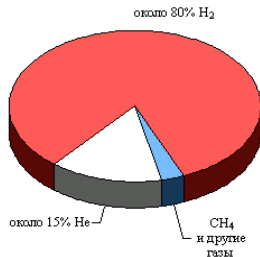
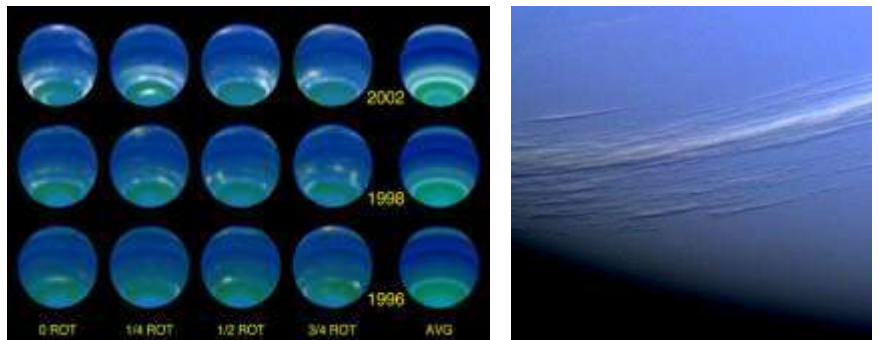


Рис. 2.311. Хімічний склад атмосфери *Нептуна*

Завдяки енергетичному «підживленню», метан, який у верхніх шарах атмосфери повинен замерзати, на полюсі проривається з нижніх шарів атмосфери у верхні аж до стратосфери, де розтікається у різні боки, а часткове поглинання ним сонячного світла надає Нептуну **зеленувато-синього забарвлення**. В атмосфері Нептуна АМС *Voyager-2* (1989р.) зафіксував різні нестійкі динамічні погодні явища: зовнішні шари атмосфери розбиті на **світлі і темні горизонтальні зони та пояси**, що витягнуті паралельно екватору; у південній півкулі існує велике темно-синє атмосферне збурення (антициклон 13 000×6600км) – **Велика Темна Пляма**, також відомі ще декілька великих **темних плям** від штормових ураганів. У 50км під верхньою межею атмосфери Нептуна розташовані **тонкі перисті хмари**, які формуються і зникають усього за декілька годин.

Рис. 2.312. Ліворуч: сезонні зміни на *Нептуні* (фото *Hubble*, 1996, 1998, 2002рр.). Праворуч: хмарні утворення –*цирруси* – шириною 50-200км на висоті 50км над щільними шарами атмосфери планети (фото *Hubble*)



Враховуючи, що температура у цьому шарі атмосфери близько -216⁰С, вони, мабуть, складені замерзлим до стану кристалів *метаном*, який піднявся

сюди із глибин атмосфери. Розташовані нижче більш щільні шари, ймовірно, утворені кристалами аміаку чи сульфїду водню. Найсильніші **вітри** на планетах Сонячної системи були зафіксовані на Нептуні – їх швидкість в районі Великої Темної Плями досягає 2200км/год і більшість з них направлена на захід, проти обертання планети, причому **верхні шари атмосфери обертаються повільніше за внутрішні**. Речовина Великої Темної Плями, з **білими хмарами із найдрібніших краплинок рідини** по периферії антициклону, робить один оберт за 16 земних діб. Сам антициклон під впливом західного вітру рухається на захід із швидкістю 1100км/год. Якщо повний оберт навколо осі планета робить за 16,9 години, то хмарному покриву, в залежності від віддалі до екватора, для цього необхідно 14-19 годин. У 2007р. телескоп *Hubble* зафіксував зміну кліматичних сезонів на Нептуні – розпочинається 40-річне літо – зникла Велика Темна Пляма, а біля північного полюса з'явилися і тиждень існували яскраві хмари тощо. Яскравість Нептуна за останні 20 років зросла на 20%, ширина хмарних зон південної півкулі Нептуна (дані *Hubble*) останні 6 років стійко зростала (рис.2.312).

Освітленість на поверхні Нептуна в 900 разів нижча ніж на Землі. Якби Сонце було єдиним джерелом енергії для Нептуна, то температура його поверхні дорівнювала б -230°C , але враховуючи інтенсивність інфрачервоного випромінювання планети, вона складає -213°C . Таким чином, **на поверхні Нептуна значно тепліше ніж на Урані, який розташований значно ближче до Сонця - у Нептуна існує внутрішнє джерело теплової енергії, яке дає в 2,5 разів більше тепла, ніж її отримує планета від Сонця. Джерелом нагрівання планети служать її надра, де температура, за рахунок гравітаційного стискування Нептуна або радіоактивного розпаду ізотопів у гіпотетичному Fe-Ni ядрі, сягає +12-14 тисяч градусів.**

Нептун має **5 вузьких, тьмяних і дуже слабких кілець** перемінної ширини, які складені із **пилу**, що утворився під час зіткнень невеликих метеоритів із супутниками планети, а також з **частинок метанової криги** і – у більшій мірі – з **вуглецевих з'єднань**, чим і пояснюється їх дуже низьке альbedo (0,03 або 3%).

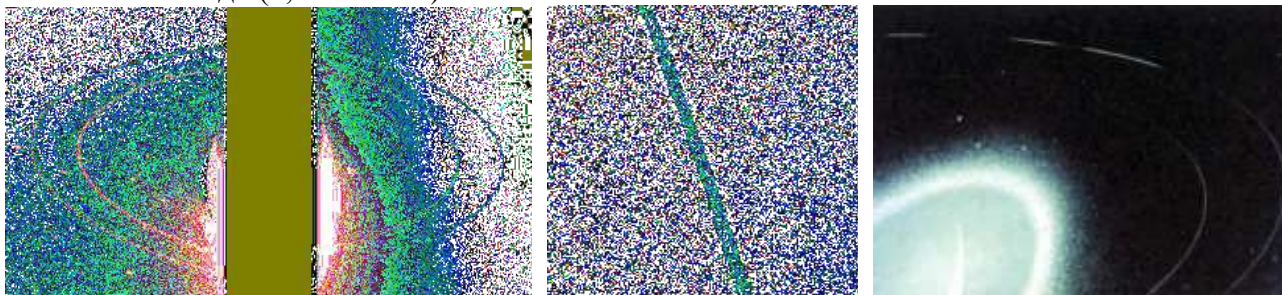


Рис. 2.313. Кільця Нептуна (ліворуч); фрагмент скрученого із джгутів найяскравішого кільця Адамс (у центрі) та його видимі із Землі потовщення - кільця-арки (фото *Voyager-2*)

Нептун має **два** відносно більш яскравих **основних кільця Левер'є і Адамс**, причому від внутрішнього кільця назовні простягається розріджений шар речовини (**Плато**), а решта **3 кільця** – дійсно тьмяні (темні кільця відкрили у 1984р.). Той факт, що кільця не відбивають радіохвилі, дозволяє допустити відсутність у їх структурі **частинок розміром не більше 1см**. Ближче до планети розташоване тонке третє **кільце Галле**. Незначне, направлене назовні, розширення кільця Левер'є отримало ім'я **Ласселла** і воно вміщує мало пилу та більше крупних уламків, а із зовнішнього боку обмежене **кільцем Араго**.

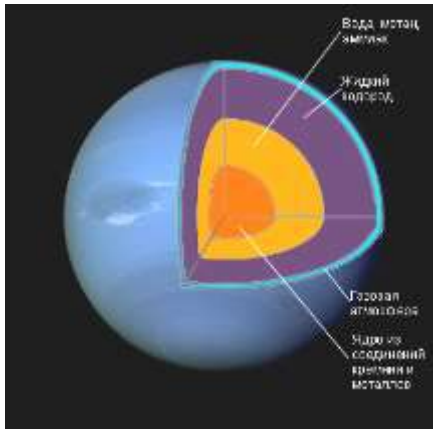
Кільця Нептуна

Назва кільця	Віддаль від центра Нептуна	Ширина кільця
Галле	41 900км	2000км
Левер'є	53 200км	110км
Ласселл	53 200км	4000км
Араго	57 200км	<100км
Адамс	62 930км	<50км

Кільця суцільні, але на найяскравіше зовнішнє **кільце Адамс** «нанизані» **5 потовщень** (їх ширина 15км і вони оточені шлейфами пилу шириною 50км) у вигляді дуг (**арок**) протяжністю до 8° , стійкість яких пов'язують з гравітаційним впливом супутника Галатеї із його орбітою у

межах кільця Адамс. Арки - названі Відвага, Свобода, Рівність-1, -2, Братство - це ланцюжок еліптичних вихорів антициклонічного типу з твердих частинок, які назвали **епімонами**.

Внутрішня будова Нептуна, мабуть, дуже схожа до внутрішньої структури її сусіда – Урана. **Атмосфера** Нептуна потужністю до 9000км, як і в Урана, складена, головним чином, **воднем**, **гелієм** і **метаном** із покривами хмар та швидкостями вітру до 1000км/год. На глибині 3000км



під величезним тиском *гази атмосфери переходять у **рідкий стан***. Твердої поверхні планета не має, її всю покриває потужний **водно-аміачно-метановий океан** (рис.2.314), який простягається у глибину на тисячі кілометрів. Цей глобальний воднево-гелієвий океан має своєрідне дно - дуже товстий шар **крижаної мантиї** загальною товщиною до 8000км, яка вміщує, крім звичайного льоду, також **твердий «лід» метану та аміаку**.

Рис. 2.314. Модель сферичної будови надр *Нептуна*

При менших розмірах маса Нептуна значно більша за масу Урана, що наводить на думку про існування у центрі планети відносно невеликого - діаметром близько 10-12тис. км – **ядра**,

складеного із **гірських порід** та **металів**. Не зовсім ясний стан ядра Нептуна, деякі вчені допускають його **рідкий стан** силікатно-металевого складу, так як планета має магнітне поле.

Рис. 2.315. Схема магнітосфери *Нептуна*

Магнітне поле Нептуна не має чіткої дипольної структури, воно нахилене під кутом 47° до осі обертання планети і зміщене від центра планети приблизно на половину її радіуса (рис.2.315). По цій причині явища, аналогічні **полярним сьйвам**, розкидані майже по всій поверхні планети. За даними Ліверморської національної лабораторії (США) відповідальною за потужні магнітні поля Урана і Нептуна може бути висока електропровідність **суперіонної води**. У так званому **суперіонному фазовому стані** води, що у такому вигляді існує в глибинах планет-гігантів при температурі в тисячу градусів за Цельсієм і тиску в сто тисяч атмосфер, **молекули води руйнуються, а атоми, що утворювали ці молекули, дійсно формують суперіонну фазу – більш щільну, ніж крига і тверду, як залізо, але яка не є ні льодом, ні рідиною, ні газом у звичайному розумінні. Атоми кисню виявляються міцно замороженими у кристалічних ґратках, а атоми водню при цьому залишаються рухливими, як у газі, та здатними переміщуватися по кристалу із дуже великою швидкістю.**

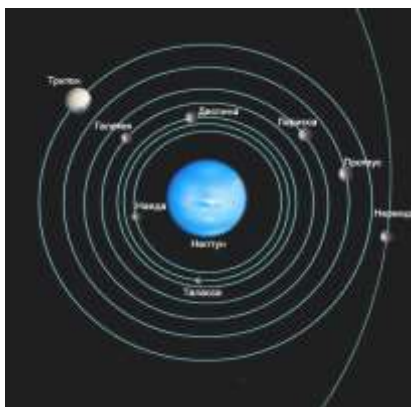
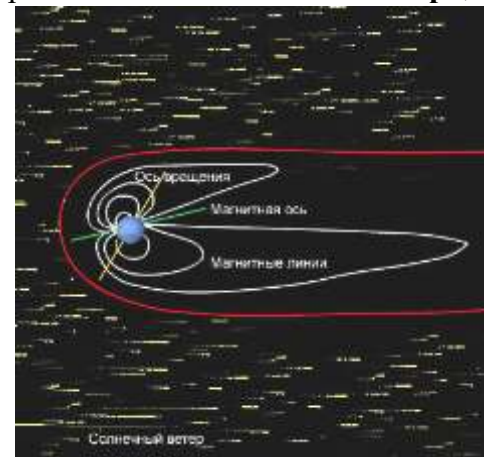


Рис. 2.316. Система супутників *Нептуна* (дані NASA). Порівняння розмірів семи внутрішніх місяців Нептуна на його фоні (за Mark R. Showalter/SETI nstitute)

Нептун має **14 супутників** – раніше відомих **Тритона** та **Нерейду**, а ще **7 невеликих темних** (альbedo 5%) **супутників-брил** (відкрив Voyager-2, 1989р.) обертаються

у напрямі обертання планети, а площини їх орбіт співпадають з площиною її екватора; решту **5 супутників** (*Сао, Галімеда, Лаомедея, Несо, Псамафа*) відкрили у 2002-04рр. астрономи обсерваторії Сьєрро-Тололо (Чилі).

Супутники Нептуна

Назва супутника	Радіус (км)	Період обертання, „-“, зворотній	Радіус орбіти (км)
Наяда	29	7год 04хв	48 230
Таласса	40	7год 29хв	50 070
Деспина	74	8год 02хв	52 530
Галатея	78	10год 18хв	61 950
Ларисса	208х108	13год 19хв	73 550
Гиппокамп	17	23год	105 250-
Протей	436х416х402	26год 56хв	117 650
Тритон	1353	-5діб 21год	354 760
Нереїда	170	360 діб	5 513 400

Також у Нептуна відкрито **6 астероїдів-троянців**. Усі вони мають однаковий блідо-червонуватий відтінок, що свідчить про близькість їх властивостей та історії формування. Один із троянців має орбіту з більш крутим нахилом до площини екліптики, ніж решта.

Наявність цього астероїда з нахиленою орбітою дає підстави допустити існування інших астероїдів, що рухаються складно перепленими орбітами і формують децю схоже на хмару, яка укутує всю орбіту планети-гіганта. Відкриття великої кількості астероїдів-троянців у Нептуна із нахиленими орбітами виключило би можливість того, що вони є реліктами ранніх стадій формування Сонячної системи, бо у такому випадку вони знаходилися б строго у площині орбіти. Утворення хмари астероїдів у Нептуна, якщо вона буде підтверджена, можна пояснити тими ж процесами, що зумовили утворення троянських хмар у Юпітера - після стабілізації навколосонячних орбіт планет-гігантів любий астероїд, що випадково попав у „троянську область”, вже не міг з неї вирватися.

2.2.9.1. ТРИТОН



ТРИТОН - найбільший супутник Нептуна і найхолодніше місце у Сонячній системі з температурою на поверхні до -240°C (альbedo 0,7-0,9) – нахилений до екватора планети під кутом 30° , має густину $2,07\text{г/см}^3$, масу $2,15 \times 10^{22}\text{кг}$ і діаметр 2706км та єдиний крупний супутник у Сонячній системі, який рухається на віддалі 354 760км від планети у зворотному напрямі (протилежному напрямку руху Нептуна орбітою), обертаючись синхронізованою ідеально коловою орбітою (постійно обернений одним боком до Нептуна) навколо планети за 17 земних діб, а навколо власної осі за 5,88 земних днів. Світла поверхня південного полюса покритого **азотною кригою** супутника відбиває до 95% падаючих сонячних променів. Передня за ходом орбітального руху півкуля темніша на 25% за решту поверхні.

Прилади *Voyager-2* зафіксували слабке рожевате світіння супутника. Тритон має дуже **розріджену азотну** (99%) **атмосферу** із незначними домішками **метану** (атмосферний тиск $1,5\text{Па}$, тобто $1/60\,000$ земного, а температура на висоті 600км була біля -173°C) потужністю до 10км, концентрації складових якої залежать від пори року. Вітри в розрідженій атмосфері Тритона відіграють істотну роль у формуванні його поверхні, а **рельєф** формувався **вітром** і **тектонічними процесами** в умовах нагрівання Сонцем поверхні в районі південного полюса, де літо, через особливості орбіти, триває кілька десятиліть. Складений супутник (рис.2.320) на 75% із твердих **гірських порід** і на 25% із **водяної криги**, яка в умовах Тритона стає дуже твердою і утворює круті бескиди, тріщини з гострими краями, а пластичні метанова та азотна

крига формують похилі ділянки рельєфу. Металево-силікатне **ядро** Титана (діаметр до 2000км) з **мантією** із H_2O -криги та силікатів (350км) оточене **кріолітосферою** (H_2O -крига, метан, азот).

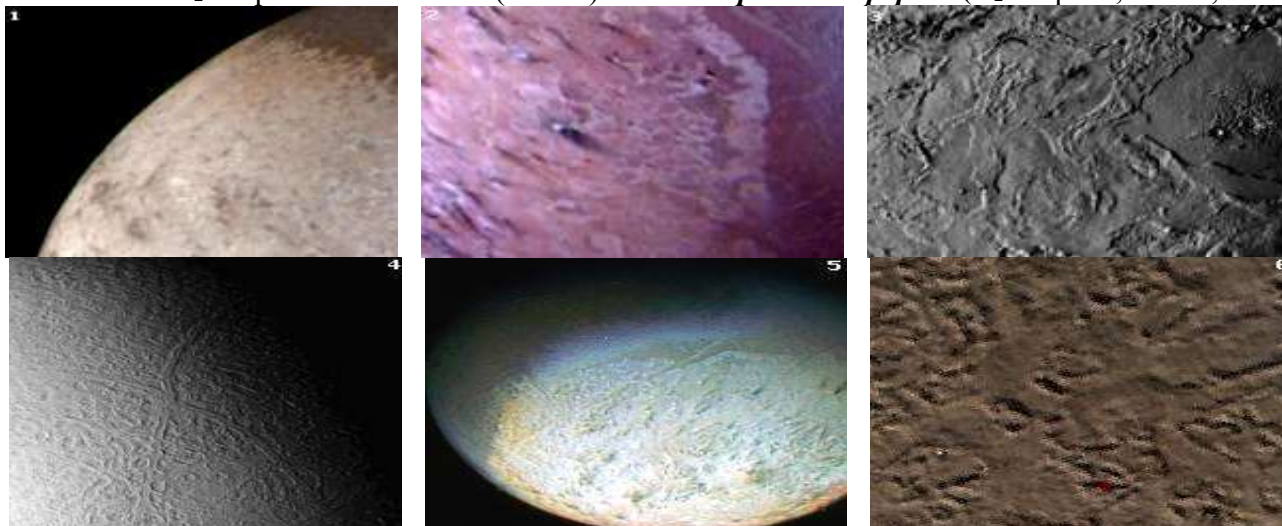


Рис. 2.317. Фото 1-6 – поверхня *Тритона*: темні плями викидів кріовулканів із потужними струменями азоту з домішками твердих мінеральних частинок (силікатів та вугільного пилу) (фото 2); гладенька поверхня замерзлих азотних озер на Тритоні (фото 3); південна полярна шапка (фото 5) (фото *Voyager-2*)



Рис. 2.318. Ліворуч: сублімація *кріолітосфери Тритона* при нагріванні Сонцем поверхні району його південного полюса. У центрі: обернена до Сонця південна півкуля *Тритона* із рожевуватим снігом та кріовулканами (гейзерами) у районі південного полюса. Праворуч: рівна поверхня замерзлих лавових N_2 -озер (200×400км) від вивержень кріовулканів в оточенні терас із крутими схилами (фото *Voyager-2*)

Крижана поверхня Тритона (замерзлі азот, метан, вуглекислий і чадний газу) покрита рожевуватим азотним *інеєм* і нагадує шкуринку дині – округлі ділянки 20-30км оточені валами висотою до 300м. Невеликі протяжні скелясті **гірські гряди** розбиті водяною кригою, а **розлогі долини** є можливим результатом численних циклів танення та замерзання, дуже мало **кратерів**. Тріщини шириною 30км і довжиною до 1000км пересікають поверхню супутника.

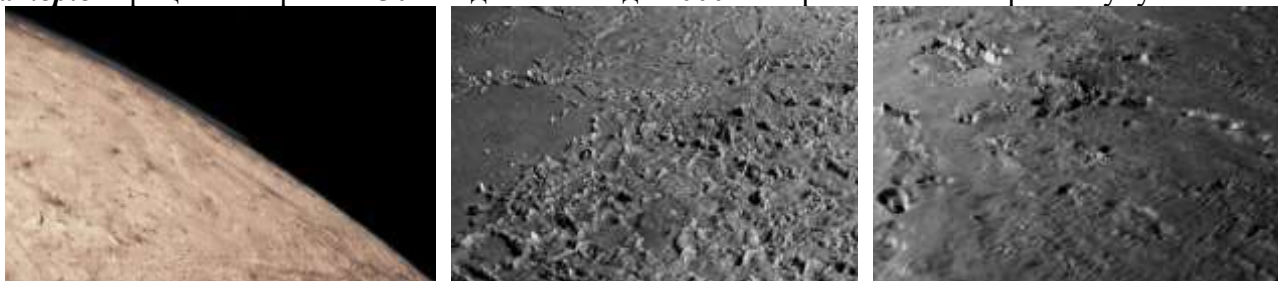


Рис. 2.319. Ліворуч: тонкий хмарний серпанок із крижаних частинок N_2 на висоті 5-10км над *Тритоном*. У центрі: хаотичний рельєф його поверхні – оточені невисокими крижаними горами вулканічні рівнини (до 250км). Праворуч: ланцюжок вулканічних утворень (довжина до 10км, висота до 300м) в оточенні покритих $H_2O-CH_4-NH_3$ -крижаною лавою вулканічних рівнин (комп'ютерна обробка фото *Voyager-2*)

Розміщення кратерів на оберненому завжди вперед, за ходом орбітального руху, боці супутника свідчить про очищення власної орбіти від уламків та пилу, які обертаються навколо Нептуна в „правильному” напрямі. Схожі на **озера** утворення свідчать про те, що у далекому

минулому поверхня Тритона була рідкою (рис.2.318). На Тритоні зафіксовані темні смуги вулканічного походження; існують **кріовулкани**, які викидають на поверхню супутника замерзлі до стану криги азот, пари води, метану тощо. У районі південного полюса *Voyager-2* сфотографував **червоний лід**, а на екваторі – **блакитний лід** із замерзлого метану. Майже вся південна півкуля покрита полярною шапкою, що складена **азотно-метановою кригою**, із якої чітко вертикально на висоту до 8-12км відбувалися викиди газових **гейзерів** (дані *Voyager-2*) із товщиною стовпа азоту у суміші з темними органічними частинками від 20м до 2км, які смугами-шлейфами розвіювалися вітром по поверхні на віддаль до 150-250км. Виділені сліди біля 50 попередніх вивержень у південній полярній області. Гравітація Нептуна змінює напрям руху комет, які попадають з космосу в межі Сонячної системи. Можливо, що деякі з них зіткнулися з Тритоном із утворенням **ударних кратерів**.

Тритон досліджувався з прольотної орбіти *Voyager-2* (25.08.1989р).

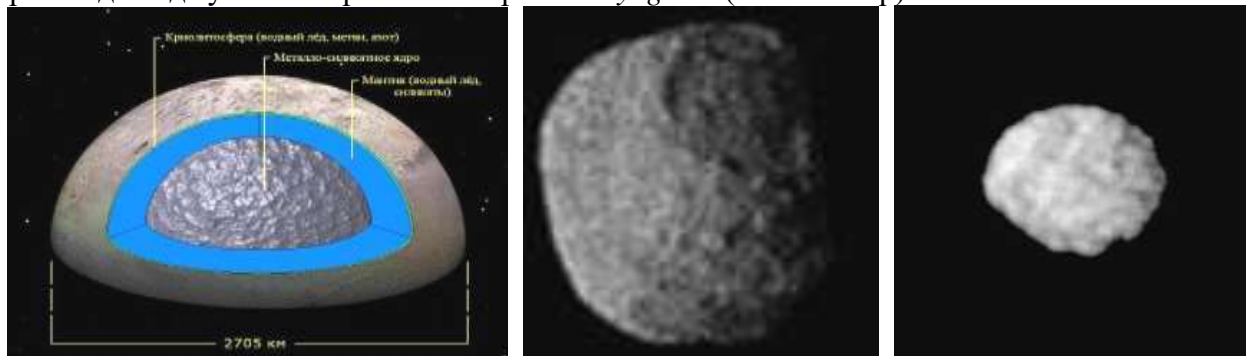


Рис. 2.320. Ліворуч: внутрішня будова *Тритона*: залізо-кам'яне ядро діаметром до 2000км, *мантія* із H_2O -криги (25% - H_2O , решта – гірські породи), *кріолітосфера* («кора», 12-30км) із H_2O -криги із замерзлими CH_4 та N_2 (ліворуч). Супутники Нептуна: *Протей* - другий за величиною супутник з помітно несферичною формою (у центрі) та *Ларисса* (праворуч) (фото *Voyager-2*)

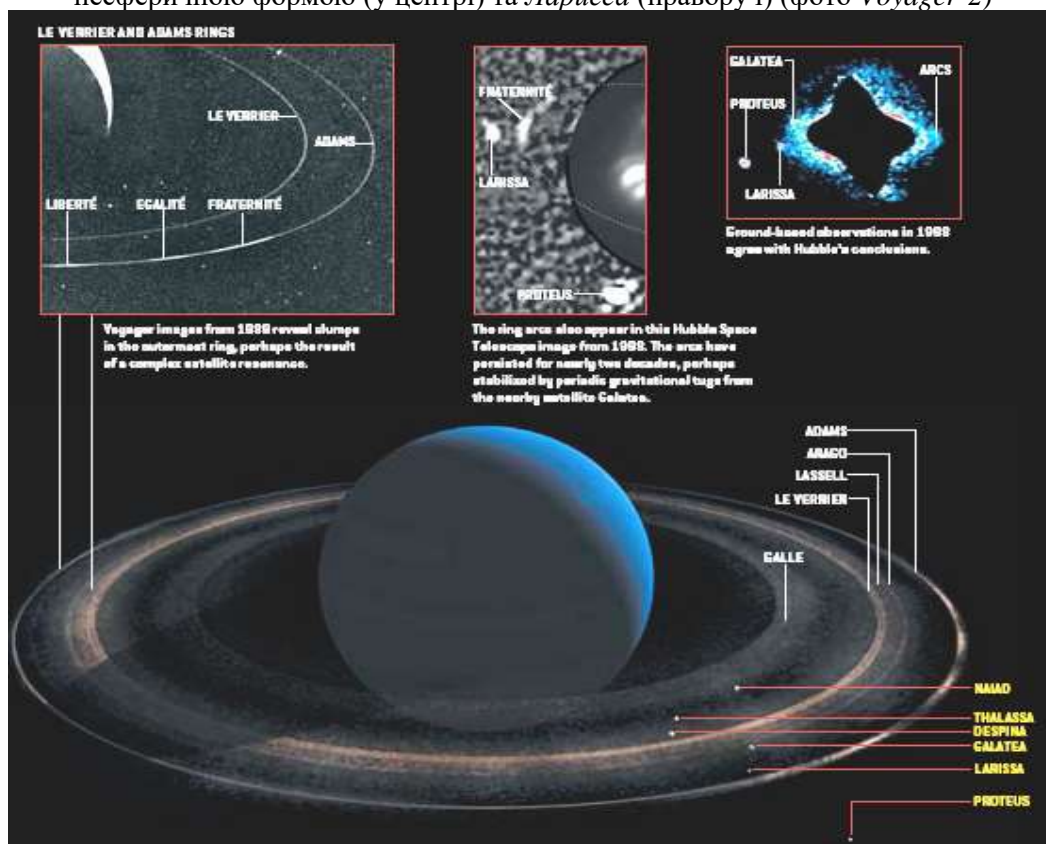


Рис. 2.320-1. Схема системи кілець *Нептуна* та розміщення в її межах супутників планети

Усі чотири планети, які розташовані за Марсом – Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун – мають гігантські розміри, величезні маси і загальний газове-рідинний стан, що істотним чином відрізняє їх від внутрішніх планет земної групи – Меркурія, Венери, Землі та Марса.

2.2.9.2. ПОЯС КОЙПЕРА

ПОЯС КОЙПЕРА – у вигляді широкого тору займає найвіддаленішу область зовнішнього краю дископодібної площини Сонячної системи (рис. 2.321) і представлений невеликими, подібними до планет, тілами (планетоїдами і астероїдами) з кам'яних брил та криги.

Походження зовнішнього поясу астероїдів цієї частини Сонячної системи пояснюється тим, що у процесі формування планет частина газів під дією сонячного вітру була виштовхнута із внутрішньої області на холодну периферію Сонячної системи і там перетворилася в червонувату кригу численних планетоїдів, а завдяки дуже низьким температурам у них могла зберегтися речовина протопланетної хмари, із якої сформувалися планети Сонячної системи.



Рис. 2.321. Тор поясу Койпера на краю Сонячної системи (ліворуч) та у сфері Хмари Оорта (у центрі), схема відомих об'єктів у поясі Койпера та 4-х зовнішніх планет-гігантів Сонячної системи (праворуч)

Переважно крижані (різних відтінків червоного кольору) об'єкти поясу Койпера обертаються на віддалі від 30 до 50-55а.о. від Сонця під впливом гравітації Сонячної системи, за розмірами вони не перевищують астероїди і, за оцінками вчених, там може бути до 100млн. об'єктів, причому понад 100тис. тіл із діаметром більше 50км, а із них 35тис. – діаметром понад 100км.

Станом на кінець 2014 року там відомо понад 1600 тіл розміром 100—2000км. Об'єкти поясу Койпера мають резонансний період обертання із відношенням 3:2 до періоду обертання Нептуна, тобто вони виконують 2 оберти по орбіті навколо Сонця за той час, коли Нептун – три оберти. Деякі з них мають дуже нахилені орбіти, але тільки 2008 KV42 **Drac** (від Дракула) діаметром до 50км (на віддалі від 20 до 70а.о. від Сонця) має еліптичну *ретроградну орбіту*, яка нахилена на 103,5° до екліптики.

2.2.10. ПЛУТОН – ХАРОН

ПЛУТОН – скасований статусу 9-ої планети Сонячної системи - відносять до об'єктів *поясу Койпера* та до нової групи об'єктів Сонячної системи - карликових планет як **134340 Pluto**.

Карликова планета – небесне тіло, яке: *а) рухається орбітою навколо Сонця; б) не є супутником планети; в) має достатню масу для набуття гідростатичної рівноважної (близької до сферичної) форми; г) але не очищує околиці своєї орбіти від планетезималей.*

Карликова планета Плутон (рис.2.322, 2.323) обертається у межах *поясу Койпера* навколо Сонця за 247,7 земних років із орбітальною швидкістю 4,67км/сек. Найближча до Сонця точка орбіти (*перигелій* – її Плутон пройшов у 1989р.) знаходиться на віддалі 4,436млрд.км (29,67а.о.), а найвіддаленіша (*афелій*) – на віддалі 7,376млрд.км (49,31а.о.), тобто, *Плутон має дуже видовжену еліптичну орбіту (ексцентриситет орбіти 0,249 і вона пересікає орбіту Нептуна), площина якої в свою чергу нахилена до площини орбіт решти планет під кутом 17°.*

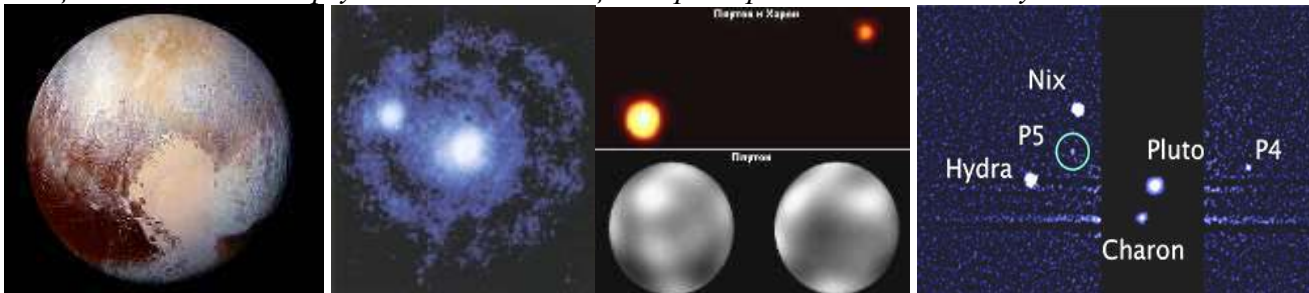


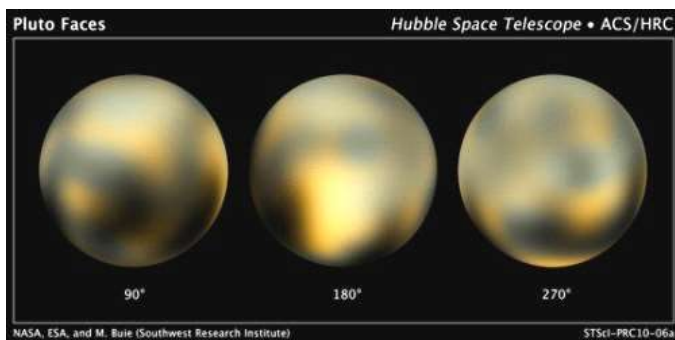
Рис. 2.322. *Зліва праворуч:* карликова планета Плутон; система Плутон-Харон (фото та колаж *Hubble*); подвійна система Плутон-Харон та всі її 4 супутники (фото *New Horizons*, 2015)

Через свою дуже видовжену орбіту Плутон у 1979р. увійшов у межі орбіти Нептуна, але в 1999р. він знову розташувався за її межами (до вересня 2226р.). Плутон *обертається навколо власної осі у протилежний бік* (як Венера і Уран) – за годинниковою стрілкою – за 153 години (6,39 земних діб), а його вісь обертання нахилена на 122° , тобто *Плутон рухається орбітою навколо Сонця лежачи на боці (подібно Урану)*, тому зміни пір року можуть тривати 120 років.

Діаметр Плутона $2376,6 \pm 3,2$ км, густина $1,86 \pm 0,013$ г/см³ і маса $1,31 \times 10^{22}$ кг (це 0,22% маси Землі). Імовірно, його надра на 50-70% складаються із гірських порід і на 50-30% - із криги, в основному водяної. У залежності від температури лід на Плутоні може існувати в модифікаціях *лід I, лід II, лід III, лід V і лід VI*. Якщо тепла від розпаду радіоактивних елементів вистачило на відокремлення льоду від порід, то надра Плутона диференційовані (рис. 2. 323): щільне кам'яне **ядро** оточене **мантією** із льоду, товщина якої становить біля 300 км. Можливо, що цього тепла вистачило і на створення під поверхнею *океану рідкої води*, при замерзанні якої могли з'явитися видимі сліди розтягування поверхні – грабени, уступи тощо.

Карликова планета Плутон є складним і геологічно різноманітним світом, поверхня якого активно змінювалася мільярди років. Еклектична суміш *гір, долин, рівнин* та ін. покриває його поверхню (рис. 2.322, 2.322-3, 2.322-4, 2.322-6). Поверхня Плутона дуже неоднорідна. Це видно навіть на знімках, зроблених телескопом «Хаббл» (рис. 2.322-1), а пізніше було підтверджено набагато кращими фотографіями зонда *New Horizons* (рис. 2.322-3 та ін.). Альbedo різних ділянок його поверхні варіює від 10 до 70%, що робить його другим за контрастністю об'єктом Сонячної системи після Япета. Ця неоднорідність зумовлює періодичну зміну при обертанні Плутона його блиску (змінність досягає 0,3m – 30%) та спектру.

Плутон значним чином змінює свій блиск, на ньому існують яскраві **полярні шапки**, а також значна область **темних плям** поблизу екватора (рис. 2.322-1). Взимку температура на червоного відтінку **крижаній поверхні** – крига складена на 98% молекулярним *азотом* (N_2) з окремими курганами чи навіть із суцільним шаром інею на її поверхні із замерзлого *метану* (CH_4), *етану* (C_2H_6), *чадного газу* (CO) і *води* (іній уповільнює випаровування перекритої твердої N_2 -криги) – досягає $-220^\circ C$. Обернена до Харона поверхня Плутона збагачена *CH_4 -кригою*, а протилежний бік (180° сх. довготи, де знаходиться «серце Плутона») – *N_2 -кригою* та *CO -кригою* і там майже немає *CH_4 -криги*. У 2015р. на фото АМС «*New Horizons*» на Плутоні виявлені велика світла зона у формі символу серця (рис. 2.321) розміром 1800×1500 км; в екваторіальній зоні різко підносяться над загальною згладженою крижаною поверхнею 3,5-кілометрові гори, що складаються, імовірно, з *H_2O -криги* та багато інших деталей поверхні. Самий примітний геологічний об'єкт, виявлений на Плутоні – **рівнина Супутника** (рис. 2.322-5). Це западина розміром більше 1000 км, що займає 5% його поверхні, – ймовірно, дуже зруйнований **ударний кратер**. Вона заповнена потужною кригою із замерзлих газів (в основному N_2) і пересічена безліччю борозен, які ділять її на окремі брили розміром у десятки кілометрів. Їх інтерпретують як результат конвекції у текучій N_2 -кризі. При температурах Плутона H_2O -крига дуже міцна; мабуть, саме з неї складаються суміжні гори висотою до 5 км. Вона легше N_2 -криги і може утворювати плаваючі у ній айсберги. Імовірно, такими айсбергами і є дрібні темні пагорби, яких чимало у згаданих борознах. Передбачається, що подібні дрібні брили H_2O -криги під дією конвекції можуть плавати по всій рівнині, тоді як великі – незграбні гори, розташовані по її краях – лише трохи зміщуються та обертаються (судячи з їхнього вигляду, вони можуть бути фрагментами колишнього цілісного покриву).



Комп'ютерне моделювання показує, що швидкість руху криги на поверхні рівнини вимірюється першими сантиметрами на рік.

Рис. 2.322-1. Вигляд поверхні Плутона. Темні області – забруднена H_2O -крига, світлі – замерзлий N_2 ; темно-помаранчеві ділянки – CH_4 -крига; яскрава пляма в центрі – імовірно, замерзлий задушливий (CO) газ (фото *Hubble*)

При найбільшому наближенні Плутона до Сонця, коли він у 30 разів більш віддалений від Сонця за Землю, температура на його поверхні піднімається до -170°C , а на Хароні вона стає ще на 10°C вищою. Примерзла до поверхні атмосфера Плутона сублімує метан (CH_4) і він поповнює його надзвичайно розріджену атмосферу. Випаровування CH_4 з поверхні, з одного боку, понижує її температуру, з другого - збагачує атмосферу цим парниковим газом.

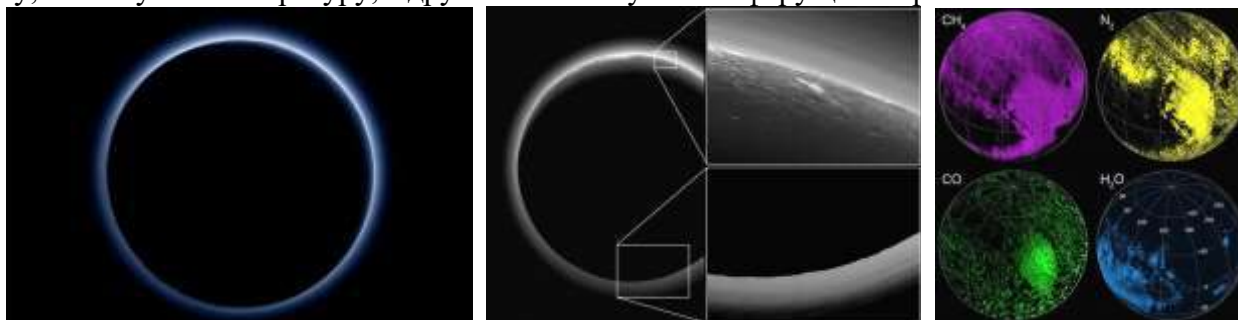


Рис. 2.322-2. Зліва праворуч: кольорове фото «плутоніанської корони» - результату розсіювання сонячних променів на частинках аерозолів в атмосфері карликової планети. Атмосферний *серпанок* Плутона (у момент зйомки Сонце розміщувалося за Плутоном; у верхній вставці фото видно льодовики рівнини *Супутника* і *гори Норгей* та *хмара* із CH_4 (?) на невеликій висоті в атмосфері). Концентрація хімічних елементів та їх з'єднань у складі атмосфери Плутона (фото та дані *New Horizons*, 2015)

New Horizons відкрив у Плутона дуже розріджену *атмосферу* та холодний *плазмовий хвіст*.

Атмосфера Плутона *азотно-метанова*, дуже розріджена (рис.2.322-2, 2.322-3) і складається із газів, що випаровуються з поверхневої криги: домінує *азот* (99%) із домішкою *метану* (біля 0,5%) і, можливо, *чадного газу*. Під дією жорсткого сонячного випромінювання із CH_4 та N_2 утворюються більш складні з'єднання червоного чи сірого кольору – *толіни*, також *етилен* (C_2H_4), *ацетилен* (C_2H_2), що поступово випадають на поверхню карликової планети, надаючи їй червонуватого кольору (рис. 2.322). Толіни є органічними речовинами і вважаються хімічними попередниками життя (крім Плутона толіни відомі на Титані, Тритоні і багатьох інших супутниках Сонячної системи та кометах). Ймовірно, саме їх частки утворюють легкий шаруватий *серпанок* (*імлу*), що досягає висот $>200\text{км}$. Достовірно аерозолі простежуються до висоти 130км над поверхнею, а їх концентрація з висотою знижується не рівномірно, а вона має два піки поблизу відміток 50 та 80км . Попри розрідженість атмосфери, цей шаруватий серпанок доволі помітний (рис. 2.322-2, 2.322-3) - завдяки розсіяному ним світлу навіть вдалося сфотографувати деякі деталі нічного боку Плутона. У верхніх шарах дуже розрідженої тонкої атмосфери Плутона переважає молекулярний N_2 , а у нижніх – CH_4 та більш складні вуглеводні у вигляді мікроскопічних частинок. Вони складені імовірно продуктами фотолізу CH_4 (його розкладу на атоми водню та вміщуючі вуглець вільні радикали під дією жорсткого сонячного ультрафіолету), які поступово полімеризуються у високомолекулярні вуглеводні. Атмосфера має характерну *інверсію температури* - з кожним кілометром висоти температура зростає на $3-15^{\circ}$ і у верхній атмосфері вона складає -170°C (тобто, там на 50° тепліше, ніж на поверхні Плутона), проте при віддаленні від Сонця атмосфера знову примерзає до поверхні карликової планети.

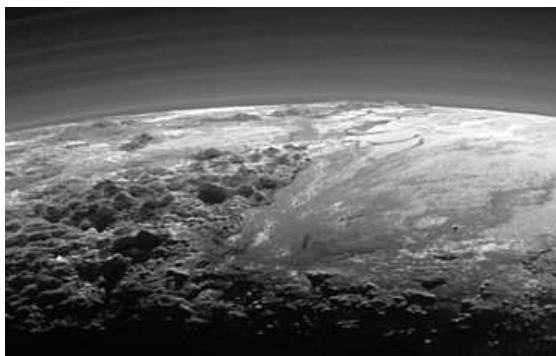


Рис. 2.322-3. Вигляд шаруватой *атмосфери* Плутона, частини *рівнини Супутника* (*Sputnik Planitia*) із навколишніми *горами* (фото *New Horizons*; віддаль $18\,000\text{км}$; ширина фото - 380км)

Ознаки цієї розрідженої газової оболонки (головним чином молекули нейтрального N_2) простежені *New Horizons* до висоти 1600км над Плутоном, а газовий «хвіст» за карликовою планетою тягнеться на віддаль не менше 100тис. км . Тиск атмосфери Плутона надзвичайно малий і дуже змінюється з часом, причому несподіваним чином. Через ексцентричність орбіти в афелії Плутон отримує майже втричі менше тепла, ніж у

перигелії, і це повинно приводити до сильних змін в його атмосфері. За деякими прогнозами, в афелії вона здебільшого замерзає і випадає на поверхню Плутона, а її тиск зменшується у багато разів.

Вимірювання зонда *New Horizons* показали, що поверхневий тиск на Плутоні становить біля 10^{-5} атм або 1 Па, що у 100 тис. разів менше земного тиску на рівні моря, проте його достатньо для утримання у підвищеному стані **аерозолей** та появи **вітрів, туманів**, дискретних **хмар** та **іоносфери**. Проте спостереження покриття Плутоном зірок показують, що з 1988р. до 2015р. цей тиск зріс приблизно втричі, хоча з 1989р. Плутон віддаляється від Сонця. Ймовірно, це пов'язано з тим, що у 1987р. північний (точніше, позитивний) полюс Плутона вперше за 124 роки вийшов із тіні, що сприяло випаровуванню N_2 з полярної шапки. Вимірювання зонда «*New Horizons*» узгоджуються зі спостереженнями покриттів за попередні кілька років, хоча деякі розрахунки вказували на те, що дані покриттів відповідають значно більшому тиску (його визначення за спостереженнями покриттів пов'язане з деякими труднощами).

Температура на Плутоні зростає з висотою (3-15° на 1км). Середня температура поверхні 50°K (-223,15°С), а середня по атмосфері - на 40° більше (дані 2008р.). Це результат парникового ефекту, викликаного CH_4 . Взаємодія з атмосферою істотно впливає на температуру поверхні Плутона. Розрахунки показують, що вона, незважаючи на дуже низький тиск, здатна ефективно згладжувати її добові перепади. Ділянки поверхні, де випаровується N_2 -крига, охолоджуються більше (подібно охолодженню при випаровуванні води) на величину до 20°. Отримані дані свідчать, що швидкість вітру біля поверхні Плутона 1-2м/с. Цього достатньо для сприяння ерозії на поверхні Плутона і переміщення найдрібніших частинок криги.

На початку 80-их років на Плутоні наступило рівнодення – Сонце пересікло його екватор. Гігантські **газово-крижані гейзери** від сублімації прориваються на поверхню Плутона і фонтанують у космос - жодна інша планета не має такої гідродинамічної утрати атмосфери в космос. У 2007р. тиск на Плутоні збільшився в 3 рази у порівнянні з 1989р. (при прольоті *Voyager-2*). Слабке тяжіння Плутона не може утримувати атмосферу, гази зносяться сонячним вітром у космічний простір. Інтенсивні процеси розкладу CH_4 під дією ультрафіолетових променів Сонця та новоутворені високомолекулярні з'єднання вуглецю надають південній півкулі карликової планети ще більш червонуватого відтінку. Північна півкуля, навпаки, світліє - там Сонце все нижче піднімається над горизонтом (екватор Плутона нахилений більш ніж на 60° до площини орбіти), середні температури поступово падають і тут конденсуються леткі компоненти, які покривають поверхню білим **азотно-метановим інєєм**.



Рис. 2.322-4. **Зліва праворуч:** ударна хвиля (червоний колір) та плазмовий хвіст (синій колір) Плутона (схема NASA/APL/SwRI). Різноманіття різних геологічних **форм рельєфу** на поверхні Плутона.

Топографічна карта із **варіаціями висот кори** карликової планети (фото та дані *New Horizons*, 2015)

Через 1,5 години після максимального зближення з Плутоном зонд *New Horizons* зафіксував у карликової планети холодний **плазмовий хвіст** (рис. 2.322-4) із молекулярного N_2 (якому достатньо енергії для подолання слабкої гравітації Плутона), що іонізований ультрафіолетовим випромінюванням Сонця. У просторі біля Плутона сонячний вітер зіштовхується з такими іонами, уповільнює свій рух, а також, можливо, формує **ударну хвилю**. Все це дозволило вченим визначити швидкість втрати матерії Плутоном – біля 500 тонн/годину (Марс втрачає ~1т/год.).

Завдяки зонду *New Horizons* на Плутоні виявлено сліди неочікувано інтенсивної та різноманітної **геологічної активності** (рис. 2.322-4), зокрема, недавньої. Судячи із концентрації **ударних кратерів**, вік одних ділянок поверхні близький до 4млрд. років, а вік інших не

перевищує 10млн років. Походження спостережуваних деталей поверхні пояснюють **ударами астероїдів, тектонічними процесами, кріовулканізмом, рухом льодовиків, ерозією, конвекцією** у кризі, **сублімацією та конденсацією** газів і, навіть, дією **вітру**.



Рис. 2.322-5. **Ліворуч:** основні регіони поверхні карликової планети Плутона. **Праворуч:** район Томбо (Tombaugh Regio) покритий тонким (кілька см) шаром CO-криги (фото New Horizons, 2015)

Основні деталі **альbedo** Плутона - темна червонувата неоднорідна смуга, що тягнеться дещо південніше екватора майже по всій його довжині, та яскрава ділянка розміром 1800×1500 км на протилежній від Харона півкулі, відома як «**серце Плутона**» або **область Томбо (Tombaugh Regio)** (рис. 2.322-5). Спектральні спостереження «серця» показали, що склад відкладів на його поверхні неоднорідний - у центральній частині концентрація CO більша, ніж на периферії.

Південна частина області переважно є покритою безформними крижаними полями рівниною, причому межі деяких цих полів виділяються більш темним застиглим матеріалом. Ця ділянка з дуже рівним рельєфом отримала назву **рівнина Супутника (Sputnik Planum)**. Крижані плити (їх розміри сягають десятків кілометрів) цієї рівнини - своєрідні айсберги N_2 -криги, які поступово переміщуються і утворюють характерні глетчери, подібно земним льодовикам. Поблизу «берега» рівнини Супутника вони розколюються на окремі фрагменти, обтікають перепони, проникають у нерівності рельєфу і затоплюють кратери (рис. 2.322-7).



Рис. 2.322-6. **Ліворуч:** вигляд поверхні Плутона. **У центрі:** схожі на дюни об'єкти на краю рівнини Супутника. **Праворуч:** брилові **пласти крижаного покриву** рівнини Супутника відносно геологічно молоді і свідчать про активні геологічні процеси під поверхнею Плутона (фото New Horizons, 2015)

До південної частини рівнини Супутника прилягає велика гірська система – **гори Норгей**, висота яких сягає 3,5км, а передгір'я поширені уздовж краю рівнини. Гірські масиви поступово переходять у складчасту систему. Найімовірніше, що гори складені H_2O -кригою, яка в умовах оточуючого середовища - біля 45 К (-230°C) – набуває властивостей міцної гірської породи.

Геологічна активність на поверхні Плутона, яка проявляється, зокрема, і у русі льодовиків, скоріше за все, має місце і зараз. Вчені не відкидають можливість, що у надрах карликової планети може знаходитися **рідкий океан**.

Більша частина поверхні Плутона доволі нерівна (рис. 2.322-4, 2.322-6). Серед різноманітних пагорбів та западин трапляються **метеоритні кратери** (найбільший виявлений сягає 260км) та **каньйони** тектонічного походження (довжиною до 600км). Багато кратерів зруйновані (у т.ч. пересічені каньйонами) або заповнені льодом. На північній межі темної **області Кім** існує глибокий 90км імпактний кратер з яскравим валом та високою центральною гіркою. На протилежній частині Плутона знаходиться ще один кратер глибиною не менше 8км і діаметром

320км із оточуючими його ударними викидами. У середині його помітний високий вторинний 150-кілометровий вал із 80-кілометровим провалом на місці центральної гірки. Ця структура, можливо, є *кріовулканом* (рис. 2.322-8), який утворився у центрі кратера в результаті удару.

Деякі ділянки поверхні Плутона порізані деревоподібно розгалуженими *долинами* - ймовірно, виробленими N_2 -льодовиками.

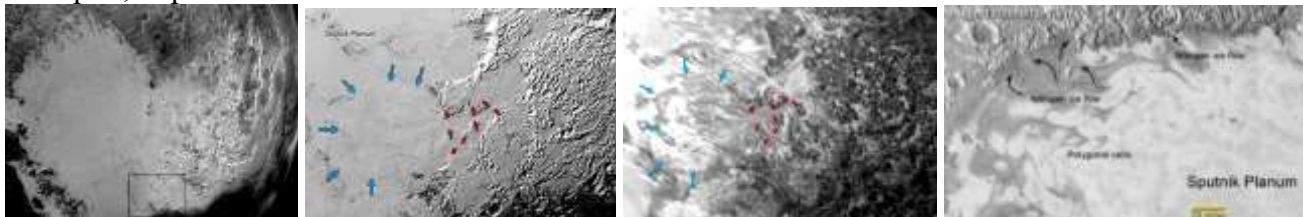


Рис. 2.322-7. **Зліва праворуч:** рівнина Спутника із розташуванням N_2 -льодовика (виділено квадратом). Місця стікання N_2 -льодовика із області його накопичення у плутоніанських горах на рівнину Спутника долиною (помічена червоними стрілками); крайові частини льодовика (помічені синіми стрілками) поширюються у глибину рівнини Спутника та проникають у пониження рельєфу (чорні стрілки на фото праворуч) суміжної кратеризованої території (фото *New Horizons*, 2015)

Відкрито й дуже своєрідні форми рельєфу – *канали*, які розмежовують крижані рівнини; ребриста, можливо, через ерозію, поверхня крижаних полів; просторі *височини*, вкриті дрібними, витягнутими в одному напрямі, *хребтами*. Висота хребтів становить кількесот метрів, а ширина проміжків між ними 5-10км - таку місцевість порівнюють із *змійною шкірою* (рис. 2.322-9). Можливо, це результат сублімації криги під дією сонячних променів та намерзання газів на височинах або інших процесів. Інші регіони перетяті численними меншими паралельними *хребтами* з проміжками біля 1км, що нагадують рельєф *пральної дошки*. Вони вкривають різні деталі поверхні, у т.ч. *кратери* та височини; їх походження незрозуміле.

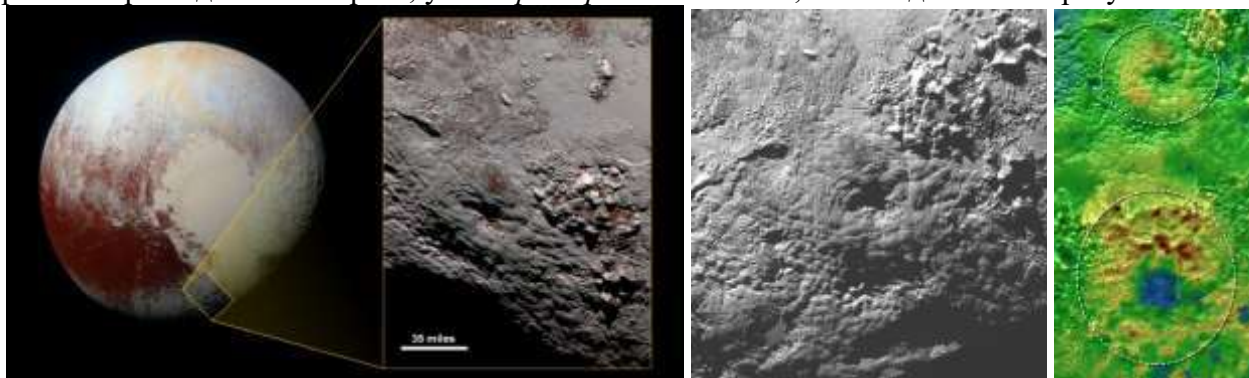


Рис. 2.322-8. Дві великі гори Плутона - *Райт Монс* (*Wright Mons*, шириною 150км і висотою 4км) і *Піккар Монс* (*Piccard Mons*) - можуть бути кальдерами *кріовулканів*, які викидали на поверхню карликової планети суміж N_2 -криги, NH_3 чи CH_4 (фото *New Horizons*, 2015)

Виявлено дві округлі височини із плямистими темними смугами на поверхні та западинами у центрі, які можуть бути *кріовулканами* (рис. 2.322-8); їх діаметр 150 і 225км, висоти 3-4 та 6км. Особливу увагу набули плямисті темні смуги на крижаному покриві, можливі сліди викидів *кріовулканів* чи *гейзерів*, такі ж, які спостерігалися у 1989р. на супутнику Нептуна – Тритоні.



Рис. 2.322-9. **Ліворуч:** загадкові ями чи западини (сотні метрів діаметром і десятки метрів глибиною) у південно-східній частині льодовика рівнини Спутника в області «серця Плутона»; дефіцит ударних кратерів свідчить про відносно недавнє формування цих западин, а їх концентрації і напрям сторін вказують на переміщення криги та обмін N_2 і іншими летучими елементами між поверхнею та атмосферою. Великі структури праворуч і ліворуч можуть бути старими кратерами. Ліворуч угорі видно

межу між рівниною та покритою ямами областю, яка може бути своєрідною *береговою лінією* (розміри збільшеного фото 80×80км, дані NASA/Johns Hopkins University). **У центрі:** схожий на *змійну шкіру* лінійний пейзаж гірського рельєфу із загостреними кінцями. Вчені допускають, що ці загадкові заглибини могли утворитися шляхом комбінації розломів у кризі та подальшої сублімації криги. Гори простягаються на сотні кілометрів, зараз вчені ще не можуть пояснити їх походження можливо, що гори (*хребет Тартара*) утворилися через комбінацію внутрішніх тектонічних сил та сублімації криги на поверхні під впливом сонячних променів. **Праворуч:** схожі на *дюни* об'єкти на краю рівнини Супутника (фото New Horizons, 2015)

Від інших регіонів Плутона різко відмінна **рівнина Супутника (Sputnik Planum)**. Вона має округлу форму з виступом на південь, її розмір становить близько 1500×800км, а площа - біля 5% площі поверхні Плутона. Це - *западина*, імовірно, *імпактного* походження, яка заповнена кригою із численних полігональних блоків, склад криги - N_2 -крига, H_2O -крига; потужність криги повинна бути у кілька кілометрів. Поверхня рівнини дуже молода через відсутність там помітних ударних кратерів. Ця рівнина багата на своєрідні й загадкові об'єкти: вона посічена криволінійними борознами (часто подвійними), що ділять її на «комірки» - утворені, найімовірніше, при *конвекції* речовини із надр в атмосферу карликової планети чи при *охолодженні та стисканні*.

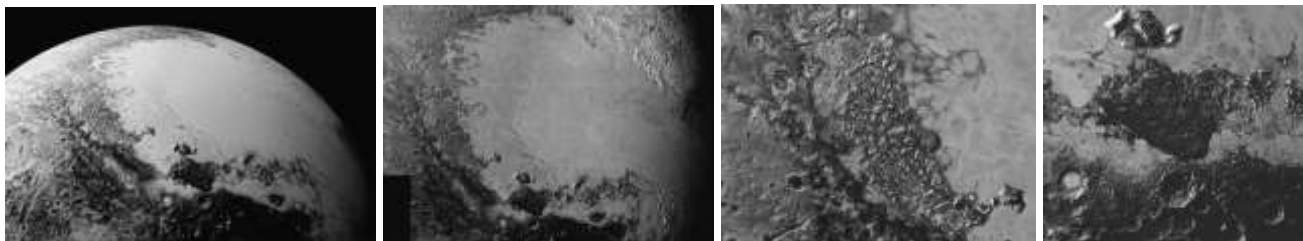


Рис. 2.322-10. **Зліва праворуч: 1.** Вигляд частини поверхні Плутона, де за покритою ударними кратерами областю *Ктулу* розкинулися білі гладенькі крижані простори *рівнини Супутника*. **2.** Область поверхні Плутона розміром біля 350км із зонами різного альбедо та великим різноманіттям форм: темними кратеризованими *давніми областями*; *гірськими масивами*; загадовими полями із темними, паралельними між собою і схожими на *дюни*, гребенями (найменша видима на фото форма рельєфу має діаметр 0,8км). **3-4.** Хаотичний, дуже схожий на поверхню Європи (супутника Юпітера), регіон на захід від *рівнини Супутника*: нагромадження скель та гір можуть бути міцними величезними *брилами* H_2O -криги, які плавають у великому, важкому й текучішому «морі» N_2 -криги. Різноманітна поверхня Плутона із *рівнин, гір* і темних *хребтів*, які можуть бути величезними *дюнами* (фото New Horizons, 2015)

Деякі ділянки усяні численними дрібними заглибинами, зазвичай вишикуваними у ряди. Їх поява може бути пов'язана із *сублімацією* льоду. Від деяких пагорбів тягнуться довгі темні смуги, що могли утворитися під дією *вітру*. Перпендикулярно їм витягнуті численні деталі, що, найімовірніше, є *дюнами* із метанового піску. Крижини, що перемістилися із рівнини, можуть бути причиною яскравого забарвлення східної половини області Томбо. Із прилеглих до рівнини височин спускаються *льодовики*, що виробляють на своєму шляху розгалужені *долини* (троги). На західному краю рівнини розміщені численні кутасті гори висотою до 5км.

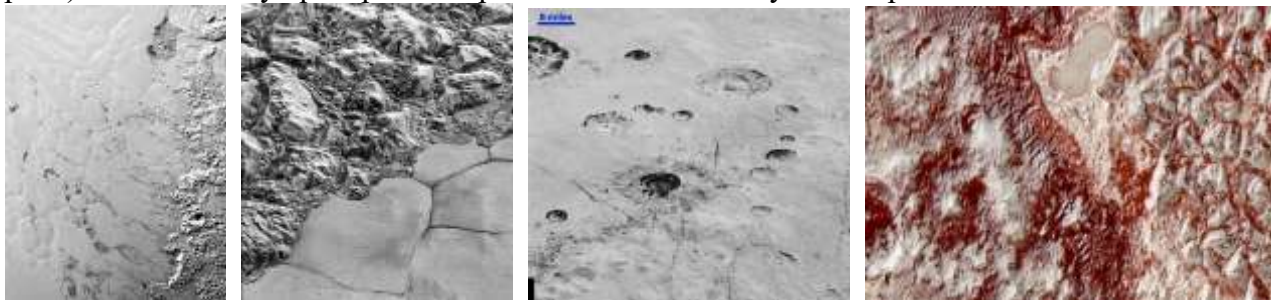


Рис. 2.322-11. **Зліва праворуч: 1.-** *гірські хребти* та *крижані рівнини* Плутона. **2.-** скупчення великих *брил* (гори *Аль-Ідрісі*) H_2O -криги у вигляді гірського масиву (ширина фото ~80км); деякі боки брил покриті темним матеріалом, інші мають світлу поверхню; місцями видно можливу шарувату структуру, інші області є хаотичним нагромадженням брил одна на одну. Цей регіон різко обмежується областю, яка нагадує земну берегову лінію - тут починається гладенька *рівнина Супутника* із більш пластичною

N_2 -кригою, що місцями посічена розломами, які формують її кліткову структуру. «Айсберги» N_2 -криги розколюються та деформуються при зіткненнях із «прибережними скелями» H_2O -криги. 3.- ударні кратери (кілька км діаметром) на поверхні Плутона. 4.- замерзле озеро (?) (дані NASA/JHUAPL/SwRI)

Область з рівнинами настільки гладенька і не має ударних кратерів, що вчені вважають: Плутон активно змінює свою поверхню від моменту утворення Сонячної системи, а вік рівнини не може перевищувати 10млн років. Основним поясненням є те, що Плутон має велике тверде ядро, до складу якого входять радіоактивні матеріали, які розігрівають надра і заставляють кригу рівнини Спутника згладжувати любі кратери, що були на ній раніше. Внутрішнє нагрівання також може зумовити існування під корою Плутона **підповерхневого океану**.

Зберегти океан під поверхнею Плутона у рідкому стані можуть *газові гідрати* – особлива форма води, де лід утворює кристалічну ґратку, яка захоплюється такими газами, як метан. Гідрати дуже в'язкі та мають низьку теплопровідність – тобто, відмінно утримують тепло.

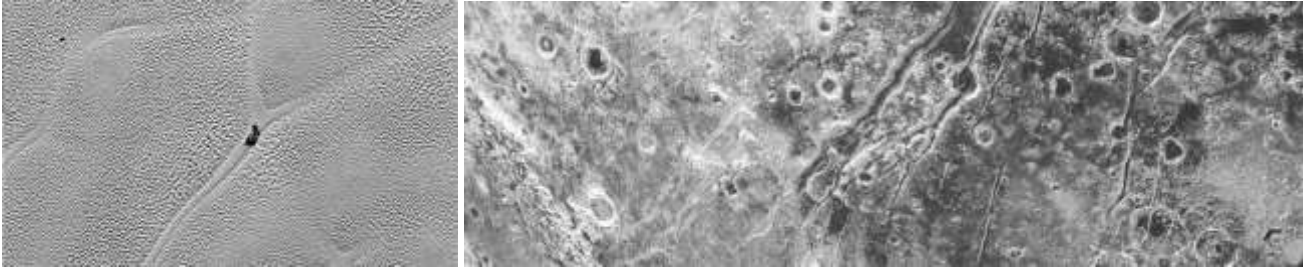


Рис. 2.322-12. **Ліворуч:** багатокутні ями (діаметр 16-25км, глибина 90м) виникають подібно дії лавової лампи: за рахунок танення N_2O -криги під поверхнею Плутона більш теплий матеріал надр піднімається догори, потім охолоджується і знову занурюється униз. **Праворуч:** «висячі долини» - вертикальні скелі - на поверхні «серця» Плутона утворюються за рахунок поступової сублімації N_2 із відслонених покладів N_2 -криги деяких ділянок на межі «серця» і решти елементів місцевості та наступної конденсації N_2 на більш високих ділянках рельєфу із формуванням льодовикових потоків та висячих долин (фото *New Horizons*, 2015)

На Плутоні знайдені великі запаси H_2O -криги у вигляді численних мілких відслонень, розкиданих по поверхні карликової планети. Причина, по якій H_2O -крига появляється лише на деяких ділянках, але здебільшого перекрита тонким покривом з інших (летких) видів криги - переважно N_2O -криги (97-98%), залишається загадковою, проте найбільша кількість H_2O -криги спостерігається на ділянках поверхні із толінами коричнюватого кольору.

Серед названих речовин азот (N_2), монооксид вуглецю або чадний газ (CO) і, меншою мірою, метан (CH_4) характеризуються суттєвою леткістю в умовах Плутона і здатні до сезонних переміщень поверхнею, що впливає на її забарвлення. H_2O -лід має велику міцність (утворювати деталі рельєфу висотою у кілометри може тільки він) та легкістю (айсберги з нього можуть плавати у важчому й текучішому N_2 -льоді). CH_4 -лід ще легший. На відміну від CO , він погано розчиняється в замерзлому N_2 і подекуди, імовірно, існує в чистому вигляді.

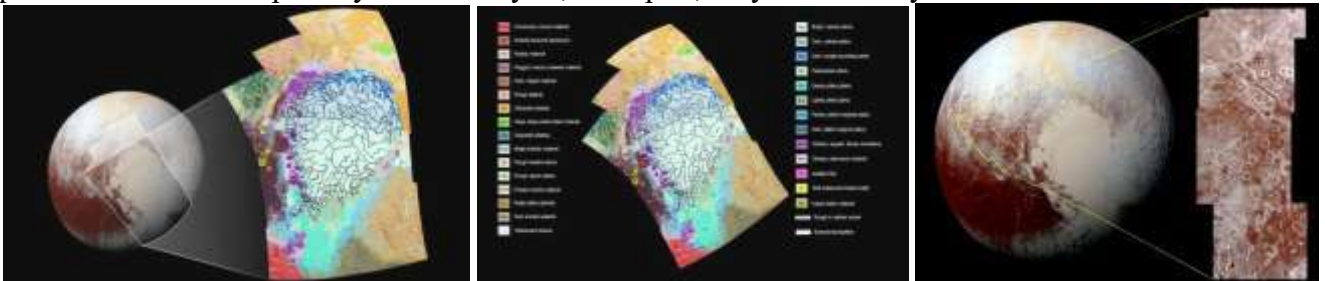
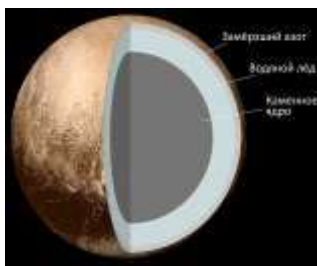


Рис. 2.322-13. **Ліворуч:** геологічна карта частини Плутона ($>3,3$ тис.км²): розбита тріщинами блакитна частина у центрі карти є рівниною N_2 -криги рівнини Спутника (*Sputnik Planum*); плями фіолетового кольору ліворуч від неї – *гірські пасма*; червоний колір ліворуч унизу – потенційний *кріовулкан Райт Монс*; темна коричнева смуга на лівій частині карти – початок *регіону Ктулху*, покритого ударними кратерами (жовті плями) (карта складена із 12 фотографій камери LORRI зонду «*New Horizons*» з віддалі 77тис. км від Плутона за 2 години до максимального зближення із карликовою планетою).

Праворуч: ударні кратери та покриті червоним пилом області Землі Вікінга (на захід від рівнини Спутника) (фото *New Horizons*, 2015)



Своєю сферичною **внутрішньою будовою** (50-70% гірських порід, 50-30% криги) Плутон (рис. 2.323), мабуть, нагадує Тритон (рис. 2.318) – найбільший супутник Нептуна - у Плутона **тверда поверхня**, але, на відміну від планет земної групи, істотна частина маси надр Плутона представлена **крижаною мантією** потужністю до 300км із замерзлих N_2 - 98%, CH_4 , H_2O і CO -газу, яка потужним шаром оточує **кам'яне ядро**.

Рис. 2.323. Будова Плутона: 1- замерзлий N_2 , 2- H_2O -крига, 3- силікати і крига

У надрах Плутона може бути тепліше ніж на поверхні і, можливо, між **корою** планети та поверхневим **шаром криги** існує **рідкий океан**.

Чи є у Плутона **магнітне поле**, невідомо (на *New Horizons* не було магнітометра). На основі досліджень сонячного вітру в околицях Плутона встановлено, що магнітна індукція біля поверхні не перевищує 30нТл (у 2000 разів менше, ніж на Землі). Тобто, максимальний можливий магнітний момент Плутона становить біля $2,5 \times 10^{17} A \times m^2$ (у 300тис. разів менше земного). Крім того, існують оцінки цієї величини, зроблені на основі емпіричної залежності магнітного моменту від маси та періоду обертання, отриманої для планет і супутників, що мають магнітне поле: $5 \times 10^{18} A \times m^2$ для випадку наявності у Плутона розплавленого залізного ядра і $1 \times 10^{14} A \times m^2$ для випадку, якщо поле створене гіпотетичним підповерхневим водняним океаном. Ці значення менші за земне в 15тис. та 800млн разів відповідно.

Карликова планета Плутон за всіма параметрами схожа на тверді планети, але Плутон не належить до планет земного типу, що мають загальну площину орбіт, більшу густину і вміщують залізо та нікель. Плутон розміщений на околиці Сонячної системи у поясі Койпера, звідки Сонце видно як яскраву зорю на вічно темному небосхилі і середня його густина (до $2,0 g/cm^3$) кардинальним чином відрізняє цю карликову планету від найближчих сусідів – газових планет-гігантів.

Порівняння періодів обертання Нептуна і Плутона свідчить про те, що *Плутон, як Тритон і Нерейда, скоріше за все був раніше супутником Нептуна, але потім „утік” від своєї планети.* Плутон з Нептуном знаходяться в орбітальному резонансі 3:2 – на кожні 3 оберти Нептуна навколо Сонця приходить 2 оберти Плутона, а весь цикл займає 500 років.

Навколо Плутона обертається **менший компонент подвійної системи - ХАРОН** (рис. 2.324) (маса Харона становить $\sim 11,65\%$ маси Плутона) - діаметр 1212 ± 6 км, один оберт орбітою здійснює за 6 земних діб 9 год.17 хв. на віддалі 19 596км від Плутона. Внаслідок припливного взаємозахвату такому ж проміжку часу рівні періоди обертання Харона і Плутона, а тому вони постійно обернені один до одного одними і тими ж сторонами, тобто, Харон на небі Плутона нерухомий, як і Плутон на небі Харона. Маса Харона $1,52 \times 10^{21} kg$ ($0,0003$ маси Землі), густина $1,702 \pm 0,021/cm^3$. Різниця між густинами Плутона і Харона свідчить, що вони **сформувалися незалежно один від одного і, ймовірно, Харон був захоплений Плутоном із поясу Койпера.**



Рис. 2.324. Супутник Плутона – Харон (в іншій інтерпретації – менший компонент подвійної планетної системи Плутон – Харон) (фото *New Horizons*, 2015)

Поверхня Харона менш червонувата й менш яскрава, ніж у Плутона. Харон покритий H_2O -кригою, а не метаново-азотною, як Плутон, має сірий колір і темніший за Плутон, що, мабуть, пов'язано з більшою масою Плутона, завдяки чому на ньому зберігся CH_4 , тоді як з крижаної поверхні Харона він випарувався. Невелика маса Харона не сприяє утримувannya навіть невеликої кількості газу біля своєї поверхні і він не має **атмосфери. В інфрачервоному спектрі на Хароні знайдені **сліди аміаку** та **водних кристалів**. Спостереження (обсерваторія *Джеміні*, 2007) дозволили виявити на Хароні ділянки із гідратами аміаку і водяними кристалами, що дозволяє припустити наявність там**

криогейзерів. Ці кріовулкани (криогейзери) викидають на поверхню супутника змішану в надрах рідку суміш **води** та **аміаку** (тобто, нашатирний спирт), що значно знижує точку замерзання води. На поверхні вода миттєво замерзає і випадає кристалами криги та гідроксиду амонію. Кристали криги швидко руйнуються під дією сонячного ультрафіолету і тому їх існування на Хароні можливе при регулярному поповненні із надр.

Найбільш характерним об'єктом на поверхні Харона є **Мордор** (*Mordor Macula*) - темна пляма біля його північного полюса, що утворилася через наднизькі температури, які виникають на поверхні супутника. Спектри плями свідчать про наявність на її поверхні твердих високомолекулярних вуглеводнів. Під час полярної зими, що може тривати сотню років, температура поверхні опускається до -258°C , і захоплені гравітацією Харона із атмосфери Плутона молекули CH_4 та N_2 замерзають. Коли настає «літо» і температура північного полюса зростає до -213°C , CH_4 і N_2 випаровуються, і в області **Мордора** залишаються лише важкі з'єднання, які під впливом ультрафіолету перетворюються у толіни.

Поверхня Харона демонструє складну геологічну історію розвитку (рис. 2.324, 2.324-1), включаючи *тектонічні розломи*; відносно гладенькі *рівнини*, які видно у правій нижній частині фото: декілька загадкових *гір* в оточенні *рівів*; густо покриті метеоритними *кратерами* області у центрі і лівій частині диску Харона. Крім того, на його поверхні існує велика кількість зон з різними альбедо, включаючи яскраві та темні «*промені*», які розходяться від кратерів.

Екватор супутника навкіс пересікає протяжна ущелина (каньйон) - система із звивистих *тріщин* та *бескидів* (рис. 2.324-1). Вони могли виникнути як у результаті контракції (стискання) верхніх шарів, так і під час інших процесів еволюції поверхні Харона. У середніх широтах північної півкулі (на фото його видно практично на термінаторі праворуч угорі) розміщений дуже глибокий *каньйон* – його глибина може перевищувати 8км. На поверхні супутника помітні нечисленні *ударні кратери*, причому частина із них має *променеві системи* викидів. Кратер у лівій частині фото має внутрішній діаметр біля 25км. Удвічі більший кратер розташований на рівнині праворуч: тут із депресії глибиною, можливо, до 5км виступає центральна гірка порівнюваної висоти. У цілому, на Хароні відсутні явні ознаки ендегенної діяльності, які спостерігаються на Плутоні.

Вчені вважають, що гігантська ущелина на Хароні появилася на стадії його геологічної молодості, коли радіоактивне тепло супутника розігрівало його. Під крижаним щитом Харона утворився гігантський *водяний океан*. Пізніше, коли радіоактивне паливо Харона закінчилося і надра супутника охололи - океан замерз та розширився і розірвав кору супутника.

Ущелини на Хароні мають довжину понад 1770км, що утричі перевищує Великий Каньйон (США), а глибина їх у деяких місцях досягає 7,2км.

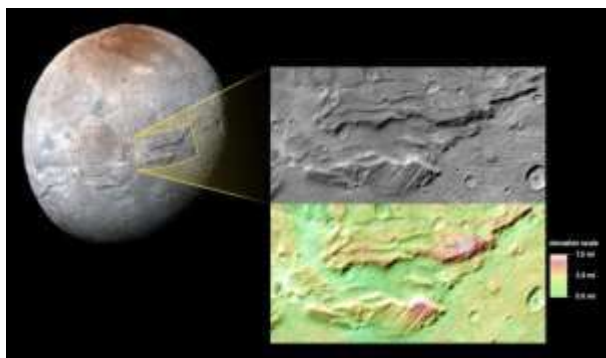


Рис. 2.324-1. Фрагменти поверхні та гігантської ущелини Харона (за *New Horizons*, 2015)

Враховуючи те, що Плутон - карликова планета (він удвічі менший за Меркурій і його розміри становлять 2/3 розмірів Місяця), а загальна маса системи Плутон - Харон складає 0,0025 маси

Землі, причому маса Харона у 8 разів менша від маси карликової планети Плутона і обертаються вони синхронно навколо розташованого між ними (за межами Плутона) загального центру мас – барицентру - за 6 діб 9 годин 17 хвилин, то вони утворюють подвійну систему Плутон–Харон. Співвідношення мас цих космічних об'єктів-близнюків є найбільшим серед планет Сонячної системи, які мають власні супутники.

Період обертання системи Плутон-Харон навколо барицентру дорівнює періодам обертання Плутона і Харона навколо власних осей, тобто, вони завжди обернені один до одного одними сторонами. Телескоп *Hubble* навколо системи **Плутон-Харон** відкрив **4 супутники** (рис.

2.325, 2.325-1, 2.325-2): **Нікс** (розміри 54×41×36км, радіус орбіти 49 000км) і **Гідра** (розміри 43×33км, радіус орбіти 65 000км) - із меншою у 5000 разів яскравістю за Плутон; найближчий до Плутона - **Стікс** (*S/2011 P4*) (розміри 16×9×8км, велика піввісь його орбіти становить 42 656(78)км; фактично Стікс обертається не навколо Плутона, а навколо загального центру ваги системи Плутон-Харон. Період обертання навколо Плутона становить 20,16155 (27) діб, тобто він знаходиться в орбітальному резонансі 11:6 із Гідрою і 11:9 із Ніктою, а також відрізняється лише на 5% від резонансу 1:3 із Хароном); **Кербер** *S/2012(134340) 1* (розміри 12×4,5км, радіус орбіти 58 000км, оберт за 32,1 доби).



Рис. 2.325. Зліва праворуч: **система Плутон-Харон** (колаж фото *New Horizons*, 2015); **Плутон-Харон** із супутниками: послідовно **Стікс** (*P4*), **Нікс** (*S/2005 P2*), **Гідра** (*S/2005 P1*), **Кербер** (*P5*) (фото *Hubble*); **Нікс** та **Гідра** (фото *New Horizons*, 2015)

Нікс (рис. 2.325) рухається майже коловою орбітою у площині орбіти Харона в орбітальному резонансі 1:4 з ним (за час одного оберту Нікса Харон виконує чотири оберти навколо Плутона) на віддалі 48 710км від Плутона, має розміри 54×36км та здійснює один оберт навколо барицентру за 24,86 земних діб. На Ніксі відкрито 2 ударних кратери.

Гідра (рис. 2.325) також рухається майже коловою орбітою у площині орбіти Харона в орбітальному резонансі 1:6 з ним на віддалі 64 750км від Плутона, має розміри 43×33км і здійснює один оберт навколо барицентру системи Плутон-Харон за 38,2 земних діб. Іноді Гідра буває яскравішою за Нікса - вона або явно більша за розмірами, або окремі її ділянки поверхні краще відбивають сонячне світло. Гідра має на своїй поверхні 1 великий кратер.

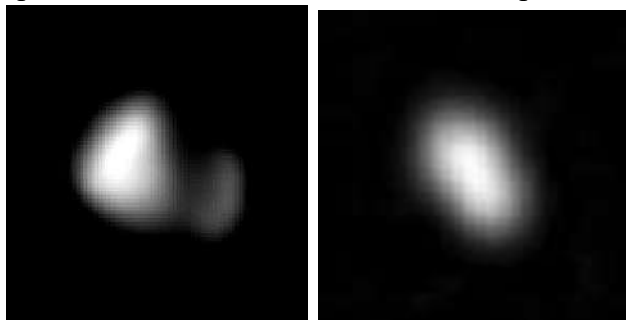


Рис. 2.325-1. Зліва праворуч: **Кербер** (*Kerberos*; раніше: *S/2011(134340) 1*, за старою системою *S/2011 P 1*, неофіційно *P4*) – найменший відомий супутник Плутона після Стікса; **Стікс** (*Styx*; раніше: *S/2012 (134340) 1*, за старою системою *S/2012 P 1*, неофіційно *P5*) (фото *New Horizons*, 2015)

Ці чотири нові супутники мають інтенсивний хаотичний характер руху навколо центру мас системи Плутон – Харон; ймовірно, захоплені силою тяжіння подвійної системи Плутон-Харон, бо, за результатами комп'ютерного моделювання, утворення їх одночасно із Хароном у результаті космічного зіткнення зумовило би розміщення цих міні-супутників на значно більш витягнутих орбітах.

Table 1. Properties of the Pluto-Charon system. Boldface entries are values from *New Horizons*. Mean orbital elements (semimajor axis, orbital period, eccentricity, and inclination) for Charon are Plutocentric, whereas those for the small satellites are barycentric and are based on numerical integrations (35); GM (standard gravitational parameter) values are also from (35).

Body	Semimajor axis (km)	Period (days)	Eccentricity	Inclination (degrees)	Radius (km)	GM (km ³ s ⁻²)	Density (kg m ⁻³)
Pluto		6.3872			1187 ± 4*	869.6 ± 1.8	1860 ± 13
Charon	19.596	6.3872	0.00005	0.0	606 ± 3*	105.88 ± 1.0	1702 ± 21
Styx	42.413	20.1617	0.00001	0.0	1.8 to 9.8†	0.0000 ± 0.0001	
Nix	48.690	24.8548	0.00000	0.0	54 × 41 × 36‡	0.0030 ± 0.0027	
Kerberos	57.750	32.1679	0.00000	0.4	2.6 to 14†	0.0011 ± 0.0006	
Hydra	64.721	38.2021	0.00554	0.3	43 × 33‡	0.0032 ± 0.0028	

*From limb fits to LORRI images; radius error is pixel scale of best resolved image for each. Pluto's radius is consistent with radio occultation results as well; see (36) for technique. †From (32). ‡Axial dimensions derived from LORRI and MVIC images (see text).

Рис. 2.325-2. Характеристики карликової планети Плутона та його супутників (за *sciencemag.org*)

Міжнародний Астрономічний Союз (червень 2008р., Осло) підвищив статус Плутона і назвав його іменем цілу категорію подібних об'єктів - виділена підгрупа складених переважно кригою із H_2O , NH_3 і CH_4 транснептунових об'єктів (карликових планет за орбітою Нептуна) - плутоїди (plutoid) – *це небесні тіла, які обертаються орбітами навколо Сонця за межами орбіти Нептуна; які досить масивні для того, щоб власною гравітацією підтримувати гідростатичну рівновагу (мають сферичну форму); проте вони не домінують у своїй області простору і не можуть „розчистити” її від інших об'єктів порівнюваної маси.*

Згідно цієї класифікації до плутоїдів віднесені Плутон, Ерида, Макемаке, Хаумеа. Карликова планета Церера не відноситься до плутоїдів, а окремої категорії для „церероподібних” об'єктів ще не запропоновано.

Ближче до фіналу історії Сонячної системи – через 1 млрд. років - яскравість Сонця збільшиться на 11% і Земля перетвориться у розжарену пустелю. Через 5 млрд. років Сонце збільшиться у розмірах у 100 разів, стане у 1000 разів яскравішим і перетвориться у Червоний гігант. Внутрішні планети Сонячної системи – Меркурій, Венера, Земля і Марс – просто випаруються, але ці смертельні умови будуть означати тепло, а можливо, і життя для зовнішніх планет Сонячної системи - простір від Сатурна до Плутона прогріється до температур, які здатні розтопити маси криги на цих планетах та їх супутниках. У зоні життя гігантського Сонця будуть планети, що розташовані на віддаль від 10 до 50 а.о. – Сатурн, Уран, Нептун із своїми крижаними супутниками, Плутон та об'єкти поясу Койпера. У газових планет – Сатурна, Урана і Нептуна – шанси на виникнення життя практично дорівнюють нулю. Найбільш сприятливі умови для його виникнення можуть сформуватися на Плутоні та Хароні, як і на Тритоні - супутнику Нептуна, а також на ряді крижаних об'єктів поясу Койпера, так як вони багаті органічними з'єднаннями, а жар зоряного червоного гіганта - Сонця перетворить їх крижані поверхні в океани на декілька сотень мільйонів років.

Таким чином, Сонячна планетна система має наступні закономірності в своїй будові:

1. Усі відомі об'єкти Сонячної системи діляться на планети, карликові планети і малі тіла. 2. Планети діляться на три групи за фізичними властивостями: тверді невеликі планети земної групи, газово-рідинні планети-гіганти та карликові планети. 3. Усі планети обертаються навколо Сонця в одному напрямі, який співпадає із напрямом обертання Сонця навколо власної осі. 4. Орбіти всіх планет, за винятком карликових планет - Плутона, Ериди та об'єкта Седни, лежать практично в одній площині, яка майже співпадає з площиною сонячного екватора. 5. Напрямок осевого обертання планет (за винятком Венери, Урана і Плутона) співпадає із напрямом їх обертання навколо Сонця і направлений проти годинникової стрілки. 6. Сумарна маса планет у 750 разів менша маси Сонця, проте на них припадає 98% моменту кількості руху всієї Сонячної системи. 7. Майже всі супутники планет обертаються навколо них практично коловими орбітами переважно у площині екватора планет, причому (за декількома винятками) напрям руху їх обертання співпадає з напрямом обертання планети навколо власної осі.

Політ зондів НАСА *Voyager-1*, *-2*, а також їх попередників *Pioneer-10*, *-11* у незвіданий простір космосу вже приніс нові загадки. Зонд *Voyager-1* зараз знаходиться на віддалі 104,8 а.о. і продовжує політ у межах геліопаузи – *області зовнішньої межі Сонячної системи, де тиск сонячного і міжзоряного вітрів вирівнюються* – фактично зонд майже вийшов із Сонячної системи у міжзоряний простір (рис. 2.326), який заповнений переважно розрідженим H_2 , різними іонами, частинками пилу та магнітними полями. За його даними, взаємодія Сонця з оточуючим міжзоряним космосом є більш динамічним та складним процесом, ніж це уявлялося раніше, а геліопауза має асиметричну форму, природу якої ще необхідно з'ясувати.

Voyager-1 подолав так званий „стрибок ущільнення” – *межу внутрішньої ударної хвилі, де сонячний вітер вступає у взаємодію з міжзоряним, раптово гальмується, розігрівається, стає густішим і переходить із надзвукової на дозвукову швидкість* (з 450 до 100 км/сек.). Вважали, що швидкість сонячного вітру, який у межах Сонячної системи розширюється зі швидкістю мільйонів кілометрів за годину, тут падає приблизно на порядок, але *Voyager-1* показав інше – швидкість падає взагалі, а часом вітер навіть починає „дмухати” назад, у бік Сонця.

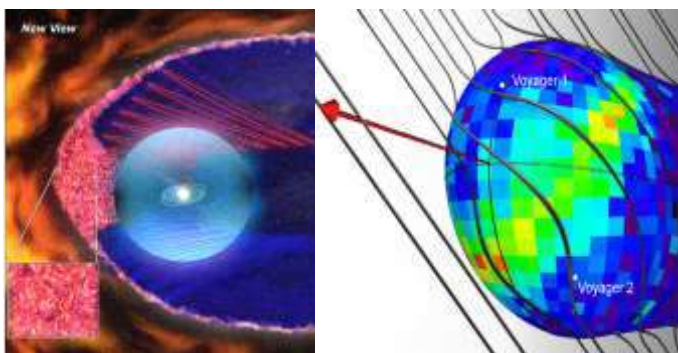


Рис. 2.326. **Ліворуч:** найвіддаленіший від Землі *Voyager-1* (15,671млрд.км) перейшов із геліосфери у межі геліопаузи (області взаємодії сонячного та міжзоряного вітрів), у якій обертання Сонця скручує своє єдине магнітне поле і утворює *магнітну піну* з окремих *магнітних пухирів* діаметром 150млн. км із намагніченою матерією в них. **Праворуч:** рух геліосфери зі *смугою ЕНА* у магнітному полі Всесвіту (дані NASA, SwRI)

Встановлено, що *напрямок силових ліній магнітного поля зовнішніх областей Сонячної системи за межами „стрибка ущільнення” змінюється повільніше*. Саме Сонце здійснює оберт навколо власної осі за 26 діб, а магнітне поле міняє орієнтацію удвічі частіше – за 13 діб, але за межами „стрибка ущільнення” зміна магнітного поля відбувається більш ніж за 100 діб. Також вважалося, що міжзоряні іони, багатократно долаючи „стрибок ущільнення”, поступово втрачають енергію, яка випромінюється у космос у вигляді космічних променів.

Це означало б, що в області „стрибка ущільнення” густина іонів міжзоряного газу досягає максимуму. Але *Voyager-1* відкрив дещо інше – *по мірі віддалення зонда густина іонів продовжує повільно зростати* і вченим ще необхідно знайти джерело космічних променів, що поступають із зовнішніх областей Сонячної системи. З південного боку, під впливом магнітного поля Галактики, геліосфера являє собою сплюснену кулю з виступами та западинами і її границя знаходиться на 1,5 млрд. км ближче до Сонця, а у залежності від активності сонячних спалахів вона коливається вперед-назад. Через це зонд *Voyager-2* (знаходиться на віддалі 84,6а.о.) п'ять разів пересікав границю Сонячної системи, так звану геліопаузу. Температура на межі ударної хвилі виявилася у 10 разів нижча теоретичної. Крім того, *аналіз траєкторії руху обох апаратів Pioneer показав, що вона все істотніше відрізняється від розрахункової* – апарати піддаються постійно зростаючому гальмуванню незрозумілої природи, яке відбувається значно швидше розрахункових згідно сучасних наукових теорій. Причина такого гальмування зондів, які покидають межі Сонячної системи, ще незрозуміла – вона може бути пов'язана як із ще невідомими властивостями простору-часу, так із гравітаційним впливом ще неведених тіл на периферії Сонячної системи.

Вивчення геліосфери апаратом *IBEX* (США, 2009р.) показало, що геліосфера оточена *гігантською дуже вузькою смугою* (рис. 2.325), в якій утворюються (за рахунок відбору протонами сонячного вітру електронів у атомів міжзоряного газу) і з якої виходять зі швидкостями від 40 до 1000км/сек. незалежні від магнітних полів *енергійні нейтральні атоми* (ЕНА), що розлітаються в усі боки, у тому числі – повертаються у внутрішню Сонячну систему.

За останні п'ять років у **поясі Койпера** астрономи відкрили декілька великих об'єктів: у



2001р. – **Варуна** (2000 WR106) та **Іксіон**, діаметри яких відповідно біля 900км та 1065км; у 2002р. – **об'єкт 2002 AW197**.

Рис. 2.327. Крупні об'єкти поясу Койпера у порівнянні із Землею (рис. NASA)

04.07.2002р. був відкритий **КВАОАР (2002 LM60)** діаметром 1280км (удвічі менше Плутона), який розташований від Землі на віддалі 6,3млрд. км (42а.о.; Нептун віддалений приблизно на 30а.о.) і

обертається власною орбітою навколо Сонця. Рік на *Кваоарі* триває 285 земних років. Аналіз спектру відбитого *Кваоаром* випромінювання незаперечно свідчить про існування на ньому *твердого метану, водяної криги, етану, інших з'єднань вуглеводнів та гірських порід* - як і на решті об'єктів поясу Койпера. Сонце здатне нагріти *Кваоар* лише до температури -223°C , тоді

як молекули води можуть утворювати кристалічну структуру при температурах не нижче – 163°C. Таким чином, ймовірно, що колись температура на *Кваоарі* була істотно вища, ніж зараз.



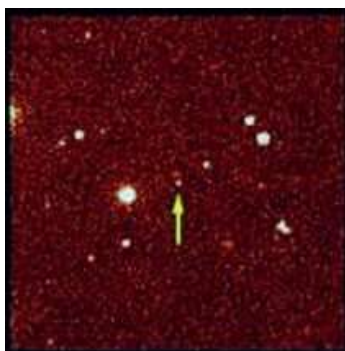
Рис. 2.328. Художнє зображення *Кваоара* (ілюстрація *Greg Bason*)

Можливо, що *Кваоар* мав у своїх надрах досить потужне джерело тепла, яке могло утворити із криги воду і виштовхнути її на поверхню, де вона перетворилася у прозору кригу. Допускають, що ця крига могла утворитися ще 4млрд. років тому під час формування периферії Сонячної системи і під впливом дії мікрометеоритів вийти на поверхню, або за рахунок виділення енергії при зіткненнях. На *Кваоарі* повинні

спостерігатися сезонні переміщення метану з полюса на полюс.

15.03.2004р. за допомогою орбітального телескопу *Spitzer* на віддалі 13млрд. км від Сонця – у сім разів далше ніж Плутон - був відкритий найбільший з 1930р. (після Плутона) об'єкт діаметром 1700-2000км - **СЕДНА (2003 VB16)**.

Седна на відміну від інших, відкритих раніше об'єктів поясу Койпера типу *Варуни*, має нормальну, „власну” орбіту, яку вона не змінює. Надзвичайно великий ексцентриситет орбіти дозволяє іншим вченим відносити *Седну* до числа **самих зовнішніх членів поясу Койпера**, а



дехто вважає її навіть **першим відомим нам представником Хмари Оорта**.

Рис. 2.329. Об'єкт поясу Койпера - *Седна* (фото *Spitzer* 16.11.2003р.) та її художнє зображення (рис. *NASA*)

Седна обертається навколо Сонця приблизно за 10 500 років надзвичайно витягнутою орбітою і

не наближується до Сонця менше ніж на 76а.о. (11,37 млрд. км), а в афелії - найвіддаленішій точці орбіти - *Седна* віддаляється від нього на 900а.о. (130 млрд. км). Як вважають вчені, *Седна* є **одвічним чистим об'єктом з моменту утворення Сонячної системи і, мабуть, наполовину складається із криги. Там, де вона знаходиться, досить пусто, так що вона не мала зіткнень із іншими об'єктами, не нагрівалась Сонцем – вона провела останні 4,5 млрд. років при температурі близькій до абсолютного нуля.**

Незвичним є те, що *Седна* має темно-червоний колір і поступається ним тільки Марсу, але з періодом у 20-40 днів вона стає то більш яскравішою, то дещо тьмяною. Вважається, що поверхня *Седни* покрита світлими і темними плямами, а період її обертання навколо власної осі складає ці 20-40 днів, а таке **тривале обертання пояснюють наявністю великого гіпотетичного**



супутника, як у Плутона, який поступово за рахунок гравітаційної взаємодії і загальмував її обертання. Температура поверхні *Седни* опускається до -240°C, як і в самих холодних районах Плутона. Виявити супутник *Седни* сучасними засобами спостережень неможливо. У найближчі 72 роки *Седна* буде наближатися до Землі рухаючись по сузір'ю Кита, що дозволить краще вивчити цей незвичний об'єкт.

Рис. 2.330. Орбіта *Седни* відносно орбіт зовнішніх планет Сонячної системи (найбільшим колом показана орбіта Плутона) (рис. *NASA*)

Навіть планети-гіганти, за результатами комп'ютерного моделювання, не змогли би помістити *Седну* на орбіту, де вона зараз знаходиться. Нові розрахунки дають два можливих шляхи утворення та „паркування” цього загадкового об'єкту - Сонце утворилося в

щільній групі зірок-однолітків, які пізніше розлетілися. Якщо у перші 100 млн. років одна з таких зірок пройшла поблизу Сонця – Седна, як і ще один рекордно віддалений об'єкт пояса Койпера з дуже витягнутою орбітою – 2000 CR105 (астероїд Баффі) – могли потрапити на свої орбіти.

Крім того комп'ютерні моделі показують, що Седна також могла належати іншій зоряній системі – системі коричневого карлика, яка мільярди років тому пролітала поруч із Сонцем і під впливом його гравітації змінила свого хазяїна. Обчислення астрономів побічно підтверджують популярну ідею, що за нинішню дуже видовжену орбіту Седни відповідальним може бути розташований приблизно в 75а.о. від Сонця гіпотетичний масивний об'єкт.

Дослідження понад 20 подібних до Сонця зірок за допомогою орбітального телескопу Hubble показали, що у двох з них, які розташовані на віддалі біля 60 світлових років від Землі, були відкриті темні акреційні диски протопланетної речовини. За своєю будовою і місцем розташування у планетних системах ці диски нагадують пояс Койпера. Внутрішні межі цих дисків проходять на віддалі 30а.о., а зовнішні – 50а.о. від своїх зірок. У такому ж діапазоні розташований у Сонячній системі пояс Койпера. Саме існування таких областей із різкими обрисами границь може свідчити про те, що у цих зірок є супутники – інші зорі менших розмірів. Роботу аналогічного механізму, але у значно менших масштабах, демонструє Сатурн, границі знаменитих кілець якого обмежуються його супутниками-„пастухами”.

Можливо, це може означати, що у нашого Сонця є невидимий зараз із Землі супутник – невідомий ще науці космічний об'єкт (гіпотетична зоря-коричневий карлик - Немезида), який, скоріше за все, у 10 разів менший за Сонце, рухається дуже витягнутою (від 30 000 до 150 000а.о.) орбітою з періодом 26 млн. років, „обкреслює” зовнішню границю поясу Койпера та зумовлює дивні орбіти деяких планетоїдів у цьому поясі і викликає рух комет із Хмари Оорта у бік Сонця; періодично заходить у межі Сонячної системи, де викликає нестабільність у русі планет, комет і астероїдів та зміну їх орбіт, осей обертання і взаємні зіткнення.

У 2005р. астрономи підтвердили параметри відкритого ще в 2003р. на віддалі 14,5 млрд. км (97а.о.) від Сонця (утричі далше за Плутон) найбільш відомого у поясі Койпера небесного тіла - **карликової планети – плутоїда 136199 ЕРИДА** (неофіційна назва *Ксена* (2003 UB313).

Ерида обертається навколо Сонця за 557 років із середньою швидкістю 3,44км/сек власною дуже витягнутою орбітою - афелій 97,61а.о. (14,6млрд. км), перигелій 37,81а.о. (5,66млрд. км), яка нахилена під кутом 44° по відношенню до площини екліптики (рис.2.331). За уточненими в листопаді 2010р. даними, при транзитному проходженні Ериди по диску зорі, її діаметр сягає 2326±12км, вона складена гірськими породами та сумішшю твердих метану і азоту (з глибиною концентрація азотної криги зростає), а тому має сірий колір поверхні у видимому спектрі.

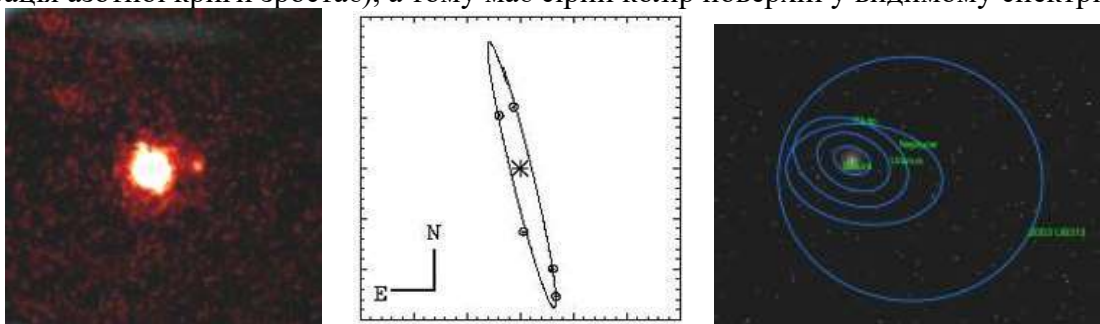


Рис. 2.331. Карликова планета-плутоїд Ерида та її супутник Дісмонія (фото W.M.Keck); орбіта Дісмонії навколо Ериди (у центрі) та орбіта Ериди (2003 UB313) на периферії Сонячної системи у поясі Койпера

Температура поверхні плутоїда коливається від -232°С(?) до -248°С(?). Спектр Ериди має лінії поглинання метану (CH₄), азоту (N₂), задушливого (CO) та вуглекислого (CO₂) газів. Через великий ексцентриситет орбіти на Ериді періодично відбуваються глобальні сезонні зміни - при наближенні до Сонця азотна (N₂ більш леткий), а пізніше - і метанова криги сублімують, і гази атмосфери штормовими глобальними вітрами переміщуються із освітленого боку Ериди на тіньовий, де кристалізуються кригою та снігом у зворотному порядку, а сама тонка газова атмосфера при віддаленні від Сонця знову повністю стає крижаним покривом плутоїда, що і

зумовлює яскраву та вічно молоду поверхню плутоїда. Проте виміри *телескопу Гершеля* (2005р.) свідчать, що на поверхні азоту більше ніж на глибині, ймовірно, через *кріовулканічні процеси* з виділенням із надр великих об'ємів газоподібного метану. Альbedo Ериди не менше 0,90 (*найяскравіша після Енцелада*), маса $1,67 \pm 0,02 \times 10^{22}$ кг (1,25 маси Плутона), густина понад $2,5 \text{ г/см}^3$. Навколо Ериди обертається коловою орбітою радіусом $37\,500 \pm 140 \text{ км}$ за 15,8 земних діб її супутник *Дісмонія* (неофіційна попередня назва *Габрієла*) діаметром 248 км.

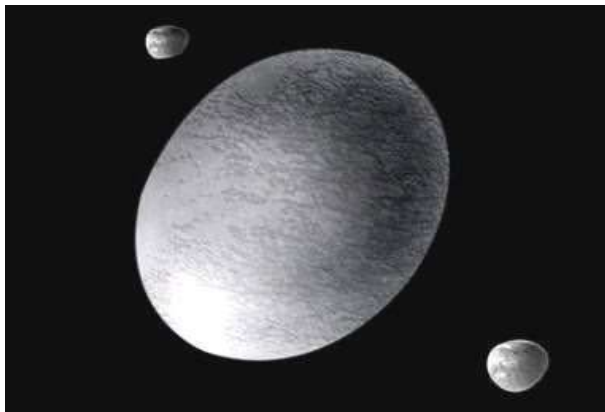


Рис. 2.332. Карликова планета-плутоїд **136108 ХАУМЕА** (неофіційна 2003 EL61 *Санта*, розмірами $1430 \times 1000 \text{ км}$ і густиною біля 3 г/см^3 , покрита H_2O -кригою, період обертання 4 год.) зі своїми супутниками *Хііака* (діаметр 350 км, період обертання 49,12 доби, радіус орбіти 49,5 тис. км) та *Намака* (діаметр $\leq 170 \text{ км}$, обертається орбітою радіусом 39,3 тис. км за 34,7 доби). Зараз додатково відкрито ще 5 менших супутників навколо Хаумеї (родина 2003 EL61) на близьких орбітах (рис. NASA)

Крім того, за даними космічного телескопу *Hubble*, ще один крупний представник поясу Койпера – планетоїд **1998 WW31** є *бінарним* - це два космічних об'єкти, що обертаються за дуже витягнутими еліптичними орбітами навколо їх загального центру мас – барицентру - за 570 днів, віддаль між об'єктами коливається у межах від 4 до 40 тисяч кілометрів, а один їх оберт навколо Сонця відбувається за 301 рік.

У поясі Койпера зараз відомо 8 подвійних об'єктів (бінарів) типу *Плутон-Харон*, а у **136108 Хаумеї** відкрито сім власних супутників, причому два супутники за своїми розмірами цілком порівнювані з центральним об'єктом (рис. 2.332).

Карликова планета-плутоїд **136472 МАКЕМАКЕ**, неофіційна *Істербанні* (2005 FY9) - третя за розмірами у поясі Койпера, сплюснений сфероїд з осями $1500 \pm 45 \text{ км}$ і $1430 \pm 9 \text{ км}$, період обертання 22,48 год., афелій орбіти – 52 а.о. (7,8 млрд. км), перигелій – 38,5 а.о. (5,76 млрд. км); густина $1,7 \pm 0,3 \text{ г/см}^3$, атмосфери і власних супутників немає. Червонуватого відтінку поверхня покрита замерзлим метаном. Альbedo 0,77, що більше ніж у Плутона, проте менше ніж у Ериди.

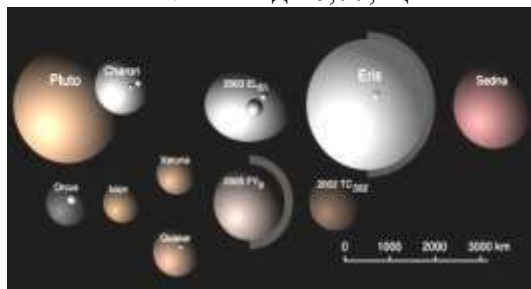


Рис. 2.333. Найбільші об'єкти поясу Койпера – карликові планети *Ерида*, *Плутон*, *Макемаке* і *Хаумеа*; об'єкт *Седна*; плутино *Орк*, *Іксіон* і *Хуїа* та кубівано *Кваоар*, *Варуна* і *Хаос* – зі своїми супутниками (ліворуч). Схеми будови надр *Титана*; супутників Юпітера *Європи*, *Ганімеда*, *Калісто*; супутників Урана *Титанії* і *Оберона*; супутника Нептуна *Тритона* і об'єктів поясу Койпера - *Ериди*, *Плутона*, *Седни*

За параметрами орбіт об'єкти поясу Койпера (на 26.05.2008р. їх 1077) діляться на класи:

1. класичні об'єкти або *кубівано* - від **1992 QB1** (*QB1* вимовляється «кю-бі-ван») - не знаходяться з Нептуном в орбітальному резонансі, а їх колові орбіти лежать в області 39,4-47,7 а.о. від Сонця і мають незначний кут нахилу до екліптики; **2. резонансні об'єкти** мають орбітальний резонанс з Нептуном 1:2, 2:3, 2:5 тощо. Об'єкти з резонансом 2:3 називають *плутино* („плутончики”) на честь Плутона – до них відноситься чимало об'єктів поясу Койпера. Великі півосі орбіт *плутино* близькі до 39,5 а.о., деякі *плутино* пересікають орбіту Нептуна, але ніколи не зближуються з ним (як і сам Плутон); **3. розсіяні (scattered) об'єкти**, („бродяги”), мають надто витягнуті орбіти ($e=0,5-0,9$) з великою піввіссю 60-100 а.о.; деякі з них віддаляються від Сонця в афелії на 100-200 а.о., а об'єкт **2000 CR105** - навіть на 1300 а.о.

За сучасними даними, у надрах усіх великих крижаних тіл Сонячної системи існують рідкі океани.

Планетезималі (зародки планет) - так ще називають ці міні-планети - є залишками того матеріалу, із якого утворилися крупні планети на ранній стадії існування Сонячної системи. За хімічним складом Плутон і Харон подібні до комет, але за розмірами дуже їх перевищують.

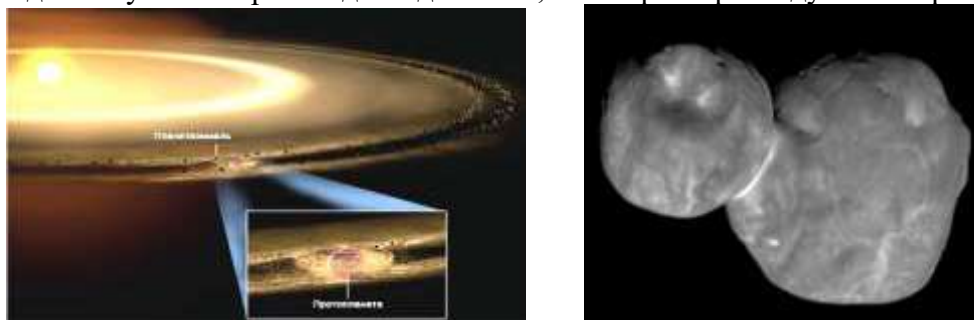


Рис. 2.334. Утворення планетезималей на ранній стадії формування Сонячної системи (за NASA, США).

Астероїд **2014 MU69 Arrokoth** ("небо") (неофіц. назва **Ultima Thule** ("Край світу")) у поясі Койпера (фото *New Horizons*, 2016)

Найбільшим з койперівських об'єктів – Плутона, Ериді, Кваоару, Седні – вдалося зберегти на поверхні вуглеводневі сполуки (метан, етан тощо) та воду в кристалічному стані, а з малих астероїдів вони звітрилися у космічний простір. Поверхневий матеріал більш мілких планетезималей, мабуть, також нагадує речовину планети.

Вивченням об'єктів поясу Койпера займається зонд *New Horizons*, який у 2015р. дослідив карликову планету Плутон та у 2016р. астероїд **2014 MU69 Arrokoth** (неофіц. назва **Ultima Thule** ("Край світу")) (рис. 2.334). У ході пошуків планети X – дев'ятої планети Сонячної системи, яка вносить аномалії в орбіти семи раніше відомих транснептунових об'єктів, астрономи відкрили рекордсмена по віддаленості від Сонця - об'єкт **2015 TG387 The Goblin** (Гоблін). Пізніше астрономи США відкрили новий об'єкт - найвіддаленіший (на віддалі 120а.о.) на даний час об'єкт Сонячної системи: **2018 VG18 Farout** (Далекий), який розміщений у три рази далі від Сонця, ніж Плутон. Йому необхідно біля 1000р. щоб зробити один оберт навколо Сонця. Астрономи визначили: колір *Далекого* як «слабко рожевий», форма його, можливо, сферична, а діаметр біля 500км.

2.2.11. ХМАРА ООРТА

Набагато далі цього поясу Койпера, на віддалі біля 1 світлового року від Сонця, розміщується **ХМАРА ООРТА**. За даними вчених, *Хмара Оорта у вигляді нечіткої сфери* (через гравітаційний вплив найближчих до Сонця зірок, а тому вплив Хмари з усіх боків на реліктове випромінювання неоднаковий) *із внутрішнім тором обгортає Сонячну систему* (рис.2.326, 2.335), *протягається до однієї п'ятої віддалі між Сонцем та найближчої до нас зоряної системи Альфа Центавра і складена переважно тілами із криги та гірських порід*.

Внутрішня границя сфери *Хмари Оорта* розташована на віддалі 20 000а.о. від Сонця, а зовнішня має середній радіус до 200 000а.о., проте не має чіткої межі через періодичний гравітаційний вплив на неї гігантських міжзоряних хмар газу та пилу, галактичного диску та зближення випадкових зірок. У цьому величезному кометному утворенні, за думкою вчених, розташовані близько 2 трильйонів мілких крижаних тіл, які рухаються зі швидкостями біля 1см/сек, але крупних планет там немає (?). Ця незліченна кількість об'єктів *Хмари Оорта* (вона ділиться на *зовнішню* та *внутрішню* *Хмари*) ніколи не покидала її межі, залишилась там з часів утворення Сонячної системи і знаходиться під впливом гравітаційного поля Сонця та служить джерелом комет із тривалим періодом обертання. За сучасними даними, маса *Хмари Оорта*



невелика – приблизно 10% маси Землі і вона приходить на сто мільярдів тіл. Звідси легко визначити масу „типового” об'єкта *Хмари Оорта* – близько ста мільярдів тонн, хоча існують як „карлики” (масою до мільярда тонн), так і „гіганти” (до ста тисяч мільярдів тонн!).

Рис. 2.335. Зовнішні області Сонячної системи – тор поясу Койпера та сфера *Хмари Оорта* (рис. NASA).

Але всі тіла Хмари Оорта рухаються у Сонячній системі еліптичними орбітами у повній відповідності до законів механіки та теорії гравітації. Ці ж закони передбачають, що орбіти цих об'єктів є стійкими, тобто, подібно планетам ці тіла виконують свій кругообіг на периферії Сонячної системи у межах *Хмари Оорта*. Коли ці окремі тіла під дією галактичних сил направляються за курсом, який веде в нашу частину Сонячної системи, вони стають *кометами*.

2.3. КОМЕТИ

КОМЕТИ - найбільш віддалені від Сонця тіла Сонячної системи, які обертаються за дуже видовженими еліптичними орбітами, довжина яких у тисячі разів перевищують розміри Сонячної системи.



Рис. 2.336. Комети Уеста (1994р., ліворуч), Хіакутаке (1996р.) та МакНота (2007р., праворуч)

Площини орбіт комет не співпадають, тому із великої кількості комет Сонячної системи спостерігаються лише ті, які наближуються до Сонця. Деякі з комет попадають у поле тяжіння планет-гігантів і стають їх супутниками.

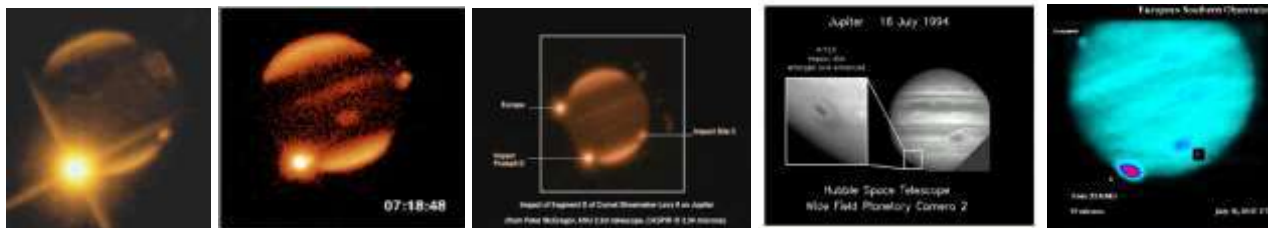


Рис. 2.337. Спалахи (фото 1-3), збурення (4) та штучні полярні сйва (5) в атмосфері Юпітера від падіння фрагментів комети Шумейкерів-Леві на планету (фото *Galileo*, регістограма обсерваторії Київського національного університету; *ANU* телескопа *CASPIR*; *Hubble* та *ESO*)

Наприклад, комета **Шумейкерів-Леві 9** була захоплена Юпітером. У 1922р. вона дуже близько підійшла до Юпітера і сили гравітації планети зруйнували її на понад 20 окремих уламків, які продовжували рухатися своїми орбітами, а розірвана комета нагадувала низку перлів. У кінці липня 1994р. всі ці фрагменти один за одним врізалися прямо в Юпітер і астрономи вперше спостерігали фантастичні ефекти в його атмосфері при зіткненні численних фрагментів комети з планетою. Збурення у хмарному покриві атмосфери величезного Юпітера, зумовлені падінням уламків ядра комети на неосвітленому та невидимому з Землі боці планети, були зафіксовані *Galileo* і спостерігалися ще багато місяців (див. с.129).

Комети складені речовиною, яка залишилася після утворення Сонячної системи і є найстарішими об'єктами Сонячної системи тому, що з моменту її утворення речовина комет була піддана мінімальним змінам. Мільярди років комети провели в глибинах космічного простору піддаючись впливу космічних променів і радіації, які виникають при вибухах наднових зірок, а також при взаємодії речовини з релятивістськими об'єктами Галактики (нейтронними зорями і чорними дірками), причому цього впливу вони почали зазнавати ще до початку термоядерних реакцій у надрах майбутнього Сонця. Крім того необхідно враховувати мікроскопічні домішки радіоактивних елементів, при розпаді яких утворюються частинки, що викликають зміни в речовині ядра комети – розпад молекул під дією високо енергетичних випромінювань (так званий радіоліз).

Останні дані свідчать, що ядра комет складені із суміші різних видів надзвичайно пухкої мілкої зернистої **криги** – замерзлих води, метану, аміаку і вуглекислого і задушливого газу, в якій знаходяться уламки **металів**, **мілких кам'яних брил**, **піску** і **тонкого пилу** (силікатного і карбонатного) тощо. Весь цей матеріал входив до складу міжзоряної газово-пилової туманності, із якої утворилася Сонячна система. Під дією **радіолізу** основний компонент кометної речовини – **водяна крига** – розкладається на **водень** (звітряється у космічний простір) і **радикал гідроксилу**, який залишається і вступає у подальшу реакцію з утворенням **перекису водню**, **озону** і власне **кисню**, який в умовах космічного холоду тисячоліттями зберігається у замерзлому стані. Другий важливий компонент комет – **метан** – при радіолізі також втрачає водень і перетворюється у високоактивний **радикал карбену** (CH_2), який полімеризується у більш складні **вуглеводні**. Схожі процеси зумовлюють утворення **гідразину** з аміаку. Темна зовнішня кірка вміщує набагато менше летких матеріалів, ніж внутрішні області ядра комети.

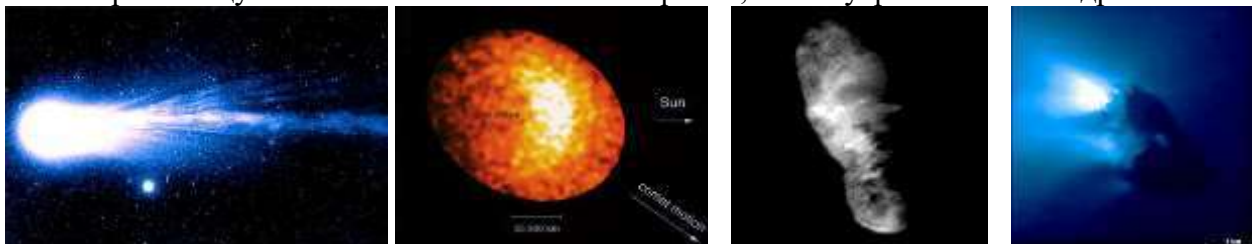


Рис. 2.338. Ліворуч: комета *Хіакутаке* та її ядро в рентгенівських променях (фото *ROSAT*, ФРГ). Нерівномірно-контрастне забарвлення ядра комети *Боррелі* (довжина до 8км) без кратерів (фото *Deer Space1*). Праворуч: крижане ядро комети *Галлея* (розміри $14 \times 7,5 \times 7,5$ км, об'єм 500 км^3 , густина $0,2 \text{ г/см}^3$, маса 10×10^9 т, альbedo 0,04, один оберт за 7,1 доби із 3,7-добовою прецесією, температура сонячного боку до 350 К) із струменями фонтануючих газів (їх склад: 80% пари H_2O , 10% CO , 3% CO_2 , 2% CH_4 , 1,5% NH_3 тощо; третина за масою викидів – пил, мілкі тверді частинки малої густини з великою кількістю органіки типу бензину, толуолу, пурину, етанолу тощо) (фото *Giotto*)

Отримані космічним апаратом *Rosetta* дані досліджень комети сім'ї *Юнітера 9P/Tempel-1*, після зіткнення її із зондом *Deer Impact*, свідчать, що комети являють собою замерзлі скупчення гязі, а не брили забрудненого льоду, як уявлялося раніше. Особливо цінна інформація була отримана за допомогою орбітального інфрачервоного телескопа *Spitzer*, який відмітив після цього зіткнення появу в атмосфері комети слідів хімічних з'єднань, що раніше не спостерігалися у спектрах комет – крім уже відомих силікатів були відкриті мінерали, що схожі за складом на крейду та глину і які на Землі формуються тільки у водних умовах (не слід виключати можливість існування „безводних” механізмів утворення глинистих та карбонатних відкладів, що зараз не відомі мінералогам). У складі викинутого матеріалу також відкрили частинки оксидів заліза (іржі); ланцюжки ароматичних вуглеводнів, молекули яких замкнуті в одне або кілька кілець тощо. Для пояснення такого складного складу комет необхідно допустити, що речовина ранньої Сонячної системи перемішувалася значно активніше, через що у складі комети появилися компоненти, які характерні для різних відстаней від Сонця. За співвідношенням летких складових (газів - метану і етану) та водяної пари вдалося визначити, що формування основної маси кометної речовини відбулося між орбітами Урана і Нептуна. Це побічно підтверджує гіпотезу про те, що ці дві планети раніше були розташовані ближче до Сонця, але пізніше, під впливом *Юнітера* і *Сатурна*, були викинуті на свої сучасні орбіти і при цьому попутно „розкидали” у просторі численні комети, які до цього займали їх місце. Результатом цього процесу стало формування *Хмари Оорта*, що оточує Сонячну систему.

Початкова модель будови кометного ядра – відносно однорідне ядро, яке оточене прогрітою Сонцем та підданою космічній радіації корою – після вивчення комети *9P/Tempel-1* зараз конкурує з „багатоядерною” моделлю - під корою комети розташовано багато маленьких комет, які злиплися в одну велику брилу, причому кожна така міні-комета має власний внутрішній склад і в умовах космічного холоду майже не обмінюється речовиною з сусідами. Забруднена H_2O -крига ядра *9P/Tempel-1* спокійно сублімує з поверхні під дією Сонця.

Коли комети направляються в бік Сонця, в них відбуваються зміни. З того моменту, коли комета досягає орбіти Юпітера, під дією сонячних променів і нагрівання крижаних брил її поверхня починає танути і випаровуватися, а навколо комети збирається газ і поступово утворюється велика **газова хмара-кома**, яка під дією сонячних променів перетвориться у **хвіст** із **газово-пилових виділень**, який під впливом сонячного вітру завжди буде направлений в протилежний від Сонця бік. Якщо розміри ядра комети можуть досягати декількох кілометрів у поперечнику, то довжина хвоста сягає понад 100млн. км.

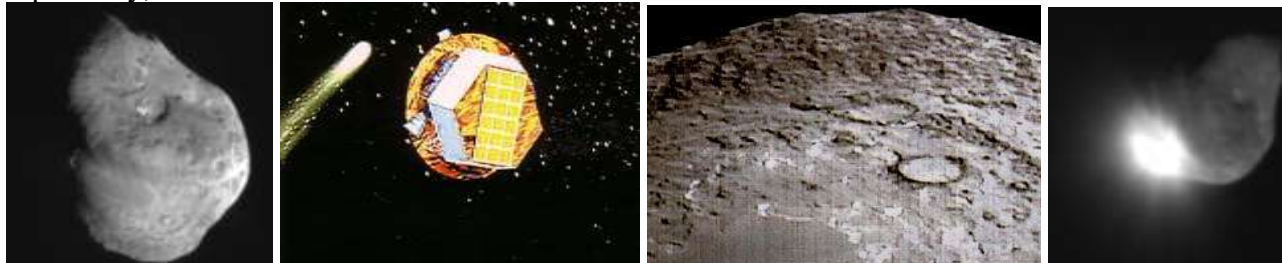


Рис. 2.339. Зліва праворуч: ядро комети *Темпель 1* (розміри $7,6 \times 4,9$ км, густина $0,6 \text{ г/см}^3$, маса $7,2 \times 10^{13} \text{ т}$); відокремлений від *Deep Impact* зонд-пенетратор (ударник) летить до ядра комети; ядро комети *Темпель 1* крупним планом (фото із зонда-пенетратора *Deep Impact* за 90сек. до зіткнення); викиди речовини ядра від зіткнення мідної болванки (маса 380кг) з ядром комети на швидкості 10км/сек. (фото *Deep Impact*)

По мірі танення на поверхні комети утворюється темна кірка з пилу. Як правило, це дуже нерівний шар і тому газ, який продовжує утворюватися в середині комети, починає струменями викидається за межі комети. Ці реактивні струмені газу та пилу, які вириваються із комети на її шляху в бік Сонця, можуть навіть дещо змінити її орбіту.



Рис. 2.340. Зліва праворуч: схема орбіти і ядро комети *Галлея* (дані *ВЕГА-1,-2*); подібне до гантелі ядро комети *Хартлі-2* (довжина до 2км, діаметр ядра вузької частини біля 400м) із струменями – джетами – забрудненого пилом і сніжинками CO_2 -газу, які вириваються через розломи шерехатої поверхні кінців ядра з-під H_2O -криги і виносять дрібні її уламки, а тонкий гранульований матеріал, що після розподілу по ядру комети зосередився в топографічній низовині, сублимує тільки воду (фото *EPOXI-Deep Impact*).

Проліт космічних апаратів серії *Vega* і європейського зонду *Giotto* поблизу ядра комети *Галлея* показали, як невеликі, майже крапкові ділянки пористої поверхні ядра комети генерували потужні високошвидкісні струмені газу, а температура поверхні досягала 130°C . Уже майже беззаперечно прийняту **модель ядра комети як „літаючої снігової кучугури”** замінили на **концепцію „гарячої березневої снігової кучугури”**, що зовні покрита пористою кіркою з гязі, яка накопичується на поверхні ядра комети по мірі випаровування.

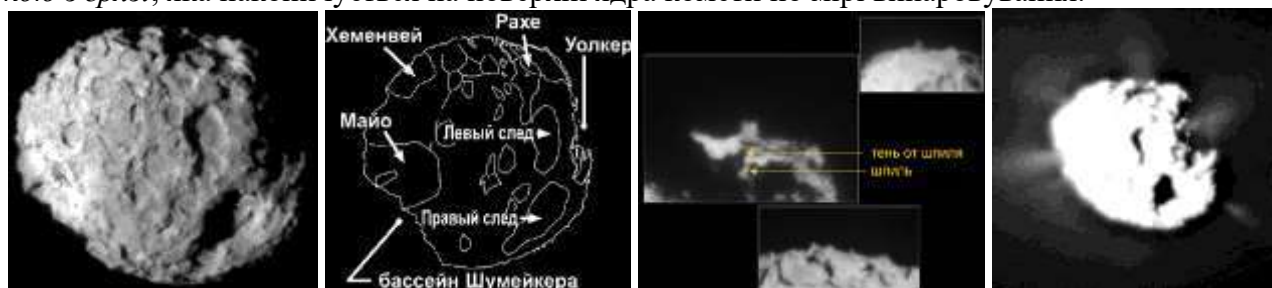


Рис. 2.341. Зліва праворуч: ядро комети *Wild-2* (5км упоперек) з елементами його чіткого рельєфу: кратерами, ямами, гострими високими піками та декількома десятками струменів газу та пилу, при пересіченні трьох з яких зонд *Stardust* отримав 12 пробіоїв від твердих частинок, деякі з яких перевищували розмір кулі (фото зонда *Stardust*)

Зроблені космічним зондом *Stardust* фотографії комети *Wild-2* з відстані 230км показали різноманітність ландшафту її твердої поверхні (піки висотою до 100м, западини, тільки крупні метеоритні кратери із округленим і оточеними уламками ямами у їх центрі, западини із практично вертикальними стінками та плоским дном незрозумілого походження) при відсутності уламків, пилу тощо. Реактивні газові струмені із надр комети вистрілювали газ та пил на значно більші відстані, ніж очікувалося.

Досліджені раніше з близької відстані дві комети мали відносно гладку поверхню і мали значно менше кратерів. Вважається, що комети виникли дуже давно на холодній околиці Сонячної системи. Вони складаються з матеріалу, що утворився при низьких температурах і не піддався температурним змінам всередині Сонячної системи, де 5-4,5 млрд. років тому з хмари гарячого газу виникли Сонце і планети. Дослідження після завершення експедиції *NASA Stardust* доставлених на Землю крихтих частинок комети *Wild-2* на 90% підтверджують ці припущення.

Співвідношення деяких ізотопів у речовині комети дає підстави вважати, що тільки близько десяти її відсотків сформувалося в гарячих зонах Сонячної туманності й потім перемістилося на холодні окраїни. Там і мала з'явитися комета приблизно тоді ж, коли й Сонце. Проте ізотопні виміри водню й азоту, проведені на факультеті земного магнетизму (Carnegie, DTM) дають іншу картину. Надлишкова кількість важких ізотопів – дейтерію і азоту-15 – незвичайна і вказує на існування частини кометного пилу ще до утворення Сонця.

Структура органічних молекул комети *Wild-2* не схожа на органіку інших неземних джерел (метеоритів чи міжзоряних частинок пилу). У ній дуже мало стабільних ароматичних вуглецевих структур, зате наявні крихкі вуглецеві структури (схожі на просту сажу), котрі навряд чи витримали складні умови в Сонячній туманності. У цих молекулах значно більше кисню і азоту, ніж у найдавніших метеоритах. Вуглецева складова комети змішана зі складнішими сполуками.

Доки комети рухаються по орбіті, від них відколюються і більш крупні уламки криги, частинки кам'яних брил та уламки металів. Ці тверді тіла утворюють **метеорні потоки**, зокрема з кометою Галлея пов'язані два **метеорні потоки** (*Ета-Аквариди* і *Оріоніди*). Після того, як комета обгинає Сонце і починає віддалятися від нього, вона поступово охолоджується, утворення газів зменшується, струмені виснажуються, хвіст комети скорочується і вона зникає з поля зору.

Зараз відомо близько 1000 комет. Багато з них обертається еліптичними, дуже витягнутими орбітами навколо Сонця (наприклад, *комета Галлея*, *комета Енке* тощо). Деякі з комет з'являються в Сонячній системі із областей, які лежать дуже далеко за її межами.

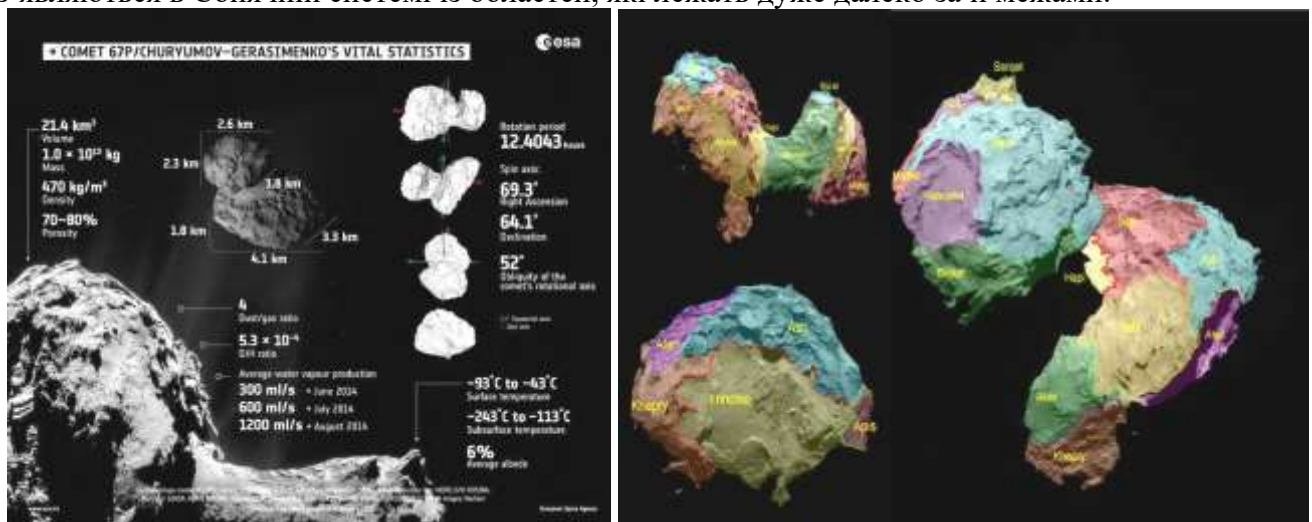


Рис. 2.341-1. Ліворуч: фотоколаж комети Чурюмова–Герасименко (фото модуля *Philae* і зонду *Rosetta*, ESA). Праворуч: 19 виділених регіонів комети із власними іменами на її 70% закартованій поверхні

Дані про комету Чурюмова–Герасименко: розміри великої півкулі 4,1×3,3×1,8км; малої – 2,6×2,3×1,8км; альbedo 0,07; загальний об'єм комети 21,4км³; маса 10млрд. тон; середня густина 0,47г/см³, що свідчить

про значну пористу структуру комети. Комета має досить рівні ділянки та складний рельєф (гори висотою до 900м, западини діаметром 300м і глибиною до 230м). Водяної криги на поверхні дуже мало, мабуть, основні її запаси зосереджені всередині ядра комети; ідентифіковані речовини: *ароматичні вуглеводні, карбонові кислоти і спирти*. При наближенні комети до Сонця навколо неї починає формуватися «атмосфера» (*кома*), а ультрафіолетове випромінювання та зіткнення із сонячним вітром іонізує деякі її молекули і розганяє їх до великих швидкостей. На досить близькій віддалі від Сонця кома стає настільки щільною та іонізованою, що стає електропровідною і чинить опір сонячному вітру – у комети виникає *магнітосфера*. Розлом довжиною 1,5км на перехилу комети може з часом спричинити її розпад на частини. Викиди речовини комети у простір зумовили появу на ній структур типу *дюн, шлейфів* позаду каміння, *ровів* навколо скель, *ям* (ширина 3м) із гострими краями та плоским дном (можливі місця викидів речовини комети). Вміст дейтерію у виділяючихся потоках водяної пари із ядра значно перевищує земні параметри – тобто, не підтверджується кометне походження води на Землі.

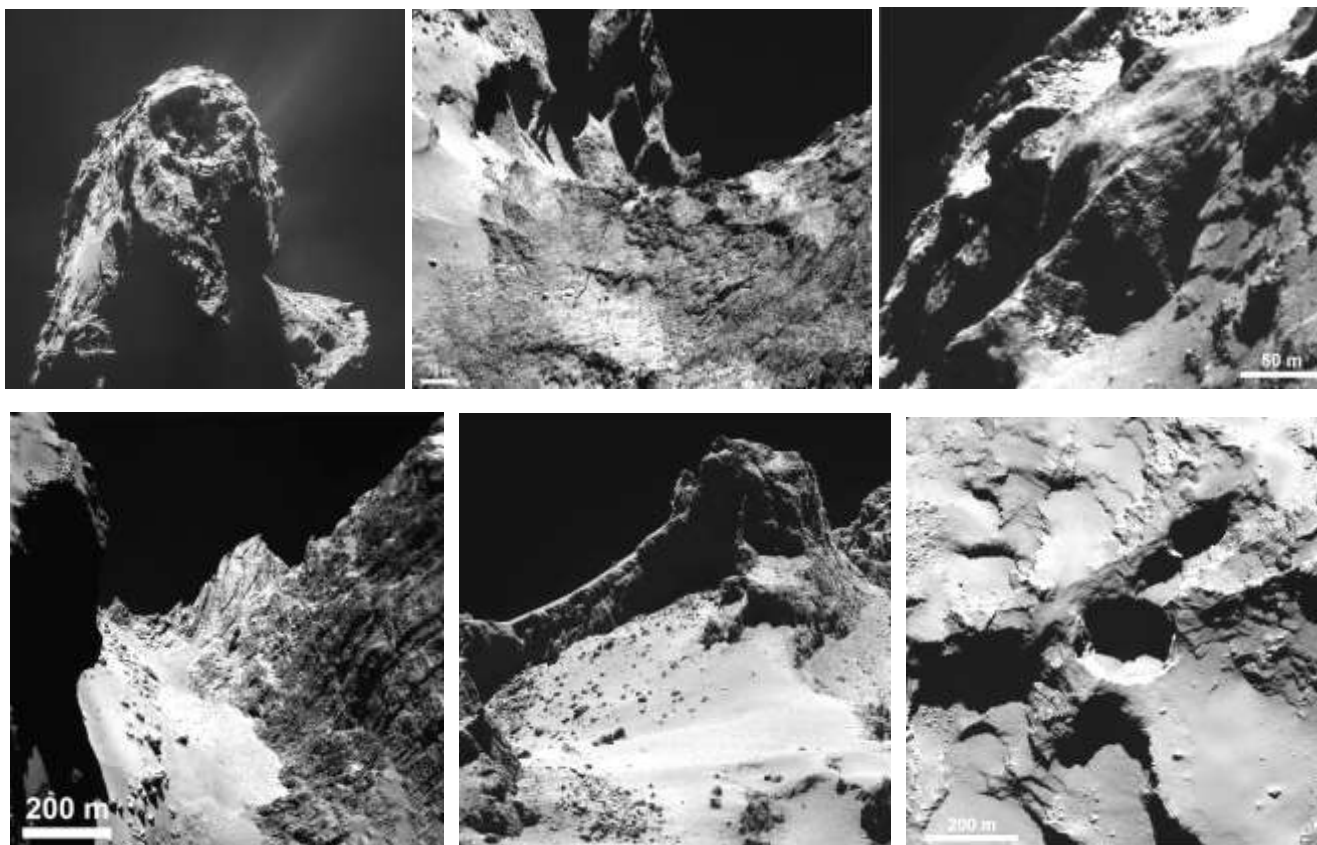


Рис.2.341-2. Фото поверхні комети Чурюмова–Герасименко (фото модуля *Philae*)

Допускають, що Сонце оточене кометною оболонкою (*Хмара Оорта*), яка простягається на четверть віддалі до найближчої зорі і яка фіксує зовнішню границю Сонячної системи. Інші вчені стверджують, що джерелом комет є розташований значно ближче *пояс Койпера*. Коли відкривають нові комети, то можна стверджувати, що їм довелось пересікти віддалі не менше 50 000а.о. (близько 7,5 млн. млн. км), щоб досягти центральної частини Сонячної системи. Комети направляються до Сонячної системи з цих областей по мірі руху Сонячної системи власною орбітою в межах нашої Галактики. Дія гравітаційних сил Галактики змушує комети цілими згустками покидати кометну хмару і падати в бік Сонця. Кометна хмара вміщує приблизно 100 млрд. комет.

Крім астероїдів у космічному просторі знаходиться величезна кількість уламків різного розміру, космічних брил та пилу, які являють собою зразки первинного матеріалу Сонячної системи і які з моменту свого утворення практично не змінилися, а їх хімічний склад подібний до хімічного складу Сонячної системи. Крім цього залишкового матеріалу, який утворився при формуванні планет, деяка його частина має відносно недавнє походження, як, наприклад, залишені кометами пилові хвости. Для визначення цього матеріалу використовують терміни: *метеороїд, метеор і метеорит*.

2.4. МЕТЕОРОЇДИ

МЕТЕОРОЇДИ - порівняно невеликі брили металічного чи кам'яного матеріалу, що літають у космосі чи проникають в атмосферу Землі. Більшість метеороїдів, можливо, є фрагментами астероїдів, які відкололися після зіткнень з іншими небесними тілами.

2.5. МЕТЕОРИ

Виконуючи свою щорічну подорож навколо Сонця, Земля отримує на своєму шляху близько 1000т космічного матеріалу. Значна частина цього матеріалу обертається у межах Сонячної системи у вигляді потоків, які утворюються після проходження комет через Сонячну систему, що залишають після себе хвіст кам'яного сміття. Коли Земля проходить через цей хвіст, на небі утворюються метеорні дощі.



Рис. 2.342. Метеорний дощ у Ленінграді 06.10.1933р. (ліворуч). Болід Леонід над штатом Канзас, США 25.11.1998р. Руйнування невеликих космічних тіл у земній атмосфері (праворуч)

Метеороїди і частинки пилу, що потрапляють в атмосферу і розжарюються через тертя з повітрям, починають зоріти власним світлом; ці сліди розжареного газу деякий час видно у вигляді яскравих смуг на тлі темного неба і їх називають **метеорами**.

Назви важливих метеорних дощів	Коли бувають видимі	Максимальна активність
Квадрантиди	01 - 05 січня	03 січня
Ета-Аквариди	19 квітня – 05 травня	03 травня
Дельта-Аквариди	08 липня – 19 серпня	28 липня
Персеїди	17 липня – 24 серпня	12 серпня
Оріоніди	02 жовтня – 07 листопада	21 жовтня
Гемініди	07 грудня – 17 грудня	14 грудня

Більшість метеорів починають світитися на висотах 80-100км від земної поверхні, а утворені ними яскраві сліди немов би виходять з одної точки неба. Появу метеорних дощів можливо досить точно передбачити, так як Земля щорічно пересікає метеорні потоки приблизно в один і той же час. Зрідка бувають виключні метеорні дощі, коли спалахують десятки і навіть сотні метеорів за хвилину, але типовий дощ – це близько 50 метеорів за хвилину. Найбільш стабільний і надійний з них – **Персеїди**. Активність *Персеїд* максимальна за 10 до 14 серпня, коли можна бачити до 75 метеорів за хвилину.

Більшість метеороїдів повністю згорають в атмосфері не досягнувши поверхні Землі, але деякі, витримавши високу температуру, падають на земну поверхню – вони називаються **метеоритами**.

2.6. МЕТЕОРИТИ

Метеорити відносяться до найбільш вивчених космічних тіл. За даними радіоактивних методів визначення абсолютного віку вік метеоритів сягає 4,5-4,6млрд. років, тобто він відповідає віку Землі та Місяця і свідчить про те, що метеорити є свідками виникнення планет Сонячної системи, являють собою зразки первинного матеріалу ранньої стадії Сонячної системи і є дуже цінним матеріалом для вчених. Речовина метеоритів практично не змінилася з

моменту їх утворення (за винятком розігрівання під час короткого падіння через атмосферу), перебуваючи в умовах космічного вакууму. В своїй структурі, мінеральному і хімічному складу вона вміщує інформацію про ті події, які відбувалися під час формування Сонячної системи. Що ж стосується місця певних подій, інформацію про які зберігають метеорити, то воно розташоване між орбітами Марса і Юпітера. Там рухаються за навколосонячними орбітами астероїди – відносно невеликі небесні тіла неправильної форми, кількість яких визначається тисячами, але за сумарною своєю масою вони складають близько 1/700 долі від маси Землі. Під час взаємних зіткнень астероїди ламаються на уламки, які розлітаються в різні боки. Якщо деякі з них зустрічають на своєму шляху нашу планету, то вони випадають на її поверхню у вигляді метеоритів, а найбільші з них утворюють ударні кратери (рис.2.348).



Рис. 2.343. Кам'яний хондрит, залізний метеорит та залізо-кам'яний метеорит (зліва праворуч). Праворуч: правильна конусоподібна орієнтована форма метеориту Каракол (2,7кг) та його чудова кора плавлення з характерними заглибинами на поверхні – *регмагілітами*. Такі форми утворюються у результаті атмосферної обробки метеорного тіла під час його руху в атмосфері

Усі метеорити складаються із *металів* (заліза та нікелю), *силікатів* і *сульфідів*. Існує три головних типи метеоритів: **залізні** (10%) – складаються із нікелістого заліза з незначними домішками вуглецю, сірки і фосфору та мають дивну структуру, яка представлена чотирма система паралельних камаситових пластинок із низьким вмістом нікелю та з прошарками теніта; **залізо-кам'яні** (5%) – складені із силікатів та металу, заліза від третини до половини об'єму, мають унікальну структуру - являють собою або металеву, або силікатну губку і **кам'яні** (85%) – із силікатів з можливою наявністю нікелістого заліза, які, в свою чергу, також поділяються на групи.

Найбільш численна з них – *хондрити*. Цей термін пов'язаний не з їх хімічним складом, а з фізичною структурою речовини. Хондрити складаються із *хондр* - кульок діаметром 0,1-2мм (грец. “*хондрос*” - крупа, зерно), які зцементовані мілкою зернистою масою того ж складу. Хімічний аналіз вуглистих хондритів засвідчив, що тільки в них такий же елементарний склад, як і у Сонця, але воно має набагато більше легких газів, тобто астероїди, уламками яких є хондрити, утворилися з тієї ж речовини (яка тільки втратила гази), що і наше Сонце. Більшість дослідників вважає, що хондрити раніше були краплинами сонячної речовини, яка викристалізувалася при охолодженні; інші вважають, що хондри утворилися як тверді частинки, а потім розплавився під впливом потужного нагрівання, щоб охолотитися і в різній мірі кристалізуватися.

Логічно допустити, якщо в пору виникнення Сонячної системи речовина неодноразово плавилася і охолоджувалася, то, мабуть, могли б розплавлялися і уже сформовані крупні астероїди. Утворений розплав намагався б поділитися на металічну та силікатну складові частини. Метал, як більш важка речовина, концентрувався б у центральній зоні, а кам'яна маса утворила б навколо нього сферичну оболонку. При зіткненнях у космосі із аналогічними тілами, астероїд утворював би метеорити різного складу: *залізні* – це уламки залізного ядра переплавленого астероїду; *кам'яні метеорити*, які не мають хондр (*ахондрити*) – уламки його оболонки; *залізо-кам'яні* – фрагменти проміжних шарів між ядром та поверхневою оболонкою.

При порівнянні хімічного складу різних метеоритів виявилася ще одна характерна риса – різна ступінь окиснення метеоритного матеріалу. За даними спостережень, оптичні характеристики астероїдів помітно змінюється по мірі їх віддалення від Сонця. Найбільш віддалені від нього астероїди подібні до метеоритів, у складі яких багато окисненого заліза. Чим

ближче до Сонця, тим більша схожість спостерігається між астероїдами і метеоритами, залізо в яких окислене слабо. Тобто, *при формуванні планет Сонячної системи із газово-пилової хмари, процес окислення заліза знаходився в прямій залежності від його віддаленості від Сонця.*

Деякі метеорити бувають дуже великими і важкими. Метеорити, які були знайдені в Гренландії, Мексиці та США, важили 15 тонн і більше, а у Намібії (Африка) знайшли метеорит вагою понад 60 тонн (рис.2.344). Крупні метеорити залишають на поверхні Землі значні кратери (рис.2.345, 2.348).



Рис. 2.344. Ліворуч: залізний метеорит на поверхні Марса – перший знайдений марсоходом *Opportunity* метеорит на поверхні іншої планети. У центрі: залізний метеорит *Ahnighito* («Палатка») – 34-тонний фрагмент метеорита, який упав на півострів Йорк на північному заході Гренландії (Природничий музей Нью-Йорка, США). Праворуч: найбільший метеорит *Гоба* (розміри 1×3×3м, маса 60 тонн, склад метеорита: *Fe*-82%, *Ni*-16%, *Co*-1%, решта-1%) був знайдений у Намібії в 1920р.

Аналіз знайдених на Землі метеоритів свідчить, що **кам'яні метеорити складають 92,8% (хондритів 85,7%, ахондритів 7,1%), залізо-кам'яні – 1,5%, а залізні метеорити представлені 5,7% від загальної кількості.**



Рис. 2.345. Місця розташування відомих ударних кратерів на поверхні Землі (ліворуч); метеоритний кратер *Баррінджера* діаметром 1200м і глибиною 175м (штат Аризона, США) від падіння метеориту діаметром біля 50м і масою близько 50 000 тонн приблизно 50тисяч років тому (у центрі); повалена сибірська тайга у районі Тунгуської катастрофи 1908 року (праворуч)

Серед знайдених в Антарктиді метеоритів, зустрічаються екземпляри, які ідентичні доставленим з Місяця зразкам порід (рис.2.347). Вчені вважають, що вони були викинуті із поверхні Місяця ударом астероїда близько 100 000 років тому. Невелика кількість ще більш рідких метеоритів, за всіма даними, прибула до нас з Марса. Їх вік від 4,5 до 1,3млрд. років, а у космічний простір вони були викинуті



Рис.2.346. Насичений іридієм прошарок (межа поділу відкладів мезозойської та кайнозойської ератем) у відкладах штату Колорадо (США), який утворився 65 млн. років тому, коли гігантський метеорит упав у море поблизу півострова Юкатан (кратер *Чиксулуб* - рис. 2.348) і викликав гігантське цунамі та викинув в атмосферу мільйони тонн пилу, що зумовило тривале похолодання і кінець ери динозаврів

Геологи виділили краплину води із марсіанського метеориту, а палеонтологи знайшли в метеориті *ALH 84001* та в деяких інших аналогічних метеоритах скам'янілі рештки, що дуже схожі на мікроорганізми та найпростіші гриби, які можуть легко переносити космічний холод. У метеориті *EETA 79001*, що також знайдений у кризі Антарктиди і являє собою вулканічний базальт віком 180 млн. років та який аналогічний земним базальтам, були знайдені пухирі з невеликою кількістю газу, який є хімічно ідентичним марсіанській атмосфері.

За хімічним складом й ізотопними співвідношеннями марсіанські метеорити розділяються на дві більші групи (типи) - **шерготити** і **нахліти**, які були названі за населеними пунктами Нахла (Єгипет) і Шергати (Індія), де вони вперше були виявлені.

До **шерготитів** відносяться метеорити, які являють собою первинно інтрузивні (лерцолітові, перидотитові) і ефузивні (пікритові, базальтові) породи з високим змістом панідіоморфного *олівіну*. Шерготити часто вміщують епігенетичні мінерали (*плагіоклазове скло*) і вторинні структури потужного динамічного стресу, що вказують на те, що зразок був вибитий і деформований у результаті потужної імпактної події.

Нахліти являють собою середньо- й крупнокристалічні продукти більше глибокої диференціації речовини, їхній мінеральний склад істотно різноманітніший: основними мінералами є *клинопіроксени*, а у якості акцесорних присутні *олівін* та *титаномagnetит*. Основний *плагіоклаз*, як правило, має радіальні голчасті структури. Епігенетичні стресові імпактні сліди в мінералах нахлитів, на відміну від шерготитів, досить рідкі.

Марсіанське походження ряду метеоритів уже давно не викликає сумнівів і встановлено за подібністю газового складу включень та сучасної атмосфери планети, дослідженої космічними апаратами, а також іншими непрямыми ознаками. Зараз отримані дані досліджень марсоходів підтвердили, що породи багатьох марсіанських метеоритів дійсно широко поширені на поверхні Марса.

У 2000р. в Антарктиді, в горах Ямато, на поверхні льодовикового покриву японською експедицією був виявлений черговий рідкий метеорит марсіанського походження. Маса **метеорита Ямато** (*Yamato 593*) була винятково велика (13,7кг) для метеоритів подібного типу. Близько 60% поверхні метеорита було покрито чорною вивітрілою кіркою. Внутрішня частина метеорита мала смарагдово-зелений колір і складалася в основному (рис.2.347) з великих витягнутих кристалів *авгіту* (1-0,5мм) з інтенсивно розвиненими полісинтетичними двійниками. У якості акцесорних мінералів присутні високозалізистий *олівін* - *фаяліт*, основний *плагіоклаз*, незначна домішка аломорфних *титаномagnetиту*, *окислів* і *силікатів*. Хімічний склад знайденого метеориту відповідав групі *нахліта*.

Ізотопні дані різних частин метеориту виявилися досить неоднакові. Найдавніший вік, 4,6млрд. років, установлений для внутрішньої незміненої частини, яка у петрографічному відношенні відповідає гіпабісальній марсіанській магматичній породі - *нахліту*. Інші ділянки метеориту носять сліди інтенсивної довгострокової переробки за участю окисної атмосфери, кругообігу води і карбонатів. Крім того, деякі карбонатні структури мають велику подібність із фосилізованими колоніями ціанобактерій і продуктів їх життєдіяльності. Вік таких змінених ділянок метеориту із включеннями органічної речовини, карбонатних і фосфатних мінералів телетермального походження датується інтервалом 4,5-3,6млрд років тому. Поверхневі шари метеориту несуть сліди найпотужнішого динамічного стресу, плавлення й за структурою відповідають *шерготиту*. Однак вік цих ділянок становить усього 16млн. років. Таких молодих порід неземного походження на Землі поки ще не відомо. Нарешті, мінімальний вік має поверхнева оплавлена скловидна кірка, що утворилася при проходженні метеорита через земну атмосферу близько 13тис. років тому.

У **метеориті Кайдун** (Південний Ємен, 1980р.), який, на думку вчених, є частинкою одного із супутників Марса – Фобоса, виявлено біля 60 різновидів мінералів, у тому числі таких, які раніше ніде не зустрічалися - ні в метеоритах, ні на Землі. У 1999р. Міжнародна мінералогічна асоціація зареєструвала мінерал *флоренскіт* (FeTiP), а у 2006р. – *андрійівановіт* (FeCrP).

В озері Тагиш (Канада, 2000р.) знайдено **метеорит Тагиш** (рис.2.347), більша частина якого, за даними абсолютної геохронології, сформувалася приблизно 4,5млрд. років тому, тобто

тоді, коли формувалися планети Сонячної системи. Метеорит досить крихкий за структурою і має найменшу густину серед усіх раніше знайдених метеоритів. Матеріал метеориту, ймовірно, є аналогом тих частинок, із яких утворилася Сонячна система, а основна частина метеориту сформована із матеріалу, що і об'єкти в астероїдному поясі Койпера на краю Сонячної системи.



Рис. 2.347. Ліворуч: метеорит із органічними з'єднаннями, вік яких перевищує вік Сонячної системи, в кризі озера Тагши (Канада). У центрі: загадковий марсіанський метеорит *Ямато* (полірований зріз, $\times 2$), порода якого "вирвана" з кори Марса в результаті потужної імпактної події біля 16млн. років тому. Близько 13тис. років тому метеорит успішно приземлився в районі островів Канадського Арктичного архіпелагу (фото NASA). Праворуч: кам'яний метеорит *ALH 81005* розміром 3см, який знайдений біля горбів Аллан-Хіллс в Антарктиді (1981р.) і прилетів з Місяця

У цьому метеориті знаходяться *органічні глобулини* (один з видів білків), які старші за метеорит приблизно на 400млн. років і перевищують вік Сонця (!). Ці глобулини розміщені у багатих на вуглець гранулах, а в уламку метеорита розміром 1см^3 вміщуються мільярди таких вуглецевих гранул. За даними фахівців NASA, органічні матеріали в метеориті могли виникнути в результаті ізотопних аномалій в умовах близьких до абсолютного нуля (-273^0C). У Сонячній системі та поблизу неї немає жодного космічного тіла з такою низькою температурою. Очевидно, що дані органічні з'єднання утворилися не в метеориті, а були сформовані на іншому космічному тілі і вони мають більш далеке та більш давнє походження.

Ця знахідка – ще один аргумент на користь гіпотези про космічне походження органічного життя на Землі.

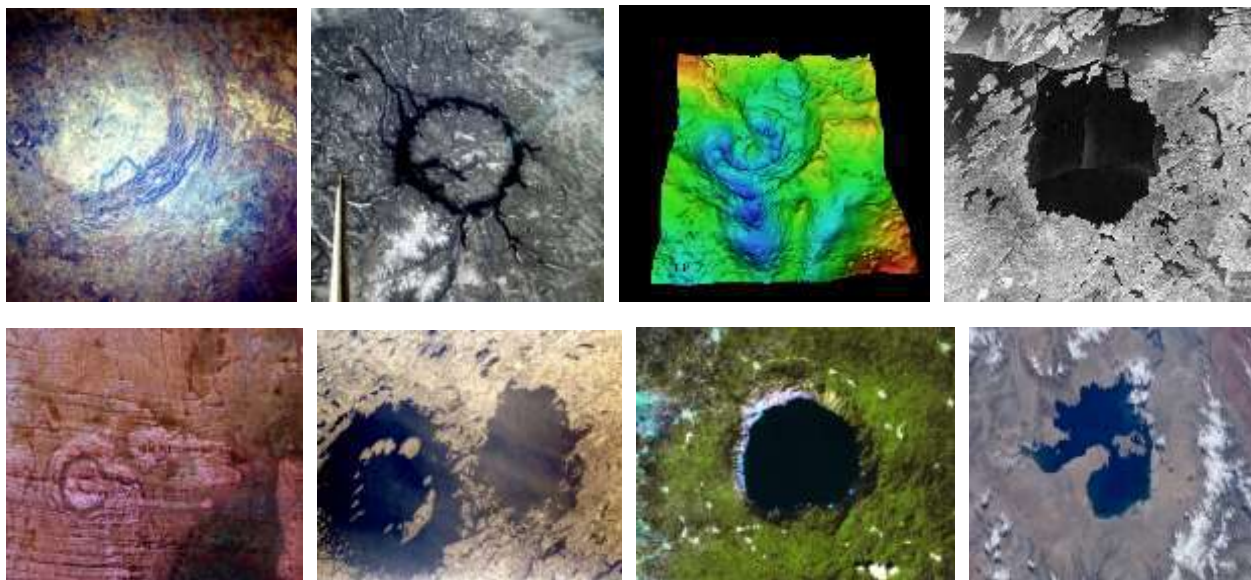


Рис. 2.348. Найбільші метеоритні кратери на Землі (зліва праворуч): **верхній ряд** - найбільший (діаметр 250км) та найдавніший (2млрд. років) *кратер Вредефорт* (Південна Африка); п'ятий за розмірами (70км, вік 212млн. років) *кратер озера Манікуган* (Квебек, Канада); третій за розмірами (170км, глибина 30км, вік 65млн. років), ймовірний вбивця динозаврів *кратер Чиксулуб* (п-ів Юкатан, Мексика); *кратер* (13км, глибина 220м, вік 99млн. років) *Deer Bay* (Саскачеван, Канада); **нижній ряд** – ймовірно, потрійний *кратер* (17км) *Аорунга* (Чад, Африка); *кратери-близнюки* (32 і 22км, вік 290млн. років) *Clearwater* (Квебек, Канада); *кратер* (10,5км, вік 1,3млн. років) озера *Bosumtwi* (Гана, Африка); високогірний (понад 6 000м) *кратер* (45км, вік 10млн. років) озера *Караколь* (Памір, Таджикистан).

У 2006р. в Антарктиді були знайдені два метеорити – *GRA 06128* та *GRA 06129*, які не підлягають жодній класифікації і є *представниками нового виду метеоритів*, так як мають велику кількість плагіоклазів у порівнянні із раніше відомими метеоритами. Вчені впевнені, що космічне тіло, від якого вони відокремились, повинно бути складної будови і, ймовірно, мати сферичну будову із ядром, мантією та корою, але було воно астероїдом чи планетою - вчені ще не можуть сказати. Вік цих метеоритів перевищує вік планет Сонячної системи.

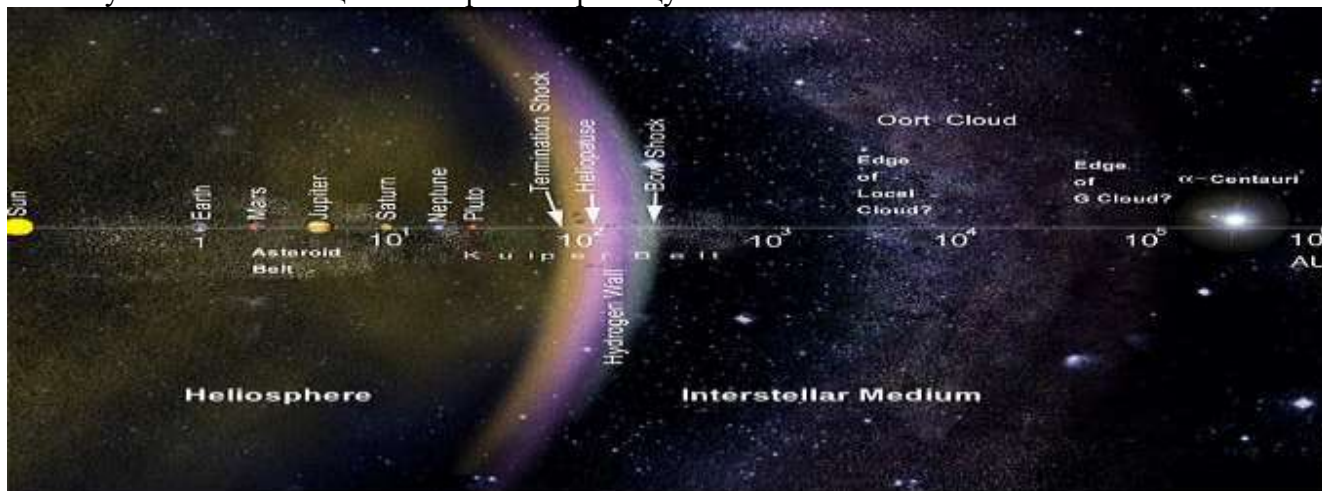


Рис. 2.348-1. Структура околиць Сонячної системи

Контрольні запитання

1. Проаналізувати атмосфери газових планет-гігантів.
2. Охарактеризуйте системи кілець Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна.
3. Які пояси астероїдів існують у межах Сонячної системи?
4. Порівняйте геологічні процеси (явища) у системах супутників планет-гігантів.
5. Який ймовірний фінал еволюції Сонячної системи?
6. Наведіть класифікацію об'єктів поясу Койпера.
7. Які особливості карликових планет та плутоїдів поясу Койпера?
8. Що являє собою Хмара Оорта?
9. Який склад ядра комет?
10. Яке значення ізотопного складу та співвідношення ізотопів у кометах?
11. Яка різниця між метеороїдами, метеорами та метеоритами?
12. Наведіть класифікацію метеоритів за складом та фізичною структурою речовини.
13. Які сенсаційні знахідки зроблені в метеоритах?

3. ГІПОТЕЗИ ПОХОДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Питаннями походження Сонця і планет займається наука *космогонія*. На різних етапах розвитку науки висловлювалися різні уявлення про походження Сонця і планет. Розвиток уявлень йшов за двома напрямками: перший пов'язував *утворення планет із космічними катастрофами*, інший розглядав *формування Сонячної системи як результат еволюції газопопилової туманності*. Загальне визнання отримали гіпотези, які базуються на еволюції газопопилової матерії.

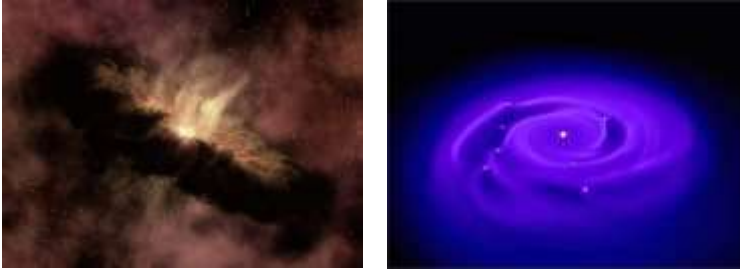


Рис.3.1. Ліворуч: протопланетний диск (фото *Hubble*). Формування планет у газопопиловій туманності

НЕБУЛЯРНА ГІПОТЕЗА КАНТА-ЛАПЛАСА (від лат. «*nebula*» – туманність). Перша спроба пояснити утворення Сонячної системи з точки зору еволюції газопопилової туманності була зроблена німецьким філософом **Іммануїлом Кантом** в 1755 році. Ймовірно, ідею походження планет із хмари космічного пилу І. Кант почерпнув у виданій в 1749 році книзі шведського письменника-містика Емануеля Сведенборга (1688-1772), який висловив гіпотезу (яку, за його словами, йому розповіли ангели) про утворення зірок у результаті вихороподібного руху речовини космічної туманності. Відомо, що цю досить дорогу книгу Е. Сведенборга із викладеною гіпотезою, купили тільки три приватні особи, однією з яких був І. Кант. Книга залишилася маловідомою, а сам автор книги невдовзі збанкрутував і решта тиражу залишилась нерозпроданою.

За І. Кантом, *простір, який займала Сонячна система, був заповнений “розкладеною на елементарні частинки” матерією у вигляді хаотичної холодної пилової туманності. Нерухомі складові частинки були різного розміру і під впливом сил взаємного тяжіння кам’яний хаос був приведений в рух, який поступово впорядковувався.* Складові частинки стикалися між собою, менші за розмірами частинки притягувалися до більших і злипалися з утворенням згустків. У центрах згущень, у результаті зіткнень і дії відцентрових сил, прямолінійні траєкторії складових частинок частково погашалися, а решта поступово набувала дугоподібних траєкторій і з часом все згущення набуло загального обертального однобічного руху. Відцентрові сили надали туманності, яка оберталася, сплюснutoї дископодібної форми.

Аналогічним чином, у середині більших згущень утворювалися менші згущення, а в них – ще менші згустки – планети та їх супутники. Із центрального згущення утворилося Сонце. Первинний стан планет і Сонця І. Кант вважав гарячим. З часом гарячі планети стали холодними, що, за думкою Канта, повинно відбутися і з Сонцем.

Опублікована І. Кантом в 1755 році без імені автора невелика книга з основними положеннями гіпотези “*Загальна природнича історія і теорія неба або досвід про влаштування та механічне походження всього світоутворення на підставі ньютонівських законів*” довго залишалася непоміченою, і тільки в XIX ст. на неї звернули увагу.

Не дивлячись на те, що гіпотеза задовільно пояснювала деякі закономірності будови Сонячної системи, вона мала ряд недоліків. Істотний із них – механістичний погляд І. Канта на матерію. Він відривав матерію від її властивості – руху (початковий нерухомий кам’яний хаос). Кант знав про наявність кілець Сатурна і бачив у них прообраз своєї схеми, але в нього відсутні уявлення про розігрівання туманності при стисканні, про її зменшення при охолодженні і про відокремлення кілець при обертанні.

У 1796 році була опублікована в книзі “*Викладення системи світу*” космогонічна гіпотеза французького математика **П.С. Лапласа**, яка багато в чому була подібна до гіпотези Канта, незважаючи на те, що Лаплас не знав про її існування. Згідно Лапласу, *Сонячна система утворилася із розжареної газоподібної туманності, яка оберталася, мала вигляд чечевиці і простягалася за межі сучасної орбіти Нептуна. У центрі туманності був розташований згусток – зародок майбутнього Сонця.*

Охолодження і притягування до центра заставляло туманність стискатися, а її зменшення, за законами механіки, зумовлювало прогресуюче прискорення обертання. З часом туманність набула форми диска, від якого в екваторіальній частині, по мірі зростання відцентрової сили, відокремлювалися газові кільця. Кількість відокремлених кілець відповідала числу планет Сонячної системи.

У силу неминучої неоднорідності кожного кільця, який-небудь згусток у ньому притягував до себе решту речовини і утворювався розжарений газовий клубок – майбутня планета. Зовнішні частини кільця і, відповідно, згустків при обертанні немов би забігали наперед і з часом спричинили обертання згустків навколо власної осі в той же бік. Подібним чином Лаплас пояснює і утворення супутників планет. Охолоджуючись, газові згустки затверділи, покрились корою і перетворилися в планети та їх супутники, а центральний згусток породив Сонце. Так як початкова туманність мала вигляд чечевиці, то орбіти всіх утворених планет лежать в одній площині, яка співпадає з екваторіальною площиною Сонця.

Лаплас, як і Кант, вірно пояснив своєю теорією наступні основні відомі на той час характерні риси Сонячної системи: більша частина маси системи зосереджена в Сонці; планети обертаються за майже круговими орбітами майже в одній і тій же площині; Сонце, планети та їх супутники обертаються навколо своїх осей і за своїми орбітами в один і той же бік.

Гіпотези Канта і Лапласа були простими, логічними і немов би доповнювали одна одну. Незабаром вони були об'єднані і стали називатися *небулярною гіпотезою Канта-Лапласа*. Ця гіпотеза була класичною і загальною припущенням понад сторіччя, але у ХХст. рівень знань вказав наступні її недоліки:

1. Густина початкової газової туманності була дуже мала, щоб туманність почала обертатися як тверде тіло;
2. Відрив речовини від туманності повинен відбуватися не кільцями, а безперервно;
3. Газоподібні кільця, маси яких відповідають масам планет, не могли згуститися, а вони розсіялися б у космосі;
4. Обертання планет Венери, Урана і Плутона відбувається у протилежний бік (за годинниковою стрілкою), ніж вони рухаються своїми орбітами навколо Сонця. Супутники деяких планет обертаються також в інший бік, ніж самі планети;
5. Один із супутників Марса – Фобос – обертається навколо планети втричі швидше, ніж вона обертається навколо власної осі.

ПЛАНЕТЕЗИМАЛЬНІ ГІПОТЕЗИ. Американський геолог *Т.К. Чемберлен* (1901р.) і астроном *Мультон* (1905р.) запровадили так звану “планетезимальну” гіпотезу походження планет. Згідно цієї гіпотези, планети утворилися з речовини, яка вирвалася із надр Сонця в результаті впливу близького проходження іншої зорі (на віддалі менше критичної межі Роша, яка досягає 2,44 сонячного радіуса). Гравітаційний вплив спочатку виразився в утворенні на діаметрально протилежних боках Сонця припливних виступів, які розвинулися у величезні протуберанці (викиди плазми), що двома струменями розжареної матерії закручувалися навколо Сонця, яке оберталося. З часом частинки викинутої речовини охолоджувалися, перетворювалися в тверді холодні частинки і почали злипатися в більш крупні “планетезималі” (вагою до 100 грамів). Усі “планетезималі” рухалися в один бік в одній площині. Притягуючись і стикаючись між собою вони злипалися, збільшувалися в розмірах і з часом утворили планети.

Гіпотеза американського вченого *Сі*, запропонована майже в той же час, пояснювала утворення планет проходженням через туманність типу лапласової, яка також оберталася і з часом перетворилася в Сонце, випадкових невеликих мас матерії. Якщо шляхи руху цих мас були дуже нахилені до площини обертання, то вони просто пронизували туманність і зникали в космосі. Якщо ж їх шляхи руху приблизно співпадали з площиною екватора, то вони ставали “бранцями” ядра туманності і, загальмувавшись під впливом середовища, починали рухатися за еліптичними, а потім за майже круговими орбітами навколо Сонця. За рахунок сил гравітації маси цих тіл збільшувалися і вони поступово перетворювалися в планети. Якщо ж маси матерії рухалися і попадали в туманність проти руху її обертання, вони швидко гальмувалися і падали

на Сонце. Тому всі планети Сонячної системи обертаються навколо Сонця в одному напрямі, а їх супутники також ставали “бранцями” планет, тільки меншого масштабу.

Гіпотеза Сі цікава тим, що вона вперше використала для пояснення походження планет ідею захоплення, але виключність (надзвичайно мала ймовірність) цього процесу робить гіпотезу Сі неправдоподібною.

В 40-их і 50-их роках минулого століття був висунутий ще цілий ряд гіпотез зарубіжними вченими про походження Сонячної системи (див. далі таблицю “Гіпотези ...на ст. 230”).

КОСМОГОНІЧНІ ГІПОТЕЗИ. У 1943р., в результаті аналізу закономірностей руху і хімічного складу Сонця та планет, **О.Ю. Шмідт** допустив, що *Сонце, рухаючись у межах Галактики, захопило холодну газOVO-пилову хмару. При зіткненні з Сонцем газOVO-пилова хмара втратила частину кінетичної енергії, почала сплющуватися і набувати густини та обертового руху із формуванням у її межах невеликих холодних згущень, які з часом об'єдналися в планети та їх супутники.* Під час свого росту згушення впливали один на одного своєю гравітацією. При цьому оберти невеликих “зародків” дуже змінилися, крупних – мало, що відобразилося в малій витягнутості орбіт планет-гігантів.

Поділ планет на дві групи (невеликі складені гірськими породами планети земної групи і газOVO-рідинні планети-гіганти) О.Ю. Шмідт пояснює наступним чином. ГазOVO-пилова хмара, в основному, складалася із водню та гелію. Поруч з ними були і більш складні елементи (кремній, залізо тощо), але в значно меншій кількості. Диск газOVO-пилової хмари був дуже непрозорим і сонячні промені проникали тільки в найближчу її частину, а у найвіддаленіших частинах диску температура понизилася до -270°C . У результаті поблизу Сонця змогли існувати тільки частинки із тугоплавких матеріалів, а в холодних частинах диску частинки укрупнювалися за рахунок наморожування на них газів. Якщо ж частинки із холодної області попадали в близьку до Сонця зону, то вони випаровувалися. Таким чином середня частина диску стала потовщеною і в результаті поблизу Сонця утворилися невеликі планети, які складені важкими гірськими породами, а на віддалі – планети-гіганти, складені більш легкими елементами. Віддаленість орбіт планет від Сонця, також не випадкова. О.Ю. Шмідт встановив, що квадратний корінь із величини радіуса орбіти будь-якої планети є середнім між аналогічними величинами орбіт сусідніх планет, а віддаленість основних супутників від планет-гігантів збільшується за такою ж закономірністю, як зростають віддалі планет від Сонця.

Головними недоліками гіпотези О.Ю. Шмідта є те, що проблема походження планет та їх супутників пояснюється поза межами процесу утворення Сонця – головного і визначаючого елемента системи, а також малоімовірним є захоплення дрібних частинок у такій масовій кількості із туманностей нашої Галактики. Гіпотеза О.Ю. Шмідта також не вирішила питання про походження навколосонячної хмари. Разом з тим, завдяки доброму математичному обрахуванню окремих питань, ця гіпотеза набула значної популярності.

За гіпотезою відомого астронома академіка **В.Г. Фесенкова** (1953, 1960рр.) *утворення Сонця і планет відбувалося одночасно із холодної протопланетної газOVO-пилової хмари, причому Сонце формувалося в центральному згущенні, а планетна система – за його межами.* Дозоряна стадія акреції і стискання, коли ще не почали діяти джерела ядерних реакцій, проходили виключно за рахунок гравітації і досить швидко. На останніх стадіях стискання, коли збільшуються швидкість обертання і відцентрова сила Протосонця, може виникнути ротаційна нестабільність і з поверхні зорі в районі екватора може відбутися викид речовини у космічний простір. У кінцевому результаті утворюється досить ущільнена зоря, яка на протязі всієї своєї еволюції буде поступово втрачати свою масу за рахунок корпускулярного випромінювання пропорційно змінам світимості, тобто вона стає типовою зорею Головної послідовності. Такою була, за В.Г. Фесенковим, і еволюція Сонця. Характерною рисою еволюційного розвитку зір, крім зменшення яскравості світимості, є втрата маси і зменшення швидкості обертання, тому невелика величина моменту кількості руху нашого Сонця цілком природна.

Існуючі планети могли ніколи і не бути складовою частиною самого Сонця, а утворилися, можливо, із різних частин того ж холодного газOVO-пилового згушення (глобули), попередньо ущільненого в процесі охолодження і конденсації. Протопланетна хмара на момент виділення з

неї планет мала досить сплюснену форму, а її площина розташовувалася майже в площині сонячного екватора. У зовнішніх частинах цієї хмари були зосереджені переважно легкі гази з невеликими домішками важких з'єднань. У середині зовнішньої частини, де сформувалася наймасивніша планета – Юпітер, кількість газу була найбільшою. У внутрішніх частинах протопланетної хмари на початок формування планет земної групи встигли утворитися багато мінералів, які стали центрами конденсації. Планетні згущення утворювалися один від одного на віддаль мінімального сонячного та взаємного впливів. Спочатку переважно із легких газів, утворювалися найвіддаленіші від Сонця зовнішні планети, які є воднево-пиловими кулями з найбільшим обертальним моментом. Внутрішні планети формувалися після них у середовищі, збагаченому різними мінеральними твердими з'єднаннями в формі більш або менш крупних агрегатів, які переміщувалися в розрідженому газі. Внутрішні планети спочатку були крупними тілами-протопланетами, які пізніше втратили свої потужні атмосфери під дією сонячного вітру. Земля утворилася зразу всією масою, а не злипалася із окремих частинок.

Системи супутників планет відображають, мабуть, розміри попередніх протяжних атмосфер. Супутники, які рухаються згідно напрямом обертання планет, утворилися із того ж згущення, а нерегулярні супутники, які рухаються у зворотному напрямі або швидше планети, є, можливо, захопленими попередньою більш потужною атмосферою астероїдами.

Утворення планет, у тому числі і в Сонячній системі, є певним закономірним процесом, широко розповсюдженим у природі. Планети утворилися без зовнішнього впливу з тієї ж речовини що і Сонце. Формування планет тісно пов'язане з утворенням зір і являє собою одну із сторін складного загального процесу утворення зоряних систем і не може бути представленим будь якою єдиною схемою. Гіпотеза В.Г. Фесенкова – одна з найбільш об'єктивних і обґрунтованих.

Гіпотези походження Сонячної системи

Автор	Рік	Основна ідея гіпотези
1	2	3
Р. Декарт	1644	Вихороподібний рух – єдина стійка форма руху, із первинних та вторинних вихорів утворилися Сонце та планети з супутниками.
Ж.Л.Л. Бюффон	1745	Гігантська комета зіткнулася з Сонцем і вирвала з його надр речовину, із якої утворилися планети.
І. Кант	1755	Конденсувалася хмара міжзоряного газу, що обертався.
П.С. Лаплас	1796	Пояснення попередньої гіпотези: хмара стискається і кожний раз, коли відцентрова сила ставала достатньою, від хмари відділялося газове кільце, з якого формувалася планета.
А. Бікєрон	1878	Сонце прийшло близько від зорі і з нього вирвалася речовина.
Т.К. Чемберлен	1901	Сонце пройшло близько від зорі і речовина вирвалася з припливної хвилі.
О. Біркеланд	1912	У магнітному полі Сонця з іонів, викинутих Сонцем, утворилися газові кільця.
С.А. Арреніус	1913	Сонце зіткнулося із зорею, після зіткнення зоря розпалася і залишилося Сонце та довгий газовий хвіст, з якого утворилися планети.
Х. Джеффрис	1916	Зоря зачепила Сонце і утворився довгий хвіст.
Дж.Х. Джинс	1917	Зоря пройшла близько від Сонця, речовина вирвалася з припливної хвилі і утворила довгі хвости.
Х.П. Берлаге	1930	Із частинок, викинутих Сонцем, утворився газовий диск.
Г.Н. Рессел	1935	Сонце було подвійною зорею, другий компонент був зруйнований третьою зорею.
Дж. Літлтон	1936	Сонце було потрійною системою, система – нестійкою, два компоненти відокремилися і залишили частину своєї речовини.
Х.О. Альфвен	1942	Сонце зустрілося з газовою хмарою, атоми газу іонізувалися і почали рухатися в магнітному полі.
О.Ю. Шмідт	1943	Сонце зустрілося з газовою хмарою і захопило її, в результаті зіткнень частинок утворилися планети.

К. Вейцеккер	1944	З вихорів у зовнішніх шарах Протосонця, що стискувалося, утворилися планети та їх супутники.
Ф. Хойл	1944	Сонце було подвійною зорею, другий компонент вибухнув надновою зорею, викинув газову хмару і залишив систему.
Ф.Л. Уіппл	1947	Протосонце захопило газову хмару з достатньо великим моментом кількості руху.
Д.Тер Хар	1948	Планети утворилися в турбулентних зовнішніх шарах Протосонця.
Дж.П. Койпер	1949	Планети утворилися в результаті гравітаційних флуктуацій в газовій хмарі навколо Протосонця.

4. ПОХОДЖЕННЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОСМОХІМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Наш звичайний світ – планета Земля та її гірські породи, океани, атмосфера, флора і фауна складається приблизно із 100 різноманітних хімічних елементів, причому у Всесвіті деякі з них значно більше поширені ніж інші.

Найпростіший із всіх елементів – *водень*. Ядро атому водню складається із єдиного протону, навколо якого обертається один електрон. Ядра інших елементів складаються із різної кількості протонів, а також нейтронів, які входять до складу всіх елементів, крім водню. У ході ядерних реакцій окремі ядра можуть зливатися з елементарними частинками, наприклад, нейтронами, і утворювати нові елементи. Для створення умов для термоядерних реакцій необхідні дуже високі температури. Такі температури існували на ранніх стадіях розвитку Всесвіту, а зараз вони зустрічаються в надрах зір, при вибухах наднових, а також при падінні речовини на поверхню зірок типу білих карликів.

Весь *водень* у Всесвіті, а також значна частина *гелію*, з'явилися на світ на протязі декількох перших хвилин існування Всесвіту після Великого Вибуху. Перші зорі, які утворилися, майже повністю складалися із водню та гелію. Свою енергію зорі отримують шляхом злиття ядер водню, що приводить до утворення гелію, потім – злиття гелію з більш важкими елементами, коли утворюється решта хімічних елементів, включаючи *вуглець*, *кисень*, *кремній*, *залізо* тощо. Коли зоря вибухом скидає свою оболонку як наднова, більша частина матеріалу виноситься в космічний простір. Теплова енергія вибуху сприяє створенню більшої кількості хімічних елементів. Після того, як відбулося достатньо багато вибухів наднових, міжзоряна речовина отримала значну кількість більш важких хімічних елементів, які утворилися в надрах зір – крім водню та гелію, що були тут із самого початку. Зорі, життєвий шлях яких проходить без вибухів, також внесли свій вклад у формування хімічного різноманіття космосу, коли поступово звільнювалися від своїх зовнішніх оболонок, створюючи появу зоряних “вітрів” або планетарних туманностей.

Зорі формуються із газово-пилових туманностей міжзоряної речовини. Зорі, які зараз народжуються в нашій Галактиці, утворюються із набагато більшого різноманіття суміші хімічних елементів, ніж самі перші зорі. Навіть наше Сонце не належить до першого зоряного покоління, а воно утворилося із туманності, в якій було немало вуглецю, кисню, кремнію, заліза тощо, - по крайній мірі, цих елементів вистачило, щоб зібрати їх у туманність, яка стала потім Сонячною системою і утворила нашу планету, більшість атомів якої, включаючи і нас, була утворена в надрах давно померлих зір.

Поширеність у космосі хімічних елементів (за проф. В. Войткевичем) зменшується, хоч і нерівномірно, по мірі збільшення їх порядкового номеру; елементи з парним порядковим номером більш поширені, ніж з непарним; значно підвищене розповсюдження заліза і найближчих до нього елементів – хрому, марганцю, кобальту, нікелю пов'язане із особливою міцністю їх ядер; мінімуми поширення пов'язані головним чином з непарними хімічними елементами. Незначна поширеність літію, берилію та бору пояснюється їх легким руйнуванням при ядерних реакціях у надрах зірок. Порядковий номер хімічного елементу дорівнює числу протонів в ядрі кожного атому, причому атомні ядра є найбільш стійкими тоді, коли вони вміщують парне число протонів і нейтронів. Таким чином, кількість атомів того чи іншого

елементу в природі зумовлена властивостями атомного ядра. До важливих властивостей елементів відноситься їх леткість – здатність перетворюватися в газ при певних температурах. Чим нижча температура такого перетворення, тим більш летким вважається хімічний елемент. Якщо ж він переходить у газоподібний стан при температурі більше $+1000^{\circ}\text{C}$ (при нормальному атмосферному тиску), то його відносять до нелетких або тугоплавких. Несхожість хімічних елементів лише по цьому одному параметру – леткості – зумовила елементам істотно різні долі в процесі загального розвитку Сонячної системи.

Виникненню хімічних елементів передувала зіркова стадія розвитку матерії, яка включала і процеси синтезу атомних ядер. Сировиною для їх утворення служив водень, який і зараз переважає в хімічному складі Сонячної системи. Синтез інших атомів з водню відбувався шляхом утворення спочатку легких, потім все більш важких елементів у ході різних ядерних реакцій в надрах зірок. Утворення атомів найбільш важких природних елементів – торію, урану та трансуранових – відбулося безпосередньо в надрах Протосонця перед утворенням планет. Базуючись на близькості ізотопного складу всіх тіл Сонячної системи можна допустити, що ядерна еволюція речовини Сонця і речовини планет мала спільну долю до певного моменту розвитку. Цей переломний етап наступив приблизно 4,6 млрд. років тому, коли первинне масивне Протосонце розділилося на первинне Сонце та навколосонячну речовину. Навколо Сонця, у просторі, близькому до площини екватора, утворилася дископодібна туманність.

Хімічний склад планет формувався в ході поступової конденсації елементів та їх з'єднань. При поступовому охолодженні розжареної газової туманності послідовно конденсувалися спочатку тугоплавкі, а потім все більш леткі елементи: спочатку утворилися краплини розплавленого заліза і нікелю (сидерофільних елементів - за В.М. Гольдшмідтом), дещо пізніше конденсувалися тугоплавкі літофільні елементи (кремній, магній, алюміній, кальцій тощо) у вигляді оксидів та силікатів, потім сульфідів і останніми – вода і ртуть. Вирішальне значення при формуванні складу внутрішніх планет мала різна ступінь окислення заліза в різних місцях протопланетної туманності, яка вміщувала також пари води. При температурі вище 600°K залізо і вода існують окремо не реагуючи між собою. При падінні температури до 400°K вони починають взаємодіяти, утворюються оксиди заліза і водень. При подальшому охолодженні окислення заліза посилюється. Формується мінерал магнетит, який зустрічається в метеоритах (вуглистих хондритах), які відображають низькотемпературну і найбільш окислену частину сонячних конденсатів.

При температурі нижче 400°K наступає ще один важливий момент: пари води починають взаємодіяти з раніше утвореними силікатами, утворюючи гідратовані силікати. На заключних етапах охолодження туманності виникають численні органічні з'єднання, які знаходять у вуглистих хондритах. Гідратовані силікати у тонкому дисперсному стані поступово поглинають водяну пару та інші гази із оточуючого середовища. Можливо, що матеріал цього типу, приймаючи участь в утворенні внутрішніх планет, привніс до їх складу воду та різноманітні гази.

Сучасна космохімія допускає, що формування планет відбувалося в два етапи.

Перший етап характеризувався охолодженням газового диску і конденсацією його речовини у краплини і частинки – утворилася газопопилова туманність. Вона була нестійкою через різну швидкість охолодження на різних віддальх від Сонця, що зумовило її хімічну неоднорідність, яка пізніше вплинула на склад планет. Ця неоднорідність посилювалася випромінюванням Сонця (тиском сонячного вітру), яке відкидало легкі гази у крайові частини туманності – в область формування зовнішніх планет-гігантів з їх потужними воднево-гелієвими атмосферами.

Другий етап полягав в об'єднанні (акумуляції) конденсованих частинок в окремі згущення – протопланети, причому ймовірно, що перші утворені краплинки та пилинки почали злипатися в окремих ділянках протопланетної туманності ще тоді, коли основна маса речовини була в газоподібному стані.

Поблизу Сонця охолодження первинного газу йшло повільніше, а на периферії – швидше, тому розташовані ближче до Сонця внутрішні планети утворилися переважно із речовини

збагаченої металевим залізом, яке в умовах високих температур не окислялося (тому внутрішні планети мають масивні металеві ядра). Далше, за орбітою Марса, формувалися переважно хондритові астероїди – родоначальні тіла метеоритів. Зовнішні планети – Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун – утворилися із речовин, які охолодилися і сконденсувалися в останню чергу (метали не входять до їх числа, тому метали в ядрах зовнішніх планет відсутні).

Логічно допустити, що в межах газової туманності, яка поступово охолоджувалася, злипання частинок розпочалося тоді, коли конденсація залізо-нікелевих краплинок уже завершилася, а конденсація силікатних частинок тільки розпочалася. Гарячі краплини або вже тверді частинки металів легко зливалися в наростаючі контактні маси через свою високу теплопровідність.

Таким чином, *при формуванні планет спочатку із металів утворилося ядро планети, потім на нього осаджувалися силікати та інші хімічні з'єднання, а верхні сфери (горизонти) формувалися при накопиченні гідратованих силікатів та інших більш летких компонентів.*

Не встигли новоутворені планети охолонути, як їх надра почали знову розігріватися під впливом розпаду радіоактивних елементів, що зумовило вибіркове плавлення речовини. Спочатку розплавалося сірчисте залізо, збагачене металевим залізом (температура плавлення такої суміші +990°C). Велика густина цього розплаву зумовила його опускання в центральні частини планети, завершуючи формування її ядра.

Усі внутрішні планети мають тверді верхні оболонки, які складені переважно з базальтів. Венера і Земля мають ділянки кори, які складені гранітним матеріалом, що більш багатий на кремнекислоту і залягає на базальтовій основі. Всі ці верхні оболонки на сотні мільйонів років молодші за внутрішні частини планет. Вони утворилися тоді, коли під впливом радіоактивного тепла із первинних мантий виплавліялися легкоплавкі мінерали. Базальтові потоки залили поверхню планет, потім застигли і утворили кору, а гази, які виділилися разом з ними і пари води – атмосферу і гідросферу. Гранітна магма виплавилася пізніше із базальтової.

Меркурій, через свою малу масу та високі температури, розсіяв свої леткі речовини, які могли виділитися назовні в процесі плавлення глибинного матеріалу.

Венера, більш масивна планета, втримала свою густу атмосферу, яка на 97% складена вуглекислим газом. У невеликій кількості в атмосфері Венери є пара води – мізерні рештки раніше великих водяних резервів, але під впливом інтенсивного сонячного випромінювання молекули води дисоціюють на водень і кисень. Легкий водень покинув атмосферу Венери і розсіявся в космічному просторі, а хімічно активний кисень був захоплений поверхнею планети.

На **Землі**, в процесі виділення газів із мантиї при її плавленні, на поверхню поступали пари води, вуглекислий газ і деяка кількість азоту. При охолодженні та конденсації водяних парів утворилися маси рідкої води у вигляді морів та океанів. Первинна атмосфера, яка була складена переважно вуглекислим газом, пізніше перетворилася в азотно-кисневу під впливом фотосинтезу зелених рослин. Вуглекислий газ переходив у морську воду і реагував з кальцієм та магнієм, утворюючи широко розповсюджені карбонатні осадові породи – вапняки та доломіти. Інша, менша частина вуглекислого газу, поглиналася в процесі фотосинтезу. В атмосферу виділявся кисень, а вуглець накопичувався в органічних речовинах, які розсіяні в осадових породах, а також у родовищах горючих сланців, кам'яного вугілля і нафти.

На **Марсі**, поверхня якого отримала мало летких речовин, атмосфера складена вуглекислим газом, частина якого разом з водяною парою періодично замерзає, утворюючи полярні шапки.

Гігантські зовнішні планети утворилися шляхом, який багато в чому подібний до еволюції внутрішніх планет. Але на заключних стадіях вони захопили багато легких газів з первинної туманності і утворили потужні воднево-гелієві атмосфери. У процесі росту зовнішніх планет та їх найближчих супутників на їх поверхню випадали величезні маси космічного снігу, який пізніше сформував крижані панцири. Так в основних рисах складався сучасний вигляд нашої планетної системи.

Вік Сонячної системи, за даними визначення абсолютного віку ізотопів хімічних елементів метеоритів родини *carbonaceous chondrites*, складає 4,568 млрд. років, а процес активного формування планет тривав від 2 до 4 млн. років, після чого він став уповільнюватися.

5. ЗОРЯНІ ПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ

Відкриття в глибинах Всесвіту планет навколо інших зірок (зовнішніх планет – *екзопланет*, від грец. *εξω*, *exo* – «поза, зовні») поставило питання: **планетні системи є винятком чи загальним правилом для Всесвіту?** З 1995р. - першого підтвердження відкриття екзопланети **51 Пегаса b** за межами Сонячної системи - було досліджено понад 3000 найближчих зірок і біля 358 з них знайшли планетні системи. **Сьогодні можна стверджувати, що екзопланети чи їх системи відкриті біля 10% зірок, які включені до програми пошуків та за спектральними властивостями близькі до сонячного класу – це зорі G-класу та пізніх F-підкласів із спокійними фотосферами та ненасиченими спектральними лініями спектрами.**

11 екзопланет (*Фомальгаут b*, *CT СНА b* тощо) були відкриті **візуальними астрономічними спостереженнями** при блокуванні ними світла своїх зірок, 64 екзопланети - за змінами **яскравості зірок при транзитному проходженні екзопланет по їх зоряному диску** (рис.5.1).

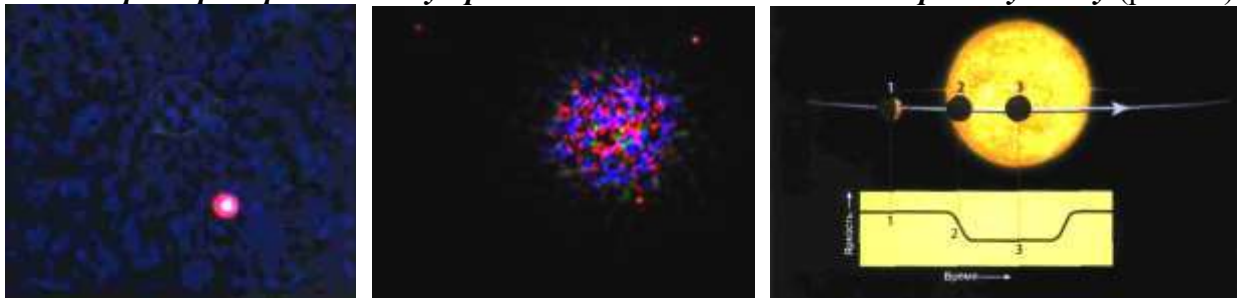


Рис.5.1. Ліворуч: фото екзопланети 2M1207b (радіус 50 000км, маса 0,25 маси Юпітера або 80 мас Землі, температура +1300⁰С) на фоні коричневого карлика 2M1207 (масою у 21 Юпітера) у сузір'ї Кентавра при візуальному способі знаходження екзопланет (фото *Hubble*). У центрі: перше фото іншої планетної системи - сусідньої зорі HR 8799 (строката куля) віком 55 млн. років на віддалі 129 світлових років та її 3-ох екзопланет (крапки угорі ліворуч і праворуч та внизу біля зорі) на віддальх 24, 37 і 67а.о. від зорі з масами двох «внутрішніх» екзопланет – до 10 мас Юпітера, «зовнішня» - у 1,5 рази легша та із зовнішнім пиловим диском типу пояса Койпера (інфрачервоне фото *National Research Council Canada*). Праворуч: зміни яскравості зорі при транзитному способі відкриття екзопланет

Про наявність екзопланет свідчить **астрометричний метод – складний спільний рух навколо загального центру мас зірок та їх екзопланет** на підставі незначних коливань траєкторій зірок через гравітаційний вплив екзопланет (так відкрили *ε Еридана b* тощо), чи **вплив екзопланет на періодичне зміщення спектральних ліній зірок** за рахунок **ефекту Доплера** – відкрили 257 екзопланет (рис.5.2). Аналогічний ефект спостерігається при обертанні екзопланет навколо пульсару, тільки спостерігається зміщення не спектральних ліній, а зміна **частоти пульсації**. 10 екзопланет були відкриті на підставі явища **гравітаційного лінзування** (рис.5.2), коли зростання блиску віддаленої зорі відбувається за рахунок збирання (лінзування) її світла гравітацією більш близької зорі (першу відкрили **OGLE 235/MOA 53**). Такі спостереження дають мінімум інформації – розмір, еліптичність орбіти і нижню межу їх маси.

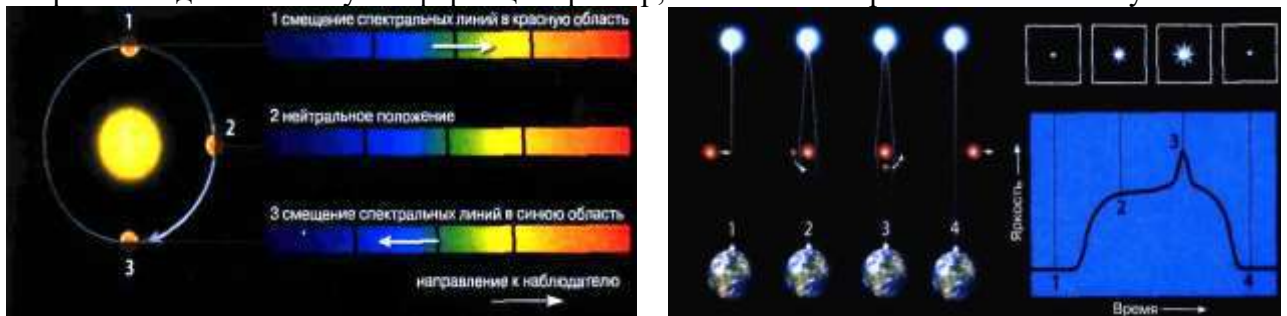


Рис.5.2. Відкриття екзопланет на базі **ефекту Доплера** (ліворуч) та ефекту **мікролінзування** (праворуч)

Екзопланетам присвоюють назви із назв їхніх зірок та приєднаних до цих назв рядкових латинських букв «b», «c», «d» тощо у порядку відкриття екзопланет, а не по мірі

їх віддалі від зорі обертання. Майже всі ці екзопланети розташовані в безпосередній близькості від своїх зірок. Багато з них являють собою газові кулі із водню та гелію, нагадують Юпітер і фактично являються *коричневими карликами* – зорями, маси яких не вистачило для проходження ядерних реакцій в ядрі. Орбіти більшості екзопланет являють собою витягнуті еліпси. Відкриті екзопланети, в основному, обертаються навколо зірок типу Сонця. Більшість знайдених екзопланет є гігантськими і вони у сотні разів більші за Землю. Найбільша за розмірами з усіх відомих зараз - екзопланета **CT СНА b** обертається в *сузір'ї Хамелеона* навколо молодого зорі CT СНА і переважає Землю за масою в 5403 рази; її діаметр більше ніж удвічі перевищує діаметр Юпітера, а маса - у 17 разів.

На екзопланетах температури надто високі для існування рідкої води, а на тілах, які рухаються за межами цієї зони панує космічний холод. П'ять планет знаходяться на оптимальній віддалі від своїх зірок і на них може існувати рідка вода, наявність якої є найголовнішою умовою виникнення життя, а на одній з екзопланет температура біля +40°C.

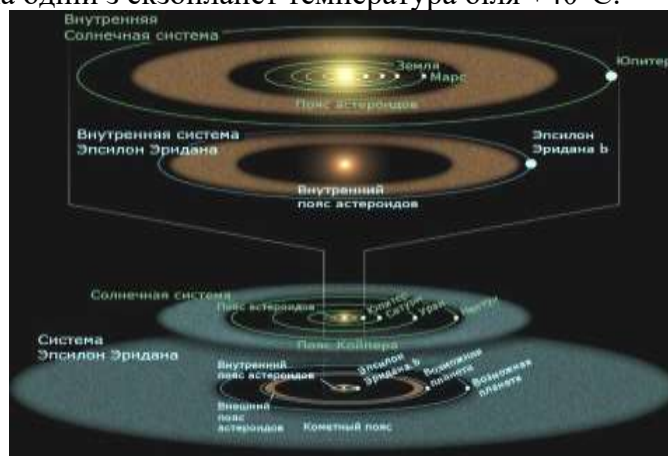
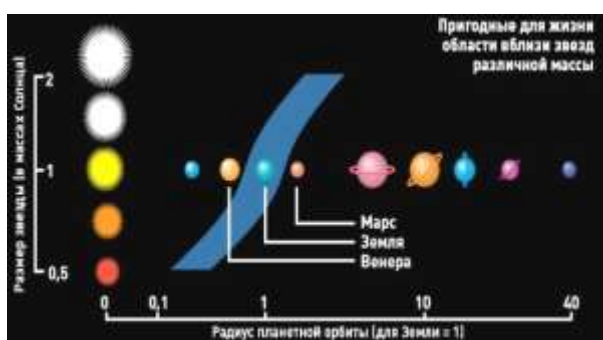


Рис.5.3. Ліворуч: смуга життя на екзопланетах у нашій Галактиці. Праворуч: порівняння будови Сонячної системи та системи ε Еридана на віддалі 10,5 світлових років від Сонця (NASA/JPL – Caltech)

У 2004р. космічний телескоп *Hubble* за межами Сонячної системи, на віддалі 150 світлових років від Землі, в атмосфері газоподібної екзопланети **HD 209458 b (Осіріс)** у *сузір'ї Пегаса* уперше відкрив наявність **Na, C і O₂**, а **H₂ випаровується у простір і утворює подібний кометі хвіст**. Ця екзопланета обертається навколо своєї зорі за 3,5 доби на віддалі 6,92 млн. км, має температуру атмосфери +1100°C і є єдиною відомою екзопланетою, яка випаровується.

За допомогою *інфрачервоного астрономічного супутника IRAS* (1983р.) навколо яскравої зорі **Вега** був відкритий **акреційний диск**, який, мабуть, є “**сонячною системою**”, а у 2004р. вперше за допомогою космічного телескопу *Spitzer* був відкритий **диск із космічного пилу та уламків навколо зорі із планетною системою**. Але астрономи не можуть пояснити, чому тільки 6 із 26 зірок із екзопланетними системами оточені дисками із уламків.

Деякі найближчих до нас зірок мають **складні планетні системи**, включаючи зорю **Бернарда** (5,97 світлових років від Землі) і зорю **ε** (рис.5.3) у *сузір'ї Еридана* (10,5 світлових років) (рис.5.1). Рухаючись у просторі ці зорі дещо “коливаються” під впливом систем екзопланет, які обертаються навколо них. **Екзопланетні системи відрізняються від Сонячної системи тим, що їх найбільші планети („юпітери”) розташовані найближче до світила, а чим менше планета – тим далі вона розміщена від своєї зорі.** Це заставляє допустити, що аномалією може бути будова нашої Сонячної системи. Аналогічна із екзопланетними системами структура спостерігається у будові супутникових систем навколо Юпітера та інших газових планет-гігантів Сонячної системи. Крім того, **всі екзопланети обертаються еліптичними орбітами, а у Сонячній системі орбіти планет майже колові.**

Перша багатопланетна система була відкрита в 1999р. - навколо зорі **HD 209458 (ε Еридана)** обертаються **три екзопланети** в 220, 660 та 1200 разів більші за масу Землі та **три кільця астероїдів** (рис.5.3). Екзопланети розташовані дуже близько від зорі (періоди їх обертання - відповідно 4,6 доби, 242 доби і 4 роки) та обертаються у площині нашого

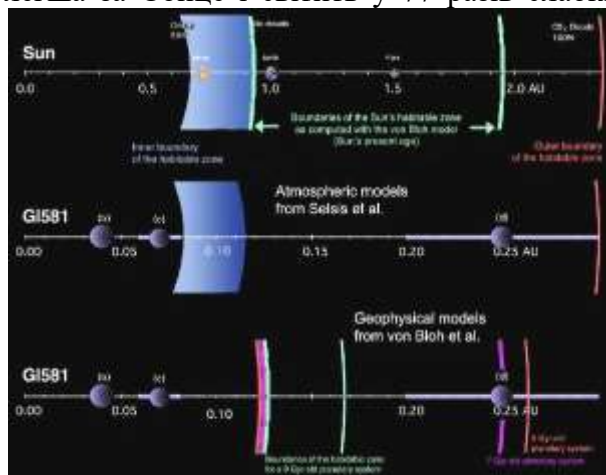
спостереження і видно, як вони транзитно проходять по її диску. Одна з них – газова, вона приблизно на 30% легша за Юпітер, але при цьому настільки ж більша за нього у діаметрі, бо її розташування в 14 разів ближче до своєї зорі, ніж Меркурій до Сонця, та випромінювання близької зорі змусило екзопланету роздутися (що суперечить сучасній теорії утворення планет). *Внутрішнє кільце* багатопланетної системи ϵ Еридана за масою (1/20 маси Місяця) та віддаллю від зорі (3а.о. чи 450 млн. км) схоже на земний пояс астероїдів, а *середнє кільце* (маса Місяця) має діаметр до 20а.о. (орбіта Урана). Ці кільця (*внутрішній та зовнішній астероїдні пояси* ϵ Еридана) складені з кам'яних тіл, які схожі на астероїди Головного поясу між Марсом та Юпітером. *Зовнішній диск* крижаних кометних тіл за своїми розмірами (35-90а.о.) нагадує пояс Койпера, але в 100 разів більший за нього. Гравітація екзопланет «контролює» зовнішній край *внутрішнього*, зовнішній край *середнього* і внутрішній край *зовнішнього кільця*.

Система ϵ **Андромеди** нараховує **три екзопланети** з масами близько 0,68; 2,05 та 4,29 мас Юпітера і радіусами орбіт 0,059; 0,828 та 2,09а.о. відповідно (у Сонячній системі це від орбіти Венери до початку Головного поясу астероїдів). Дві зовнішні екзопланети мають овальні орбіти (їх ексцентриситети 0,24 і 0,31 відповідно).

Навколо зорі **HD 69830**, що розміщена на віддалі 40 світлових років від Землі (її видно неозброєним оком), відкрита система із **трьох екзопланет** із масами всього від 10 до 18 мас Землі (тобто, кожна з них менша за масу Нептуна). Дві екзопланети із періодами 8,37 та 31,6 діб знаходяться на низьких орбітах, а орбіта третьої екзопланети, з періодом 197 діб, подібна орбіті Венери. Враховуючи, що зоря **HD 69830** менш масивна за Сонце, то можна вважати, що ця екзопланета знаходиться у зоні, яка майже придатна для життя (якщо не враховувати несприятливо велику масу).

Навколо іншої, меншої за наше Сонце, зорі обертаються резонансно невеликі **дві екзопланети**, причому їх орбітальні періоди відповідно дорівнюють 30 та 61 дням, тобто внутрішня екзопланета виконує два оберти навколо зорі за той час, за який зовнішня екзопланета здійснює один оберт. У вересні 2004 року *вчені вперше сфотографували за межами Сонячної системи справжню екзопланету* – темно-червону кулю з удвічі вищою ніж на Венері температурою, яка обертається навколо зорі **2M1207** у *сузір'ї Гідри* на віддалі 230 світлових років від Землі (див. рис.5.5).

У 2007р. на віддалі 20,5 світлових років від Землі у *сузір'ї Терези* навколо **неспокійного червоного карлика класу М3 – затухаючої зорі Глізе 581 астрономи відкрили екзопланету Глізе 581 с**, яка за своїми характеристиками дуже схожа на Землю (рис.5.4). Ця екзопланета обертається навколо своєї періодично спалахуючої на кілька хвилин зорі (світимість при цьому зростає у кілька разів, а рентгенівське випромінювання – у тисячі) орбітою радіусом 11 млн. км (0,073а.о.) майже за 13 земних діб. Екзопланета на 50% більша за Землю, її маса у 7 разів перевищує земну (такі об'єкти називають *суперЗемля*), а сила тяжіння на екзопланеті в 1,6 разів більша. Віддаль від екзопланети до зорі у 14 разів менша ніж від Землі до Сонця і тому планета постійно обернена до свого сонця одним боком, але зоря – червоний карлик – *Глізе 581* утричі легша за Сонце і світить у 77 разів слабкіше за нього, тому екзопланета перебуває у межах



смуги життя – області, де кількості тепла від зорі достатньо для існування на її поверхні рідкої води (середня температура на її поверхні приблизно відповідає земній – від 0°C до +40°C). За даними моделювання поверхня екзопланети повинна бути чи кам'янистою як на Землі, чи покритою океанами.

Рис.5.4. Схематичне зображення *смуги життя* у системі екзопланет червоного карлика *Gliese 581* у порівнянні із Сонячною системою

Двома роками раніше біля цього ж червоного

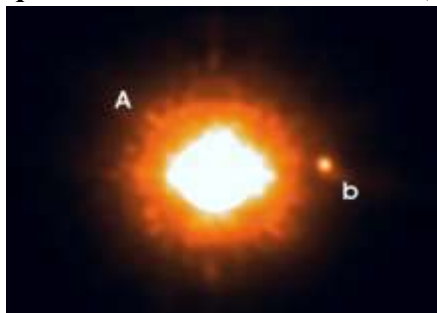
карлика був відкритий „гарячий Нептун” вагою в 15 земних мас, який обертається навколо зорі за 5,4 земних діб (піввісь орбіти 0,04а.о.). Ймовірно, що екзопланета Глізе 581 с утворилася у більш віддалених областях своєї екзопланетної системи і потім мігрувала до своєї зорі. У такому випадку вона цілком забезпечена водою чи навіть покрита глобальним океаном.

„Гарячий Нептун”, який рухається власною орбітою, досить тісно зближується з екзопланетою-океаном, що зумовлює на ній потужну припливну хвилю та приводить до посилення вулканічної активності, аналогічно юпітеріанському Іо, а велика маса екзопланети з великою кількістю вулканічних викидів повинна сформувати потужну атмосферу. Це наводить вчених на думку про можливе існування на покритій густою газовою оболонкою екзопланеті рідкої води та життя. Також у цій екзопланетній системі на віддалі в 1/4а.о. від зорі була відкрита ще одна *суперЗемля* – у 8,2 разів важча за нашу планету – з періодом обертання орбітою за 84 земних дні. Зараз у **планетній системі червоного карлика Глізе 581 відомо шість екзопланет (e, b, c, g, d, f).**

Одними із найменших відомих екзопланет є: четверта планета **55 Рака e**, що розташована у віддаленій на 41 світловий рік від Землі **системі із 5 екзопланет жовтої зорі 55 Рака** у сузір’ї Рака і яка в 14 разів тяжча за Землю, обертається навколо власної зорі на середній віддалі 0,038а.о. за 2,81 земних діб по орбіті з ексцентриситетом 0,174; та планета **Глізе 436 b** (2004р) – величезна крижана куля діаметром 50 390км, яка обертається навколо зорі - *червоного карлика типу М* – **Глізе 436** у сузір’ї Лева на віддалі 30 світлових років від Землі, її маса приблизно в 22,6 разів більша за земну, а за розмірами вона в 3,95 разів більша за Землю. Негуста атмосфера цієї екзопланети із тонкого зовнішнього шару водню та гелію над розжареною до +377⁰С освітленою стороною, як і земна, випромінює блакитне світло. На нічному боці планети температура близька до абсолютного нуля, а у сутінковій зоні термінатора можливе існування сприятливих, з точки зору землян, температур. За даними вчених, ззовні **Глізе 436 b** складена „*гарячою кригою*” – коли через високі тиск та температуру вода набуває твердої форми криги, під якою розташований шар *гірських порід* невеликої потужності. Період обертання цих найменших екзопланет навколо своїх зірок всього кілька днів - вони розташовані дуже близько до них, зокрема віддаль до зорі у **Глізе 436 b** складає всього 3% віддалі між Землею та Сонцем, а період обертання цієї екзопланети – 2,6 земних діб.

Десять років тому за допомогою інфрачервоного телескопу у зорі **дзета-Зайця**, на відстані 70 світлових років від нас, був відкритий **акреційний диск із незвично теплого пилу**, температура частинок якого приблизно +77⁰С. Маса зорі **дзета-Зайця** вдвічі перевищує масу Сонця, але зоря дуже молода - їй всього 100 млн. років. Маса пилу в цьому диску порівнюється з масою Землі, тобто у 1000 разів перевищує масу Головного поясу астероїдів у Сонячній системі. Подальші дослідження до 2002р. показали, що, скоріше за все, у цьому диску відбувається формування астероїдів чи планет, подібно до того, як це відбувалося у Сонячній системі. Але несподіванкою для астрономів стало те, що диск пилу з такими параметрами взагалі не повинен існувати на цьому місці. Він розташований так близько до самої зорі, що, за теоретичними розрахунками, всі його складові частинки та частинки матерії повинні давно упасти на **дзета-Зайця** під впливом гравітації. Значить, *існує джерело поповнення матерії в акреційному диску і цей теплий диск пилу, можливо, приховує пояс астероїдів.*

Усі відкриті екзопланети були супутниками слабких, непримітних зірок, а відомі **яскраві зорі** були або **подвійними** (*Ригель, Антарес, Толіман*), або **оточеними пиловими протопланетними дисками** (*Вега, Фомальгаут*). У липні 2006р. у найяскравішій зорі сузір’я



Близнюків – **Полукса** - була відкрита екзопланета, яка масою втричі перевищує Юпітер і робить один оберт навколо зорі коловою орбітою за 590 днів.

Рис.5.5. Зоря віком 1 млн. років у південному сузір’ї Вовка – **GQ Вовка** та її **екзопланета GQ Вовка b** (фото *ESO VLT NACO*, 2004р.). Маса екзопланети **GQ Вовка b** удвічі більша за Юпітер, її радіус - у 1,8 разів більший за Юпітер та перевищує земний радіус у 100 разів, температура на поверхні екзопланети **GQ Вовка b** +1700⁰С

Проведений аналіз знімків космічного телескопу *Hubble* (експеримент *SWEEPS*) області простору (два відсотки площі Сонця) поблизу видимого центру Чумацького Шляху дозволив виділити серед спостерігаємих 180 тисяч зірок цієї області екзопланети тільки у 16 з них, причому у 2-х зірок наявність екзопланет була підтверджена візуальними спостереженнями за допомогою наземних телескопів. Усі екзопланети були відкриті поблизу *червоних карликів* з температурою поверхні біля $+4000^{\circ}\text{C}$ і відносяться до категорії „*гарячих Юпітерів*” – *масивних газових гігантів, які обертаються дуже близько навколо центральних зірок орбітами, радіуси яких порівнювані із розмірами самих зірок*. П’ять екзопланет мають період обертання менше 24 годин, а найшвидша з них (екзопланета *SWEEPS-10*) виконує один оберт навколо зорі за 10 годин орбітою радіусом 1млн. 200тис км.(менше діаметра Сонця). Маса екзопланети повинна бути не менше 1,6 маси Юпітера, температура поверхні на освітленому боці сягає $+3000^{\circ}\text{C}$. Відсутність планет-гігантів на менших орбітах біля зірок пояснюється можливістю їх випаровування під дією випромінювання останніх. Дослідження інфрачервоного космічного телескопу *Spitzer* засвідчили, що немає ніякої різниці в інфрачервоній яскравості денних та нічних сторін, по крайній мірі, у трьох екзопланет-„*гарячих Юпітерів*” (*55 Pegasa, HD 179949 b* і *HD 209458 b*), які розташовані на віддальх 50, 100 і 147 світлових років від Землі. Причина – розжарені сильні вітри швидкістю до 14 500км/год., які переносять розігріту речовину на неосвітлену частину, що і вирівнює температури на обох боках екзопланет. Більш того, температура цих планет приблизно однакова (біля $+925^{\circ}\text{C}$) - за рахунок того, що вони розташовані на майже однакових віддальх від своїх зірок – близько 8млн. км (у кілька разів менше віддалі від Меркурія до Сонця).

Згідно сучасних комп’ютерних моделей, „гарячі Юпітери” являють собою закономірну стадію еволюції планетних систем, в яких газові гіганти формуються на віддалених орбітах, потім поступово мігрують до середини планетних систем за рахунок їх гальмування речовиною протопланетного диску і навіть мають тенденцію до падіння на центральну зорю. Але у кожному третьому експерименті формуванню „зони заселення” (області простору з існуванням на стійкій орбіті планети земного типу з рідкою водою на її поверхні) сприяли саме ці планети-гіганти. Екстраполяція отриманих телескопом Hubble даних на всі зорі Чумацького Шляху вказує на ймовірність існування понад 6 млрд. таких (чи навіть більших) екзопланет, як Юпітер.

На початок жовтня 2018р. достовірно підтверджено існування у нашій Галактиці 3851 екзопланети у 2871 планетній системі. Відкрито 14 маленьких кам’яних планет, розміри яких порівнювані з розмірами Землі і які обертаються навколо зірок, схожих на Сонце. Майже 30 екзопланет розміщені в «смузі життя» - там, де наявні умови достатні для існування рідкої води. У 2017р. космічний телескоп «Кеплер» підкрив перший екзомісяць в екзопланети Кеплер-1625в у системі зорі-жовтого карлика Кеплер-1625. Група астрофізиків (університет Оклахомв, США) за допомогою гравітаційного лінзування вперше підтвердила існування екзопланет за межами Чумацького Шляху.

Більшість екзопланет відносяться до класу газових гігантів - вони є гігантськими газовими кулями масою близько 100 земних, що схожі на Юпітер - їх біля 170 (80% від загальної кількості). Актуальним стає пошук супутників цих екзопланет (екзомісяців) із близькими до земних складом та фізичними характеристиками.

Відкриті екзопланети діляться на **2 великі групи**:

- „**гарячі юпітери**” на низьких колових орбітах з радіусом менше 0,15а.о. та періодом обертання менше 10 діб і зі значними масами у 0,6-0,7 мас Юпітера. Такі екзопланети-гіганти можуть бути тільки газовими, можливо – з твердим ядром, вони не можуть підтримувати життя через відсутність твердої поверхні, а через близькість до власних зір вони нагріті до дуже високої температури у декілька сотень і навіть тисяч градусів;

- **більш масивні об’єкти** на високих еліптичних орбітах із ексцентриситетом аж до 0,9 та періодом обертання менше 10 років, які за масами відрізняються між собою значним чином.

Умовна межа між коловими короткоперіодичними (кілька діб) та переважно ексцентричними орбітами з періодом понад 30 діб знаходиться на віддалі 0,15-0,16а.о. від своїх зірок. Причина своєрідного вибору мас екзопланет, що обертаються низькими коловими орбітами, лежить, ймовірно, у механізмі повільного сповзання (міграції до центральної зорі) екзопланет з високих орбіт, на яких вони сформувалися, на низькі орбіти навколо зірок. Деякі групи орбіт короткоперіодичних екзопланет мають понижену або підвищену заселеність у

порівнянні з рештою. Групування екзопланет за орбітальними періодами також нерівномірне і чомусь зростає поблизу періодів 3-5 діб. Переважна більшість екзопланет з радіусом орбіти понад 0,16 а.о. мають дуже великі і навіть гігантські ексцентриситети орбіт, які у Сонячній системі існують тільки у комет та у деяких астероїдів.

Виділяють **5 різновидів екзопланет**:

- найпоширенішими є **54 прохолодних „водних гігантів”**, які названі так через те, що, враховуючи віддаль від зорі, вони закутані хмарами водяної пари або крижаних кристалів і повинні мати вигляд блакитно-білих куль;

- наступними за поширенням йдуть **42 „гарячих Юпітери”**, які розташовані зовсім близько від своїх зірок (у 10 разів ближче, ніж Земля від Сонця). Допускається наявність у них атмосфери коричнево-багряного кольору із темними смугами хмар із графітового пилу. Температура зовнішніх оболонок „гарячих юпітерів”, у залежності від орбіти та властивостей атмосфери, лежить у межах $+600-1000^{\circ}\text{C}$. Хмарний покрив повинен складатися із найдрібніших частинок MgSiO_3 , Fe і Al_2O_3 , причому у надхмарній атмосфері повинні бути присутніми пари води, метану і оксиду титану. Існує кілька типів „гарячих юпітерів”: екзопланета з транзитами *HD 149026 b* являє собою новий клас – має невеликий радіус (0,725 радіуса Юпітера і 0,85 радіуса Сатурна); за своїм розташуванням відповідає „гарячим юпітерам”, але має масивне ядро із важких елементів до 0,7 всієї її маси із розрахунковою густиною $5,52/\text{см}^3$, що досягає 1,2 маси Сатурна (115 мас Землі). Період її обертання навколо зорі складає 2,8766 земних діб орбітою, радіус якої всього у 6 разів перевищує радіус самої зорі.

Відкрито кілька **низькоорбітальних „дуже гарячих юпітерів”**, зокрема екзопланета *OGLE TR-56* – самий короткоперіодичний „гарячий юпітер” із відомих – масою у 1,45 мас Юпітера та радіусом орбіти тільки у 3,3 млн. км (0,02 а.о.) навколо материнської зорі, що у 50 разів більша за Сонце. До „дуже гарячих юпітерів” також відноситься одна із відкритих екзопланет на віддалі 63 світлових років від нас – *HD 189733 b* (період обертання 2,219 доби, радіус орбіти 0,0313 а.о, температура поверхні $+900^{\circ}\text{C}$, атмосфера – пари H_2O , CO , CO_2 , CH_4);

- дещо прохолодніше на **37 теплих Юпітерах** – екзопланетах із атмосферою синювато-бузкового відтінку з температурами від $+200^{\circ}\text{C}$ до $+600^{\circ}\text{C}$;

- у ще більш віддалених та прохолодних областях розташовані **19 „сірчаноокислих гігантів”**. Скоріше за все, вони укутані хмарним покривом із краплин сірчаної кислоти – таким, як на Венері. З’єднання сірки можуть надавати цим екзопланетам жовтувато-білого забарвлення;

- ще далі від зірок розташовані вже згадувані „водні гіганти”, а у найхолодніших областях знаходяться **13 „двійників Юпітера”**, які за температурою (від -100°C до -200°C на зовнішній поверхні хмарного покриву) аналогічні Юпітеру і, мабуть, мають близький до нього вигляд – з блакитно-білими та бежевими смугами і білими та оранжевими плямами крупних вихорів-ураганів.

Крім цих газових гігантів за останні два роки знайдено півтора десятки екзопланет менших за розмірами. За масою (від 6 до 20 мас Землі) вони отримали назву „**Нептун**”. Серед них виділяється **4 різновиди**:

- найчастіше зустрічаються „**гарячі Нептуни**”, їх відкрито **9**. Вони розташовані близько до своїх зірок і дуже нагріті;

- знайдено **2 „холодних Нептуни”** чи „**крижані гіганти**”, аналогічні Нептуну;

- сюди ж віднесені і **2 „суперЗемлі”** – масивні планети земного типу, які не мають густих та потужних атмосфер планет-гігантів. Одна із них вважається „**гарячою суперЗемлею**” із дуже ймовірною вулканічною активністю та нагадує за своїми характеристиками Венеру. На іншій – „**холодній суперЗемлі**” – допускають наявність водяного океану.

Вже відкрито кілька подібних до Землі екзопланет з масами менше юпітеріанських – астрономи перейшли у пошуках екзопланет „юпітеріанський бар’єр” і ці нові екзопланети, за сучасними уявленнями, повинні бути твердими (із скельних порід) та мати густі атмосфери. Але, згідно розрахунків, усі вони обертаються надзвичайно близько навколо зірок з періодами 2-3 дні і, подібно Меркурію, мають розжарений бік зі сторони зорі та протилежний, закований космічним холодом бік, бо припливні сили зірок давно зупинили їх обертання навколо своїх осей.

Проте відкрита екзопланета Гліз 581 g – «сестра» Землі: вона більша за Землю у 3-4 рази, її діаметр перевищує земний на 20-40%, а маса – на 75%, період обертання орбітою (рік) триває 37 діб. За оцінками астрономів, склад атмосфери екзопланети близький до земної і на ній існує вода у рідкому стані, а температура змінюється залежно до пори року від -12°C до -30°C . Екзопланета не обертається навколо власної осі - на одному боці завжди день, на іншому – ніч.

Найвіддаленіша екзопланета відкрита в сусідній галактиці Туманність Андромеди.

Екзопланетні системи існують і біля пульсарів (нейтронних зірок). Пульсар **PSR B1257+12**, що знаходиться на віддалі 1300 світлових років від Землі і імпульси якого повторюються кожні 6,2 мілісекунди, має **3 екзопланети**, які віддалені від нього у тому ж співвідношенні 0,39 / 0,72 / 1,0, що і віддалі від Сонця до планет Меркурія, Венери та Землі. Маси екзопланет досить значні: 0,2, 4,3 та 3,6 земної, періоди їх обертання орбітою 25, 67 і 98 земних діб, а самі екзопланети піддані періодичному опромінюванню інтенсивними потоками електронів, позитронів та гамма-випромінювання. Залишається загадковою їх наявність біля пульсару, який виник після вибуху наднової зорі. У 1999р. підтвердилась наявність **екзопланети** масою у 5 мас Юпітера у пульсара **PSR B1620-26**.

Крім того, у космосі зустрічаються гігантські екзопланети, які не обертаються навколо певного об'єкту Всесвіту, а „вільно плавають” у безмежному просторі – це так звані **планетарі**. Вони схожі на коричневих карликів і ще не зовсім зрозуміло, де за масою закінчуються власне екзопланети та починаються коричневі карлики, тим більше, що деякі з коричневих карликів мають власні екзопланети. Планетарі були відкриті в областях формування молодих зірок у туманностях Хамелеона і Оріона (13 об'єктів), поблизу зорі Сигма Оріоніс (у насиченій молодими зорями віком 1-5млн. років другій частині сузір'я Оріон у 1000 світлових років від нас), де у просторі між зорями спостерігається 15 невеликих об'єктів із температурами всього $+1700 - +2200^{\circ}\text{C}$ та масами 5-15 юпітеріанських мас. Спільним для всіх відкриттів було вільне плавання планетарів усередині скупчень молодих зірок, які формуються далеко одна від одної і не зв'язані гравітаційними силами. Пошуки планетарів у межах закритих (зв'язаних гравітаційними силами) кульових скупчень зірок віком біля 10 млрд. років не дали результатів. Екзопланети були відкриті біля зірок другого покоління, які багаті важкими хімічними елементами. Давні кульові скупчення зірок утворилися у ті часи молодого Всесвіту, коли таких елементів у космосі ще було мало (вони утворюються тільки у надрах наднових зірок і розсіюються у космосі при їх вибухах). Можливо, що утворенню планет у кульових скупченнях зірок мішає тіснота, або ж вони там утворюються, але потім викидаються зі своїх орбіт через хаотичні гравітаційні впливи зірок, що пролітають поблизу.

Більшість із відкритих екзопланет, які обертаються навколо власних зірок, або занадто гарячі, або занадто холодні, або являють собою безжиттєві газові гіганти.

Проходження екзопланети по диску зорі триває кілька годин, вперше транзит спостерігали у екзопланети **HD 209458 b**. Зоря **HD 149026** відноситься до класу GO з досить спокійною фотосферою, вона старіша за Сонце (віком 5,2млрд. років і пройшла тривалий шлях еволюції), знаходиться на віддалі 150 світлових років від Землі та має стару екзопланетну систему. Її єдина відома екзопланета **HD 209458 b** має період обертання 3,524738 земних діб орбітою радіусом 0,045а.о. Орбітальне розташування екзопланети біля власної зорі вказує на водень (як основну складову) із, ймовірно, незначною домішкою гелію. Екзопланета - гігант **HD 209458 b** повинна мати потужне, аналогічне Юпітеру, магнітне поле складної структури.

Пізніше були відкриті ще дві екзопланети з транзитами – **HD 149026 b** і **TrES-1** – всі вони „гарячі юпітери” на низьких орбітах. Ймовірність знайти екзопланету з транзитами на високій орбіті дуже незначна. Найдавнішою із відомих зараз зовнішніх планет вважають екзопланету **PSR B1620-26 c** (2003р.), яка розташована у скупченні зірок **M4** на віддалі 5000 світлових років від Землі. Її вік – 13млрд. років, а маса в 2,5 разів перевищує масу Юпітера.

Найбільшими зараз екзопланетними системами є системи із **6 екзопланет зорі Глізе 581 та 5 екзопланет зорі 55 Рака**, що розташована на віддалі 41 світлового року від Землі і відноситься до того ж спектрального класу, що і наше Сонце („жовтий карлик”), але має дещо меншу масу і відповідно світимість: **перша екзопланета** є газовим гігантом розміром з Нептун

та періодом обертання менше трьох земних діб; *друга* – за масою схожа на Юпітер, її віддаль до центральної зорі – близько 18млн. км, рік на ній триває дещо більше двох тижнів; *третья екзопланета* за своїми фізичними характеристиками нагадує Сатурн, а за орбітальними – Меркурій (великі півосі орбіт – відповідно 35,9 та 57,9млн.км); *четверта* – за масою в 45 разів перевищує Землю і повинна бути схожою на планети-гіганти без твердої поверхні - обертається коловою орбітою радіусом 116,7млн. км (всього в 1,28 разів менше середнього радіуса земної орбіти) і знаходиться в межах „смуги життя” – умовної сфери, у межах якої температурний режим сприятливий для існування живих організмів на звичній нам „водній” основі. На прикладі Сонячної системи, подібні об’єкти обов’язково мають супутники, маса яких значно ближча до земної і вони складаються переважно із криги, але на околицях четвертої планети зорі **55 Cancri** вони скоріше будуть нагадувати великі водяні кулі, своєрідні „супутники-океани”; *п’ята екзопланета* – найвіддаленіша і рухається на віддалі 868млн. км від зорі і робить повний оберт за 14 років, а її орбіта та маса близькі до відповідних параметрів Юпітера.

Згідно проведених спостережень, зараз у Всесвіті відомі: *звичайні екзопланети*, що обертаються навколо звичайних зірок; *екзопланети*, які обертаються навколо *коричневих карликів*; *екзопланети нейтронних зірок* (радіопульсарів) та „*бездомні*” екзопланети - *планетарі*, які вільні від гравітаційного впливу більш масивних об’єктів і просто літають у міжзоряному просторі (недавно відкритий подвійний планетар без центральної зорі).

Тобто, крім утворення планет „традиційним” шляхом із протопланетного акреційного диску навколо зірок, можливі і інші варіанти їх формування, що зумовлюють їх появу навколо пульсарів, одиноких планетоподібних тіл чи об’єктів на великих віддальх від центральної зорі. Космос проявляє дивовижне та екзотичне, за нашими уявленнями, різноманіття – серед уже відкритих екзопланет виділяють гарячу надЗемлю, гарячий Юпітер, голубий гігант, водний гігант, близнюк Юпітера, теплий Плутон тощо.

Якщо таких планетних систем у космосі дійсно багато, то це допускає існування у Всесвіті планет земного типу і можна допустити, що на них існує життя.

6. МАЙБУТНЄ ВСЕСВІТУ

Вивчення майбутнього Всесвіту принципово відрізняється від вивчення його розвитку в минулому, яке залишило свої сліди і вивчаючи які вчені перевіряють правильність свої гіпотез та теорій. Картина майбутнього – це завжди екстраполяція, пряма перевірка якої неможлива.

Космологічна модель А. Ейнштейна описувала *обмежений у просторі, але нескінченний у часі Всесвіт постійних розмірів із відсутніми у просторі межами*, бо вигинаючись у просторі Всесвіт став замкненим. Після того, як було відкрито розширення Всесвіту, космологи зосередились на *моделі нескінченного Всесвіту, розширення якого постійно уповільнюється під впливом сил тяжіння*. У 1980-их роках теоретики допрацювали модель, доповнивши її *початковою фазою дуже прискореного розширення (інфляції)*. Спостереження останніх 6 років показали, що 5 млрд. років тому *розширення Всесвіту почало прискорюватися*.



Рис.6.1. Моделі розширення Всесвіту.

Всесвіт уповільнює своє розширення (ліворуч), досягає своїх нинішніх розмірів (у світлій рамці) за найкоротший час. Він може *колапсувати* чи *нескінченно розширюватися*, зменшуючи темпи до нуля. *Розширюючийся із постійною швидкістю* Всесвіт (у центрі) старший за попередній – для досягнення сучасних розмірів йому потрібно більше часу. Всесвіт, який *розширюється з прискоренням* (праворуч), ще давніший за віком. Швидкість його розширення зростає під дією антигравітаційних сил вакууму.

Що чекає Всесвіт у кінцевому результаті – продовження розширення, колапс чи надзвичайно швидке розширення, яке називають Велике розлітання (чи Великий Розрив) – залежить від природи таємничої „Темної Енергії”, що прискорює розширення Всесвіту.

У кінці XX століття вчені вважали, що у формуванні Всесвіту приймали участь дві гігантські сили. *Першою силою* був Великий Вибух з його неймовірно швидким розширенням на ранній стадії. Потім, за уявленнями, енергія та маса почали конденсуватися у частинки, потім - в атоми, зорі і галактики, що віддалялися між собою з великою швидкістю (можливо, це і є швидкість розширення самого простору). Але *друга сила* - їх взаємне тяжіння (гравітація) - поглинала кінетичну енергію розширення і поступово уповільнювала їх рух. Вияснення характеру цього уповільнення, на підставі фізичних і астрофізичних знань про зараз відомий вченим Всесвіт, повинно дати відповідь на ймовірний сценарій подальших розвитку подій, коли, у залежності від густини матерії у Всесвіті, можливі **два варіанти розвитку**:

- якщо густина матерії досить велика, то гравітація буде здатна зупинити розширення Всесвіту, що неминуче зміниться стисканням, і приведе до другого сингулярного стану – тоді можливий новий Великий Вибух, який створить новий всесвіт і, таким чином, цикл існування всесвіту не припиниться ніколи (**теорія закритого космосу**);

- якщо густина матерії у Всесвіті мала, то існуючих сил гравітації недостатньо для зупинки процесу нескінченного розширення Всесвіту, доки не вичерпається вся енергія, всі зорі та галактики не припинять свого існування (**теорія відкритого космосу**).

Сучасні астрономічні спостереження показують, що середня густина видимої речовини у Всесвіті приблизно в 30 разів менше критичного значення (біля 10^{-29} г/см^3 при сучасній швидкості розширення Всесвіту), яке відокремлює один варіант майбутнього від іншого.

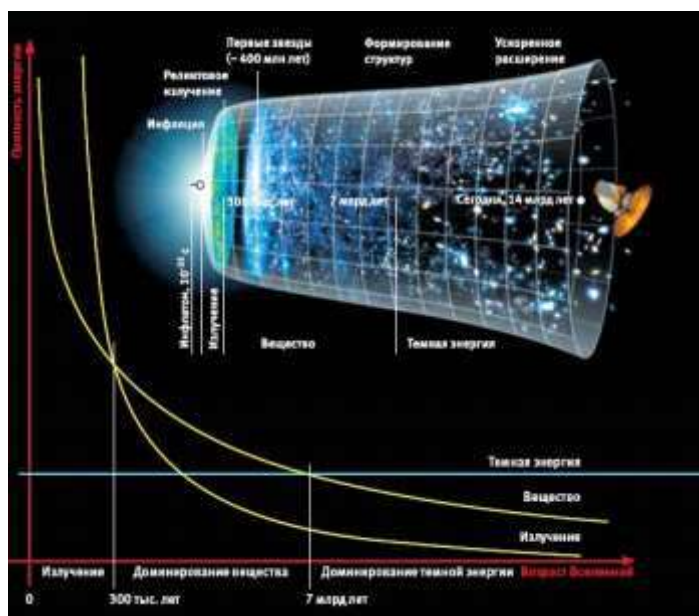


Рис.6.2. Сучасна модель розвитку Всесвіту

Якщо Всесвіт розширюється нескінченно, то з часом всі зорі погаснуть. Сонце закінчить свою активну еволюцію через декілька мільярдів років через стадію *Червоного гіганта* і перетвориться у *білий карлик* розміром із Землю, який буде поступово охолоджуватися.

Масивніші за Сонце зорі проживуть ще менше і, в залежності від своєї маси, перетворяться або у *нейтронні зорі* діаметром у десятки кілометрів, або у *чорні дірки* – об’єкти з дуже сильним гравітаційним полем, яке поглинає все, навіть світло. Можливий і катастрофічний вибух у кінці “життєвого шляху” зорі із її повним руйнуванням. Зорі, які менш масивні ніж Сонце, проживуть довше, але і вони рано чи пізно перетворяться в холодні карлики. Наступить час, коли повністю вичерпаються запаси ядерної енергії і речовини, нові зорі не будуть народжуватися, а старі перетворяться в холодні тіла та чорні дірки. **Зіркова ера** еволюції Всесвіту закінчиться через 10^{14} років (це в 10 000 разів більше за час, який прийшов від початку розширення Всесвіту до наших днів).

Для майбутнього *галактик* – зоряних систем, які складаються із сотень мільярдів зірок, що обертаються навколо гігантських чорних дірок у центрах галактик – істотними будуть дуже рідкі в наш час процеси, коли окремі зорі набувають більшої швидкості в результаті гравітаційної взаємодії з іншими зорями і стають міжгалактичними мандрівниками. Зорі будуть поступово покидати галактику, а її центральна частина буде стискатися. Кінцевий результат стискання – це *надмасивна чорна дірка*, яка поглине решту зірок центральної частини

галактики, а близько 90% зір ще раніше розсіється в просторі. Процес руйнування галактик закінчиться приблизно через 10^{19} років, коли всі зорі вже давно погаснуть.

Для подальших процесів визначальною буде передбачувана сучасною фізикою *нестабільність ядерної речовини*, коли протон, час існування якого приблизно 10^{32} років, є все ж нестабільною елементарною частинкою і кінцевий продукт його розпаду – один позитрон (\bar{e}), випромінювання у вигляді фотонів (γ), нейтрино (ν) і можливо, одна чи декілька електронно (\bar{e})-позитронних ($e\bar{e}$) пар. Таким чином, через 10^{32} років ядерна речовина повністю розпадеться, але цей розпад ще задовго до цього строку почне відігравати важливу роль в еволюції Всесвіту. Утворені позитрони будуть взаємодіяти з електронами і взаємознищуватися (процес *анігіляції*), перетворюючись у фотони, які, разом із уже існуючими фотонами, будуть нагрівати матерію. Тільки нейтрино можуть вільно покидати зорю і виносити близько 30% всієї енергії розпаду.

Після 10^{32} років вся ядерна речовина повністю розпадеться, зорі і планети перетворяться в фотони та нейтрино, а залишаться лише чорні дірки колишніх масивних зір та надмасивні чорні дірки центрів колишніх галактик. Ядерна речовина розсіяного у Всесвіті газу також розпадеться через 10^{32} років, але утворені позитрони не будуть взаємознищуватися з електронами – через крайню розрідженість газу ймовірність зустрічі цих частинок неймовірно мала, тому Всесвіт буде наповнений розрідженою *електронно-позитронною плазмою*.

Таким чином, *після повного розпаду ядерної речовини у Всесвіті будуть існувати чорні дірки, електронно-позитронна плазма, фотони і нейтрино. Основна частина маси Всесвіту буде зосереджена в фотонах та нейтрино – розпочнеться ера випромінювання.*

Через подальше розширення Всесвіту густина маси випромінювання (фотонів і нейтрино) буде падати швидше, ніж середня густина електронно-позитронної плазми та чорних дірок, а, враховуючи те, що густина матерії буде з часом визначатися її масою в чорних дірках (де її значно більше, ніж в електронно-позитронній плазмі), то через 10×10^{32} років на зміну ері випромінювання прийде **ера чорних дірок**.

Але і чорні дірки не вічні. У полі тяжіння поблизу чорної дірки відбувається народження елементарних частинок, причому в чорних дірках із масою близько зоряної та більше утворюються *кванти випромінювання*. Такий процес веде до зменшення маси чорної дірки, вона поступово перетворюється у випромінювання – у фотони, нейтрино, гравітони. Процес цей дуже повільний, але поступово, за 10^{96} років, всі чорні дірки перетворяться у випромінювання і воно знову стане домінуючим за масою у Всесвіті – наступить **нова ера випромінювання**. Нескінченне розширення Всесвіту знову зумовить більш швидке зменшення густини випромінювання, ніж густини електронно-позитронної плазми і через 10^{100} років домінуючою знову стане *плазма* – крім неї у Всесвіті не залишиться практично нічого.

Таким чином, *коли наш Всесвіт досягне віку 10^{100} років у ньому залишаться тільки електрони і позитрони, які будуть розсіяні в просторі із неймовірно малою густиною: одна елементарна частинка буде припадати на об'єм, рівний 10^{185} об'ємам всього видимого зараз Всесвіту.*

На перший погляд картина еволюції Всесвіту в далекому майбутньому песимістична – поступовий розпад, деградація, розсіювання. Чи означає це, що в майбутньому зупиняться всі фізичні процеси, не буде відбуватися активних рухів фізичних форм матерії, неможливе існування будь-яких складних систем, а тим більше розуму в його будь-якій формі ?.

Звичайно, з нашої точки зору всі процеси в майбутньому будуть надзвичайно повільні, але і масштаби простору тоді будуть зовсім іншими. Відмітимо, що мова йшла про процеси, які витікають із надійно встановлених людством фізичних законів, але в майбутньому виникнуть умови, недоступні зараз навіть при експериментах (наднизькі температури, низькі густини тощо) і можливі прояви сил та процесів, які зараз нам абсолютно невідомі. А ці сили і процеси можуть корінним чином змінити ситуацію.

Наприклад, розпад вакууму і його перетворення в умовах Всесвіту, що нескінченно розширюється, в реальну речовину (як це відбулося в перші долі часу після Великого Вибуху). Теорія допускає можливість, що в далекому майбутньому густина маси вакууму (вона надзвичайно мала, але вона існує) дискретно перейде в реальні частинки та античастинки,

даючи початок новим фізичним процесам. Подібний «фазовий перехід» вакууму із народженням нової матерії може зупинити розширення Всесвіту і привести до його стискування.

Крім того, всі сучасні розрахунки фізиків та астрофізиків проводилися із розрахунком того, що нейтрино являють собою випромінювання – тобто, ці частинки подібно фотонам мають масу тільки тому, що завжди рухаються із швидкістю світла, а їх маса спокою дорівнює нулю. Сучасна фізика допускає, що маса нейтрино хоча і дуже мала, але не нульова (приблизно 0,00005 маси електрону). Вплив цього факту на долю Всесвіту може бути наступним: якщо маса нейтрино дуже мала, то сили тяжіння створені ними теж дуже малі і вони не впливають на темпи розширення Всесвіту. Але у далекому майбутньому сумарна маса нейтрино в електронно-позитронній плазмі Всесвіту може перевищити критичну густину (10^{-29}г/см^3) і в майбутньому сили гравітації нейтрино зупинять розширення Всесвіту. Це може відбутися набагато раніше, ще до повного розпаду всієї ядерної речовини і навіть раніше, ніж погаснуть всі зорі. Тоді в майбутньому Всесвіт знову чекають надгаряча фаза із надбурхливими фізичними процесами.

Таким чином, при будь-якому можливому сценарію розвитку Всесвіту, його теоретичне майбутнє уявляється різноманітним і захоплююче цікавим.

7. ТЕМНА РЕЧОВИНА І ТЕМНА ЕНЕРГІЯ

Застосування з другої половини XX століття радіоастрономії у космічних дослідженнях забезпечило надходження нової, величезної за об'ємом і принципово нової за якістю, інформації, що лише частково співпадала з інформацією про Всесвіт, яка раніше була здобута за допомогою оптичної астрономії. Електромагнітний діапазон досліджень радіотелескопами дозволив вченим відкрити невідомі раніше космічні об'єкти та явища, що не знаходили місця у рамках пануючої наукової парадигми.

Зараз домінує гіпотеза, згідно якої *планети Сонячної системи утворилися із решток газово-пилової хмари, гравітаційне стискування якої зумовило народження Сонця*. Вважається, що планети – це своєрідний конденсат із космічного „сміття”, яке залишилося після утворення Сонця. Але гіпотеза не пояснює обертання навколо власної осі Венери, Урана і Плутона у напрямі, який є протилежним напрямку обертання решти планет. Більш того, Уран немов би котиться по своїй орбіті лежачи на боці. Вияснилося, що у газових планет-гігантів Юпітера і Сатурна є супутники із зворотним напрямом обертання, що протиречить закону збереження моменту обертання. Більш того, супутники однієї і тієї ж планети можуть бути зовсім різними за своїм походженням. Наприклад, супутники Юпітера Калісто і Ганімед складені на 60-70% із води, тоді як на їх сусіді Іо немає навіть її слідів. Питання про походження планет Сонячної системи стає ще більш заплутаним після відкриття планет навколо сусідніх зірок. Ці екзопланетні системи мають дивовижні, з точки зору встановлених для Сонячної системи закономірностей, властивості, зокрема неймовірно великі маси, дуже близькі до центрального світила орбіти тощо.

Сучасна точка зору на походження Всесвіту, яка базується на ідеї Великого Вибуху стверджує, що *Всесвіт ізометрично розширюється і Галактики рівномірно розбігаються в усі боки, віддаляючись одна від другої*. Можливо, що для більшості досліджених галактик це справедливо, але існує багато винятків з цих правил – із біля 80 найбільш детально досліджених космічним телескопом *Hubble* галактик, 18 взаємодіють між собою, а певна частина їх приймає участь у взаємних, часто лобових, зіткненнях, причому ці зіткнення не несуть їм загибель, а спричиняють процес нового утворення зірок. Галактики, які зближуються, взаємодіють між собою за правилами, що протиречать нашому розумінню фізичних закономірностей, причому взаємодіючі галактики викидають у космос речовину зі швидкістю, яка повинна перевищувати швидкість світла тощо.

В арсеналі вчених є *факти, які вказують на існування у Всесвіті безіменної поки що сили, яка утримує його від тотального колапсу і протидіє силам гравітації стиснути все до стану сингулярності*. Перш за все це факт розбігання галактик. Незважаючи ні на що, галактики за

13,73±0,12 млрд. років свого існування істотно віддаляються між собою і неясно, чи зможе яка-небудь сила гравітації зупинити цей процес. Згідно теорії походження Всесвіту, після Великого Вибуху перші 7 млрд. років він розширювався із деяким уповільненням під дією всесвітнього тяжіння, коли рухом галактик управляла матерія через гравітацію. Виявляється, відразу після Великого Вибуху у Всесвіті переважала **Темна Речовина** (разом із звичайною матерією) над **Темною Енергією** і він, обплутаний зв'язками гравітації, розширювався з дедалі меншою швидкістю. При віці Всесвіту 7 млрд. років їх співвідношення було 10/1. Приблизно 6,3 млрд. років тому співвідношення „темних сил” змінилося на користь *Темної Енергії* і у русі галактик відбулися зміни - замість уповільнення галактики стали прискорюватися, причому їх прискорення експоненційно зростає на протязі останніх 5 млрд. років.

Темна Енергія була відкрита у 1998р. двома незалежними групами астрономів. Тоді було доказано, що найвіддаленіші наднові зорі світають менш яскраво, чим необхідно за теорією. Виявилось, що вони розташовані від нас значно далі, чим повинні були знаходитися, якщо б розширення Всесвіту уповільнювалося звичайними гравітаційними силами. Для пояснення цього феномену була висунута гіпотеза про те, що Всесвіт вміщує у своєму складі не тільки звичайну і Темну (невидиму) Матерію, але також і компонент, який здатний на космологічних відстанях протистояти гравітаційній взаємодії матерії, який пізніше назвали Темною Енергією.

Всесвітнє тяжіння змінилося всесвітнім відштовхуванням, або *антигравітацією* і нині (останні 1,2 млрд. років) Всесвіт розширюється із дедалі більшою швидкістю під дією *Темної Енергії*, але розбігання галактик відбувається досить своєрідно. Цей процес нагадує „втікання із наздогананням”, так як окремі галактики не розбігаються, а біжать назустріч і вступають у взаємодію, але без безпосереднього зіткнення зірок. Через 14 млрд. років це відношення стане зворотнім, 1/10 (чи 10/1, але на користь *Темної Енергії*).

Якщо закон тяжіння був би єдиним у цій ситуації, то сили гравітації неминуче викликали би масове взаємне зближення і зіткнення зірок взаємодіючих галактик, які не можуть не притягуватися між собою, але нічого подібного не спостерігається. Причому у деяких зоряних скупченнях немає навіть кругового обертання і відсутня відцентрова сила, яка утримує, наприклад, Землю від її падіння на Сонце. На картах Всесвіту видно нерівномірності у розподілі галактик у просторі - їх скупчення розташовані по периферії великих, діаметром до 300 млн. світлових років, пустот (*лакун*) у вигляді своєрідних *смуг, волокон* або *спіралей*, що зв'язують надскупчення між собою. *Лакуни* та *волокна* навколо них – найбільші об'єкти Всесвіту. У лакунах не видно речовини, але це не значить, що її там немає. Вважають, що там знаходяться галактики із тьмянних зірок-карликів, які непомітні у найпотужніші телескопи, а також масиви невідомої матерії. Без існування цих масивів неможливо було отримати баланс гравітаційних сил та густини речовини, який спостерігається в оточуючому нас космосі. Але проведені за допомогою радіотелескопів експерименти показали, що густина всього того, що розташоване поміж видимими об'єктами, в три рази нижче критичної величини, яка допускається розрахунками. Прийшлося допустити, що у Всесвіті крім *Темної Речовини* присутня і *Темна Енергія*.

Спостереження навколишнього Всесвіту за допомогою мікрохвильового зонду Вілкінсона (WMAP, NASA) вперше дозволили скласти карту температурних флуктуацій реліктового випромінювання (рис.1.2). Розшифрування цієї інформації змусило переглянути звичні уявлення про наш Всесвіт. Результат був приголомшливим: *усе, що ми бачимо у Всесвіті, - зорі, газ, пилові туманності і майже відкриті чорні дірки – складають всього 0,4% його маси. Випромінювання дає 0,005%. З високою ймовірністю існують відносно масивні, але ще не відкриті, об'єкти, що не світаються і на які приходить основна маса звичної нам речовини - біля 3,6%. Таким чином, повна маса усіх відомих нам об'єктів з баріонної матерії – весь світ звичайної речовини Всесвіту - становить не більше 5% від маси Всесвіту (рис.8.4).*

23% маси приходить на Темну Речовину – приховану масу баріонної і не баріонної матерії, де остання являє суміш із невідомих ще науці елементарних частинок та, у залежності від своїх властивостей, може бути холодною чи гарячою. Темна Речовина Всесвіту ніяк не взаємодіє з випромінюваннямлюбих видів, нічого не випромінює сама і

нічого не поглинає (рис.8.4). Але вона підвладна закону всесвітнього тяжіння і проявляє себе, концентруючись навколо галактик та інших масивних об'єктів. **Крім тяжіння Темна Маса нічим себе не проявляє.** Мабуть, більш правильно буде сказати, що *галактики та інші масивні об'єкти концентруються навколо скупчень таємничої Темної Меси, якої більше у шість разів.*

Допускається, що Темна Речовина складається з невідомих елементарних частинок (*нейтраліно*) із парадоксальними властивостями: вони не реагують на випромінювання і не взаємодіють між собою; вони не повинні розпадатися менше, ніж за 14 млрд. років; навіть у момент Великого Вибуху вони залишалися холодними і ніяк не реагували на його мільярди градусів; вони нерелятивістські (повільні) і тому були здатні створювати гравітаційні неоднорідності прямо у момент Великого Вибуху.

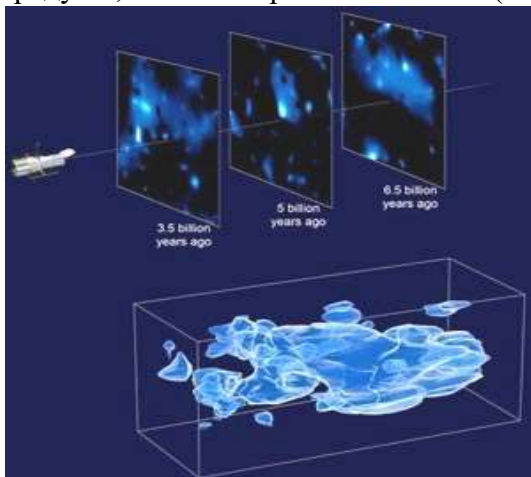


Рис.7.1. Тривимірна карта розподілу Темної Матерії у Всесвіті віком після 6,5 млрд. років – невидимого каркасу, на якому розміщена звичайна матерія. Карта охоплює 500 тисяч віддалених галактик за межами Темної Матерії, створена за даними спостережень телескопів *Hubble* і *Subaru* та техніки гравітаційного лінзування. Аналізуючи отримані викривлення у формах галактик, були визначені властивості „лінз”, які створені Темною Матерією, і була визначена її маса та положення у просторі Всесвіту

Прихована маса може вміщуватися у *чорних дірках, коричневих карликах* (проміжних утвореннях - між зорями та планетами - з невеликими масами надр, у яких температури і тиск недостатні для ядерних реакцій, а дуже низька світимість цих об'єктів пояснюється енергією гравітаційного стискування) і *МАЧО* (масивні компактні об'єкти, що своєю гравітацією створюють у космосі ефекти лінзи), спостерігати які можливо завдяки їх гравітаційному впливу на видиму матерію у Всесвіті. *Недавно у сузір'ї Діви (центр нашого надскупчення галактик), на віддалі 50 млн. світлових років від Землі, за допомогою радіотелескопів відкрита гравітаційна аномалія, своєрідний „колодязь” із масою, що в 100 млн. разів перевищує масу Сонця - перша невидима галактика VIRGO HI21, яка майже повністю складається із загадкової темної речовини.*

Вчені допускають, що темних невидимих галактик може бути значно більше у Всесвіті, ніж звичайних видимих. Дослідження супутника *WMAP* свідчать, що **Темна Маса вже існувала у момент Великого Вибуху, а утворені на ранній стадії Всесвіту неоднорідності у розподілі маси Темної Речовини і зумовили формування перших протогалактик.**

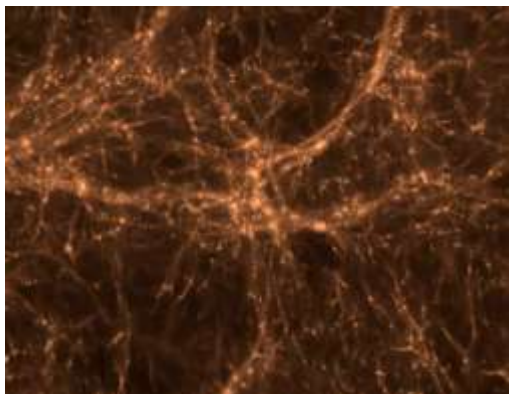


Рис.7.2. Розподіл темної матерії в Молочному Шляху 13,3 млрд. років тому, через 460 млн. років після Великого Вибуху (ілюстрація *J. Diemand, M. Kuhleni і P. Madau*)

Раніше вважали, що Темна Речовина існує тільки у скупченнях галактик, потім її „допустили” у нашу Галактику, де на неї приходить приблизно стільки ж маси, скільки і на звичайну матерію, але якщо звичайна матерія формує центральний диск Галактики, то Темна Речовина більш рівномірно розподілена у гало, що охоплює Галактику гігантською сферою. У межах Сонячної системи густина звичайної речовини у мільйони разів більша, ніж у космічному просторі. Вже відомо, що у кубі міжгалактичного простору із стороною 170 тис. км (половина віддалі до Місяця) знаходиться у середньому всього 1 грам звичайної речовини та біля 10 грамів Темної Речовини. Але це ще не означає, що Темної Речовини немає навколо і у середині нас.

Неочікуване підтвердження існування таємничої Темної Матерії астрономи отримали під час аналізу даних розподілу мікрохвильового випромінювання по небесній сфері, які були отримані

космічним радіотелескопом WMAP. Виявилось, що це випромінювання має більшу інтенсивність у тій частині неба, на яку проєктуються центральні області Молочного Шляху. Властивість згущуватися поблизу центрів зоряних систем повинна мати тільки Темна Матерія. Вона взаємодіє із звичайною (баріонною) матерією тільки гравітацією і до тепер проявляла себе за рахунок притягування нею „видимих” об’єктів – у першу чергу галактик. Однією із передбачених властивостей цієї матерії є властивість *анігіляції* – взаємознищення „темних” частинок при їх зіткненнях.

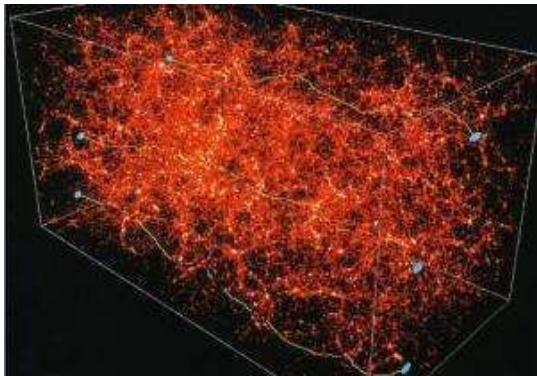


Рис.7.3. *Викривлений Всесвіт*. Промені світла на своєму шляху від далеких галактик до Землі пронизують заповнений хмарами Темної Речовини простір. Гравітаційні сили таких хмар відхиляють промінь від прямолінійного шляху. За А.Ейнштейном, саме ці звивисті лінії і є прямими, тобто геодезичними лініями нашого кривого простору

Якщо „звичайна” матерія анігілюється тільки з антиматерією із повним перетворенням в енергію у вигляді гамма-випромінювання, то взаємознищення „темних” частинок супроводжується викидами інших частинок, які вже реєструються сучасними приладами, та генеруванням електромагнітного випромінювання. Форма і розмір „мікрохвильового ореолу” навколо центру Чумацького Шляху вказують на високу густину Темної Матерії. Згідно із проведеними розрахунками рівнянь *теорії суперсиметрії*, аналогічна аномалія може існувати у присутності частинок, що в 100-1000 разів масивніші за протон і які аналогічні теоретично доказаним „нейтраліно”. При анігіляції їх, зокрема, утворюються важкі *кварки* та ще більш загадкові „*бозони Хіггса*”.

Решта **72% маси** Всесвіту представлена таємничою, про існування якої недавно навіть не підозрювали, **Темною Енергією** – *силою, про яку відомо тільки те, що це матерія з позитивною густиною і від’ємним, що є неймовірним, тиском, яка протидіє у вакуумі гравітації і зумовлює віддалення галактик та всіх інших небесних тіл Всесвіту одне від другого із все зростаючою швидкістю* (рис.8.4).

Якщо енергетична густина Темної Енергії у Всесвіті **постійна у часі** - у майбутньому Всесвіт продовжить своє прискорене розширення. Якщо ж густина Темної Енергії (антигравітація) **з часом буде зростати**, то швидкість прискореного розширення настільки збільшиться, що у майбутньому це приведе до розриву галактичних скупчень та окремих галактик і їх розсіюванню у Всесвіті – відбудеться *Великий Розрив*. У тому випадку, коли густина Темної Енергії **зменшується**, то розширення Всесвіту зміниться стисканням і з часом він стиснеться до стану сингулярності, тобто відбудеться *Великий Грюк*.

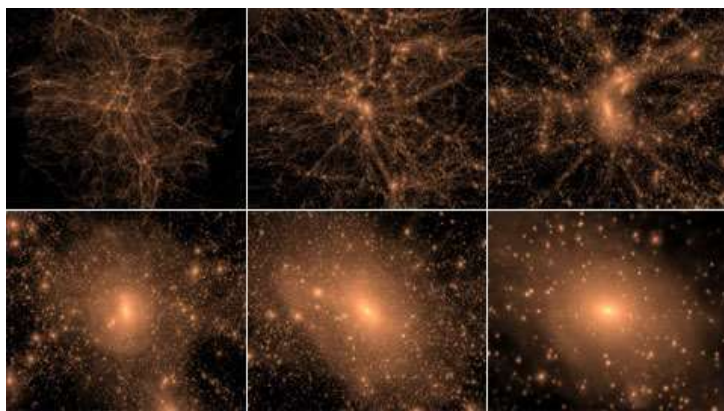


Рис.7.4. Розподіл *Темної Матерії* в Молочному Шляху в різні періоди часу. Верхній ряд: 12,8; 12,0 і 10,3 млрд. років тому; нижній ряд: 6,8; 3,4 млрд. років тому і зараз (за J. Diemand, M. Kuhleni і P. Madau)

Можливо, що *баріонна речовина* (об’єкт усіх фундаментальних досліджень – протони і нейтрони з їх структурами) не є основою світобудови, а породжувана нею гравітація поступається першістю Темній Енергії. Вивчення розташування 250 тисяч галактик також підтвердило існування переважаючої Темної Енергії, що протидіє гравітаційним силам. **Що собою являють Темна Матерія і Темна Енергія - на сьогоднішній день, з впевненістю ніхто сказати не може. Джерело антигравітації - Темна Енергія - являє собою більшу таємницю, ніж Темна**

Матерія. Можливо, вплив Темної Енергії був завжди, але він став проявлятися лише тоді, коли гравітація Всесвіту стала слабкішою через його розширення.

Найбільш ймовірний кандидат на роль Темної Енергії – **вакуум космічного простору**, що наповнює Всесвіт. Цей вакуум, як свідчить квантова теорія, переповнений елементарними частинками, які парами (наприклад, електрон-позитрон) миттєво появляються з вакууму та зникають у ньому і мають певну енергію – і тільки при певних умовах фізикам вдається зафіксувати деякі з цих частинок. В 1967-68рр. акад. Я.Б. Зельдович доказав, що знаменита космологічна постійна - лямбда-коефіцієнт (Λ) Ейнштейна – це не кривизна простору, а *густина енергії вакууму*, а теоретичні розрахунки показали неймовірне - ця **енергія пуского простору переважає ВСЮ енергію Всесвіту (за формулою $E=mc^2$) в одиницю зі 120 нулями разів, а сам вакуум, з його постійними при розширенні Всесвіту густиною та тиском, повинен мати від’ємний тиск у той час, коли у газовому середовищі тиск позитивний і падає відповідно з розширенням**. Порівняння густини вакууму і Темної Речовини показали, що на той же куб міжгалактичного простору із стороною 170 тис. км (із 1 грамом звичайної речовини та 10 грамами Темної Речовини) приходить 25 грамів Темної Енергії, якщо її виразити як густину маси. На відміну від Темної та звичайної матерії, розподіл яких нерівномірний, **вакуум є самим щільним середовищем з його абсолютно однаковою, скрізь і завжди у всьому Всесвіті, густиною та від’ємним тиском. Саме від’ємний тиск вакууму створює антигравітацію. На вакуум ніде і ніщо не впливає. На відміну від реліктового випромінювання, рух відносно вакууму ніяк не проявляється – вакуум завжди попутний.**

Таким чином, ймовірність майбутнього стиснення Всесвіту до стану сингулярності (теорія *закритого космосу*) опинилася під серйозним сумнівом. У 1998р. астрономи вирішили встановити швидкість уповільнення розширення Всесвіту, але отримали дані, які не вписувалися у класичну модель утворення Всесвіту – замість уповільнення відкрили прискорення. Космологи були дуже здивовані – чому розширення Всесвіту прискорюється, адже галактики, що розкидані Великим Вибухом, повинні взаємно притягуватися і уповільнюватися. Новий закон тяжіння можливо вивести із *теорії струн*. Зокрема, ця теорія передбачає, що **у Всесвіті є додаткові виміри, куди зникає гравітація, а її витікання може викривлювати просторово-часовий континуум і спровокувати космічне прискорення.**

Сучасна *теорія струн* допускає, що **наш простір має набагато більше вимірів, але всі вони, крім трьох звичних нам, „згорнуті” у тонкі трубочки та існують тільки у мікросвіті**. Згідно цієї теорії, закон всесвітнього тяжіння повинен порушуватися на надмалих віддальх. Охоплюючи єдиними формулами усі сили, які існують у природі, теорія струн однозначно прийшла до висновку, що таке об’єднання можливе при умові існування не тримірного, а багатомірного у мікросвіті фізичного простору. Крім загальновідомих трьох вимірів, решта їх є дуже короткими і вони не сягають у нескінченність, так як за всіма цими додатковими вимірами фізичного простору багатомірний простір немов би згорнутий у тонкі (приблизно 10^{-35} м) трубочки. Ці трубочки (за теорією) на досить малих віддальх збільшують гравітацію між тілами у десятки тисяч разів. Деякі з цих згорнутих вимірів можуть бути „напівзгорнуті” і мати видиму товщину до 0,1мм, а це (за новими розрахунками) дозволяє їм проникати у наш тримірний простір. У цьому випадку, як говорять теоретики, гравітація перетікає із одних вимірів у інші і тоді вона повинна додаватися до нашої „тримірної гравітації”. Таким чином, сила гравітації між двома тілами повинна бути більша, ніж допускає закон Ньютона (згадайте про прискорення розбігання галактик у Всесвіті і про Темну Енергію).

Доля нашого Всесвіту повністю визначається Темною Енергією, якщо її властивості залишаються незмінними у часі. Всесвітнє тяжіння у міжгалактичних масштабах своє відіграло і більше не повернеться. При подальшій еволюції Всесвіту антигравітація з часом зростає, але поблизу масивних тіл ефекти всесвітнього тяжіння залишаються незмінними і тому в уже існуючих галактиках, а тим більше у Сонячній та інших планетних системах, мало що зміниться – від антигравітації вони захищені своєю масою. Антигравітація проявляється на космічних масштабах, що приводить до прискорення

взаємного віддалення галактик та поступового їх відходу за горизонт бачення Всесвіту, а майбутній видимий простір Всесвіту буде ставати все більш та більш пустим.

Перші недавні результати виконання проекту SNLS (*Supernovae Legacy Survey*) за один рік спостережень за спалахами 71 наднової зорі на віддаль від 2 до 8 млрд. світлових років недвозначно показали, що з гіпотезою про непостійне прискорення Всесвіту прийдеться, можливо, розпрощатися, тому що у цей відрізок часу після Великого Вибуху розширення Всесвіту залишалося постійним. Крім того, ретельна перевірка супутникових спостережень за космічним мікрохвильовим фоном виявила помилковість початкової їх інтерпретації. Саме з цих помилкових результатів раніше визначили кількість „темної енергії” – ті горезвісні 72%.

Зіставивши відкоректовані дані з наземними спостереженнями в телескопи, вчені вияснили, що без гіпотези „Темної Енергії” можна спокійно обійтись: необхідний рівень коливань космічного фону можуть забезпечити галактики викидами зоряного газу. Але програма SNLS розрахована на п'ять років, кількість спостережень зростає на порядок, і точність їх вчені хочуть поліпшити у 2-3 рази. Залишається почекати нових результатів та нових висновків.

8. МУЛЬТИВЕРСУМ

Теорія еволюції Всесвіту все ще далека до повного сформування. Згідно сучасних висновків учених, *Всесвіт, який доступний спостережанню, не є унікальним явищем. Цей „наш Всесвіт” розміщується в ще більш грандіозному Мега-Всесвіті або, у так званому, Мультиверсумі. Явище, яке відоме під назвою Великий Вибух, було зовсім не поодиноким та унікальним, а всього лише один із багатьох у послідовності ланцюгової реакції „великих вибухів”, за допомогою яких Всесвіт нескінченно відтворює та відновлює самого себе. Першопричиною всього цього є прискорене розширення Всесвіту під впливом потужної антигравітації. Вчені називають таку сітку утворених поєднаних всесвітів Численням Всесвітом. Життя можливе у багатьох всесвітах.*

Згідно теорії розширення (інфляційної теорії) існує нескінченний *Мега-Всесвіт*, який заповнений квантовою просторово-часовою „піною”, в якій формуються нові і нові бульбашки (рис.8.1). Деякі з них роздуваються і опадають, інші – вроді нашої – після роздування вибухають вогняною кулею. Протопухир, із якого утворився наш Всесвіт, повинен був спочатку виникнути як квантова флуктуація в піні незліченних мініпросторів-часів і тільки випадково, підхоплений силою відштовхування та роздувшись, цей пухир через миттєвий Великий Вибух утворив наш світ. Якщо це так, то інші вибухи могли утворити інші всесвіти. У решті Мега-Всесвіту процес утворення бульбашок вічний, а наш Всесвіт для Мега-Всесвіту є неймовірно малою величиною. Моделлю нашого Всесвіту є куля, що постійно роздувається і від якої в свою чергу може відокремитися наступний пухир, а від нього – подальший тощо (рис.8.1). Момент утворення кожного пухиря буде сприйматися у якості великого вибуху, а утворені при цьому всесвіти можуть значним чином відрізнятися від попередніх.

За сучасними уявленнями, ми можемо жити в одному із численних та одночасно існуючих всесвітів, які можуть абсолютно відрізнятися між собою фізичними законами.

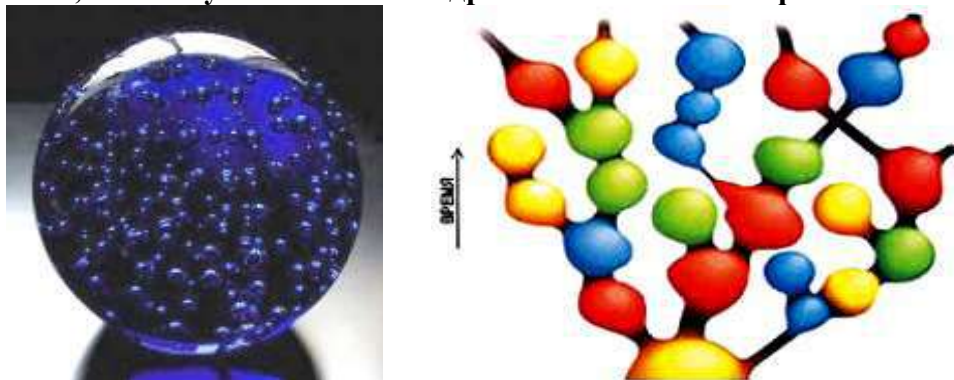


Рис.8.1. Коректно уявити собі Мультиверсум складно: бульбашки-всесвіти, які розміщені у деякій загальній сфері, - дуже приблизна аналогія. Праворуч: новий вигляд нашої Всесвіту - один із багатьох

Але навіть ця теорія все ще залишає місце для відповіді на те: **з чого все це починається та отримується ?**. Відповідь вчених проста і логічна – **із нічого**. Правда, у цьому „нічого” час від часу фіксують нові субатомні частинки, які виникають із небуття за рахунок енергії, яку вони набувають із енергетичних полів. Такі квантові флуктуації вдалося спостерігати в середині існуючих атомів. Вони і могли дати початок нашому Всесвіту.

Фізикам Університету Нью-Мексико та Національної лабораторії в Лос-Аламосі (США) вдалося успішно провести телепортацію ядра атому вуглецю у межах однієї молекули без переміщення самої речовини. Вчені знищили ядро атома в одному місці, попередньо знявши з нього інформацію про масу, структуру та спін, і переправили цю інформацію в інше місце молекули, де і матеріалізували її в нове ядро. Сама речовина при цьому не приймала участі у переміщенні.

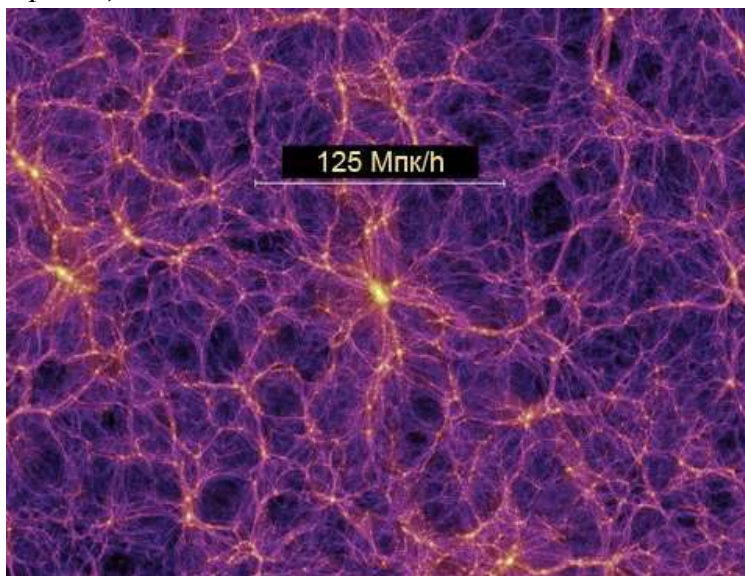


Рис.8.2. Практично вся баріонна речовина Всесвіту (4%) зосереджена в його *мегаструктурі*, яка являє собою гігантську об'ємну сітку, у вузлах пересічень волокон якої знаходяться *галактичні скупчення* – найбільші структурні одиниці нашого світу. Простягнуті між вузлами цієї сітки „нитки” складені газом, який має мізерну густину та високу температуру (від ста тисяч до десяти мільйонів градусів), що заставляє їх зоріти у рентгенівському діапазоні (ілюстрація *Virgo Consortium*, у масштабі: 1 мегапарсек (Мпк) віднесений до постійної (h) Хаббла; $1\text{Мпк} \approx 3,1 \times 10^{13}\text{км}$, а $h \approx 74,2 \pm 3,6\text{км/сек}$)

Таким чином, видимий нам Всесвіт – тільки мізерний у поперечнику об'єм Космосу – **93 мільярди із трильйонів світлових років**. Він вміщує **100 млн. надскупчень галактик, 25 млрд. галактичних груп, 350 млн. великих і 7 трильйонів карликових галактик і, у сукупності, біля 3×10^{22} зірок**.

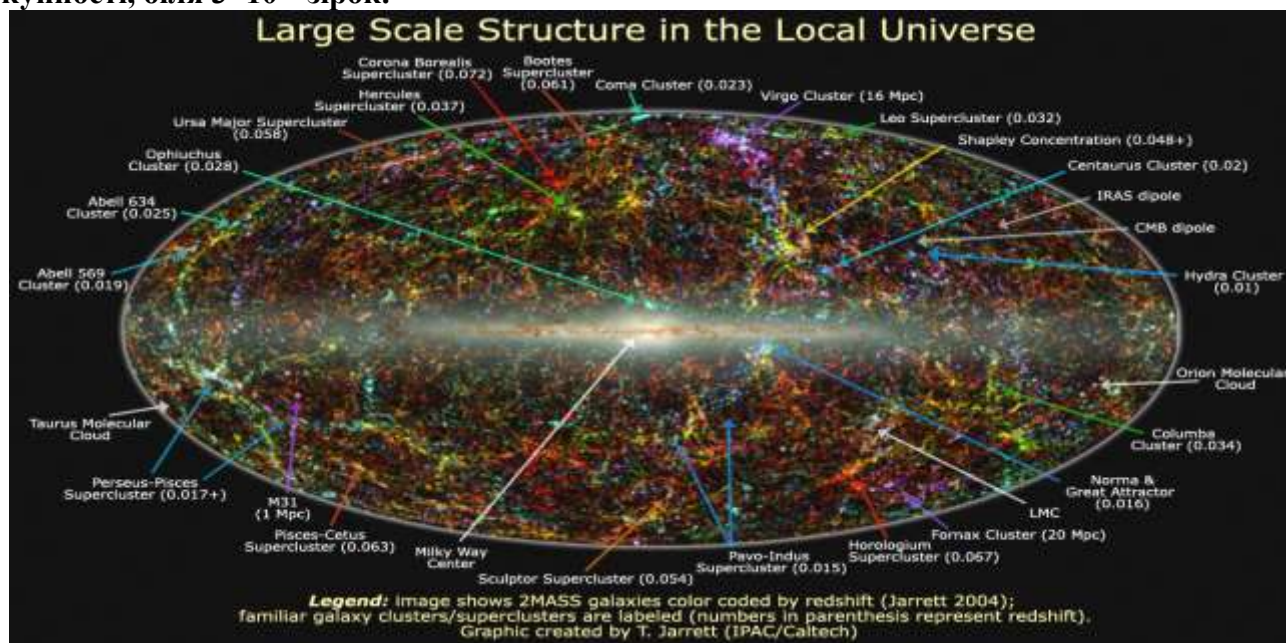


Рис.8.3. Крупномасштабні структури оточуючого Всесвіту з понад 500 млн. зірок Чумацького Шляху та 1,5 млн. галактик. У центрі, в площині Чумацького Шляху, розміщені *зорі*. За межами галактичної площини крапками зображені *галактики*, які з'єднані гравітаційними силами у *скупчення*, що об'єднані у *надскупчення*, які, у свою чергу, формують ще більш *крупні масштабні структури* Всесвіту (огляд неба на хвилі 2мкм в інфрачервоному діапазоні, графіка *T.Jarrett, IPAC/Caltech*)

За межами того, що ми бачимо, розташовані неосяжні космічні простори, де можуть існувати такі ж закони природи. Ми бачимо Всесвіт у тих межах, куди дійшло світло, а якщо вийти за ці межі, то можливо побачити інші зони такого ж розміру. Але якщо існують різні міні-всесвіти, то в кожному із цих незалежних між собою утвореннях при низьких температурах може бути зовсім інша, ніж у нас, фізика. Немає підстав вважати, що простір скрізь однаковий. Завжди є можливість того, що будуть відкриті принципово інші властивості, якості, структури, системи, рівні, які підпорядковані зовсім іншим законам природи.

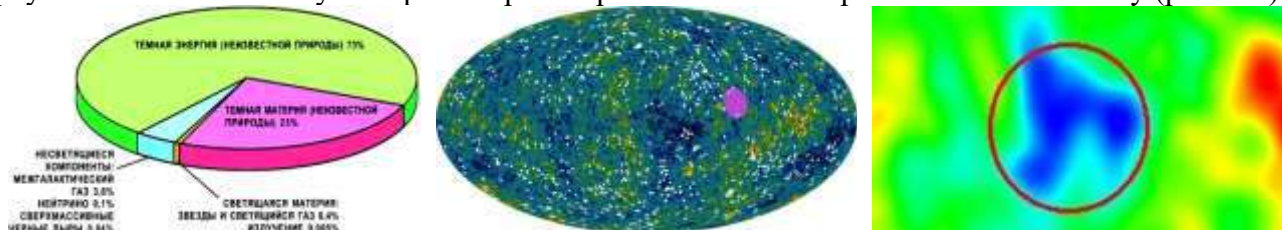


Рис. 8.4. Ліворуч: розподіл *Темної Енергії*, *Темної Речовини* та *баріонної матерії* у Всесвіті.

Ці відкриття та висновки астрофізиків і космологів можуть свідчити про наявність меж нашого Всесвіту; про наявність паралельного всесвіту, з яким на момент Великого Вибуху був сплутаний (на рівні квантової механіки) наш Всесвіт; про мультиверсумну версію походження Темного потоку як результату взаємодії між нашим Всесвітом та всесвітом-сусідом чи братом (враховуючи їх спільне народження). Дані, які отримані із мікрохвильового фону, вперше можуть надати нам інформацію про те, що лежить зараз за межами нашого світу і принести докази, що він – тільки маленька частина куди більш масштабної реальності.

1. Проаналізуйте гіпотези походження Сонячної системи.
2. Охарактеризуйте суть моделі космохімічної еволюції Сонячної системи.
3. Які групи та різновиди екзопланет виділяють на сучасному етапі вивчення космосу?
4. Назвіть специфічні особливості будови екзопланетних систем інших зірок.
5. Які можливі варіанти майбутнього Всесвіту?
6. Дайте визначення Темній Матерії, Темній Енергії, Темному потоку; їх роль та значення.
7. У чому полягає суть теорії еволюції Всесвіту за сучасними висновками вчених?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. АЛЬФА И ОМЕГА. Краткий справочник (Коллектив авторов). Пер. с эстонского. - 4-е изд., Таллинн: „Принтэст“, 1991- С.41-61. 2. Бронштэн В.А. Планеты и их наблюдения.- М.: Наука, 1979. 3. Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция.- М.: Наука, 1990.- 294с. 4. Волков А. Между звездами и планетами//Знание-сила.- 2005.- №5.- С.16-21. 5. ВСЕЛЕННАЯ, пространство, время//Международн. науч.-попул. журн.- К.: ЧП «Третья планета».-2003-2010.- №№ 1-78. 6. Голдсмит Г., Оун Т. Поиски жизни во Вселенной.- М.: Мир, 1983. 7. Жарков В.Н. и др. Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. –М.: Наука, 1971.- 384с. 8. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет.- М.: Наука, 1983.- 416с. 9. Жарков В.Н., Трубицин В.П. Физика планетных недр.- М.: Наука, 1980. 10. Жиль Спэрроу. ВСЕЛЕННАЯ. Как наблюдать и изучать звездное небо. Пер. с англ.- М.: БММ АО, 2002.– 224с., ил. 11. Зигель Ф.Ю. Путешествие по недрам планет.- М.: Недра, 1988.- 217с. 12. Кауфман У. Планеты и луны.- М.: Мир, 1982. 13. Когда на Марсе еще шли дожди//Sciense.-2004, V.305, №5680.- P.26, 78(США). 14. Космос: альманах./Под рук. Капицы С.П.- М.: В мире науки, 2006.- 224с., ил. 15. Ксанфомалити Л.В. Планеты, открытые заново.- М.: Наука, 1978. 16. Ксанфомалити Л.В. Планета Венера.- М.: Наука, 1985. 17. Ксанфомалити Л.В. Парад планет.- М.: Наука, Физматлит, 1997. 18. Ксанфомалити Л.В. Экспедиция «Гюйгенс»//Наука и жизнь.- 2005.- №3.- С.2-9. 19. Ксанфомалити Л.В. Планетные системы звезд//Наука и жизнь. 2006.-№11.- С.2-9. 20. Ксанфомалити Л.В. «Бомжи» в Солнечной системе//Наука и жизнь.- 2006.-№11.- С.28-29. 21. Ксанфомалити Л.В. Планетные системы звезд//Наука и жизнь. 2006.-№12. С.60-68. 22. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы.- М.: Наука, 1986. 23. Мороз В.И. Физика планеты Марс.- М.: Наука, 1978. 24. Мороз В.И., Кораблев О.И., Родин А.В. Новые исследования Марса и сравнительная планетология//Природа.- 2005.- №9.- С.25-33. 25. Митрофанов И.Г. Поиски воды на Марсе//Природа.- 2005.- №9.- С.34-43. 26. Новиков И. Черные дыры и Вселенная.- М.: Мол. гвардия, 1985.- 190с., ил. 27. Нудельман Р. Космические сиротки//Знание-сила. 2006. №5. –С.82-86. 28. Планета Венера (атмосфера, поверхность, внутреннее строение).- М.: Наука, 1989.- 482с. 29. Планета Земля.//Древо познания. - Marshall Cavendish Partworks Ltd., 1995-2006/Пер. с англ.- К.: ДП Маршалл Кавендиш Украина, 2001-2006. 30. Симоненко А.Н. Астероиды.- М.: Наука, 1985. 31. Система Сатурна. Сб. статей.- М.: Мир, 1990.- 464с. 32. Спутники планет. Сб. материал.- М.: Мир, 1980. 33. Хазен А. Ключи к проблеме жизни на Марсе//Наука и жизнь.- 2001.- №1- С.21-26. 34. Чурюмов К.И. Кометы и их наблюдение.- М.: Наука, 1980. 35. Шевченко В.В., Родионова Ж.Ф. Глобус Марса - еще одна планета у вас на столе.- М.: ГАИШ, 1993. 36. Шевченко В.В. Современная селенография.- М.: Наука, 1980. 37. Шевченко В.В. Луна и ее наблюдение.- М.: Наука, 1983. 38. Шишков Ю. Долгое становление экосистемы Земли//Наука и жизнь.- 2001.- №12.- С.3-6. 39. Уилл Ф.Л. Семья Солнца.- М.: Мир, 1984. 40. Універсальний Словник-Енциклопедія.- Київ: Вид-во "Ірина", 1999.- 1551с. 41. National Geographic.- 1975.- 147, №6.-P. 858-869. 42. National Geographic.- 1975.- 147, №2.-P. 284-294. 43. National Geographic.- 1999.-196, №3.-P. 126-139. 44. National Geographic.- 2000.-197, №1.-P. 44. 45. Simon and Jacqueline Mitton. Astronomy. - Oxford University Press, 1994.– 160p.

КОРИСНІ САЙТИ INTERNET

АВСТРАЛІЙСЬКІ АСТРОНОМІЧНІ ТОВАРИСТВА
AUSTRALIAN ASTRONOMICAL SOCIETIES
WWW.ATNF.CSIRO.AU

АМЕРИКАНСЬКА АСОЦІАЦІЯ СПОСТЕРІГАЧІВ ПЕРЕМІННИХ ЗІРОК
AMERICAN ASSOCIATION OF VARIABLE STAR OBSERVERS
WWW.AAVSO.ORG

АМЕРИКАНСЬКЕ АСТРОНОМІЧНЕ ТОВАРИСТВО
AMERICAN ASTRONOMICAL SOCIETY WWW.AAS.ORG

АНГЛОМОВНИЙ ПОШУКОВИЙ КАТАЛОГ САЙТІВ НА АСТРОНОМІЧНУ ТЕМАТИКУ
[HTTP://ASTRONOMYLINKS.COM](http://astronomylinks.com)

АСОЦІАЦІЯ СПОСТЕРІГАЧІВ МІСЯЦЯ ТА ПЛАНЕТ
ASSOCIATION OF LUNAR AND PLANETARY OBSERVERS
[WWW.LPL.ARIZONA.EDU/ALPO/](http://www.lpl.arizona.edu/alpo/)
БРИТАНСЬКА АСТРОНОМІЧНА АСОЦІАЦІЯ
BRITISH ASTRONOMICAL ASSOCIATION
[WWW.AST.CAM.AC.UK/-BAA](http://www.ast.cam.ac.uk/-BAA)

ЕНЦИКЛОПЕДІЯ ПОЗАСОНЯЧНИХ ПЛАНЕТ
[WWW.OBSPM.FR/ENCYCL.HTML](http://www.obspm.fr/encycl.html)

ЄВРОПЕЙСЬКЕ АСТРОНОМІЧНЕ АГЕНТСТВО
SCI.ESA.INT

ЖУРНАЛ „АСТРОНОМІЯ”
[WWW.ASTRONOMY.COM/HOME.ASP](http://www.astronomy.com/home.asp)

ЖУРНАЛ „НЕБО І ТЕЛЕСКОП”
[WWW.SKYPUM.COM/SKYTEL.SHTML](http://www.skypum.com/skytel.shtml)

КАРТИ ПЛАНЕТ, АСТЕРОЇДІВ ТА СУПУТНИКІВ
[WWW.HEAVENS-ABOVE.COM](http://www.heavens-above.com)

КОСМІЧНИЙ ТЕЛЕСКОП ХАББЛА
[HUBBLE.STSCI.EDU](http://hubble.stsci.edu)

ЛАБОРАТОРІЯ РЕАКТИВНОГО РУХУ
[WWW.JPL.NASA.GOV](http://www.jpl.nasa.gov)

МІЖНАРОДНА МЕТЕОРНА ОРГАНІЗАЦІЯ
INTERNATIONAL METEOR ORGANIZATION
[WWW.IMO.NET](http://www.imo.net)

НАСА
[WWW.NASA.GOV](http://www.nasa.gov)

НАУКА – ФІЗИКА, АНАЛІЗ, ГІПОТЕЗИ, ВІДКРИТТЯ
[HTTP://INAUKA.RU](http://inauka.ru)

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ „МЕМБРАНА”
[HTTP://WWW.MEMBRANA.RU/ARTICLES/](http://www.membrana.ru/articles/)

НОВИНИ КОСМОНАВТИКИ
[HTTP://COSMOWORLD.RU](http://cosmoworld.ru)

НОВИНИ НАУКИ
[HTTP://GRANI.RU/SOCIETY/SCIENSE](http://grani.ru/society/sciense)

ПЛАНЕТНЕ ТОВАРИСТВО
THE PLANETARY SOCIETY
[WWW.PLANETARY.ORG](http://www.planetary.org)

ПОШУК ПОЗАЗЕМНОГО РОЗУМУ
[WWW.SETI.ORG](http://www.seti.org)

ТАЄМНИЦІ РІДНОГО ДОМУ
[WWW.SOLARVIEWS.COM](http://www.solarviews.com)

ЩОДЕННО ПОНОВЛЮВАНИЙ СПИСОК САЙТІВ ПО АСТРОНОМІЇ
[WWW.CV/NRAO.EDU/FITS/WWW/ASTROWEB.HTML](http://www.cv.nrao.edu/fits/www/astroweb.html)

ПІДРУЧНИК

КИСЕЛЕВИЧ Леонід Сергійович

ПОРІВНЯЛЬНА ПЛАНЕТОЛОГІЯ

Коректор
Оригінал-макет автора



КИСЕЛЕВИЧ Леонід Сергійович закінчив геологорозвідувальне відділення Київського геологорозвідувального технікуму (1975) та геологічний факультет Київського державного університету імені Т.Г. Шевченка (1982). Кандидат геолого-мінералогічних наук (1989), доцент кафедри загальної та історичної геології геологічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (1998). Академік Міжнародної Академії безпеки життєдіяльності (2006).

