

ЩО ТАКЕ ПЛАНЕТИ? ОДИНАДЦЯТЬ РОКІВ ПО ТОМУ

Володимир ЗАХОЖАЙ, професор кафедри астрономії та космічної інформатики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, доктор фізико-математичних наук;

Сергій КУЗЬМЕНКОВ, професор кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету, доктор педагогічних наук

Генеральна асамблея Міжнародного астрономічного союзу (МАС), що відбулася у Празі у серпні 2006 р., після численних дискусій запропонувала відповідь на запитання, що його винесено в заголовок статті. На цій асамблеї було прийнято резолюцію стосовно визначення поняття «планета» і нової класифікації об'єктів Сонячної системи. Її остаточний вигляд такий [10]:

1. *Класична планета* – це небесне тіло, що:
 - a) обертається навколо Сонця;
 - b) має достатню масу для того, щоб самогравітація перевищувала твердотільні сили і тіло могло прийняти гідростатично врівноважену (близьку до сферичної) форму;
 - c) очищує околиці своєї орбіти (тобто поряд із планетою немає інших, порівнянних з нею тіл).
2. *Карликова планета* – це небесне тіло, що:
 - a) обертається навколо Сонця;
 - b) має достатню масу для того, щоб самогравітація перевищувала твердотільні сили і тіло могло прийняти гідростатично врівноважену (близьку до сферичної) форму;
 - c) не очищує околиці своєї орбіти;
 - d) не є супутником (планети).
3. *Усі інші об'єкти*, що обертаються навколо Сонця, охоплює поняття «малі тіла Сонячної системи».

У 2010 р. в цьому журналі була надрукована стаття одного з авторів з історією даного питання, коментарями і доповненнями до цього визначення [9]. Минуло сім років, а із часу прийняття резолюції – майже 11 років. Чи змінилися погляди астрономів і автора статті на цю проблему? Спробуємо розібратися.

У той самий рік, коли відбулася згадана Генеральна асамблея МАС, був опублікований каталог планет Сонячної системи і екзопланет, в якому ще не було поділу планет на великі (класичні) та карликові [12]. Належність до них

визначалася за ознакою наявності у планет ядер згідно із запропонованим їх визначенням одним із авторів цієї статті [6]. За вказаною ознакою було розраховано мінімальні маси планет залежно від їхньої середньої густини, що дало змогу до планет як космічних тіл віднести великі планети Сонячної системи, їх великі супутники, три астероїди Головного поясу (Цереру, Весту та Палладу) та низку об'єктів поясу Койпера, розміри яких визначали за їх абсолютною величиною, а густини приймали близькими до густини води. За наступний період стали доступними для аналізу зображення всіх класичних планет Сонячної системи та їх супутників і вище зазначених астероїдів, які за вказаною ознакою можна віднести до планет. Кількість відкритих екзопланет з того часу збільшилась у 18 разів й у 2017 р. перевищила 3600.

Отже, за минулий період було накопичено багато нової важливої інформації щодо планет, і це дає змогу зробити певні узагальнення й висновки.

По-перше, як і у попередній статті [9], наголошуємо, що вимога обертання планети навколо своєї зорі, як це зроблено для планет Сонячної системи, не має бути обов'язковою. Адже, за сучасними уявленнями, можливе існування планет окремо від зір – у міжзоряному просторі, оскільки внаслідок гравітаційних збурень, спричинених або сусідніми планетами з ексцентричними орбітами, або близьким прольотом іншої зорі вони можуть бути викинуті зі своїх планетних систем.

По-друге, спираючись на пункт b) резолюції по планетах, визначимо критичні розміри й масу космічного тіла, за яких його можна вважати планетою. Очевидно, що космічне тіло не можна вважати сферичним, якщо максимальна висота гір на ньому є порівнянною з радіусом цього тіла [8]. Максимальну висоту гір H_{\max}

можна визначити з умови, що тиск на основі гори не має перевищувати границю пружності порід σ , що лежать в її основі, інакше основа необоротно деформується, і гора просяде. Для однорідної гори довільної форми і густиною ρ матимемо рівність [8]:

$$\xi g H_{\max} = \sigma, \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує форму гори (наприклад, за циліндричної форми $\xi = 1$, за конічної – $\xi = 1/3$). Із (1) отримуємо:

$$H_{\max} = \frac{\sigma}{\xi \rho g}. \quad (2)$$

Зазначимо, що для гір максимальної висоти, що трапляються на планетах Сонячної системи, задовільне походження з формулою (2) досягається за значення $\xi \approx 1$ (висота Евересту на Землі становить ≈ 9 км, гори Олімп на Марсі ≈ 26 км).

Покладаючи у граничному випадку $H_{\max} = R_{\min}$, де R_{\min} – критичний (мінімальний) радіус сферичного космічного тіла, і враховуючи, що маса такого однорідного тіла $M_{\min} = 4\rho R_{\min}^3/3$, для граничних параметрів сферичної планети отримуємо:

$$R_{\min} = \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{3\sigma}{\pi\xi G}} \approx \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{\sigma}{\xi G}}, \quad (3)$$

$$M_{\min} = \frac{1}{2\rho^2} \sqrt{\frac{3}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\xi G}\right)^3} \approx \frac{1}{2\rho^2} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\xi G}\right)^3}. \quad (4)$$

Для отримання числового значення *мінімальної* маси планети необхідно визначити основні можливі типи планет – у цьому й полягає суть сучасного підходу. За нинішніми уявленнями, тип планети залежить від умов формування протопланетних тіл. Зони формування планет у протопланетному диску того хімічного складу, що відповідає складу атмосфери Сонця, визначають чотири групи планетних тіл.

За розрахунками, атоми й молекули Гідрогену, а також атоми Гелію, що перебувають у газуватому стані, можуть утримуватися тільки планетами з масою, більшою від $10^{-4}M_{\odot}$ в зоні з температурою $T < 200$ К. Такі планети є *гідрогено-гелієвими* (позначимо їх як Н-He). У менш масивних планет, що формуються в низькотемпературній зоні, домінує лід різного хімічного складу (*льодяні планети* – Ic).

В середньотемпературній зоні протопланетного диску, де $T > 200$ К, речовина вже не може конденсуватися в лід; там втрачається як Гідроген, так і Гелій. За $T < 350$ К з'являються гідратні силікати ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), під час нагрівання яких виділяється вода, і вони можуть формувати гідросферу або криолітосферу. Отже, у зоні з $T < 1500 - 1700$ К (залежно від тиску) формуються *силікатні планети* (умовно позначаються символом Si). У високотемпературній зоні (до 1900 К) силікатна речовина частково втрачається, і виникають умови для формування *силікатно-металічних планет* (Si-Me).

Кожній з виокремлених планетних груп відповідають типові середні значення густини та границі пружності переважаючих порід на поверхні. У таблиці 1 наведено мінімальні значення маси і діаметра льодяних, силікатних (як типову взято гірську породу базальт [7]) і силікатно-металічних планет, що їх обчислено за формулами (3) і (4) у припущенні $\xi = 1$. За мінімальну масу Н-He-планет прийнято значення $10^{-4}M_{\odot}$ і за характерною для них густиною (≈ 1000 кг/м³) обчислено їхній мінімальний діаметр.

Прикладами існування маленьких льодяних сферичних тіл (набагато менших за силікатні сферичні тіла) можуть слугувати супутники Сатурна Мімас ($M = 3,75 \cdot 10^{19}$ кг, D (середній) ≈ 396 км і середня густина $\rho \approx 1150$ кг/м³ (мал. 1, а) та Енцелад ($M = 1,08 \cdot 10^{20}$ кг, $D \approx 505$ км і $\rho \approx 1610$ кг/м³ (мал. 1, б), а також супутник Урана Міранда ($M = 6,59 \cdot 10^{19}$ кг, $D \approx 472$ км і $\rho \approx 1200$ кг/м³ (мал. 1, в).

Зазначимо також, що мінімальна маса для силікатних планет – це межа між планетами (класичними, карликовими) і таким малими тілами Сонячної системи, як астероїди. Насправді різниця між планетами та астероїдами не обмежується відмінностями в геометричній формі цих об'єктів. Вона є глибшою. Маси планет достатньо великі, щоб у їх надрах відбувався процес гравітаційної диференціації.

Т а б л и ц я 1

Тип планети	Середня густина, ρ , кг/м ³	Границя пружності, σ , МПа	Маса мінімальна, M_{\min}		Діаметр мінімальний, D_{\min} , км
			Сонячні одиниці, M_{\odot}	кг	
Ic	≈ 1000	≈ 5	$\approx 10^{-11}$	$\approx 10^{19}$	≈ 300
Si	≈ 3000	≈ 250	$\approx 10^{-10}$	$\approx 5 \cdot 10^{20}$	≈ 600
Si-Me	≈ 5000	$\approx 10^4$	$\approx 10^{-8}$	$\approx 10^{22}$	≈ 2400
H-He	≈ 1000	–	$\approx 10^{-4}$	$\approx 10^{26}$	$\approx 57\,600$

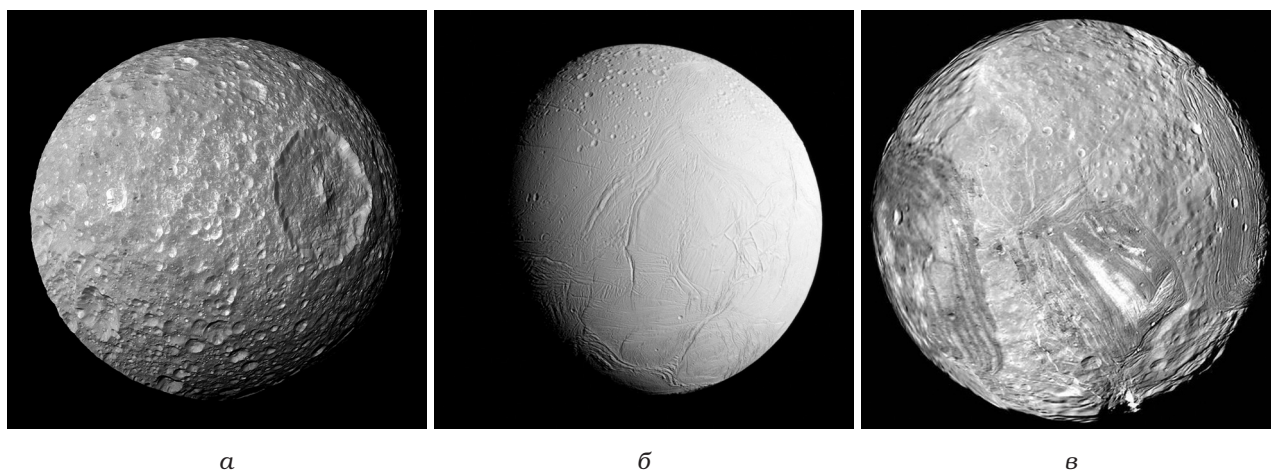
Цей процес під дією власного гравітаційного поля призводить до просторового розділення речовини планети на шари з різною густиною. Важчі хімічні елементи у складі сполук опускаються до центра планети, легші – спливають до поверхні. Для твердої планети це можливо за умови, що власна гравітаційна енергія планети в розрахунку на одиницю маси перевищуватиме енергію кристалічних ґраток (питому енергію зв'язку кристалів).

Наочний приклад результатів гравітаційної диференціації – внутрішня будова Землі, що детально досліджена за допомогою сейсмологічних методів. За відсутності сейсмічних даних про диференціацію можуть свідчити результати аналізу: гравітаційного та магнітного полів, геометричної фігури, значення безрозмірного

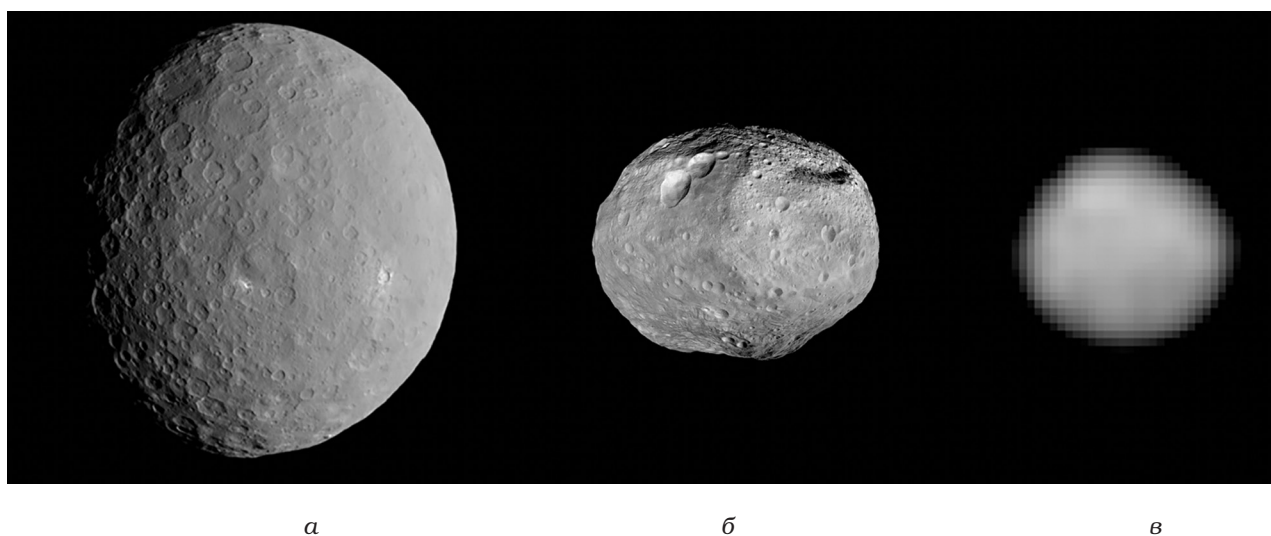
моменту інерції планет, геологічної будови їх поверхонь (для планет із твердою поверхнею) і деякі інші дані [5].

Взагалі для будь-якої планети характерною має бути така будова, що визначається стрибками густини речовини: *ядро*, *оболонка* (у твердому стані на планетах земної групи, і у цьому разі часто застосовується інша назва – *мантія*, й у рідкому стані – на планетах-гігантах), *кора* (для планет, подібних до Землі), *атмосфера* (якщо планета здатна її утримати).

Наявність процесу гравітаційної диференціації (нині або в минулому) означає, що планети всередині еволюціонують. Причому термін еволюції є сумірним з часом існування Сонячної системи. Саме *еволюція* (крім форми) принципово відрізняє планети від астероїдів.



Мал. 1. Супутники Сатурна Мімас (а) і Енцелад (б), а також супутник Урана Міранда (в)



Мал. 2. Карликова планета Церера (а) і кандидати у карликові планети: Веста (б) і Паллада (в) у Головному поясі астероїдів

На сьогодні Цереру ($M = 9,39 \cdot 10^{20}$ кг, $D \approx 946$ км і $\rho \approx 2080$ кг/м³ – мал. 2, а) відносять беззаперечно до карликових планет. У Вести ($M = 2,59 \cdot 10^{20}$ кг, $D \approx 525$ км і $\rho \approx 3460$ кг/м³ – мал. 2, б), за даними нещодавньої космічної місії «Світанок» (*Dawn*), виявлено залізо-нікелеве ядро, а із співвідношення її розмірів – ($573 \times 557 \times 446$) км можна дійти висновку, що максимальне відхилення такої фігури від сфери (525 км – 446 км = 79 км) істотно менше за середній радіус – 263 км. І хоча Вести на фотографіях бракує «сферичності» (її параметри перебувають якраз на межі астероїд – силікатна планета), наявність ядра є вагомим аргументом на користь статусу планети.

Для Паллади ($M = 2,11 \cdot 10^{20}$ кг, $D \approx 512$ км і $\rho \approx 3000$ кг/м³ (мал. 2, в), швидше за все, ситуація подібна. Хоча цей об'єкт ще не був предметом дослідження космічної місії, за якою могло б бути виявлене ядро, зображення, що його одержано в 2007 р. космічним телескопом ім. Габбла, дає підставу зробити аналогічний висновок, як для Вести. Розміри Паллади становлять ($550 \times 516 \times 476$) км. Максимальне відхилення фігури Паллади від сфери набагато менше за її середній радіус: 38 км < 256 км. Отже, виходячи з результатів представлених у табл. 1 для силікатних планет, імовірно, Весту і Палладу слід також віднести до карликових планет з найменшою поки що масою в Сонячній системі.

По-третє, довгий час вважалося, що верхньою межею мас планет є межа між планетами і зорями. Зорі (крім кінцевих стадій їхньої еволюції) – це газові кулі, які складаються переважно з Гідрогену та Гелію і всередині яких відбуваються термоядерні реакції. Нині вважають, що мінімальна маса зір (і це зумовлене ефективним початком термоядерних реакцій перетворення ядер Гідрогену на ядра Гелію), становить приблизно $0,075$ маси Сонця (M_{\odot}), що за значенням дорівнює 10^{29} кг (близько 80 мас Юпітера; позначимо її M_J).

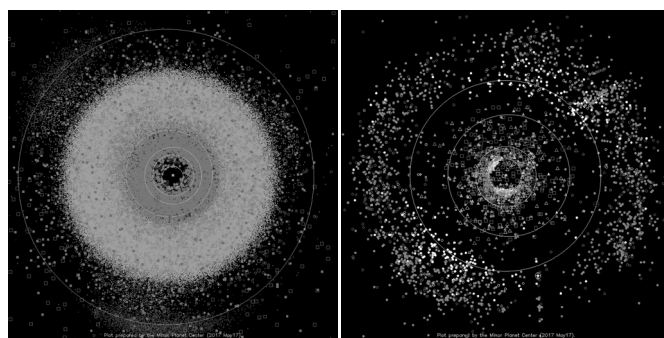
Проте 1980 р. [3] було висунуто гіпотезу, що між планетами і зорями має існувати проміжний клас об'єктів, що їх згодом назвали субзорями, або коричневими карликами, і їх було виявлено в 1995 р. Субзорі – космічні тіла, що утворюються шляхом самогравітації, містять речовину з різним ступенем виродження електронів та йонізації атомів й еволюціонують за рахунок запасів внутрішньої енергії [6]. У надрах об'єктів із масою, більшою за $13M_J$, виникають умови для термоядерних реакцій за участі ядер дейтерію, а в масивніших (> $65M_J$) – також і Літію. Температура надр, за

якої відбувається остання реакція, становить близько 2 млн К. Оскільки частка дейтерію (як і Літію) у протозоряній речовині надзвичайно низька, таке термоядерне палне порівняно швидко вичерпується. Діапазон мас, в яких існують субзорі, є вузьким і становить лише $10^{28} - 10^{29}$ кг. Отже, верхньою межею мас планет можна вважати значення 10^{28} кг (теоретична оцінка – $0,012M_{\odot} \approx 13M_J$).

Уточнення верхньої межі мас планет дало змогу: 1) передбачити існування субзір; 2) вибудувати цілісну ієрархію мас космічних тіл, починаючи з малих (метеороїди, комети, астероїди – тіла з масами < 10^{19} кг) і закінчуючи великими (зорі – тіла з масами > 10^{29} кг).

По-четверте, мабуть, єдиною відмінністю класичних планет від карликових є результат очищення околиць своїх орбіт від порівнянних з планетами за масою інших тіл (пункт с у резолюції Генеральної асамблеї МАС). Наочною ілюстрацією цієї відмінності є схематичне зображення внутрішньої і зовнішньої частин Сонячної системи (мал. 3) і виявлена залежність процесу очищення від маси самого об'єкта і його орбітального періоду (мал. 4). З'ясовано, що чим більше маса і коротший період (а, отже, згідно з третім законом Кеплера менший розмір орбіти), тим легше космічному тілу акумулювати або розкидати своїх сусідів [13]. З мал. 4 видно, що Меркурій і Марс належать до класичних планет, а Плутон, Ерида, Хаумеа, Макемаке та Церера утворюють зовсім іншу групу.

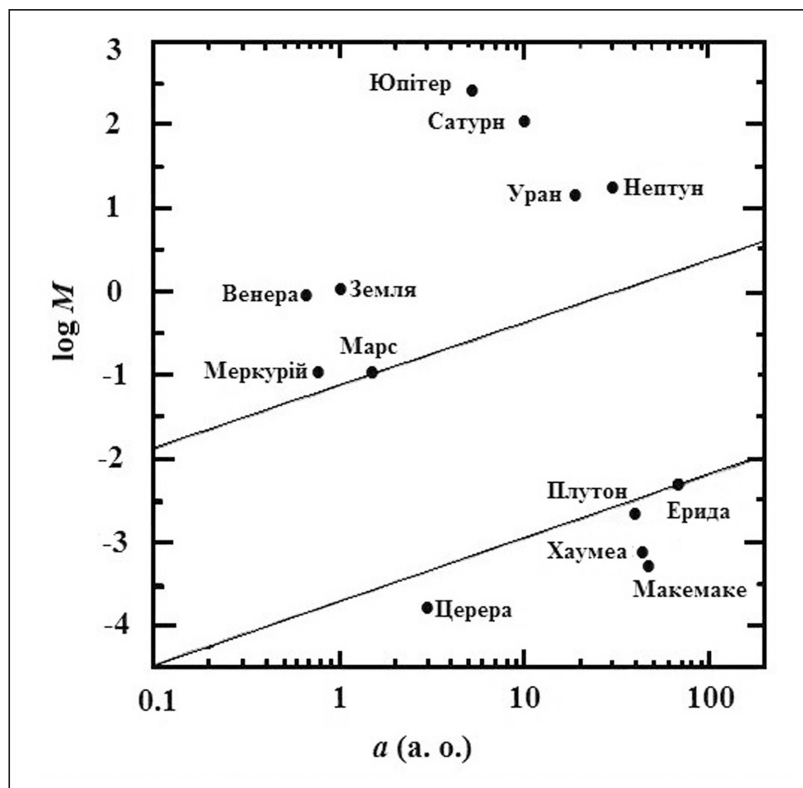
Те, що карликові планети не очистили околиці своїх орбіт, видно з мал. 3, де представлено розташування (на середину травня 2017 р. [11])



а

б

Мал. 3. Розташування малих тіл Сонячної системи на 17 травня 2017 р. [11] у внутрішній (а) і зовнішній (б) її частинах. Астероїди Головного поясу, в якому рухаються Церера, Веста і Паллада, показано сірим кольором. Об'єкти поясу Койпера (б), в якому перебуває Плутон (позначений великим кружечком з хрестом), зображено темно-сірим кольором



Мал. 4. Діаграма «маса – відстань від Сонця (велика піввісь орбіти)» для класичних і карликових планет Сонячної системи

об'єктів у Головному поясі астероїдів, в якому рухаються Церера, Веста та Паллада, і поясі Койпера, в якому перебувають усі інші карликові (швидше за все, переважно льодяні) планети.

Отже, нині в Сонячній системі налічують 8 великих (класичних) планет. Офіційно МАС затверджено 5 карликових планет: Церера, Плутон, Хаумеа, Макемаке та Ерида. Крім того, в статусі ймовірних кандидатів у карликові планети перебувають ще 8 космічних тіл. Зазначимо, що в поясі Койпера (а можливо, і в Хмарі Оорта) слід очікувати набагато більше карликових планет, ніж у внутрішній області Сонячної системи – до кількох сотень. Це пов'язано з трьома чинниками. По-перше, ця область займає набагато більший об'єм, ніж внутрішня область Сонячної системи. По-друге, в цій області були умови для формування льодяних планет. По-третє, мінімальні діаметри таких планет є найменшими порівняно з планетами іншого хімічного складу.

Класичні планети чітко поділяються на дві групи: планети земної групи і планети-гіганти. До планет земної групи відносять Меркурій, Венеру, Землю і Марс – типові силікатно-мета-

лічні планети (середня густина перших трьох – понад 5 000 кг/м³, а Марса – близько 4 000 кг/м³). Планети-гіганти також можна поділити на дві групи. Юпітер і Сатурн – типові гідрогено-гелієві планети, часто їх називають газовими гігантами. Планети Уран й особливо Нептун, ймовірно, містять значну кількість елементів, важчих за Гелій. За однією з моделей, у цих планетах міститься близько 50 % води, 20 % Гідрогену, стільки само метану і близько 5 % амоніаку. Як бачимо, невизначеність щодо хімічного складу цих планет достатньо велика. Ці планети відносять до льодяних гігантів.

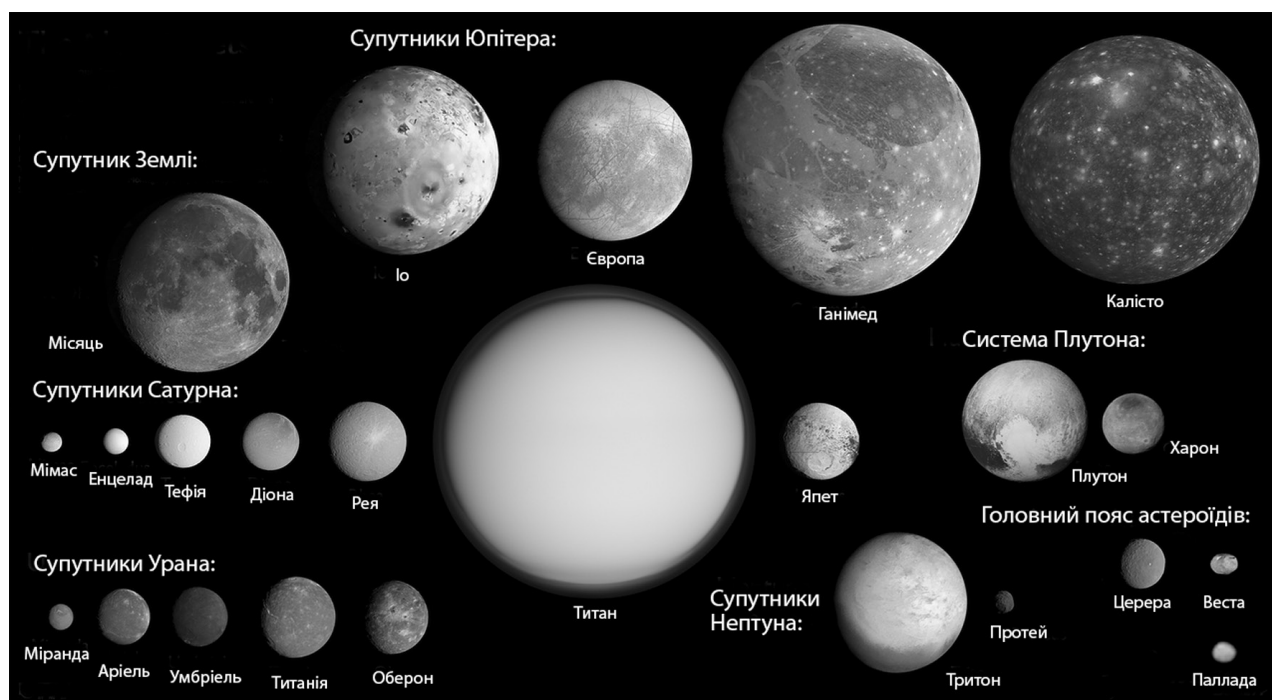
Зазначимо, що переважна більшість космічних тіл, представлених на мал. 5, якби вони не були супутниками планет Сонячної системи (зокрема й наш Місяць), можна було б вважати планетами (класичними або карликовими). І тоді загальна кількість планет у Сонячній системі сягала б на сьогодні 34.

Щодо екзопланет, то найнадійнішою є їхня статистика в околі Сонця – у сфері радіусом 10 пк. Там виявлено 58 планет у 22 зір (не враховуючи Сонячної системи).

Серед них 20 % становлять юпітероподібні (H-He) планети, 20 % – урано-нептуніві (льодяні гіганти) і 60 % – «великі землі» (суперземлі) і землеподібні (як Si-, так і Si-Me-планети).

Отже, нині можна навести таке уточнене визначення поняття «планета»: *планети – це космічні тіла, маси яких становлять діапазон від 10¹⁹ до 10²⁸ кг, речовина перебуває переважно в конденсованому стані і що еволюціонують через гравітаційну диференціацію, наслідком якої є утворення ядра з більшою густиною.*

Завершити нам би хотілося думками, якими упродовж багатьох років неодноразово в різних формах, починаючи з 1980 р. (див., наприклад, [1 – 3; 5]) ділився професор Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Ю. В. Александров, який наприкінці 2016 р. у віці 82 років пішов із життя: «Планети – певна форма структурної організації матерії у Всесвіті. Причому форма, що посідає особливе місце у структурній та еволюційній картині Всесвіту. Якщо Всесвіт у цілому – це сфера дії фізичної форми руху матерії та лише у початковій стадії – хімічної, то тільки на планетах хімічні процеси



Мал. 5. Сферичні тіла Сонячної системи, що є супутниками класичних і карликових планет, «офіційні» карликові планети Церера і Плутон і «неофіційні» Веста і Паллада. Несферичний супутник Нептуна Протей наведено для порівняння

досягають такого ступеня розвитку, що виявляються спроможними породити біологічну форму руху, яка, в свою чергу, може розвинути у соціальну. Отже, планети – це база для розвитку вищих форм руху матерії. Цим визначається фундаментальне загальнонаукове і філософське значення планетної проблематики» [3].

ЛІТЕРАТУРА

1. Александров Ю. В. *Астрономія, 11 кл. : кн. для вчителя / Ю. В. Александров, А. М. Грецький, М. П. Пришляк.* – Харків : Веста : Ранок, 2005. – 256 с.
2. Александров Ю. В. *Фізика планет / Ч. I. – Фізика планетних тіл : навч. посіб. / Ю. В. Александров.* – К. : ІЗМН, 1996. – 424 с.
3. Александров Ю. В. *Что такое планеты / Ю. В. Александров, В. А. Захожай // Астроном. вестн.* – 1980. – Т. XIV. – № 3. – С. 129 – 132.
4. *Астрономічний енциклопедичний словник / за заг. ред. І. А. Климишина та А. О. Корсунь.* – Львів, 2003. – 548 с.
5. Євсюков М. М. *Хімія і геологія планет : навч. посібник / М. М. Євсюков, Ю. В. Александров.* – Харків, 2000. – 190 с.
6. Захожай В. А. *Вклад Пулковской и Харьковской астрономических школ в развитие проблемы поиска и существования планетных систем в Галактике / В. А. Захожай, Ю. Н. Гнедин, Н. А. Шахт // Изв. ГАО в Пулкове.* – 2009. – № 219, вып. 4. – Тр. Всерос. конф. «Пулково-2009». – С. 111 – 118., Zakhochay V. A., Gnedin Yu. N., Shakht N. A. *The contribution of Pulkovo and Kharkiv scientific schools in a problem of searches of exoplanets and dark satellites of stars // Astrophysics.* – 2010. – Vol. 53. – No. 4. – P. 575 – 591.
7. Карпиков А. П. *Свойства минералов и пород / А. П. Карпиков, В. В. Чубаров, А. В. Чирков.* – М. : ЦИТ-М, 2007.
8. Кузьменков С. Г. *Сонячна система : зб. задач : навч. посіб. / С. Г. Кузьменков, І. В. Сокол.* – К. : Вища шк., 2007. – 168 с.
9. Кузьменков С. *Що таке планети? / Сергій Кузьменков // Фізика та астрономія в шк.* – 2010. – № 3. – С. 24 – 28.
10. *Определение понятия планета II. – Режим доступу <http://www.astronet.ru/db/msg/1215378>*
11. *Plot of the Inner and Outer Solar System. – Режим доступу <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot.html>*
12. Zakhochay V. A. *Catalogue of Planetary Objects. Version 2006.0 / O. V. Zakhochay, V. A. Zakhochay, Yu. N. Krugly // Proceedings of 13th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics / Ed. A. Golovin, G. Ivashchenko & A. Simon.* – April 25 – 29, 2006, Kyiv. – Kyiv National Taras Shevchenko University. – P. 122 – 133.
13. Soter S. *What is a planet? / S. Soter // Astronom. J.* – 2006. – V. 132. – P. 2513 – 2519.