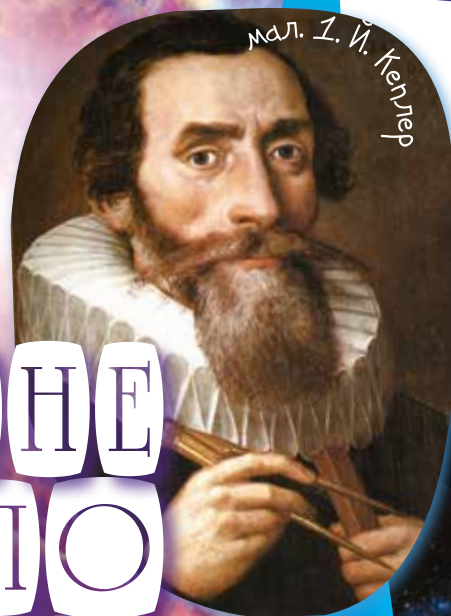


# ЯК ОДНЕ ПРАВИЛО „ЗНАЙШЛО” ДВА ПОЯСИ

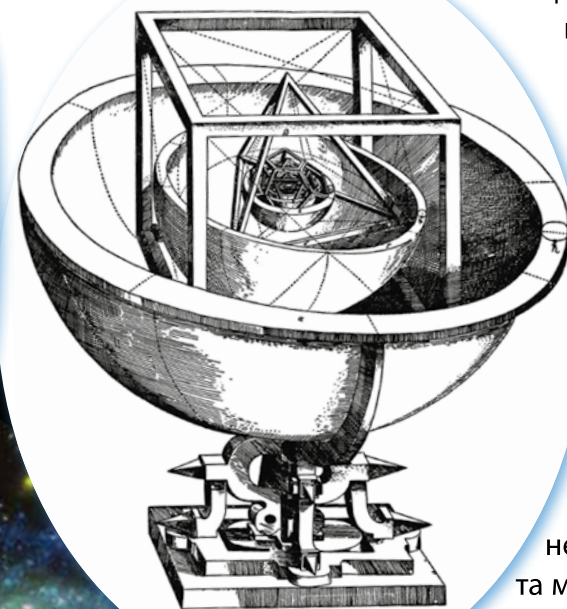
## Правило Тіциуса-Бодє

Люди здавна шукали закономірності в розташуванні фізичних об'єктів, вірили в містичні зв'язки чисел та небесних світил, у вплив чисел на явища природи і навіть на свідомість людей. На вірі у такі закономірності ґрунтується релігійно-філософське трактування в системі езотеричних вчень, зокрема в нумерології<sup>1</sup> та ізопсефії<sup>2</sup>.

Видатний німецький астроном Й. Кеплера (мал. 1) застосував езотеричне вчення до астрономічної практики. У 1590 році в Граці вийшла в світ його перша книга „Таємниця світобудови” (*Mysterium Cosmographicum*). У ній Кеплер у пошуках таємної гармонії Всесвіту порівняв орбіти п'яти відомих на той час планет з правильними багатогранниками (мал. 2). Орбіти Сатурна він поставив у відпо-



мал. 1. Й. Кеплер



мал. 2.

відність коло на поверхні кулі, описаної навколо куба. У куб була вписана куля, яка відповідала орбіті Юпітера, тетраедр, описаний навколо кулі – це орбіта Марса і т. д. Згодом Кеплер відкрив закони руху планет, і ця робота втратила своє значення. Але все життя він вірив у існування математичної гармонії Всесвіту. В 1621 році він перевидав *Mysterium Cosmographicum*, доповнивши книгу новими геометричними побудовами.

Прихована гармонія світобудови не давала спокою і німецькому фізику та математику Й. Тіциусу (мал. 3). Він шукав математичні закономірності серед послідовності чисел, яку утворюють радіуси орбіт планет Сонячної системи і у 1766 році на базі експериментальних даних сформулював правило. Одне з формулювань цього правила таке: до кожного елемента послідовності  $0, 3, 6, 12, 24, 48, \dots$  додаємо 4 і ділимо на 10. Отриманий результат – це й буде радіус орбіти в астрономічних одиницях<sup>3</sup> (а. о.) планети, номер орбіти якої співпадає із порядковим номером цього числа у вказаній послідовності. Інше формулювання правила Тіциуса: для будь-якої планети відстань від даної планети до внутрішньої планети Меркурія в два рази більша, ніж відстань від попередньої планети до внутрішньої.

Відстані до всіх відомих на той час планет (від Меркурія до Сатурна) підлягали під це правило. Була лише одна прогалина: згідно правила, на відстані 2.8 а.о. від Сонця мала бути планета, а її там не було (див. табл.).

<sup>1</sup>Нумерологія – псевдонаука. ґрунтується на вірі та практиках, які приписують числам певні властивості в залежності від культурного чи історичного контексту.

<sup>2</sup>Ізопсефія – практика складання чисел та числових значень букв, слів для знаходження загальної суми.

<sup>3</sup>Астрономічна одиниця – середня відстань від Землі до Сонця. Дорівнює приблизно 150 млн км.



мал. 3. Й. Тіциус

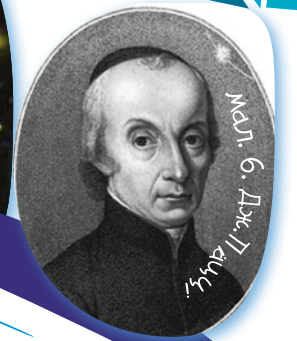
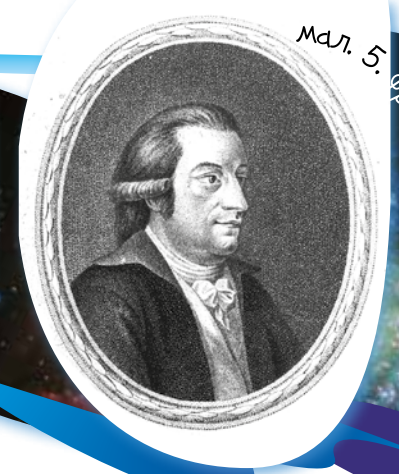
Таблиця

ПЛАНЕТА	РАДІУС ОРБИТИ (а.о.)	
	за правилом	фактичний
Меркурій	0.40	0.39
Венера	0.70	0.72
Земля	1.00	1.00
Марс	1.60	1.52
?	2.80	?
Юпітер	5.20	5.20
Сатурн	10.00	9.54

Правило Тіциуса привернуло увагу вчених лише у 1781 році, коли У. Гершель відкрив Уран, радіус орбіти якого практично співпав із значенням, яке передбачало правило Тіциуса для сьомої від Сонця планети Сонячної системи. Розрахована за правилом відстань від Сонця до Урану становила 19,6 а. о., а насправді – 19.2 а. о. Після цього передбачення німецький астроном Й. Боде (мал.4) звернув увагу вчених на це емпіричне правило і невтомно закликав астрономів та аматорів науки до пошуків планети між Марсом і Юпітером на відстані 2,8 а. о. Врешті пропаганда Боде досягла успіху: правило Тіциуса набуло всесвітньої слави, та й Боде до неї прилаштувався, бо відтоді це правило називають правилом Тіциуса-Боде.

Астрономи, яких надихнула віра в містичну силу правила Тіциуса-Боде, кинулися на пошуки нових планет. Група з 24-ох дослідників, яку очолив німецький астроном Франц Ксавер фон Цах (мал. 5) з 1789 р. займалася пошуками планети Ікс. Відкриття сталося у новорічну ніч на 1 січня 1801 року: італійський астроном Дж. Піацці, який не входив до складу групи фон Цаха (мал. 6), відкрив нове небесне тіло. Наполегливість та відданість науці перемогла: не сиділось людині за новорічним столом, та ще й у ніч, яка розділяла історію на два століття – XVIII-те та XIX-те.

Орбіту нового небесного тіла обчислив видатний німецький математик К. Гаус. Виявилась, що нова планета рухається у просто-



рі між орбітами Марса та Юпітера саме на тій відстані, яку передбачає правило Тіциуса-Боде! Це був справжній триумф прихильників нумерології. Піацці назвав нову планету Церерою на честь богині родючості і землеробства, покровительки Сицилії.

Невдовзі з'ясувалося, що крім Церери, приблизно на тій самій відстані навколо Сонця обертається багато небесних тіл. Просторову зону, в якій вони обертаються, астрономи назвали головним поясом. Знайти цей пояс небесних тіл астрономам допомогло правило Тіциуса-Боде.

Нові тіла назвали астероїдами. Термін „астероїд” (від гр. ἀστεροειδής – „зореподібний”) придумав композитор Чарльз Берні, а У. Гершель запровадив його в науковий обіг, аргументуючи тим, що відкриті об'єкти в телескоп більше схожі на зорі, ніж на планети, які при спостереженні в телескоп мають видимий диск.

Єдиного визначення терміну „астероїд” досі немає. Згідно з резолюцією Міжнародної астрономічної спілки, астероїди – це тіла неправильної форми діаметром понад 30 м. Тіла меншого розміру називають метеороїдами<sup>3</sup>. До 2006 року астероїди називали ще малими планетами.

Після відкриття астероїдів астрономи понизили статус Церери з планети до астероїда. Щоправда, у 2006 році її статус знову „виріс”. Тепер Церера – карликова планета. Таким чином, Церера є єдиним тілом Сонячної системи, яке у різний час перебувало у статусі планети, астероїда і карликової планети<sup>4</sup>.

Відкриття Нептуна у 1846 році і Плутона у 1930 році похитнуло віру у правило Боде. Відстані до цих планет становлять відповідно 30,1 і 39,6 а.о., а за правилом – 38,8 і 77,2 а. о.

<sup>3</sup>Про карликові планети ти довідаєшся у перших числах журналу „Колосок” у 2017 році.

## Модифіковане правило Тіциуса-Бодє

Три планети Сонячної системи – Юпітер, Сатурн і Уран – мають чисельну систему супутників<sup>5</sup>. Астрономи вважають, що родини супутників цих планет сформувалися разом із самими планетами. Тому логічно сподіватися, що радіуси орбіт супутників планет теж підкоряються правилу Тіциуса-Бодє. Справді, виявилось, що правило Тіциуса-Бодє з точністю до 10 % (а це непогано!) „передбачає” значення радіусів орбіт супутників планет. Щоправда, для супутників правило довелося дещо переформулювати. Нову редакцію правила Тіциуса-Бодє запропонував у 1960-х роках американський астроном Стенлі Дермот.

Тімоті Боверд і Чарльз Лайнвівер з Австралійського національного університету перевірили справедливість модифікованої версії правила до екзопланетних систем<sup>6</sup>. Вони відібрали 27 екзопланетних родин, для яких поява додаткових планет порушувала б стабільність системи. Автори дослідження підтвердили, що модифіковане правило Тіциуса-Бодє виконується і для екзопланетних родин. Зокрема, для 22-х екзопланетних систем радіуси орбіт задовольняють правилу Тіциуса-Бодє навіть краще, ніж для планет Сонячної системи! У двох екзопланетних родин правило Тіциуса-Бодє працює з такою ж точністю, що й у Сонячній системі, а у трьох випадках – гірше, ніж у Сонячній системі. Тімоті Боверд та Чарльз Лайнвівер спробували передбачити орбіти екзопланет для 64 систем. Згідно з останніми астрометричними даними (2015 р.), деякі з цих прогнозів (але небагато!) підтвердилися. То ж застосовність правила Тіциуса-Бодє, в тому числі у модифікованій формі, для заповнення „відсутніх” орбіт під питанням. Але нещодавно (травень 2016 р.) виявилось, що для 43-х екзопланетних систем з чотирма або більше планетами, модифіковане правило Тіциуса-Бодє виконується з високою точністю за умови зміни масштабів радіусів орбіт екзопланет. Тому у питанні про прогностичну значимість правила Тіциуса-Бодє ще рано ставити крапку.

Однак треба визнати, що правило Тіциуса-Бодє не має конкретного математичного та аналітичного пояснення на основі гравітації. Численні спроби пов'язати це правило з відомими законами природи не призвели до успіху, надто величезний обсяг обчислень. Комп'ютерне моделювання теж не дає результатів через брак точних даних про ранні етапи формування тіл у Сонячній системі та в екзопланетних родин.

<sup>5</sup>Див. „КОЛОСОК” №№ 2–4/2016.

<sup>6</sup>Екзопланетні системи – системи планет поблизу зір. На листопад 2016 р. відкрито 3544 екзопланети.

## З історії Сонячної системи

Як народилися астероїди? Що стало причиною появи величезної кількості тіл у просторі між Марсом і Юпітером? Відповісти на ці запитання непросто, бо процес народження астероїдів ще не до кінця розгаданий.

Є докази, що саме Юпітер зіграв важливу роль в тому, що на місці головного поясу астероїдів не сформувалася ще одна планета. Існують гіпотези, що головний пояс астероїдів утворився на ранніх етапах еволюції Сонячної системи, коли гравітаційне поле „змужнілого” та „молодого” Юпітера викинуло понад 99 % протопланетної речовини (планетозималей) у внутрішні області Сонячної системи та за її межі.

Ще на початку ХХ ст. вчені вважали, що між Юпітером і Марсом раніше існувала планета Фаєтон, яка з якихось причин зруйнувалася. Однак, як виявилось згодом, події розвивалися по-іншому... Наукові факти свідчать, що астероїди – не уламки планети, яка вибухнула. Навпаки, це залишки протопланетних тіл, які не змогли зібратися в одну велику планету на зорі виникнення Сонячної системи. Але звідки взялися ці протопланетні тіла?

Згідно гіпотези академіка О. Ю. Шмідта (мал. 7.) Земля та усі планети утворилися внаслідок згущення речовини газопилової хмари, яка оточувала Сонце. Але в просторі між Юпітером і Марсом цей процес зупинився на стадії утворення протопланетних тіл через сильне збурення з боку гіганта Юпітера. Тому дуже ймовірно, що найбільші астероїди – це і є найдавніші тіла нашої Сонячної системи, зародки несформованих великих планет. Щодо дрібних астероїдів, то вони виникли в результаті чисельних зіткнень тіл у головному поясі астероїдів.

Комп'ютерне моделювання підтверджує, що астероїди діаметром понад 120 км справді могли утворитися в результаті зчеплення планетозималей.

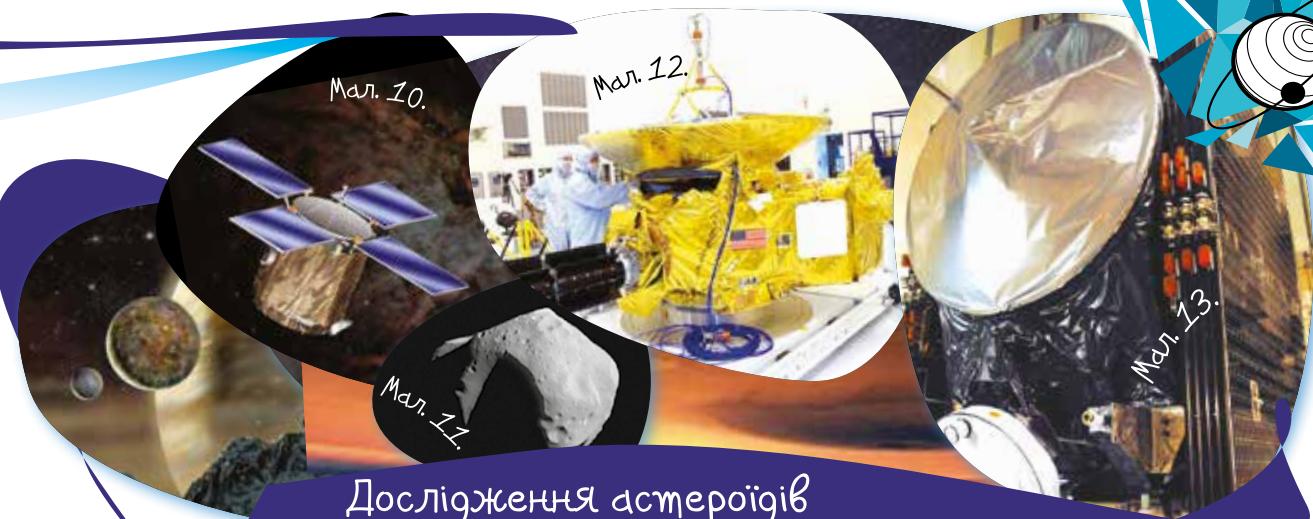
### Мешканці головного поясу

Станом на 11 січня 2015 р. в астрономічних базах даних налічувалося 670 474 об'єкта, для 422 636 з яких точно визначені орбіти, і їм присвоєно офіційний номер (понад 19 000 з них мають затверджені назви). За прогнозами астрономів, у Сонячній системі є приблизно два мільйони астероїдів розміром понад 1 км.

Діаметри двох найбільших астероїдів – Паллади і Вести (мал. 8, 9) – приблизно 500 км. Веста – єдиний об'єкт головного поясу астероїдів, який можна спостерігати неозброєним оком. Загальна маса всіх астероїдів головного поясу оцінюється в  $3,6 \times 10^{21}$  кг (це лише 4 % від маси Місяця).

На основі деяких спільних ознак орбіт астрономи об'єднують астероїди у групи та родини. Зазвичай група має таку ж назву, як перший астероїд, відкритий на даній орбіті. У найбільших родин астероїдів є сотні об'єктів середнього розміру (1–10 км) і величезна кількість ще менших. Майже третина астероїдів головного поясу входить до складу різних родин. Межі зон, в яких обертається родина астероїдів, зазвичай доволі розпливчасті і поступово зливаються з загальним астероїдно-метеороїдним фоном головного поясу.

Родини астероїдів утворюються внаслідок чисельних зіткнень між крупними астероїдними тілами. Зазвичай при зіткненнях астероїдів вони повністю руйнуються. Якщо з астероїдом зіткнувся невеликий об'єкт, він вибиває дрібні уламки з поверхні великого астероїда, і вони утворюють дифузну, з розмитими краями, межу родини. Серед них – родини Вести, Гигеї, Массалії. Деякі родини астероїдів мають дуже складну внутрішню структуру. Час життя астероїдних родин становить приблизно мільярд років. Найстаріші родини в процесі еволюції втратили майже всіх своїх дрібних і середніх за розмірами членів. Прикладами таких родин найбільших астероїдів є родини Метиди та Амальтеї.



### Дослідження астероїдів космічними апаратами

Космічні апарати (КА) декілька разів досліджували астероїди головного поясу. Перший КА „Near Earth Asteroid Rendezvous Shoemaker” („NEAR Shoemaker”) запустило NASA 17 лютого 1996 року (мал. 10). Політ до астероїда тривав понад 16 місяців. 27 червня 1997 року „NEAR Shoemaker” пролетів на мінімальній відстані 1200 км від астероїда Матильда. Космічний апарат передав понад 500 зображень астероїда (мал. 11); роздільна здатність деяких з них – 180 метрів на піксель. „NEAR Shoemaker” сфотографував лише 60 % поверхні астероїда, але ці дані допомогли вченим уточнити розміри, форму та період обертання астероїда.

Космічний апарат „New Horizons” (мал. 12), що прямував до Плутона, зблизився з астероїдом головного поясу APL приблизно до відстані 102 000 км. Дослідження астероїда APL тривали з 11 по 13 червня 2006 року. Апарат надіслав фотографії астероїда, але на них не було виявлено жодних деталей рельєфу.

27 вересня 2007 року для дослідження астероїда Веста і карликової планети Церери космічне агентство NASA запустило автоматичну міжпланетну станцію (мал. 13) „Dawn” (з англ. „Світанок”). З 16 липня до 5 вересня КА Dawn перебував на орбіті навколо Вести, передав тисячі фотографій астероїда, на яких видно деталі його поверхні розміром у декілька метрів. Зокрема, „Dawn” виявив на Весті величезний кратер Реясилівія (мал. 14). За різними оцінками кратер має діаметр від 475 до 500 км і є одним з найглибших кратерів у Сонячній системі (20–25 км). Посередині кратера (над точкою удару) знаходиться центральна гірка висотою приблизно 22 км і діаметром 180 км. Це найвища з відомих вершин у Сонячній системі!

