

Рух небесних тіл під дією сил тяжіння

1. Космічні швидкості й форма орбіт. Виходячи із спостережень за рухом Місяця й аналізуючи відкриті Кеплером закони руху планет, І. Ньютон (1643— 1727) установив закон всесвітнього тяжіння. За цим законом, як ви вже знаєте з курсу фізики, всі тіла у Всесвіті притягуються одне до одного із силою, прямо пропорційною добутку їхніх мас і обернено пропорційною квадратові відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

тут m_1 і m_2 — маси двох тіл, r — відстань між ними, а G — коефіцієнт пропорційності, який називають гравітаційною сталою. Його числове значення залежить від одиниць, у яких виражені сила, маса й відстань. Закон всесвітнього тяжіння пояснює рух планет і комет навколо Сонця, рух супутників навколо планет: подвійних і кратних зір навколо їх спільного центра мас.

Ньютон довів, що під дією взаємного тяжіння тіла можуть рухатися одне відносно одного по еліпсу (зокрема, по колу), по параболі й гіперболі. Він установив, що вид орбіти, яку описує тіло, залежить від його швидкості в даному місці орбіти (мал. 1).

При певній швидкості тіло описує коло біля центра тяжіння. Таку швидкість називають першою космічною або коловою швидкістю; її надають тілам, що запускаються як штучні супутники Землі по колових орбітах. (Виведення формули для обчислення першої космічної швидкості відоме з курсу фізики.) Перша космічна швидкість поблизу поверхні Землі становить близько 8 км/с (7,9 км/с).

Якщо тілу надати швидкості, у $\sqrt{2}$ раз більшої від колової (11,2 км/с), яка називається другою космічною або параболічною швидкістю, то тіло назавжди відійде від Землі й може стати супутником Сонця. У цьому разі тіло рухатиметься по параболі відносно Землі. При ще більшій швидкості відносно Землі воно полетить по гіперболі. Рухаючись по параболі або гіперболі, тіло лише один раз обходить Сонце і назавжди віддаляється від нього.

Середня швидкість руху Землі по орбіті 30 км/с. Орбіта Землі близька до кола, отже, швидкість руху Землі по орбіті наближається до колової на відстані Землі від Сонця. Параболічна швидкість на відстані Землі від Сонця дорівнює $30\sqrt{2}$ км/с = 42 км/с. При такій швидкості відносно Сонця тіло з орбіти Землі покине Сонячну систему.

2. Збурення в русі планет. Закони Кеплера точно справджуються тільки тоді, коли розглядається рух двох ізольованих тіл під впливом взаємного притягання. У Сонячній системі планет багато, усі вони не тільки притягаються Сонцем, а й притягують одна одну, тому їхні рухи не точно підпорядковуються законам Кеплера.



Мал. 1. Залежність форми орбіти

від початкової швидкості об'єкта

Відхилення від руху, що відбувався б строго за законами Кеплера, називаються збуреннями. У Сонячній системі збурення невеликі, бо притягання кожної планети Сонцем значно сильніше від притягання інших планет.

Найбільші збурення в Сонячній системі спричиняє планета Юпітер, яка приблизно в 300 раз масивніша за Землю. Юпітер дуже впливає на рух астероїдів і комет, коли вони близько підходять до нього. Зокрема, якщо напрями прискорень комети, спричинені притяганням Юпітера і Сонця, збігаються, то комета може розвинути настільки велику швидкість, що, рухаючись по гіперболі, назавжди вийде із Сонячної системи. Траплялися випадки, коли притягання Юпітера стримувало комету, ексцентриситет її, орбіти зменшувався і різко зменшувався період обертання.

Обчислюючи видиме положення планет, доводиться враховувати збурення. Нині робити такі розрахунки допомагають швидкодіючі електронно-обчислювальні машини. При запуску штучних небесних тіл і розрахунку їхніх траєкторій користуються теорією руху небесних тіл, зокрема теорією збурень.

Можливість запускати автоматичні міжпланетні станції по бажаних, заздалегідь розрахованих траєкторіях, доводити їх до цілі з урахуванням збурень у русі — усе це яскраві приклади пізнання законів природи. Небо, яке за уявленнями віруючих є оселею богів, стало ареною людської діяльності так само, як і Земля. Релігія завжди протиставляла Землю і небо й проголошувала небо недосяжним. А тепер серед планет рухаються штучні небесні тіла, створені людиною і керовані нею по радіо з великих відстаней.

3. Відкриття Нептуна. Одним з яскравих прикладів досягнень науки, одним із свідчень необмеженої пізнаванності природи було відкриття планети Нептун за допомогою обчислень — «на кінчику пера».

Уран — планета, яку відкрив В. Гершель наприкінці XVIII ст. Вона йде за Сатурном, що багато століть вважався найвіддаленішою з планет. Уран важко побачити неозброєним оком. До 40-х років XIX ст. точні спостереження показали, що він ледь помітно відхиляється від того шляху, яким мав би рухатись з урахуванням збурень з боку усіх відомих планет. Таким чином, теорія руху небесних тіл, настільки строга й точна, зазнала випробування.

Лever'є (у Франції) та Адамс (в Англії) висловили припущення, що, оскільки збурення з боку відомих планет не пояснюють відхилення в русі Урана, значить, на нього діє притягання ще невідомого тіла. Вони майже одночасно обчислили, де за Ураном має бути невідоме тіло, яке своїм притяганням спричиняє ці відхилення. Учені обчислили орбіту невідомої планети, її масу і вказали місце на небі, де в даний час вона мала знаходитись. Цю планету й було знайдено в телескоп у зазначеному місці в 1846 р. її назвали Нептуном. Планету не видно неозброєним оком. Отже, ця суперечність між теорією і практикою, яка, здавалось, підривала авторитет матеріалістичної науки, привела до тріумфу.

4. Припливи. Під дією взаємного притягання частинок тіло намагається набутися форми кулі. Тому форма Сонця, планет, їхніх супутників і зір близька до кулястої. Внаслідок обертання тіла (як ви знаєте з фізичних дослідів) сплющуються, стискаються вздовж осі обертання. Через це трохи сплюснута біля полюсів земна куля, а найбільше сплюснуті Юпітер і Сатурн, які швидко обертаються.

Але форма планет може змінюватися і під дією сил їх взаємного притягання. Кулясте тіло (планета) рухається в цілому під дією гравітаційного притягання іншого тіла так, ніби вся сила притягання прикладена до його центра. Проте деякі частини планети знаходяться на різній відстані від тіла, яке притягує, тому гравітаційне прискорення в них також неоднакове, то й спричиняє виникнення сил, які намагаються деформувати планету. Різниця прискорень, що виникають внаслідок притягання іншим тілом, у даній точці й у центрі планети називається припливним прискоренням.

Як приклад розглянемо систему Земля — Місяць. Один і той самий елемент маси в центрі Землі притягатиметься Місяцем слабше, ніж на боці, зверненому до Місяця, і сильніше, ніж на протилежному. Через це Земля, і насамперед її водна оболонка, злегка розтягується в обидва боки вздовж лінії, яка сполучає її з Місяцем. На малюнку 35 океан для наочності зображено так, ніби він покриває всю Землю. У точках, що лежать на лінії Земля — Місяць, рівень води найвищий — там припливи. Уздовж крута, площа якого перпендикулярна до напрямку лінії Земля — Місяць і проходить через центр Землі, рівень води найнижчий — там відпливи. При добовому обертанні Землі в смугу припливів і відпливів послідовно потрапляють різні її місця. Легко зрозуміти, що за добу може бути два припливи і два відпливи.

Сонце також спричиняє на Землі припливи і відпливи, але через його велику віддаленість вони слабкіші, ніж місячні, і менш помітні.

З припливами переміщується величезна маса води. У наш час починають використовувати колосальну енергію води, яка бере участь у припливах, на берегах океанів і відкритих морів.

Вісь припливних виступів завжди має бути спрямована до Місяця. Обертаючись, Земля намагається повернути водяний припливний виступ. Оскільки вона обертається навколо осі значно швидше, ніж Місяць навколо неї, то Місяць відтягує водяний горб до себе. Внаслідок цього виникає тертя між водою і твердим дном океану — так зване припливне тертя. Воно гальмує обертання Землі, і доба з плином часу стає довшою (колись вона становила тільки 5—6 год). Сильні припливи, які спричиняє на Меркурії і Венері Сонце, очевидно, й зумовили їх украй повільне обертання навколо осі. Припливи, спричинені Землею, настільки загальмували обертання Місяця, що він завжди звернутий до Землі одним боком. Отже, припливи є важливим фактором еволюції небесних тіл і Землі.

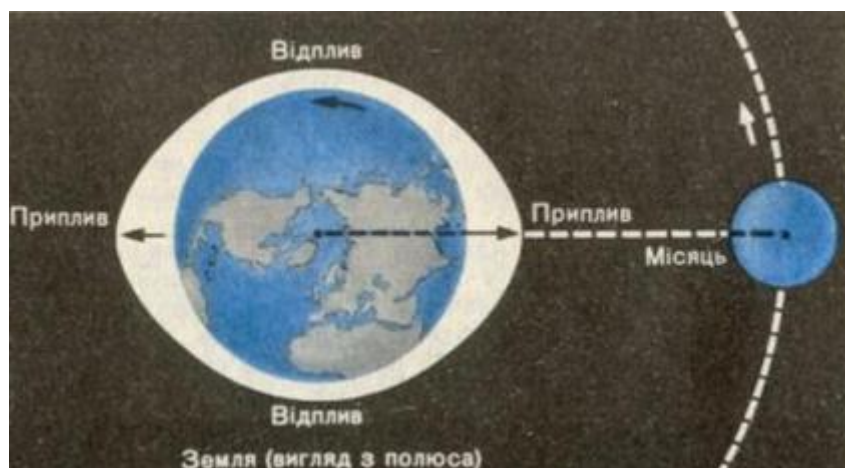
5. Маса і густина Землі. Закон всесвітнього тяжіння також дає змогу визначити одну з найважливіших характеристик небесних тіл — масу, зокрема масу нашої планети. Справді, за законом всесвітнього тяжіння прискорення вільного падіння

$$g = G \frac{M}{R_{\oplus}^2}$$

Отже, якщо відомі значення прискорення вільного падіння, гравітаційної сталої і радіуса Землі, то можна визначити її масу.

Підставивши у згадану формулу значення $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $R_{\oplus} = 6370 \text{ км}$, знаходимо, що маса Землі $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Знаючи масу та об'єм Землі, можна обчислити її середню густину. Вона становить $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Але густина Землі з глибиною зростає, і, за розрахунками, поблизу центра, в ядрі Землі, вона дорівнює $1,1 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$. Густина з глибиною зростає внаслідок збільшення вмісту важких елементів, а також підвищення тиску.



Мал.2. Схема місячних припливів

6. Визначення мас небесних тіл. Ньютон довів, що точнішою є така формула третього закону Кеплера:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} \frac{M_1 + m_1}{M_2 + m_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

де M_1 і M_2 — маси будь-яких небесних тіл, а m_1 і m_2 — відповідно маси їхніх супутників. Так, планети є супутниками Сонця. Ми бачимо, що уточнена формула цього закону відрізняється від наближеної наявністю множника, який містить маси. Якщо під $M_1 = M_2 = M_\odot$ розуміти масу Сонця,

а під m_1 і m_2 — маси двох різних планет, то відношення $\frac{M_\oplus + m_1}{M_\oplus + m_2}$ мало відрізнятиметься від одиниці, бо m_1 і m_2 дуже малі порівняно з масою Сонця. При цьому точна формула помітно не відрізнятиметься від наближеної.

Уточнений третій закон Кеплера дає змогу визначити маси планет, які мають супутників, і масу Сонця. Щоб визначити масу Сонця, порівняємо рух Місяця навколо Землі з рухом Землі навколо

Сонця:
$$\frac{T_\oplus^2}{T_\odot^2} = \frac{M_\odot + M_\oplus}{M_\oplus + m_\odot} = \frac{a_\oplus^3}{a_\odot^3},$$

де $T_\oplus$ і $a_\oplus$ — період обертання Землі (рік) і велика піввісь її орбіти, $T_\odot$ і $a_\odot$ — період обертання Місяця навколо Землі і велика піввісь його орбіти, $M_\odot$ — маса Сонця, $M_\oplus$ — маса Землі, $m_\odot$ — маса Місяця. Маса Землі дуже незначна порівняно з масою Сонця, а маса Місяця мала (1 : 81) порівняно з масою Землі. Тому другі доданки в сумах можна відкинути, не роблячи великої

похибки. Розв'язавши рівняння відносно $\frac{M_\odot}{M_\oplus}$ маємо:

$$\frac{M_\odot}{M_\oplus} = \left(\frac{a_\oplus}{a_\odot} \right)^3 : \left(\frac{T_\oplus}{T_\odot} \right)^2.$$

Ця формула дає змогу визначати масу Сонця, виражену в масах Землі. Вона становить близько 333000 мас Землі.

Для порівняння мас Землі та іншої планети, наприклад Юпітера, треба у вихідній формулі індекс 1 віднести до руху Місяця навколо Землі масою M_1 , а 2 — до руху будь-якого супутника навколо Юпітера масою M_2 .

Маси планет, що не мають супутників, визначають за тими збуреннями, які вони спричиняють своїм притяганням у русі сусідніх з ними планет, а також у русі комет, астероїдів чи космічних апаратів.