

## § 20. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

■ Кажуть, що І. Ньютон сам розповідав, як він дійшов до відкриття закону всесвітнього тяжіння. Якось учений гуляв яблуневим садом і побачив у денному небі Місяць. У цей момент на його очах з гілки впало яблуко. Ньютон знав, що яблуко впало під дією притягання Землі. Знав він і про те, що Місяць обертається навколо Землі й, отже, є якась сила, що втримує його на орбіті. Саме тоді до вченого прийшла думка про те, що, можливо, це одна сила змушує яблуко падати на землю, а Місяць залишатися на навколоземній орбіті.

### 1 Що таке гравітаційна взаємодія

Усі без винятку фізичні матеріальні тіла у всесвіті притягуються одне до одного — це явище називають *всесвітнім тяжінням* або *гравітацією* (від латин. *gravitas* — вага).

■ **Гравітаційна взаємодія** — взаємодія, яка є властивою всім тілам у всесвіті й виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного.

Наприклад, зараз ви і цей підручник взаємодієте силами гравітаційного притягання. Однак у цьому випадку сили настільки малі, що їх не зафіксують навіть найточніші сучасні прилади. Сили гравітаційного притягання тіл сягають помітного значення тільки тоді, коли хоча б одне з тіл має масу, яку можна порівняти з масою небесних тіл.

Гравітаційна взаємодія здійснюється за допомогою особливого виду матерії — *гравітаційного поля*, яке існує навколо будь-якого тіла: зорі, планети, людини, книжки, молекули, атома тощо.

### 2 Якою є історія відкриття закону всесвітнього тяжіння

Перші вислови про тяжіння належать до античності. Так, давньогрецький мислитель *Плутарх* писав: «Місяць упав би на Землю як камінь, щойно зникла б сила його польоту».

У XVI–XVII ст. учені Європи повернулися до теорії існування взаємного тяжіння тіл. Поштовхом до її відродження стали насамперед відкриття, зроблені в астрономії: *Миколай Коперник* (рис. 20.1) довів, що в центрі Сонячної системи, «у центрі світобудови»,

розташоване Сонце, а всі планети обертаються навколо нього; *Йоганн Кеплер* (рис. 20.2) відкрив закони руху планет навколо Сонця; *Галілео Галілей* (див. рис. 1.1) створив телескоп і за його допомогою побачив супутники Юпітера.

Чому планети обертаються навколо Сонця, чому супутники обертаються навколо планет, яка сила втримує космічні тіла на орбітах? Учені дійшли висновку, що справа — у взаємному притяганні тіл. Одним із перших, хто це зрозумів, був англійський учений *Роберт Гук* (1635–1703). Він писав: «Усі небесні тіла мають притягання, або силу тяжіння, до свого центра, унаслідок чого вони не тільки притягають власні частини й перешкоджають їм розлітатися, як спостерігається на Землі, але й притягають також усі інші небесні тіла, що перебувають у сфері їхньої дії».

Саме Гук висловив припущення про те, що сила тяжіння залежить від мас тіл, які взаємодіють, і відстані між цими тілами, однак знайти математичний вираз для розрахунку цієї сили йому не вдалося. Це зміг зробити І. Ньютон, сформулювавши закон всесвітнього тяжіння, який часто називають четвертим законом Ньютона.

### Як розрахувати силу гравітаційного притягання

Отримаємо закон всесвітнього тяжіння, йдучи за логікою міркувань Ньютона.

1. Спочатку встановимо, як прискорення вільного падіння, причиною якого є гравітаційне притягання Землі, залежить від відстані до центра Землі:

а) прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі, тобто на відстані  $6,4 \cdot 10^6$  м від її центра, дорівнює  $9,8 \text{ м/с}^2$  (радіус Землі  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$  м);

б) Місяць обертається навколо Землі з періодом  $T = 27,32$  доби  $= 2,36 \cdot 10^6$  с по орбіті радіусом  $r = 3,84 \cdot 10^8$  м  $= 60R_3$ . Під дією гравітаційного притягання Землі Місяць набуває доцентрового прискорення

(рис. 20.3):  $a_{\text{дц}} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 0,0027 \text{ м/с}^2$ . Таким чином, Місяць «падає» на Землю з прискоренням  $g_M = a_{\text{дц}} = 0,0027 \text{ м/с}^2$ ;



**Рис. 20.1.** Миколай Коперник (1473–1543) — польський астроном, творець геліоцентричної системи світу



**Рис. 20.2.** Йоганн Кеплер (1571–1630) — німецький астроном, астролог, математик. Відкрив закони руху небесних тіл (закони Кеплера), які згодом були використані Ньютоном для обґрунтування закону всесвітнього тяжіння





Рис. 20.3. Доцентрове прискорення Місяця зумовлене його притяганням до Землі

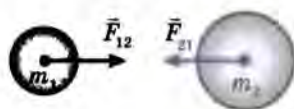


Рис. 20.4. Згідно з третім законом Ньютона модуль сили  $\vec{F}_{21}$ , з якою тіло масою  $m_2$  притягує тіло масою  $m_1$ , дорівнює модулю сили  $\vec{F}_{12}$ , з якою тіло масою  $m_1$  притягує тіло масою  $m_2$

в) прискорення вільного падіння не залежить від маси тіла, тому будь-яке тіло, віддалене від центра Землі на відстань Місяця, падатиме з прискоренням  $0,0027 \text{ м/с}^2$ . Тобто при збільшенні відстані  $r$  до центра Землі в 60 разів прискорення вільного падіння тіла зменшується в  $60^2$  разів  $\left( \frac{g}{g_M} = \frac{9,8}{0,0027} = 3600 \right)$ .

Таким чином, прискорення вільного падіння  $g$  обернено пропорційне квадрату відстані  $r$  від тіла до центра Землі:  $g \sim \frac{1}{r^2}$ .

2. Згідно з другим законом Ньютона  $g \sim F$ , отже:

$$F \sim \frac{1}{r^2}, \quad (1)$$

тобто сила гравітаційного притягання двох тіл обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

3. Відповідно до другого закону Ньютона Земля всім тілам поблизу її поверхні надає прискорення  $g = \frac{F}{m}$ . Але це прискорення не залежить від маси тіла — таке є можливим тільки в разі, якщо сила гравітаційної взаємодії прямо пропорційна масі тіла ( $F \sim m$ ).

4. Відповідно до третього закону Ньютона два тіла масами  $m_1$  і  $m_2$  взаємодіють із рівними за модулем силами (рис. 20.4), але  $F_{12} \sim m_1$ , а  $F_{21} \sim m_2$ . Отже, сила гравітаційної взаємодії двох тіл прямо пропорційна добутку мас цих тіл:

$$F \sim m_1 m_2. \quad (2)$$

Об'єднавши висновки (1) і (2), одержимо **закон всесвітнього тяжіння**:

Між будь-якими двома тілами діють сили взаємного притягання, які прямо пропорційні добутку мас цих тіл і обернено пропорційні квадрату відстані між ними:

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

де  $m_1$  і  $m_2$  — маси тіл, що взаємодіють;  $r$  — відстань між тілами;  $G$  — гравітаційна стала (коефіцієнт пропорційності, однаковий для всіх тіл),  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ .

Закон всесвітнього тяжіння — видатне досягнення природознавства. Він дозволяє описати велике коло явищ, у тому числі рух природних і штучних тіл у Сонячній системі, рух подвійних зір, зоряних скупчень тощо. У сучасній астрономії, базуючись на цьому законі, обчислюють маси небесних тіл, визначають характер їхнього руху, будову, еволюцію.

### Якими є межі застосування закону всесвітнього тяжіння

Формула закону всесвітнього тяжіння дає точний результат у таких випадках:

- 1) якщо розміри тіл нехтовно малі порівняно з відстанню між ними, тобто коли тіла можна вважати матеріальними точками;
- 2) якщо обидва тіла мають кулясту форму та сферичний розподіл речовини; у цьому випадку за відстань між тілами беруть відстань між центрами сфер;
- 3) якщо одне з тіл, що взаємодіють, — куля, розміри та маса якої значно більші, ніж розміри та маса другого тіла, яке перебуває на поверхні цієї кулі або поблизу неї.

Однак коли гравітаційні поля настільки сильні, що розганяють тіла, які перебувають в них, до швидкостей порядку швидкості світла, або коли частинки, що пролітають поблизу масивних тіл, ще на віддалі від цих тіл мали швидкість руху, яку можна порівняти зі швидкістю світла, силу гравітаційного притягання не можна розрахувати за законом всесвітнього тяжіння Ньютона. У загальному випадку тяжіння описується загальною теорією відносності, створеною Альбертом Ейнштейном (1879–1955).

### Як виміряли гравітаційну сталу

Гравітаційна стала  $G$  — одна із фундаментальних констант у фізиці. З формули  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  випливає:

$$G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2}.$$

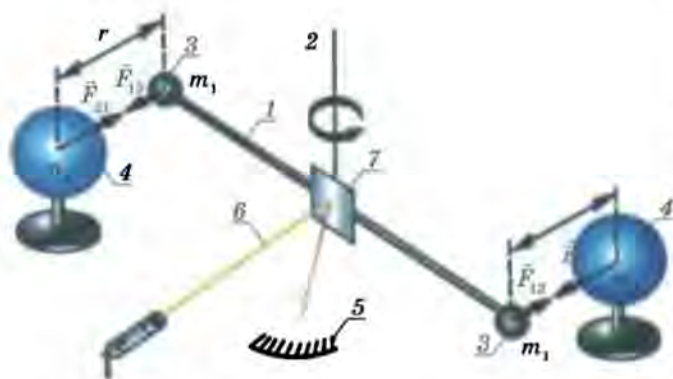
Якщо  $m_1 = m_2 = 1$  кг, а  $r = 1$  м, то  $\{G\} = \{F\}$ , тобто гравітаційна стала чисельно дорівнює силі гравітаційного притягання двох матеріальних точок масою 1 кг кожна, які перебувають на відстані 1 м одна від одної. У цьому й полягає фізичний зміст гравітаційної сталої.

Гравітаційну сталу вперше виміряв англійський учений Генрі Кавендіш (рис. 20.5) у 1798 р. за допомогою крутильних терезів (рис. 20.6). Вимірявши силу  $F$  гравітаційного притягання кульок відомих мас  $m_1$  і  $m_2$  та відстань  $r$  між кульками,



**Рис. 20.5.** Генрі Кавендіш (1731–1810) — англійський фізик і хімік. За кілька років до Ш. Кулона встановив закон взаємодії електричних зарядів. Учений визначив гравітаційну сталу; масу та середню густину Землі





**Рис. 20.6.** Схема досліду з визначення гравітаційної сталої. На довгому легкому коромислі 1, підвішеному на тонкому пружному дроті 2, зрівноважено дві маленькі кульки 3 масою  $m$ , кожна. Біля маленьких кульок розміщено великі свинцеві кульки 4 масами  $m_2$ . У результаті притягання кульок дріт закручується. Кут закручування реєструють на шкалі 5 за поворотом світлового пучка 6, який відбивається від дзеркала 7. За кутом закручування дроту визначають силу гравітаційного притягання

Кавендіш знайшов значення гравітаційної сталої, яка виявилася дуже малою величиною:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ .



### Підбиваємо підсумки

Взаємодію, яка є властивою всім тілам у всесвіті й виявляється в їхньому взаємному притяганні одне до одного, називають гравітаційною, а саме явище взаємного притягання — всесвітнім тяжінням або гравітацією.

Закон всесвітнього тяжіння: між будь-якими двома тілами діє сила взаємного притягання, що прямо пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ , де  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравітаційна стала.

Закон всесвітнього тяжіння справджується: 1) для матеріальних точок; 2) для кулястих тіл зі сферичним розподілом речовини; 3) для невеликих тіл, що перебувають на поверхні значно більшої за них кулі або поблизу цієї кулі.

### Контрольні запитання

1. Яку взаємодію називають гравітаційною? Наведіть приклади. 2. Доведіть, що сила всесвітнього тяжіння обернено пропорційна квадрату відстані між тілами; прямо пропорційна добутку мас тіл, що взаємодіють. 3. Сформулюйте й запишіть закон всесвітнього тяжіння. 4. Яким є фізичний зміст гравітаційної сталої? Чому вона дорівнює? 5. Хто і як з'ясував значення гравітаційної сталої? 6. Якими є межі застосування закону всесвітнього тяжіння?



### Вправа № 17

- Як зміниться сила притягання між двома кульками, якщо одну з них замінити іншою, удвічі більшої маси?
- На якій відстані сила притягання між двома кульками масою 1 т кожна дорівнюватиме 0,667 мкН?
- У скільки разів сила притягання Землею супутника більша на поверхні Землі, ніж на висоті, що дорівнює сумі трьох земних радіусів?
- Визначте масу Сонця, вважаючи, що орбіта Землі є колом і що радіус земної орбіти дорівнює  $1,5 \cdot 10^8$  км.