

§ 18. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

П Ми вже багато разів говорили про геніального англійського вченого Ісаака Ньютона. За свої наукові заслуги він навіть одержав лицарське звання й титул лорда. «Природа для нього була відкритою книгою, яку він читав без зусиль», — писав про цього вченого Альберт Ейнштейн. У роботі «Математичні начала натуральної філософії» (1687) Ньютон сформулював *«аксіоми руху»* — їх тепер називають *законами Ньютона*. Про другий закон Ньютона — основний закон динаміки — йтиметься в цьому параграфі.

1 Другий закон Ньютона

У результаті дії на тіло деякої сили тіло набуває прискорення, значення якого залежить від маси цього тіла. З'ясуємо експериментально, якою залежністю пов'язані сила, прискорення та маса тіла.

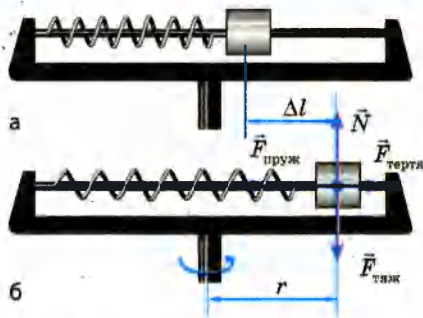


Рис. 18.1. Дослід зі встановлення другого закону Ньютона за допомогою відцентрової машини: *а* — поки машині не надано обертання, пружина залишається нерозтягнутою й сила пружності пружини, що діє на циліндр, дорівнює нулю; *б* — після початку обертання пружина розтягується й на циліндр починає діяти сила пружності пружини, надаючи йому доцентрового прискорення

Для експерименту скористаємося циліндром, надітим на стрижень відцентрової машини, та пружиною, один кінець якої прикріплено до циліндра, а другий — до рами машини (рис. 18.1, *а*).

Під час обертання на циліндр діють чотири сили: сила пружності $\vec{F}_{\text{пруж}}$ пружини, сила тертя $\vec{F}_{\text{тертя}}$ циліндра об вісь машини, сила тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ та сила нормальної реакції опори \vec{N} (рис. 18.1, *б*). Сила тяжіння скомпенсована силою реакції опори, а отвір і стрижень добре відшліфовані та змащені, тому силою тертя циліндра об стрижень можна знехтувати. Таким чином, можна з достатньою точністю стверджувати, що в даному випадку причина прискорення циліндра — тільки сила пружності, значення якої легко визначити за видовженням Δl пружини: $F_{\text{пруж}} = k\Delta l$, де k — жорсткість пружини.

Дослід показує: чим швидше обертається машина, тим більше видовжується пружина. При цьому у скільки разів збільшується сила пружності пружини, у стільки ж разів збільшується доцентрове прискорення, якого набуває циліндр у результаті дії цієї сили. Таким чином, *прискорення тіла прямо пропорційне прикладеній до цього тіла силі:*

$$a \sim F.$$

Досліди з циліндрами різної маси дають такий результат: за незмінної сили пружності (видовження пружини не змінюється) прискорення, якого набуває циліндр, зменшується у стільки ж разів, у скільки разів збільшується маса циліндра. Отже, *прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії даної сили, обернено пропорційне масі цього тіла:*

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

В інерціальних системах відліку при будь-якій взаємодії виконуються співвідношення: $a \sim F$ і $a \sim \frac{1}{m}$. Об'єднавши ці співвідношення й узявши до уваги, що напрямком прискорення тіла завжди збігається з напрямком сили, у результаті дії якої це прискорення набуде ($\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{F}$), сформулюємо **другий закон Ньютона:**

■ Прискорення, якого набуває тіло внаслідок дії сили, прямо пропорційне цій силі та обернено пропорційне масі тіла:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Цей вираз можна записати і для модулів: $a = \frac{F}{m}$, і для проєкцій: $a_x = \frac{F_x}{m}$; $a_y = \frac{F_y}{m}$; $a_z = \frac{F_z}{m}$.

2 Що впливає з другого закону Ньютона

Наслідки із другого закону Ньютона

1. Прискорення визначається силою, яка діє на тіло (сила — причина прискорення). Змінення сили приводить до змінення прискорення, а не навпаки.
2. Якщо на тіло одночасно діють кілька сил, то у формулі, яка є математичним записом другого закону Ньютона, силу слід розуміти як рівнодійну \vec{F} усіх сил, прикладених до тіла: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ (рис. 18.2). У цьому випадку другий закон Ньютона можна записати так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}, \text{ або } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}.$$

Останньою формулою зручно користуватися для розв'язування задач.

3. Напрямок прискорення руху тіла завжди збігається з напрямком рівнодійної сил, прикладених до тіла.
4. Якщо сили, що діють на тіло, скомпенсовані, тобто $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$, то $\vec{a} = 0$ (рис. 18.3). Таким чином, закон інерції можна сформулювати так: *тіло перебуває у стані спокою або рухається з постійною швидкістю ($\vec{a} = 0$), якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю.*
5. Тіло рухається рівноприскорено тільки в тому випадку, якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не змінюється з часом.

Справді, оскільки $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, а $m = \text{const}$, то $\vec{a} = \text{const}$, якщо $\vec{F} = \text{const}$.

6. На підставі другого закону Ньютона встановлюється одиниця сили: якщо маса тіла дорівнює 1 кг, а прискорення, якого набуває тіло в результаті дії сили, дорівнює 1 м/с², то з рівності $F = ma$ маємо, що сила дорівнює одиниці сили — 1 Н (1 Н = 1 кг · 1 м/с²).



Рис. 18.2. Сила \vec{F} — рівнодійна сили тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$, сили нормальної реакції опори \vec{N} і сили тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тертя ковзання}}$, що діють на лижника під час спуску з гори. Сила \vec{F} викликає прискорення \vec{a} лижника

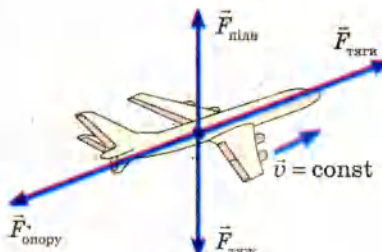


Рис. 18.3. Якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю, то тіло перебуває у стані спокою (а) або рухається з постійною швидкістю (б)

3 Чому другий закон Ньютона називають основним законом динаміки

Другий закон Ньютона дозволяє встановити причини багатьох механічних явищ, за його допомогою можна розв'язати більшість практичних задач на рух тіл. Другий закон Ньютона дозволяє розв'язати основну задачу механіки — визначити положення тіла в будь-який момент часу. Справді, знаючи масу тіла та сили, що діють на нього, легко визначити прискорення цього тіла. Знаючи ж залежність прискорення тіла від часу та початкові умови руху (початкову швидкість, початкові координати тіла), можна визначити координати і швидкість руху тіла в будь-який момент часу.

! Підбиваємо підсумки

Другий закон Ньютона — основний закон динаміки. Цей закон виконується тільки в інерціальних СВ: прискорення \vec{a} , якого набуває тіло під дією сили \vec{F} , прямо пропорційне цій силі та обернено про-

порційне масі m тіла: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

Наслідки із другого закону Ньютона:

1) сила — причина прискорення; прискорення визначається силою, а не навпаки;

2) якщо на тіло одночасно діють кілька сил ($\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$), то другий закон Ньютона можна записати так: $\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}$, або

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a};$$

3) напрямок прискорення завжди збігається з напрямком рівнодійної сил, прикладених до тіла;

4) якщо сили, що діють на тіло, скомпенсовані, то тіло перебуває в спокої або рухається з постійною швидкістю (якщо $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$, то $\vec{a} = 0$);

5) тіло рухається рівноприскорено тільки в тому випадку, якщо рівнодійна сил, прикладених до тіла, не змінюється з часом;

6) одиниця сили (ньютон) установлюється на підставі другого закону Ньютона: $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2$.

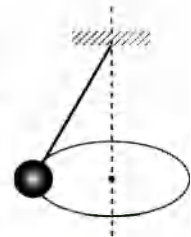
? Контрольні запитання

- Від яких чинників залежить прискорення тіла? Опишіть дослід, що встановлює цю залежність.
- Сформулюйте другий закон Ньютона, запишіть його математичний вираз.
- Чому другий закон Ньютона називають основним законом динаміки?
- Що можна сказати про напрямок сили та прискорення, якого ця сила надає тілу?
- Як записати другий закон Ньютона, якщо на тіло діють кілька сил?
- Сформулюйте закон інерції, спираючись на другий закон Ньютона.
- Якою є умова рівноприскореного руху тіла?

Вправа № 15

- Як напрямлена рівнодійна сил, прикладених до автомобіля, коли він розганяється на горизонтальній ділянці дороги?
- Чи можна виходячи з формули $\vec{F} = m\vec{a}$ стверджувати, що сила, яка діє на тіло, залежить від маси цього тіла та прискорення, якого надає тілу дана сила?

3. Тіло масою 2 кг, яке рухається на південь, змінює швидкість свого руху внаслідок дії постійної сили 10 Н, направленої на схід. Визначте модуль і напрямок прискорення тіла.
4. Кулька масою 200 г закріплена на невагомому стрижні й рівномірно рухається по колу радіусом 10 см (див. рисунок). Які сили діють на кульку? Куди напрямлена їхня рівнодійна? Визначте її значення, якщо кулька здійснює 10 обертів за 5 с.
5. На тіло масою 5 кг діють дві взаємно перпендикулярні сили: 9 Н і 12 Н. Визначте прискорення цього тіла.
6. Під дією сили 15 кН тіло рухається прямолінійно так, що його координата змінюється за законом: $x = -200 + 9t - 3t^2$. Визначте масу цього тіла.



§ 19. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

31 Вдарте долонею об парту. Боляче? Але чому? Адже це ви били парту, а не парту вас. Потягніть свого товариша за руку, стоячи на гладенькому льоду. Хто зрушить з місця? Обидва? А чому? Адже це ви тягнули товариша, а не товариш вас. Чи зможете ви, вхопившись за волосся, витягти себе з води? Ні? Але чому? Ви ж легко можете витягти в такий спосіб з води дорослу людину, що важча за вас. На ці та інші запитання вам допоможе відповісти третій закон Ньютона.

1 Третій закон Ньютона

Ми вже говорили про те, що в природі не буває так, що, наприклад, тіло *A* діє на тіло *B*, а тіло *B* при цьому не діє на тіло *A*. Тіла завжди взаємно діють одне на одне — *взаємодіють*. З'ясуємо, яким співвідношенням пов'язані сили, з якими тіла діють одне на одне. Для цього звернемося до досліду.

Поставимо на горизонтальну поверхню два однакові легкорухомі візки та за допомогою динамометрів прикріпимо їх до вертикальних стійок. На візках закріпимо по магніту так, щоб вони були повернені один до одного різнойменними полюсами. У результаті візки притягнуться, розтягнувши пружини динамометрів (рис. 19.1). Дослід демонструє, що покази обох динамометрів будуть однаковими. Це означає, що з якою силою магніт *A* притягує магніт *B*, з такою ж силою магніт *B* притягує магніт *A*: $F_1 = F_2$. Сили при цьому мають протилежні напрямки: $\vec{F}_1 \uparrow \downarrow \vec{F}_2$.

Можна провести безліч дослідів із вимірювання сил, з якими взаємодіють два тіла, і результат завжди буде однаковим: ці сили будуть рівними за модулем і протилежними за напрямком (рис. 19.2–19.5).

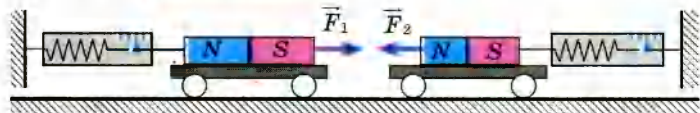


Рис. 19.1. Сили, що виникають під час взаємодії магнітів, рівні за модулем і протилежні за напрямком: $F_1 = F_2$, $\vec{F}_1 \uparrow \downarrow \vec{F}_2$, отже, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

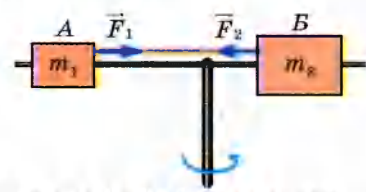


Рис. 19.2. За будь-якої частоти обертання відцентрової машини $\frac{a_{\text{цн}1}}{m_1} = \frac{m_2}{m_1}$. Звідси: $m_1 a_{\text{цн}1} = m_2 a_{\text{цн}2}$, інакше: $F_1 = F_2$, тобто з якою силою циліндр *A* тягне циліндр *B*, з такою ж силою циліндр *B* тягне циліндр *A*; ці сили напрямлені назустріч одна одній, отже, їхні напрямки протилежні: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

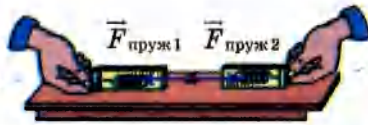


Рис. 19.3. Якщо взяти в руки два однакові динамометри, зчепити гачками й потягти в різні боки, то обидва динамометри покажуть однакові за модулем сили:

$$\vec{F}_{\text{пруж 1}} = -\vec{F}_{\text{пруж 2}}$$

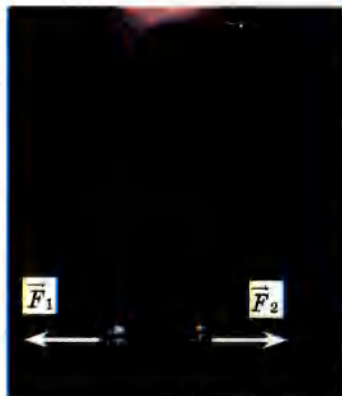


Рис. 19.4. На кожну з двох одноіменно заряджених кульок діє сила Кулона з боку іншої кульки. Ці сили є рівними за модулем і протилежними за напрямком:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

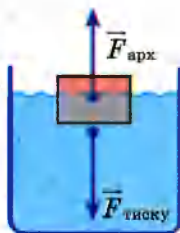


Рис. 19.5. Сила $\vec{F}_{\text{арх}}$, з якою вода виштовхує дерев'яний брусок, що плаває на її поверхні, дорівнює за модулем і протилежна за напрямком силі $\vec{F}_{\text{тиску}}$, з якою брусок тисне на воду: $\vec{F}_{\text{арх}} = -\vec{F}_{\text{тиску}}$

Взаємодію тіл описує закон взаємодії — **третій закон Ньютона***:

Сили, з якими тіла діють одне на одне, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

де \vec{F}_{12} — сила, з якою друге тіло діє на перше; ця сила прикладена до першого тіла; \vec{F}_{21} — сила, з якою перше тіло діє на друге; ця сила прикладена до другого тіла.

2 Якими є особливості взаємодії тіл

Звернувшись до вищезазначених прикладів, можна помітити низку особливостей.

1. *Третій закон Ньютона виконується як у випадках безпосереднього контакту тіл* (див. рис. 19.2, 19.3, 19.5), так і у випадках взаємодії тіл на відстані (див. рис. 19.1, 19.4).

2. *Сили завжди виникають парами*: якщо присутня сила \vec{F}_1 , що діє на тіло А з боку тіла В, то обов'язково присутня рівна їй за модулем і протилежно напрямлена сила \vec{F}_2 , що діє на тіло В з боку тіла А. Зверніть увагу: прояви цих сил (або однієї з них) не завжди помітні. Наприклад, під час ходьби ви відштовхуєтеся від поверхні Землі, отже, на вас діє сила з боку Землі. Відповідно до третього закону Ньютона, з такою самою силою ви штовхаєте Землю назад, однак через велику масу Землі результат дії цієї сили непомітний. А от якщо ви йтимете по легкому човну, то ваша дія на нього відразу стане помітною: човен буде рухатись у напрямку, протилежному вашому руху.

3. *Пари сил, що виникають під час взаємодії двох тіл, завжди мають одну природу*. У прикладі, наведеному на рис. 19.1, обидві сили магнітні, на рис. 19.2, 19.3, 19.5 обидві сили — сили пружності, на рис. 19.4 обидві сили електростатичні.

* У формулюванні Ньютона цей закон звучав так: дії завжди існує рівна й протилежна протидія, інакше: дії двох тіл одне на одне між собою рівні й напрямлені протилежно.

4. Здавалося б, якщо за будь-якої взаємодії тіл виникає пара сил, рівних за модулем і протилежних за напрямком, такі сили мають зрівноважувати одна одну, а це рівнозначно тому, що дії немає; отже, виходить, що ми приречені або на нерухомість, або на безперервний рух. Але ж у реальності це не так! Річ у тім, що *зрівноважуються тільки ті сили, які прикладені до одного тіла, а сили, які виникають під час взаємодії, прикладені до різних тіл, тому вони не можуть зрівноважити (компенсувати) одна одну.*

3 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Посудина з водою зрівноважена на терезах. Чи зміниться рівновага терезів, якщо опустити у воду палець, не торкаючись при цьому дна й стінок посудини?

Аналіз фізичної проблеми. Оскільки палець взаємодіє з водою, то для розв'язання задачі скористаємося третім законом Ньютона та умовою рівноваги тіл.

Розв'язання. Перед початком досліду терези перебувають у рівновазі, отже, сили, що діють на праве та ліве плечі терезів, є рівними. Після занурення пальця у воду на нього почне діяти архімедова сила, напрямлена вертикально вгору. Відповідно до третього закону Ньютона сили виникають парами, тому з боку пальця на воду теж почне діяти сила — рівна за модулем архімедовій силі й напрямлена вниз. Таким чином, палець (навіть не торкаючись дна та стінок посудини) штовхне воду, а разом з нею й посудину вниз — рівновага терезів порушиться в бік посудини з водою.

Відповідь: рівновага терезів порушиться в бік посудини з водою.

! Підбиваємо підсумки

Тіла завжди взаємно діють одне на одне — взаємодіють. Взаємодію тіл описує третій закон Ньютона (закон взаємодії): сили, з якими тіла діють одне на одне, напрямлені вздовж однієї прямої, рівні за модулем і протилежні за напрямком: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Особливості взаємодії тіл: третій закон Ньютона виконується як у випадках безпосереднього контакту тіл, так у випадках взаємодії тіл на відстані; сили завжди виникають парами; пари сил, що виникають під час взаємодії, завжди мають одну природу; ці сили не зрівноважують одна одну, тому що прикладені до різних тіл.

? Контрольні запитання

1. Сформулюйте третій закон Ньютона. Яким є його математичний запис? Чому цей закон називають законом взаємодії? 2. Наведіть приклади прояву третього закону Ньютона. 3. Що можна сказати про природу сил, які виникають під час взаємодії тіл? Наведіть приклади. 4. Чому сили, що виникають під час взаємодії тіл, не зрівноважують одна одну?

✓ Вправа № 16

1. Розгляньте гравітаційну взаємодію яблука, що висить на гілці дерева, та Землі. Що сильніше притягується: яблуко до Землі чи Земля до яблука?

2. Чи говорив правду барон Мюнхаузен, коли стверджував, що витягував себе із болота за волосся? Відповідь обґрунтуйте.
3. Хлопчик масою 48 кг, стоячи на ковзанах на льоду, відштовхує від себе кулю масою 3 кг, надаючи їй у горизонтальному напрямку прискорення 8 м/с^2 . Якого прискорення набуває хлопчик?
4. Мотузка витримує натяг не більш ніж 300 Н. Чи порветься ця мотузка, якщо двоє чоловіків тягнуть її в протилежні боки силами по 200 Н кожен? Чи порветься мотузка, якщо один її кінець закріпити, а обидва чоловіки тягтимуть її за другий кінець в одному напрямку?
5. Кінь везе сани. Згідно з третім законом Ньютона сани тягнуть коня назад із такою ж силою, з якою кінь тягне сани вперед. То чому ж кінь везе сани, а не навпаки? Чому вони взагалі рухаються?

§ 20. ЗАКОН ВСЕСВІТНЬОГО ТЯЖІННЯ

Знають, 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 навколосемній 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. Попштовхом 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.

3 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 $9,8$ м/с² (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): $a_{\text{дц}} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 0,0027$ м/с². Таким чином, Місяць «падає» на

Землю з прискоренням $g_M = a_{\text{дц}} = 0,0027$ м/с²;



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

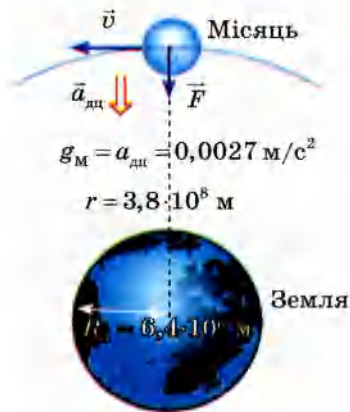


Рис. 20.3. Доцентрове прискорення Місяця зумовлене його притяганням до Землі

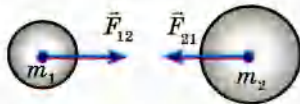


Рис. 20.4. Згідно з третім законом Ньютона модуль сили \vec{F}_{21} , з якою тіло масою m_1 притягує тіло масою m_2 , дорівнює модулю сили \vec{F}_{12} , з якою тіло масою m_2 притягує тіло масою m_1

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.

4 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).

5 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

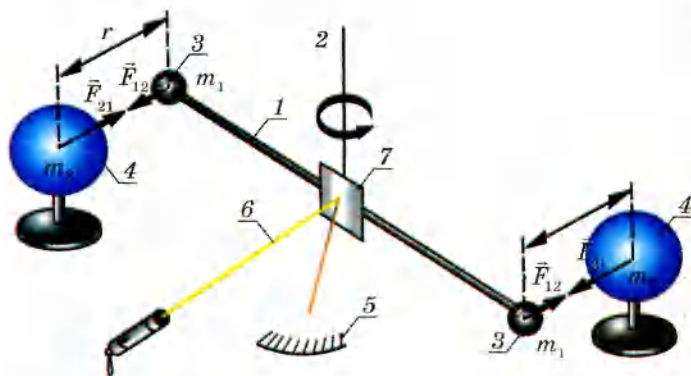


Рис. 20.6. Схема дослід з визначення гравітаційної сталої. На довгому легкому коромислі 1, підвішеному на тонкому пружному дроті 2, зрівноважено дві маленькі кульки 3 масою m_1 кожна. Біля маленьких кульок розміщено великі свинцеві кульки 4 масами m_2 . У результаті притягання кульок дріт закручується. Кут закручування реєструють на шкалі 5 за поворотом світлового пучка 6, який відбивається від дзеркальця 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

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