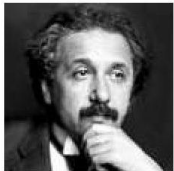


РОЗДІЛ II. ЕЛЕМЕНТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

§ 24. ПОСТУЛАТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ. РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ



А. Ейнштейн

«Відтоді як за теорію відносності взяли математики, — зізнавався А. Ейнштейн, — я її вже й сам не розумію». І не дивно, що навколо теорії відносності ось уже 100 років не вщухають запеклі суперечки тих, хто її «не розуміє». А що послугувало причиною створення цього, на перший погляд, суто теоретичного розділу фізики? Виявляється, спочатку, майже як завжди у фізиці, був експеримент.

1 Принцип відносності Галілея — Ньютона

Механіка — наука про рух. У механіці І. Ньютона будь-який рух розглядають відносно інерціальних систем відліку (СВ). Розв'язуючи задачу, обирають певну *інерціальну СВ*, умовно вважаючи її нерухомою. Однак це не означає, що обрана СВ — єдино правильна. Можна обрати будь-яку інерціальну СВ — результат буде тим самим.

Для інерціальних СВ справджується **механічний принцип відносності** (принцип відносності Галілея — Ньютона):

Будь-які механічні процеси в усіх інерціальних СВ відбуваються однаково, тобто жодними механічними дослідженнями всередині системи не можна встановити, рухається система рівномірно прямолінійно чи перебуває в стані спокою.

В інерціальних СВ виконується **класичний закон додавання швидкостей**: швидкість $\vec{v}$ руху тіла відносно нерухомої СВ дорівнює сумі швидкості $\vec{v}_1$ руху тіла відносно рухомої СВ і швидкості $\vec{v}_2$ руху рухомої СВ відносно нерухомої: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.

2 Якими були передумови створення спеціальної теорії відносності

Після того як у середині XIX ст. англійський фізик Джеймс Максвелл (1831–1879) сформулював основні закони електродинаміки, виникло запитання: чи поширюється принцип відносності Галілея — Ньютона на електромагнітні явища? Інакше: чи відбуваються електромагнітні процеси (взаємодія електричних зарядів, явище електромагнітної індукції, поширення електромагнітних хвиль тощо) однаково в усіх інерціальних СВ? Уже перші міркування над цим питанням давали, здавалося б, заперечну відповідь.

Наприклад, відповідно до законів електродинаміки *швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі*, в тому числі швидкість поширення світла, однакова в усіх напрямках і дорівнює 299 792 458 м/с (для розрахунків зазвичай беруть округлене значення: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Однак відповідно до класичного закону додавання швидкостей швидкість поширення світла має бути різною в різних СВ.

Чи так це, чи залежить швидкість поширення світла від вибору СВ? Для відповіді на це запитання американські вчені *Альберт Майкельсон* (1852–1931) і *Едвард Морлі* (1838–1923) у 1887 р. поставили експеримент.

Ідея вчених була такою. Якщо від джерела світла на Землі спрямувати промінь світла спочатку вздовж лінії руху Землі, а потім перпендикулярно до неї, то кожного разу швидкість поширення світла відносно нерухомої СВ має бути різною. Справді, згідно з класичним законом додавання швидкостей швидкість c_1 світла, що поширюється в напрямку руху Землі, має дорівнювати:

$$c_1 = c + v,$$

де $v = 2,96 \cdot 10^4$ м/с — швидкість руху Землі навколо Сонця.

Якщо світло поширюється в напрямку, протилежному напрямку руху Землі, то швидкість c_2 його поширення має дорівнювати: $c_2 = c - v$. Відповідно швидкість c_3 світла, яке поширюється перпендикулярно до напрямку руху Землі, має становити: $c_3 = \sqrt{c^2 + v^2}$.

Досліди А. Майкельсона й Е. Морлі показали, що *швидкість поширення світла в будь-якому випадку є однаковою* (рис. 24.1). Це загнало в «глухий кут» провідних фізиків кінця XIX — початку XX ст., адже *одержаний результат суперечив класичному закону додавання швидкостей*.

Тож яка теорія правильна — класична механіка І. Ньютона чи електромагнітна теорія Дж. Максвелла? Розв'язанням проблеми зацікавилися провідні фізики того часу, серед яких *Гендрік Антон Лоренц* (1853–1928), *Жуль Анрі Пуанкаре* (1854–1912), *Герман Мінковський* (1864–1909), *Альберт Ейнштейн* (1879–1955). Було зрозуміло, що проблему можна розв'язати тільки на основі нових фізичних уявлень про простір і час. Такі уявлення почали розвиватися ще наприкінці XIX ст., а остаточно були сформульовані А. Ейнштейном у роботі «До електродинаміки рухомих тіл». Незалежно один від одного А. Ейнштейн і Ж. А. Пуанкаре сформулювали важливі постулати, які було покладено в основу *спеціальної теорії відносності*, або *релятивістської механіки* (від латин. *relativus* — відносний).

Спеціальна теорія відносності (СТВ) розглядає взаємозв'язок фізичних процесів *тільки в інерціальних СВ*, тобто в СВ, які рухаються одна відносно одної рівномірно прямолінійно.

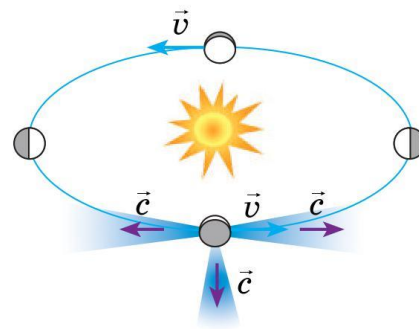


Рис. 24.1. Незалежність швидкості поширення світла від вибору СВ. Швидкість поширення світла вздовж лінії руху Землі та перпендикулярно до лінії її руху є незмінною і дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с

3

Постулати спеціальної теорії відносності

Перший постулат СТВ:

В інерціальних СВ всі закони природи однакові.

Це означає, що *всі інерціальні СВ еквівалентні (рівноправні)*. У разі наявності двох інерціальних СВ немає сенсу з'ясовувати, яка з них рухається

відносно спостерігача, а яка перебуває в спокої. Жодні досліди в будь-якій галузі фізики (електрика й магнетизм, молекулярна фізика, ядерна фізика, механіка тощо) не дозволяють виділити абсолютну (переважну) інерціальну СВ.

Другий постулат СТВ:

Швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ.

Це означає, що швидкість поширення світла у вакуумі *інваріантна* — вона не залежить від швидкості руху джерела або приймача світла.

Незмінність швидкості поширення світла — фундаментальна властивість природи. Відповідно до цього постулату *швидкість поширення світла — максимумно можлива швидкість поширення будь-якої взаємодії*. Матеріальні об'єкти не можуть мати швидкість більшу, ніж швидкість світла.

4 Чи є абсолютним час

Після швидкості поширення світла другим найважливішим поняттям СТВ є поняття *події*.

Подія — будь-яке явище, що відбувається в певній точці простору в певний момент часу.

Подія для матеріальної точки вважається заданою, якщо задано координати (x, y, z) місця, де подія відбувається, і час t , коли ця подія відбувається. З геометричної точки зору, задати подію означає задати точку в чотиривимірному просторі «координати — час».

У класичній механіці І. Ньютона час однаковий у будь-якій інерціальній СВ, тобто такі поняття, як «зараз», «раніше», «пізніше», «одночасно», не залежать від вибору СВ. У релятивістській механіці час залежить від вибору СВ. Події, що відбулися в одній СВ одночасно, в іншій СВ можуть бути розділені часовим проміжком, тобто **одночасність двох подій відносна**. Покажемо це за допомогою уявного експерименту.

Нехай посередині космічного корабля (рис. 24.2), який рухається зі швидкістю v відносно зовнішнього спостерігача, відбувся спалах світла. Для спостерігача, який перебуває всередині корабля, світло досягає носа і корми корабля одночасно, тобто в системі відліку K' , пов'язаній із кораблем, ці дві події відбуваються одночасно (див. рис. 24.2, а). Для зовнішнього спостерігача світло досягає корми раніше, ніж носа корабля, тому що корма

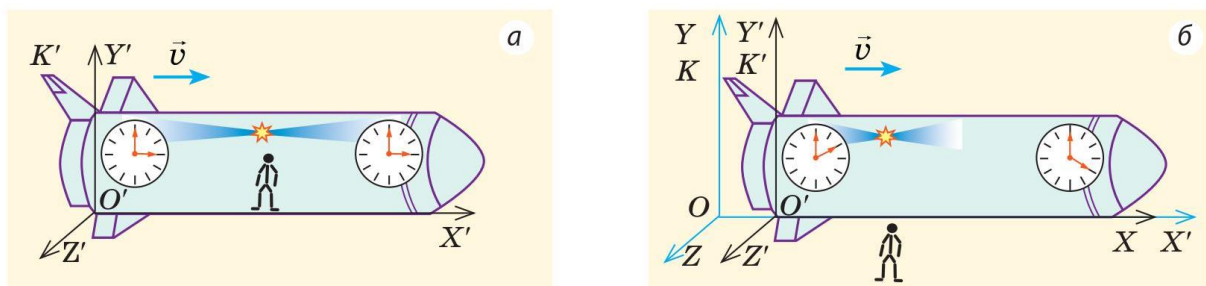


Рис. 24.2. Відносність одночасності подій: а — для спостерігача всередині корабля світло досягає носа і корми корабля одночасно; б — для спостерігача поза кораблем світло досягає носа корабля пізніше, ніж корми

наближається до спостерігача, а ніс корабля віддаляється від нього, тобто в системі відліку K , пов'язаній із зовнішнім спостерігачем, ці дві події відбуваються не одночасно (див. рис. 24.2, б).

5

Релятивістський закон додавання швидкостей

Відповідно до другого постулату СТВ швидкість поширення світла у вакуумі є незмінною й не залежить від швидкості руху джерела або приймача світла. Це означає, що класичний закон додавання швидкостей у релятивістській механіці застосовувати не можна. У СТВ застосовують *релятивістський закон додавання швидкостей*. Запишемо цей закон для окремого випадку, — випадку додавання швидкостей, напрямлених уздовж однієї прямої, наприклад осі OX (рис. 24.3). Тоді *релятивістський закон додавання швидкостей* має вигляд:

$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}},$$

де v_x — проекція швидкості руху тіла відносно нерухомої СВ K ; v_{1x} — проекція швидкості руху тіла відносно рухомої СВ K' ; v_{2x} — проекція швидкості рухомої СВ K' відносно нерухомої СВ K .

Зіставимо релятивістський і класичний закони додавання швидкостей. Якщо швидкості набагато менші від швидкості світла ($v_1 \ll c$, $v_2 \ll c$), то $1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2} \approx 1$ і релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного: $v_x = v_{1x} + v_{2x}$.



Чи можна, розглядаючи, наприклад, рух автомобіля відносно потяга, користуватися релятивістським законом додавання швидкостей? А чи варто?

6

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Доведіть, використовуючи релятивістський закон додавання швидкостей, що у випадку переходу від однієї інерціальної СВ до іншої швидкість поширення світла не змінюється.

Аналіз фізичної проблеми. Для розв'язання задачі слід виконати пояснювальний рисунок (ми скористаємося рис. 24.3). Нехай квант світла M рухається зі швидкістю $\vec{v}_1$ ($v_1 = c$) уздовж осі $O'X'$ системи відліку K' , яка, у свою чергу, рухається зі швидкістю $\vec{v}_2$ в напрямку осі OX системи відліку K . Нам потрібно визначити швидкість руху кванта відносно СВ K .

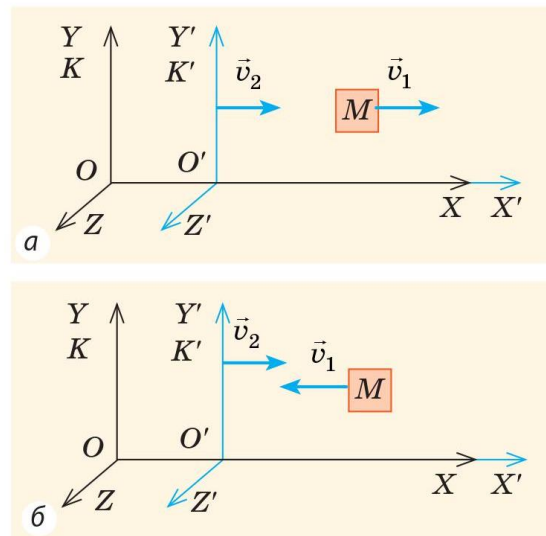


Рис. 24.3. Тіло M рухається зі швидкістю $\vec{v}_1$ відносно СВ K' , яка, у свою чергу, рухається зі швидкістю $\vec{v}_2$ відносно СВ K : а — напрямок руху тіла збігається з напрямком осі $O'X'$; б — напрямок руху тіла протилежний напрямку осі $O'X'$

Розв'язання. Розглянемо два випадки.

Випадок 1: квант світла рухається в напрямку осі $O'X'$ (рис. 24.3, а).

Випадок 2: квант світла рухається протилежно напрямку осі $O'X'$ (рис. 24.3, б).

Запишемо релятивістський закон додавання швидкостей: $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$ (*).

Знайдемо проекції швидкостей на вісь OX :

$$v_{1x} = v_1 = c, \quad v_{2x} = v_2.$$

$$v_{1x} = -v_1 = -c, \quad v_{2x} = v_2.$$

Підставивши одержані вирази у формулу (*), маємо:

$$v_x = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c + v_2}{\frac{c + v_2}{c}} = c.$$

$$v_x = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{v_2}{c}} = \frac{v_2 - c}{\frac{c - v_2}{c}} = -c.$$

Отже, в будь-якому випадку швидкість руху кванта світла відносно СВ K дорівнює c ; знак «-» означає, що квант рухається в напрямку, протилежному напрямку осі OX .

Відповідь: швидкість поширення світла не залежить від вибору СВ.



Підбиваємо підсумки

- В основу спеціальної теорії відносності (СТВ) покладено два постулати: 1) в усіх інерціальних СВ закони природи однакові; 2) швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ; це максимально можлива швидкість руху й поширення взаємодії у Всесвіті.

- Одночасність двох подій відносна: події, одночасні в одній інерціальній СВ, не є одночасними в інерціальних СВ, що рухаються відносно першої СВ.

- У СТВ для визначення відносної швидкості руху тіл застосовують релятивістський закон додавання швидкостей: $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$. Він набуває ви-

гляду класичного, коли швидкості набагато менші від швидкості світла. У загальному випадку класична механіка І. Ньютона є окремим випадком СТВ.



Контрольні запитання

- У чому результати експерименту А. Майкельсона й Е. Морлі суперечили класичному закону додавання швидкостей?
- Сформулюйте постулати СТВ і поясніть їх зміст.
- У чому полягає відмінність першого постулату СТВ від принципу відносності в механіці І. Ньютона?
- Чому дорівнює швидкість поширення світла у вакуумі?
- Що таке подія? Коли подія визначена?
- Що означає вираз «одночасність двох подій відносна»?
- За яких швидкостей релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного?



Вправа № 24

- Два автомобілі рухаються назустріч один одному. Чому дорівнює швидкість поширення світла, випромінюваного фарами першого автомобіля, у СВ, пов'язаній із другим автомобілем?
- Йонізований атом, вилетівши з прискорювача зі швидкістю $0,5c$ (c — швидкість поширення світла), випустив фотон у напрямку свого руху. Якою є швидкість руху фотона відносно прискорювача?
- Космічна ракета віддаляється від спостерігача зі швидкістю $0,8c$. Яку швидкість відносно Землі матиме снаряд, випущений із ракети в напрямку її руху зі швидкістю $0,6c$? Якою є швидкість руху снаряда відносно Землі, якщо він випущений у напрямку, протилежному напрямку руху ракети?
- Дві ракети віддаляються одна від одної, рухаючись зі швидкостями $0,7c$ відносно нерухомого спостерігача. Визначте: а) швидкість руху ракет відносно одна одної; б) на скільки збільшується щосекунди відстань між ракетами з точки зору спостерігача.
- Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, чому існують чорні діри.