

§ 47. РЕЛЯТИВІСТСЬКИЙ ЗАКОН ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ. ВІДНОСНІСТЬ ОДНОЧАСНОСТІ

21

Почавши знайомство зі спеціальною теорією відносності, дехто з вас, можливо, засумнівався: про яке невиконання законів механіки І. Ньютона йдеться, якщо численні досліди підтверджують їхню правильність? А може, й обурився: для чого ж стільки часу було витрачати на вивчення класичної механіки, якщо ця теорія суперечить експерименту? Сумнів одних і обурення інших цілком зрозумілі, але даремні. Річ у тім, що механіка І. Ньютона є ніби частиною СТВ — для випадків, коли швидкості руху частинок набагато менші за швидкість поширення світла. З'ясуємо, чи це так.

1 Чи є абсолютним час

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

Подією називають будь-яке явище, що відбувається в даній точці простору в деякий 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 «тепер», «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.

Установити одночасність подій можна тільки за допомогою годинників, які йдуть синхронно. Іншого способу не існує. Годинники йдуть *синхронно*, якщо вони показують однаковий час у момент, коли відбувається подія.

Припустимо, що у двох точках A і B простору встановлено два синхронізовані годинники. Нехай у цих точках відбуваються певні події, наприклад спалахують блискавки. Якщо спостерігач *бачить*, що в момент спалаху час на обох годинниках однаковий, то він робить висновок, що події одночасні. Слово «бачить» означає, що до спостерігача дійшов світловий сигнал.

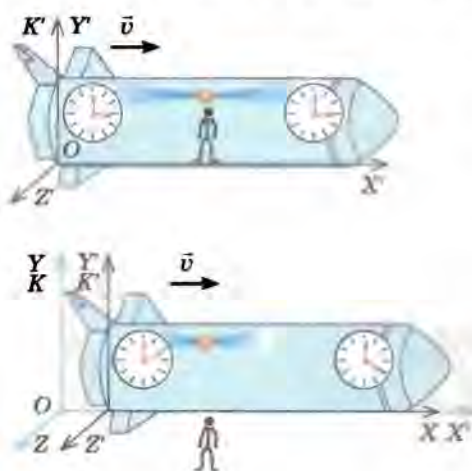


рис. 47.1. Відносність одночасності подій:
— для спостерігача всередині корабля світло досягає носа і корми корабля одночасно;
— для спостерігача поза кораблем світло досягає носа корабля пізніше, ніж корми

Якби сигнал поширювався миттєво, то одночасність подій мала б абсолютний характер. Однак жодний сигнал не може поширюватися зі швидкістю, більшою за швидкість світла. Тому події, одночасні в одній інерціальній СВ, не є одночасними в іншій інерціальній СВ, яка рухається відносно першої, — тобто *одночасність двох подій відносна*.

Покажемо це за допомогою мисленого експерименту. Нехай посередині космічного корабля, який рухається зі швидкістю v відносно зовнішнього спостерігача, встановлене джерело світла; другий спостерігач перебуває всередині корабля (рис. 47.1). У певний момент часу джерело світла спалахує. Для спостерігача 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. 47.1, а). Для зовнішнього спостерігача світло досягає корми раніше, ніж носа корабля, тому що корма 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. 47.1, б).

Релятивістський закон додавання швидкостей

Відповідно до другого постулату СТВ швидкість поширення світла у вакуумі є постійною 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 часткового випадку.

Нехай тіло рухається зі швидкістю \vec{v}_1 уздовж осі X' системи відліку K' , яка, у свою чергу, рухається з певною швидкістю \vec{v}_2 відносно системи відліку K . Нехай під час руху координатні осі OX і $O'X'$ напрямлені вздовж однієї прямої, а координатні осі OY і $O'Y'$, OZ і $O'Z'$ залишаються паралельними (рис. 47.2). 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 .

Порівняємо релятивістський і класичний закони додавання швидкостей.

У разі швидкостей, які набагато менші за швидкість світла ($v_1 \ll c$ і $v_2 \ll c$), $1 + \frac{v_{1x} v_{2x}}{c^2} \approx 1$ і релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного закону додавання швидкостей:

$$v_x = v_{1x} + v_{2x}.$$

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.

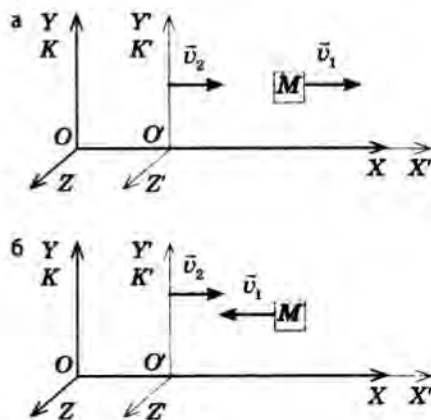


Рис. 47.2. Тіло M рухається зі швидкістю \vec{v}_1 відносно СВ K' , яка рухається зі швидкістю \vec{v}_2 відносно СВ K : а — напрямком руху тіла збігається з напрямком осі $O'X'$; б — напрямком руху тіла протилежний напрямку осі $O'X'$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Для розв'язання задачі виконаємо пояснювальний рисунок (скористаємося рис. 47.2). Нехай квант світла 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 .

Розглянемо два випадки: 1) квант світла рухається в напрямку осі $O'X'$; 2) квант світла рухається протилежно напрямку осі $O'X'$.

Розв'язання. Запишемо релятивістський закон додавання швидкостей:
$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}.$$

Зазначимо напрямки швидкості \vec{v}_1 руху кванта, напрямки швидкості \vec{v}_2 руху СВ K' та знайдемо проекції швидкостей на вісь OX .

Випадок 1 (рис. 47.2, а). $v_{1x} = v_1 = c$, $v_{2x} = v_2$.

Підставивши одержані вирази у формулу закону додавання швидкостей, маємо:
$$v_x = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c + v_2}{\frac{c + v_2}{c}} = c.$$

Таким чином, швидкість руху кванта відносно СВ K дорівнює c .

Випадок 2 (рис. 47.2, б). $v_{1x} = -v_1 = -c$, $v_{2x} = v_2 \Rightarrow v_x = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{cv_2}{c^2}} =$

$$= \frac{v_2 - c}{1 - \frac{v_2}{c}} = \frac{v_2 - c}{\frac{c - v_2}{c}} = -c.$$

Таким чином, 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

Подією називають будь-яке явище, що відбувається в даній точці простору в певний момент часу. Подія для матеріальної точки задана, якщо задані координати (x, y, z) , які визначають місце, де відбувається подія, і час t , який визначає, коли подія відбувається.

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

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

Релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного у випадку швидкостей, набагато менших за швидкість світла. У загальному випадку класична механіка І. Ньютона є частковим випадком СТВ.

Контрольні запитання

1. Що таке подія? 2. Коли вважають, що подія визначена? 3. Які події називають одночасними? 4. Поясніть, що означає вираз «одночасність двох подій відносна». 5. Наведіть формулу, яка виражає релятивістський закон додавання швидкостей. 6. За яких швидкостей релятивістський закон додавання швидкостей набуває вигляду класичного?

Вправа № 40

1. Два автомобілі рухаються назустріч один одному. Чому дорівнює швидкість поширення світла, випромінюваного фарами першого автомобіля, у СВ, пов'язаний із другим автомобілем?
2. Космічний корабель віддаляється від Землі зі швидкістю, що дорівнює швидкості світла. Чи побачить космонавт своє відображення в дзеркалі, встановленому на кораблі?
3. Йонізований атом, вилетівши із прискорювача зі швидкістю $0,5c$ (c — швидкість світла), випустив фотон у напрямку свого руху. Якою є швидкість руху фотона відносно прискорювача?
4. Дві ракети віддаляються одна від одної зі швидкостями $0,7c$ відносно нерухомого спостерігача. Якою є відносна швидкість руху ракет?
5. Космічна ракета віддаляється від спостерігача зі швидкістю $0,8c$. Яку швидкість відносно Землі матиме снаряд, випущений з ракети у напрямку її руху зі швидкістю $0,6c$? Якою є швидкість руху снаряда відносно Землі, якщо він випущений у напрямку, протилежному напрямку руху ракети?