

§ 48. НАСЛІДКИ ПОСТУЛАТИВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

«Вік існування речей лишається тим самим незалежно від того, чи швидкі їхні рухи, чи повільні, а чи їх немає взагалі», — писав Ньютон. Творці класичної механіки вважали цілком очевидним, що і час, і розміри тіла абсолютні й не залежать від швидкості його руху. З'ясуємо, чи так це очевидно з погляду релятивістської механіки.

Чи змінюються лінійні розміри предметів під час їхнього руху

Довжиною стрижня називають відстань між його кінцями, зафіксовану *одночасно* (за годинником тієї системи, у якій вимірюється довжина). Оскільки одночасність двох подій відносна, то можна припустити, що в різних СВ довжина стрижня буде різною.

Нехай твердий стрижень перебуває у спокої в СВ K' , яка рухається з деякою швидкістю v відносно СВ K (рис. 48.1).

Якщо стрижень розташовано вздовж лінії руху системи K' (уздовж осі OX), то згідно з теорією відносності має місце формула:

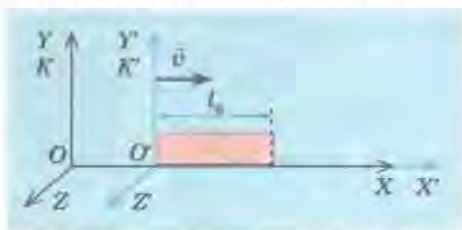


Рис. 48.1. Довжина l_0 стрижня в СВ K' , відносно якої стрижень перебуває в спокої, більша за довжину l стрижня в СВ K , відносно якої стрижень рухається: $l_0 > l$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

де l_0 — довжина стрижня в СВ K' , відносно якої стрижень перебуває у спокої; l — довжина стрижня в СВ K , відносно якої стрижень рухається.

Оскільки $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, то найбільшу довжину стрижень має в тій

СВ, де він перебуває в спокої. У тій СВ, де стрижень рухається, його довжина зменшується. Зміну довжини тіла під час руху називають *лоренцевим скороченням довжини*.

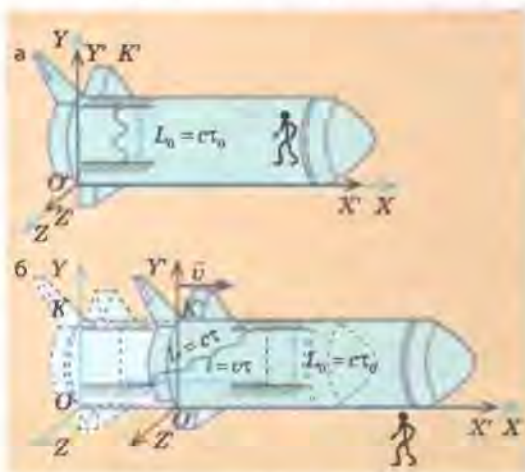


Рис. 48.2. Вимірювання проміжків часу світловим годинником: а — вимірювання власного часу τ_0 події спостерігачем, який рухається разом із годинником; б — вимірювання часу τ нерухомим спостерігачем — для нього світло проходить більшу відстань, а отже, і за більший проміжок часу: $L > L_0 \Rightarrow \tau > \tau_0$

2 У чому полягає ефект уповільнення часу

Розглянемо, як змінюється інтервал часу між двома послідовними подіями у випадку переходу від однієї інерціальної СВ до іншої. Для цього скористаємося *світловим годинником*. Світловий годинник має таку будову: на кінцях стрижня завдовжки L_0 закріплені два дзеркала, розташованих паралельно одне одному (див. рис. 48.2). Світловий імпульс рухається вгору та вниз, і кожне відбиття імпульсу від дзеркала фіксується спеціальним пристроєм. Спостерігач, відносно якого годинник перебуває в спокої (рис. 48.2, а), помітить, що час між двома послідовними відображеннями дорівнює:

$$\tau_0 = \frac{L_0}{c}.$$

Для спостерігача, відносно якого годинник рухається з деякою швидкістю v , світловий імпульс пройде відстань $L > L_0$ (рис. 48.2, б), тому він зафіксує інакший час між двома послідовними відображеннями:

$$\tau = \frac{L}{c}.$$

Скориставшись теоремою Піфагора, маємо: $L^2 = l^2 + L_0^2$, або:

$$(c\tau)^2 = (v\tau)^2 + (c\tau_0)^2 \Rightarrow \tau^2(c^2 - v^2) = c^2\tau_0^2 \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Звідси час τ , вимірюваний спостерігачем, відносно якого годинник рухається, дорівнює:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Інтервал часу τ_0 , відлічуваний у СВ, відносно якої годинник перебуває в спокої (власний час події), менший, ніж інтервал часу τ , відлічуваний у СВ, відносно якої годинник рухається. Інакше кажучи, час у рухомій СВ уповільнюється.

Зверніть увагу: ефект уповільнення часу не має нічого спільного з конструкцією годинника, це є властивість самого часу. Уповільнення часу покаже будь-який годинник у рухомій СВ. Інакше був би отриманий якийсь «індикатор руху»: якщо годинник відстає — СВ рухається, не відстає — СВ перебуває в спокої. Тобто можна було б знайти якусь ідеальну (абсолютно нерухому) СВ, сам факт існування якої суперечить першому постулатові СТВ про те, що всі інерціальні СВ рівноправні. У рухомій СВ уповільнюються всі фізичні процеси, уповільнюється й процес старіння. Якби хоч один із процесів не вповільнювався, ми знов-таки мали б «індикатор руху».

Уповільнення часу експериментально спостерігається, наприклад, у ході радіоактивного розпаду ядер. Нехай у СВ, відносно якої ядро перебуває в спокої, період його напіврозпаду дорівнює $\tau_0 = 0,1$ с. Якщо за допомогою лінійного прискорювача розігнати ядро до таких швидкостей, що $1 - \frac{v^2}{c^2} = 0,01$ (тобто $v^2 = 0,99c^2$), то період напіврозпаду ядра дорівнюватиме:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,1 \text{ с}}{0,1} = 1 \text{ с}.$$

Експеримент у повній відповідності з теорією показав, що радіоактивний розпад прискорених ядер є уповільненим порівняно з радіоактивним розпадом таких самих ядер у стані спокою.

Уповільнення темпу процесів у системах, які рухаються з великими швидкостями, порівняно з темпом процесів у цих самих системах у стані спокою є особливо наочним, якщо розглянути «парадокс близнюків».

Проведемо мислений експеримент. Посадимо одного з близнюків у ракету й розженемо її до швидкості $v^2 = 0,99c^2$ (рис. 48.3). Повернемо його на Землю через один рік за годинником, який працює в ракеті: $\tau_0 = 1$ рік. Годинник

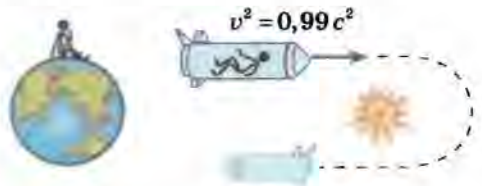


Рис. 48.3. «Парадокс близнюків»: близнюк, який залишився на Землі, постаріє сильніше, ніж близнюк, який рухається зі швидкістю, близькою до швидкості світла

на Землі покаже, що між двома подіями — відльотом і прибуттям ракети — минуло: $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1 \text{ рік}}{0,1} = 10 \text{ років}$.

Природно, що близнюк, який перебував увесь цей час на Землі, помітно постаріє. Цей яскравий приклад, щоб запам'ятати положення про вповільнення процесів у системах, які рухаються, належить А. Ейнштейну.

Зробимо одне важливе зауваження: СТВ розглядає тільки інерціальні СВ. Ракета, яка відлітає із Землі та потім на неї повертається, не є інерціальною СВ: вона мінімум тричі прискорюється — під час відльоту, під час розвертання на зворотний курс і під час посадки. Із цієї причини безпосередньо застосовувати формулу вповільнення часу для ситуації з близнюками не можна. Її необхідно розглядати методами загальної теорії відносності. Зазначимо, що в загальній теорії відносності «парадокс близнюків» зберігається.

3 Як пов'язані маса та енергія

Обговоримо ще один дуже важливий результат СТВ, а саме залежність енергії E тіла масою m від швидкості v його руху. А. Ейнштейн показав, що ця залежність має вигляд:

$$E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

Формула для енергії частинки пройшла повну перевірку в експериментах із прискорення ядер, протонів, електронів. Із даної формули випливає низка важливих наслідків.

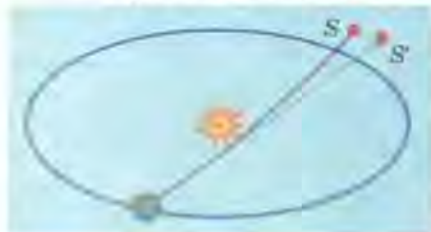


Рис. 48.4. Промінь світла, що йде від зорі S до Землі, викривляється внаслідок гравітаційного притягання фотонів до Сонця; S' — видиме положення зорі

1) Електромагнітне поле має енергію, отже, з цієї енергією обов'язково пов'язана маса. Наприклад, наявність маси у фотона («частинки» світла) експериментально було перевірено в ході спостереження відхилення світла під час проходження поблизу Сонця (рис. 48.4).

2) Якщо тіло (частинка) перебуває у стані спокою ($v = 0$), то формула (1) набуває вигляду:

$$E = mc^2$$

Дану енергію називають *енергією спокою*. Отже, *будь-яка частинка (будь-яке тіло), що має масу, несе із собою запас енергії $E = mc^2$* .

3) *Зміна енергії тіла прямо пропорційна зміні його маси: $\Delta E = \Delta mc^2$* . Передача тілу енергії завжди супроводжується збільшенням його маси, і навпаки: виділення тілом енергії супроводжується зменшенням його маси.

Повною мірою формулу зв'язку енергії і маси оцінили в 1940-х рр., коли створювали атомну бомбу. Річ у тім, що ядра Урану-235 діляться в процесі зіткнень із повільними нейтронами, унаслідок чого виділяється величезна кількість енергії. Виникає питання: звідки береться ця енергія? Розрахунки показують, що маса ядра Урану до його розпаду більша, ніж загальна маса частинок, які утворюються після розпаду. Оцей *дефект мас* виділяється у вигляді енергії.

4) У випадках, коли тіло (частинка) рухається зі швидкістю, яка набагато менша за швидкість світла ($v \ll c$), формулу (1) можна записати так:

$$E(v) = mc^2 + \frac{mv^2}{2},$$

де величина $\frac{mv^2}{2}$ — кінетична енергія тіла (частинки); mc^2 — енергія спокою тіла (частинки).



Підбиваємо підсумки

Довжина тіла в різних СВ різна. Найбільшу довжину тіло має в тій СВ, де воно перебуває в спокої. Якщо l_0 — довжина стрижня в СВ, відносно якої стрижень перебуває в спокої, l — довжина стрижня в СВ, відносно якої стрижень рухається, то $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Час у різних СВ плине з різною швидкістю. У рухомих СВ час плине повільніше, ніж у нерухомих. Якщо τ_0 — інтервал часу, виміряний у СВ, відносно якої тіло (частинка) перебуває в спокої (власний час події), а τ — інтервал часу, виміряний у СВ, відносно якої тіло (частинка) рухається, то $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Енергія тіла або частинки, які рухаються, залежить від швидкості руху: $E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Якщо швидкість v руху тіла (частинки)

набагато менша за швидкість поширення світла, то енергію такого тіла або частинки можна розрахувати за формулою: $E(v) = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$, де $E = mc^2$ — енергія спокою тіла (частинки).

Зміна енергії тіла чи частинки завжди супроводжується зміною їхньої маси: якщо вони поглинають енергію, то їхня маса збільшується, якщо виділяють енергію — їхня маса зменшується.



Контрольні запитання

1. Як змінюється довжина предмета, якщо він рухається з постійною швидкістю?
2. Який час називають власним часом події? 3. Як змінюється інтервал часу для тіла, якщо воно рухається з постійною швидкістю? 4. Який експеримент підтверджує ефект уповільнення часу? 5. Наведіть формулу залежності кінетичної енергії тіла від швидкості його руху. Якого вигляду набуває ця формула у випадку малих швидкостей руху ($v \ll c$)? 6. Який зміст має величина mc^2 ?