

## § 46. ПОСТУЛАТИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

«Відтоді як за теорію відносності взялися математики,— зізнався 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 СВ. Для опису механічного руху обирають найзручнішу для розв'язання даної задачі *інерціальну СВ*, умовно вважаючи її *нерухомою*. Однак це не означає, що найзручніша для розв'язання даної задачі СВ — єдино правильна. Можна обрати будь-яку інерціальну СВ — результат правильного розв'язання задачі буде тим самим.

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

Будь-які механічні процеси в будь-якій інерціальній СВ відбуваються однаково, тобто ніякими механічними дослідженнями всередині системи не можна встановити, рухається ця 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 сформулював основні закони електродинаміки, виникло запитання: чи поширюється принцип відносності Галілея — Ньютона на електромагнітні явища? Іншими словами: 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 привели, здавалося б, до заперечної відповіді. Наприклад, відповідно до законів електродинаміки швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі (у тому числі швидкість поширення світла) однакова в усіх напрямках і дорівнює  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с\*. Проте

\* Вимірювання швидкості поширення світла показали, що *швидкість світла у вакуумі дорівнює*  $2,9979 \cdot 10^8$  м/с. Для розрахунків зазвичай беруть округлене значення:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

відповідно до класичного закону додавання швидкостей швидкість поширення світла має бути різною у 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 1881 р. поставили експеримент, ідея якого 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, для нерухомого спостерігача має дорівнювати:

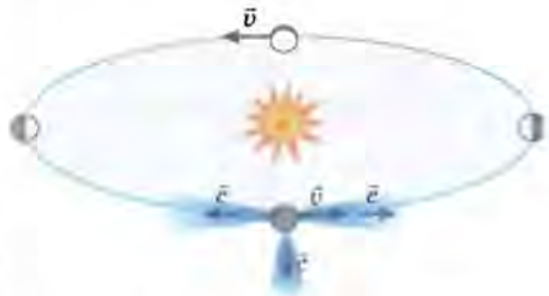
$$c_1 = c + v,$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — швидкість світла, випромінюваного джерелом на Землі;  $v = 2,96 \cdot 10^4$  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 світла, яке поширюється перпендикулярно до напрямку руху Землі, має становити:  $c_3 = \sqrt{c^2 + v^2}$ .

Досліди показали, що *рух Землі не впливає на швидкість поширення світла* (рис. 46.1). Це загнало в «глухий кут» провідних фізиків кінця XIX — початку XX ст., адже *одержаний результат суперечив класичному законові додавання швидкостей*.

То яка ж теорія правильна — класична механіка І. Ньютона чи електромагнітна теорія Дж. Максвелла? Розв'язанням проблеми зацікавилися багато провідних фізиків того часу, серед яких *Гендрік Антон Лоренц* (1853–1928), *Жуль Анрі Пуанкаре* (1854–1912), *Герман Мінковський* (1864–1909), *Альберт Ейнштейн* (рис. 46.2). Було зрозуміло, що проблему можна розв'язати



**Рис. 46.1.** Незалежність швидкості поширення світла від напрямку руху Землі. Швидкість поширення світла вздовж лінії руху Землі та перпендикулярно до лінії її руху є постійною і дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с



**Рис. 46.2.** Альберт Ейнштейн (1879–1955), один із засновників сучасної теоретичної фізики, лауреат Нобелівської премії. Учений розробив кілька дуже важливих фізичних теорій: спеціальну теорію відносності (1905), загальну теорію відносності (1907–1916), квантову теорію фотоефекту й теплоємності та ін.



тільки на основі нових фізичних уявлень про простір і час. Такі уявлення почали розвивати ще наприкінці XIX ст. Г. А. Лоренц і Ж. А. Пуанкаре, а остаточно вони були сформульовані А. Ейнштейном у роботі «До електродинаміки рухомих середовищ». А. Ейнштейн і Ж. А. Пуанкаре незалежно один від одного 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.

**Загальна теорія відносності (ЗТВ)** розглядає взаємозв'язок фізичних процесів у неінерціальних СВ, тобто в СВ, що прискорено рухаються одна відносно одної.

### 3 Постулати спеціальної теорії відносності

**Перший постулат СТВ:**

В інерціальних системах відліку 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, 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 системах відліку.

Це означає, що швидкість поширення світла у вакуумі *інваріантна* — вона не залежить від швидкості руху джерела або приймача (спостерігача) світла. Другий постулат СТВ узгоджується з результатами досліду А. Майкельсона й Е. Морлі. Інваріантність швидкості поширення світла підтверджується й спостереженнями за подвійними зорями, які обертаються навколо спільного центра з величезною швидкістю, і багатьма іншими спостереженнями та дослідженнями.

Сталість швидкості поширення світла — фундаментальна властивість природи. Відповідно до цього постулату *швидкість поширення світла — максимально можлива швидкість поширення будь-якої взаємодії*. Матеріальні тіла не можуть мати швидкість більшу, ніж швидкість світла.

### 4\* Чому існують чорні діри

**Чорна діра** — область у просторі-часі, гравітаційне притягання якої настільки велике, що залишити її не можуть навіть об'єкти, які рухаються зі швидкістю світла (рис. 46.3).

Для оцінки радіуса чорної діри скористаємося законом збереження енергії. Щоб подолати гравітаційне притягання небесного тіла масою  $M$  і радіусом  $R$ , будь-яка частинка масою  $m$  повинна мати кінетичну енергію не меншу, ніж її потенціальна енергія гравітаційної взаємодії з цим небесним тілом:

$$\frac{mv^2}{2} \geq \frac{GmM}{R}.$$

Звідси мінімальний радіус небесного тіла, яке може залишити частинка (тіло), рухаючись із максимальною можливою швидкістю  $v_{\text{max}} = c$ , дорівнює:

$R_{\text{ш}} = \frac{2GM}{c^2}$ , де  $R_{\text{ш}}$  — радіус Шварцшильда (дану формулу першим одержав німецький фізик Карл Шварцшильд у 1916 р.).

Якщо частинка перебуває від центра чорної діри на відстані  $r < R_{\text{ш}}$ , то, щоб залишити чорну діру, частинка повинна мати швидкість  $v$ , більшу за швидкість світла ( $v > c$ ). Згідно з другим постулатом теорії відносності це неможливо, тому, перебуваючи всередині сфери радіусом  $R_{\text{ш}}$ , жодна частинка, жодне випромінювання не можуть залишити чорну діру. Існуванням чорних дір ще раз підтверджується правильність другого постулату СТВ.



**Рис. 46.3.** Надгігантська чорна діра, маса якої у 18 млрд разів більша за масу Сонця;  $R_{\text{ш}}$  — радіус Шварцшильда

### Підбиваємо підсумки

Результати експериментів А. Майкельсона й Е. Морлі суперечили механіці Ньютона й тим самим стимулювали створення нової теорії — спеціальної теорії відносності (СТВ). В основу СТВ покладено два постулати.

1. Усі закони природи однакові в інерціальних СВ.

2. Швидкість поширення світла у вакуумі однакова в усіх інерціальних СВ. Цей постулат показує також, що швидкість поширення світла — максимально можлива швидкість руху й поширення взаємодії у всесвіті.

### Контрольні запитання

1. У чому результати експерименту А. Майкельсона й Е. Морлі суперечили класичному закону додавання швидкостей? 2. Сформулюйте постулати СТВ та поясніть їхній зміст. 3. У чому полягає відмінність першого постулату СТВ від принципу відносності в механіці І. Ньютона? 4. Чому дорівнює швидкість поширення світла у вакуумі? Яким символом її позначають? 5\*. Чому існування чорних дір підтверджує наявність верхньої межі швидкості поширення будь-якої взаємодії?