Мартинюк М. Т., Миколайко В. В., Підгорний О. В., Хитрук В. І.

ВИВЧЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ В ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

Навчально-методичний посібник

Умань
Видавець «Сочінський М. М.»
2022

УДК 530.121(075.8)
М29

Рекомендовано до друку вченою радою
Уманського державного педагогічного університету
імені Павла Тичини
(протокол № 4 від 26 жовтня 2021 року)

Рецензенти:
С. П. Величко – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри фізики, біології та методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка;
М. І. Шут – доктор фізико-математичних наук, професор, дійсний член Національної академії педагогічних наук України, завідувач кафедри загальної та прикладної фізики Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова.

Мартинюк М. Т.

М29 Вивчення спеціальної теорії відносності в закладах загальної середньої освіти: навч.-метод. посіб. / М. Т. Мартинюк, В. В. Миколайко, О. В. Підгорний, В. І. Хитрук. за ред. М. Т. Мартинюка; МОН України, Уманський держ. пед. ун-т імені Павла Тичини. – Умань: Видавець «Сочінський М. М.», 2022. – 130 с.

ISBN 978-966-304-454-5

В посібнику пропонується новий змістовий контент вивчення фізичних основ спеціальної теорії відносності в закладах загальної середньої освіти в контексті концепції становлення і розвитку фізичного знання та парадигми реалізації гуманітарного потенціалу природничо-наукового знання в освітньому середовищі закладу загальної середньої освіти.

Рекомендується для здобувачів освіти – студентів, як майбутніх учителів фізики і природничих наук, та учнів закладів загальної середньої освіти. Посібник буде корисним і для слухачів курсів підвищення кваліфікації та всіх інших, хто цікавиться відповідною тематикою.

ISBN 978-966-304-454-5

© Мартинюк М. Т., 2022
© Миколайко В. В., 2022
© Підгорний О. В., 2022
© Хитрук В. І., 2022

ЗМІСТ

ВСТУП 4

РОЗДІЛ І. ПЕРЕДУМОВИ ВИНИКНЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ 7

1.1. Відносність механічного руху. Додавання рухів. Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності. Перетворення Галілея 7

1.2. Релятивістські рухи. Релятивістські ефекти. Принцип відносності електромагнітних явищ. Перетворення Фіцджеральда-Лоренца 22

1.3. Принцип відносності А. Ейнштейна. Спеціальна теорія відносності як пряме продовження класичної механіки 34

РОЗДІЛ ІІ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ 42

2.1. Постулати і найважливіші поняття спеціальної теорії відносності .. 42

2.2. Перетворення Лоренца 44

2.3. Релятивістські ефекти як наслідки спеціальної теорії відносності ... 50

2.4. Матеріальне середовище в єдиному просторово-часовому вимірі теорії відносності. Просторово-часовий інтервал 59

2.5. Найважливіші застосування теорії відносності 68

РОЗДІЛ ІІІ. ПРИКЛАДИ І ЗАДАЧІ НА ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ 73

3.1. Релятивістські ефекти 73

3.2. Розрахунок величини енергії, яку отримують внаслідок ядерних реакцій 84

3.3. Розрахунок енергії системи матеріальних точок при зменшенні (збільшенні) її енергії внаслідок хімічної реакції 90

3.4. Розрахунок зміни енергії тіла внаслідок випромінювання (поглинання) світла 91

ЗАМІСТЬ ПІСЛЯМОВИ: від ідеї – до вічності 94

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 98

ДОДАТКИ 100

ВСТУП

Процес формування і розвиток природничо-наукового знання можна розглядати різночинно: в контексті еволюції концептуальних ідей, фундаментальних положень і основоположних понять, історії становлення і розвитку наукової картини світу, історичних подій і ін.. Знання у їх розвитку, новітні технології та засоби отримання й подання інформації, сучасні можливості комунікації учасників освітнього процесу, – спільно створюють умови для успішної реалізації гуманітарного потенціалу власне природничо-наукового знання, як знання про розвиток цілісного світу «природи – людини – суспільства». Теорія відносності, її виникнення і становлення, – яскравий приклад цього.

Виникнення і розвиток теорії відносності, як відповідь на виклики кризового стану наукового природознавства на зламі XIX-XX століть, обумовили не лише його стрімкий подальший розвиток, але й започаткували становлення нового наукового світогляду.

Нині теорія відносності – це одна із п'яти фундаментальних фізичних теорій, які є основою сучасного (точного) наукового природознавства і ядром наукової картини світу. Теоретичні основи методики вивчення відповідної теми в старших класах ЗЗСО розроблені: С.У. Гончаренком, О.А. Коновалом, Б.М. Яворським і іншими вченими. Вони реалізовані в усіх національних шкільних підручниках з фізики для учнів старших класів.

Однак, стан вивчення основ СТВ в ЗЗСО не можна вважати сповна задовільним в усіх відношеннях. Зокрема, основи СТВ як

структурно виокремлену тему шкільного курсу фізики (10 клас), подають формально-описово, але ж по суті – це теорія прогностична. Евристичний потенціал, гуманітарний контент та місце цієї теорії у науковому і шкільному природничому знанні є значно ширшими і такими, які наразі сповна відповідають цілям і завданням модернізації змісту сучасної загальної середньої природничої освіти в контексті Концепції Нової української школи.

Функціонально, зміст навчального матеріалу теми (СТВ) подається діючою навчальною програмою з метою визначення меж застосування класичної механіки [9]. На рівні шкільних підручників розглядають постулати СТВ і, як правило, без обґрунтування відповідних їм тверджень, як уже відомих на час створення цієї теорії, основоположних принципів фізичної науки. Більш цього, значна частина фізичних процесів (явищ) і експериментальних фактів, про які йдеться у випадку того чи іншого складника СТВ, були виявлені раніше, але не могли бути поясненими на основі уявлень класичної механіки І. Ньютона. Зокрема це стосується багатьох так званих наслідків теорії відносності: скорочення довжини, сповільнення часу, *«залежності маси тіла від його швидкості»* та ін.. Так звана *«залежність маси… »* виділена нами тут не випадково: уявлення про цю залежність мають формально-історичну обумовленість і нині вважаються помилковими [11, с. 527]. *Маса тіла не залежить від його швидкості!* З'ява відомої масовому читачу формули $m = m_0 \Big/ \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}$ обумовлена некоректним перенесенням класичних уявлень про закон збереження імпульсу на релятивістські явища.

Безпосередньо, введення в науковий обіг понять інертної, поперечної, повздовжньої, зникаючої, нульової, релятивістської (такої, «що змінюється залежно від швидкості руху матеріального тіла») мас було обумовлено історично та з метою більш переконливого обґрунтування фізичної суті теорії відносності, як такої. В сучасній науці говорять просто про масу і позначають її лише одним символом (m). «В теорії відносності по-суті є всього лише один термін: маса, – а все інше – «від лукавого»» [11, с. 527].

Насамкінець зазначимо, що в науково-методичній літературі та в педагогічній практиці вивчення основ СТВ наразі вважається одним із найбільш проблемних і складних питань. Натомість, «… теорія відносності проста і прекрасна!» [11, с. 526]. Фізичні основи цієї теорії можна осягнути, не вдаючись до спеціально-математичних знань. Для цього достатньо знати лише шкільний курс математики. Системна візуалізація навчальних матеріалів в посібнику також сприяє осмисленню найбільш складних понять спеціальної теорії відносності.

Пропонований нами контент навчального матеріалу щодо вивчення СТВ в системі фахової і методичної підготовки майбутніх вчителів природничих наук, зокрема фізики, представлено у Додатку А. Добір і конструювання змісту навчального матеріалу відповідає й певній методичній системі навчання основам СТВ і в ЗЗСО: ліцеях та коледжах (Додаток Б). Ця система може бути рекомендована і в якості вихідного пункту при конструюванні вчителем власної методичної системи навчання основам СТВ з урахуванням особистісно-професійної позиції самого вчителя та, безперечно, рівня підготовки здобувачів освіти.

РОЗДІЛ І. ПЕРЕДУМОВИ ВИНИКНЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

1.1. Відносність механічного руху. Додавання рухів. Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності. Перетворення Галілея

- ***Що таке нерухома і рухома система відліку***. Одним із основоположних уявлень про сутність механічного руху, як зміну положення одного тіла відносно іншого, є його відносність. Це означає, що механічний рух завжди описують у певній *системі відліку.*

Системою відліком в механіці називають зв'язану з тілом відліку систему координат плюс вибраний спосіб вимірювання часу.

Отже система відліку, це: *тіло відліку + система координат + годинник.*

Вивчення механічного руху тіла є особливо плідним, якщо описання цього руху здійснюється одночасно в різних (зокрема, двох) системах відліку. Оскільки більшість тіл в природі змінюють своє положення одне відносно одного, то при виборі таких систем відліку одну з них вважають умовно нерухомою, а іншу – рухомою відносно попередньої (нерухомої).

Вибір нерухомої чи рухомої систем відліку є завжди довільним. На практиці цей вибір роблять з позиції доцільності в аспекті найбільш «простого» розв'язання поставленої задачі. Тому тіло відліку у нерухомій системі відліку не обов'язково пов'язувати із Землею. Більш того, іноді буває вигідно нерухому систему відліку зв'язувати з тілом

відліку, яке рухається відносно Землі. Це означає, що Земля з точки зору спостерігача, який перебуває в такій нерухомій системі, рухається у протилежному напрямку.

Та все ж таки, найчастіше нерухомою вважають систему відліку, пов'язану із Землею, населеним пунктом, берегом річки, мостом та іншими тілами, які в більшості ситуацій вважаються (сприймаються спостерігачем) нерухомими. З іншими тілами, що рухаються в цій (нерухомій) системі відліку, пов'язують рухому систему відліку.

- ***Приклад спільного вибору нерухомої і рухомої систем відліку.*** Нехай на кормі баржі, яка рухається за течією річки, перебувають пасажир і вахтовий матрос. Розглянемо рух вахтового матроса з корми до носової частини баржі одночасно у двох системах відліку: нерухомій **OX** (зв'язаній зі спостерігачем **C**, що перебуває на березі) і рухомій **O′X′** (зв'язаній зі спостерігачем **C′,** що сидить на кормі палуби) (Рис. 1.1).

З рисунку слідує, що в нерухомій системі відліку **OX** (тобто з точки зору спостерігача **C**, який стоїть на березі річки), переміщення $\vec{s}$ матроса складається з двох переміщень:

$$\vec{s} = \vec{s}_в + \vec{s}_п, \quad \textbf{(1.1)}$$

де $\vec{s}_в$ – переміщення матроса з точки зору нерухомого спостерігача **C′**, тобто переміщення матроса в рухомій системі координат **O′X′**; $\vec{s}_п$ – переміщення баржі, і разом з нею й рухомої системи відліку **O′X′** відносно нерухомої системи відліку **OX**.

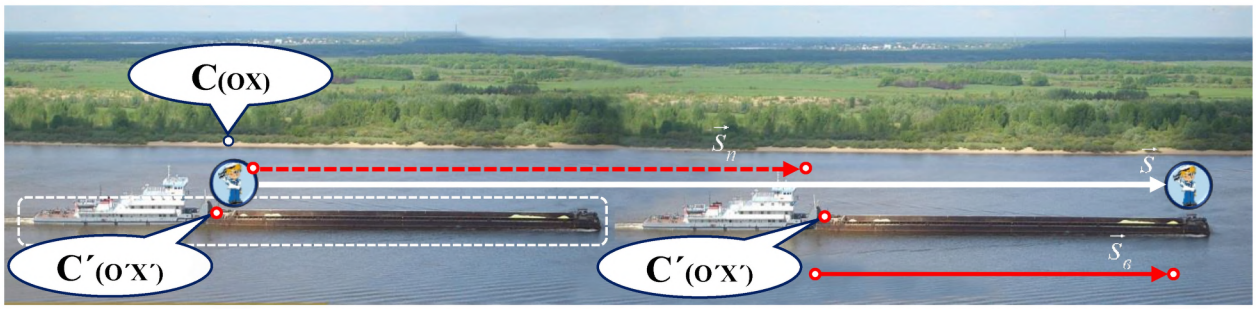


Рис. 1.1. Спостереження руху вахтового матроса палубою баржі в нерухомій (**OX**) і рухомій (**O′X′**) системах відліку

Розділивши кожний член рівняння (1.1) на час *t*, який є однаковим як для нерухомої, так і для рухомої систем відліку, одержимо:

$$\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_в}{t} + \frac{\vec{s}_п}{t} \Rightarrow \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_в + \vec{\upsilon}_п \,, \quad \textbf{(1.2)}$$

де: $\vec{\upsilon}$ – швидкість матроса в нерухомій системі відліку **OX**;

$\vec{\upsilon}_в$ – швидкість вахтового матроса в рухомій системі відліку **O′X′**;

$\vec{\upsilon}_п$ – швидкість рухомої системи відліку **O′X′** в нерухомій системі відліку **OX**.

- ***Рух відносний і рух переносний. Закон додавання швидкостей.*** Розглянутий приклад описання руху одного й того самого тіла (у розглянутому вище прикладі – матроса) у двох різних системах відліку показує, що рух цього тіла відносно берега (нерухомого спостерігача) ми розглядаємо як такий, що складається з двох простіших рухів: відносного руху матроса в рухомій системі координат (у загальному випадку цей рух так і називають *відносним рухом*) і переміщенням рухомої системи відліку в нерухомій системі відліку (цей рух називають *переносним рухом*). З урахуванням фізичного змісту складових рухів формулу (1.2) записують так:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_{від} + \vec{\upsilon}_{пер} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Формула (1.3) справджується й для випадків , коли напрямки переміщень і, відповідно, швидкостей нерухомої і рухомої систем відліку не співпадають (Рис. 1.2).

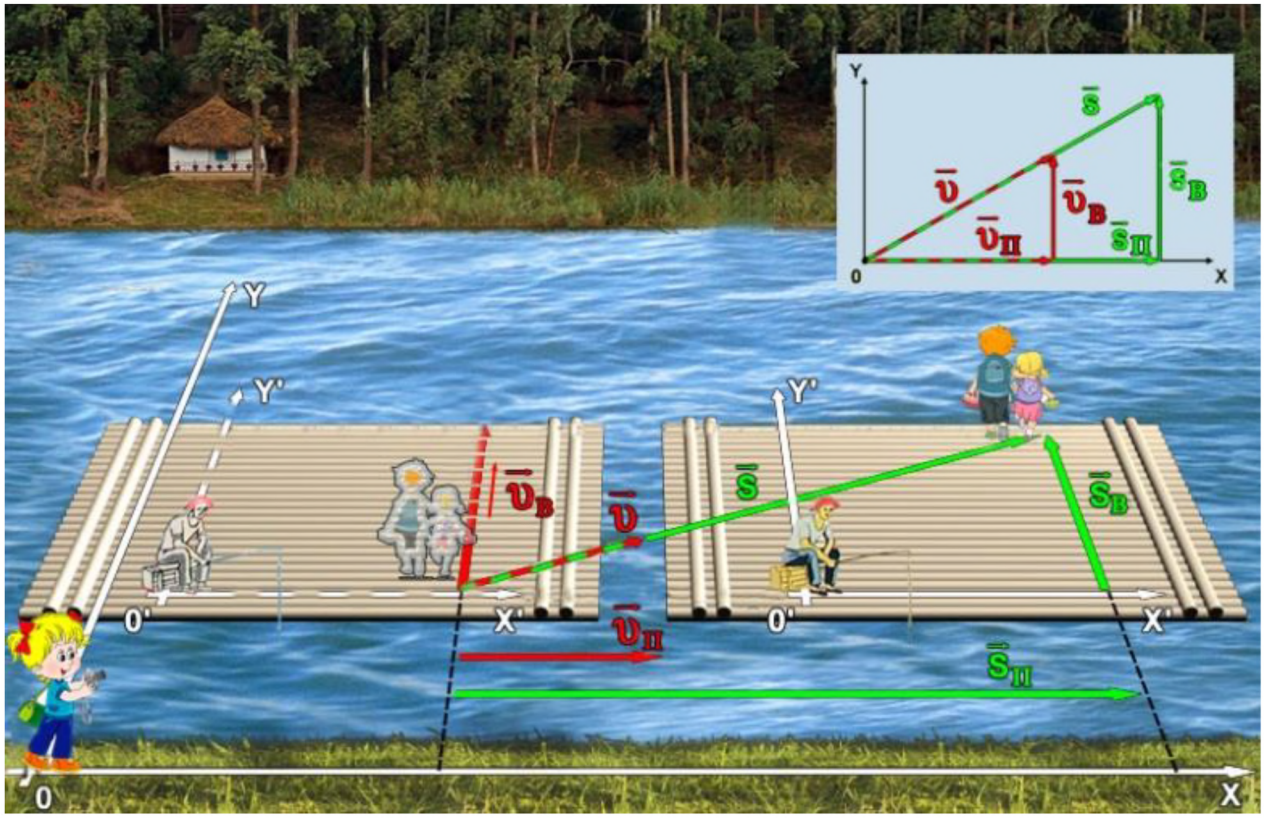


Рис. 1.2. Додавання рухів, які відбуваються у взаємно перпендикулярних напрямках

Отже, формула $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_{від} + \vec{\upsilon}_{пер}$ виражає фізичний закон, який так і називають – *закон додавання швидкостей* при переході від нерухомої системи відліку до рухомої, і навпаки: від рухомої системи відліку – до нерухомої.

- ***Відносність кінематичних величин, якими характеризують рух тіла у різних системах відліку одночасно.*** Кінематичні величини, які характеризують рух одного і того самого тіла в різних системах відліку, виражаються по-різному. Наприклад, у

розглянутому вище прикладі руху тіла (матроса) ці кінематичні величини записано у формі Таблиці 1).

Таблиця 1. Кінематичні характеристики руху одного і того ж тіла в двох різних системах відліку, які рухаються одна відносно одної рівномірно і прямолінійно

Назва кінематичної величини	**Рухома система відліку O′X′**	**Нерухома система відліку OX**
Переміщення	$\vec{s}_в$	$\vec{s} = \vec{s}_в + \vec{s}_п$
Швидкість	$\vec{\upsilon}_в$	$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_в + \vec{\upsilon}_п$
Координата	x'	$x = x' + \upsilon_п \cdot t$
Шлях	$l' = \lvert\vec{s}_в\rvert = x'$	$l = \lvert\vec{s}\rvert = x = x' + \upsilon_п \cdot t$

У залежності кінематичних величин від вибору системи відліку й полягає фізична суть поняття *відносності механічного руху*.

Вибір системи відліку при описанні кінематичних величин рухомого тіла сприяє побудові найпростішої математичної моделі задачі. Як приклад, пропонуємо розв'язати наступну фізичну задачу.

Задача. *Катаючись на гідроциклі, дівчина рухається проти течії річки. Коли вона рухалася під мостом, зведеним через річку, поривом вітру з неї зірвало панаму. Панама впала в воду і далі рухалася разом з водою. За одну хвилину дівчина вирішила повернутися за панамою: швидко розвернула гідроцикл і наздогнала панаму на певній відстані від місця її втрати. Через який час вона наздожене панаму, якщо спідометр гідроцикла показував одну і ту ж швидкість в обох напрямках руху – 2 м/с? На якій відстані від місця втрати дівчина*

поверне панаму? Задачу розв'язати трьома способами, залежно від такого вибору тіла відліку: місце втрати панами (міст); місце розвороту гідроцикла; панаму.

Задачу розв'язати самостійно і переконатися, що вибір системи відліку має визначальний вплив на подальше описання механічного руху тіла.

То ж який із запропонованих вище способів вибору системи відліку є найбільш раціональним?

- ***Додавання незалежних рухів.*** Описання руху тіла одночасно в різних системах відліку є по-суті розкладанням руху на простіші складові рухи, які є незалежними і наперед заданими (або потенційно можливими).

Так, у розглянутих вище прикладах, складові рухи (зокрема відносний і переносний) вважалися заздалегідь заданими і треба було знати лише сумарне переміщення або сумарну швидкість. Це означає, що певний рух тіла ми вважаємо сумарним рухом, який отримано внаслідок додавання незалежних складових рухів.

Тому важливим є наступний висновок: *незалежні механічні рухи одного ж і того самого тіла додаються*. Дане твердження є надзвичайно важливим в описанні механічних рухів, тому його недарма називають *принципом незалежності рухів,* які додаються. При додаванні незалежних механічних рухів, у яких одночасно бере участь дане тіло, сумарне переміщення $\vec{s}$ тіла і його сумарна швидкість $\vec{\upsilon}$ визначаються за правилами додавання векторних величин, тобто:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + ... + \vec{s}_n \quad \text{і} \quad \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 + \vec{\upsilon}_2 + ... + \vec{\upsilon}_n \ . \quad \textbf{(1.4)}$$

Принцип незалежності механічних рухів вперше був сформульований ще Галілео Галілеєм (1632 р.). Досліджуючи рух тіл, кинутих горизонтально, він вперше довів, що швидкість вертикально падаючого тіла не залежить від швидкості, наданої цьому тілу в горизонтальному напрямі. Ось як він про це писав у своїй праці «Діалозі…»: «Чи не чудова річ, що в той самий невеликий час, який потрібний для вертикального падіння на Землю з висоти яких-небудь ста ліктів, ядро, силою пороху викинуте з гармати, пройде в горизонтальному напрямку чотириста, тисячу, чотири тисячі, десять тисяч ліктів так, що при всіх горизонтально направлених пострілах залишиться в повітрі однаковий час» [13]. Пояснюючи таким чином рух тіла кинутого горизонтально Г. Галілей встановив, що траєкторією такого руху є парабола. Вслід за Галілеєм, зробимо це і ми.

- ***Приклад: рух тіла кинутого горизонтально, як результат додавання двох незалежних рухів.*** Рух тіла внаслідок його притягання до Землі – це рух з прискоренням вільного падіння $\vec{g} = 9{,}8\frac{м}{с^2}$, яке спрямоване вертикально вниз. Для описання руху тіла кинутого горизонтально виберемо систему відліку так як це показано на рисунку 1.3; опором повітря нехтуємо.

Розглядатимемо цей рух як такий, що складається з двох незалежних рухів: вільного падіння (у напрямку вісі OY) і руху у горизонтальному напрямку (уздовж вісі OX) з початковою швидкістю $\vec{\upsilon}_0$.

Згідно із формулою залежності координати від часу у рівномірному і рівноприскореному рухах, їх рівняння набувають виду:

$$x = +x_0 + \upsilon_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \Rightarrow x = 0 + \upsilon_{0x}t + \frac{0 \cdot t^2}{2} \Rightarrow x = \upsilon_0 t \ ;$$

$$y = +y_0 + \upsilon_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2} \Rightarrow y = 0 + 0 + \frac{gt^2}{2} \Rightarrow y = \frac{gt^2}{2} \ .$$

Спільний розв'язок отриманих рівнянь дозволяє встановити рівняння траєкторії руху $y = f(x)$ тіла, кинутого горизонтально.

Оскільки $t = \frac{x}{\upsilon_{0x}}$, то $y = \frac{gt^2}{2} = \frac{g}{2}\left(\frac{x}{\upsilon_0}\right)^2 = \frac{g}{2\upsilon_0{}^2} \cdot x^2$. **(1.5)**

Отримана залежність є квадратичною $\left(y \sim x^2\right)$, а отже її графіком є парабола з вершиною у точці кидання тіла. Що й підтверджується дослідним шляхом (Додаток В).

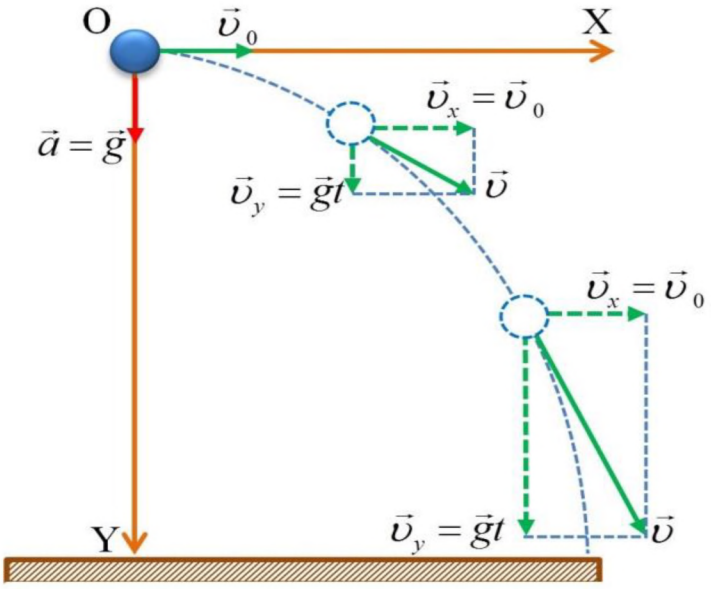


Рис. 1.3. Траєкторія і швидкість руху тіла кинутого горизонтально

Із наведеного вище рисунку 3 видно, що $\upsilon_x = \upsilon_0$ і $\upsilon_y = gt$. Тому модуль швидкості тіла у довільний момент часу обчислюємо за формулою:

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon_x{}^2 + \upsilon_y{}^2} = \sqrt{\upsilon_0{}^2 + g^2 t^2} \qquad \textbf{(1.6)}$$

Користуючись формулами (1.5) і (1.6) обчислюють ті чи ті параметри руху тіла кинутого горизонтально: час падіння, далекість польоту, значення і напрям швидкості тіла у будь-який момент часу (у тому числі й у момент його падіння на поверхню Землі) тощо.

- ***Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності.*** Галілео Галілея недарма вважають одним із засновників класичної механіки. Зокрема, він вперше у фізичній науці став віддавати перевагу проведенню фізичних дослідів з наступним раціональним аналізом їх результатів та формулюванню відповідних цьому теоретичних узагальнень (законів). Так сталося й з дослідами, в яких Г. Галілей проводив спостереження за особливостями скочування металевої кульки з похилої площини (Рис. 1.4). Ці досліди й понині називають *фундаментальними* (основоположними) дослідами, на яких базується класична механіка. Головним результатом цих дослідів став висновок про можливість сповна *вільного* руху тіла: такий рух буде завжди рівномірним прямолінійним (хоч у різних випадках,– з різною швидкістю). Так було відкрито *явище інерції*.

Інерція – це явище збереження швидкості руху тіла, якщо на нього не діють ніякі інші тіла.

Системи відліку, пов'язані з «вільним» тілом стали називати *інерційними системами відліку*.

Тепер *інерційною системою відліку називають систему, тіло відліку якої перебуває в стані відносного спокою або рухається прямолінійно рівномірно*. У свою чергу, якщо тіло відліку вибраної системи відліку рухається з прискоренням, то її називають *неінерційною системою відліку*.

У подальшому, ми розглядатимемо механічні явища і процеси лише в інерційних системах відліку.

Уявімо тепер, що ми уже вибрали певну інерційну систему відліку. В такому разі, будь яка інша система відліку, тіло відліку якої перебуває в спокої або рухається прямолінійно рівномірно відносно раніше вибраної інерційної системи відліку, також є інерційною. І таких тіл відліку можна вибрати безліч. Отже й інерційних систем відліку також існує безліч! Та Г. Галілей вперше звернув увагу не лише на значну кількість інерційних систем відліку, але й на те, що всі вони є *рівнозначними*. Це й означає, робить свій наступний висновок Г. Галілей (1590 р.), що:

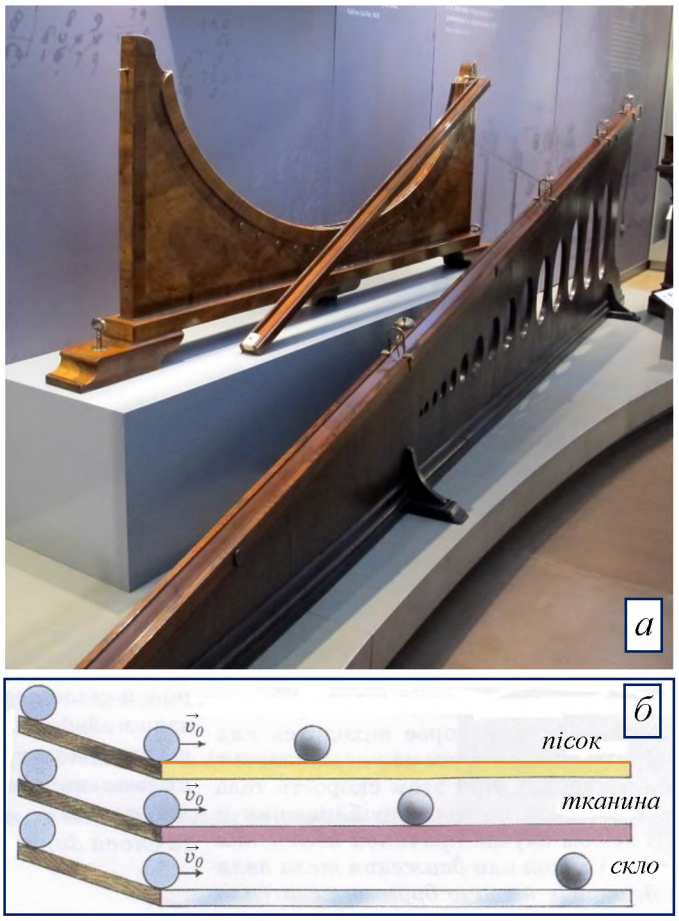


Рис. 1.4. Дослідні установки, за допомогою яких вивчають скочування кульки вздовж «жолоба Галілея» (*а*), та схематичне подання одного із дослідів (*б*).

механічні явища в усіх інерційних системах відліку відбуваються однаково, а отже за одними і тими ж законами;

В останньому твердженні й полягає суть одного з найважливіших, як згодом з'ясувалося, наукових принципів, – *механічному принципу відносності фізичних явищ*.

Згідно з механічним принципом відносності можна стверджувати, що закон механічного руху, встановлений в одній із

інерційних систем відліку може бути застосовним і в будь-якій іншій інерційній системі відліку. Більш цього, йдеться й про те, що і форма запису механічного закону може бути також збереженою при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої. Звісно, при цьому мають бути враховані й відповідні початкові умови руху та зміни координат (а можливо й часу), які відбуваються внаслідок описання положення тіла в тій чи іншій (конкретній) системі відліку. Так виникла потреба у необхідності відповідних математичних операцій (а отже й формул), які б забезпечували збереження форми запису закону руху. Такі формули вперше було запропоновано Г. Галілеєм (1632 р.) у знаменитій його праці «Діалог…». Ці математичні операції (формули) отримали назву «*перетворення Галілея*».

- ***Перетворення Галілея.*** Розглянемо конкретний приклад описання руху тіла одночасно у двох взаємозв'язаних інерційних системах відліку: нерухомої (**XYZ**) і рухомої відносно неї системи (**X′Y′Z′**). Нехай система (**X′Y′Z′**) рухається відносно системи(**XYZ**) з деякою швидкістю *u* (Рис. 1.5).

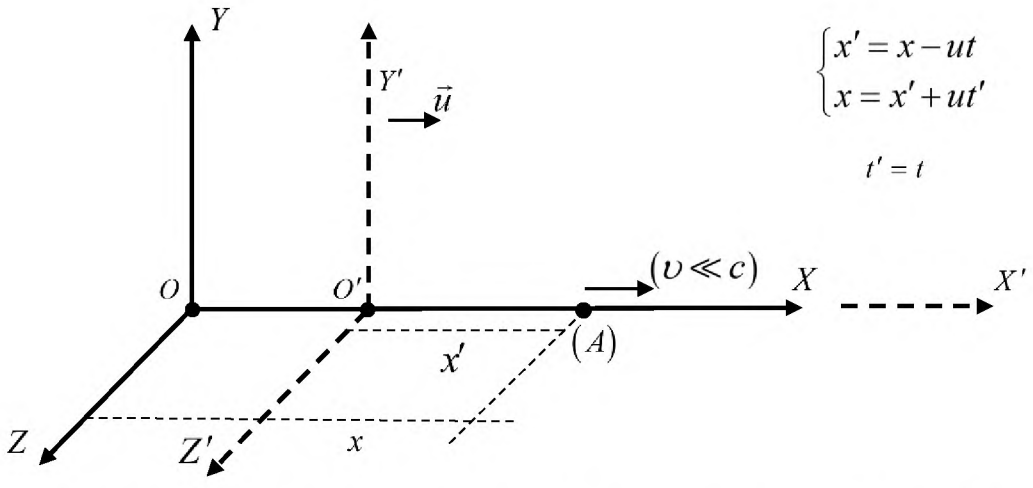


Рис. 1.5. До прикладу про описання руху одного і того ж тіла (*A*) в різних інерційних системах відліку.

Вважатимемо, що в момент початку руху положення тіла (A) і точок ($\mathbf{O,O'}$) вибраних систем координат співпадають. Кожна із вибраних систем відліку має свій годинник.

Годинники синхронізовано і вони починають свій відлік в момент початку руху тіла. Рух тіла відбувається вздовж осей ($\mathbf{X,X'}$). Покажемо, як можна виразити координати тіла в одній із систем відліку через координати тіла в іншій системі відліку (і навпаки). Цілком очевидно, що в будь-який довільний момент часу (наприклад, який відповідає положенню тіла (A), вказаному на рис. 1.5), координату тіла x' – з точки зору спостерігача який перебуває в нерухомій системі відліку – можна визначити як: $x' = x - ut$. У свою чергу, спостерігач який перебуває в рухомій системі відліку ($\mathbf{X'Y'Z'}$) визначить координату тіла (A) в нерухомій системі відліку як: $x = x' + ut'$. Оскільки плинність часу не залежить від вибору системи відліку, то покази годинників розміщені в різних системах відліку завжди показуватимуть один і той же час, тому: $t' = t$ і $t = t'$.

Отже, перехід від запису координати (і часу) при описанні руху одного й того ж тіла в різних системах відліку можна здійснювати на основі наступних рівнянь:

$$\begin{cases} x' = x - ut \\ t' = t \end{cases} \quad \rightleftarrows \quad \begin{cases} x = x' + ut' \\ t = t' \end{cases} \qquad (\mathbf{1.7})$$

Записані таким чином перетворення Г. Галілея відповідають механічному принципу відносності і раціонально реалізують його при описанні механічних рухів при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої.

Примітка. У загальному випадку описання руху тіла в тримірній системі координат (**XYZ**), – до системи рівнянь (1.7) треба додати ще два вирази: $y' = y$ і $z' = z$ (або: $y = y'$ і $z = z'$), бо ми розглядаємо найпростіший випадок коли рух тіла, відбувається лише у напрямку вісі **OX**.

Рівняння (1.7) записано для випадку, коли напрям швидкості руху u системи відліку (**X′Y′Z′**) і швидкості руху тіла υ співпадають. Цим і обумовлено наявність знаку «–» у першому із записаних вище рівнянь. У випадку ж, коли напрямки швидкостей u і υ не співпадають, то фізичний зміст перетворень Галілея не змінюється. Процедурно це відбувається лише шляхом заміни знаків «–» на «+». З урахуванням цього, перетворення Галілея можна записати у більш загальному вигляді:

$$\begin{cases} x' = x \mp ut \\ t' = t \end{cases} \quad \rightleftarrows \quad \begin{cases} x = x' \pm ut' \\ t = t' \end{cases} \qquad \textbf{(1.8)}$$

З перетворень Галілея слідує, що:

- При переході від однієї системи відліку до іншої відповідно змінюються й компоненти швидкості руху тіла, бо якщо $\upsilon = \Delta x / \Delta t$, то:

$$\begin{aligned} \upsilon' &= \upsilon \mp u \\ \upsilon &= \upsilon' \pm u \end{aligned} \qquad \textbf{(1.9)}$$

Перетворення (1.9) є не що інше, як уже розглянутий вище закон додавання швидкостей в класичній механіці (див. формулу **1.3**).

- Цілком очевидно, що прискорення тіла ($a = \Delta\upsilon / \Delta t$) при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої не змінюється,

бо відносна швидкість руху u цих систем є сталою (незмінною) величиною, а отже: $a = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{u - u}{\Delta t} = \frac{0}{\Delta t} = 0$.

➢ Оскільки маса є величиною сталою, то при зміні вибору системи відліку форма запису основного закону динаміки І. Ньютона залишається справедливою (застосовною) для будь-якої іншої інерційної системи відліку, тобто:

$$F = ma = m\frac{\Delta \upsilon}{\Delta t} = m\frac{\Delta \upsilon'}{\Delta t'} = \ldots \qquad \textbf{(1.10)}$$

Отже, перетворення Г. Галілея дійсно забезпечують збереження форми запису закону (у загальному випадку – законів) механічного руху при переході від однієї інерційної системи відліку до будь-якої іншої інерційної системи відліку (з урахуванням відповідних початкових умов і розміру/величини відносної швидкості руху u між ними).

Запропоновані Г. Галілеєм перетворення виявилися не лише раціональними при переході від однієї системи відліку до іншої. Ці перетворення дозволили отримати й ряд інших висновків, які виявилися дуже важливими для подальшого розвитку фізичної науки. Це, зокрема, твердження:

– ніякими дослідами, проведеними в середині інерційної системи відліку, не можна встановити, перебуває ця система відліку в стані відносного спокою, чи рухається рівномірно прямолінійно відносно іншої (інших) інерційної (інерційних) систем відліку;

– всі інерційні системи відліку в механіці є рівнозначними (еквівалентними), тобто абсолютної інерційної системи відліку не існує;

– закони механічного руху є інваріантними відносно перетворень Г .Галілея;

– розміри тіла (як різниця відповідних координат тіла) при переході від однієї системи відліку до іншої зберігаються (що й підтверджується експериментально).

• ***Парадигма абсолютного часу. Межі застосування законів класичної механіки.*** *Парадигмою* (грец. παράδειγμα – «приклад», «взірець») називають уявлення (твердження), яке сприймають як загальновизнану істину (аксіому). Однією із таких парадигм є уявлення про час в класичній науці, зокрема в класичній механіці. Такими ж є уявлення й про *абсолютність часу* ***t*** як фізичної величини, що характеризує тривалість і послідовність подій в природі. Абсолютність часу тут означає, що плинність часу не залежить від фізичного стану середовища, в якому той чи інший рух відбувається, а також від спостерігача, який цей рух описує. Проте вже наприкінці XIX століття в науковому природознавстві виникли непоодинокі й достатньо обґрунтовані дослідним шляхом сумніви щодо абсолютності часу. Це зрештою привело до інших уявлень про час, а саме: про залежність плину часу від фізичного стану середовища (Додаток Г). На основі такої залежності роблять висновок про *відносність (а не абсолютність!) плину часу.*

Найбільш суттєво це проявилося при визначенні швидкості світла та поясненні закономірностей руху електрично заряджених тіл

зі швидкостями, співвідносними зі швидкістю поширення світла. Такі рухи тіл, швидкості та явища, які при цьому спостерігаються, називають *релятивітськими* (з лат. *relativus* – відносний, співвідносний).

Відносність часу, яка проявляється при релятивістських швидкостях вказує на те, що для них закони класичної механіки не справджуються, а отже й не застосовуються. Так визначилися *межі беззастережного застосування законів класичної механіки, – це лише рухи зі швидкостями, значно меншими від швидкості поширення світла*.

Математичною умовою, якою окреслюють межі застосувань класичної механіки, є вираз: $\upsilon \ll c$.

1.2. Релятивістські рухи. Релятивістські ефекти. Принцип відносності електромагнітних явищ. Перетворення Фіцджеральда-Лоренца

На зламі XIX-XX століть вчені-фізики, досліджуючи релятивістські рухи (поширення світла в різних середовищах, відхилення катодних променів та β-променів, які входять до складу радіоактивного випромінювання) встановили ряд дослідних фактів, названих релятивістськими ефектами. Розглянемо окремі з них.

- ***Незалежність швидкості поширення світла від відносного руху джерела і приймача світла. Гіпотеза світлового ефіру.*** Чи не єдиним рухом із «надзвичайно» великою швидкістю, який вперше в історії науки досліджували експериментально, був процес поширення світла. Швидкість поширення світла вимірювали в різні

часи: Галіло Галілей (1607 р.), Олаф Ремер (1676 р.), Арман Фізо (1849 р.), Альберт Майкельсон (1879 р.) і інші.

Як наслідок було встановлено, що швидкість поширення світла дорівнює $\approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Виявилося, що швидкість світла у повітрі, воді і інших середовищах є різною, та безпосередньо залежить від діелектричних і магнітних властивостей середовища.



Арман Фізо
(1819 – 1896)

Залежність швидкості поширення світла від властивостей середовища свідчила про хвильову природу світла та про те, що світлова хвиля є поперечною, тобто подібною до хвиль у пружному середовищі. І щоб світлова хвиля могла поширюватися з такою великою швидкістю, середовище, яке забезпечує механізм цього поширення, повинно мати дивовижні властивості: бути надзвичайно пружним, а отже мати велику густину, та бути прозорим і не перешкоджати рухам тіл з відносно великою густиною (наприклад руху Землі чи інших небесних тіл). Неймовірне за фізичними властивостями *гіпотетичне* середовище, яке мало забезпечувати механізм поширення світла в ньому, було названо світлоносним «ефіром». Гіпотеза «ефіру» стала основою для висновків про наявність абсолютного середовища, в якому відбуваються природні явища. У свою чергу, наявність такого середовища поставила під сумнів справедливість механічного принципу відносності та відповідних йому перетворень Г. Галілея при їх застосуванні до



Альберт
Майкельсон
(1852 – 1931)

релятивістських рухів. Але як і будь-які інші гіпотези у науковому природознавстві, гіпотеза світлоносного «ефіру» мала бути підтверджена дослідним шляхом.

Вперше такий досліді було виконано А. Фізо (Рис. 1.6). У ньому за допомогою спеціального пристрою світловий промінь S розділявся на дві частини (S′ і S″). Промінь S′ поширювався через трубки з рухомою водою вздовж напрямку руху води, а промінь S″ – у протилежному напрямку. Обидва промені, відбившись від дзеркал та пройшовши вперед і назад через трубки з водою, об'єднуються та накладаються на екрані, утворюючи інтерференційні смужки (інтерференційну картину). Розміщення смужок визначається різницею ходу променів. При наявності додаткової різниці ходу інтерференційні смужки зміщуються і це зміщення можна виміряти.

Отже в досліді А. Фізо відбувається процес утворення та поширення розділених частинок одного і того ж самого світлового променя та подальше їх накладання як двох незалежних рухів одного і того ж тіла.

В досліді А. Фізо було виявлено, що *існує відмінність у результатах вимірювання швидкостей поширення світла у напрямку руху середовища (води) та у протилежному напрямку*. Цю відмінність (цей результат) вчені-фізики пояснювали по різному. Одні стверджували, що швидкість поширення світла в рухомому середовищі (воді) змінюється, залежно від руху цього середовища (води). Інші, – вважали навпаки: змінюється не швидкість світла, а відстань між двома точками рухомого середовища (у досліді – це вода) у напрямку поширення світла. Отже й зменшується шлях, який

проходить світло в ньому. Тому цю скорочену відстань світло проходить, звісно, швидше.

Так, внаслідок досліду А. Фізо виникла ідея про існування особливого релятивістського ефекту – *скорочення розмірів тіл у напрямку їх руху*. Але ж це суперечить механічному принципу відносності та перетворенням Галілея, справедливість яких підтверджена понад 200-річною історією розвитку фізичної науки!

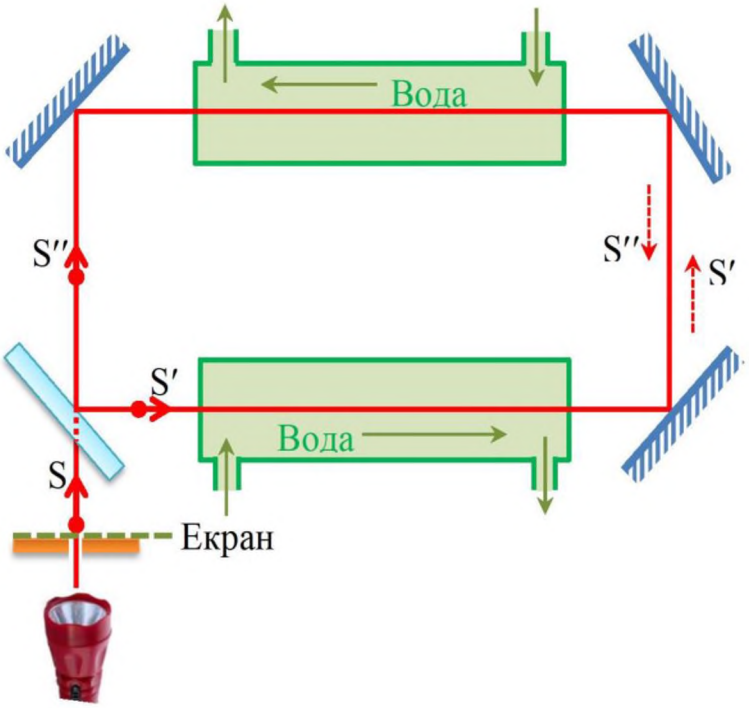


Рис. 1.6. Схематична модель досліду А. Фізо щодо виявлення впливу рухомого середовища (води) на швидкість світла в ньому

Як наслідок, вчені-фізики робили різні припущення (висували певні гіпотези, формулювали додаткові умови і т. ін.), але такі припущення не мали доказового характеру та не були достатньо обґрунтованими на основі існуючих на той час фізичних теорій.

- ***Електромагнітна природа світла. Теорія Дж. Максвелла і гіпотеза світлового ефіру.*** Існування «особливого» середовища, у якому відбуваються електричні і магнітні явища, передбачена й єдиною теорією електромагнітних явищ Максвелла-Герца-Лоренца. Ця теорія була створена наприкінці XIX століття, а її ядром є рівняння Дж. Максвелла. Наслідком з цих рівнянь є можливість існування

змінних електричного і магнітного полів які, послідовно перетворюючись одне в одне, охоплюють все нові і нові частини простору, і таким чином поширюються в ньому. Так вперше було теоретично передбачено, а згодом й підтверджено експериментально, існування електромагнітних хвиль, для поширення яких наявність світлоносного ефіру не є обов'язковою.



Джеймс Максвелл
(1831 – 1879)

Згідно з цією теорією швидкість поширення електромагнітних хвиль визначається за формулою: $\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ (**1.11**), де υ – швидкість поширення електромагнітної хвилі у середовищі з діелектричною проникністю ε (читається «епсилон») і магнітною сприйнятливістю μ («мю»).

З формули (1.11) слідує, що у випадку фізичного вакууму, тобто коли $\varepsilon = 1$ і $\mu = 1$, швидкість поширення електромагнітної хвилі дорівнює швидкості світла у вакуумі. Так виникла, а згодом була й підтверджена думка, що світло це і є електромагнітна хвиля. Як наслідок, встановлені раніше закони поширення світла та оптичні методи дослідження природних явищ поширилися й на дослідження електродинамічних явищ. Це, зокрема, забезпечило велику точність вимірювання відстаней, розмірів тіл, довжини електромагнітної хвилі та швидкості її поширення в тих чи тих середовищах, тощо.



Генріх Герц
(1857 – 1894)

Безперечно, з'явилася й можливість перевірити гіпотезу про існування світлоносного ефіру дослідним шляхом. Дійсно, якщо такий ефір існує, то рух всіх електрично заряджених тіл має бути рухом відносно цього ефіру. Ідею такого досліду вперше запропонував Дж. Максвелл відразу ж після створення ним єдиної теорії електромагнітного поля. Бо ця теорія не заперечувала можливість існування ефіру, як абсолютного середовища в якому поширюється електромагнітна хвиля. І остаточну відповідь на це питання мав дати експеримент. Більш цього, Дж. Максвелл сформулював й певні вимоги щодо необхідної точності вимірювань в такому досліді. І з огляду на це висловив своє скептичне ставлення щодо можливості його проведення існуючими на той час засобами вимірювання. Але такий дослід все ж таки невдовзі (1881 р.) було проведено за допомогою спеціально створеної дослідної установки. Цей дослід здійснили Альберт Майкельсон (1852–1931) спільно з Едвардом Морлі (1838–1923). Оскільки результати досліду мали дуже вагоме значення, його автори провели повторно, уже за допомогою більш удосконаленого обладнання (1886 р.).


Гендрік Лоренц
(1853 – 1928)

- **Дослід А. Майкельсона - Е. Морлі.** В цьому досліді (Рис.1.7, Рис. 1.8) також було використано явище інтерференції (накладання) двох попередньо розділених частинок одного й того ж світлового променю. Для цього «розділення» А. Майкельсон сконструював спеціальний інтерферометр. В ньому світлова хвиля ділилася на дві частини за допомогою «подільної» пластинки, після

чого – одна з цих частин рухалася у напрямку Сонця, а друга – перпендикулярно до цього напрямку, тобто у напрямку орбітального руху Землі навколо Сонця (а це $\upsilon = 30 км/с$, що складає десятитисячну долю швидкості світла у вакуумі).

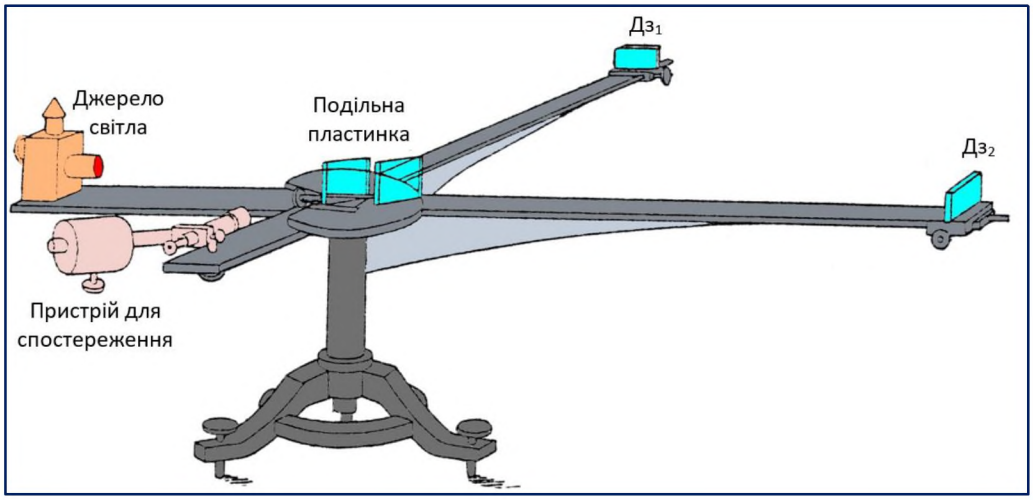


Рис. 1.7. Загальний вигляд першого варіанту інтерферометра А. Майкельсона

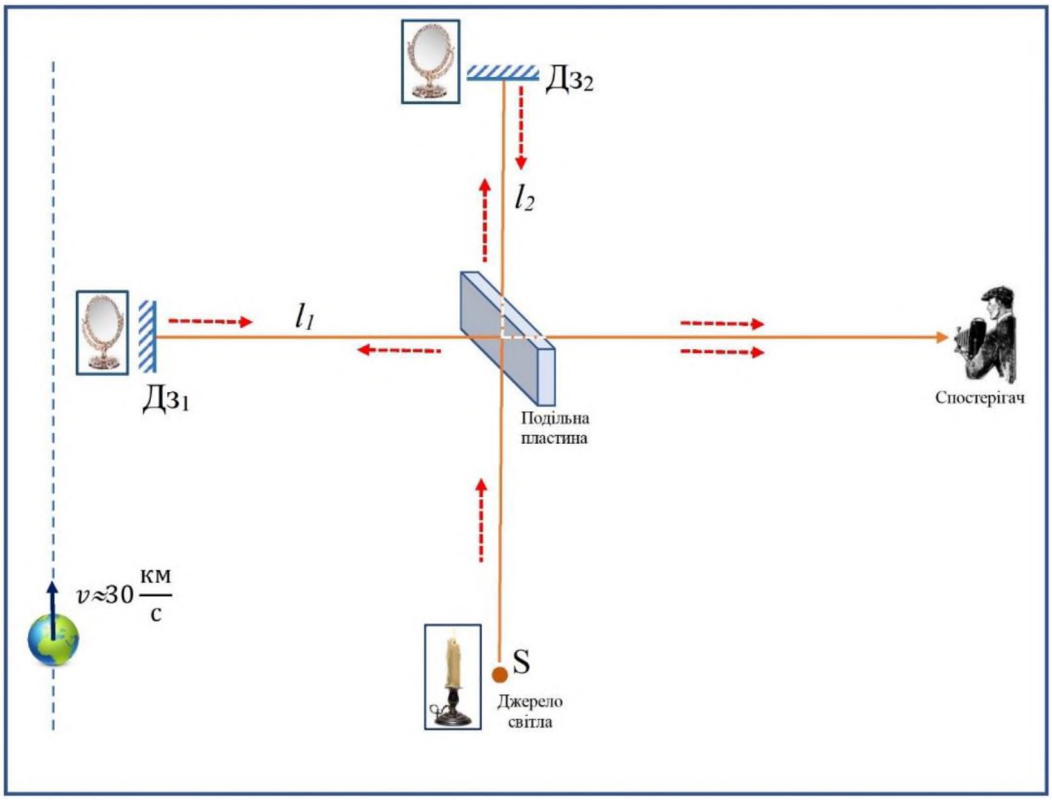


Рис. 1.8. Схема класичного досліду А. Майкельсона - Е. Морлі

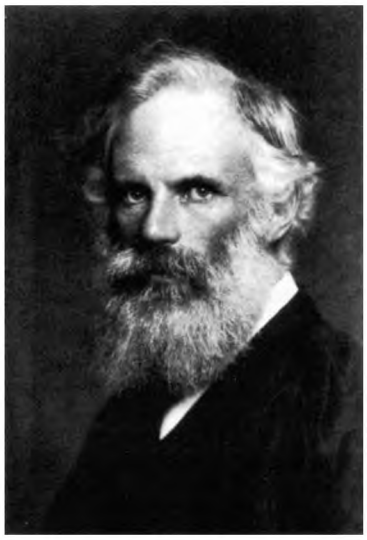
Пройшовши уздовж відповідних пліч інтерферометра, хвилі направляються на екран, де накладаються і інтерферують, утворюючи інтерференційну картину (сукупність світлих і темних смужок), яку спостерігають за допомогою зорової труби. Результат накладання розділених частинок однієї і тієї ж хвилі, залежить виключно від різниці ходу між ними, набутої в процесі їх поширення різними плечами інтерферометра, тобто від $\Delta l \sim (l_2 - l_1)$.

Дослід проводять в два етапи. Спочатку розміщують плече інтерферометра 1 (із дзеркалом $Дз_1$) у напрямку руху Землі, а плече інтерферометра 2 – перпендикулярно до нього, тобто у напрямку Сонця, та фіксують відповідну цьому інтерференційну картину. На другому етапі повертають інтерферометр на 90^o і знову фіксують інтерференційну картину. Згідно з попередніми розрахунками, якби швидкість світла у напрямку до Сонця і у напрямку руху Землі відрізнялися, то внаслідок додаткової різниці ходу променів, смужки інтерференційної картинки зміщувалися і це зміщення можна було виміряти з великою точністю. Результати досліду виявилися неочікуваними: передбаченого, на основі ідеї про наявність світлоносного середовища, зміщення інтерференційної картини не виявлено. Цей, «*негативний*», за висловленням самого А. Майкельсона, результат досліду вказував на те, що швидкість світла не залежить від відносного руху джерела світла (у нашому досліді – Сонця) і приймача світла (спостерігача на Землі). *А отже, ніякого світлоносного ефіру не існує.*

Проте, окремі вчені ще продовжували спроби пояснити результати досліду А. Майкельсона - Е. Морлі, дотримуючись гіпотези про такий ефір. Але ці спроби, як з'ясувалося з часом, були марними.

- ***Окремі релятивістські ефекти та їх пояснення в рамках класичної фізики.***

Дослідження електродинаміки заряджених тіл і створюваних ними електромагнітних полів поставили під сумнів справедливість класичної механіки для випадку руху тіл з релятивістськими швидкостями. Ці ж дослідження не підтверджували гіпотезу світлоносного ефіру, але й остаточно не відкидали її. Проте вони свідчили про наявність у природі особливих проявів релятивістських рухів матеріальних тіл, які отримали назву *релятивістських ефектів*.



Джордж Фіцджеральд
(1851 – 1901)

➢ ***Перетворення Лоренца.*** Як уже відомо, в досліді А. Фізо було виявлено залежність лінійних розмірів тіла (а отже й координат) від швидкості його руху. З метою обґрунтування такої залежності, ряд вчених-фізиків прийшли до висновку про необхідність відповідного «уточнення» перетворень Г. Галілея. Як наслідок, було запропоновано декілька варіантів принципово різних «перетворень», які б відображали справедливість принципу відносності механічних явищ та виявлену дослідним шляхом зміну просторових і часових характеристик (координат і часу) механічного руху залежно від відносної швидкості рухомої і нерухомої систем відліку.

В історії фізики відповідні варіанти запису таких перетворень мають назву своїх авторів: перетворення Лармора, перетворення Фіцджеральда, перетворення Лоренца. Зрештою, було обрано найбільш раціональну формулу запису означених вище перетворень, яку було названо *перетвореннями Фіцджеральда-Лоренца*:

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x - ut}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{u}{c}\right)^2}} \\ t' = \dfrac{t' - \dfrac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}}} \end{cases} \rightleftarrows \begin{cases} x = \dfrac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{u}{c}\right)^2}} \\ t = \dfrac{t' + \dfrac{u}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \dfrac{u^2}{c^2}}} \end{cases} \qquad \textbf{(1.12)}$$

Як і у випадку нерелятивістських рухів: $y' = y, z' = z$. Нагадуємо, що ці формули вказують на відсутність змін у напрямках, перпендикулярних до напрямку руху тіла.

Примітка: Спосіб отримання цих перетворень тут не розглядаємо, бо у подальшому ми їх отримаємо, міркуючи з позицій теорії відносності А. Ейнштейна.


Анрі Пуанкаре
(1854 – 1912)

Релятивістський закон додавання швидкостей. З перетворень Лоренца виводять й релятивістський закон додавання швидкостей. Так, в 1900 р. французький математик, фізик і астроном Анрі Пуанкаре встановлює, що при додаванні рухів зі швидкостями, сумірними зі швидкістю поширення світла у вакуумі, класичний закон додавання

швидкостей ($\upsilon = \upsilon_{\text{відн}} + \upsilon_{\text{переносн}}$), не справджується. «Релятивістські» швидкості додаються за законом:

$$\upsilon = \frac{\upsilon_{\text{відн}} + \upsilon_{\text{переносн}}}{1 + \frac{\upsilon_{\text{відн}} \cdot \upsilon_{\text{переносн}}}{c^2}} \Rightarrow \upsilon = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{1 + \frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_2}{c^2}} \qquad \textbf{(1.13)}$$

де, υ_1 – швидкість тіла, виміряна в одній із систем відліку (нерухомій), а υ_2 – швидкість тіла в рухомій (відносно попередньої) системі відліку.

Формула (1.13) є узагальненням експериментальних даних, а тому сумнівів у її достовірності не може бути. Проте вона суперечить класичному закону додавання швидкостей $\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_1 + \vec{\upsilon}_2$, який був встановлений для випадків руху тіл зі швидкостями значно меншими від швидкості світла.

Насамкінець зазначимо, що перетворення Фіцджеральда-Лоренца, а отже й релятивістський закон додавання швидкостей (1.13) переходять у перетворення Г. Галілея та відповідно, в класичний закон додавання швидкостей (1.3) за умови, що $\upsilon \ll c$, бо: $\frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_2}{c^2} \to 0$.

➢ ***Релятивістське зменшення лінійних розмірів тіла у напрямку його руху.*** Нідерландський фізик Г. Лоренц і ірландський фізик Дж. Фіцджеральд незалежно один від одного запропонували гіпотезу про залежність масштабів середовища, у якому поширюється електромагнітна взаємодія, від її швидкості. Пояснюючи результати досліду А. Фізо про вплив рухомого середовища на швидкість поширення світла в ньому, а також деякі інші оптичні явища, вони дійшли висновку про наявність «скорочення» розмірів тіл у напрямку

їх руху. Зокрема, якщо довжина тіла у нерухомому стані була l, то у напрямку руху вона l' буде меншою і дорівнюватиме:

$$l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} \qquad \textbf{(1.14)}.$$

Звідси слідує, що $l < l_0$, бо множник $\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$ завжди менший одиниці, адже $\upsilon < c$.

З формули (1.14) слідує, що скорочення розміру тіла у напрямку його руху визначається за формулою

$$\Delta l = l - l' = l - l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = l\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right) \qquad \textbf{(1.15)}.$$

Скорочення довжини тіла у напрямку його руху із релятивістською швидкістю було названо «скороченням Фіцджеральда-Лоренца».

Зазначимо також, що названі вище перетворення Фіцлжеральда-Лоренца введені на основі уявлень про рух і взаємодію електрично заряджених тіл, опираючись на непідтверджену гіпотезу про існування абсолютного простору (ефіру).

➢ ***Гранична швидкість передачі фізичної взаємодії (фізичного сигналу)***.

На основі дослідження рухів заряджених тіл у різних середовищах, видатний англійський фізик Дж. Дж. Томсон (1854 – 1912) вперше показав, що при наближенні швидкості зарядженого тіла, до швидкості світла у вакуумі, енергія тіла має зростати до нескінченності, що не має фізичного змісту (тобто, такого бути не може). У свою чергу це означає, що швидкість поширення світла у

вакуумі є граничною швидкістю, досягнення якої реальним (інертним) тілом є неможливим, тобто такого зростання не може бути.

Тому, швидкість поширення світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю передачі фізичної взаємодії, а отже й «фізичного сигналу».

➢ ***Про взаємозв'язок маси і енергії тіла.*** Вперше (1879 р.) на взаємозв'язок маси і енергії звернув увагу Дж. Дж. Томсон. Згодом (1900 р.) А. Пуанкаре, пояснюючи процес поширення світла в реальному середовищі, запропонував формулу



Джозеф Томсон (1856 – 1940)

$$E = mc^2 \qquad \textbf{(1.16)}.$$

Згідно формули (1.16), фотон повинен мати масу: $m = \frac{E}{c^2}$, де, E – енергія фотона, c – швидкість світла.

Звертаємо увагу: формула (1.16) отримана А. Пуанкаре у 1900 році з метою пояснення процесу поширення світла. Як виявилося згодом (1905 р.), формула (1.16) є окремим випадком більш загального закону природи, який стверджується відповідним наслідком СТВ. Але такої теорії в 1900 році ще не існувало.

1.3. Принцип відносності А. Ейнштейна. Спеціальна теорія відносності як пряме продовження класичної механіки

• ***Принцип відносності як абсолютний закон природи.*** З часів Г. Галілея (середина XVII ст..) і до кінця XIX ст. у фізиці не піддавали сумніву механічний принцип відносності Г. Галілея.

Вважалося, що механічний принцип відносності, а згодом і відповідний (перший) закон Ньютона мають свого роду «допоміжну роль» у системі знань про закони механічного руху. Адже ним вказується на умови застосування законів руху тіл під дією певних сил, та необхідність пошуку таких систем відліку (інерційних систем), де всі закони механіки справджуються. Аналогічна «роль» принципу відносності відводилася й при поясненні досліду А. Фізо та досліду А. Майкельсона і Е. Морлі.

В якості наукової гіпотези, з'явилася пропозиція окремих вчених-фізиків поширити механічний принцип відносності на електродинамічні, світлові та інші фізичні явища. Згодом така гіпотеза була підтверджена експериментально. Осмислення принципу відносності, як *загального закону природи*, було вперше сформульовано А. Пуанкаре (1903 р.). У 1904 р. він розглядає принцип відносності як фундаментальний закон природи, називаючи його одним із основних принципів фізики. Проте, А. Пуанкаре підкреслював, що закон/принцип відносності потребує додаткового експериментального підтвердження, бо передбачає наявність «абсолютного спокою» (абсолютного простору), існування якого також не підтверджено експериментально. Як стверджував сам А. Пуанкаре, зазначене вище тлумачення принципу відносності трактується ним в «чисто філософському плані» [7, с. 206].

А. Пуанкаре вперше висловив й гіпотезу, що із принципу відносності слідує і граничне обмеження швидкості поширення сил тяжіння і що ця гранична швидкість має дорівнювати швидкості світла у вакуумі. Отже, ідея про певний взаємозв'язок принципу відносності

і принципу сталості світла гіпотетично також висловлювалася ще до відкриття спеціальної теорії відносності.

Відкриття електромагнітної природи світла та набутий на зламі XIX-XX століть досвід дослідження рухів електрично заряджених тіл зі швидкостями, сумірними із швидкістю світла, виявили ряд релятивістських ефектів (закономірностей, явищ), пояснити які у рамках класичної механіки виявилося неможливим. Раніше (див. п. 1.2) було показано, що такими ефектами є: залежність швидкості руху тіла і тривалості подій в природі від швидкості руху системи відліку, в якій рух цього тіла розглядають; відносність, тобто залежність координат і розмірів тіл, а також плину часу від вибору системи відліку, в якій це тіло розглядають, тощо.

Спроби багатьох вчених-фізиків, у т. ч. й нікому невідомого на той час працівника патентної служби А. Ейнштейна, пояснити закономірності руху тіл з релятивістськими швидкостями стали підґрунтям, на якому виникли геніальні наукові ідеї, що згодом привели людство до сучасних уявлень про наукову картину світу.

Найголовнішим для фізичної науки на зламі XIX-XX століть, було виникнення ідеї (гіпотези) про те, що пояснити релятивістські ефекти можна якщо вважати, що просторові і часові характеристики середовища залежать від фізичних процесів, які в цьому середовищі відбуваються. Все частіше стали висловлюватися пропозиції щодо критичного аналізу класичних понять простору і часу.

- ***Проблема створення електродинаміки, як єдиної теорії релятивістських рухів.*** В 1905 році вийшла стаття А. Ейнштейна (в прямому перекладі з нім. A. Einstein – на укр. А. Айнштайн) «До

електродинаміки рухомих середовищ» (Рис. 1.9). Згодом, ця стаття була оцінена істориками-фізиками як перший виклад нової фізичної теорії: спочатку (1905 р.) вона називалася теорією руху електрично заряджених тіл, а після її доопрацювання, – за нею закріпилася назва: *спеціальна (часткова) теорія відносності* (скорочено: СТВ).

На відміну від своїх попередників, які вважали що принцип відносності є основним законом природи, але таким що потребує додаткового експериментального підтвердження, – А. Ейнштейн вперше в історії наукового природознавства виходить з того, що принцип відносності є абсолютним законом природи. Абсолютним – це означає таким, який не потребує ніяких додаткових обґрунтувань і сприймається як аксіома. Це означає, що принцип відносності слід розуміти, як прояв закономірностей, які відбуваються в природі, тобто як відображення об'єктивності існування матеріального світу.

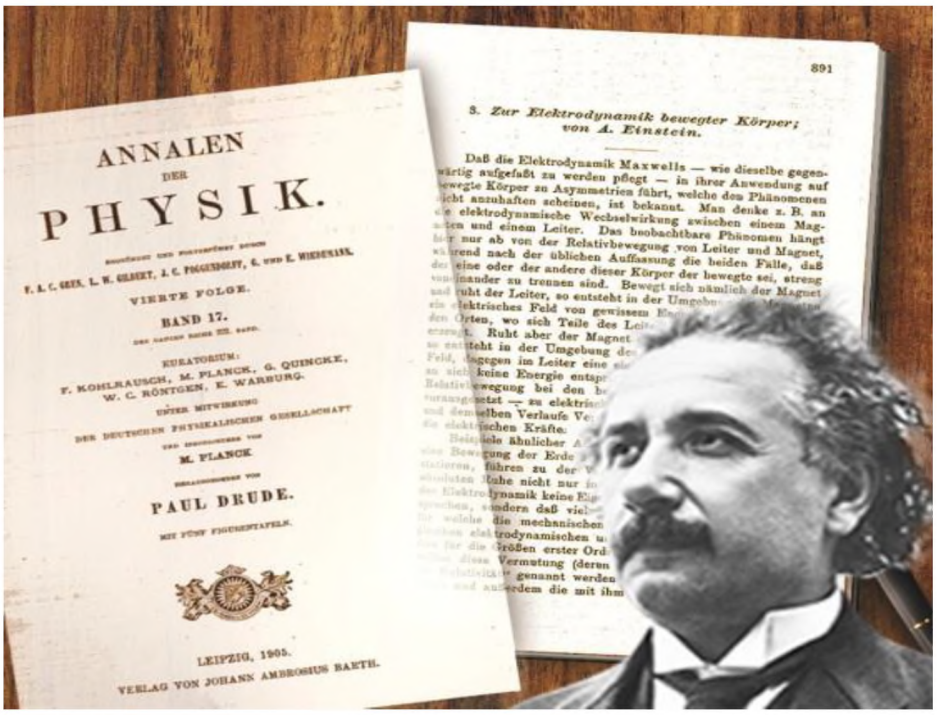


Рис. 1.9. Журнал і стаття, в яких А. Ейнштейн виклав основи СТВ

Дійсно, вже на початку названої вище статті «До електродинаміки рухомих середовищ», А. Ейнштейн чітко означив суть *принципу відносності як абсолютного закону природи.* Тут він спочатку говорить про явище електромагнітної індукції яке, цитуємо: *«... залежить тільки від відносного руху струму і магніту».*

«Приклади подібного роду, – продовжує Ейнштейн, – так само як і невдалі спроби виявити рух Землі щодо «світлоносного середовища», ведуть до припущення, що не тільки в механіці, але і в електродинаміці ніякі властивості явищ не відповідають абсолютному спокою. Навіть, більш того, до припущення, що для всіх координатних систем, для яких справедливі рівняння механіки, справедливі ті ж самі електродинамічні і оптичні закони... Це припущення (суть якого в подальшому буде називатися «принципом відносності») ми маємо намір перетворити в передумову і зробити, окрім того, додаткове припущення, що знаходиться з першим лише в уявному протиріччі, а саме, що світло в порожнечі завжди поширюється з постійною швидкістю, що не залежить від стану рухомого випромінювального тіла. Ці дві передумови достатні для того, щоб, поклавши в основу «теорію Максвелла» для нерухомих заряджених тіл, побудувати просту, вільну від протиріч електродинаміку рухомих тіл.» [7, с. 210]

Виявилося, що запропонована ним в статті «До електродинаміки рухомих середовищ» (1905 р.) теорія, як спосіб пояснення закономірностей електродинаміки рухомих тіл, має більш фундаментальне значення. Тому вже у 1907 році А. Ейнштейн дає

більш повне тлумачення своєї теорії, що й відображено у назві відповідної праці: «Про принцип відносності і його наслідки».

Подальше становлення СТВ тривало ще кілька років по тому. І в цьому «процесі» брали плідну участь не лише вчені-фізики, але й математики і астрономи з різних країн світу.

Вважається, що остаточно СТВ була створена у зв'язку із побудовою німецьким математиком Г. Мінковським (1864 – 1909 р.р.) математичної моделі цієї теорії (1907 р.) [7].

Перед тим як розглянути суть цієї теорії, важливо знати, що вона сформульована для інерційних систем відліку. Тому завершивши роботу над цією теорією, А. Ейнштейн звертає увагу на необхідність перенесення отриманих ним законів на будь-які інші (неінерційні) системи відліку і чітко визначає перший крок у цьому напрямку – розпочати з аналізу інерційних систем відліку, які рухаються зі салим прискоренням. Прикладом таких систем є їх рух в однорідному полі тяжіння. Як наслідок, А. Ейнштейн в історично короткий термін створив наступну теорію – теорію тяжіння (її ще називають *загальною теорією відносності*).

Спеціальна теорія відносності і загальна теорія відносності створюють *єдину теорію відносності*, як одну із фізичних теорій, на яких базується сучасне наукове природознавство, і сучасна фізика – як його фундаментальна складова.

Інколи в спеціальній і науково-популярній літературі висловлюють думку про те, що СТВ виникла майже на порожньому місці та створена А. Ейнштейном одноосібно – [7; 11 та ін.]). Однак, це не відповідає дійсності, бо вона була створена А. Ейнштейном у

зв'язку з активними спробами багатьох вчених пояснити експериментальні дані щодо закономірностей релятивістських рухів та на основі наявних на той час (а це початок XX століття) фізичних теорій, гіпотез, допущень. Більш цього, пояснення окремих питань спеціальної (а згодом і загальної) теорії відносності здійснювалося за безпосередньої участі багатьох вчених: фізиків, математиків, астрономів, хіміків, філософів. Велике значення у підтвердженні достовірності окремих наслідків СТВ мали раніше (до А. Ейнштейна) проведені фізичні експерименти і їх результати, а також експериментальні дані спеціально організованих астрономічних експедицій (німецької – 1914 р. і англійської – 1919 р.). Активні наукові дискусії щодо тих чи тих положень теорії відносності тривали з часу її виникнення (1905 – 1907 р.р.) і майже до середини XX століття. Подекуди вони тривають і нині (як і щодо остаточного з'ясування фізичної суті поняття маси) [11].

Загальні висновки до розділу 1

Скорочення довжини тіл, сповільнення часу і інші релятивістські ефекти, наявність яких підтверджується різноманітними дослідами, суперечать уявленням класичної фізики про простір і час: на зламі XIX-XX століть простір і час вважалися не змінними (абсолютними) та не залежними одне від одного. Так у фізичній науці виникло протиріччя між класичними уявленнями про простір і час та виявленими закономірностями руху тіл із релятивістськими швидкостями. Як наслідок, окремі вчені-фізики ще до виникнення спеціальної теорії відносності висловлювали сумніви щодо

абсолютності простору і часу та вказували на їх залежність від руху та взаємодії матеріальних тіл, тобто від фізичного стану середовища. Звісно, це суперечило існуючій на той час «моді», якою ми так називаємо гіпотезу про наявність абсолютного середовища (ефіру). Цю ситуацію у фізичній науці, вслід за Анрі Пуанкаре, стали називати «кризою фізики». Згодом, цю кризу було названо «кризою наукового природознавства», бо фізика є основою наукового природознавства, як цілісної системи природничих наук.

Однак, фізична наука на даний період свого розвитку, уже нагромадила значний науково-пізнавальний досвід, який обумовив виникнення і створення принципово нової фізичної теорії – спеціальної теорії відносності А. Ейнштейна.

Виявилося, що розглянуті вище релятивістські ефекти є окремими наслідками цієї теорії і не потребують ніяких додаткових пояснень, припущень, тощо. Спеціальна теорія відносності виявилася не просто продовженням класичної механіки, як науки про механічні рухи з невеликими швидкостями ($\upsilon \ll c$). Ця новостворена теорія стала відправним пунктом для подальшого розвитку наукового природознавства (і фізики, як його основи), перегляду наукової картини світу в цілому, та вплинула на формування нового, відповідного цій картині світу наукового світогляду.

РОЗДІЛ ІІ. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

2.1. Постулати і найважливіші поняття спеціальної теорії відносності

Постулати А. Ейнштейна. Ядром спеціальної теорії відносності є два уже відомі нам твердження, на яких А. Ейнштейн будує цю, «позбавлену від протиріч», систему теоретичних знань.

Перший постулат СТВ: в інерційна системах відліку всі закони природи діють однаково. Це означає, що розглядаючи релятивістські рухи в різних (рухомій і нерухомій) інерційних системах відліку, ми не зможемо з'ясувати яка з них рухається, а яка перебуває в спокої. Жодні досліди в будь-якій галузі фізики (механіці, електродинаміці, молекулярній фізиці, ядерній фізиці тощо) не дозволяють визначити, перебуває дана інерційна система відліку у стані рівномірного прямолінійного руху чи спокою. А отже, жодну із цих систем не можна вважати переважною (абсолютною) стосовно іншої.

Принцип сталості швидкості поширення світла узгоджується із результатами досліду А. Фізо та досліду А. Майкельсона і Е. Морлі (1887 р.). Як відомо, останній дослід не виявив різниці у швидкостях світла, виміряну у напрямку орбітального руху Землі та в перпендикулярному до нього напрямку. Нині принцип сталості світла підтверджується й спостереженнями за подвійними зорями, які обертаються навколо спільного центру із величезною швидкістю, та багатьма іншими спостереженнями і дослідами.

- *Другий постулат СТВ: швидкість поширення світла у вакуумі однакова у всіх напрямках і не залежить від відносного руху джерела і приймача світла.* Сталість швидкості поширення світла є фундаментальною властивістю природи. Жодне матеріальне тіло, окрім фотона та квантів інших фізичних полів, не може досягнути такої швидкості. Отже швидкість поширення світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю поширення будь-якої фізичної взаємодії (читай: *фізичного сигналу*).

Основні поняття і уявлення СТВ.

✓ *Принцип відносності фізичних явищ – це абсолютний закон природи.* Слово «абсолютний» означає, що такий закон не обґрунтовується, а сприймається як істина, побудована на основі уже наявного досвіду пізнання.

✓ *Швидкість поширення світла* – це швидкість поширення електромагнітної взаємодії у просторі з часом.

✓ *Максимальна швидкість передачі фізичної взаємодії (фізичного сигналу)* – дорівнює швидкості поширення світла у вакуумі. З такою швидкістю рухаються кванти електромагнітного випромінювання та кванти інших фізичних полів.

✓ Поняття *«інерційна система відліку»* (ІСВ) у спеціальній теорії відносності має той самий зміст і призначення, що і в класичній механіці.

У спеціальній (частковій) теорії відносності розглядають рухи лише в інерційних системах відліку, тобто розглядають виключно рухи зі сталими релятивістськими швидкостями.

Метою і основним завданням СТВ є з'ясування загальних закономірностей релятивістських рухів в одній із систем відліку та пошук шляхів раціонального застосування цих загальних закономірностей в умовах вибору будь-якої іншої інерційної системи відліку.

✓ Словосполучення «*система відліку*» нерідко замінюють коротким терміном «*спостерігач*».

✓ *Подія* – це будь-яка зміна природнього середовища, що відбувається в даній, виокремленій частині (точці) простору у деякий фіксований момент часу. Подія вважається заданою, якщо визначено координати місця цієї події (x, y, z) і час (t), коли ця подія відбувається. Отже, будь-яка подія в СТВ оцінюється в просторовому та часовому вимірах у їх єдності (нагадуємо: в класичній механіці простір і час є абсолютними і незалежними один від одного).

Розрізняють події, які відбуваються в одній і тій же частині простору, та події – просторово розділені. Одночасність подій, які відбуваються в одній і тій же частині простору, є незмінною (абсолютною) при їх описанні у різних інерційних системах відліку. Натомість, одночасність просторово розділених подій є відносною. Це означає, що дві просторово розділені події, одночасні в нерухомій інерційній системі відліку, будуть неодночасним в іншій, рухомій інерційній системі відліку.

2.2. Перетворення Лоренца

У випадку релятивістських рухів, розміри тіла, а отже і його координати, залежать від величини швидкості руху тіла в тій чи іншій

інерційній системі відліку, а отже й від вибору цієї системи. Це вказує на те, що й плин часу змінюється залежно від величини (розміру) цієї швидкості. Тобто, якщо $\upsilon \to c$, то $t' \neq t$ і є таким, що залежить від υ. Тому у даному разі перетворення Галілея не відповідають механічному принципу відносності стосовно релятивістських рухів. Але ж у справедливості механічного принципу відносності сумнівів немає, бо він сформульований на основі експериментальних даних. Тому логічним є наступний висновок: необхідні інші формули перетворення, які б забезпечували застосовність законів руху при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої.

Як уже зазначалося вище (див. с. 31) вчені знайшли єдиний варіант цих перетворень (*перетворення Фіцджеральда-Лоренца*), які сповна задовольняли умову застосовності законів руху при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої. Однак, ці перетворення було запропоновано на основі різних додаткових припущень і тому вони потребували відповідного теоретичного обґрунтування. Та відповідні цьому спроби були безуспішними. Зрештою виявилося, що в цьому потреби й немає, бо подібні до перетворень Фіцджеральда-Лоренца математичні формули були отримані А. Ейнштейном як один із наслідків його спеціальної теорії відносності.

А. Ейнштейн отримав свої перетворення шляхом внесення певних змін… у перетворення Галілея. Ці зміни, за міркуванням А. Ейнштейна, мають бути виражені відповідною цьому функціональною залежністю $f_{(\upsilon)} - ?$. Якою саме є ця функціональна

залежність координат і часу від швидкості руху тіла та відносної швидкості руху систем відліку одна відносно іншої?

Встановимо математичний вираз шуканої залежності наступним чином. Позначимо шукану функціональну залежність символом $f_{(\upsilon)}$ і внесемо відповідні зміни у перетворення Галілея:

$$x' = f_{(\upsilon)}(x - \upsilon t) \quad \textbf{(2.1)} \qquad \rightleftarrows \qquad x = f_{(\upsilon)}(x' + \upsilon t') \quad \textbf{(2.2)}$$

тут: $f_{(\upsilon)}$ – передбачувана функціональна залежність, яку треба встановити. Можна стверджувати, що у випадку малих рухів ($\upsilon \ll c$) ця функція $f_{(\upsilon)}$ повинна дорівнювати одиниці і тоді формули (2.1), (2.2) автоматично перетворюються в перетворення Галілея (1.7) і (1.8), відповідно.

З метою встановлення конкретного виразу функціональної залежності $f_{(\upsilon)}$, розглянемо приклад поширення світлового сигналу з точки зору спостерігачів, які перебувають в рухомій (**X`Y`Z`**) і нерухомій (**XYZ**) системах відліку (Рис. 2.1).

Нехай в момент відправлення світлового сигналу:

– початкові положення обох систем відліку співпадають;

– годинники, розміщені в різних системах відліку синхронізовано, тобто вимірювання часу вони починають в один і той же момент ($t_0' = t_0 = 0$).

Вважатимемо, що через деякий час світловий сигнал фіксують (тобто визначають покази годинників і координати) в спільній для обох систем відліку точці (т. *A).* Визначимо, якими будуть координати і покази годинників в цей момент?

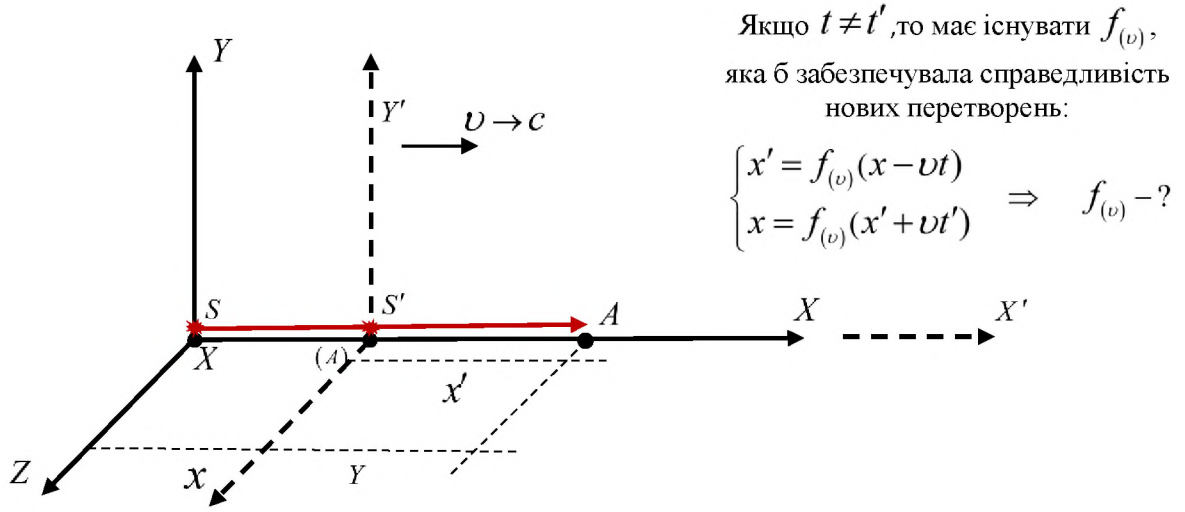


Рис. 2.1. До пояснення «математичної схеми» переходу від перетворень Г. Галілея до перетворень Г. Лоренца

Розглянемо вирази (2.1) і (2.2) як систему рівнянь. Розв'яжемо цю систему рівнянь врахувавши, що світловий сигнал в обох системах відліку поширюється з однією і тією ж швидкістю c, незалежно від вибору системи відліку. Тому: $x' = ct'$ і $x = ct$.

Розв'язання:

$$\begin{cases} ct' = f_\upsilon(ct - \upsilon t) \\ ct = f_\upsilon(ct' + \upsilon t') \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} ct' = f_\upsilon(c - \upsilon)t \\ ct = f_\upsilon(c + \upsilon)t' \end{cases}$$

Перемножимо отримані співвідношення, а потім виконаємо скорочення на множник $(t \cdot t')$. Як наслідок, отримаємо:

$$c^2 t't = f^2{}_\upsilon(c - \upsilon) \cdot (c + \upsilon)t't \quad \Rightarrow \quad c^2 = f^2{}_\upsilon(c^2 - \upsilon^2)$$

Звідки: $f^2{}_\upsilon = \dfrac{c^2}{c^2 - \upsilon^2} = \dfrac{1}{\dfrac{c^2 - \upsilon^2}{c^2}} = \dfrac{1}{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}} \Rightarrow f_\upsilon = \sqrt{\dfrac{1}{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$ **(2.3)**

З урахуванням виразу (2.3), формули (2.1) і (2.2) набувають виду:

$$x' = \frac{x - \upsilon t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \qquad \textbf{(2.4)} \qquad\qquad x = \frac{x' + \upsilon t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \qquad \textbf{(2.5)}$$

Скориставшись рівнянням (2.4) і (2.5), отримаємо перетворення для часу:

$$ct' = \frac{ct - \upsilon \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow t' = \frac{t - \frac{\upsilon}{c} t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{t - \frac{\upsilon}{c} \cdot \frac{x}{c}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{t - \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow t' = \frac{t - \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \quad \textbf{(2.6)}$$

Аналогічно:

$$ct = \frac{ct' + \upsilon \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow t = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c} t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c} \cdot \frac{x'}{c}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow t = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \quad \textbf{(2.7)}$$

Отже:

$$t' = \frac{t - \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \qquad \rightleftarrows \qquad t = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \quad \textbf{(2.8)}$$

Зазначимо, що аналогічні перетворення часу Фіцджеральда-Лоренца (1.12) потрактовували як підтвердження того, що скорочену відстань світло долає за, звісно, менший час. А тут йдеться про функціональну залежність між простором і часом, як фізичними величинами, які характеризують відповідні, об’єктивно існуючі властивості матеріального середовища.

Отже вслід за А. Ейнштейном, ми отримали формули перетворень координат (2.4), (2.5) і часу (2.8), які повністю співпадають з перетвореннями Фіцджеральда-Лоренца. І це стало наслідком прямого застосування принципу відносності фізичних явищ та постулату про незалежність швидкості світла від відносного руху джерела та приймача світла.

Формальне співпадіння перетворень (2.4), (2.5) і (2.8), що слідують з постулатів А. Ейнштейна, з перетвореннями Фіцджеральда-Лоренца, які отримані на основі експериментальних даних, підтверджує, перш за все, справедливість запропонованої А. Ейнштейном теорії відносності. Бо вони є наслідком застосування принципу відносності, який дійсно має місце у випадку будь-яких фізичних явищ і процесів, та постулату про сталість швидкості світла у вакуумі.

За пропозицією А. Пуанкаре, яка була підтримана А. Ейнштейном, отримані А. Ейнштейном перетворення, як елемент нової (спеціальної) теорії відносності, назвали *перетвореннями Лоренца*. Проте перетворення Лоренца – це принципово інші за фізичною суттю перетворення, ніж перетвореннння Фіцджеральда-Лоренца. Бо перетворення Лоренца (за А. Ейнштейном) стосуються не лише пояснень окремих експериментальних фактів щодо руху і взаємодії електричних зарядів в умовах гіпотетичного абсолютного простору, а вказують на загальну закономірність релятивістських рухів різної (будь-якої) фізичної природи (механічних, електромагнітних, світлових тощо). Зокрема.

Формули (2.8) А. Ейнштейн трактує як підтвердження того, що *в кожній системі відліку – свій час!*

2.3. Релятивістські ефекти як наслідки спеціальної теорії відносності

- ***Сповільнення тривалості подій в рухомій інерційній системі відліку як наслідок (закон) СТВ.*** Як ми уже зазначали вище, наявність скорочення розмірів тіла у напрямку його руху означає, що й час проходження світловим сигналом «скороченої» відстані буде, звісно, меншим. Дійсно, якщо:

$$t = \frac{l}{c}, \quad t' = \frac{l'}{c}, \text{ а } l' < l \text{ то } t' < t.$$

Покажемо, що до такого ж висновку ми приходимо, й скориставшись перетвореннями Лоренца (А. Ейнштейна) для часу $t' = \dfrac{t - \dfrac{\upsilon}{c^2}x}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$. Згідно до них, *інтервал часу* при переході від нерухомої системи відліку Δt до рухомої $\Delta t'$ дорівнює:

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - \dfrac{\upsilon}{c^2}x_2}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} - \frac{t_1 - \dfrac{\upsilon}{c^2}x_1}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\left(t_2 - \dfrac{\upsilon}{c^2}x_2\right) - \left(t_1 - \dfrac{\upsilon}{c^2}x_1\right)}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}}$$

Врахувавши, що $x_2 = x_1$ (як одна і та ж координата події в даній системі відліку) отримаємо:

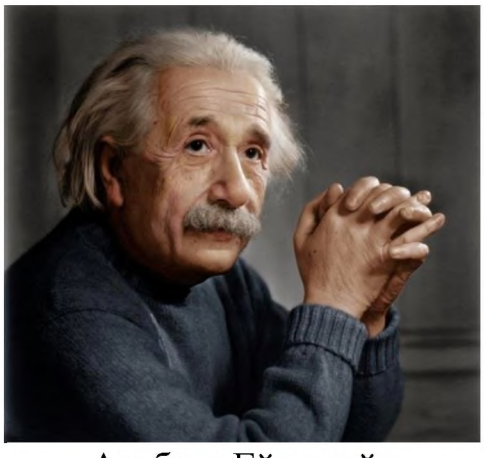
$$\Delta t' = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}$$, звідси: $\Delta t' > \Delta t$. **(2.9)**

Отже, тривалість процесу в рухомій системі відліку є більшою, ніж тривалість цього ж процесу в нерухомій системі відліку. *Плинність часу в рухомій системі відліку сповільнюється!*

Можна сформулювати й наступне твердження:
тривалість будь-якого процесу в нерухомій системі відліку завжди менша, а отже час плине швидше, ніж в будь-якій іншій, рухомій відносно попередньої системи відліку. Цей висновок відомий як «парадокс близнюків».

Однак необхідно зазначити, що в контексті історії становлення і розвитку наукового фізичного знання, перетворення Лармора, Фіцджеральда і Лоренца, сформульовані ними у зв'язку з необхідністю пояснення експериментально виявлених релятивістських ефектів, слід вважати не лише вдалим допущенням, але й далеко перспективним, та, без перебільшення, – геніальним.

- ***Відносність одночасності просторово розділених подій.*** Установити одночасність подій можна лише за допомогою годинників які йдуть *синхронно*, тобто таких що показують узгоджений час. Якщо уже синхронізовані годинники розділити (один – залишити в нерухомій системі відліку, а інший – зв'язати з рухомою системою відліку), то за показами годинників можна робити висновок про одночасність чи



Альберт Ейнштейн
(1879 – 1955)

неодночасність подій. Покажемо, на конкретному прикладі, що дві просторово розділені події, які є одночасними в нерухомій системі відліку, спостерігатимуться в іншій, рухомій системі відліку як такі, що розділені і в часі. Щоб переконатися у цьому, на перший погляд дивному, результаті скористаємося наступним мисленим (уявним) експериментом.

Розглянемо поширення світлового променя (сигналу) в нерухомій і рухомій ІСВ.

Нехай у нерухомій системі відліку перебуває спостерігач **С** (Рис. 2.2).

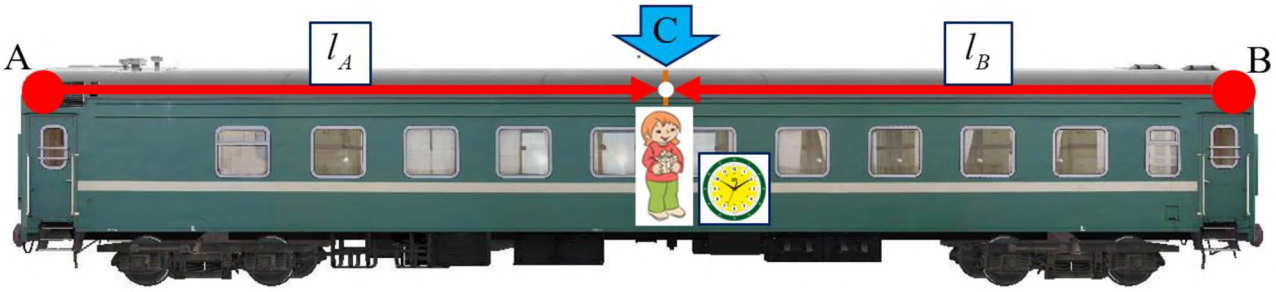


Рис. 2.2. Дві одночасні та просторово розділені події в нерухомій системі відліку

На однакових відстанях l від нього зліва і справа знаходяться джерела світла **А** і **В,** які періодично випромінюють світловий сигнал. У певний момент часу джерела синхронно випромінюють однакові світлові сигнали. Оскільки відстані від спостерігача до джерел світла однакові, а швидкість світла стала, то й час поширення сигналів світла до нерухомого спостерігача буде однаковий, бо: $t_A = \frac{l_A}{c}$ і $t_B = \frac{l_B}{c} \Rightarrow$ $t_A = t_B$.



Рис. 2.3. Щодо неодночасності синхронізованих подій в рухомій системі відліку

Нехай тепер інший спостерігач **C′** рухається в напрямі одного із синхронізованих у часі джерел світла, наприклад праворуч – до джерела **B** (Рис. 2.3).

Тепер він матиме інший результат щодо часу надходження синхронізовано відправлених сигналів світла: і того, що зліва – **A**, і того, що справа – **B**. Сигнал від джерела **A** долає коротшу відстань, бо за час поширення світла до спостерігача **C′** останній уже пройшов деяку відстань. Тому: $t'_A = \frac{l'_A}{c}$ і $t'_B = \frac{l'_B}{c} \Rightarrow t_A > t_B$, бо $t'_A > t'_B$, а $c = const$.

Отже, рухомий спостерігач фіксуватиме сигнали світла як неодночасні. Зважаючи на те, що швидкість поширення світла є сталою, спостерігач робить висновок: сигнали відправлено неодночасно. Але ж з точки зору нерухомого спостерігача – ці сигнали є одночасними!

Таким чином: дві події, що синхронізовано відбулися в різних точках простору, які є одночасними в одній системі відліку, не будуть одночасними в інших системах відліку, які рухаються рівномірно і прямолінійно відносно першої. І чим більша швидкість руху спостерігача **C′**, тим більшою буде «величина» неодночасності.

Очевидним є й наступний висновок: в релятивістській механіці час не є абсолютним; він залежить від вибору системи відліку (читай: від швидкості її руху).

- ***Скорочення розмірів тіла у напрямку руху, як наслідок постулатів А. Ейнштейна.*** Співпадіння перетворень Г. Лоренца (А. Ейнштейна) з перетвореннями Фіцджеральда-Лоренца дозволяє зробити висновок про те, що скорочення розміру електрично заряджених тіл, виявлене в досліді А. Фізо, є частковим проявом більш загальної властивості релятивістських рухів:

релятивістський ефект скорочення розміру тіла у напрямку його руху є загальною властивістю таких рухів, не залежно від їх фізичної природи (механічних, теплових, електромагнітних, тощо).

Розглянемо це докладніше.

Відносність часу з урахуванням принципу сталості світла означає й відносність масштабів (розмірів) тіл.

Так, якщо час в рухомій системі сповільнюється, то згідно з формулою $c = \frac{l'}{t'} = const$ робимо висновок: збільшенню тривалості (сповільненню) часу у рухомій системі відліку відповідає рівнозначне йому зменшення довжини тіла у напрямку його руху (Рис. 2.4).

А. Ейнштейн шляхом відповідних обчислень отримує формули, за якими визначають довжину тіла і час у рухомих системах відліку через значення цих же величин у нерухомій системі відліку (відповідно):

$$l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} \qquad \textbf{(2.10)} \qquad \text{і} \qquad t' = \frac{t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} \qquad \textbf{(2.11)}$$

Із цих формул, зокрема слідує, що: $\Delta l = l_0 - l =$

$$= l_0 - l_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = l_0\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right). \quad \text{Отже: } \Delta l = l_0\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right) \qquad \textbf{(2.12)}$$

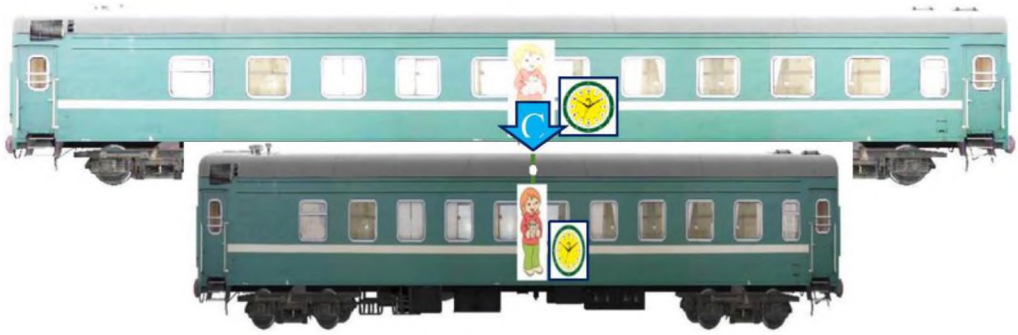


Рис. 2.4. Зменшення довжини вагона, що рухається з релятивістською швидкістю (при його спостережені з нерухомої системи відліку)

Рівність (2.12) формально співпадає з формулою (1.15). Але формула А. Ейнштейна (2.12) вказує на загальну закономірність всіх тіл, які рухаються з релятивістськими швидкостями у всіх без виключення середовищах. Натомість, формула Фіцджеральда-Лоренца (1.15) вдало пояснювала лише відповідний результат окремих фізичних дослідів за умови існування гіпотетичного «ефірного» середовища .

Скорочення розмірів тіл, що рухаються з релятивістськими швидкостями, яке визначають за формулою А. Ейнштейна (2.12), за пропозицією самого А. Ейнштейна, називають в науці «лоренцовим скороченням».

- ***Релятивістський закон додавання швидкостей (за А. Ейнштейном).*** На основі спільного застосування постулату відносності і постулату сталості швидкості світла та відповідних цьому перетворень, А. Ейнштейн вивів формулу:

$$\upsilon = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{1 + \frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_2}{c^2}}, \qquad \textbf{(2.13)}$$

де: υ_1 – швидкість тіла в рухомій системі відліку; υ_2 – швидкість руху цієї системи відліку відносно нерухомої; υ – швидкість руху в нерухомій системі відліку.

Формально, математична форма релятивістського закону додавання швидкостей за А. Ейнштейна є такою самою, як і аналогічний вираз закону додавання швидкостей (1.13), отриманого з метою пояснення результатів дослідів А. Фізо та А. Майкельсона - Е. Морлі. Натомість, формула А. Ейнштейна (2.13) виражає загальний закон природи, який справджується під час релятивістських рухів будь-яких тіл у будь-яких середовищах.



Едвард Морлі
(1838 – 1923)

Якщо в формулу (2.13) покласти, що $\upsilon_2 \approx c$, а швидкість тіла в рухомій системі відліку вважати рівною υ, то швидкість тіла в будь-якій нерухомій системі відліку υ' дорівнюватиме:

$$\upsilon' = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{1 + \frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_2}{c^2}} \Rightarrow \frac{\upsilon + c}{1 + \frac{\upsilon \cdot c}{c^2}} \qquad \textbf{(2.14)}$$

Уявімо, що додаються дві швидкості світла, наприклад вагон рухається зі швидкістю світла $\upsilon = c$ і посилає світловий сигнал у напрямку свого руху. В такому разі:

$$\upsilon' = \frac{\upsilon + c}{1 + \frac{\upsilon \cdot c}{c^2}} \Rightarrow \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = c \qquad \textbf{(2.15)}$$

Отже, ми приходимо до висновку, що швидкість світла у всіх інерційних системах відліку (і рухомих, і нерухомих) дійсно є однаковою.

- ***Закон взаємозв'язку маси і енергії.*** Відповідно до закону збереження імпульсу, а він справджується для будь-яких замкнутих механічних систем, А. Ейнштейн отримав формулу: $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$, де: E – енергія тіла, m – маса тіла, p – імпульс тіла ($p = m\upsilon$), υ – швидкість тіла. Згідно з цією формулою, енергія нерухомого тіла ($\upsilon = 0$) не перетворюється в нуль, а дорівнює $E^2 - 0 = m^2c^4$. Звідси:

$$E = mc^2 \ \textbf{(2.16)},$$

де, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{c}$ – швидкість світла у вакуумі.

Енергія $E = mc^2$ *визначається лише масою* тіла, бо $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{c}$ – величина стала. Енергію, яка визначається формулою $E = mc^2$, називають *нульовою енергією*. Як особливий вид енергії, нульову енергію загальновизнано позначають символом E_0. Отже:

$$E_0 = mc^2 \ \textbf{(2.17)}$$

Нульова енергія – це дуже велика енергія! Наприклад, тілу масою один грам ($m = 10^{-3} кг$) відповідає нульова (власна) енергія:

$$E_0 = mc^2 = 10^{-3}\,кг \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}\right)^2 = 9 \cdot 10^{13}\,Дж = 90\,000\,000\,000\,кДж$$

Фізичний зміст формули (2.16) та її практичне значення є надзвичайно важливим. Недарма цю формулу називають найголовнішим здобутком творчості А. Ейнштейна упродовж усього його життя (Рис. 2.5).

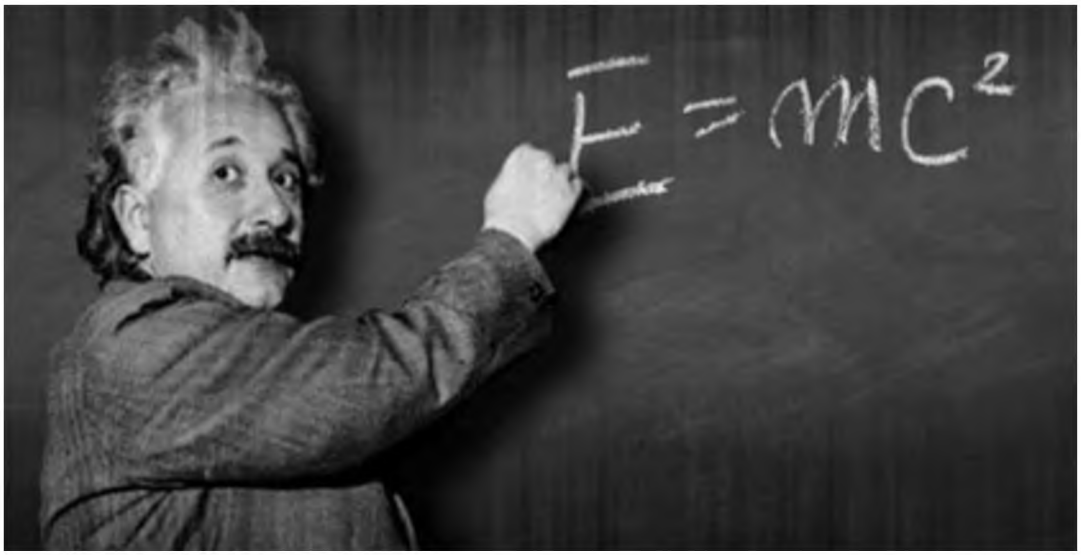


Рис. 2.5. Колаж: «А. Ейнштейн і формула його життя»

- ***Взаємоперетворення нульової енергії і кінетичної енергії тіла.*** Нульова енергія тіла – особливий вид енергії. Її ще називають *енергією спокою*. Як уже зазначалося вище, це надзвичайно велика енергія. Але, як показав А. Ейнштейн, ця енергія може змінюватися. Зокрема, за певних умов нульова енергія може перетворюватися в кінетичну енергію і навпаки. З формули (2.17) слідує: якщо в результаті деякого фізичного процесу енергія спокою тіла змінилася, то це означає, що змінилася його маса. Відповідна цьому зміна може бути визначена за формулою:

$$\Delta E_0 = \Delta m c^2 \text{ або } \Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}. \quad \textbf{(2.18)}$$

Наприклад, в ядерних і хімічних реакціях енергія спокою може переходити в кінетичну енергію продуктів реакції, якщо сума мас частинок, які вступають у реакцію, більше суми мас продуктів реакції. Зокрема, при анігіляції позитрона і нейтрона у два фотони вся енергія спокою електрона і позитрона переходить у кінетичну енергію фотонів.

2.4. Матеріальне середовище в єдиному просторово-часовому вимірі теорії відносності. Просторово-часовий інтервал

- ***Принцип відповідності в теорії відносності.*** Перетворення Лоренца, закон додавання швидкостей та інші наслідки спеціальної теорії відносності вказують на те, що всі закони спеціальної теорії відносності переходять, як граничні, у відповідні закони класичної механіки за умови що $\upsilon \ll c$. Цей висновок, разом із аналогічними висновками в інших фізичних науках (наприклад, квантовій механіці) згодом стали називати *принципом відповідності*.

Загалом, *принцип відповідності в методології науки, – це твердження, що будь-яка нова наукова теорія повинна включати стару теорію та її результати як окремий випадок*.

Принцип такого співставлення нового і перевіреного практикою старого знання має місце і у випадку переходу від старих (класичних) уявлень про простір і час (як абсолютні і незалежні одне від одного якості) до нових уявлень про єдиний просторово-часовий континуум (від. лат. *continuum* – неперервне, суцільне), як властивість середовища матеріальних тіл. З’ясуємо це докладніше.

- ***Просторовий і часовий виміри при визначенні відстаней між подіями та їх тривалості.*** Відстань між *подіями,* як і їх тривалість, в природному середовищі можна оцінювати одночасно у двох вимірах – координатному і часовому.

Наприклад, розглянемо дві просторово розділені події: *подія 1* – спалах світла як світловий сигнал, що відбувся в одній точці простору і напрямлений в іншу точку простору; *подія 2* – надходження світлового сигналу в іншу точку простору.

В звичному для нас тривимірному (декартовому) просторі відстань між т. *O* і т. *A* можна представити відповідним вибором системи відліку (Рис. 2.6) та визначити двома способами:

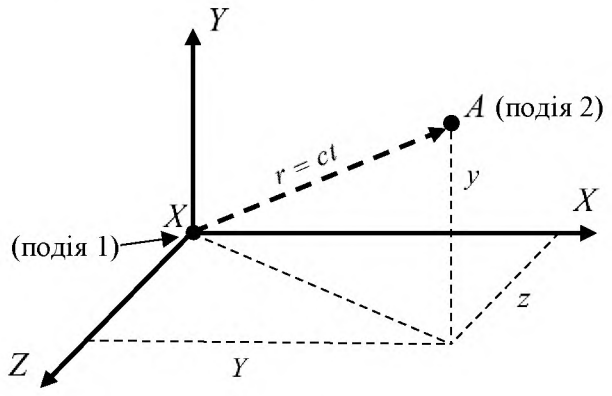


Рис. 2.6. Про взаємозв'язок часового і просторового вимірів відстаней між подіями

Спосіб 1 (координатний). Скориставшись теоремою Піфагора, визначаємо геометричну відстань від т. *O* (подія 1) до точки т. *A* (подія 2) через відповідні їм координати:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \qquad \textbf{(2.19)}.$$

Спосіб 2 (часовий). Вважаючи, що *швидкість світла, як максимальна швидкість передачі фізичного сигналу, є величиною*

сталою, відстань т. *O* від т. *A* (де відбуваються подія 1 і подія 2 – відповідно) можна визначити за формулою шляху:

$$l = |OA| = ct \qquad \textbf{(2.20)}.$$

Прирівнявши праві частини виразів (2.19) і (2.20) отримаємо:

$$ct = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \qquad \textbf{(2.21)}$$

З формули (2.21) слідує, що: $c^2t^2 = x^2 + y^2 + z^2$, звідки

$$c^2t^2 - \left(x^2 + y^2 + z^2\right) = 0 \qquad \textbf{(2.22)}$$

В формулі (2.22) всі складові мають одну і ту ж розмірність – розмірність довжини (бо $\left[c^2t^2\right] = \frac{м^2}{c^2} \cdot c^2 = м^2$).

Формула (2.22) підтверджує, що при описанні відстаней між подіями у часовому і просторовому вимірах одночасно, обидва виміри рівноправно доповнюють один одного *за умови коли швидкість світла у вакуумі є величиною сталою.*

В розглянутому прикладі (Рис. 2.6) неявно йдеться не лише про відстань між подіям 1 і 2, але й про *третю подію – процес поширення фізичного сигналу з* т. *O* до т. *A,* та тривалість цього процесу (*події*).

- ***Поняття простору і часу в теорії електромагнітних явищ Г. Лоренца-А. Пуанкаре.*** А. Пуанкаре, пояснюючи процес поширення електромагнітних хвиль в середовищі запропонував, за його словами, «математичний спосіб» описання електромагнітних явищ на основі чотирьох координат: (*x, y, z* і t_k), де t_k – умовна *часова координата,* тобто величина, яка дорівнює приведеному до розмірності довжини інтервалу часу *t* за формулою $t_k = ct$, в якій *c* – швидкість світла в вакуумі, *t* – інтервал часу, який потрібний для

проходження електромагнітною хвилею відстані між двома точками простору. У подальшому А. Пуанкаре реалізував такий підхід, користуючись уявленнями про *n*-мірний простір Б. Рімана в межах уявлень про абсолютність (незалежність) простору і часу. Зокрема.

А. Пуанкаре звернув увагу й на те, що вираз (2.22) не змінюється при переході від однієї інерційної системи відліку до іншої. Тобто, він є інваріантним для будь яких двох вибраних точок середовища електромагнітних хвиль відносно перетворень Фіцджеральда-Лоренца. Отже

$$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - c^2 t_1^2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - c^2 t_2^2 = \ldots \qquad \textbf{(2.23)}$$

Але подальших узагальнень у напрямку взаємозв'язку простору і часу, як двох проявів однієї і тієї ж властивості середовища матеріальних тіл А. Пуанкаре не зробив бо, як ми це вже не раз підкреслювали, він дотримувався поглядів про абсолютність (незалежність) простору і часу.

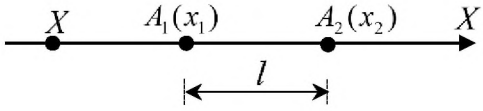
- ***Простір і час в спеціальній теорії відносності. Геометричний простір Г. Мінковського.*** Про рівноправність простору і часу по-суті йдеться і в перетвореннях Г. Лоренца (див. формули (2.4), (2.5) і (2.8), (2.9) – відповідно). На це вперше звернув увагу Г. Мінковський. Це стало підставою вважати, що час можна розглядати як четверту координату, на рівні з трьома координатами декартового простору.



Герман Мінковський (1864 – 1909)

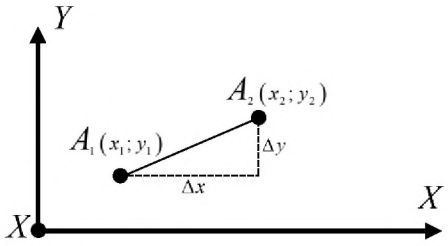
Таким чином, подія в чотиривимірному просторі Г. Мінковського вважається заданою, якщо вона визначена координатами: x, y, z, t_k.

а) одновимірна система координат:



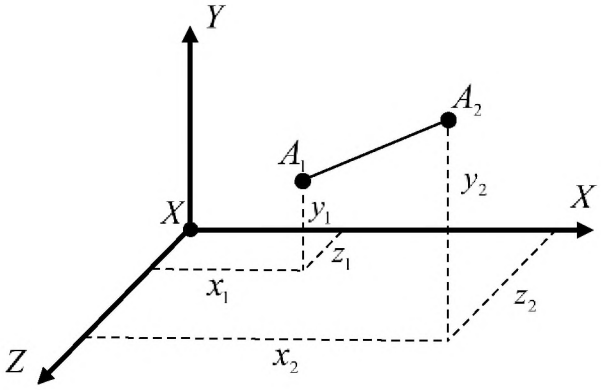
$$l = |A_1A_2| = (x_2 - x_1) = \Delta x$$

б) двовимірна система координат:



$$l = |A_1A_2| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

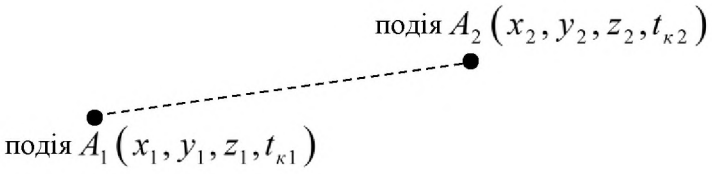
в) тривимірна система координат:



$$l = |A_1A_2| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

г) чотиривимірна система координат:





$$l_{уявне}(A_{П1}A_{П2}) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + (t_{k2} - t_{k1})^2} =$$

$$= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta t_k{}^2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta(ict)^2}, \text{ де } i = \sqrt{-1}.$$

Рис. 2.7. До прикладу про визначення відстані в різних системах координат.

Підхід до геометричного представлення системи понять і уявлень СТВ, реалізований Г. Мінковським, можна показати схематично (Рис. 2.7).

Визнавши рівноправність простору і часу та їх взаємозв'язок в описанні природних явищ, М. Мінковський зробив висновок: «З цього моменту поняття простору самого собою і часу самого собою мають відійти в тінь; право на самостійне існування отримує лише певна форма їх спільного союзу» [7, с. 41].

Герман Мінковский – це німецький професор математики, який в своїх працях: «Основні рівняння для електродинамічних процесів рухомих тіл», «Принцип відносності» та «Простір і час» (1907 – 1908 р.р.) показав, що СТВ А. Ейнштейна може бути чітко представлена в чотиривимірному просторі. (Примітка: геометрія чотиривимірного простору, як цілісна математична теорія, була створена М. Лобачевським і Б. Ріманом та визнана вченими ще за довго до цього).

В геометричному просторі Г. Мінковського інваріантність формули (2.22) розглядають як один із наслідків постулату про сталість поширення світла, а сам вираз – базовим (основою) для розгляду наслідків СТВ в координатах чотиривимірного простору.

Зазначимо, що чотиривимірний простір представити нам образами тривимірного світу (в якому ми живемо і міркуємо) неможливо. Проте чотиривимірний простір Г. Мінковського чітко уявляють фахівці, які володіють відповідним математичним апаратом.

Без геометричного простору Г. Мінковського (який ще називають математичним формалізмом Г. Мінковського) не сталося б визнання

СТВ А. Ейнштейна як фізичної теорії. Очевидно не було б створено і теорії тяжіння. А головне – не було б загального визнання того, що простір і час є двоєдиною властивістю матеріального середовища.

Отже, теорія відносності остаточно дала пояснення того, що простір і час цілком і повністю визначаються фізичним станом середовища (конкретно: скупчення матеріальних тіл і їх взаємодією).

- ***Просторово-часовий інтервал.***

Цілісне уявлення про єдиний простір-час в науці називають *просторово-часовим континуумом* (від лат. *continuum* – безперервне, суцільне). Кількісною мірою просторово-часового континууму є поняття *просторово-часового інтервалу* (скорочено – інтервалу).

Просторово-часовий інтервал між подіями – це узагальнене поняття проміжку часу і відстані між подіями (цілісно). Математично, він визначається співвідношенням

$$S = \sqrt{c^2 \left(\Delta t\right)^2 - \left(\Delta l\right)^2} \qquad \textbf{(2.24)},$$

де: S – просторово часовий інтервал між двома подіями; Δt – проміжок *власне часу* між подіями; Δl – *власне відстань* між двома точками, в яких відбуваються події. Вираз (2.22), а отже і вираз (2.24) є інваріантним (сталим) для будь-яких вибраних двох подій незалежно від того в якій інерційній системі їх розглядають. Це означає, що шляхом «раціонального» вибору системи відліку, ми можемо кількісно оцінити просторово-часовий інтервал між ними і цю «оцінку» перенести на будь-які інші інерційні системи в яких ці дві події розглядають (досліджують) під іншим кутом зору.

Якщо ми розглядаємо дві події в тривимірному просторі (**XYZ**), то: $(\Delta l)^2 = x^2 + y^2 + z^2$. В такому разі: $S = 0$.

В чотиривимірному просторі Г. Мінковського рівність $S = 0$ також має місце, але лише для тих подій, які можна оцінювати як синхронізовані в часі. А це можливо лише тоді, коли ці події зв'язані між собою світловим сигналом.

Тому інтервал $S = 0$ називають *світлоподібним просторово-часовим інтервалом*.

Для будь-якої іншої пари подій, не зв'язаних світлових сигналом, інтервал S відмінний від нуля, але величина (розмір) інтервалу у всіх інерційних системах відліку також однакова:

$$c^2t^2 - x^2 + y^2 + z^2 = c^2t'^2 - x'^2 + y'^2 + z'^2 \quad \textbf{(2.25)}$$

У цьому легко переконатися за допомогою перетворень Лоренца: підставивши в ліву частину виразу (2.25) для *x, y, z,* та *t* через координати і час цієї ж події *x'*, *y'*, *z'*, та *t'* в іншій системі відліку. Інваріантність інтервалу означає, що твердження «дві події розділені інтервалом *S*» має абсолютний характер, тобто воно є справедливим у всіх інерційних системах відліку.

Поняття інтервалу між подіями є узагальненням понять проміжку часу та відстані між точками. Залежно від того, яка складова – часова чи просторова – переважає в умовному інтервалі S_{12}, розрізняють часоподібні і просторовоподібні інтервали [1]. Для часоподібного інтервалу $c^2 t_{12}^{\ 2} > l_{12}^2$, тобто $S_{12}^{\ 2} > 0$. У цьому випадку завжди можна знайти таку систему відліку C', в якій події, що розглядаються,

відбуваються в одній точці, тобто $l'_{12}=0$, і проміжок часу між ними в такій системі відліку є «власним» часом $t'_{12}=\tau_0$:

$$S_{12}{}^2=c^2t_{12}^2-l_{12}^2=c^2t_{12}'^2-l_{12}'^2=c^2\tau_0$$

Таким чином, для подій, розділених часовоподібним інтервалом, завжди існує така система відліку, в якій цей інтервал (з точністю до постійного множника *c*) є просто проміжком часу τ_0 між цими подіями. Для цих подій поняття «раніше», «пізніше» мають абсолютний характер. Очевидно, що між такими подіями може бути причинно-наслідковий зв'язок.

Для подій, розділених просторовоподібним інтервалом, $c^2t_{12}^2<l_{12}^2$, тобто $S_{12}{}^2<0$, а інтервал S_{12} є уявним числом. В цьому випадку завжди можна знайти таку систему відліку $\boldsymbol{C'}$, в якій ці події відбуваються одночасно, тобто $t'_{12}=0$:

$$c^2t_{12}^2-l_{12}^2=c^2t_{12}'^2-l_{12}'^2=-l_{12}'^2$$

Абсолютна величина просторовоподібного інтервалу – це просторова відстань між подіями в системі відліку, в якій ці події сталися одночасно. Поняття «одночасно», «раніше», «пізніше» для таких подій відносні: завжди можна вказати такі системи відліку, в яких перша подія відбувається раніше за другу, і такі, у яких друга відбувається раніше першої. Очевидно, що між подіями, для яких втрачається абсолютний сенс поняття «раніше» та «пізніше», не може бути причинно-наслідкового зв'язку. Втім, неможливість причинного зв'язку між подіями, розділеними просторовоподібним інтервалом, для яких $l_{12}>ct_{12}$, безпосередньо видно з того, що ніякий сигнал, ніяка взаємодія не може поширюватися зі швидкістю, більшою *c*.

Що нам дає конкретний запис просторово-часового інтервалу між двома даними подіями в тій чи іншій інерційній системі відліку?

Якщо такий інтервал записано в конкретних значеннях x, y, z, t_k у вибраній інерційній системі відліку ми можемо оцінити не лише відстань і тривалість подій в природі: зокрема, скориставшись перетвореннями Г. Лоренца можна визначити відносні швидкості руху тіл, які беруть участь у цих подіях (бо: $\upsilon_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$; $\upsilon_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ і т.д.).

2.5. Найважливіші застосування теорії відносності

- ***Формула взаємозв'язку маси і енергії та її практичне застосування.*** Формули (2.16, 2.17, 2.18) є основою для відповідних розрахунків у сучасній практичній енергетиці, у т. ч. ядерній енергетиці, ядерній військовій техніці; на основі неї розраховують енергію ядерних реакцій, пояснюють взаємоперетворюваність елементарних частинок і таке ін.

- ***Створення квантової теорії світла.*** Формула (2.16) свідчить, що при випромінюванні світла маса випромінювального тіла зменшується, а при поглинанні світла – збільшується. Цей наслідок із теорії відносності відіграв революційну роль у подальшому розвитку теорії оптичних явищ, квантової фізики (у т. ч. квантової оптики) та інших розділів сучасної фізичної науки. За відкриття закону фотоефекту А. Ейнштейну було (1921 р.) присуджено Нобелівську премію – найважливішу міжнародну відзнаку за наукові досягнення світового масштабу.

- ***Теорія відносності і астрономічна наука.*** Відкриття А. Ейнштейном закону взаємозв'язку маси і енергії, у подальшому – створення загальної теорії відносності (теорії тяжіння) суттєво вплинуло на *астрономічну науку*. Наприклад, наявністю у кванта світла маси пояснюється гравітаційне відхилення світлових променів від далеких зірок, які проходять поблизу Сонця (Рис. 2.8).

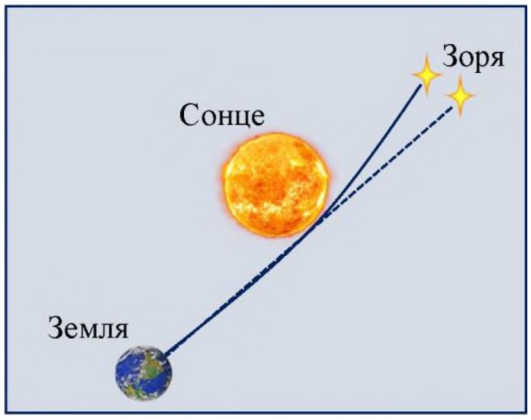


Рис. 2.8. Гравітаційне притягання квантів світла при його проходженні поблизу масивних небесних тіл

Загальна теорія відносності передбачила існування чорних дір – космічних об'єктів, навколо яких гравітація є такою сильною, що навіть світло, потрапляючи у чорну діру, не може її покинути. Загальна теорія відносності передбачила також існування гравітаційних хвиль, які породжуються прискореним рухом масивних тіл і поширюються у просторі зі швидкістю світла. Експериментально, існування таких гравітаційних хвиль було підтверджено у 2015 році.

- ***Теорія відносності як інженерна наука.*** Законами теорії відносності користуються не лише вчені-фізики, але й інженери; наприклад ті, хто будує прискорювачі елементарних частинок (Рис. 2.9). Закон взаємозв'язку маси і енергії є основою для побудови та експлуатації атомних електростанцій.

Отже, теорія відносності нині є наукою *інженерною*!



Рис. 2.9. Найбільший у світі прискорювач елементарних частинок (Швейцарія)

- ***Теорія відносності і GPS.*** Глобальна система навігації та визначення положення (англ. Global Positioning System, або GPS), стала незамінною в навігації, торгівлі, військовій справі, транспорті та багатьох інших галузях діяльності сучасної людини і суспільства, в цілому. Все, від комп'ютеризованих карт в автомобілях – до крилатих ракет, базується на можливості синхронізації сигналів з точністю до 50 мільярдних часток секунди для визначення положення будь-якого об'єкта на Землі з великою точністю. Але для того, щоб забезпечити таку високу точність, вченим-інженерам необхідно вносити певні поправки до законів Ньютона згідно з теорією відносності, бо під час руху супутників відбувається невеликий зсув частоти радіохвиль. Якщо нехтувати відповідними поправками, то годинники на супутниках глобальної системи будуть спішити на 40 мільйонних часток секунди в день. Це може спричинити суттєві порушення в процесі визначення положення об'єктів на Землі.

– Перелік застосувань теорії відносності можна значно продовжити.

• ***Теорія відносності і науковий світогляд.*** Теорія відносності суттєво змінила *ставлення людини до дійсності.* Віднині діалектично-матеріалістичний світогляд людини отримав переконливе підтвердження в тому, що:

– світ є матеріальним, тобто таким, що реально існує;

– все, що відбувається в природі має природну обумовленість;

– реальний (матеріальний) світ – це єдність неперервного та дискретного у їх цілісності; він проявляється в єдності і боротьбі ‘протилежностей та переході кількісного у якісне;

– реальний світ є пізнаваним, а наукові знання мають об’єктивний характер, тобто їх джерелом є реальний світ; набування наукових знань сприяє пізнанню людини самої себе та забезпеченню життєдіяльності і самої себе, і суспільства в цілому; застосування сучасного знання передбачає необхідність відповідального ставлення людини до всього природного і таке інше.

Наразі, світоглядний аспект законів і уявлень теорії відносності був і залишається бути дискусійним у філософії, як науці, продукуючи її подальше революційне оновлення. Зокрема, це стосується й уявлень про простір і час, як форми існування матерії; віднині, простір і час, – це дві сторони (якості) цілісного просторово-часового континууму, властивості якого визначаються розподілом, рухом і взаємодією матеріальних тіл.

Загальні висновки до розділу 2

✓ Зі створенням теорії відносності А. Ейнштейна, наявність «ефірного» середовища відкидається в науці остаточно!

✓ СТВ стала основою для пояснення релятивістських ефектів з точки зору єдиної наукової теорії, а не на основі окремих і гіпотетичних припущень. Недарма, її А. Ейнштейн назвав її теорією «вільною від протиріч» (див. п.2.2).

✓ Принцип відносності набуває статусу абсолютного (тобто такого, який не потребує ніяких додаткових обґрунтувань) закону природи. Цей принцип є беззастережним доказом того що світ реальних речей в природі є об'єктивним, тобто таким, що не залежить від того вивчає його людина чи ні. Отже СТВ – є основою сучасного наукового світогляду.

✓ Висновок СТВ щодо взаємозв'язку простору і часу та їх залежності від стану фізичного середовища (розподілу тіл, їх властивостей, подій) є основою сучасної (цілісної) природничо-наукової картини світу. В цій картині немає часу самого собою і немає простору самого собою: є щось суцільне і неперервне, що означають терміном просторово-часовий континуум. Просторово-часовий континуум – це форма існування матеріального світу. Кількісною мірою просторово-часового континууму є просторово-часовий інтервал між подіями.

Просторово-часовий інтервал – це поняття, яким оцінюють (і виражають числом) просторово-часову відстань між будь-якими двома подіями, що відбуваються в середовищі матеріальних тіл. Просторово-часовий інтервал є основою для пояснення одночасності (чи неодночасності) події в природі, наявності (чи відсутності) причинно-наслідкових зав'язків між подіями і т. ін..

РОЗДІЛ ІІІ. ПРИКЛАДИ І ЗАДАЧІ НА ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

3.1. Релятивістські ефекти

Задача 3.1. При якій швидкості релятивістське скорочення довжини рухомого тіла дорівнює 25%?

Розв'язання

Дано:

$\frac{\Delta l}{l_0} = 0,25$

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$

$\upsilon - ?$

Співвідношення довжини тіла в нерухомій системі відліку $\boldsymbol{C}$ (l_0), довжини цього ж тіла в рухомій системі відліку $\boldsymbol{C'}$ (l) та релятивістське (лоренцове) скорочення довжини тіла (Δl) показано на рисунку 3.1.

Як відомо (2.12), релятивістське скорочення довжини тіла визначають за формулою: $\Delta l = l_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)$. З неї слідує, що: $\frac{\Delta l}{l_0} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)$.

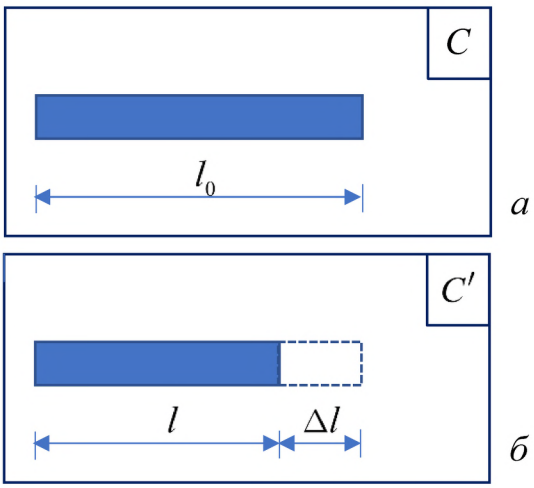


Рис. 3.1. (До задачі 3.1)

Згідно до умови задачі $\frac{\Delta l}{l_0} = 0,25$. Отже:

$$0,25 = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}\right) \quad (\mathbf{3.1}).$$

Розв'язавши останню рівність відносно υ, отримаємо:

$$\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}=1-0,25=0,75 \quad \Rightarrow \quad 1-\frac{\upsilon^2}{c^2}=0,75^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon^2}{c^2}=1-0,75^2 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\upsilon^2}{c^2}=1-0,5625 \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon^2}{c^2}=0,4375 \quad \Rightarrow \quad \upsilon^2=0,4375\cdot c^2 \quad \Rightarrow$$

$$\upsilon=\sqrt{0,4375}\cdot c.$$

Обчислення

$$\upsilon=\sqrt{0,4375}\cdot c=0,6614\times 3\cdot 10^8=1,9842\cdot 10^8\left(\frac{м}{c}\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$[\upsilon]=\frac{м}{c}.$$

Відповідь. Швидкість тіла, при якій скорочення його довжини дорівнюватиме 25% дорівнює $\upsilon\approx 1,98\cdot 10^8\,\frac{м}{c}$.

Задача 3.2. Яку швидкість υ повинно мати тіло, щоб його розмір у напрямку руху зменшився в 2 рази?

Розв'язання

Дано:

$l=\frac{1}{2}l_0$

$c=3\cdot 10^8\,\frac{м}{c}$

$\upsilon-?$

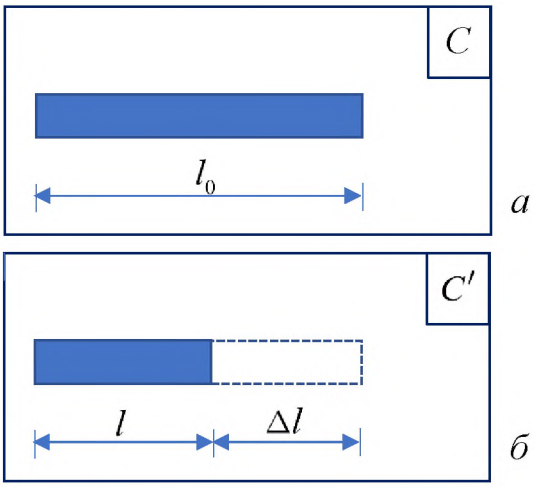


Рис. 3.2. (До задачі 3.2)

Співвідношення довжини тіла в нерухомій системі відліку $\boldsymbol{C}$ (l_0), довжини цього ж тіла в рухомій системі відліку $\boldsymbol{C}'$ (l) та релятивістське (лоренцове) скорочення довжини тіла (Δl) показано на рисунку 3.2.

Цілком очевидно, що задача 3.2 є подібною до задачі 3.1. А отже, її розв'язання здійснюємо аналогічним чином.

В такому разі розрахункова формула є аналогічною до формули (3.1) і набуває виду: $\frac{1}{2}=\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)$ (**3.2**)

Розв'язавши рівність (3.2) відносно υ, отримаємо:

$$\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}=1-0,5=0,5 \quad \Rightarrow \quad 1-\frac{\upsilon^2}{c^2}=0,5^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon^2}{c^2}=1-0,5^2 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\upsilon^2}{c^2}=1-0,25 \;\Rightarrow\; \frac{\upsilon^2}{c^2}=0,75 \;\Rightarrow\; \upsilon^2=0,75\cdot c^2 \;\Rightarrow\; \upsilon=\sqrt{0,75}\cdot c.$$

Обчислення

$$\upsilon=\sqrt{0,75}\cdot c=0,866\times 3\cdot 10^8\approx 2,6\cdot 10^8\left(\frac{м}{c}\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$[\upsilon]=\frac{м}{c}.$$

Відповідь. Швидкість тіла, при якій лоренцове скорочення його довжини дорівнюватиме $\frac{1}{2}$ від початкових розмірів дорівнює $\upsilon\approx 2,6\cdot 10^8\,\frac{м}{c}$.

Задача 3.3. Мезони комічного випромінювання досягають поверхні Землі з різними швидкостями. Знайти релятивістське скорочення розмірів (об'єму) мезона, швидкість якого дорівнює 95% від швидкості світла.

Розв'язання

Дано:	Скорочення об'єму мезону (δ) – це величина, яка визначається за формулою: $\delta = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot 100\%$, де ΔV – скорочення об'єму тіла (мезона); V_0 – об'єм тіла (мезона) в нерухомій системі відліку.
$\upsilon = 0{,}99 \cdot c$	
$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	
$\delta - ?$	

Із записаної вище формули слідує, що $\delta = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \cdot 100\%$, тобто визначається відношенням $\frac{V}{V_0}$. Визначимо його.

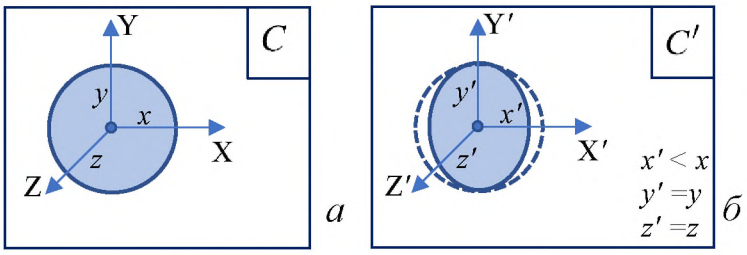


Рис. 3.3. (До задачі 3.3)

Оскільки, поперечні розміри тіла (мезона) при його русі не змінюються (див. рис. 3.3 *б*), то зміна об'єму тіла визначається лише лоренцовим скороченням його лінійних розмірів у напрямку руху (вісь ***OX***). Враховуючи це можна записати, що:

$$V = V_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}\right), \qquad \textbf{(3.3)}$$

відповідно до формули $\Delta l = l_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)$.

З формули (3.3) слідує, що: $\frac{V}{V_0}=\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)$.

В такому разі $\delta=\left(1-\frac{V}{V_0}\right)\cdot 100\%=\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)\cdot 100\%$

Отже: $\delta=\left(1-\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}\right)\cdot 100\%$

Обчислення

$$\delta=\left(1-\sqrt{1-\frac{(0,95\cdot c)^2}{c^2}}\right)\cdot 100\%=\left(1-\sqrt{1-0,95^2}\right)\cdot 100\%=$$

$$=\left(1-\sqrt{1-0,9025}\right)\cdot 100\%=\left(1-\sqrt{0,0975}\right)\cdot 100\%=$$

$$=(1-0,3122)\cdot 100\%=0,6878\cdot 100\%\approx 68,8\%$$

Відповідь. Релятивістське скорочення розмірів мезона при швидкості 95% від швидкості світла дорівнює 68,8% .

Задача 3.4. В скільки разів збільшиться тривалість існування нестабільної частинки, якщо вона починає рухатися зі швидкістю, яка дорівнює 99% від швидкості світла.

Дано:	*Розв'язання*
$\upsilon=0,99\cdot c$ $c=3\cdot 10^8\,\frac{м}{с}$	Проміжок часу t в системі, яка рухається зі швидкістю υ відносно спостерігача, пов'язаний з проміжком часу Δt_0 в нерухомій системі відліку співвідношенням (2.9):
$\frac{\Delta t'}{\Delta t}-?$	

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \quad \text{звідси:}$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = \sqrt{1-\frac{(0{,}99c)^2}{c^2}} = \sqrt{1-0{,}99^2} = \sqrt{1-0{,}98} = \sqrt{0{,}02} = 0{,}14.$$

Отже: $\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{1}{0{,}14} \approx 7{,}1.$

Відповідь. Якщо частинка починає рухатися зі швидкістю, яка дорівнює 99% від швидкості світла, то тривалість існування нестабільної частинки збільшиться в 7,1 рази.

Задача 3.5. Мезон, що входить до складу космічного випромінювання, починає рухатися зі швидкістю, яка дорівнює 95% від швидкості світла. Якою буде тривалість «сповільненого» часу життя мезона, який відповідає одній секунді життя мезона до початку набування цієї швидкості.

Розв'язання

Дано:	Як відомо, зміна тривалості події в СТВ визначається формулою (2.9):
$\upsilon = 0{,}95 \cdot c$	$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$
$\Delta t = 1c$	
$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	
$\Delta t' - ?$	

Обчислення

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{(0{,}95\cdot c)^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-0{,}95^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}95^2}} \approx 3{,}2(c).$$

Відповідь. Одній секунді тривалості життя мезона в нерухомій системі відліку відповідає 3,2 *с* життя мезона в рухомій системі відліку.

Задача 3.6. Яку прискорювальну різницю потенціалів U повинен пройти протон, щоб його повздовжні розміри зменшилися в 2 рази?

Розв'язання

Дано:	Кінетична енергія протона, який пройшов прискорювальну різницю потенціалів U, дорівнює $W_K = eU$, де: e – електричний заряд протона; U – прискорювальна різниця потенціалів.
$l=2l'$	
$e = 1{,}60\cdot 10^{-19}\,Кл$	
$m = 1{,}67\cdot 10^{-27}\,кг$	
$c=3\cdot 10^8\,\frac{м}{с}$	У свою чергу, кінетична енергія протона в СТВ
$U-?$	виражається рівнянням $W_K = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right)$,

де: $m = 1{,}67\cdot 10^{-27}\,кг$ – маса протона, $\beta = \frac{\upsilon}{c}$ – відносна швидкість.

Прирівнявши праві частини виразів, які визначають розмір кінетичної енергії, отримаємо:

$$eU = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right), \text{ звідки } U = \frac{mc^2}{e}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right).$$

Визначимо значення виразу $\sqrt{1-\beta^2}$, скориставшись формулою залежності довжини тіла від його швидкості (2.10):

$l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} \quad \Rightarrow l' = l\sqrt{1-\beta^2}$, звідки $\sqrt{1-\beta^2} = \frac{l'}{l}$.

В такому разі: $U = \frac{mc^2}{e}\left(\frac{1}{\frac{l'}{l}} - 1\right) = \frac{mc^2}{e}\left(\frac{l}{l'} - 1\right) = \frac{mc^2}{e}\left(\frac{2l'}{l'} - 1\right) = \frac{mc^2}{e}$.

Отже: $U = \frac{mc^2}{e}$.

Обчислення

$$U = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27}\left(3 \cdot 10^8\right)^2}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} = 9{,}4 \cdot 10^8\,(B)$$

Перевірка розмірностей:

$$[U] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2 \cdot Кл} = \frac{кг \cdot м \cdot м}{с^2 \cdot Кл} = \frac{Дж}{А \cdot с} = \frac{А \cdot В \cdot с}{А \cdot с} = В$$

Відповідь. Для того, щоб повздовжні розміри протона зменшилися в 2 рази, він повинен пройти прискорювальну різницю потенціалів $U = 9{,}4 \cdot 10^8\,В = 940\,МеВ$.

Задача 3.7. Знайти швидкість υ мезона, якщо його повна енергія в 10 разів більша енергії спокою.

Дано:	*Розв'язання*
c=$3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ $W = 10E_0$	Повна енергія мезона W складається із його кінетичної енергії W_K і енергії спокою E_0, тому
$\upsilon - ?$	

$W = W_K + E_0$, де: $W_K = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$; $E_0 = mc^2$.

Отже: $W = E_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - E_0 + E_0 = E_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

За умовою задачі $W = 10E_0$, тому: $10E_0 = E_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow$

$10 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow 100 \cdot \left(1-\beta^2\right) = 1 \Rightarrow 99 = 100\beta^2 \Rightarrow \beta^2 = 0{,}99 \Rightarrow$

$\beta = \sqrt{0{,}99} \approx 0{,}995$.

Оскільки $\beta = \frac{\upsilon}{c}$, то: $\upsilon = \beta c = 0{,}995c$. Отже $\upsilon = 0{,}995c$.

Обчислення

$$\upsilon = 0{,}995c = 0{,}995 \times 3 \cdot 10^8 = 2{,}985 \cdot 10^8 \left(\frac{м}{с}\right).$$

Відповідь. Якщо повна енергія мезона в 10 разів більша енергії спокою, то його швидкість дорівнює $\upsilon = 2{,}985 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$.

Задача 3.8. Яку частину β швидкості світла повинна мати швидкість частинки, щоб її кінетична енергія дорівнювала її енергії спокою?

Дано:	*Розв'язання*
c=$3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	Кінетична енергія частинки $W_K = mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$, де $\beta = \frac{\upsilon}{c}$ – шукана величина.
$W_K = E_0$	
$\beta - ?$	

За умовою задачі $W_K = E_0$. У свою чергу $E_0 = mc^2$.

Отже: $E_0 = E_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right) \Rightarrow 1=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}=2.$

Звідси слідує, що: $4\cdot\left(1-\beta^2\right)=1 \Rightarrow 4-4\beta^2=1 \Rightarrow \beta^2=\frac{3}{4} \Rightarrow$

$\beta=\sqrt{\frac{3}{4}}=\sqrt{0,75}=0,866.$

Отже: $\beta=0,866$ або $\beta=0,866\cdot100\%=86,6\%.$

Відповідь. Щоб кінетична енергія частинки дорівнювала її енергії спокою, швидкість частинки повинна мати 86,6% швидкості світла.

Задача 3.9. Синхрофазотрон створює пучок протонів з кінетичною енергією $W_K=10 ГкВ$. Яку частину β швидкості світла становить швидкість протонів в цьому пучку?

Розв'язання

Дано:	Залежність кінетичної енергії протонів від швидкості їх руху виражається рівнянням $W_K=mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right).$
$W_K=10 ГкВ=10^{12} В$	
c=$3\cdot10^8\frac{м}{с}$	
$\beta-?$	

Звідси частинка швидкості протонів від швидкості світла

$\beta=\sqrt{1-\frac{m^2c^4}{\left(W_K+mc^2\right)^2}}=0,996\cdot100\%=99,6\%.$

Відповідь. Швидкість протонів становить 99,6 % від швидкості світла.

Задача 3.10. Знайти релятивістське скорочення розмірів протонів в умовах попередньої задачі.

Розв'язання

Дано:	Діаметр протона d, який рухається зі швидкістю υ відносно деякої системи відліку, пов'язаний з діаметром протона d_0, нерухомого в цій системі, співвідношенням швидкості $d = d_0\sqrt{1-\beta^2}$ (див. задачу 3.3).
$c=3\cdot10^8\,\frac{м}{с}$	
$\beta \approx 99\% = 0,99$	
$\frac{d_0-d}{d_0}-?$	

Згідно із розв'язку задачі 3.9: $\beta \approx 99\% = 0,99$. Релятивістське скорочення розмірів протона згідно з формулою $d = d_0\sqrt{1-\beta^2}$:

$$\frac{d_0-d}{d_0} = 1-\sqrt{1-\beta^2} = 0,911 \approx 91,1\%.$$

Відповідь. Релятивістське скорочення розмірів протонів дорівнює 91,1%.

Задача 3.11. Циклотрон створює пучок електронів з електричною енергією $E_K = 0,67eB$. Яку частину β швидкості мають електрони в цьому пучку?

Дано:	*Розв'язання*
$E_K = 0,67eB \approx$ $\approx 1,1\cdot10^{-19}\,Дж$	Залежність швидкості електронів від швидкості світла (див. задачу 3.9) дорівнює $\beta = \sqrt{1-\frac{m^2c^4}{\left(E_K+mc^2\right)}}$.
$c=3\cdot10^8\,\frac{м}{с}$	
$m_e=9,1\cdot10^{-31}кг$	
$\beta-?$	

Обчислення:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{\left(9{,}1 \cdot 10^{-31}\right)^2 \cdot \left(3 \cdot 10^8\right)^4}{\left(1{,}1 \cdot 10^{-19} + \left(9{,}1 \cdot 10^{-31}\right) \cdot \left(3 \cdot 10^8\right)^2\right)}} = 0{,}899 \cdot 100\% = 89{,}9\%.$$

Відповідь. Швидкість частинки становить 89,9% від швидкості світла.

3.2. Розрахунок величини енергії, яку отримують внаслідок ядерних реакцій

Примітка. Тут і далі, при розрахунках зміни енергії чи зміни маси релятивістських тіл на основі застосування закону взаємозв'язку маси і енергії ($\Delta E = \Delta m c^2$), використовують позасистемні одиниці енергії ($1\ eB = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Дж$) та маси ($1\ а.о.м = 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ кг$).

Із формули $\Delta E = \Delta m c^2$ слідує, що одній атомній одиниці маси *відповідає* енергія $931 \cdot 10^6\ eB = 931 MeB$.

Задача 3.12. При поділі ядра Урану $_{92}U^{235}$ вивільняється енергія $W = 200 Мев$. Знайти зміну маси Δm_μ при поділі $\nu = 1$ моль урану.

Розв'язання

Дано:

$W = 200 MeB = 3{,}2 \cdot 10^{-11}\ Дж$

$c = 3 \cdot 10^8\ \frac{м}{с}$

$\nu = 1$ моль

$N_A = 6{,}04 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$

$\Delta m - ?$

Якщо при поділі одного ядра виділяється енергія W, то при розпаді N ядер виділиться енергія в N раз більша, тобто: $\Delta W = W \cdot N$. Згідно умови задачі $\nu = 1$, тому $N = N_A \cdot \nu$. Отже: $\Delta W = W \cdot N_A \cdot \nu$.

Зміну маси тіла, яка відбувається внаслідок розпаду визначаємо за формулою: $\Delta m = \frac{\Delta W}{c^2} \Rightarrow \Delta m = \frac{W \cdot N_A \cdot \nu}{c^2}$.

Обчислення

$$\Delta m = \frac{W \cdot N_A \cdot \nu}{c^2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1}{\left(3 \cdot 10^8\right)^2} = 0,214 \cdot 10^{-3} \left(кг\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$\left[\Delta m\right] = \frac{Дж \cdot моль^{-1} \cdot моль \cdot с^2}{м^2} = \frac{Н \cdot м \cdot с^2}{м^2} = \frac{кг \cdot м \cdot м \cdot с^2}{с^2 \cdot м^2} = кг.$$

Відповідь. При поділі одного моля урану, зміна маси дорівнює $0,214 \cdot 10^{-3} кг$.

Задача 3.13. При бомбардуванні Літію ($_3Li^7$) протонами відбувається ядерна реакція: $_3Li^7 + _1H^1 \rightarrow _1Be^8 \rightarrow 2_2He^4$. Яка енергія виділяється при цій реакції і в якому вигляді?

Розв'язання

Дано:	$M_{Li} + M_p = 2M_{He} + \Delta m;$
M_p=$1,6725 \cdot 10^{-27} кг$	$\Delta m = M_{Li} + M_p \rightarrow 2M_{He};$
M_{Li}=$11,6502 \cdot 10^{-27} кг$	$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$
M_{He}=$6,6465 \cdot 10^{-27} кг$	$\Delta m = 11,6502 \cdot 10^{-27} кг + 1,6725 \cdot 10^{-27} кг -$
c=$3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	$-2 \cdot 6,6464 \cdot 10^{-27} кг = 0,0297 \cdot 10^{-27} кг;$
$\Delta E = ?$	$\Delta E = 0,0297 \cdot 10^{-27} кг \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{м^2}{с^2} = 0,2673 \cdot 10^{-11} Дж$

Відповідь. При бомбардуванні літію протоном утворюються дві α-частинки і виділяється $0,2673 \cdot 10^{-11}$ *Дж* енергії у вигляді кінетичної енергії цих частинок.

Задача 3.13. Обчисліть кількість енергії, яка виділяється при утворенні 1 *г* гелію внаслідок бомбардування Літію ${}_3\mathrm{Li}^6$ ядрами Дейтерію (${}_1\mathrm{D}^2$).

Утворення гелію відбувається за реакцією: ${}_3\mathrm{Li}^6 + {}_1\mathrm{D}^2 \to 2\,{}_2\mathrm{He}^4 + \Delta E$.

Розв'язання

Дано:

m_{Li}=$9,9882 \cdot 10^{-27}$ *кг*

m_D=$3,3444 \cdot 10^{-27}$ *кг*

m_{He}=$6,6465 \cdot 10^{-27}$ *кг*

N_A=$6,02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$

M_{He}=$4,0039 \dfrac{г}{моль}$ =

=$4,0039 \cdot 10^{-3} \dfrac{кг}{моль}$

c=$3 \cdot 10^8 \dfrac{м}{с}$

$m = 1г = 10^{-3}$ *кг*

$E = ?$

Відповідно до закону збереження маси:

$m_{Li} + m_D = 2m_{He} + \Delta m;$

$\Delta m = m_{Li} + m_D - 2m_{He};$

Визначимо числове значення Δm:

$\Delta m = 9,98882 \cdot 10^{-27} + 3,3444 \cdot 10^{-27} - 2 \cdot 6,6465 \cdot 10^{-27} =$
$= 0,0396 \cdot 10^{-27} (кг).$

$\Delta E = \Delta m c^2$ – енергія, яка виділяється при утворенні двох атомів гелію.

В 1 *г* гелію є атомів N/M_{He}.

Отже, при їх утворенні виділиться енергія:

$$E = \frac{N}{M_{He}} \cdot \frac{\Delta E}{2} = \frac{N \Delta m c^2}{M_{He}}.$$

Обчислення

$$E = \frac{N\Delta mc^2}{M_{He}} = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 0{,}0396 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{4{,}0039 \cdot 10^{-3}} = \cdot 53{,}6 \cdot 10^{17} \left(Дж\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$\left[E\right] = \frac{моль^{-1} \cdot кг \cdot м^2 \cdot моль}{с^2} = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = \frac{кг \cdot м \cdot м}{с^2} = Н \cdot м = Дж\,.$$

Відповідь. Утворення 1 *г* гелію при бомбардуванні літію дейтерієм супроводжується виділенням енергії в $E = 53{,}48 \cdot 10^{10} Дж$.

Задача 3.14. Визначте енергію зв'язку ядра Гелію.

Розв'язання

Дано:	Згідно з законом взаємозв'язку маси та енергії
M_n = 1,00898 а. о. м.	$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.
M_p =1,00758 а. о. м.	Зміна маси $\Delta m = ZM_p + \left(A - Z\right)M_n - M_я$, де: $Z = 2$
$M_я$ = 4,00271 а. о. м.	(число протонів в ядрі Гелію); $A = 4$ (число
$\Delta E - ?$	протонів + нейтронів в ядрі Гелію).

З таблиці беремо значення M_n, M_p та $M_я$, для гелію. Ядро Гелію - α-частинка.

Визначимо дефект маси:

$\Delta m = 2 \cdot 1{,}00758$ а. о. м. + $\left(4 - 2\right) \cdot 1{,}00898$ а. о. м. –4,00274 а. о. м. =

$0{,}03038$ а. о. м. = $0{,}03038$ а. о. м. $\cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг}}{\text{а.о.м.}} = 0{,}0507346 \cdot 10^{-27}$ *кг*.

Обчислення

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}0507346 \cdot 10^{-27} \cdot \left(3 \cdot 10^8\right)^2 \approx 0{,}46 \cdot 10^{-11} \left(Дж\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$\left[\Delta E\right] = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = \frac{кг \cdot м \cdot м}{с^2} = Н \cdot м = Дж\,.$$

Відповідь. Енергія зв'язку ядра Гелію дорівнює $\Delta E = 0,46 \cdot 10^{-11}\, Дж$

.

Задача 3.15. Визначте енергію зв'язку ядра ізотопу Літію $_3Li^7$.

Розв'язання

Дано:	В таблицях немає маси ядра ізотопу Літію – $M_я$, а приведено значення маси атома ізотопу Літію $M_а$. Тому потрібно розраховувати за формулою: $\Delta m = ZM_в + (A-Z)M_п - M_а$, де $M_в$ – маса атому водню.
$M_в$ = 1,00813 а. о. м.	
$M_п$=1,00898 а. о. м.	
$M_а$= 4,01822 а. о. м.	
$\Delta E - ?$	

$\Delta m = 3 \cdot 1,00813$ а. о. м. + $(7-3) \cdot 1,00898$ а. о. м. –4,01822 а. о. м. = 0,04209 а. о. м.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,04209 а.о.м \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \frac{кг}{а.о.м.} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}\right)^2 \approx 0,63 \cdot 10^{-11}\, Дж .$$

Розрахунок можна зробити іншим способом, якщо заздалегідь визначити величину енергії, яка є еквівалентною одній атомній одиниці маси $\Delta E_{а.о.м.} = 931,8 \cdot 10^6\, eB$.

Тоді енергія зв'язку ядра $_3Li^7$ буде

$$\Delta E = 931,8 \cdot 10^6 \frac{eB}{а.о.м.} \cdot 0,04209 а.о.м. = 39,2 \cdot 10^6\, eB \approx$$
$$\approx 39,2 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\, Дж = 0,63 \cdot 10^{-11}\, Дж$$

Відповідь. Енергія зв'язку ядра ізотопу Літію $_3Li^7$ дорівнює $\Delta E = 0,63 \cdot 10^{-11}\, Дж$.

Задача 3.16. Відомо, що при одному поділі ядра ізотопу Урану $_{92}U^{235}$ вивільняється 200 *Мев*. Яку кількість енергії можна отримати при поділі 1 *г* урану?

Розв'язання

Дано:	Цілком очевидно, що: $W = \Delta E \cdot N$, де N – число атомів в даній масі речовини. Число атомів в заданій масі урану визначаємо за формулою: $N = \frac{m}{\mu} N_A$, де m – маса речовини, μ – молярна маса Урану 235, N_A – число Авогадро.
$\Delta E = 200 МеВ = 3,2 \cdot 10^{-11}$ *Дж*	
$m = 1 г = 10^{-3}$ *кг*	
$\mu = 235 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{\text{моль}}$	
$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$	
$W - ?$	

Отже: $W = \Delta E \cdot N = \Delta E \cdot \frac{m}{\mu} N_A$.

Обчислення

$$W = \Delta E \cdot \frac{m}{\mu} N_A = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{10^{-3}}{235 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 8,4 \cdot 10^{10} \left(Дж\right).$$

Перевірка розмірностей:

$$\left[W\right] = Дж \frac{кг \cdot моль^{-1} \cdot моль}{кг} = Дж .$$

Відповідь. При поділі 1 *г* урану можна отримати $W = 8,4 \cdot 10^{10}$ *Дж* енергії.

Задача 3.17. Потужність атомного реактора 32000 *кВт* при споживанні за добу 200 *г* ізотопу Урану $_{92}U^{235}$. Яка частина енергії, що виділяється при поділі урану використовується корисно?

Дано:

$P = 32000 кВт = 3{,}2 \cdot 10^7 Вт$

$t = 24 год = 86400 с$

$m = 200\ г = 0{,}2\ кг$

$\mu = 235 \cdot 10^{-3} \dfrac{кг}{\text{моль}}$

$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$

$W - ?$

Розв'язання

ККД реактора визначається за формулою: $\eta = \dfrac{W_{корис}}{W_{витрат}} \cdot 100\%$, де: $W_{корис} = Pt$, $W_{витрат} = \Delta E \cdot N = \Delta E \cdot \dfrac{m}{\mu} N_A$ (згідно з даними, отриманими при розв'язуванні задачі 3.16).

Отже: $\eta = \dfrac{W_{корис}}{W_{витрат}} \cdot 100\% = \dfrac{Pt}{\Delta E \cdot \dfrac{m}{\mu} N_A} \cdot 100\% = \dfrac{Pt \cdot \mu}{\Delta E \cdot m \cdot N_A} \cdot 100\%$

Обчислення

$$\eta = \frac{Pt \cdot \mu}{\Delta E \cdot m \cdot N_A} \cdot 100\% = \frac{3{,}2 \cdot 10^7 \cdot 86400 \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{3{,}2 \cdot 10^{-11} \cdot 0{,}2 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}} \cdot 100\% = 16{,}9\%$$

Перевірка розмірностей:

$$[\eta] = \frac{Вт \cdot с \cdot кг}{моль \cdot Дж \cdot кг \cdot моль^{-1}} = \frac{Дж \cdot кг}{моль \cdot Дж \cdot кг \cdot моль^{-1}} = 1.$$

Відповідь. Корисно використовується 16,9% енергії палива.

3.3. Розрахунок енергії системи матеріальних точок при зменшенні (збільшенні) її енергії внаслідок хімічної реакції

Задача 3.17. Знайти зміну маси Δm, що відбувається при утворенні $\nu = 1$ моль води, якщо реакція утворення одного моля води має вигляд: $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 5{,}75 \cdot 10^5$ *Дж*.

Дано:	*Розв'язання*
$\Delta W' = 5,75 \cdot 10^5\ Дж$	Згідно з умовою задачі, при утворенні двох молей води вивільняється енергія $\Delta W' = 5,75 \cdot 10^5\ Дж$.
$\nu = 1$ моль	
$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	В такому разі при поділі одного моля води вивільняється вдвічі менше енергії. Тому:
$\Delta m - ?$	

$$\Delta W = \frac{\Delta W'}{2} = 2,875 \cdot 10^5\ Дж.$$

Скориставшись формулою взаємозв'язку маси і енергії $\Delta m = \frac{\Delta W}{c^2}$, отримаємо: $\Delta m = \frac{\Delta W}{c^2}$

Обчислення

$$\Delta m = \frac{2,875 \cdot 10^5}{\left(3 \cdot 10^8\right)^2} = 3,2 \cdot 10^{-12}\left(кг\right)$$

Перевірка розмірностей:

$$m = \frac{Дж \cdot с^2}{м^2} = \frac{Н \cdot м \cdot с^2}{м^2} = \frac{кг \cdot м \cdot м \cdot с^2}{с^2 м^2} = кг.$$

Відповідь. Зміна маси дорівнює $\Delta m = 3,2 \cdot 10^{-12}\ кг$.

3.4. Розрахунок зміни енергії тіла внаслідок випромінювання (поглинання) світла

Задача 3.18. Сонце випромінює потік енергії $P = 3,9 \cdot 10^{26}\ Вт$. За який час τ маса Сонця зменшиться в 2 рази? Випромінювання Сонця вважати постійним.

Розв'язання

Дано:	Потік енергії, який випромінює Сонце визначається співвідношенням $P=\frac{\Delta W}{\tau}$ (1). Зміна енергії Сонця в процесі випромінювання $\Delta W=\Delta mc^2$ (2).
$P=3{,}9\cdot10^{26}\,Вт$	
$\Delta m=\frac{1}{2}m$	
$m=1{,}989\cdot10^{20}\,кг$	
$\tau-?$	

За умовою $\Delta m=\frac{1}{2}m$ (3), де: $m=1{,}989\cdot10^{30}\,кг$ початкова маса Сонця.

Підставляючи (2) в (1), з урахуванням (3), отримуємо $P=\frac{mc^2}{2\tau}$, звідки

$$\tau=\frac{mc^2}{2P}.$$

Обчислення

$$\tau=\frac{mc^2}{2P}=\frac{1{,}989\cdot10^{30}\cdot\left(3\cdot10^8\right)^2}{2\cdot3{,}9\cdot10^{26}}=2{,}295\cdot10^{20}\left(с\right)=\frac{2{,}295\cdot10^{20}}{365\cdot24\cdot60\cdot60}\left(с\right)=7{,}2\cdot10^{12}\left(років\right)$$

Перевірка розмірностей:

$$\tau=\frac{кг\cdot м^2}{с^2\cdot Вт}=\frac{кг\cdot м^2\cdot с}{с^2\cdot Дж}=\frac{кг\cdot м^2\cdot с}{с^2\cdot Н\cdot м}=\frac{кг\cdot м^2\cdot с\cdot с^2}{с^2\cdot кг\cdot м\cdot м}=с.$$

Відповідь. Маса Сонця зменшиться в 2 рази за $7{,}2\cdot10^{12}$ років.

Задача 3.19. Протягом 10-годинного дня Європейський континент отримує від Сонця 130 млрд кВт·год енергії. Яка при цьому маса речовини потрапляє на континент? Як зміниться маса Землі за добу?

Дано:	*Розв'язання*
$E = 130 \cdot 10^9 \cdot 3{,}6 \cdot 10^6\ Дж = 4{,}7 \cdot 10^{17}\ Дж$	Згідно закону взаємозв'язку маси і енергії $m = \frac{E}{c^2}$, звідки:
$m - ?$	

$$m = \frac{4{,}7 \cdot 10^{17}}{\left(3 \cdot 10^8\right)^2} = 5{,}2 \cdot 10^3\,(кг) = 5{,}2\,(\text{т}).$$



Рис. 3.1. До прикладу задачі 3.19

Відповідь. 1) Протягом 10-годинного дня Сонце випромінює на Європейський континент енергію, що еквівалентна 5,2 т.

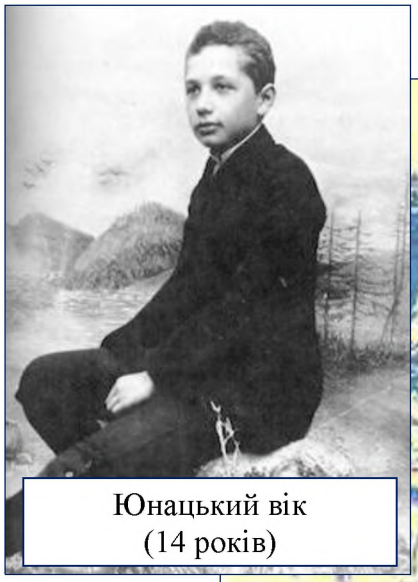
2) Упродовж ночі, Європейський континент випромінює таку саму кількість енергії, а отже він втрачає ті ж 5,2 т. маси. Тому маса Землі за добу не змінюється.

ЗАМІСТЬ ПІСЛЯМОВИ: від ідеї – до вічності

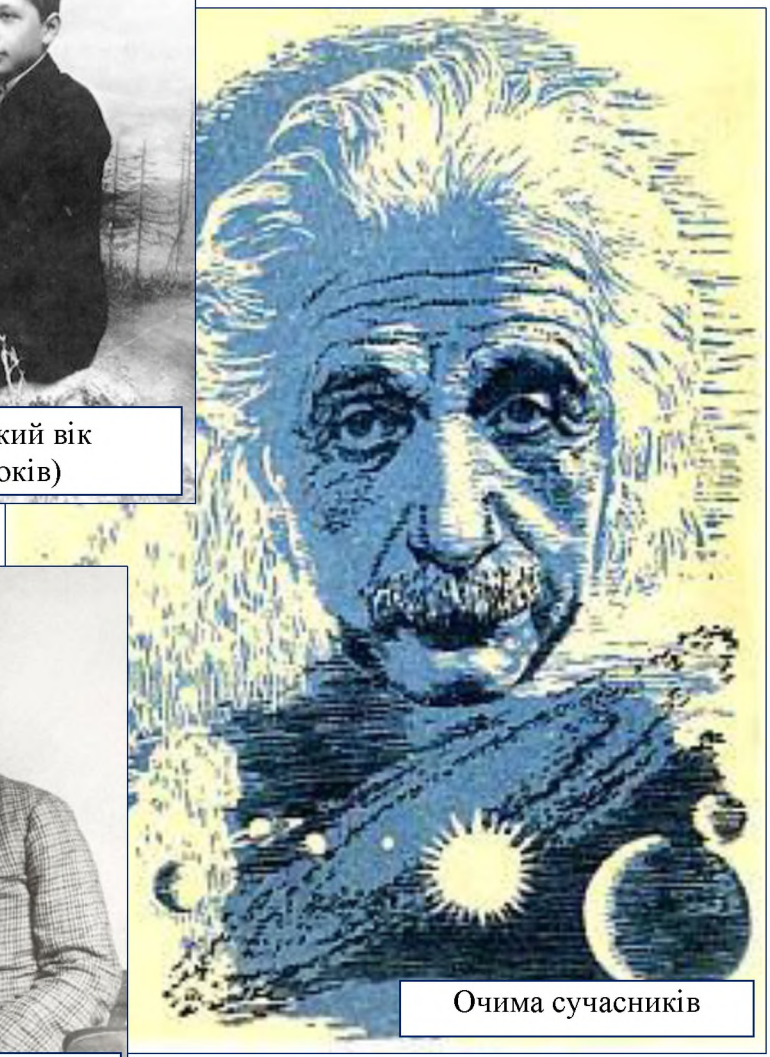
Es gibt nichts Praktischeres

als eine gute Theorie (І. Кант)

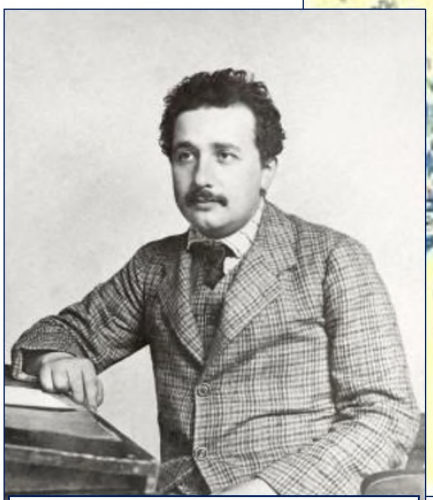
Першим ученим-фізиком, який створив цілісну теорію рухів з великими швидкостями, був 25-річний Альберт Ейнштейн (1879 – 1955 рр.). Як стверджував у своїх спогадах А. Ейнштейн, перші думки щодо пояснення досліду А. Фізо про вплив середовища на швидкість



Юнацький вік
(14 років)



Очима сучасників



25-річний геній «нової фізики»

А. Ейнштейн: *від ідеї – до вічності…*

поширення в ньому електрично заряджених тіл, виникли в нього ще у 16-річному віці;

СТВ дає описання фізичних процесів які відбуваються в інерційних системах відліку, тобто системах які рухаються одна відносно одної рівномірно і прямолінійно. Створивши цю теорію, А. Ейнштейн окреслив і наступний етап наукових пошуків: встановити можливість застосування законів СТВ (як і наслідків з них) для інших, неінерційних систем відліку, тобто таких систем відліку, які рухаються прискорено одна відносно одної. Напочатку, як стверджував А. Ейнштейн, це треба проаналізувати на прикладі систем відліку які рухаються одна відносно одної зі сталим прискоренням. Так було окреслено магістральний шлях становлення нової, загальної теорії



Пам'ятники А. Ейнштейну: *а)* Австралія (Канберра), *б)* Китай (Суджоу), *в)* США (Вашингтон) і багато ін.

відносності (теорії тяжіння), – як продовження спеціальної теорії відносності.

Сучасна теорія відносності складається із двох частин: *спеціальна (часткова) теорія відносності*, створена для пояснення релятивістських рухів в інерційних системах відліку, тобто системах, які рухаються одна відносно одної рівномірно і прямолінійно; другу частину теорії відносності називають *загальною теорією відносності* – її закономірності поширюються на всі інші системи відліку, тобто, які рухаються одна відносно одної з прискореннями. Звісно, при описанні таких рухів враховуються сили (всесвітнього) тяжіння. Тому, загальну теорію відносності ще називають теорією тяжіння.

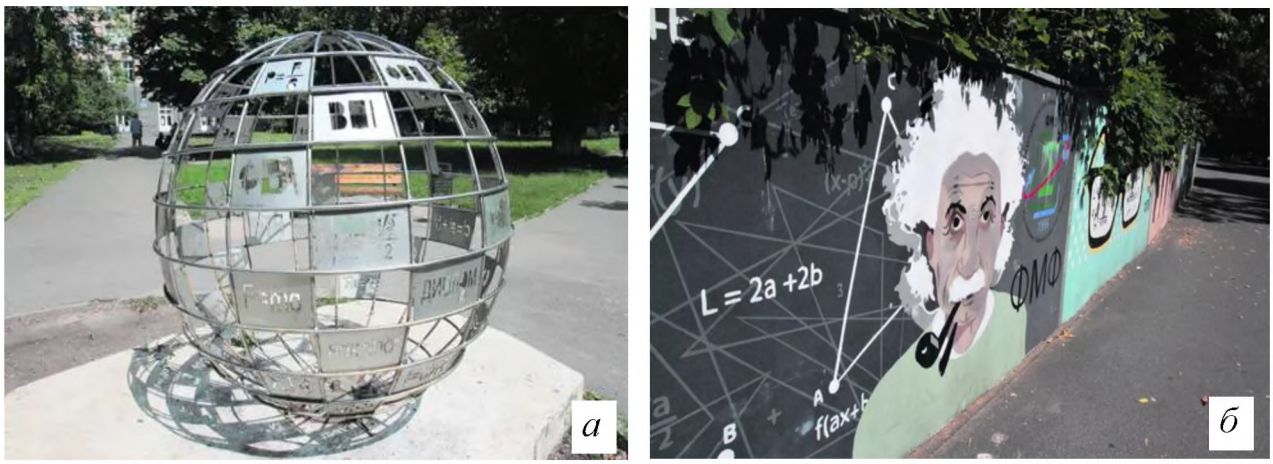
Теорія відносності – це, безперечно, система теоретичних знань, що базуються на математичних методах, які потребують спеціальних знань. Проте практична значущість теорії відносності полягає не лише в поясненні окремих релятивістських ефектів та відкритті формули $E = mc^2$. Це теорія, практичну значущість якої виражають словами «Немає нічого практичніше, ніж гарно продумана теорія».

Інтернет-джерела пропонують дивовижну різноманітність імен, головним чином фізиків, кому належить ця фраза. Тут і Альберт Ейнштейн, і Густав Роберт Кірхгоф, і Нільс Бор, і Енрік Фермі і Ернест Резерфорд, і Луї де Бройль, і Людвіг Больцман. Нещодавно, в «Новій газеті» біолог Михайло Гельфанд опублікував замітку в якій стверджував, що крім перерахованих фізиків, вираз належить також Миколі Боголюбову, Давиду Гільберту, Дмитру Менделєєву і навіть Карлу Марксу та Фрідріху Енгельсу та ін. Бо й справді, всі ці люди

дійсно говорили щось подібне. А німецький класик філософії Іммануїл Кант стверджував таке ще раніше, ніж усі вище поіменовані вчені [10].

Цим ми і пояснюємо вибір наведеного вище епіграфу!

Нині, теорія відносності А. Ейнштейна (як цілісне поєднання спеціальної та загальної теорій відносності) є не лише однією із п'яти фундаментальних фізичних теорій, на яких побудовано сучасну природничо-наукове знання, природничо-наукова картина світу і відповідно, науковий світогляд сучасної людини. Наукові знання про теорію відносності, обумовлений створенням теорії відносності подальший стрімкий розвиток точного природознавства, інші видатні наукові досягнення А. Ейнштейна, життєвий шлях вченого-реформатора, а також особистісні якості Альберта Ейнштейна, – стали невід'ємною частиною досягнень сучасної світової культури. Це, зокрема, відображено і в багаточисленних пам'ятках культури як на регіональних рівнях, так і в планетарному вимірі.



Формула А. Ейнштейна, як елемент культури (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»):
а) Скульптурна композиція, *б)* Арт-об'єкт

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика для поступающих в вузы: Учеб. Пособие. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 640 с.

2. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики / Учеб. пос. – М.: Наука. Глав. ред. Физ.-мат. лит. 1985. 384 с.

3. Гриневич Л., Елькін О., Калашнікова С. та ін. Нова українська школа: концептуальні засади реформування середньої школи / заг. ред. М. Грищенко [ухвалено рішенням колегії МОН України від 27.10.2016]. Київ, 2016. 34 с.

4. Каменецкий С.Е., Орехов В.П. Методика решения задач по физике в ср. шк. / Пособ. для учит. – М., «Просвещение», 1971. 448 с.

5. Кремень В. Г. Філософія людиноцентризму в освітньому просторі. Київ : Т-во «Знання» України, 2011. 520 с.

6. Критично-конструктивний підхід до вивчення спеціальної теорії відносності в профільних класах закладів загальної середньої освіти: навч.-мет. посіб. / А.О. Соломенко, О.А. Коновал, М.А. Слюсаренко, Т.І. Туркот; за ред. О.А. Коновала. Кривий Ріг: КДПУ, 2018. 150 с.

7. Кудрявцев П.С. Курс истории физики . Учеб. Пособие для студентов физ.-мат. Фак. Пед ин-тов. М., «Просвещение», 1975. 312 с.

8. Линднер Г. Картины современной физики. Пер. с нем. Ю. Г. Рудого. Предисл. Н.В. Мицкевича. М., «Мир», 1977. 272 с.

9. Навчальна програма «Фізика і Астрономія 10-11 клас» / авторський колектив під керівництвом Ляшенка О. І. URL:

https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-i-astronomiya-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lyashenka-o-i.doc (дата звернення: 15.10.2021)

10. Нет ничего практичнее хорошей теории: веб-сайт URL: https://eidograph.livejournal.com/90155.html (дата звернення: 15.09.2021).

11. Окунь Л.Б. Понятие массы. Успехи физических наук. т. 158, вып. 3, 1989. С. 511–530

12. Спасский Б.И. История физики. Ч. II. Учеб. Пособие для вузов. изд. 2-е, перераб. и доп. М.; «Высш. школа», 1977, 309 с.

13. Шут М. І., Мартинюк М.Т., Благодаренко Л. Ю. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підручник для 10 класу закладів загальної середньої освіти/ Шут М. І., Мартинюк М.Т., Благодаренко Л. Ю. – К.; Ірпінь: Перун, 2018 – 288с.

14. Эйнштейн А. Собрание научных трудов в четырех томах. Серия «Классики науки». М.; «Наука», т. I, 1965; т. II, 1966; т. III, 1966; т. IV, 1967.

15. Яворський Б.М. Основные вопросы современного школьного курса физики. Пособие для учителей. М.; Просвещение. 1980. – 318 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОРІЄНТОВНА ПРОГРАМА ВИВЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Модуль 1. Передумови виникнення та створення спеціальної теорії відносності.

Тема 1. Відносність механічного руху. Додавання рухів. Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності. Перетворення Галілея.

Що таке нерухома і рухома система відліку? Приклад спільного вибору нерухомої і рухомої систем відліку. Рух відносний і рух переносний. Закон додавання швидкостей. Відносність кінематичних величин, якими характеризують рух тіла у різних системах відліку одночасно. Додавання незалежних рухів. Приклад: рух тіла кинутого горизонтально, як результат додавання двох незалежних рухів. Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності. Перетворення Галілея. Парадигма абсолютного часу. Межі застосування законів класичної механіки.

Тема 2. Релятивістські рухи. Релятивістські ефекти. Принцип відносності електромагнітних явищ. Перетворення Фіцджеральда-Лоренца.

Незалежність швидкості поширення світла від відносного руху джерела і приймача світла. Гіпотеза світлового ефіру. Електромагнітна природа світла. Теорія Дж. Максвелла і гіпотеза світлового ефіру.

Дослід А. Майкельсона - Е. Морлі. Окремі релятивістські ефекти та їх пояснення в рамках класичної фізики. Перетворення Лоренца. Релятивістський закон додавання швидкостей. Релятивістське зменшення лінійних розмірів тіла у напрямку його руху. Гранична швидкість передачі фізичної взаємодії (фізичного сигналу). Про взаємозв'язок маси і енергії тіла.

Тема 3. Спеціальна теорія відносності як пряме продовження класичної механіки. Принцип відносності А. Ейнштейна як вихідний пункт побудови цілісної теорії релятивістських рухів. Про наукову працю А. Ейнштейна «До електродинаміки рухомих середовищ».

Модуль 2. Фізичні основи спеціальної теорії відносності.

Тема 4. Постулати і найважливіші поняття спеціальної теорії відносності. Постулати А. Ейнштейна. Основні поняття і уявлення СТВ. Перетворення Лоренца.

Тема 5. Релятивістські ефекти як наслідки спеціальної теорії відносності. Сповільнення тривалості подій в рухомій інерційній системі відліку як наслідок (закон) СТВ. Відносність одночасності просторово розділених подій. Скорочення розмірів тіла у напрямку руху, як наслідок постулатів А. Ейнштейна. Релятивістський закон додавання швидкостей (за А. Ейнштейном). Закон взаємозв'язку маси і енергії. Взаємоперетворення енергії спокою і кінетичної енергії.

Тема 6. Матеріальне середовище в єдиному просторово-часовому вимірі теорії відносності. Просторово-часовий інтервал як міра відстаней між подіями в природі та їх тривалості. Принцип відповідності в теорії відносності. Взаємозв'язок просторового і часового вимірів при визначенні відстаней між подіями

та їх тривалості. Поняття простору і часу в теорії електромагнітних явищ Г. Лоренца-А. Пуанкаре. Простір і час в спеціальній теорії відносності. Геометричний простір Г. Мінковського. Просторово-часовий інтервал.

Тема 7. Найважливіші практичні застосування теорії відносності. Створення квантової теорії світла. Теорія відносності і астрономічна наука. Теорія відносності як інженерна наука. Теорія відносності і GPS. Теорія відносності і науковий світогляд.

Модуль 3. Приклади і задачі на застосування законів спеціальної теорії відносності.

Релятивістські ефекти. Розрахунок величини енергії, яку отримують внаслідок ядерних реакцій. Розрахунок енергії системи матеріальних точок при зменшенні (збільшенні) її енергії внаслідок хімічної реакції. Розрахунок зміни енергії тіла внаслідок випромінювання (поглинання) світла.

Додаток Б

Орієнтовне поурочно-тематичне планування вивчення основ спеціальної теорії відносності у ЗЗСО

(у розрахунку: 3 год. – рівень стандарту; 6 год. – рівень профільного навчання; скорочено – 3/6 год. Примітка: *питання, виділені курсивом, розглядаються на рівні стандарту в ознайомлювальному плані, а на профільному рівні – подаються системно*)

Тема 1. *(1/2 год.)* **Передумови виникнення та створення спеціальної теорії відносності.**

Відносність механічного руху. *Додавання рухів.* Інерційні і неінерційні системи відліку. Механічний принцип відносності. *Перетворення Галілея.*

Релятивістські рухи. Релятивістські ефекти. Принцип відносності електромагнітних явищ. *Досліди Фізо і Майкельсона-Морлі. Перетворення Фіцджеральда-Лоренца.*

Принцип відносності А. Ейнштейна. Про наукову працю А. Ейнштейна «До електродинаміки рухомих середовищ».

Тема 2. *(1/2 год.)* **Фізичні основи спеціальної теорії відносності.**

Постулати і найважливіші поняття спеціальної теорії відносності. *Перетворення Лоренца.* Релятивістські ефекти як наслідки спеціальної теорії відносності. *Матеріальне середовище в єдиному просторово-часовому вимірі теорії відносності. Просторово-часовий інтервал як міра відстаней між подіями в природі та їх тривалості.*

Тема 3. *(1/2 год.)* ***Найважливіші практичні застосування теорії відносності.*** Закон взаємозв'язку маси і енергії. Нульова енергія (енергія спокою). Розрахунок величини енергії при зміні фізичного стану тіла (на прикладах розв'язування фізичних задач).

Створення квантової теорії світла. Теорія відносності і астрономічна наука. Теорія відносності як інженерна наука. Теорія відносності і GPS. Теорія відносності і науковий світогляд.

Додаток В

Лабораторна робота

Тема. Дослідження руху тіла, кинутого горизонтально

Мета: переконатися, що траєкторія руху тіла , кинутого горизонтально, є параболою; набути вміння вивчати складний рух на прикладі руху тіла, кинутого горизонтально.

Прилади і матеріали: 1) дугоподібний жолоб для скочування кульки і надання їй швидкості в горизонтальному напрямі; 2) кулька; 3) деко з піском; 4) секундомір; б) вимірювальна стрічка з ціною поділки не менше 0,5 см; 6) фанерна дошка з опорними ніжками для забезпечення стійкості у вертикальній площині; 7) прилад одночасного падіння двох кульок, закріплений за допомогою муфти у штативі (Рис 38).

Теоретичні відомості

Спостереження за рухом будь-якого тіла, кинутого горизонтально, показують, що воно рухається по криволінійній траєкторії і через деякий час падає на Землю. При цьому тіло одночасно переміщується у вертикальному і в горизонтальному напрямах. Переміщення тіла в горизонтальному напрямі називають далекістю польоту.

Які фактори і як саме впливають на рух тіла, кинутого горизонтально? Нехай (для спрощення) опір повітря настільки малий, що ним можна знехтувати. У такому випадку тіло, що падає, буде рухатися лише під дією сили тяжіння.

Визначимо траєкторію руху тіла. Для цього знайдемо співвідношення відстані h, яку проходить тіло у вертикальному напрямі, і відстані x, пройденій тілом у горизонтальному напрямі.

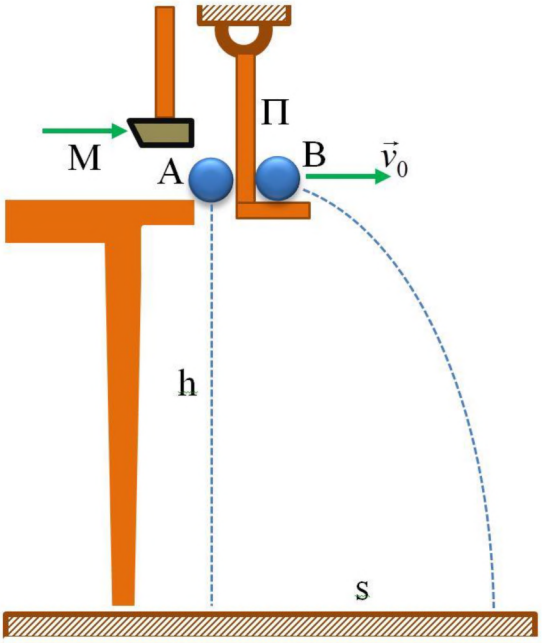


Схема роботи приладу, за допомогою якого спостерігають одночасний рух двох тіл: кулька **A** – вільно падає; кулька **B** – починає рухатися горизонтально

Спочатку знайдемо відстань h. У цьому напрямі діє сила тяжіння $\vec{F} = m\vec{g}$; будь-які інші сили відсутні. Це означає, що тіло рухається у вертикальному напрямі рівноприскорено. Отже,

$$h = \upsilon_c t = \frac{0+\upsilon}{2} t = \frac{\upsilon t}{2} = \frac{gt \cdot t}{2} = \frac{gt^2}{2}.$$

У горизонтальному напрямі дії сил немає і тіло рухається за інерцією з початковою швидкістю $\vec{v}_0$ (швидкість стала). Відстань, яку проходить тіло, дорівнюватиме $x = \upsilon_0 t$. Звідси:

$$t = \frac{x}{\upsilon_0}$$

Підставивши знайдене значення t у формулу $h = \frac{gt^2}{2}$, дістанемо:

$h = \frac{g}{2}\left(\frac{x}{\upsilon_0}\right)^2 = \frac{g}{2\upsilon_0^2} x^2$. Величина $\frac{g}{2\upsilon_0^2} = k$ – стала. Тому $y = kx^2$. З курсу математики ви знаєте, що залежність виду $y = kx^2$ графічно зображується параболою.

Таким чином, траєкторією руху тіла, кинутого горизонтально, буде парабола, вершина якої перебуває в точці кидання. Щоб підтвердити ці міркування, треба дослідним шляхом довести, що:

1. Час падіння тіла, кинутого горизонтально з висоти к, дорівнює часу вільного падіння тіла з цієї висоти. Це можна довести за допомогою установки, схематично зображеної на рисунку. Ударяючи молоточком M по пружній пластині $П$, можна одночасно відпустити кульку A і штовхнути кульку B у горизонтальному напрямі. Якщо тіла впадуть одночасно, то це означає, що рухи тіла у горизонтальному і вертикальному напрямах відбуваються незалежно. Це твердження ще називають принципом незалежності механічних рухів.

2. Інтервали часу падіння, визначені з умови $h = \frac{gt^2}{2}$ (звідси: $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$) і зафіксовані секундоміром, повинні співпадати.

3. Співпадати (приблизно) повинні також і траєкторії руху тіла, розраховані теоретично і відтворені в лабораторних умовах.

Порядок виконання роботи

1. Розмістіть на краю стола жолоб і скочуйте з нього кульку так, щоб вона падала у деко з піском. Зафіксуйте час і місце її падіння в деко, виміряйте висоту і далекість польоту. Дослід повторіть п’ять разів і знайдіть середні значення h_c, t_c, x_c. Оцініть допущені при цьому похибки вимірювань.

Обчисліть середні значення часу падіння (з урахуванням похибки обчислень) за формулою $t_c = \sqrt{\frac{2h_c}{g}}$. Здобутий результат порівняйте з попереднім. Зробіть висновок.

2*. Визначте середнє значення початкової швидкості кульки в момент відриву її від опори за формулою $\upsilon_{0c} = \frac{x_c}{t_c}$.

За формулами $x = \upsilon_{0c} t$ і $h = \frac{gt^2}{2}$ знайдіть далекість польоту і відстань, яку проходить тіло у вертикальному напрямі через кожні 0,5 с. Результати обчислень занесіть до таблиці:

t, с	0	0,05	0,10	0,15	0,20
x, м					
h, м					

Накресліть (крейдою) траєкторію падіння тіла на фанерній дошці. Потім розмістіть фанерну дошку поряд зі столом так, щоб на її фоні можна було спостерігати падіння кульки. При цьому початок побудованої на дошці параболи повинен співпадати з місцем відривання кульки від жолоба. Відтворіть дослід зі скочуванням кульки і переконайтеся в тому, що її траєкторія близька до побудованої параболи.

3*. За допомогою муфти закріпіть у штативі прилад одночасного падіння двох кульок і дослідним шляхом переконайтеся, що кульки падають одночасно.

Контрольні запитання

1. Тіло кидають горизонтально зі швидкістю $\vec{v}_0$. Який напрям швидкості тіла: а) в момент падіння; б) у будь-який інший момент часу?

2. Що називають далекістю польоту тіла, кинутого горизонтально?

3. У чому полягає принцип незалежності механічних рухів?

4*. Як називають лінію, яка є графічним зображенням залежності виду у $y = kx^2$?

5*. Чи впливає опір повітря на: а) час падіння тіла; б) далекість польоту тіла? Відповідь обґрунтуйте.

Додаток Г

Сучасні уявлення про простір і час, як властивості матеріального світу

Простір і час як наукові категорії

Сучасна наукова картина світу – це складне поєднання досвіду побутового і власне наукового пізнання людиною всього того, що її оточує, і себе в ньому.

Для повсякденних «житейських» (побутових) уявлень простір і час – це щось звичне, відоме, очевидне. А чи так це, по суті?

Коли говорять, що всі явища і процеси природи відбуваються в просторі і часі, то при цьому розуміють, що для їх опису необхідно вказати місце, де вони відбуваються, і час, коли вони відбуваються. Те, що відбувається в даній точці і в даний момент часу у фізиці називають елементарною подією. Сукупність же всіх можливих подій в сучасній науці прийнято називати світом, де кожній окремій події відповідає світова точка, а будь-якому процесу, тобто послідовності елементарних подій, – світова лінія.

Простір і час відносяться до числа найважливіших форм буття матерії або її атрибутів, без яких неможливе існування матерії. У світі не існує матерії, яка б не володіла просторово-часовими властивостями, як не існує простору і часу самих по собі поза матерією або незалежно від неї.

Простір є форма буття матерії, що характеризує її протяжність, структурність, співіснування і взаємодію елементів у всіх матеріальних системах. Тобто, простір виражає співіснування, протяжність і структурність будь-яких об’єктів природи.

Таким чином поняття «простору» виражає:

– взаємне розташування матеріальних систем (об'єктів): попереду, позаду, зовні, всередині, біля, далеко, близько і т.д.;

– властивість їх займати певний об'єм, мати протяжність – довжину, ширину і висоту;

– властивість матеріальних об'єктів мати певну форму, структуру.

Час є всезагальною об'єктивною формою існування рухомої матерії, яка є необхідною умовою виникнення і зміни конкретних матеріальних систем і яка виражає структурність, темп і тривалість матеріальних процесів і об'єктивну послідовність подій. Отже, поняття «часу» виражає також всезагальну властивість таких матеріальних систем і процесів, як от:

– тривалість існування предметів, систем і розвитку їх окремих фаз, сторін, ступенів і т.д.;

– спрямованість і зміну станів, відому послідовність процесів (до, після, одночасно і т.п.).

Всі структурно розділені об'єкти матеріального світу перебувають в русі і розвитку, являють собою процеси, які розгортаються за певними етапами, у них можна виявити події, які змінюють одна одну. Зміна цих подій може характеризуватися поняттями тривалості і певної повторюваності. Одна подія може наступати швидше, ніж інша і т.п. Порівняння різних тривалостей може стати основою для кількісних мір, які виражають швидкість розгортання процесів, їх темп і ритм. Якщо розглядати співвідношення

тривалостей як деякі самостійні ознаки процесів, то отримаємо уявлення про час як такий.

Уявлення про час і саме поняття часу мають смисл лише постільки, поскільки світ перебуває в стані руху і розвитку. Якби матерія була б поза рухом (не змінювалася), то поняття часу втратило б всякий зміст.

Спільні властивості простору і часу

Із фундаментальної властивості матерії бути об'єктивною реальністю випливає об'єктивність простору і часу. Друга спільна властивість цих атрибутів – абсолютність. Третя – відносність. Четверта спільна властивість простору і часу – нескінченність, яка випливає із визнання нескінченності матеріального світу.

Простір і час існують поза і незалежно від свідомості людини, тобто вони об'єктивні. Властивість абсолютності випливає із визнання тези про те, що буття поза часом є такою ж нісенітницею, як і буття поза простором. Людські уявлення про простір і час відносні. Із цих відносних уявлень складається абсолютна істина; ці відносні уявлення, розвиваючись, йдуть по лінії абсолютної істини, наближаючись до неї.

Специфічні властивості простору і часу

Простір і час мають не лише спільні характеристики, але й специфічні властивості, які відносяться тільки до простору або тільки до часу, що дозволяє розглядати їх як різні атрибути матерії.

Поряд з такими властивостями, як перервність і неперервність, суперечливість, до найбільш загальних властивостей простору і часу

ще відносять: структурність; протяжність; одномірність, односпрямованість і необоротність часу.

Тривимірність є загальною властивістю простору, яка проявляється на всіх відомих структурних рівнях матерії. Всі матеріальні процеси і вимірювання реалізуються в просторі трьох вимірів. Трививимірність простору органічно пов'язана із структурністю матеріальних систем і їх рухом.

Три виміри є саме тим необхідним і достатнім мінімумом, у рамках якого можуть здійснюватися всі типи взаємодії матеріальних об'єктів. На даний час невідомо форм руху і взаємодій, які б вимагали чотири- чи п'ятивимірного простору. Можливість таких процесів не випливає з жодних встановлених законів природи. Реальний простір як атрибут матерії, у визначеному вище трактуванні, завжди залишається трививимірним. Які завгодно за складністю явища можна відобразити простором трьох вимірів і однією часовою координатою, але із зміною способу опису.

Розмови про можливість простору з більшим від трьох числом вимірів ведуться постійно. Подібні міркування навіяні поняттям абстрактних багатовимірних просторів у математиці і фізиці. У фізиці це поняття використовується у якості зручного способу опису, коли до трьох просторових координат прибавляється час і низка інших параметрів. Якщо число таких параметрів разом з просторово-часовими характеристиками – n, то вважається, що вони утворюють n-мірний простір. Таким чином, за достатньо великої кількості властивостей і взаємопов'язаних змінних можна прийти до поняття

багатовимірного і навіть нескінченного простору, але це поняття носитиме досить умовний характер.

До специфічних властивостей описуваних категорій відносять ще й такі: простір має властивість симетрії, а одномірність і односпрямованість часу («стріла» часу), означає, що він тече від минулого до теперішнього і від нього до майбутнього. В одномірному часі, його необоротності виражається безпосередній характер зв'язку між змінними станами матеріальних об'єктів, а також охарактеризована загальна тенденція слідування одних матеріальних явищ за іншими, перехід від нижчих форм до вищих, від простих до більш складних системних утворень.

Простір і час є єдністю нескінченного і кінечного. Нескінченність простору проявляється абсолютним характером рухомої матерії, відсутністю будь-яких скінченних, застиглих станів, невичерпністю в структурному відношенні і якісними перетвореннями матерії. Нескінченність часу полягає в тому, що матерія вічна в минулому і майбутньому, що час – це всезагальна форма існування невичерпної матерії. Скінченність простору виражається у перервності руху, дискретності і диференційованості матеріальних систем. Аналогічно й час складається із нескінченної множини тривалостей існування окремих матеріальних систем, де відбуваються необоротні процеси.

Класична і посткласична концепції простору і часу

Розширення і поглиблення знань про оточуючий світ завжди було пов'язано з відповідними вченнями про простір і час.

Уже в античні часи мислителі задумувалися над природою і сутністю простору і часу. З історії природознавства відомі з цього приводу міркування Емпедокла, Демокріта, Евкліда, Птолемея та інших філософів і вчених тих часів.

Корінні зміни просторової і всієї фізичної картини відбулися у геліоцентричній системі світу, розвинутої Коперником у праці «Про обертання небесних сфер». Принципова відмінність цієї системи світу від попередніх теорій полягає в тому, що в ній концепція єдиного однорідного простору і рівномірного ходу часу набула реальної емпіричної бази, яка сприяла спрямуванню природничо-наукової думки до визнання безмежності і нескінченності простору. Розуміння взаємозв'язку нескінченності Всесвіту і простору набуло у космологічній теорії Д.Бруно.

Практичного обґрунтування висновки Бруно отримали в «фізиці неба» Кеплера і в небесній механіці Галілея. Кеплер встановив універсальну залежність між періодами обертання планет і середніми відстанями їх до Сонця, ввів уявлення про еліптичні орбіти планет. Концепція Кеплера сприяла розвиткові математичного і фізичного вчення про простір.

Галілей ввів у механіку точний кількісний експеримент і математичний опис явищ. Першочергову роль у розвиткові уявлень про простір відіграв сформульований ним загальний принцип класичної механіки–принцип відносності (Галілея). На основі цього принципу було обґрунтовано еквівалентність інерційних систем відліку та інваріантність у них довжини, часу та прискорення; у фізику було введено ідею близькодії.

Єдність фізики і геометрії обґрунтував Декарт, увівши координатну систему, в якій час представлений як одна з просторових осей. Теза про єдність фізики і геометрії призвела його до ототожнення «матеріальності» і «протяжності». Декарт розвинув також уявлення про співвідношення «тривалості» і «часу».

Таким чином, розвиток уявлень про простір і час у доньютонівський період сприяв створенню концептуальної основи вивчення фізичного простору і часу. Ці уявлення підготували математичне і експериментальне обґрунтування властивостей простору і часу в рамках класичної механіки.

Вперше фізична гравітаційна картина світу, яка базується на строгих математичних обґрунтуваннях, представлена в класичній механіці Ньютона.

У 1687 р. побачила світ основоположна праця Ньютона « Математичні начала натуральної філософії». У цій праці були сформульовані основні закони руху і дано визначення понять простору, часу, місця положення і руху.

З'ясувати сутність часу і простору, Ньютон пропонує розрізняти два типи понять простору і часу: абсолютні (істинні, математичні), і відносні (звичайні, буденні) і дає їм таку типологічну характеристику:

- абсолютний, істинний, математичний час сам по собі і за своєю сутністю, без всякого відношення до чого-небудь зовнішнього, протікає рівномірно і по іншому називається тривалістю;
- відносний, буденний; такий, що видається (позірний), час є або точною, або змінною, пізнаваною чуттями, зовнішньою мірою

довгочасності, яка використовується у побутовому житті замість істинного математичного часу, як-от: година, день, місяць, рік;

- абсолютний простір за своєю сутністю, безвідносно до чого-небудь зовнішнього, залишається завжди однаковим і нерухомим. Відносний простір є мірою, яка визначається нашими почуттями за її положенням відносно деяких тіл, і яка в буденному житті сприймається як простір нерухомий.

Успіхи ньютонівської системи (вражаюча точність і, на перший погляд, абсолютна ясність) сприяли тому, що його концепція простору і часу, на основі якої вибудовувалась фізична картина світу, панувала майже до кінця XIX століття.

Класичні уявлення про простір і час як про самостійні сутності, які не залежать від матеріальних тіл, і в які тіла «занурені» або «укорінені», отримали назву «Субстанційної концепції». Основні положення цієї концепції, які пов'язані з концепціями простору і часу, полягають у наступному:

- простір вважається нескінченним, плоским, «прямолінійним», евклідовим; його метричні властивості описувалися геометрією Евкліда; він розглядався як абсолютний, порожній, однорідний і ізотропний (немає виокремлених точок і напрямів) і виступав у якості «вмістилища» матеріальних тіл, як незалежна від них інерційна система;

- час розумівся абсолютним, однорідним і таким, що тече рівномірно; він іде відразу і скрізь у всьому Всесвіті «одночасно і синхронно» і виступає як незалежний від матеріальних об'єктів процес тривалості. Фактично класична механіка зводила поняття часу до

поняття тривалості, фіксуючи визначальну властивість часу – «показувати довготривалість події». Значення показів (відліків) часу в класичній механіці вважалося абсолютним, незалежним від стану руху систем відліку;

- абсолютні час і простір слугували основою для перетворень Галілея-Ньютона, через які здійснювався перехід до інерційних систем відліку; ці системи виступали у якості обраних систем координат у класичній механіці;

- прийняття абсолютного часу і постулювання абсолютної і універсальної одночасності в усьому Всесвіті стало основою для «теорії дальнодії»; у якості дальнодіючої сили виступало тяжіння, яке з нескінченно великою швидкістю, миттєво і прямолінійно поширювало сили на нескінченні відстані; ці миттєві (з нульовою тривалістю) взаємодії об'єктів слугували фізичним каркасом для обґрунтування абсолютного простору, існуючого незалежно від часу.

Ньютонівське трактування простору і часу сприймалося не всіма природодослідниками і філософами. З критикою поглядів Ньютона виступив німецький учений Лейбніц. Він заклав основи «Реляційної концепції» (реляція–зв'язок, співвідношення) простору і часу, яка заперечувала існування простору і часу як абсолютних сутностей. Цією концепцією користується і сучасне природознавство. У ній простір і час існують як атрибути руху матеріального світу. Без матерії немає ні простору, ні часу, лише у зв'язку з рухом (змінами) матерії простір і час мають зміст.

У кінці XX ст. це положення набуває ширшого змісту – час створюється рухом матеріального світу, хоча не існує будь-якого

специфічного «часоутворюючого» руху в його побутовому розумінні. Термін «рух» у природознавстві розуміється як зміна стану всього світу: дещо, яке не існувало, стає існуючим, у той час як існуюче переходить в інші форми або стани. Іншими словами, від розуміння часу як тривалості (інтервалу між подіями) ми переходимо до його розуміння як процесу становлення (від існуючого до виникаючого).

Радикальних змін погляди на простір зазнали під впливом праць Лобачевського і Рімана. Створення ними у першій половині XIX ст. неевклідової геометрії усунуло один із основних доводів на користь ньютонівської концепції простору і часу – наявність лише однієї евклідової геометрії. Ці геометрії відображали нові, невідомі раніше, властивості простору. Вони базувалися на принципі залежності геометричних властивостей простору від матерії, від процесів, що відбуваються в матеріальному світі.

Ідеї Лобачевського і Рімана знайшли свій подальший розвиток у теорії відносності Ейнштейна. Згідно з цією теорією, простір і час перебувають в прямому нерозривному зв'язку з рухомою матерією. Теорія відносності, яка включає в себе спеціальну (СТВ) і загальну (ЗТВ) теорію відносності, розкрила конкретні форми органічного взаємозв'язку простору і часу, встановила їх залежність від розподілу і руху матерії, показавши тим самим, що простір і час не існують окремо один від одного і від матерії і що вони не є абсолютними у розумінні класичної фізики. Рух тіла або системи відліку можна порівнювати лише з рухом іншого тіла або іншої системи відліку і лише стосовно до них можна чисельно його визначати. «Спеціальний принцип відносності» Ейнштейна стверджує, що у всіх системах

відліку, які рухаються одна відносно одної прямолінійно і рівномірно, діють одні і ті ж самі закони природи. При переході від однієї системи відліку до другої, просторові і часові координати змінюються у відповідності з особливими рівняннями, які називаються перетвореннями Лоренца.

Ейнштейн перший помітив, що швидкість світла відіграє в механіці таку ж важливу роль, що й в оптиці. Швидкість світла виступає тут як недосяжна верхня межа швидкостей для всіх процесів, які супроводжуються передачею сили або переносом енергії. Швидкість цих процесів ніколи не може досягнути швидкості світла, а тим паче перевершити її, навіть у тому випадку, коли до початкової швидкості додається ще яке завгодно число швидкостей.

Із сталості швидкості світла випливає два знаменитих «парадокси» теорії відносності – «ефект скорочення відстаней» і «ефект уповільнення часу».

Один з парадоксів полягає в тому, що розміри тіл, які рухаються дуже швидко, скорочуються у напрямку їх руху порівняно з їх довжиною у стані спокою. Ефект скорочення відстаней полягає у зменшенні довжини відрізків з точки зору спостерігачів, які переміщуються уздовж цих відрізків (відрізки, які орієнтовані перпендикулярно до швидкості відносного руху зберігають свою довжину незмінною).

Ефект уповільнення часу полягає в тому, що з точки зору рухомого відносно розглядуваної системи спостерігача всі інтервали часу, які характеризують процеси в цій системі (коливання маятників годинників, розпад нестабільних частинок, старіння біологічних

організмів тощо), збільшуються порівняно з інтервалами, які спостерігаються безпосередньо в самій цій системі.

Головним висновком теорії відносності Ейнштейна, таким чином, є встановлення того факту, що простір і час існують не самі по собі, відірвано від матерії, а перебувають в такому тісному універсальному взаємозв'язку, в якому вони втрачають самостійність і виступають як відносні сторони єдиного і неподільного простору-часу. Наукою доказано, що плин часу і протяжність тіл залежать від швидкості руху цих тіл, і що структура або геометричні властивості цього чотиривимірного простору-часу - «континууму» - змінюються залежно від скупчення маси речовини і породжуваного нею поля тяжіння. Тяжіння – це викривлення простору-часу. Воно було підтверджене у 1919р. астрономічними спостереженнями, які виявили, що промінь світла, як прообраз прямої лінії, скривлюється поблизу Сонця внаслідок дії його поля тяжіння.

Вимірювання часу

Історично вимірювання часу прийнято проводити на основі обертання Землі навколо осі і обертання Землі навколо Сонця. Одиницю першого періоду називають добою, а одиницю другого – роком. Сонячною добою називають проміжок часу, протягом якого Земля здійснює один повний оберт навколо своєї осі відносно Сонця. Внаслідок річного обертання Землі навколо Сонця, яке відбувається нерівномірно і під кутом 23 °27 ′ до екватора, сонячні доби протягом року не однакові. Тому користуються середньою сонячною добою тривалістю 24 години. Поділ доби на 24 частини почався з древніх

єгиптян, коли вони визначали рух неба протягом доби за 24-ма сузір'ями (деканами). За початок доби взято північ. Отже, середній сонячний час – це проміжок часу, від моменту нижньої кульмінації Сонця (проходження Сонця через небесний меридіан опівночі) до будь-якого його іншого положення, виражений у долях середньої сонячної доби: 24-та доля – година; 60-та доля години- хвилина;60-та доля хвилини – секунда.

Середній сонячний час даного географічного меридіану називають «місцевим часом». Він збільшується у напрямі на Схід. За початок місцевого часу прийнято Грінвічський меридіан, місцевий час якого називають «всесвітнім часом». Користуватися місцевим часом у близько розташованих місцях незручно. Тому за пропозицією канадського інженера Флемінга у 1884 році було запроваджено «поясний час». Поверхня Землі розбита на 24 часових пояси навколо 24 основних меридіанів, які проходять через 15° за довготою. Місцевий час основного меридіану прийнято за час всього пояса і називається поясним часом. Початок доби відраховується з демаркаційної лінії або лінії зміни дати, проведеної за 180° від Грінвічського меридіану. При переході із Заходу на Схід з одного часового поясу на другий час збільшується на 1 годину, а при переході із Заходу на Схід через демаркаційну лінію – зменшується на 1 добу, при зворотному переході – навпаки. З метою раціонального використання енергії протягом доби інколи запроваджують «декретний» або «сезонний час», тоді до поясного часу прибавляють 1 годину на весь рік або на сезон.

Через нерівномірне обертання Землі навколо осі, зумовлене впливом місячних і сонячних припливів і відпливів, сезонних перерозподілів водних і повітряних мас та інших причин, за еталон часу прийнято атомний час: еталонна секунда дорівнює 9 192 631 770 періодам коливань, які відповідають переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома Цезію–133 за відсутності впливів зовнішніх силових полів.

Для вимірювання тривалих проміжків часу використовують календар. Точний календар повинен бути близьким до тривалості тропічного року і містити ціле число діб. Тривалість тропічного року – одного оберту Землі навколо Сонця – складає 365 діб 5 годин 48 хвилин 46 секунд, або 365,24220 середніх сонячних діб.

В історії народів було багато календарів. Найбільш поширеними з них є місячні і сонячні. Місячний календар основний на тривалості синодичного місяця (проміжок часу між двома послідовними однаковими фазами Місяця, який дорівнює 29,53 середніх сонячних діб). Тому місячний календар містить 12 місяців, з яких 6 мають по 30 діб, 6 – 29 діб. Тривалість календарного року становить 354 доби (менша від тропічного року на 11,2422 доби). Тому початок кожного наступного року за місячним календарем зустрічають на цю величину раніше. За тривалістю основних фаз Місяця (новий місяць, 1-ша чверть, повний місяць, остання чверть) виник семиденний тиждень у Вавілоні. Вони назвали неділю днем Сонця, понеділок – Місяця, вівторок – Марса, середу- Меркурія, четвер - Юпітера, п’ятницю – Венери, суботу – Сатурна. Так називають дні тижня багато європейських народів. Словянські народи називали дні тижня так:

понеділок – 1-й день після неділі, вівторок – 2-й день, середа – середина тижня, четвер – 4-ий день, пятниця – 5-ий день, субота – іудейське свято шаабат, неділя – християнське свято.

Сонячний календар виник у Єгипті. Спочатку він містив 360 діб. Мабуть, звідси пішов поділ математиками кола на 360 °. Потім календар уточнили до 365 діб. А в 46 р. до н.е. за пропозицією александрійського вченого Созигена Ю. Цезар увів календар з високосними роками, який отримав назву юліанського календаря. Три роки вважалися тут простими і містили по 365 діб, а четвертий, який ділився без залишку на 4, - високосним. Тривалість юліанського року 365,25 діб. Подальше уточнення сонячного календаря зробив у 1582 році папа римський Григорій XIII. Тут на відміну від юліанського календаря із років століть високосними вважаються лише ті у яких сотні діляться на 4 без залишку. Тривалість григоріанського календарного року 365,2425 діб. Ми зараз користуємося григоріанським календарем. Поділ року на 12 місяців і їх тривалість перейшли до нас від римського календаря. Початок року тоді рахувався з березня місяця. Пізніше початок року перенесли на 1-ше січня.

Початок літочислення в історії суспільства був різним: від Створення світу, від заснування Риму, від Олімпійських ігор, від появи якихось правителів і т.п. Нинішнє літочислення відноситься до Різдва Христового.

Поняття простору і часу в об'єктах нефізичної природи

У сучасній науці використовують поняття «біологічного», «психологічного» і «соціального» простору і часу. Ці поняття уведені

в зв'язку з особливостями прояву просторово-часових властивостей нефізичних об'єктів. Метричні (кількісні) і топологічні (якісні) властивості простору і часу в таких об'єктах можуть суттєво відрізнятися. Так, біологічний простір і час характеризують особливості просторово-часових параметрів органічної матерії: біологічне буття людського індивіда, зміна видів рослинних і тваринних організмів, їх життя і смерть. Одним з перших проблему біологічного простору і часу почав аналізувати В.І. Вернадський. Специфіку біологічного простору він пов'язував з найважливішою ознакою живого – наявністю асиметричності просторової структури органічних молекул.

Вперше властивість асиметрії органічних молекул була виявлена французьким ученим, засновником наукової мікробіології Луї Пастером. Розвиваючи ідеї Пастера, Вернадський представив молекулярну асиметрію як особливу властивість простору, пов'язану з життям.

Невід'ємною ознакою живого, на думку Вернадського, є особлива симетрія простору, зайнятого живою речовиною, а саме, разючий прояв лівизни в матеріальному субстраті живої речовини. Під живою речовиною Вернадський розуміє всю сукупність рослинних і тваринних організмів, у тому числі і людину.

Із особливостей біологічного простору Вернадський виводив й особливості протікання, у тому числі й перервності і неперервності, біологічного часу. Цей час повинен відповідати простору специфічної будови живої речовини і не суперечити йому. Він є певним параметром стану живої речовини. Вернадський об'єднує його в єдиний

біологічний простір-час і пов'язує з ним процеси зміни поколінь, старіння багатоклітинних організмів, а також смерть як руйнування простору-часу тіл організмів.

Дійсно, як встановила сучасна біохімія, все живе, на відміну від неживого, володіє фундаментальною властивістю: білки містять лише «ліві» амінокислоти, а нуклеїнові кислоти – лише «праві» цукри. Головний біологічний смисл цієї асиметрії живого – у забезпеченні молекулярно-просторової комплементарності (відповідності) при взаємодії молекул.

Ця особливість просторової асиметрії живого, відома в сучасній науці під назвою «хіральності» (від грец. *heir* – рука). Виникнення хіральної чистоти живого, як підтверджують сучасні наукові дослідження, відбулося на певному етапі еволюції природи. На цьому етапі під дією поки що невідомих для науки причин наступило повне руйнування дзеркальної симетрії передбіологічного середовища. І лише потім почалося утворення в хірально чистому середовищі коротких нуклеотидних ланцюжків – елементарних «ниток» майбутніх ДНК і РНК.

Таким чином, виникненню біологічних обєктів і повязаного з ними біологічного простору-часу передували певні етапи еволюції просторово-часових властивостей неорганічних об'єктів.

Найбільш явно відмінності просторово-часових властивостей виступають на наступному етапі еволюції, коли під впливом пошукової і трудової діяльності, перебудови фізіологічних механізмів діяльності мозку відбувається формування людської психіки. Одночасно йде формування нового феномена – психологічного

простору і часу. Психічна регуляція рухів індивіда і його предметних дій відбувається не лише на рівні відображення зовнішнього фізичного простору, але й на основі власної тілесної біомеханіки і власного простору.

На основі цих рухів у психіці індивіда і в його психомоториці формується полімодальний (узагальнений) образ простору. Цей образ включає сукупність особливих метричних і топологічних властивостей: криволінійність, відсутність жорсткої прив'язки координат до координат зовнішнього фізичного простору, відносна байдужість до положення, переважання топології над метрикою, відсутність право-лівосторонньої симетрії.

При цьому пошук і пробу майбутніх предметних дій індивід здійснює засобами ідеальних образів, які вибудовуються на основі мовного спілкування за допомогою таких психічних процесів, як відчуття, сприйняття, пам'ять, мислення.

Становлення людського індивіда і особистості як необхідність включає не лише біологічний і психологічний, але й соціальний цикл. Він відбувається в рамках соціогенезу – становлення людського суспільства, розвитку форм соціальної організації і духовного життя. Одночасно йде процес формування нового феномена – соціального простору і часу. Аналізуючи цей феномен, К. Ясперс виділяє поняття «осьова епоха» і «осьовий час».

Осьова епоха як особливий соціальний простір включає утворення декількох духовних центрів людства, внутрішньо споріднених один з одним. Одночасно відбувається зближення цих духовних центрів і формування людини такого психологічного типу,

який існує і в теперішній час. Разом з цим формуються образи і ідеї, з допомогою яких йде раціоналізація соціального буття, народжуються релігійна і філософська віра. Все це відбувається у так званий осьовий час, який представляє собою часові рамки осьової епохи – період розвитку людства між 800 і 200 роками до нової ери.

Соціальний простір включає просторову організацію соціальних об'єктів суспільства, які диференційовані, розділені і певним чином орієнтовані. Його можна характеризувати і як форму буття соціальної матерії, в якій соціальна енергія перетворюється в конкретні форми життєдіяльності особистостей і суспільства в цілому. У цьому плані воно має певну субстанційну реальність. Його специфічними властивостями є протяжність, упорядкованість, масштаб, інтенсивність, насиченість, щільність, певна координація соціальних процесів і явищ.

Соціальний час – це певний за тривалістю період який має будь-який соціальний об'єкт і суспільство в цілому; це сукупний час існування і діяльності всіх індивідів суспільства. Соціальний час невіддільний від соціального простору, в межах якого життєдіяльність індивідів існує у формі різних інститутів, спільнот, груп і територіальних структур.

Соціальний час фіксує як особливості параметрів часу в ретрансляції соціального досвіду, так і одночасність у протіканні соціальних подій.

Навчальне видання

Михайло Тадейович Мартинюк
Володимир Валерійович Миколайко
Олександр Васильович Підгорний
Валентин Іванович Хитрук

ВИВЧЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ В ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

(Ілюстративний матеріал до тексту надано
з відкритих інформаційних джерел)

Видається в авторській редакції

Підписано до друку 22.02.2022 р.
Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 7,56
Тираж 100 прим. Замовлення № 739 (104)

Видавничо-поліграфічний центр «Візаві»
20300, м. Умань, вул. Тищика, 18/19
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2521 від 08.06.2006.
тел. (04744) 4-64-88, (067) 104-64-88
vizavi-print.jimdo.com
e-mail: vizavi008@gmail.com