

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ ПИТАНЬ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ

ДЛЯ УЧНІВ СТАРШОЇ ШКОЛИ

спеціальності 014 – Середня освіта (Фізика)

Студент гр.СФ-81

С.М. Ващенко

Науковий керівник,
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю.Проценко

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю.Проценко

Суми 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 6.014.08 – Середня освіта (Фізика), освітньо-професійна програма
«Середня освіта (Фізика)»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«27» травня 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Ващенко Станіслава Миколайовича

1. Тема роботи: Методика викладання питань сучасної фізики для учнів старшої школи

затверджена наказом по університету від «04» травня 2022 р. , № 0316-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 08 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Одним із актуальних питань викладання фізики в школі є методика викладання розділів сучасної фізики для учнів старшої школи. Не дивлячись на накопичений великий методичний досвід викладання таких класичних розділів як Механіка, Електродинаміка, Оптика та ін. певні проблеми виникають в учителів при спробі викладання учням розділів сучасної фізики таких як Спеціальна теорія відносності, Теорія будови атомного ядра, Теорія гравітації та ін.

З такої точки зору, представляється актуальною методична проблема стосовно викладання питань Спеціальної теорії відносності (СТВ) для учнів старшої школи.

Тому мету кваліфікаційної роботи можна сформулювати таким чином: пов'язати між собою історичні та наукові факти, на основі яких була розвинута СТВ, та здійснено пояснення релятивістських ефектів відносності просторових відрізків, часу та інших ефектів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Загальна інформація про ранні експерименти стосовно визначення швидкості світла.

2. Формулювання постулатів Ейнштейна.

3. Пояснення кінематичних та динамічних ефектів СТВ.

4. Експериментальне підтвердження деяких висновків СТВ.

5. Методичні особливості викладання СТВ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2 – Загальна інформація про експериментальне визначення швидкості світла.

Слайди № 3-4 – Постулати Ейнштейна, перетворення Лоренца та кінематичні ефекти на їх основі.

Слайди № 5-6 – Основи динаміки СТВ.

Слайд № 7-8 – Перелік методичних підходів і прийомів при викладанні СТВ.

Слайди № 9 – Висновки.

6. Дата видачі завдання 27.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалаврів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 25.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Підготовка та оформлення розділу 1.	до 30.05.2022 р.	<i>вик.</i>
3.	Підготовка та оформлення розділу 2.	до 02.06.2022 р.	<i>вик.</i>
4	Підготовка та оформлення розділу 3 та висновків.	до 04.06.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Підготовка тексту роботи.	до 08.06.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	10.06.2022 р.,	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	22.06.2022 р., (у форматі відеоконференції)	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

С.М. Ващенко

Керівник роботи

І.Ю. Проценко

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи бакалавра була спеціальна теорія відносності та методичні особливості її викладання учням у старшій школі.

Мета роботи полягала у встановленні зв'язку між історичними і науковими фактами, на основі яких була розвинута спеціальна теорія відносності; поясненні релятивістських ефектів відносності просторових відрізків, часу та інших ефектів; удосконаленні методики викладення матеріалу учням старшої школи щодо сучасної фізики з використанням нових педагогічних способів та методів для покращення розуміння учнями спеціальної теорії відносності.

У роботі було розглянуто історичний контекст та методику проведення перших експериментів з вимірювання швидкості світла такими вченими як: Альберт Майкельсон, Оле Ремер та Джеймс Бредлі. Наведено опис інерційних систем відліку, пояснено важливість розуміння перетворень Галілея та Лоренца, постулати Ейнштейна та їх зв'язок з іншими розділами фізики. Введено поняття чотиривимірного простору Мінковського; розглянуто наслідки із спеціальної теорії відносності: залежність маси тіла від швидкості його руху, зміна лінійних розмірів тіл, які рухаються з релятивістськими швидкостями, сповільнення часу в рухомих системах та взаємозв'язок між масою та енергією відповідно до спеціальної теорії відносності. Описано методичні аспекти викладання окремих питань спеціальної теорії відносності, а також прийоми та дидактичний матеріал для зацікавлення учнів даною теорією.

Робота викладена на 45 сторінках, зокрема містить 13 рисунків та список цитованої літератури із 20 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ, МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ СВІТЛА, ПОСТУЛАТИ ЕЙНШТЕЙНА.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВ ...	7
1.1. Експериментальне вимірювання швидкості світла (дослід Ремера, Бредлі, Майкельсона, гіпотеза Рітца)	7
1.2. Інерціальні системи відліку, перетворення Галілея	12
1.3. Перетворення Лоренца, постулати Ейнштейна	14
1.4. Довжина рухомих тіл і проміжки часу в рухомих системах	18
РОЗДІЛ 2 ЧОТИРИВИМІРНИЙ СВІТ МІНКОВСЬКОГО	23
2.1. 4-вектори швидкості, е прискорення і імпульсу	23
2.2. Елементи динаміки СТВ	28
2.3. Залежність маси від швидкості	29
2.4. Взаємозв'язок між масою і енергією	30
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ВИКЛАДАННЯ ОСНОВ	
КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ СТВ	33
3.1. Кінематичні ефекти	33
3.2. Елементи динаміки СТВ	36
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

ВСТУП

При виконанні кваліфікаційної роботи були враховані методичні особливості навчального матеріалу та інших питань курсу фізики для учнів старшої школи. У 1905 році Альберт Енштейн опублікував теорію, яка стверджує, що всі фізичні закони мають однакове формулювання у всіх інерційних системах відліку, – спеціальну теорію відносності (СТВ), яка і є предметом дослідження [1-3].

Актуальність тематики роботи пов'язана з тим фактом, що даний розділ фізики відіграє надзвичайно важливу роль у формуванні наукового світогляду учнів, і дає можливість отримати сучасні уявлення про простір і час.

Об'єкт дослідження – методика викладання спеціальної теорії відносності для учнів старшої школи.

Предмет дослідження – побудова системи викладання з урахуванням знань учнів на момент навчання та їх вікових особливостей.

Мета роботи полягала у встановленні зв'язку між історичними і науковими фактами, на основі яких була розвинута спеціальна теорія відносності; поясненні релятивістських ефектів відносності просторових відрізків, часу та інших ефектів; удосконаленні методики викладення матеріалу учням старшої школи щодо сучасної фізики з використанням нових педагогічних способів та методів для покращення розуміння учнями спеціальної теорії відносності.

Сучасні фізичні теорії, наприклад, квантова електродинаміка, квантова хромодинаміка, теорія струн тощо, будуються одразу в лоренц-коваріантній формі, автоматично задовольняючи умові того, що всі закони руху повинні виглядати однаково в будь-якій системі відліку [4, 5].

У процесі підготовки кваліфікаційної роботи було здійснено критичний аналіз особливостей реалізації принципу науковості під час викладання спеціальної теорії відносності в підручниках з фізики для учнів старшої школи.

РОЗДІЛ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВ

1.1. Експериментальне вимірювання швидкості світла (дослід Ремера, Бредлі, Майкельсона, гіпотеза Рітца)

1.1.1. Дослід Оле Ремера

Дослід Ремера полягає у спостереженні за супутником Юпітера – Іо, та періодом його затемнення Юпітером в різних положеннях Землі, найближчому та найдальшому. Спочатку при найближчому положенні Землі до Юпітера необхідно виміряти час поки Іо знаходиться в тіні, а потім при найдальшому. Експериментально ця різниця в часі становить 1320 секунд. Дана різниця у вимірах викликана тим, що світлу необхідно пролетіти більшу відстань до спостерігача та приблизно вона дорівнює діаметру орбіти Землі (рис.1.1).

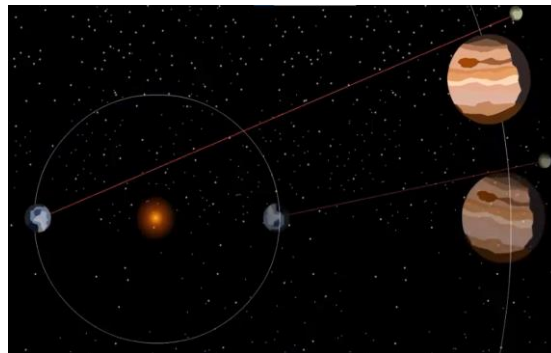


Рисунок 1.1 – Відстань до Іо у найближчому та найдальшому положенні Землі [6]

Знаючи відстань яка «додалась» до шляху світла та час, за який світло пододало додатковий шлях, маємо змогу порахувати швидкість світла (1.1).

$$V_{\text{світла}} = \frac{S_{\text{обр. Землі}}}{t_{\text{затримка}}}, \quad (1.1)$$

де $S_{\text{обр. Землі}}$ – радіус орбіти Землі;

$t_{затримка}$ – різниця у часі появи Іо із-за Юпітера при найдальшому та найближчому положенні Землі.

На той час діаметр орбіти Землі вважався рівним 292 млн км, тому експериментально виміряна швидкість світла становила $2.1 \cdot 10^5$ км/с [6].

1.1.2. Дослід Джеймса Бредлі

Дослід Бредлі полягає у визначення швидкості світла використовуючи аберацію видимих зірок та швидкість руху Землі по орбіті. Аберація – це зміщення світила на небесній сфері яку викликано тим, скінченністю швидкості світла та внаслідок декількох типів руху спостерігача, а саме: обертанням Землі навколо своєї осі (добова аберація); обертанням Землі навколо Сонця - річна аберація; а також переміщенням Сонячної системи по галактиці - вікова аберація (рис.1.2).

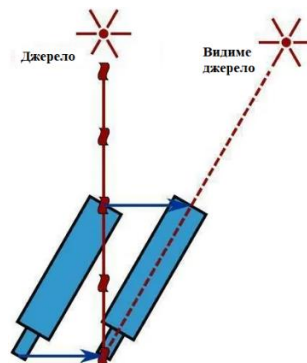


Рисунок 1.2 – Аберація джерела світла [2]

Оскільки Земля рухається по своїй орбіті зі швидкістю приблизно 29,8 км/с, то за час руху світла до спостерігача вона зміщується і зоря знаходиться у другому місці, під кутом α від положення зорі на момент випромінювання світла. Розрахувавши кут α та знаючи швидкість руху Землі по орбіті навколо Сонця можна розрахувати швидкість світла (1.2).

$$V_{\text{світла}} = \frac{V_{\text{Землі}}}{\text{tg } \alpha} \quad (1.2)$$

де $V_{Землі}$ – швидкість руху Землі по орбіті;

$tg \alpha$ – кут між положенням джерела світла у різні моменти часу.

Згідно з результатами розрахунків $c \approx 303000$ км/с [2].

1.1.3. Дослід Альберта Майкельсона

Дослід Альберта Майкельсона по вимірюванню швидкості світла полягав у тому, що від точкового джерела світла пучок падав на грань восьмикутної призми, яке було монолітним стальним дзеркалом, потім через систему дзеркал знову падало на призму та попадало в окуляр телескопа (рис.1.3).

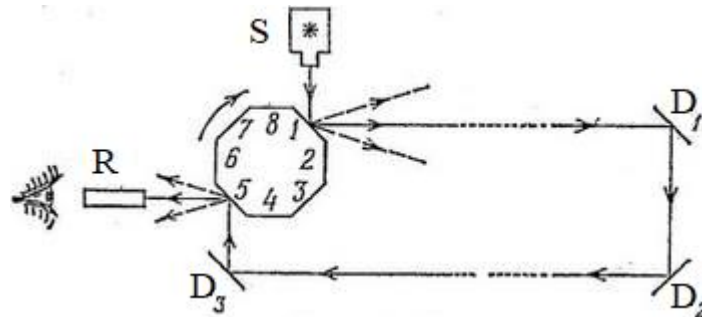


Рисунок 1.3 – Схема досліду Альберта Майкельсона [3]

Під час експерименту відстань L між призмою, що обертається та дзеркалами становила 35400 метрів. Призму починали обертати і зображення в окулярі R зникало. Зі збільшенням кутової швидкості, при досягненні деякої кількості обертів за хвилину n , зображення знову з'являлось в окулярі – це означало, що за час руху світла від джерела S до призми, потім до системи дзеркал $D_1 - D_3$ знову на призму та в окуляр, призма встигла обернутись на $1/8$ оберта, що й дало можливість світлу відобразитись в окулярі. При подальшому зменшенні чи збільшенні швидкості обертання, світло в окулярі не з'явиться. Через те, що час за який циліндр проходить $1/8$ повного оберта, його можна виразити наступною формулою (1.3):

$$t = \frac{L}{\left(\frac{mn}{60}\right)} \quad (1.3)$$

де m – кількість граней.

Тоді для швидкості світла. Тоді для знаходження швидкості світла буде формула (1.4). А згідно з формулою виміряна швидкість світла дорівнювала $c = 299796 \pm 4$ км/с [3]:

$$c = \frac{Lmn}{30} \quad (1.4)$$

1.1.4. Гіпотеза Вальтера Рітца

Ця теорія у свій час склала альтернативу та сильну опозицію теорії відносності Альберта Ейнштейна та квантовій механіці. Балістична теорія Вальтера Рітца – це класична універсальна теорія яка дала, базуючись на єдиних наочних механічних уявленнях, несуперечливий опис явищ космосу та мікросвіту, природи маси, світла та атомів, матерії та часу, електромагнетизму та гравітації. Сутність теорії полягає в тому, що всі явища та взаємодії природи – світло, електричні явища, магнетизм та гравітація зводяться до механічного руху, зіткнення, злиття і розпаду частинок у порожньому просторі, що не має ніяких властивостей та ніяк не впливає на те, що відбувається у ньому.

Основні положення балістичної теорії Вальтера Рітца:

1) Гравітаційні, магнітні та електричні взаємодії мають механічну природу і переносяться частинками, які випускаються елементарними зарядами зі швидкістю світла c , що й використовують, коли класично інтерпретують всі релятивістські та електромагнітні ефекти;

2) Світло - це потік однотипних, частинок які не взаємодіють, періодично розподілених у просторі й таких, що розлітаються від джерела прямолінійно зі швидкістю світла. Рух цих частинок підпорядковується законам класичної механіки, включаючи закон додавання швидкостей частинок (та світла, що вони несуть) зі швидкістю джерела;

3) Елементарні частинки та атоми мають складну кристалічну структуру, вони утворені з періодично розташованих однотипних частинок (електронів – носіїв елементарного заряду, магнітного моменту та маси). Внаслідок цього всі

закони мікросвіту, квантові закони та спектри випромінювання пояснюються природним чином, у рамках класичної механіки та електродинаміки.

Загалом балістична теорія Вальтера Рітца зводиться до того, що вона розповсюджує принципи класичної механіки Ісаака Ньютона (без парадоксальних наслідків спеціальної теорії відносності Ейнштейна, на кшталт зміни швидкості плину часу, зміни відстаней та мас) на область оптичних, електричних, атомних та будь-яких інших явищ. Світло у балістичній теорії Вальтера Рітца являє собою потік частинок, які випромінюються тілами що світяться.

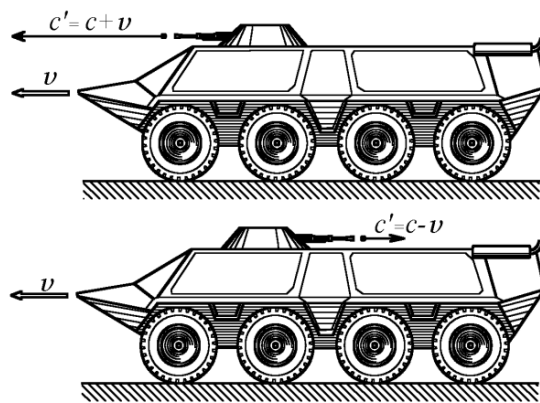


Рисунок 1.4 – Постріли з БТРа який рухається, що показує розповсюдження частинок світла від рухомого джерела та додавання його швидкості до швидкості частинок [4]

Джерело світла, на кшталт кулемету вистрілює ці частинки з постійною швидкістю, що дорівнює швидкості світла. Та якщо джерело світла рухається, то швидкість БТРу геометрично додається до швидкості частинок за класичним законом складання швидкостей (рис.1.4).

1.2. Інерціальні системи відліку, перетворення Галілея

Інерційна система відліку – це система відліку у якій будь-яке тіло знаходиться у стані спокою або рухається рівномірно та прямолінійно, якщо на нього не діють інші тіла або дію інших тіл скомпенсовано. У таких системах

тіло зберігатиме початковий стан спокою або рівномірного прямолінійного руху доти, доки дія інших тіл не змусить його змінити цей стан, цей вислів називають Першим законом Ісаака Ньютона. Будь-яка система відліку, яка переміщується відносно інерціальної системи відліку рівномірно, а також прямолінійно теж є інерціальною. Встановити, що дана система відліку є інерціальна можна зробити лише дослідним шляхом [4]. З високим ступенем точності можна вважати інерційною - геліоцентричну систему відліку, в якій початок координат пов'язаний із Сонцем, а осі спрямовані на певні «нерухомі» зірки. Системи відліку, жорстко пов'язані з поверхнею Землі, є інерційними, оскільки Земля рухається по орбіті навколо Сонця, а також обертається навколо своєї осі. Під час розрахунку руху тіл, що не мають масштабу сонячної системи чи галактики, системи відліку, пов'язані із Землею, можна з достатньою точністю вважати інерційними [5].

Жодними механічними дослідженнями, поставленими всередині інерційної системи відліку, неможливо встановити, чи ця система покоїться або рухається рівномірно і прямолінійно. Це твердження називається принципом відносності Галілея, або механічного принципу відносності. Цей принцип був згодом розвинений Альбертом Ейнштейном і є одним із постулатів спеціальної теорії відносності. Інерціальні системи відліку відіграють у фізиці винятково важливу роль, оскільки, згідно з принципом відносності Ейнштейна, математичне вираження будь-якого закону фізики має однаковий вигляд у кожній інерціальній системі відліку.

Перетворення Галілея показують, в який спосіб пов'язані між собою координати механічного об'єкта у різних інерціальних системах відліку та вони показують перетворення координат і часу, які застосовуються у ньютонівській механіці при переході від однієї інерціальної системи відліку $K(x, y, z, t)$ до іншої $K'(x', y', z', t')$, яка рухається відносно K поступально зі сталою швидкістю V (рис.1.5).

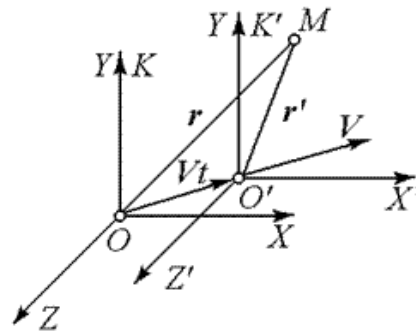


Рисунок 1.5 – Перехід від однієї інерціальної системи відліку до іншої [4]

Перетворення Галілея ґрунтуються на аксіомах про абсолютність довжин та проміжків часу. Перша аксіома стверджує, що плин часу (відповідно проміжок часу між будь-якими двома подіями) однаковий у всіх інерційних системах відліку. А друга аксіома стверджує, що розміри тіла не залежать від швидкості його руху відносно системи відліку. Обидві аксіоми перестають працювати при швидкостях руху тіл, що наближається до швидкості світла [1].

Перетворення Галілея мають вигляд (1.5), якщо відповідні осі координат інерційних систем відліку K і K' проведені попарно паралельно одна одній та в початковий момент часу ($t = t' = 0$) початки координат O та O' збігаються (рис.1.5):

$$x' = x - V_x t, y' = y - V_y t, z' = z - V_z t \text{ і } t' = t \quad (1.5)$$

де x, y, z та x', y', z' - координати точки M у системах відліку K і K' ;

r та r' - радіус-вектори точки M ;

V_x, V_y, V_z - проєкції V системи K' на осі координат K .

1.3. Перетворення Лоренца, постулати Ейнштейна

1.3.1. Перетворення Лоренца

Розглянемо дві інерціальні системи відліку K та K' просторові координати яких є декартовими. Позначимо їх через x, y, z і x', y', z' відповідно. Осі x та x' збігаються, а осі y, y' і z, z' мають однакові напрямки (рис. 1.6).

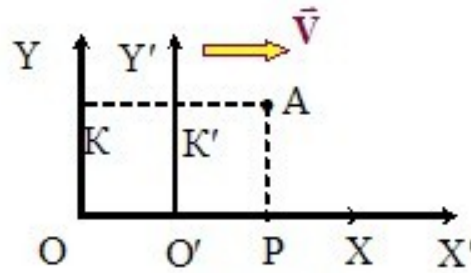


Рисунок 1.6 – Дві інерціальні системи відліку «накладені» одна на одну [8]

Відлік часу почато в момент, коли початки координат O і O' та відповідні осі координат співпадали. У точці A з координатами (x, y, z) у момент часу t відбувається подія, тому аби дізнатися які координати (x', y', z') має дана точка та момент часу t' , коли сталась подія для спостерігача K' -системи відліку, що рухається відносно K із швидкістю \vec{V} . При швидкостях набагато менших за швидкість світла перетворення Галілея є точними. Це дає змогу знайти нові перетворення координат x, x' (1.6) та (1.7) відповідно [7]:

$$x = \gamma(x' + Vt') \quad (1.6)$$

$$x' = \gamma(x - Vt) \quad (1.7)$$

де величина γ - релятивістський гамма фактор.

В залежності від значення швидкості V , та величини релятивістського гамма фактору рух умовно поділяють на три види [1]:

- 1) ультра релятивістський вид руху: $V \approx c, \gamma \gg 1$,
- 2) релятивістський вид руху: $V \rightarrow c, \gamma \rightarrow 1$,
- 3) нерелятивістський вид руху: $V \ll c, \gamma \approx 1$.

Через те, що в обох формулах є одна й та ж величина γ , то вони відповідають першому постулату спеціальної теорії відносності – «Принципу відносності», а тому обидві системи є рівноправними і різниця лише у напрямку відносного руху (знаку проекції \vec{V}). Оскільки при $t = t'$ у (1.6) та (1.7) γ стає рівним 1, та вони перетворюються у перетворення Галілея.

Загальний вигляд перетворень часу можна знайти, якщо підставити замість координати x в (1.7) її вираз у (1.6) і розв'язати отримане рівняння відносно t :

$$x' = \gamma(\gamma(x' + Vt') - Vt) \Rightarrow t = \gamma t' - \frac{(1 - \gamma^2)x'}{V} \quad (1.8)$$

Якщо врахувати принцип відносності обернений вираз має вигляд (1.9):

$$t' = \gamma t + \frac{(1 - \gamma^2)x'}{V} \quad (1.9)$$

Це можна перевірити порахувавши t' з (1.8). Перетворення, що шукаються мають задовольняти також умові сталості швидкості світла c , другому постулату спеціальної теорії відносності. Для цього припустимо, що в момент часу $t = t' = 0$, коли точки O і O' були накладені одна на одну, включилась лампочка, яка закріплена на початку координат однієї з двох систем відліку. Через те, що швидкість світла в обох системах дорівнює c , то поширення світлового сигналу вздовж осей x , x' описується рівняннями (1.10) та (1.11):

$$x = ct \quad (1.10)$$

$$x' = ct' \quad (1.11)$$

Підставивши дані вирази в (1.6) і (1.7), отримаємо (1.12) та (1.13) відповідно:

$$ct = \gamma(c + V)t' \quad (1.12)$$

$$ct' = \gamma(c - V)t \quad (1.13)$$

Після чого помноживши обидві частини цих рівнянь отримаємо (1.14):

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad (1.14)$$

Підставивши знайдену величину γ у (1.6), (1.7) та (1.8), (1.9), а також врахувавши збіг поперечних координат отримаємо перетворення часу та координат, які задовольняють постулатам спеціальної теорії відносності та мають назву перетворення Лоренца (1.15) [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{x'V}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = \frac{t' + \frac{x'V}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. \quad (1.15)$$

1.3.2. Постулати Ейнштейна

Альберт Ейнштейн висловив два постулати, які є основою спеціальної теорії відносності:

1. Будь-які фізичні процеси, при однакових початкових умовах, відбуваються однаково в усіх інерціальних системах відліку, тобто усі закони фізики та рівняння, що їх описують справджуються однаково в будь-яких інерційних системах відліку – є інваріантними. Ніякими фізичними дослідженнями неможливо встановити чи перебуває система в стані спокою, рухається прямолінійно рівномірно чи перебуває всередині іншої інерціальної системи [10]. Це означає, що в ніякі експерименти у будь-якій галузі фізики (механіка, електродинаміка, молекулярна фізика, ядерна фізика тощо) не дають змогу визначити, чи рухається рівномірно дана інерціальна система відліку чи знаходиться у стані спокою. Тому жодну з цих систем не можна вважати такою що домінує (абсолютною) у порівнянні з іншою. Також принцип відносності Ейнштейна можна сформулювати наступним чином: всі рівняння, що описують закони природи, інваріантні відносно перетворення координат і часу від однієї інерційної системи відліку до іншої. Інваріантністю рівнянь називається

незмінність їх виду при заміні в них координат та часу однієї системи відліку координатами та часом іншої.

2. Швидкість світла у вакуумі (c) не залежить від швидкості руху джерела та приймача світла і незмінна у будь-якому напрямку, тобто швидкість світла однакова в усіх інерційних системах відліку (c – інваріант)[1,с.34].

З рівності швидкості світла у всіх інерціальних системах відліку виходить, що вона є граничною швидкістю. Постійність швидкості світла є однією з фундаментальних речей у природі. Ніяке тіло, що має масу не може досягти її, окрім квантів різних полів та фотонів [10]. А тому швидкість світла є максимальною швидкістю поширення інформації, будь-якої взаємодії та «причинності».

Принцип постійності швидкості світла збігається з результатами експерименту Армана Фізо та експерименту Альберта Майкельсона та Едварда Морлі (1887 р.). Ці експерименти не виявили різниці у швидкості світла, вимірної в орбітальному напрямку руху Землі та в перпендикулярному до нього напрямку. Сьогодні принцип сталості світла підтверджується спостереженнями за подвійними зірками, які обертаються навколо спільного центру мас з великою швидкістю, та багатьма іншими спостереженнями.

Комбінація постулату про постійність швидкості світла з принципом відносності називається принципом відносності Ейнштейна.

1.4. Довжина рухомих тіл і проміжки часу в рухомих системах

1.4.1. Довжина рухомих тіл

Для розуміння уявимо, що необхідно знайти довжину стрижня АВ в K – системі відліку (рис.1.7).

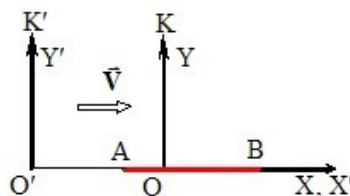


Рисунок 1.7 – Система з рухомих стрижнем

Спостерігаючи зі сторони K – систему знайти це можна, замірявши тривалість переміщення стрижня $\Delta t_{ст}$ повз нерухому точку O у K' – системі відліку (1.16):

$$l = V\Delta t_{ст} \quad (1.16)$$

Очевидно, що довжина l та l_0 повинна бути однаковою, але це не так. Уявімо, що описаний спосіб вимірювання контролюється спостерігачем системи K' , для якого стрижень знаходиться в стані спокою, а годинник системи K пересувається вздовж нього зі швидкістю V . Спостерігач K – системи вимірює час, за який його годинник перемістився на відстань l_0 вздовж стрижня, тому (1.17):

$$\Delta t_{год} = \left(\frac{l_0}{V}\right) \Rightarrow l_0 = V\Delta t_{год} \quad (1.17)$$

Через те, що проміжки часу між тими самими подіями, а також у K – системі відбуваються у тій самій точці і записуються нерухомим відносно K – системи годинником, тому $\Delta t_{ст}$ – це власний проміжок часу між даними подіями (1.18):

$$\Delta t_{ст} = \Delta t_0 \quad (1.18)$$

Своєю чергою $\Delta t_{год}$ записувалось пересувним годинником, з чого випливає, що воно є лабораторним проміжком часу між даними подіями (1.19):

$$\Delta t_{год} = \Delta t \quad (1.19)$$

В системі відліку K довжина l_0 нерухомого стрижня є власною довжиною, а в K' – системі, довжина l , у якій він рухається є лабораторною довжиною. Поєднавши формули (1.17) та (1.18), а також урахувавши (1.26) отримаємо (1.20):

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1.20)$$

З чого слідує, що лабораторна довжина у напрямку руху в $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ разів менша ніж власна довжина, а тому власні повздовжні розміри предмета є найбільшими.

1.4.2. Проміжки часу в рухомих системах

З відносності одночасності подій слідує відносність ходу самого часу у різних системах відліку. На стрижні закріпленому вертикально, на кінцях, закріплено два горизонтальних дзеркала (рисунок 1.8) між якими переміщується короткохвильовий світловий імпульс.

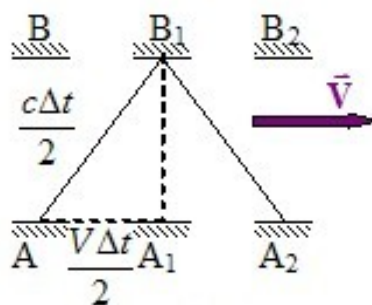


Рисунок 1.8 – Експеримент, що був запропонований Альбертом

Ейнштейном [12]

Почнемо рухати стрижень горизонтально зі швидкістю V та визначимо час проходження імпульсу від одного дзеркала до іншого і навпаки: а) у системі

відліку стрижня K' і б) у нерухомій системі відліку K по якій стрижень рухається. Очевидно, що в K' -системі цей час дорівнює (1.21):

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c} \quad (1.21)$$

де $l_0 = AB$ – це відстань між дзеркалами в K' -системі відліку, у якій стрижень нерухомий; c — швидкість світла.

Але в системі відліку K , відносно якої рухається стрижень, світловий імпульс відбивається верхнім дзеркалом в точці B_1 і повертається до нижнього дзеркала в точці A_2 . І так за половину часу він долає дистанцію: $l = AB_1$, що пов'язана з відстанями AA_1 , а також A_1B_1 наступним співвідношенням (1.22), з чого виходить (1.23):

$$(AB_1)^2 = (AA_1)^2 + (A_1B_1)^2 \quad (1.22)$$

$$AA_1 = \frac{V\Delta t}{2} \quad (1.23)$$

де V – швидкість стрижня;

Δt – час пробігу світлового імпульсу від нижнього дзеркала до верхнього й назад у K - системі відліку.

Відстань A_1B_1 в K - системі відліку так само як і K' дорівнює l_0 , згідно з принципом відносності, тому (1.24):

$$l^2 = l_0^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2 \quad (1.24)$$

В K та K' -системах відліку швидкість світла дорівнює c , а тому $l = \frac{c\Delta t}{2}$ поєднавши ці 2 рівняння отримаємо (1.25):

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = l_0^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2 \Rightarrow \Delta t = \frac{2l_0}{c\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad (1.25)$$

Поєднавши даний вираз із виразом (2.1) отримаємо формулу для двох інерціальних систем відліку (1.26):

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad (1.26)$$

Для системи K' з нерухомими дзеркалами, час Δt_0 було виміряно нерухомим годинником, а своєю чергою час Δt годинником, який був у K – системі відліку, який також рухався зі швидкістю V . Через те, що $\Delta t > \Delta t_0$, то годинник з K' – системи буде «йти» повільніше ніж для спостерігача. Система відліку, в якій точки, де яких фіксуються події, називається власною системою відліку, а час, який показує фіксований годинник у цій системі відліку («власний» годинник), називається власним часом і тому він є найповільнішим.

Висновок до Розділу 1: у першому підрозділі розділу було розглянуто перші спроби вчених виміряти швидкість світла. Перша експериментальна спроба Оле Ремера визначити швидкість світла, ґрунтувалась на різниці у часі появи Іо в залежності від положення Землі відносно Юпітеру, дала швидкість світла рівну приблизно $2.1 \cdot 10^5$ км/год. Більш точний експеримент провів американський фізик Джеймс Бредлі, який був заснований на явищі аберації Сонця та дав у результаті швидкість світла рівну $c \approx 303000$ км/с.

Найбільш близьке до сучасного значення швидкості світла, експериментально отримав Альберт Майкельсон. Який використав джерело світла, три дзеркала, приймач світла (окуляр) та велику монолітну призму від якої, під необхідним кутом світло відбивалось, переміщувалось між дзеркалами, потрапляло на призму після чого в окуляр. Майкельсон отримав швидкість світла рівну $c = 299796 \pm 4$ км/с.

Гіпотеза Вальтера Рітца, як антипод теорії відносності, полягає у тому, що світло - це потік однотипних частинок, що розлітаються прямолінійно від джерела, а рух цих частинок описується законами класичної механіки у тому числі закон додавання швидкості частинок з швидкістю джерела.

У другому підрозділі розділу було систематизовано поняття інерціальної системи відліку, а також сутність перетворень Галілея, згідно з якими змінюються значення фізичних величини при переході між інерційними системами відліку.

У третьому підрозділі розкрито сутність постулатів Ейнштейна, згідно з якими:

- швидкість світла - незмінна у будь-якій системі відліку;
- усі фізичні процеси, в будь-якій ІСВ відбуваються однаково.

Також розглянуто перетворення Лоренца які описують лінійні перетворення, що залишають незмінним просторово-часовий інтервал.

Останнім підрозділом було пояснено явище зменшення повздовжних розмірів об'єктів при наближенні швидкості руху до швидкості світла, а також те, чому власні повздовжні розміри предметів є найбільшими. Обґрунтовано чому в рухомій системі час протікає повільніше, ніж у нерухомій.

РОЗДІЛ 2. ЧОТИРИВИМІРНИЙ ПРОСТІР МІНКОВСЬКОГО

2.1. 4-вектори швидкості, прискорення і імпульсу

Для коректного опису явищ, що протікають при великих швидкостях, необхідно враховувати скінченність швидкості передачі взаємодії, а також нерозривність простору - часу. Для цього пропонується ввести об'єкт, який запропонував Герман Мінковський, у якому відбуваються всі процеси – це чотиривимірний простір-час. У ньому положення будь-якої матеріальної точки визначається трьома просторовими координатами x, y, z та однією часовою t .

Група з чотирьох координат, що однозначно визначає положення тіла у певний момент часу називається світовою точкою, а світловою лінією називають відображення в чотиривимірному світі руху тіла в просторі та часі.

У класичній механіці три просторові координати вводяться як функції четвертої, незалежної, змінної – часу, своєю чергою час є інваріантом перетворень Галілея. Через те, що час у чотиривимірному просторі спеціальної теорії відносності – це рівноправна координата, то необхідно задавати і її зміну. Через те, що тривимірна швидкість – це вектор та необхідно зберегти векторні властивості і в чотиривимірному просторі, закон переміщення матеріальної точки можна задати у вигляді (2.1) [13]:

$$x_i = x_i(\tau) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2.1)$$

Своєю чергою компоненти чотиривимірного вектора швидкості можна описати як (2.2):

$$u_i = \frac{dx_i}{d\tau} \quad (2.2)$$

У якості інваріантної величини, пов'язанної з рухом тіл необхідно обрати особистий (власний) час $d\tau$ або еквівалентну йому величину – інтервал.

Рахуючи зміну координат точки dx_i такою, що пов'язана зі зміною власного часу отримаємо компоненти чотиривимірного вектора швидкості. Власний час $d\tau$ – це час між двома подіями, що відбуваються в одній точці та визначений він годинником, який є нерухомим відносно системи. Проміжок часу між двома подіями, тривалість якого виміряна секундоміром інерційної системи відліку, відносно якої рухається тіло зі швидкістю V позначено через dt . Тому зв'язок між цими проміжками часу виражається як (2.3):

$$d\tau = \gamma dt, ds = c d\tau \quad (2.3)$$

$$\text{де } \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}};$$

$$\beta = \frac{V}{c}.$$

Узявши власний час тіла у якості інваріантного параметра, та використавши взаємозв'язок (2.3) тобто власним часом та часом системи відліку відносно якої рухається тіло, маємо можливість скласти наступне рівняння (2.4):

$$u_\alpha = \frac{dx_\alpha}{d\tau} = \gamma \frac{dx_\alpha}{dt} = \gamma v_\alpha \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (2.4)$$

де v_α – компоненти тривимірної швидкості.

Перші 3 компоненти чотиривимірного вектора швидкості – це компоненти тривимірного вектора швидкості помножені на γ множник, який своєю чергою, залежить від абсолютної швидкості тіла. Четверту компоненту чотиривимірного вектора швидкості можна знайти так (2.5):

$$u_4 = \frac{dx_4}{d\tau} = \gamma \frac{d(ict)}{dt} \quad (2.5)$$

Через те що при $\beta \rightarrow 0$, тобто при $V \ll c$ множник γ приблизно рівний одиниці, з чого слідує що перші 3 компоненти чотиривимірного вектора

швидкості співпадають зі звичайною швидкістю. Важливо, що четверта компонента швидкості не дорівнює 0 навіть тоді, коли тіло перебуває у стані спокою ($v = 0$, $\gamma = 1$ та $u_4 = ic$). З даного факту можна зробити висновок, що плин часу зупинити не можна та у чотиривимірному світі $\vec{V} = 0$ бути не може. Важливо, що компоненти чотиривимірної швидкості є залежними, що показано у формулі (2.6):

$$\vec{V}^2 = u_i^2 = \gamma^2 v^2 + i^2 c^2 \gamma^2 = c^2 \gamma^2 \left(\frac{v^2}{c^2} - 1 \right) = -c^2 \quad (2.6)$$

З цього можна зробити висновок, що абсолютна величина чотиривимірної швидкості є інваріантом.

Як і у тривимірному випадку, абсолютна величина чотиривимірного вектора знаходиться додаванням квадратів його відповідних компонент, оскільки четверта компонента є уявною то вона віднімається.

Чотиривимірне прискорення можна побудувати, за аналогією, як чотиривимірний вектор $\vec{\omega}$ (2.7) [14]:

$$\omega_i = \frac{du_i}{d\tau} = \frac{d^2 x_i}{d\tau^2} \quad (2.7)$$

А, відповідно, компоненти чотиривимірного вектора прискорення, можна визначити як компоненти тривимірних векторів v та \dot{v} , як показано нижче у (2.8):

$$\omega_\alpha = \frac{d}{dt} (\gamma v_\alpha) \frac{dt}{d\tau} = \gamma v_\alpha \frac{d\gamma}{dt} + \gamma^2 \frac{dv^2}{dt} = \frac{\dot{v}_\alpha}{1 - \beta^2} + \frac{v_\alpha (v\dot{v})}{c^2 (1 - \beta^2)^2} \quad (2.8)$$

Вираз (2.8) справедливий, через те, що вирази (2.9) справедливі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \gamma^3 \beta \dot{\beta} \text{ та } \frac{dt}{d\tau} = \gamma \quad (2.9)$$

При рівномірному русі ($\dot{v} = 0$) четверта компонента прискорення стає рівна нулю. У тій системі координат, де тіло не рухається, тобто швидкість рівна нулю, перших три просторові компоненти чотиривимірного вектора прискорення співпадають із тривимірними компонентами прискорення, а часова компонента стає рівна нулю, як видно у формулі (2.10):

$$\begin{cases} \omega_1^0 = \dot{v}_x, \\ \omega_2^0 = \dot{v}_y, \\ \omega_3^0 = \dot{v}_z, \\ \omega_4^0 = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

З формули (2.10) очевидно, що (2.11):

$$\vec{\omega}_0^2 = \omega_i^0{}^2 = \dot{v}^2 > 0 \quad (2.11)$$

З того, що квадрат модуля чотиривимірного вектора є інваріантним слідує те, що чотиривимірний вектор прискорення – це просторовоподібний вектор. У будь-якій системі відліку маємо (2.12):

$$\vec{\omega}^2 = \omega_i^2 = \frac{\dot{v}^2 - \frac{1}{c^2}[\dot{v}\dot{v}]^2}{(1 - \beta^2)^3} > 0 \quad (2.12)$$

Продиференціювавши співвідношення $u_i^2 = -c^2$ по τ маємо вираз (2.13) з якого слідує, що у чотиривимірному просторі швидкість та прискорення частинки - ортогональні (перпендикулярні).

$$u_i \frac{du_i}{d\tau} = 0 \quad (2.13)$$

Ґрунтуючись на другому законі Ньютона, основному законі динаміки у тривимірному просторі (2.14), складемо за аналогією основний закон релятивістської динаміки у чотиривимірному вигляді (2.15) [8]:

$$\frac{d\vec{p}_{\text{кл}}}{dt} = \vec{f} \quad (2.14)$$

$$\frac{dp_i}{ds} = F_i \quad (2.15)$$

де p_i – це чотиривимірний імпульс;

F_i – це чотиривимірна сила.

За аналогією, так як у класичній механіці швидкість частинки та її імпульс пов'язані співвідношенням (2.16) складемо вираз і для 4 - векторів (2.17):

$$\vec{p}_{\text{кл}} = m\vec{v}, \quad (2.16)$$

де m – маса частинки, яка є однаковою у всіх інерціальних системах відліку.

$$p^i = mci^i \quad (2.17)$$

Якщо використовувати явний вигляд компоненти чотиривимірного вектора швидкості, то контрваріантні компоненти чотиривимірного вектора імпульсу мають вигляд (2.18):

$$p^i = (mc\gamma, m\vec{v}\gamma), \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.18)$$

Припустимо, що p^0 та \vec{P} часова та просторова компоненти чотиривимірного вектора імпульсу, а тому можна записати (2.19):

$$\begin{cases} p^0 = \frac{mc}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Враховуючи, що рівняння (2.15) характеризує зміну чотиривимірного вектора швидкості частинки за відповідними компонентами чотиривимірного вектора сили та враховуючи, що (2.20) виходить (2.21):

$$ds = c dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.20)$$

$$\frac{dp^i}{dt} = c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} F^i \quad (2.21)$$

2.2. Елементи динаміки СТВ

Зрозумівши, що рівняння руху залежить від трьох його перших компонент, у масштабі однієї системи відліку. З чого робимо висновок, що працювати з рівнянням руху можна як з тривимірним рівнянням, не беручи до уваги, що спочатку воно було чотиривимірне. Переписавши формулу (2.14) в інший вид маємо (2.15), важливо зазначити, що у формулі (2.15) вектори v та F мають тривимірний сенс:

$$\frac{d}{dt} (m_0 \gamma v) = F \quad (2.15)$$

Як зазначалось вище, при $\gamma \approx 1$ релятивістське рівняння руху тіла перетворюється у рівняння Ньютона, тобто в рівняння руху в класичній механіці. З виразу (2.16) слідує, що (2.17) коли енергія тіла набагато більша ніж енергія її енергія спокою починають працювати релятивістські рівняння руху.

$$\gamma = \frac{\varepsilon}{m_0 c^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{\varepsilon}{m_0 c^2} \gg 1 \quad (2.17)$$

З формули (2.18) слідує що, на відміну від класичної механіки, в релятивістській механіці сила F та прискорення $\frac{dv}{dt}$ не збігаються, а також що якщо v та F не взаємно паралельні, то прискорення та сила також.

$$m_0 \gamma \frac{dv}{dt} + m_0 \gamma^3 \beta \dot{\beta} v = F \quad (2.18)$$

Рівняння руху, у загальному випадку, можна виразити наступним чином (2.19), а для тривимірного прискорення ω виходить, що (2.20):

$$m_0 \gamma \frac{dv}{dt} + v \frac{d}{dt} (m_0 \gamma) = F \quad (2.19)$$

$$\omega = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_0 \gamma} \left\{ F - \frac{v}{c^2} (Fv) \right\} \quad (2.20)$$

З (2.20) видно, що при наближенні швидкості руху частинки до c , $v \rightarrow c$, коефіцієнт γ прямує до безкінечності, сила залишається незмінною, а прискорення зникає.

2.3. Залежність маси від швидкості

Якщо в будь-якій системі відліку маса нерухомої частинки у цій самій системі незмінна, то така маса називається інваріантною масою спокою.

Підставивши у формулу (2.21) вираз $m_{\text{рел}} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, отримаємо (2.22):

$$\varepsilon = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon = m_{\text{рел}} c^2, \quad \vec{p} = m_{\text{рел}} \vec{v} \quad (2.22)$$

У цьому випадку $m_{\text{рел}}$ позначено релятивістську масу. У (2.22) вираз для знаходження імпульсу подібний до виразу з класичної механіки. З формули (2.21) маємо - релятивістська маса тіла у спеціальній теорії відносності не стала величина, а залежить від швидкості руху тіла, як зображено на (рис. 2.1).

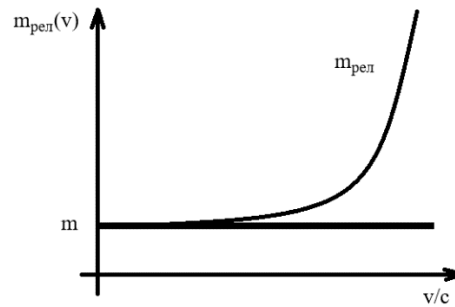


Рисунок 2.1 – Залежність релятивістської маси тіла від його швидкості руху [1]

При швидкостях за яких працює класична механіка, тобто при $v \gg c$, маса спокою та релятивістська маса тіла майже однакові. При наближенні швидкості руху до швидкості світла маса зростає, що робить недосяжною швидкість світла для будь-якого тіла з масою відмінною від нуля.

2.4. Взаємозв'язок між масою і енергією

Через те, що для вільної матеріальної точки справедливий вираз (2.23):

$$\vec{P} = (p, \frac{i}{c}\epsilon) \quad (2.23)$$

де $p = m_0\gamma v$.

Коли імпульс точки p_0 стає рівним нулю в системі K^0 , тоді чотиривимірний вектор \vec{P} у цій системі дорівнює: $\vec{P}^0 = (0, \frac{i}{c}\epsilon_0)$. При перетворенні чотиривимірного вектора для системи K отримуємо (2.24):

$$p = \gamma \frac{\varepsilon_0}{c^2} V, \varepsilon = \gamma \varepsilon_0 \quad (2.24)$$

Беручи до уваги що $p = m_0 \gamma v$ слідує (2.25):

$$m_0 = \frac{\varepsilon_0}{c^2} \quad (2.25):$$

З (2.25) слідує, що енергію частинки у власній системі (та система, де її імпульс = 0) визначає її маса спокою. Будь-яка замкнена система, у якій є енергія у власній системі відліку, разом з тим має інертну масу, яка визначається формулою (2.26):

$$M_0 = \frac{\varepsilon_0}{c^2} \quad (2.26)$$

де ε_0 – вся енергія, що міститься у системі.

У якості доказу уявімо тіло, що має масу спокою M_0 , яке випромінює світло, електромагнітне випромінювання, тобто втрачає енергію в системі K' . Воно має форму сфери та випромінює рівномірно з усієї площі, а тому результівний імпульс випромінювання дорівнює нулю [15]. Перейшовши до системи K будемо вважати, що випромінювання тривало протягом кінцевого проміжку часу, а тому енергія та імпульс цуга хвиль утворює чотиривимірний вектор. В системі K , якщо випромінювана енергія в системі K' дорівнює ε_0 , імпульс випромінювання можна знайти наступним чином (2.27):

$$p = \gamma \frac{\varepsilon_0}{c^2} V \quad (2.27)$$

Так як імпульс тіла не змінився, закон збереження імпульсу виконується тільки у тому випадку, коли змінилась маса спокою тіла, тоді закон збереження імпульсу для даного випадку має вигляд (2.28), або, якщо спростити, то (2.29):

$$\gamma M_0 V = \gamma M'_0 V + \gamma \frac{\varepsilon_0}{c^2} V \quad (2.28)$$

де M'_0 – маса спокою тіла до випромінювання.

$$M'_0 = M_0 - \frac{\varepsilon_0}{c^2} \quad (2.29)$$

З (2.29) слідує, що маса спокою зменшилась на величину $\frac{\varepsilon_0}{c^2}$. Для даного випадку не важливо у якій формі була енергія ε_0 до випромінювання.

Висновок до Розділу 2: у першому підрозділі другого розділу було розглянуто основи інваріантності чотиривимірного вектора швидкості. Доведено, що вектори швидкості та прискорення частинки у чотиривимірному просторі - ортогональні, а також складено основний закон релятивістської динаміки.

У другому підрозділі було пояснено як виникає явище зменшення прискорення з наближенням руху тіла до швидкості світла.

У третьому підрозділі було пояснено неможливість досягти швидкість світла для тіл, що мають не нульову масу.

У четвертому підрозділі було систематизовано зв'язок енергії з масою при швидкості руху наближається до швидкості світла у вакуумі.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ВИКЛАДАННЯ ОСНОВ КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ СТВ

3.1. Кінематичні ефекти

Спеціальна теорія відносності є одним із найвизначніших досягнень фізичної науки в цілому. Вона була створена як узагальнення експериментальних і теоретичних фактів та фізичних концепцій. Одразу ж стало зрозумілим, що класична механіка Ньютона не може пояснити усі експериментальні факти, які стали відомими на початку ХХ століття.

Уже на початку вивчення класичної механіки учні дізнаються, що рух матерії відбувається у просторі та часі, тобто простір та час виступають як форми руху матерії. Це проявляється також у тому факті, що у фізичні закони входять як просторові, так і часові параметри. Про це необхідно говорити учням починаючи із класичної механіки та закінчуючи спеціальною теорією відносності.

Необхідно підкреслювати учням, що важливою рисою часу є його незворотність на відміну від простору, який оборотній, оскільки у довільну його точку можна повертатися багато разів. Крім цього зробити наголос на тому, що простір характеризується однорідністю та ізотропністю, а час – однорідністю. Ці фундаментальні характеристики лежать в основі як класичної механіки, так і спеціальної теорії відносності. Більш поглиблене уявлення про час і простір учні отримують при вивченні основ спеціальної теорії відносності.

Теорія Ейнштейна розкрила єдність простору, часу матерії та руху, виразивши її певними математичними законами, використовуючи перетворення Лоренца, які були запропоновані ще до створення спеціальної теорії відносності.

Фізичний зміст перетворень Лоренца полягає в тому, що відносно системи K рухається система K' із релятивістською швидкістю V , в якій відбувається подія із координатами (x', y', z', t') в системі K' та координатами (x, y, z, t) у системі K .

Взаємний зв'язок координати виражається співвідношеннями системи K' (3.1) та системи K (3.2):

$$\begin{cases} x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \\ y' = y; \\ z' = z; \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} x = \frac{x' - Vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \\ y = y'; \\ z = z'; \\ t = \frac{t' - \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases} \quad (3.2)$$

Учням буде корисно знати мнемонічне правило, яке дозволяє перейти від не штригованих до штригованих (або навпаки) координат шляхом заміни V на $(-V)$, а (x', y', z', t') на (x, y, z, t) .

З (3.1) та (3.2) можна записати формули для відносності просторових і часових проміжків (рис. 3.1.) [1,16]:

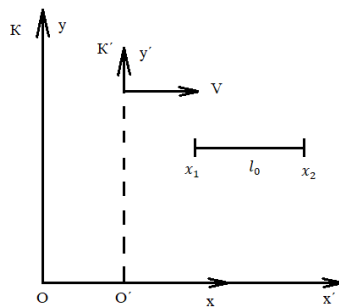


Рисунок 3.1 – Для пояснення співвідношення (3.3)

$$\begin{cases} t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Співвідношеннями (3.3) описують лише уявні ефекти скорочення просторових відрізків та уповільнення часу [16] до тих пір доки ми будемо знаходитися в межах інерціальних систем. При переході до динамічної системи K' мова іде про реальне уповільнення часу.

Дуже переконливими є експериментальні дані стосовно релятивістських μ – мезонів (маса μ^- або $\mu^+ \approx 207 m_e$) [17]. Якщо мезони утримуються в умовах земного експерименту, то $t_0 \approx 2.2 * 10^{-6} \text{с}$, $l_0 = t_0 * c \approx 660 \text{ м}$. У той час мезони, які народжуються у космічному випромінюванні, проходять шлях $l = 16000 \text{ м}$, що відповідає $t_\mu = 0.7 * 10^{-4} \text{с}$ (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Ілюстрація уповільнення часу життя μ - мезона

Не дивлячись на переконливість експериментальних результатів має місце деяка «незручність»: співвідношення (3.3) отримані у випадку не динамічних, а інерційних систем: K і K' .

З нашої точки обов'язково необхідно проілюструвати учням універсальність перетворень Лоренца, якщо їх представити у вигляді теореми додавання швидкостей (3.4):

$$\begin{cases} u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x} \\ u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x} \\ u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x} \end{cases} \quad (3.4)$$

Дуже легко переконатись у справедливості першого постулату Ейнштейна, якщо розрахувати швидкість фотона в K' , при умові, що він рухається в K з швидкістю світла або навпаки. В обох випадках ми отримаємо, що швидкість u_x та u'_x дорівнює швидкості світла.

3.2. Елементи динаміки СТВ

Для більш зручного аналізу понять імпульсу та маси в спеціальній теорії відносності їх краще розпочати з нагадування учням 2-го закону Ньютона. На жаль, у програмі матеріал з взаємозв'язку маси та енергії та їх залежності одна від одної подається без виведення [16], але враховуючи відведення на дану тему час – допустимо, але не оптимально. При вивченні основних законів та величин релятивістської механіки важливо звернути увагу на те, що вони не подібні до класичних, а також на те, що у класичній механіці імпульс, момент імпульсу та енергію можна вивести як наслідок з перетворень основного рівняння динаміки.

Значення параметра маси вважається абсолютним, таким, що є незмінним у будь-якій системі відліку. Відповідно до спеціальної теорії відносності маса тіла – величина відносна, вони залежать від швидкості руху, та у різних

інерціальних системах відліку (ІСВ) має різне значення. Кінетична енергія – скалярна величина, вона характеризує рix лише кількісно, а імпульс – векторна величина вказує ще й на напрямок руху. Другий закон Ньютона можна записати у вигляді, який поєднує силу та швидкість зміни імпульсу, що впливає на тіло (3.5):

$$\frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \vec{F} \quad (3.5)$$

Помноживши рівняння (3.5) скалярно на вектор швидкості частинки \vec{v} отримаємо співвідношення для тіла з незмінною масою (3.6):

$$m\vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}\vec{v} \quad (3.6)$$

Явище тиску світла, яке передбачив Максвелл, та обґрунтував, показує що світло (електромагнітні хвилі) як і будь-яка рухома матерія теж володіє імпульсом і, відповідно, «масою».

Найсучаснішим методичним підходом для знаходження функціональної залежності є метод Лагранжа. Для використання цього методу необхідно скласти функцію Лагранжа, яка була б інваріантною до перетворень Лоренца. Для вирішення цієї проблеми пропонуємо використовувати інший прийом заснований на законі збереження імпульсу і правилі додавання швидкостей в релятивістській теорії яка висвітлюються в шкільному курсі фізики [17].

Нехай відбувається пружній удар двох однакових куль А і В, у системі К, а швидкості куль однакові за величиною та протилежні за напрямком. Позначивши проекції швидкості кулі а на вісі 0x та 0y через a і b, відповідні проекції швидкості кулі В будуть дорівнювати - a і - b відповідно. Уявимо, що проекції швидкостей обох куль після співудару «x-і» проекції залишаються незмінними, а у «y-і» проекції змінюють знак, як не зображено на (рис. 3.3).

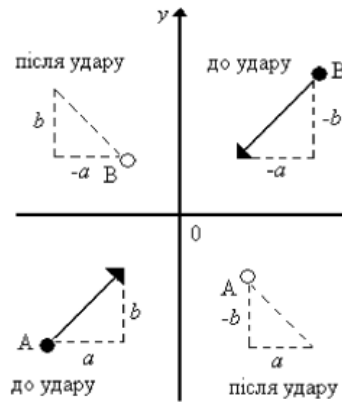


Рисунок 3.3 – Проекції швидкостей кульок на осі «x» та «y»[17]

Тоді для проекцій швидкостей кульок А і В, у нерухомій системі відліку К до і після удару матимемо наступні результати (табл. 3.1):

Таблиця 3.1. - Проекції швидкостей кульок А та В на осі «x» та «y»

Куля	до удару		Після удару	
	v_x	v_y	v_x	v_y
А	a	b	a	-b
В	-a	-b	-a	b

У даній системі відліку проекції на осі $0x$ та $0y$ дорівнюють (3.7):

$$m(\sqrt{a^2+b^2})a + m(\sqrt{a^2+b^2})(-a) = 0; \quad m(\sqrt{a^2+b^2})a + m(\sqrt{a^2+b^2})(-a) = 0 \quad (3.7)$$

Використовуючи релятивістський закон додавання швидкостей можемо перейти до системи координат K' (3.8):

$$v'_x = \frac{v_x - a}{1 - \frac{v_x a}{c^2}}; \quad v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}}}{1 - \frac{v_x a}{c^2}} \quad (3.8)$$

Проекції швидкостей для рухомої системи K' отримаємо підставивши значення (v_x, v_y) у (3.8). Маємо: куля А у системі K' до та після удару рухається

вздовж осі $0y'$, а схема удару буде наступною (рис. 3.4). Для кулі А абсолютна

величина швидкості становить: $v'_A = \frac{b}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}}}$, а для кулі В: $v'_B = \frac{\sqrt{4a^2 + b^2(1 - \frac{a^2}{c^2})}}{1 + \frac{a^2}{c^2}}$.

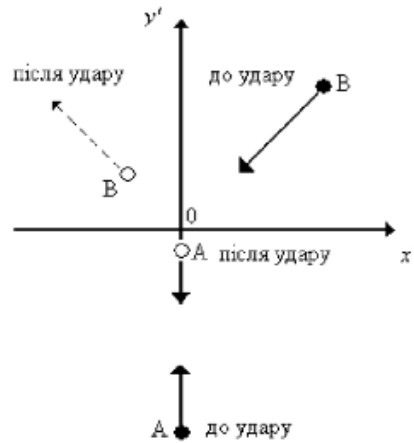


Рисунок 3.4 – Схема удару кулі А у системі K' вздовж осі $0y'$

Нехай $b = 0$, тоді пам'ятаючи що $v'_A = \frac{b}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{c^2}}}$, а $v'_B = \frac{\sqrt{4a^2 + b^2(1 - \frac{a^2}{c^2})}}{1 + \frac{a^2}{c^2}}$ отримаємо

наступний вираз (3.9):

$$m_0 \frac{1 + \frac{a^2}{c^2}}{1 - \frac{a^2}{c^2}} = m \left(\frac{2a}{1 + \frac{a^2}{c^2}} \right) \quad (3.9)$$

де $m_0 = m(0)$ – маса спокою.

Додавши та віднявши обидві частини цього рівняння від одиниці маємо:

$$\frac{(1 + \frac{a}{c})^2}{1 + \frac{a^2}{c^2}} = 1 + \frac{v}{c}; \quad \frac{(1 - \frac{a}{c})^2}{1 - \frac{a^2}{c^2}} = 1 - \frac{v}{c}. \quad \text{Перемноживши ліві та праві частини рівностей}$$

маємо: $\frac{1 - (\frac{a}{c})^2}{1 + \frac{a^2}{c^2}} = \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}$. Врахувавши даний вираз у рівнянні (3.9) отримаємо

(3.10) [17]:

$$m(v) = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.10)$$

З (3.10) видно, що при наближенні швидкості руху до швидкості світла, вона зростає до безкінечності. Використовуючи (3.10) запишемо вираз для релятивістського імпульсу (3.11):

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.11)$$

Залежність між імпульсом тіла та швидкістю в релятивістській механіці описується формулою (3.11) [17].

Для того аби сильніше зацікавити учнів даною темою пропонується пояснити найвідомішу формулу з СТВ, а саме – $E = mc^2$.

По-перше, E означає енергію, а m – масу, міру кількості матерії. Енергія та матерія взаємозамінні. Крім того, важливо пам'ятати, що у Всесвіті існує певна кількість енергії/матерії. Загальний підсумок залишається постійним, але енергія регулярно змінює форму на матерію, а матерія - на енергію [18].

Тепер ми підходимо до частини рівняння c^2 . c означає швидкість світла, універсальну константу, тому все рівняння зводиться до наступного: енергія дорівнює матерії, помноженої на швидкість світла у квадраті.

Навіщо треба множити матерію на швидкість світла, щоби виробляти енергію? Причина в тому, що енергія, світлові хвилі або випромінювання, поширюється зі швидкістю світла, яка становить 300000 км/с. Коли ми розщеплюємо атом усередині атомної електростанції або атомної бомби, отримана енергія вивільняється зі швидкістю світла.

Швидкість світла у квадраті, бо кінетична енергія або енергія руху є пропорційною масі. Коли ви прискорюєте об'єкт, кінетична енергія збільшується пропорційно до квадрата швидкості. Квадрат швидкості світла - це колосальне число, що ілюструє, скільки енергії міститься навіть у невеликій

кількості матерії. Наочним прикладом цього є те, що 1 грам води — якщо всю його масу перетворити на чисту енергію через $E = mc^2$ — містить стільки ж енергії, скільки 20 000 тонн тротилу, що вибухає. Ось чому така невелика кількість урану або плутонію може зробити такий потужний атомний вибух.

Рівняння Ейнштейна відчинило двері для численних технологічних досягнень, від ядерної енергетики та ядерної медицини до пояснення внутрішніх особливостей роботи Сонця. Це показує нам, що матерія та енергія є єдиними.

Висновок до Розділу 3: у даному розділі було розглянуто основні методи викладання основ спеціальної теорії відносності, показано простий приклад, який доводить відносність часових та просторових відрізків на прикладі часу життя μ – мезонів. Як побачили на практиці викласти дану тему можна послідовно і логічно, в рамках відведеного у шкільному курсі фізики часу. Для цього необхідно показати її емпіричний базис, логіку структури та евристичні (див., наприклад, [18]) можливості на прикладі отримання найбільш вагомих наслідків, як показано вище. А для більшої зацікавленості учнів у даній темі запропоновано привести наочний приклад скільки енергії міститься у 1г води, якщо перетворити її на чисту енергію згідно із знаменитою формулою $E = mc^2$.

ВИСНОВКИ

Аналіз експериментальних основ спеціальної теорії відносності, її постулатів, логіки побудови теорії та урахування часу відведеного у шкільному курсі для вивчення СТВ дозволяє запропонувати наступну послідовність методичних прийомів для викладання елементів СТВ у старшій школі:

1. Необхідним елементом методики викладання є розширене вивчення історії та експериментальних і теоретичних основ СТВ: уявлення про ефір як середовище передачі взаємодії; відмова від поняття ефіру; вимірювання швидкості світла; перетворення Лоренца і релятивістська теорема додавання швидкостей;

2. Першим етапом вивчення основ СТВ можна вважати формування уявлення про простір і час. Особливо підкреслюється, що рух матерії відбувається у просторі і часі (це особливо буде підкреслено при формуванні уявлення про 4-простір Мінковського). Відмічається, що простір і час за своєю природою однорідні, крім того, простір також має властивість ізотропності;

3. При аналізі одного із основних висновків стосовно відносності поняття просторового відрізка слід опиратися на експериментальні дані стосовно часу життя τ_0 і τ у нерухомій системі координат K і рухомій K' – мезонів та відрізків l_0 і l при народженні мезонів у космічних променях;

4. Дуже велике враження на учнів справляє логічність релятивістської теореми додавання швидкостей, із якої витікає постулат Ейнштейна про сталість швидкості світла і її незалежність ні від напрямку руху, ні від швидкості руху інерціальної системи K' ;

5. Із використанням релятивістської теореми додавання швидкостей та закону збереження імпульсу двох взаємодіючих тіл можна провести виведення релятивістської залежності маси рухомого тіла від швидкості.

У рамках відведеного у шкільному курсі фізики на вивчення елементів теорії відносності часу, цей матеріал можна викладати не фрагментарно, а послідовно й логічно, як і будь-яку іншу фізичну теорію. Для більш плавного

введення учнів в дану тему необхідно показати емпіричний базис теорії, її основні постулати, логіку побудови та евристичні можливості на прикладі отримання основних наслідків. Розширення та більш повне розкриття положень теорії відносності є необхідним елементом для реалізації принципу науковості під час вивчення фізичних теорій у шкільному курсі фізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Спеціальна теорія відносності / І. О. Мороз, В. С. Іваній, Р. І. Холодов – Суми: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів: МакДен, 2011. 334 с.
2. Смелянська Олександра Володимирівна «Вимірювання швидкості світла» – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/vimiryuvannya-shvidkosti-svitla-39276.html>
3. Kenneth William Davies «Measuring the One-Way Speed of Light» // Applied Physics Research; Vol. 10, No. 6; 2018 ISSN 1916-9639 E-ISSN 1916-9647
4. Andrzej Dragan, Artur Ekert Quantum principle of relativity // New Journal of Physics; 22. 2020. – P. 033038.
5. S. A. de Souza Farias, D. P. Meira Filho Didactical situations to treat Lorentz and Galileo transformations in theoretical physics // Mexican Magazine of Physics E. – 2022. – V. 19, №1.
6. Rhett Allain «How to measure the speed of light with lanterns, wheels, and planets» – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.wired.com/2016/01/how-to-measure-the-speed-of-light-with-lanterns-wheels-and-planets/>
7. Основи спеціальної теорії відносності [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<http://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=272&chapterid=778#1.3.1>
8. Угаров В. А. Специальная теория относительности: Москва: Наука, 1969р. – 304 с.
9. А. А. Денисов Мифы теории относительности: Вильнюс: ЛитНИИНТИ, 1989. – 51 с.
10. Olivier Darrigol Can we trust Einstein’s accounts of the genesis of special relativity? // Studies in History and Philosophy of Science Part A – Volume 89, 2021, p. 138-154.
11. James M. Hill, Barry J. Cox, Einstein’s special relativity beyond the speed of light // Proceedings The Royal Society. – 2012. – V.468. – P.4174–4192

12. Принцип науковості при висвітленні спеціальної теорії відносності в шкільних підручниках з фізики: критично-конструктивний аналіз: зб. наук. праць / Наукові записки. – Вип. 141. – 2018.

13. Michel Janssen Drawing the line between kinematics and dynamics in special relativity // Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics; Volume 40, Issue 1, January 2009, Pages 26-52

14. Jaroslav Hynecsek, Gravitational Mass Dependence on Velocity and the Conservation of Energy in General Relativity // Applied Physics Research; Vol. 10, No. 2; 2018 ISSN 1916-9639, E-ISSN 1916-9647

15. Otto C. W. Kong, Jason Payne Special Relativity and Its Newtonian Limit from a Group Theoretical Perspective // Department of Physics and Center for High Energy and High Field Physics, Symmetry 2021. – V.13(10). – P.1 – 20.

16. Бугаєнко Г. О. Електродинаміка Теорія відносності: посібник / Г. О. Бугаєнко, М. Є. Фонкич. – Київ: Радянська школа, 1965. – 419 с.

17. Подопригора Н. В. Залежність маси від швидкості у спеціальній теорії відносності шкільного курсу фізики // Наукові записки: педагогічні науки. – № 82(1). – 2019. – С. 85 – 91.

18. Xabier Prado, José Manuel Domínguez Castiñeiras A didactic proposal for the visual teaching of the theory of relativity in high school first course // Conference: ESERA 2009, Istanbul. – 2009. - P.297 – 305.