МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНУВЕРСИТЕТ

А.О. Соломенко, О.А. Коновал,
М.А. Слюсаренко, Т.І. Туркот

КРИТИЧНО-КОНСТРУКТИВНИЙ ПІДХІД ДО ВИВЧЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ В ПРОФІЛЬНИХ КЛАСАХ ЗАКЛАДІВ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

Навчально-методичний посібник
для студентів фізичних спеціальностей університетів

Кривий Ріг – 2018

УДК 373.55.016:530.12(075.8)

Соломенко А.О., Коновал О.А., Слюсаренко М.А., Туркот Т.І. Критично-конструктивний підхід до вивчення спеціальної теорії відносності в профільних класах закладів загальної середньої освіти: навч.-метод. посіб. / за ред. О.А. Коновала. Кривий Ріг. КДПУ, 2018. 171 с.

У посібнику обґрунтовано теоретичну модель і схарактеризовано методику розвитку критичного мислення здобувачів освіти в процесі вивчення спеціальної теорії відносності у вищій та середній школах. На конкретних прикладах розглянуто дидактичні можливості використання цієї методики під час вивчення основ релятивістської механіки на засадах вимог програм з фізики для профільних класів закладів загальної середньої освіти. Запропоновано моделі розв’язання задач, завдання для контролю та самоконтролю знань, що орієнтовані на розвиток критичного мислення суб’єктів навчальної діяльності.

Посібник призначений для студентів фізичних спеціальностей університетів, викладачів закладів вищої педагогічної освіти, слухачів інститутів післядипломної педагогічної освіти, вчителів-практиків, аспірантів і докторантів, які досліджують проблеми розвитку критичного мислення особистості в теоретичному та праксеологічному аспектах.

Соломенко А.О. – вчитель фізики Криворізької загальноосвітньої школи І-ІІІ ступенів № 89.

Коновал О. А. – доктор педагогічних наук, канд. фіз.-мат. наук, професор кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету.

Слюсаренко М.А. – канд. пед. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету.

Туркот Т.І. – канд. пед. наук, доцент КВНЗ «Херсонська академія неперервної освіти».

Рецензенти:

Здещиц В.М. – доктор технічних наук, професор кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету.

Шарко В.Д. – доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її навчання Херсонського державного університету.

Юзбашева Г.С. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри теорії і методики викладання навчальних дисциплін КВНЗ «Херсонська академія неперервної освіти»

Затверджено на засіданні кафедри фізики та методики її навчання КДПУ

(*Протокол № 4 від 15.11.2018р.*)

Затверджено радою фізико-математичного факультету КДПУ

(*Протокол № 4від 22.11.2018р.*)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗВО – заклад вищої освіти.

ЗЗСО – заклад загальної середньої освіти.

ВСВ – власна система відліку.

ЗТВ – загальна теорія відносності.

ЗЧ – заряджена частинка.

ІСВ – інерціальна система відліку

КМ – критичне мислення.

ЛСВ – лабораторна система відліку.

МРКМ – методика розвитку критичного мислення.

ПВ – принцип відносності.

ПЛ – перетворення Лорентца.

ПСШС – постулат сталості швидкості світла.

РЗЧ – рухома заряджена частинка.

РФДШ – релятивістські формули додавання швидкостей.

СВ – система відліку.

СК – система координат.

СТВ – спеціальна теорія відносності.

ТФ – теоретична фізика.

ВСТУП

«Недостатньо мати ясний розум,
головне – правильно його використовувати»
Р. Декарт

Сучасний стан розвитку цивілізації характеризується прискореним розвитком технологій, зростанням транскордонної міграції трудових ресурсів, різновекторними демографічними тенденціями, докорінними змінами в структурі ринку праці. Зменшується потреба у робочій силі для виконання тих рутинних операцій, які успішно можуть виконуватися робототехнікою. Ці чинники є тільки деякими з багатьох, які кардинально змінюють пріоритети у вимогах до фахової компетентності особистості. Багато традиційних професій можуть зникнути вже упродовж однієї зміни поколінь, натомість з'являтимуться інші, з невідомими на сьогодні характеристиками. Тому у змісті сучасної шкільної і вищої освіти все більша увага надається розвитку критичного, гнучкого мислення, і наголошується на необхідності вміти неперервно вчитися впродовж життя. Зокрема, у Державному стандарті початкової освіти, як первинної ланки розбудови нової української школи, зазначено (п.14): метою природничої освітньої галузі є формування компетентностей в галузі природничих наук, техніки і технологій, екологічної та інших ключових компетентностей шляхом опанування знань, умінь і способів діяльності, розвитку здібностей, які забезпечують успішну взаємодію з природою, формування основи наукового світогляду і критичного мислення, становлення відповідальної, безпечної і природоохоронної поведінки здобувачів освіти у навколишньому світі на основі усвідомлення принципів сталого розвитку [52]. Таким чином, здобувач освіти має вміти оцінювати факти, поєднувати новий досвід з набутим раніше і творчо його використовувати для розв'язання проблем природничого характеру.

Відтак, на шляху інтеграції України в європейський та світовий освітній простір спостерігається зростання суспільних вимог до підготовки майбутніх спеціалістів загалом, до змісту і процесу професійної підготовки студентів – майбутніх учителів зокрема. Зважаючи на педагогічну аксіому, згідно з якою тільки особистість може виховати особистість, можна стверджувати, що тільки креативний вчитель може виховати креативного, здібного до критичного осмислення та творчого підходу до процесів життєдіяльності, випускника загальноосвітньої школи. Логічно, що одним із найбільш важливих стратегічних завдань сучасної вищої педагогічної освіти постає розвиток у майбутніх учителів критичного мислення (КМ). Окрім науково-методичних і психолого-педагогічних чинників, проблема більш детального дослідження теоретичних та праксеологічних засад розвитку КМ майбутніх учителів фізики обумовлюється ще й соціальними чинниками, зокрема:

- інтелектуалізацією праці і підвищенням рівня вимог сучасного ринку праці до вміння особистості критично оцінювати і конструктивно вирішувати науково-технічні та соціально-економічні завдання, притаманні суспільству, яке перебуває у стані бурхливих трансформацій;
- потребою кардинальної перебудови освітнього процесу в загальноосвітній та вищій школах з орієнтацією на самопізнання і саморозвиток особистості, здібної до критично-конструктивного осмислення інновацій та їх творчої реалізації в професійній діяльності;
- необхідністю оптимального використання змісту навчальних дисциплін для розвитку особистісних рис майбутніх фахівців, зокрема таких як самостійність, системність, логічність і широта світосприйняття, здібність до самоаналізу і рефлексії, що є ознаками і водночас елементами критичного мислення.

Наразі все відчутнішою стає необхідність подолання таких негативних наслідків сучасної освіти як фрагментарність поверховість, безсистемність тощо. Ці явища мають стимулювати педагогічну спільноту до переосмислення змісту освіти і методів навчання на користь зростання обґрунтованості, цілісності та міцності знань, які є можливими лише на основі переходу від засвоєння фактів суб'єктами навчальної діяльності до формування в них універсальних компетентностей у вигляді інтегрованих ідей, підходів, методів, принципів, розуміння і ставлення. Логічно, що реалії сьогодення вимагають від кожної особистості вмінь аналізувати, критично-конструктивно оцінювати соціальну ситуацію, власні досягнення, поведінку та життєві перспективи, бути толерантними до інших точок зору, розглядати припущення як гіпотези, що потребують верифікації, відмовлятися від тих, які цієї перевірки не витримують, уникати однобічності суджень, формувати настанову на критично-конструктивне ставлення до себе й навколишнього світу. Відтак, у суспільстві зростає культ культури критичного мислення. Між тим слід зважити на думку відомого фахівця в галузі розробки стратегій розвитку критичного мислення, доктора філософських наук, професора О. В. Тягло, який, аналізуючи Проект «Нова українська школа», звертає увагу, що: «За експертними оцінками більш успішними на ринку праці в найближчій перспективі будуть фахівці, які вміють навчатися впродовж життя, критично мислити, ставити цілі та досягати їх, працювати в команді, спілкуватися в багато культурному середовищі, володіти іншими сучасними вміннями. Але українська школа не готує до цього [61].

На наш погляд причинами цього явища можуть бути:

- недостатня підготовка вчителів до впровадженя в навчальний процес стратегій та технологій критичного мислення;
- недостатнє використання розвивального потенціалу фахових навчальних дисциплін, які вивчаються студентами вищої педагогічної школи.

Ми, зокрема, маємо на увазі розвивальний потенціал теоретичної фізики, і конкретно такого її розділу як «Спеціальна теорія відносності», зміст та методика навчання якої містить низку суперечностей [23; 24], навчання студентів критично конструктивному підходу до вирішення чи спростування яких :

а) сприятиме більш глибокому осмисленню ними сутності СТВ;

б) засвоєнню особливостей викладання СТВ в профільних класах ЗЗСО;

в) оволодінню стратегією і методами розвитку критично-конструктивного мислення з метою творчого використання в сучасній освітній практиці.

З огляду на вище викладене *мету* навчально-методичного посібника окреслюємо як висвітлення теоретико-методичних аспектів навчання СТВ на засадах критично-конструктивного підходу, що стане у нагоді студентам-фізикам та вчителям-практикам у процесі організації гурткової, факультативної, самостійної роботи учнів, зацікавлених у поглибленому вивченні цього розділу фізики.

Між тим слід урахувати, що під час вивчення спеціальної теорії відносності зазвичай висвітлюються кінематичні наслідки СТВ. Тому для учнів, зацікавлених у поглибленому вивченні відповідного розділу фізики, та з метою надання вчителю перспективи вибору оптимальних як способів обґрунтування перетворень Лорентца, так і методичних підходів загалом до навчання СТВ, в навчально-методичному посібнику запропоновано варіанти способів обґрунтування кінематичних наслідків СТВ. Окрім того з метою підготовки студентів до критичного осмислення наукової, навчально-методичної літератури здійснено аналіз окремих некоректних формулювань, суперечностей, що мають місце в науково-методичній літературі [23; 24; 63; 64; 65] та надано пропозиції щодо їх усунення.

Автори начально-методичного посібника мають сподівання, що читачі отримають суттєву методичну допомогу у процесі ознайомлення з запропонованими в третьому розділі моделями розв’язання задач на засадах використання методу розвитку критичного мислення. Корисною в сенсі формування критично-конструктивного мислення студентів та вчителів буде самостійна робота по виконанню завдань з метою самоконтролю та самоперевірки отриманих знань.

Завершуючи звернення до наших молодих колег – студентів і досвічених – учителів-практиків, згадаємо афоризм геніального А. Ейнштейна: «Нічому не можна навчити, можна тільки навчитись», та побажаємо успіхів у самостійному опрацювані матеріалів нашого навчально-методичного посібника, підготовленому для Вас науковцями-методистами та вчителями-практиками.

РОЗДІЛ 1. ДИДАКТИЧНА СУТНІСТЬ КРИТИЧНО-КОНСТРУКТИВНОГО ПІДХОДУ ДО ВИВЧЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

«Я поважаю віру, але саме сумніви
–це те, завдяки чому ти вчишся»
Х Мізнер

Загальновідомо, що інтелектуальний розвиток особистості визначається не обсягом отриманих знань, а готовністю до відбору необхідної інформації шляхом критичного аналізу, її осмислення та використання для прийняття конструктивних рішень. Такий підхід до оволодіння системою актуальних для людини знань вважається критично-конструктивним. Використання такого підходу в освітньому процесі орієнтоване насамперед на формування в суб’єктів навчальної діяльності критичного мислення, що визначається одним із пріоритетних завдань кожної з ланок сучасної системи освіти. Проте, якщо в психології є досить розлогі дослідження природи критичного мислення, такі розвідки в педагогіці – несистемні та фрагментарні, то в методиках викладання навчальних дисциплін практично відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо їх застосування в освітньому процесі. Саме цей чинник визначає актуальність нашого науково-методичного пошуку з урахуванням специфіки викладання СТВ в профільних класах старшої школи.

Теперішнього часу в різних джерелах можна знайти різні тлумачення поняття «критичне мислення». Мабуть першим, хто акцентував увагу на критичному підході до розгляду будь-якої інформації був Сократ, чиїм іменем названі діалогові розвивальні бесіди вчителя з учнями. До нас дійшли праці Платона та інших філософів, які дали загальний абрис поведінки та дидактичних методів Сократа. Сократ перед нами постає як особистість, що намагається допомогти вихованцям знайти істину, крокуючи вельми тернистими шляхами, розглядаючи аргументи та спираючись на них. Більш того, Сократ своїм прикладом демонструє, як слід взагалі міркувати, чому слід виявляти хиби в міркуваннях як своїх, так і співрозмовника. В певному розумінні такий підхід містить елементи методики розвитку критичного мислення суб'єктів навчальної діяльності.

Ученим, який плідно розміркував над мисленням взагалі і над окремими його елементами, постає Аристотель. У головній своїй праці «Метафізика» Аристотель розгортає ґрунтовне вчення про мислення, виділяючи так звані «види душі». Розглядаючи процес пізнання, як третій вид душі, або такий, який найбільш притаманний Богові або людині, науковець аналізує відмінність мислення людини від інших істот, звертає увагу на важливість аналітики, раціональності в процесі пізнання, характеризує так званий активний розум, зупиняється на важливості самокорекції думки. Взагалі, праці Аристотеля можна віднести до класики як філософської так і психологічної думки. Надалі ж від так званого періоду Античної філософської думки і до Нового часу в полі нашого зору не виявилося досліджень, які б мали безпосереднє відношення до проблеми розвитку критичного мислення.

Між тим, на думку багатьох дослідників (Д. Дьюї [16], С. Векслер [9], Дж. Гілфорд [53], С. Гончаренко [11], З. Калмикова [54], О. Коновал [23], С. Терно [38; 39; 40], О. Тягло [55], Д. Халперн [45] та інші) ця проблема, сягаючи ще часів Сократа, була і залишається актуальною, набуваючи особливої гостроти у період об'ємних соціально-економічних реформацій, притаманних початку третього тисячоліття.

Історико-генезисний аналіз свідчить, що вивчення питань формування і розвитку КМ особистості протягом тривалого часу знаходиться в центрі об'ємних психолого-педагогічних і деяких науково-методичних досліджень (М. Варлакова, О. Почтовюк та інші), які розгорталися за трьома «хвилями» (Р. Поль).

Перша «хвиля» (1970-1982) охоплювала наукові пошуки Д. Брауса, Д. Вуда, Д. Джонсона, Е. Глассера, К. Поппера, Д. Халперн, які у найбільш загальному вигляді дійшли висновків, що критичне мислення – це цілеспрямоване мислення, яке відрізняється виваженістю, логічністю, системністю, наявністю когнітивних навичок і стратегій, які збільшують імовірність отримання конкретного бажаного результату. В дослідженнях другої «хвилі», одним із найбільш яскравих представників якої на нашу думку є Девід Клустер, запропонована розлога характеристика критичного мислення за шістьома ознаками [21].

Третя «хвиля» наукових пошуків у ракурсі визначення сутності КМ має орієнтацію на з'ясування особистісних якостей людини, здібності мислити критично (О. Бочаєва, М. Варлакова, Л. Карпова, С. Почтовюк, С. Терно, О. Тягло та інші). Під таким кутом зору звертає на себе увагу слушна думка О. Лунгол, яка досліджуючи методичні аспекти навчання електродинаміки учнів вищих професійно-технічних закладів, підкреслила, що наразі, за прискореного зростання інформаційного потоку, різноманіття ідей, теорій, поглядів, на перше місце виходить здатність і готовність фахівців аналізувати інформацію, перевіряти і переосмислювати її, самостійно встановлювати істину, приймати рішення і аргументовано захищати свою позицію. «Вкрай необхідним постає уміння мислити гнучко, динамічно, адаптувати своє мислення до вимог сьогодення, бути толерантним і сприйнятливим» [25, с.5], «підготовленим мислити критичного» [25, с.6].

Наші наукові пошуки дозволили нам дещо детальніше проаналізувати погляди науковців на сутність критичного мислення, здійснити контент-аналіз цього поняття, що систематизовано таблицею 1.

Таблиця 1.

Контент-аналіз поняття «критичне мислення»

К. Поппер [32]	Основу критичного мислення складає уміння спростовувати, змінювати та перевіряти.
Е. Глассер [49]	Критичне мислення передбачає обґрунтованість суджень та здатність оцінити

	рівень їх обґрунтованості, знайти межу їх застосовності.
Д. Джонсон [15]	Критичне мислення – особливий вид розумової діяльності, який уможливлює винесення здорового судження щодо пропонованої точки зору.
Дж. А. Брауз, Д. Вуд [5]	Критичне мислення – розумне рефлексивне мислення, спрямоване на вирішення того, у що слід вірити і як діяти.
Д. Халперн [45]	Критичне мислення – мислення, яке відрізняється виваженістю, логічністю та цілеспрямованістю, його відрізняє використання таких когнітивних навичок і стратегій, які збільшують імовірність отримання бажаного результату.
Р. Пауль (Paul, Поль) [50; 51]	Мистецтво мислити про своє мислення в процесі цього мислення, щоб поліпшити його: зробити більш ясним, правильнішим чи аргументованим (The art of thinking about your thinking while you are thinking in order to make your thinking better: more clear, more accurate, or more defensible)
Дж. Чеффі [47]	Критичне мислення – розмірковування про мислення з метою його поліпшення та надання більшої ясності і чіткості.
Д. Дьюї [16]	Критичне мислення – рефлексивне мислення.
Ч. Темпл, К. Мередікт, Д. Стіл, С. Уолтер [36; 37]	Мислити критично - це ні що інше як проявляти цікавість, використовувати дослідницькі методи: порушувати питання і

	здійснювати планомірний пошук відповідей.
В. А. Попков, А. В. Коржуєв, Е. Л. Рязанова [31]	Критичне мислення – специфічна форма оцінювальної діяльності суб'єкта пізнання, спрямована на виявлення ступеня відповідності (або невідповідності) того чи іншого продукту, прийнятого еталоном або стандартом, що сприяє смисловому самовизначенню суб'єкта пізнання по відношенню до найрізноманітніших проявів навколишнього світу і його продуктивного перетворення.
Е. А. Ходос, А. В. Бутенко [8]	Критичне мислення розглядається як комплекс метакогнітивних умінь.
С. І. Заір-Бек, І. В. Муштавинська [17; 18]	Критичне мислення є точкою опори для мислення людини, природний спосіб взаємодії з ідеями та інформацією.
Г. В. Соріна [35]	Критичне мислення передбачає наявність навичок рефлексії щодо власної розумової діяльності, вміння працювати з поняттями, судженнями, думками, питаннями, розвиток здібностей до аналітичної діяльності, а також до оцінки аналогічних можливостей інших людей.
С. Г. Гільміярова, К. В. Даутова, Ю. Ю. Шамігулова [10]	Критичне осмислення отриманої зовні інформації слугує своєрідним захистом від маніпулювання.
С. І. Векслер [9]	Критичність мислення спрямована на виявлення насамперед прихованих помилок у міркуваннях.

В. М. Синич-Кондратенко [33]	Критичне мислення – це мислення вищого порядку, яке опирається на інформацію, усвідомлене сприйняття своєї інтелектуальної діяльності та діяльності інших.
В. К. Буряк [7]	Критична коректність – це відсутність в інформації таких фрагментів, які б містили змістові та логічні недоречності як формально ствердного, так і критичного плану.
С. О. Терно [38; 39; 40]	Суттю критичного мислення є уміння розв’язувати нетривіальні проблеми, а формою існування цієї суті може бути будь-що: дискусія, написання есе, мозковий штурм тощо. Завдання критичного мислення – навчити учнів правильно аргументувати свої думки, виявляти хиби у своїй та чужій аргументації; визначити правомірність чи неправомірність оцінок, ідей, розв’язків.
Н. В. Нечепельська [29]	Критичне мислення – це процес, який найчастіше розпочинається з постановки проблеми, продовжується пошуком і осмисленням інформації, закінчується прийняттям рішення щодо розв’язання порушеної проблеми.
Л. Б. Карпова [20]	Критичне мислення – це використання когнітивних технік або стратегій, які збільшують імовірність отримання бажаного кінцевого результату. Це визначення характеризує мислення як щось, що відзначається контролем, обґрунтованістю й цілеспрямованістю.

Т. І. Туркот [42]	Критичне мислення – якість мислення, що передбачає вміння особистості об'єктивно оцінювати власні думки і явища оточуючого світу, піддавати їх сумніву і перевіряти.
Є. С. Рапацевич [30]	Критичне мислення – це здатність аналізувати інформацію з позиції логіки і знаходити протиріччя в ній, вміння виносити обґрунтовані судження, рішення і застосовувати отримані результати як до стандартних, так і нестандартних ситуацій, питань і проблем.
О. І. Пометун, І. М. Сущенко [28]	Критичне мислення – тип мислення, який характеризується самостійністю, організованістю, цілеспрямованістю, практичністю та рефлективністю і дає можливість людині здійснювати оцінку, обґрунтування і вибір власної позиції, думок, дій, вчинків, поведінки.
Н. Бородіна [4]	Критичне мислення містить такі компоненти, як вміння усвідомлювати проблему, бачити зв'язок між суперечностями; вміння добирати несуперечливі докази; вміння знаходити контраргументи; вміння обґрунтовувати; вміння оцінювати та узагальнювати; вміння спростовувати та робити висновки.
Л. І. Ткаченко [41]	Критичне мислення – це здатність ставити нові запитання, випрацьовувати різноманітні аргументи, приймати незалежні та продумані рішення.
Р. Енніс [48]	Критичне мислення – процес, мета якого –

	прийняття обґрунтоване рішення про те, що вважати правильним і що робити.

Відтак, узагальнюючи, підкреслимо, що у вузькому сенсі термін «критичне мислення» можна інтерпрепретувати як «коректну оцінку суджень». Варто взяти до уваги думку, що критичне мислення – «розумне рефлексивне мислення, спрямоване на ухвалення рішення, чому довіряти і що робити». Психолог Дайана Халперн розглядає критичне мислення як використання когнітивних технік або стратегій, які збільшують ймовірність одержання об’єктивного кінцевого результату.

Ми будемо дотримуватися визначення, що *критичне мислення* – це інтелектуально впорядкований процес активного й умілого аналізу, концептуалізації, застосування, синтезування й об’єктивної оцінки інформації, отриманої або породженої спостереженями, експериментом, досвідом, розмірковуванням або комунікацією як орієнтир для переконання й дії.

Контент-аналіз визначень «критичного мислення» (див. табл. 1), дозволяє окреслити перелік ключових навичок, необхідних для критичного осмислення фізичних явищ. Зокрема, це – спостережливість, аналіз, обґрунтування висновків, їх оцінка, метазнання. Якість критичного мислення оцінюється логічністю, ясністю, правдоподібністю, точністю, глибиною, творчою уявою, широким кругозором. Воно характеризується обгрутованістю, контрольованістю, цілеспрямованістю, що необхідно для оцінювання ймовірності висновків, результатів розв’язування задач, проведених дослідів і спостережень. Критичність мислення має виховуватися не тільки щодо оцінювання знань, але й стосовно способів їхнього здобування та засвоєння.

Мета навчання критичному мисленню здобувачів освіти – стимулювати висування особистісно нових ідей, що руйнують звичні стереотипиі загальноприйняті погляди, не нав’язуючи єдиного шляху вирішення проблеми, а вчити активного, альтернативного, більш раціонального вибору прийомів і способів вирішення проблеми.

Високо оцінюючи попередні наукові пошуки, які узагальнюють різні погляди на природу і шляхи розвитку КМ особистості, слід однак констатувати, що теперішнього часу немає достатньо повного теоретичного обґрунтування механізмів розвитку КМ студентів вищої педагогічної школи на засадах використання могутнього дидактичного потенціалу природничо-математичних наук, і зокрема теоретичної фізики (ТФ) з її дискусійними питаннями у змістовому і методичному аспектах (зокрема, в електродинаміці та спеціальній теорії відносності).

Так, дослідженнями професора О. Коновала констатовано, що розвиток цих якостей уможливлюється у процесі аналізу фізичних явищ і процесів, з'ясування суперечностей, які мають місце в електродинаміці, спеціальній теорії відносності і методиці їх навчання [23; 24; 63]. Зокрема, зазначено, що обговорення і спростування цих суперечностей дозволяє майбутнім учителям фізики обґрунтовувати і обстоювати власну наукову позицію, аргументувати свої погляди, аналізувати власні ідеї тощо. Проте, на цю слущну думку дидактичний потенціал теоретичної фізики в сучасній педагогічній практиці, не маючи достатнього наукового обґрунтування, реалізується далеко не в повній мірі.

З огляду на викладене вище обґрунтувано *теоретичні підходи* до моделювання науково-методичної системи розвитку критичного мислення майбутніх учителів у процесі вивчення теоретичної фізики (на прикладі вивчення СТВ), зокрема це: системний, особистісно-зорієнтований, діяльнісний, рефлексивний, акмеологічний.

Так, звертаючись до методу моделювання, який наразі широко використовуються в різних наукових галузях, зазначимо, що за тлумаченням філософського енциклопедичного словника: «Модель – предметна, знакова чи уявна система яка відображає чи імітує принципи внутрішньої організації, або функціонування, певні властивості риси і характеристики об'єкта дослідження (оригіналу), безпосереднє вивчення якого неможливе, ускладнене чи недоцільне, і може замінити цей об'єкт у пізнавальному процесі з метою отримання нових знань про нього» [43, с. 394]. Використання методу моделювання у нашому дослідженні дозволило визначити мету, зміст, методи, дидактичні умови розвитку КМ студентів під час вивчення СТВ, окреслити прогнозований результат упровадження науково-методичної системи, використовуючи концептуальні підходи та науково обґрунтовані принципи її функціонування. Відтак, пропонована в дослідженні модель науково-методичної системи – це логічно послідовна система взаємопов'язаних та взаємообумовлених складових (блоків: цільового, теоретико-методологічного, змістового, праксеологічного, оцінювально-результативного), які функціонують у просторі і часі (рис. 1).

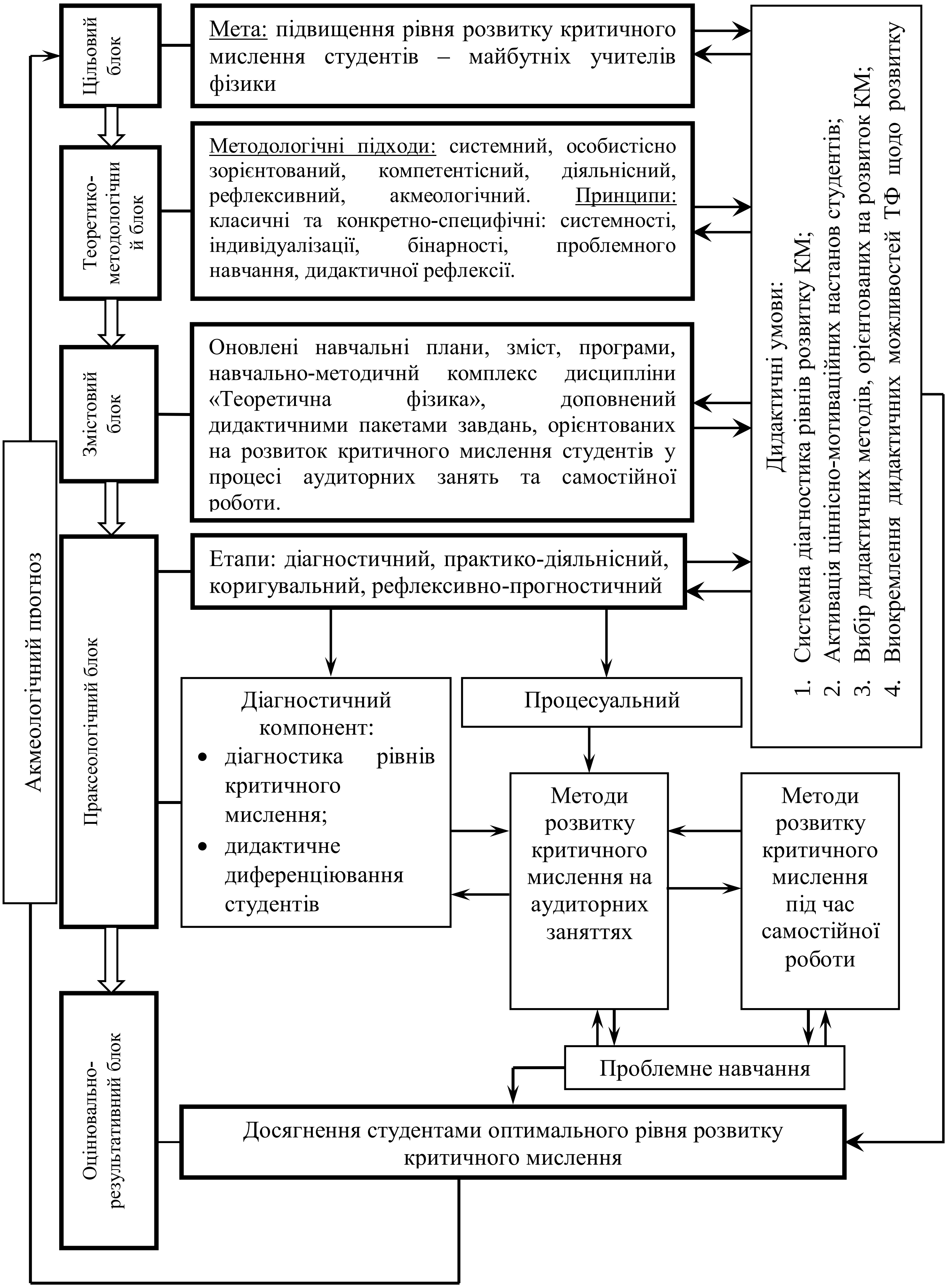


Рис. 1.1. Модель науково-методичної системи розвитку критичного мислення студентів у процесі вивчення теоретичної фізики (на прикладі СТВ)

Цільовий блок ураховує особливості сучасних суспільних вимог, державних стандартів до рівня фахової підготовки сучасного вчителя фізики, одним із показників якої є рівень розвитку його КМ.

Теоретико-методологічний блок характеризує систему теоретичних підходів і принципів розвитку КМ студентів з урахуванням специфіки теоретичної фізики як науки та навчальної дисципліни.

Змістовий блок окреслює специфіку фахової підготовки з теоретичної фізики, окреслює можливості навчальних програм і шляхи оновлення навчально-методичного комплексу дисципліни з урахуванням її потенціалу щодо розвитку КМ студентів.

Праксеологічний блок передбачає добір методів діагностики рівня розвитку КМ, дидактичного диференціювання студентів з урахуванням діагностичних даних, вибір на цих засадах методів розвитку КМ студентів на аудиторних заняттях і в процесі самостійної роботи.

Оцінювально-результативний блок орієнтує на визначення результативності функціонування науково-методичної системи щодо забезпечення оптимального рівня розвитку КМ студентів з урахуванням їх індивідуально-типологічних особливостей. На цьому етапі обов’язковим є навчання здобувачів освіти дидактичної рефлексії – навчання аналізу власних дій та отриманих результатів

Зупинимося щонайперше на характеристиці одного зі складників моделі – теоретико-методологічного блоку, висвітлення сутності якого є, на наш погляд, «ключем» до розуміння основних положень побудови методичної системи. Зазначимо, що теоретико-методологічний блок обґрунтовує необхідність моделювання цієї системи з урахуванням вихідних найголовніших теоретичних положень [34], які, за твердженням О. Матвієнко, характеризують методологію найбільш загальних підходів до процесу підготовки фахівця [27, с. 49]. За словником В. Даля термін «підхід» тлумачення як «іти під гору будь-чого»; «бути підґрунтям чого-небудь». У нашій роботі уважаємо необхідним здійснити моделювання експериментальної науково-методичної системи на засадах системного, особистісно зорієнтованого, діяльнісного, компетентнісного, рефлексивного, акмеологічного підходів. Методологічним стрижнем пропонованої «Моделі» (рис. 1) постає системний підхід – як «напрям методології науки, завданням якого є розробка методів дослідження, конструювання складних за організацією об'єктів як систем» [11, с. 305], та усвідомлена позиція науковців, орієнтована на розгляд досліджуваного об'єкта як системи, як сукупності елементів, об'єднаних взаємодією, що постає єдиним цілим відносно навколишнього середовища [1; 2; 34]. На думку С. У. Гончаренка у науково-педагогічних дослідженнях системний підхід забезпечує цілісність педагогічних об'єктів, виявлення в них різноманітних зав'язків та зведення їх в єдину теоретичну картину [11, с. 305]. Системному підходу належить, на наш погляд, пріоритетна роль у моделюванні експериментальної моделі методичної системи, оскільки необхідно окреслити у взаємозв'язках та взаємообумовленості мету, принципи, зміст, методи розвитку КМ студентів під час вивчення теоретичної фізики, спрогнозувати ефективність очікуваних результатів за певних дидактичних умов, адже саме ці елементи є множиною складників, які спільно виступають як цілісна система.

Звернення до компетентнісного підходу при побудові експериментальної науково-методичної системи аргументується тим, що, на нашу думку, компетентність є найважливішим показником педагогічного професіоналізму, складником якого, як вже зазначалося, є критичне мислення. У процесі фахової підготовки у вищій школі формування у здобувачів освіти нагальним завданням постає формування низки компетентностей і, зокрема, окрім загально-професійних компетентностей, – формування здатності аналізувати, синтезувати, порівнювати і зіставляти факти, систематизувати, генерувати ідеї, набувати нового досвіду [1; 12; 19; 22]. Тому у відповідності з тенденціями розвитку компетентнісно орієнтованої освіти у всіх ланках нової української школи пріоритетним є положення, що "компетентнісний підхід дозволяє досягти особистісних результатів через набуття досвіду самостійного розв'язування проблем" [6, с. 15], визначимо цей підхід одним із основних у процесі розвитку критичного мислення студентів саме під час вивчення ТФ з огляду на наявність суттєвих проблем і суперечностей у викладі навчального матеріалу цієї навчальної дисципліни у підручниках і навчальних посібниках [24].

Згоджуючись з науковими тезами А. Губи [13], розглядаємо компетентнісний підхід не тільки як засіб оновлення змісту професійної освіти, як механізми узгодження з сучасними вимогами, але як механізм підсилення діяльнісного характеру навчальної діяльності студентів у педагогічному виші. У роботі І. Бургун [6] обґрунтовується сутність компетентнісного підходу при вивченні фізики, що стимулювало нас до аналізу навчальної програми і змісту курсу «Теоретична фізика», яка вивчається студентами-фізиками педагогічних університетів. З метою розвитку їх КМ була виявлена можливість доповнення навчально-методичного комплексу цієї навчальної дисципліни дидактичними пакетами проблемних оригінальних задач та завдань, виконання яких не порушує межі навчального часу, відведеного на вивчення теоретичної фізики, а в той же час сприяє інтеграції знань майбутніх учителів фізики та методики її навчання.

Відомий фізик-методист, професор В. Д. Шарко шляхом саморозвитку вчителя в умовах неперервної освіти визначає рефлексивний підхід (reflecsio – від лат. *reflexio* – звернення назад) до організації навчання [46]. Нашій дослідницькій позиції щодо розвитку критичного мисленння здобувачів освіти близькі погляди В. Семиченко та В. Дикань, які також апелюють до необхідності неперервного, постійного, всебічного аналізу уявлень, наукових ідей, отриманої інформації, що уможливлює вибір найбільш оптимальних стратегій пізнання і поведінки, формування і подальшого розвитку критичного мислення, що «обслуговує» процес рефлексивного аналізу, підіймає його на більш високий рівень. З огляду на результати досліджень Г. Давидової та І. Семенова, які доводять, що «рефлексивна експлікація різноманітних труднощів у навчанні і праці слугує конструктивним фактором саморозвитку особистості в проблемній конфліктній ситуації, самодіагностиці і самовизначення на різних етапах професійної освіти» [14, с. 39], уважаємо, що виявлення і спростування студентами суперечностей, які мають місце в теоретичній фізиці, слугуватимуть розвитку КМ, методи якого можуть бути використані як під час вивчення інших навчальних дисциплін так і в майбутній професійній педагогічній діяльності.

У річищі визначення і реалізації акмеологічних (akme-вершина професійної майстерності) пріоритетів необхідною постає активна, різнобічна навчально-пізнавальна діяльність студентів як суб'єктів навчання, що є характерним для діяльнісного підходу [6]. За твердженням професора О. Малихіна, категорія діяльності є ключовою в розумінні людини, і соціальних характеристик. Активність діяльності знаходить вияв у тому, що діяльність у всіх випадках – це акт «ініційований суб'єктом, а не такий, що запускається зовнішнім впливом. Діяльнісний підхід-це не сукупність реакцій, а система усвідомлених дій, що поєднуються в єдине ціле мотивом, який її спонукає» [26, с. 108-111]. Тому організація розвитку КМ студентів під час вивчення СТВ має забезпечуватись варіативністю завдань для навчальної діяльності, їх індивідуальною спрямованістю. Відповідь на запитання «чого навчати» повинна визначатися з урахуванням індивідуальних здібностей і досягнутого досвіду окремого студента. Уважаємо, що вивчення СТВ, поєднане з розвитком КМ студентів у відповідності з логікою діяльнісного підходу (знати →вміти→ діяти), має навчати їх висувати і вирішувати ключові завдання:

- Для чого необхідно вивчати цей матеріал?
- Як матеріал, який я вивчаю, може сприяти розвитку критичного мислення?
- Які методи і засоби слід використати, щоб з'ясувати і визначити проблеми (чи суперечності), з якими я зіткнувся під час вивчення конкретної теми?
- Наскільки ефективно я вирішив ці завдання?

- Де в майбутній професійній діяльності можна використати апробовані при вивченні теми методи мислення і діяльності?

Загалом, *методика розвитку критичного мислення* орієнтована на вирішення комплексу завдань. Найбільш важливими з них вважаємо навчання здобувачів освіти :

– виділяти причинно-наслідкові зв’язки під час аналізу отриманої інформації;
– висувати нові ідеї на засадах аналізу наявних;
– розуміти як різні частини інформації або інформація, отримана з різних джерел, різних наукових галузей, пов’язані між собою;
– визначати та аналізувати помилки в міркуваннях;
– уникати категоричності в твердженнях;
– визначати помилкові стереотипи, що можуть привести до неправильних висновків;
– виявляти та спростовувати упереджені думки й судження;
– уміти відрізняти факти, які можуть бути перевірені, від суб’єктивних припущень та особистих думок;
– брати під сумнів логічну непослідовність усних або письмових тверджень, які зустрічаються в дискусіях, посібниках і підручниках, іншій літературі;
– «сортувати» інформацію, відокремлювати головне від несуттєвого і при узагальненні та побудові власних висновків брати до уваги перше;
– бути об’єктивним у своїх міркуваннях, дотримуватись норм наукової етики;
– запускати механізми самоосвіти.

Узагальнення теоретичних здобутків та набутого практичного досвіду дозволило нам визначити етапи методики розвитку критичного мислення здобувачів освіти, яка була апробована в нашій практиці під час вивчення спеціальної теорії відносності студентами – фізиками педагогічних університетів та поглиблення знань учителями – практиками у процесі самостійної роботи під час навчання на курсах підвищення кваліфікації в КВНЗ «Херсонська академія неперервної освіти» та в Криворізькому державному педагогічному університеті. Передбачається, що відповідно принципу бінарності оволодіння вчителями методикою розвитку критичного мислення (МРКМ) буде використовуватися ними у навчальному процесі ЗЗСО.

Отже, логіка МРКМ передбачає такі взаємопов'язані етапи:

1. Перший етап – «Виклик».

Функціями «Виклику» визначаємо:

а) Мотиваційну функцію, що передбаає: з'ясування важливості інформації, пропонованої до вивчення, спонукання здобувачів освіти до її опрацювання, пробудження й стимулювання їх інтересу до теми з використанням історичного матеріалу, з'ясуванння наявних суперечностей у змісті чи логіці викладу матеріалу, протиріч у висвітленні матеріалу в різних джерелах інформації і т.п.; постановку здобувачем освіти власних цілей вивчення теми.

б*) Інформаційну*, що означає актуалізацію отриманих раніше знань за цією темою (за необхідності їх повторення та активізацію). Підкреслимо, що інформація є відправним, але не кінцевим результатом критичного мислення. Щоб породити власне міркування, власні висновки потрібно проаналізувати «сировину» - факти, ідеї, теорії, експериментальні дані, раніше сформульовані концепції, обґрунтувати власні думки на засадах вивчення раніше накопиченого теоретичного та емпіричного матеріалу. Підкреслимо, що самостійно критично мислити особистість може у будь-якому віці [61].

в) *Комунікативну,* зорієнтовану на конструктивний обмін думками щодо особливостей вивчення теми.

Важливо, щоб кожен учень, студент чи вчитель – практик зміг взяти участь у роботі, метою якої є актуалізація знань та власного досвіду осмислення пропонованої для осмислення теми. На цьому етапі необхідно рекомендувати здобувачам освіти:

- розвивати у собі впевненість і розуміння цінності власних думок та ідей;
- брати активну участь у обговоренні проблем навчального матеріалу;
- з повагою та толерантно вислуховувати думки опонентів, бути готовим до висловлювання власних суджень та критичного аналізу їх недоліків.

У тому випадку, якщо здобувачі освіти не мають знань чи достатнього досвіду у конкретній галузі фізичної освіти, бажано звернутися до них з пропозицією висловити свої припущення про можливий предмет чи обєкт вивчення. При цьому вчитель (викладач) з повагою вислуховувати ці припущення, акцентуючи увагу на впевненості та розумінні цінності висловлюваних думок та ідей.

2. Другий етап МКРМ (осмислення) – передбачає одержання інформації, осмислення змісту навчального матеріалу, пропонованого для обговорення, вільних висловлювань щодо отримання нової інформації. На цьому етапі роль викладача (вчителя) полягає в організації вільного обговорення теми, стимулювання до згадування раніше вивченого, конструктивного аналізу та обговорення раніше відомого. При цьому важливо діяти за правилом: «Думка кожного - коштовна наукова цінність».

На цьому етапі доцільним може бути використання порад Ч. Темпла, К. Мередита та Дж. Стіла:

- важливо сприяти набуванню здобувачами освіти досвіду критичного мислення;
- важливо надавати кожному учаснику освітнього процесу часу для самостійного і вдумливого обмірковування;
- викладачеві(вчителю) важливо толерантно сприймати різні думки й ідеї без коментування;
- важливо підкреслювати, що кожна особистість здатна до критичного

міркування;

- важливо переконати кожного учасника освітнього процесу , що кожна думка, навіть абсолютно незрозуміла, не буде висміюваною;
- слушно зазначати, що будь-які прояви критичного мислення є цінними та можуть бути конструктивно сприйнятими для критичного осмислення.

На другому етапі МКРМ слід:

- організувати контакт здобувачів освіти з усім об’ємом нової інформації, зіставлення її з наявними знаннями та пошуком змісту нової;
- акцентувати увагу на пошуці відповідей на виниклі питання та суперечності (зокрема, і в методиці вивчення СТВ);
- бажано звернути увагу на виниклі запитання й утруднення під час традиційного пояснення деяких явищ СТВ;
- підготуватися до аналізу традиційних методик навчання СТВ та їх суперечностей.
- визначити оптимальний час для первинного ознайомлення здобувачів освіти з інформацією та поглибленого її сприйняття, осмислення й обговорення.

Звернемо увагу на *функції* цього етапу:

а) *Інформаційну,* яка передбачає одержання інформації за оголошеною викладачем темою;

б) аналіз, осмислення та систематизацію, орієнтовані на вивчення та класифікацію нових знань, їх універсалізацію та об’єднання в систему нових знань – мета знання (*систематизуюча* функція);

в) збереження та розвиток інтересу та мотивації студетів , учнів , учителів – практиків до досліджуваної теми (*мотиваційна функція*).

На цьому етапі здобувачі освіти мають розвивати в собі впевненість у власному творчому потенціалові, цінності своїх думок та ідей. Викладач (вчитель) не повинен бути єдиним джерелом інформації, а насамперед пропонувати методи вдумливого первинного чи повторного ознайомлення з різними джерелами наукової інформації, формування власних висновків. У цей період необхідно рекомендувати учасникам освітнього процесу узагальнити власні думки, підготуватися до аргументації суджень щодо почутого та прочитаного з можливістю повернення до тексту оригіналу.

3. Третім важливим етапом методики РКМ має бути оцінно-результативний (етап дидактичної рефлексії).

Аналізуючи зміст цього етапу, звернемось до досліджень О. В. Тягло [55; 61] та І. В. Батрун [60], які необхідною умовою МРКМ визначають стадію рефлексії. Важливо урахувати слушну рекомендацію: «Спосіб навчання полягає в тому, щоб визначати свої сумніви, спробувати прояснити неясні запитання й у такий спосіб наблизитися до змісту нового досвіду» [60, с. 14]. На цьому етапі необхідно вчити здобувачів освіти відповідати на запитання:

– які нові знання та досвід Ви отримали при вирішення нової проблеми?
– які суперечності були виявлені у процесі самостійного осмислення її змісту?
– які методи роботи з навчальною літературою були використані? Які з них були найбільш ефективними?
– у процесі обговорення проблеми Вашими колегами (однокурсниками) висловлювалися різні судження. Які з них сприймалися вами критично? Чому?
– які знання, форми та дидактичні методи можуть бути використані в педагогічній практиці, зокрема при вивченні СТВ в профільних класах ЗЗСО?

На етапі рефлексії (третій етап МРКМ) здобувачі освіти аналізують отримані результати. Важливо, щоб під керівництвом викладача вони дійшли таких *загально дидактичних висновків* .

1. Не обсяг знань чи інформації є метою фізичної освіти, а насамперед те, як здобувач освіти має її відшукувати, привласнювати, аналізувати, узагальнювати, застосовувати у практичній діяльності.

2. Важливою ознакою критичного мислення є не присвоєння набутого знання, а конструювання свого, яке формується у процесі навчання та самоосвітньої діяльності.

3. Важливою ознакою здібності до критичного мислення вчителя є діалог, полілог, спільний пошук вирішення науково- методичних проблем, партнерські відносини у науково- педагогічному співтоваристві.

4. Критичне мислення – це не пошук недоліків у міркуваннях інших, а насамперед об'єктивна оцінка здобутків інших, їх негативних і позитивних сторін.

5. Узагальнені твердження типу « всі» , «завжди», « ніхто», «досвідчені науковці стверджують», подібні стереотипні узагальнення, стереотипні кліше та подібні припущення можуть вести до неправильних уявлень, які протирічать результатам критичного мислення, а тому небажані до вживання у науковій та науково-методичній лексиці.

Схарактеризовану методику розвитку критичного мислення рекомендуємо для використання в освітньому процесі ЗВО та ЗЗСО, зокрема при вивченні СТВ.

Список використаної літератури до першого розділу

1. Абасов З. А. Системный подход как методическое направление исследования инноваций в образовании. Москва: Политиздат, 1985. 263 с.
2. Беспалько В. П. О возможности системного подхода в педагогике. *Советская педагогика*. 1990. № 7. С. 59-60.
3. Бондаревская Е. В. Парадигмальный подход к разработке содержания ключевых педагогических компетентностей. *Педагогика.* 2004. № 10. С. 23-31.
4. Бородіна Н. В. Шляхи розвитку критичного мислення. *Філософія та гуманізм*. 2017. № 5. С. 29–38.
5. Браус Дж., Вуд Д. Инвайроментальное образование в школах: Пер. с англ. NAAEE, 1994. 103 с.
6. Бургун І. В. Розвиток навчально-пізнавальних компетенцій учнів основної школи в навчанні фізики: монографія. Херсон: Грінь Д. С., 2014. 528 с.
7. Буряк В. К. Теория и практика самостоятельной учебной работы школьников (на материалах естественнонаучных дисциплин) : дис. … д-ра пед. наук : 13.00.01 / Криворожский государственный педагогический инситут. Кривой Рог, 1984. 593 с.
8. Бутенко А. В., Ходос Е. А. Критическое мышление: метод, теория, практика: учеб.-метод. пособие. Москва: Мирос, 2002.
9. Векслер С. І. Розвиток критичного мислення учнів у процесі навчання. Київ: Радянська школа, 1971. 171 с.
10. Гильмиярова С. Г., Даутова К. В., Шамигулова Ю. Ю. К вопросу о формировании критического мышления у студентов педагогических вузов. *Наука и школа*. 2016. №3. С. 201–206.
11. Гончаренко С. У. Український педагогічний словник. Київ: Либідь, 1997. 376 с.
12. Гончаренко Я. В. Формування професійно-предметних компетенцій майбутніх екологів у навчанні теорії ймовірності та математичної статистики. *Вища освіта України*. 2013. № 3(50). С. 241-245.
13. Губа Н. В. Концептуальні підходи до формування управлінської культури. *Педагогіка і психологія*. 2008. № 2(59). С. 100-101.
14. Давидова Г., Семенов В. Рефлексивные технологии психолого-педагогического сопровождения личности в дополнительном образовании. *Післядипломна освіта в Україні*. 2009. № 2. С. 39-43.
15. Джонсон Д. Несколько замечаний касательно обучения критическому мышлению. КМ Новости. Университет штата Калифорния 1985. Т.4. №1. 210 с.

16. Дьюи Дж. Психология и педагогика мышления. Пер. с англ. Н.М. Никольской. Москва: Совершенство, 1997. 208 с.

17. Заир-Бек С.И. Развитие критического мышления через чтение и письмо: стадии и методические приемы. *Директор школы*. 2005. № 4. С. 66–72.

18. Заир-Бек С. И., Муштавинская И. В. Развитие критического мышления на уроке: пособ. для учителя. Москва: Просвещение, 2004. 173 с.

19. Зимняя И. А. Ключевые компетентности как результативно-целевая основа компетентного подхода в образовании: Авторская версия. Москва: Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов. 2004. 120 с.

20. Карпова Л. Б. Розвиток критичного мислення учнів: реалізація програми «Шлях до Успіху». *Фізика*. 2014. № 9. С. 11–13.

21. Клустер Д. Что такое критическое мышление. *Відкритий урок*. 2003.№ 17-18. С. 9–13.

22. Компетентнісний підхід у сучасній освіті: Світовий досвід та українські перспективи / за заг. ред. О. В. Овчарук. Київ: Кіс, 2004. 112 с.

23. Коновал О. А. Основи спеціальної теорії відносності: навч.-метод. посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавець Роман Козлов, 2014. 271 с.

24. Коновал О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. 346 с.

25. Лунгол О. М. Методика навчання електродинаміки учнів вищих професійно-технічних навчальних закладів: дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / Кіровоградський державний педагогічний університет ім. В. Виниченка. Кіровоград, 2015. 322 с.

26. Малихін О. В. Організація самостійної навчальної діяльності студентів вищих педагогічних навчальних закладів: теоретико-методологічний аспект: монографія. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. 307 с.

27. Матвієнко О. В. Створення моделі спеціаліста на засадах теорії освітньої інноватики. *Педагогіка і психологія*. 2004. № 3(44). С. 44-52.

28. Пометун О. І., Сущенко І. М. Навчаємо мислити критично: посібник для вчителів. Дніпропетровськ: ЛІРА, 2016. 144 с.

29. Нечепельска Н. В. Формування критичного мислення. *Педагогічна майстерня*. 2010. № 5. С. 2–5.

30. Новейший психолого-педагогический словарь / сост. Е. С. Рапацевич; под общ ред. А. П. Астахова. Минск: Современная школа, 2010. 928 с.

31. Попков В. А., Коржуев А. В., Рязанова Е. Л. Критическое мышление в контексте задач высшего профессионального образования. Москва: зд-во МГУ, 2001. 166 с.

32. Поппер К. Логика и рост научного знания. Избранные работы / сост. и общ. ред. В. Н. Садовского. Москва: Прогресс, 1983. 605 с.

33. Синич-Кондратенко В. Критичне мислення й аналітичні здібності учнів. *Директор школи*. 2012. №7. С. 50–52.

34. Советов Б. Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 2001. 343 с.

35. Сорина Г.В. Критическое мышление: история и современный статус. *Вестник Московского университета*. Серия 7. Философия. 2003. № 6. 463 с.

36. Темпл Ч. Критическое мышление и критическая грамотность. *Перемена*. 2005. № 2. С. 15-20.

37. Темпл Ч., Стил Дж. Л., Мередит К. С. Критическое мышление: углубленная методика. Москва: Открытое общество, 1998. 237 с.

38. Терно С. О. Методика розвитку критичного мислення школярів у процесі навчання історії. Харків: Основа, 2012. 93 с.

39. Терно С. О. Світ критичного мислення: образ та мімікрія. *Історія в сучасній школі*. 2012. № 7-8. С. 27–39.

40. Терно С. О. Теорія розвитку критичного мислення (на прикладі навчання історії): посібник для вчителя / Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2011. 105 с.

41. Ткаченко В. М. Розвиток критичного мислення учнів на уроках історії як умова їхньої успішної соціалізації. *Таврійський вісник освіти*. 2014. № 1(45). Ч.2. С. 141–150.

42. Туркот Т. І. Педагогіка вищої школи: навч. посібник. Київ: Кондор, 2011. 628 с.

43. Философский энциклопедический словарь / за ред. Аверищев С. С. 2-е изд. Москва: Сов. Энциклопедия, 1985. 815 с.

44. Формування превентивного виховного середовища загальноосвітнього навчального закладу: навч.-метод. посіб. / Єжова О. О. та ін.; Кіровоград: Імекс ЛТД, 2014. 172 с.

45. Халперн Д. Психология критического мышления. Питер: СПб, 2000. 512с.

46. Шарко В. Д. Рефлексивний підхід до організації навчання як умова саморозвитку вчителя в умовах неперервної освіти. *Методи.* Херсон, 2007. С. 45-53.

47. Chaffee J. Thinking critically. Belmont, CA, United States, 2014. 592 p.

48. Ennis, Robert H. Critical Thinking: Reflection And Perspective—Part I. Inquiry, Vol. 26, 1. 2011. 181 p.

49. Glaser, Edward M., *An Experiment in the Development of Critical Thinking.* AMS Press, New York, 1941. 212 p.

50. Paul R., Elder L. The Critical Thinking Reading and Writing Test Publisher: Foundation for Critical Thinking, 2006. 68 p.

51. Paul R. *Critical Thinking - What Every Person Needs to Survive in a Rapidly Changing World (Third Edition*), edited by Jane Willsen and A.J.A. Binker, Foundation for Critical Thinking, Santa Rosa, CA, 1993. 70 p.

52. Про затвердження державного стандарту початкової освіти. Початкове навчання та виховання. *Науково-методичний журнал*. 2018. №13-15. С. 7.

53. The Nature of Human Intelligence. J. P. Guilford. McGraw-Hill, New York, 1967. 538 p.

54. Калмыкова З. И. Продуктивное мышление как основа обучаемости. Москва: Педагогика, 1981. 200 с.

55. Тягло О. В. Критичнее мислення: навч. посіб. Харків: Основа, 2008. 192 с.

56. Соломенко А. О. Дидактичні прийоми в методиці розвитку критичного мислення майбутніх учителів під час вивчення теоретичної фізики. *Актуальні проблеми природничо-математичної освіти в середній та вищій школі*. Херсон. 2018. С. 117-118.

57. Почтовюк С. Розвиток критичного мислення студентів технічних коледжів у процесі навчання інформатики: дис. … канд. пед. наук: 13.00.02 / Нац. пед. ун-т. ім. М. П. Драгоманова. Київ, 2013. 225 с.

58. Zhao C., Pandian A., Kaur Mehar Singh M. Instructional Strategies for Developing Critical Thinking in EFL Classrooms: English Language Teaching: 2016. Vol. 9. No. 10. P. 17–24.

59. Варлакова М. Развитие критического мышления учащихся в процессе обучения физике: дисс. … канд. пед. наук : 13.00.01 / Курганский государственный университет. Курган, 2016. 194 с.

60. Батрун І. В. Технологія розвитку критичного мислення і сучасний освітній процесс. Завучу. Усе для роботи. 2018. № 5/6. С. 7–14.

61. Тягло О. В. Чи буде культура критичного мислення в новій українській школі? URL: https://life.pravda.com.ua/columns/2017/02/9/222533/ (дата звернення: 9.02.2018).

62. Solomenko A. O. The formation of Critical-Constructive Thinking of Future Teachers of Physics in the Process of Analysis of Contradictions in Electrodynamics. *XVI International Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems* (dedicated to memory Professor Dmytro Freik). Materials. Ivano-Frankivsk. 2017. P. 177.

63. Релятивістські кінематичні ефекти: методичні рекомендації до самостійної роботи студентів фізико-математичних факультетів та вчителів фізики / укл. А. О. Соломенко, О. А. Коновал, Н. С. Шолохова. Кривий Ріг-Херсон. 2016. 41 с.

64. Соломенко А. О. Суперечності теоретичної фізики як один із засобів розвитку критичного мислення студентів. *Актуальні проблеми природничо-математичної освіти в середній і вищій школі*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон. 2016. С. 113-115.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ РЕАЛІЗАЦІЇ КРИТИЧНО-КОНСТРУКТИВНОГО ПІДХОДУ ДО ВИВЧЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Теперішнього часу фізика в ЗЗСО України вивчається за новими Державними стандартами [1], згідно з якими у старшій школі запроваджують профільну диференціацію навчання. Фізика вивчається за новими програмами, які мають три рівні [2; 49], і відповідно різні підручники: рівень стандарту [27; 36; 44; 45; 46], академічний рівень [3], профільний рівень [10; 12; 13; 14; 48].

При цьому тема «Релятивістська механіка» завершує вивчення розділу «Механіка» у 10 класі.

Аналіз навчальних програм з фізики для закладів загальної середньої освіти засвідчує, що на вивчення «Релятивістської механіки» відводиться:

а) в класах, що вивчають фізику на рівні стандарту – 3-4 год.;

б) в класах, що вивчають фізику на академічному рівні – 4 год.;

в) в класах, що вивчають фізику на профільному рівні – 8 год.

У межах цього навчального часу учні профільних класів (класів з поглибленим вивченням фізики) повинні засвоїти:

- Принцип відносності А. Ейнштейна. Основні положення спеціальної теорії відносності (СТВ). Перетворення Лорентца. Швидкість світла у вакуумі. Відносність одночасності подій. Відносність довжини й часу. Просторово-часові властивості фізичного світу.
- Релятивістський закон додавання швидкостей. Взаємозв'язок маси та енергії.
- Основні наслідки СТВ та їх експериментальне підтвердження.

У процесі узагальнюючих занять «Сучасні уявлення про простір і час» у здобувачів освіти повинні сформуватися адекватні реальності уявлення про простір і час, взаємозв’язок класичної та релятивістської фізики. Вони також повинні усвідомити роль та значення фізичних знань, зокрема з релятивістської механіки, у суспільному розвитку, науково-технічному прогресі, знати про сучасні проблеми механіки, і, зокрема, спеціальної теорії відносності, поглибити свої знання про досягнення українських учених у розвитку фізичної науки й техніки.

Окрім того цей матеріал має значний світоглядний потенціал і, як засвідчує наша практика, в класах, які вивчають фізику на рівні стандарту, академічному рівні та профільному рівнях є досить великий відсоток учнів, які проявляють підвищений інтерес до вивчення фізики, і, зокрема, до поглибленого вивчення основ СТВ.

Саме тому в розділі 2 пропонуються матеріали, які будуть корисними вчителю фізики ЗЗСО:

а) в організації роботи учнів при їх самостійному, більш глибокому вивченні основ СТВ;

б) при проведенні факультативних занять з фізики (за рахунок варіативної частини навчального плану);

в) при організації гурткових занять з фізики.

Зауважимо, що ця робота повинна ґрунтуватися на принципах фундаменталізації, наступності, відповідності та науковості, сприяти розвитку критичного мислення здобувачів освіти.

Наразі в науково-методичній літературі існує розмаїття підходів до викладання спеціальної теорії відносності в середній та вищій школах (див. «Список використаних джерел»). Це обумовлено перш за все специфікою СТВ та парадоксальністю її наслідків, зокрема, кінематичних. Саме аналіз кінематичних наслідків СТВ, в основному, і пропонується в навчальній та науково-методичній літературі. По-друге, відносно складний математичний апарат, необхідний для усвідомлення сутності фізичних явищ і процесів, які описуються з позицій теорії відносності (зокрема, перетворення Лорентца), вимагає від суб’єктів навчальної діяльності високого рівня розвитку логічного і абстрактного мислення, і водночас може сприяти розвитку його критичності.

Ці обставини також зумовлюють потребу пошуку методичних новацій в процесі навчання СТВ в ЗЗСО.

На наше переконання, завдання, які стоїть перед вчителем при навчанні СТВ, наступні:

– сформувати в суб'єктів навчальної діяльності адекватне розуміння фізичної реальності, яка виходить за межі їх повсякденного досвіду (і яка описується ньютонівською механікою);
– допомогти зрозуміти особливості законів релятивістської фізики (область великих енергій і швидкостей руху частинок);
– сформувати основи наукового світогляду, ураховуючи, що суттю СТВ як фізичної теорії, є вчення про властивості простору і часу;
– забезпечити реалізацію принципів фундаменталізації, наступності, відповідності та науковості при вивченні класичної й релятивістської механіки, зберігши при цьому їх логічну спадкоємність і взаємозв'язок;
– з позицій розвивального навчання сприяти розвитку критичного мислення суб'єктів навчальної діяльності.

У відповідності з цими завданнями при викладанні спеціальної теорії відносності необхідно дотримуватись чіткого обґрунтування всіх формул, висновків і положень релятивістської фізики, що дозволить забезпечити цілісне сприйняття структури та змісту цієї фізичної теорії.

Однак аналіз сучасних підручників з фізики і методичної літератури засвідчує, що типовим є виклад релятивістської механіки у вигляді розрізнених фактів і понять, з фрагментарним висвітленням та з не завжди достатньою глибиною їх аналізу та пояснення. В деяких посібниках та підручниках для загальноосвітніх шкіл [12; 13; 14; 27] наявні фізичні помилки, неточності формулювань, некоректні трактування деяких положень СТВ. Аналіз цих фактів надасть учителеві можливості уникнути цих негараздів у практиці викладання.

Зазначимо також, що варіанти вивчення кінематики СТВ відрізняються різною послідовністю викладу способів обґрунтування кінематичних релятивістських ефектів. Звернемося наразі до безпосереднього висвітлення методичних особливостей вивчення релятивістських кінематичних ефектів СТВ.

Оскільки в підручниках фізики для ЗЗСО, як правило, обов'язково висвітлюються кінематичні наслідки СТВ, то вочевидь постає нагальна потреба обґрунтувати різними способами ці кінематичні наслідки, пояснити їх фізичну суть. На нашу думку, це надає вчителю перспективу вибору оптимальних як способів обґрунтування кінематичних наслідків так і методичних підходів загалом до навчання СТВ.

Зокрема: у **п. 2.1** висвітлено методичні особливості вивчення явища сповільнення ходу рухомого годинника.

У **п. 2.2** подано способи обґрунтування лорентцевого скорочення.

У **п. 2.3** схарактеризовано деякі способи обґрунтування перетворень Лорентца.

У **п. 2.4** подано способи обґрунтування релятивістських формул додавання швидкостей.

У **п. 2.5** здійснено критично-конструктивний аналіз особливостей висвітлення релятивістських кінематичних ефектів у підручниках для ЗЗСО.

Пропонуємо декілька варіантів побудови структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

І Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ (вимірювання простору і часу, відносність одночасовості).
2. Сповільнення ходу рухомого годинника.
3. Скорочення Лорентца.
4. Перетворення Лорентца.
5. Формули додавання швидкостей за Ейнштейном (РФДШ).
6. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар. Пропонована послідовність вивчення релятивістської механіки передбачає обґрунтування всіх кінематичних наслідків СТВ згідно схеми:

а) постулати СТВ;

б) обґрунтування формули сповільнення ходу рухомого годинника за допомогою «світлового годинника» (п**. 2.1.2**);

в) обґрунтування формули скорочення Лорентца на основі на аналізу поширення променів в «світловому годиннику» (п. **2.2.2**), або з використанням результатів п. **2.2.5**;

г) очевидно, що обґрунтування ПЛ слід здійснити на основі результатів п. **2.1.2**, п. **2.2.2**. та п. **2.2.5**. А потім необхідно скористатися п. **2.3.1** або п. **2.4.2**, в якому виводяться не тільки ПЛ на основі РФДШ для повздовжнього компонента швидкості, але й РФДШ для поперечного компонента швидкості;

д) доведення формул додавання швидкостей за Ейнштейном простіше всього здійснити використовуючи ПЛ (п. **2.4.1**). Більш вишукані способи обґрунтування РФДШ пропонуються в пп. **2.4.2**, **2.4.3**, **2.4.4.**

II Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ (вимірювання простору і часу, відносність одночасовості).

2. Скорочення Лорентца.

3. Сповільнення ходу рухомого годинника.

4. Перетворення Лорентца.

5. Формули додавання швидкостей за Ейнштейном.

6. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар. Можна запропонувати наступну послідовність вивчення основ СТВ у цьому варіанті:

а) Постулати СТВ (вимірювання простору і часу, відносність одночасовості);

б) порівнюючи всі можливі способи обґрунтування формули $l = l_0\sqrt{1-B^2}$ доходимо висновку, що абсолютно незалежно (не спираючись на ПЛ та формулу явища сповільнення ходу рухомого годинника, $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$, не використовуючи властивості квадрату інтервалу між двома подіями, не користуючись методом k- коефіцієнта) неможливо обґрунтувати скорочення Лорентца. Тому ми пропонуємо все ж таки скористатися п. **2.1.2**, побіжно використавши $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$. А вже потім наступним кроком слід більш детально обґрунтувати формулу сповільнення ходу рухомого годинника;

в) обґрунтування формули сповільнення ходу рухомого годинника в цьому варіанті структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО простіш за все зробити за допомогою «світлового годинника» (п**. 2.1.2**);

г) перетворення Лорентца, аналогічно до структури змістового компонента першого варіанта, слід обґрунтувати з використанням п. **2.3.1** або п. **2.4.2**;

д) для одержання РФДШ необхідно використати будь який спосіб, що пропонується в параграфі **2.4**.

III Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ (вимірювання простору і часу, відносність одночасовості).

2. Перетворення Лорентца.

3. Кінематичні наслідки ПЛ.

А) сповільнення ходу рухомого годинника;

Б) скорочення Лорентца;

В) РФДШ.

4. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар.

а) Перетворення Лорентца - це основа СТВ, власне математичний апарат СТВ. Можна запропонувати такі способи обґрунтування ПЛ: п. 2.**3.2** та п. 2.**3.3**. Досвід показує, що засвоєння суті цих способів учнями ЗЗСО є можливим;

б) надалі при обґрунтуванні кінематичних наслідків ПЛ слід скористатися такою послідовністю:

пп. 2.**1.1**, 2.**1.2**, 2.**1.5**. (для обґрунтування формулу сповільнення ходу рухомого годинника, $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$);

пп.. 2.**2.2**, **2.2.3**, **2.2.4**, **2.2.5** (для обґрунтування скорочення Лорентца);

пп. 2.**4.1**, 2.**4.2**, 2.**4.3** (для обґрунтування РФДШ).

IV Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ.
2. Квадрат інтервалу між подіями.
3. Сповільнення ходу рухомого годинника.
4. Скорочення Лорентца.
5. Перетворення Лорентца.
6. РФДШ.
7. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар. Цей варіант подання змістового компонента релятивістської механіки та методики вивчення СТВ в ЗЗСО на теренах українських шкіл мабуть вперше запропоновано в [26] хоча й з деякими явними та неявними помилками (див. п. **2.5** цього розділу).

Пропозиція наступна:

а) пояснити, що ПЛ як математична основа СТВ можуть розглядатися як наслідок більш загального положення- інваріантності виразу для квадрату інтервалу між двома подіями [25, с. 67-72; 26]

$$\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2;$$

б) в п. **2.1.1** подано обґрунтування формули $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$;

в) в п. **2.2.1** подано обґрунтування формули лорентцевого скорочення;

г) ПЛ обґрунтовуються в п. **2.3.2**. та п. **2.3.3**;

д) очевидно, що РФДШ найбільш прозоро можна обґрунтувати з використанням п. **2.4.1**

V Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ.
2. Метод k - коефіцієнта.
3. Сповільнення ходу рухомого годинника.
4. Скорочення Лорентца.
5. Перетворення Лорентца.
6. РФДШ.
7. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар. Вивчення СТВ (обґрунтування ПЛ, обґрунтування кінематичних наслідків цих перетворень) можливе також з використанням методу k - коефіцієнта. Опис його подано в [5; 25; 37]. Тому ми пропонуємо наступну послідовність вивчення СТВ на основі методу k - коефіцієнта:

а) п. **2.1.3**, в якому детально висвітлюється сутність самого методу та обґрунтування формули $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$;

б) п. **2.2.6** (доведення формули $l = l_0\sqrt{1-B^2}$);

в) п. **2.3.4** (обґрунтування ПЛ);

Послідовність використання пп. **2.1.3**, **2.2.6**, **2.3.4** в навчальному процесі може бути довільною й визначається уподобаннями вчителя, рівнем знань суб'єктів навчання та вибором методики подання СТВ.

VI Варіант структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО.

1. Постулати СТВ (вимірювання простору і часу, відносність одночасовості).

2. Релятивістські формули додавання швидкостей за Ейнштейном.

3. Перетворення Лорентца.

4. Кінематичні наслідки ПЛ:

А) сповільнення ходу рухомого годинника;

Б) скорочення Лорентца;

5. Експериментальні підтвердження СТВ та її наслідків.

Методичний коментар. а) Малініним О.М. запропонований своєрідний спосіб обґрунтування формули повздовжнього компонента швидкості РФДШ [30], п. **2.4.3**;

б) використовуючи його та п. **2.4.2.,** одержуємо не тільки РФДШ, але й перетворення Лорентца;

в) подальша послідовність викладу матеріалу аналогічна структурі варіанту III.

Зазначимо насамкінець, що варіант I та варіант II майже ідентичні. Варіанти IV, V та VI доцільно використовувати для достатньо підготовлених учнів профільних класів ЗЗСО.

На наш погляд, найбільш широкі можливості для інновацій та свободи у виборі варіантів подання релятивістської механіки надає варіант III структури змістового компонента методики вивчення СТВ в ЗЗСО підґрунтям якого є перетворення Лорентца. Тому найбільш доступний для учнів є спосіб обґрунтування ПЛ, що описаний в п. **2.3.2**; п. **2.3.1** також нескладний для учнів.

2.1. Методичні особливості пояснення явища сповільнення ходу рухомого годинника

Розглянемо на прикладі аналізу питання «Явище сповільнення ходу рухомого годинника» методику РКМ здобувачів освіти з проекцією її використання під час вивчення інших тем СТВ.

Перший етап *«Виклик»*.

У відповідності зі змістом мотиваційної функції «Виклику» (перший етап МРКМ) звертаємо увагу майбутніх читачів насамперед на той факт, що при вивченні СТВ розглядаються, як правило, дві системи відліку, K і K'. Система відліку (СВ) K вважається нерухомою, а СВ K' рухається відносно СВ K.

Загальноприйнятим вважається, що вісь OX СВ K, й вісь $O'X'$ СВ K' співпадають, а СВ K' рухається відносно СВ K із швидкістю $\vec{V}$ вздовж вісі OX (Рис. 2.1).

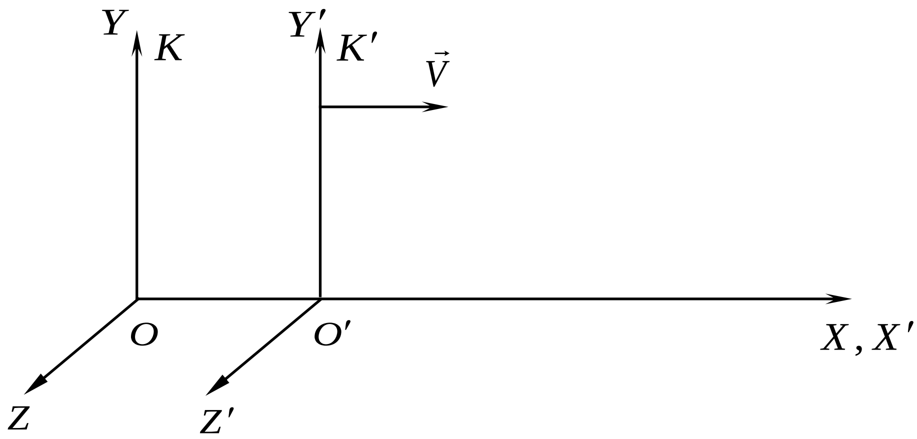


Рис. 2.1. Рух СВ K' відносно «нерухомої» СВ K

При цьому в початковий момент часу $t = t' = 0$ початки координат СВ K $x = y = z = 0$ й СВ K' $x' = y' = z' = 0$ співпадають.

Далі формулюємо завдання: проаналізувати особливості явища сповільнення ходу рухомого годинника та окреслюємо важливість вивчення цього питання для розуміння сутності СТВ.

На другому етапі (*Осмислення змісту начального матеріалу*) інформуємо здобувачів освіти, що в науково-методичній літературі існує декілька способів обґрунтування формули явища сповільнення ходу рухомого годинника, $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Критичний розгляд і аналіз яких дасть змогу як вчителю, так і учню зіставити, оцінити, в кінці кінців обрати найбільш зручний, адекватний спосіб опису цього явища.

На третьому етапі МРКМ (етапі дидактичної рефлексії) разом зі здобувачами освіти (або в процесі їх самостійної роботи) аналізуємо способи обґрунтування формули явища сповільнення ходу рухомого годинника, $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}$.

На завершення вивчення теми слід організувати обговорення за таким планом:

а) Які нові знання Ви отримали?

б) Які методи з навчальної літератури були використані?

в) Чи були використані в процесі обговорення різні судження, висловлені однокурсниками? Які з них сприймалися Вами критично? Чому?

2.1.1. Спосіб, який ґрунтується на ***інваріантності квадрату інтервалу між двома подіями***:

Квадрат інтервалу Δs^2 (квадрат «віддалі») між двома подіями, згідно з означенням, дорівнює,:

$$\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2, \qquad (1)$$

де $\Delta x,\ \Delta y, \Delta z$ - просторові віддалі між двома подіями в СВ K, відповідно по осях OX, OY, OZ; $\Delta x',\ \Delta y', \Delta z'$ - просторові віддалі між *цими ж двома подіями в СВ* K', відповідно по осях $O'X', O'Y', O'Z'$; Δt, $\Delta t'$ - проміжки часу між цими двома подіями з точок зору СВ K та СВ K' відповідно; c - швидкість світла у вакуумі.

Якщо інтервал часоподібний, тобто $\Delta s^2 > 0$, то завжди можна знайти систему відліку, в якій дві довільні нескінченно близькі події відбуваються в одній просторовій точці ($\Delta x' = \Delta y' = \Delta z' = 0$).

Тоді квадрат просторово-часового інтервалу зводиться до нескінченно малого проміжку часу в СВ K':

$$c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2\Delta t'^2,$$

$$c^2\Delta t^2 - \Delta r^2 = c^2\Delta t'^2,$$

де $\Delta r^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ - це квадрат віддалі між просторовими точками цих двох подій.

Отже, одержуємо:

$$c^2\Delta t'^2 = c^2\Delta t^2\left(1 - \frac{\Delta r^2}{c^2\Delta t^2}\right) = c^2\Delta t^2\left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right), \qquad (2)$$

де $\dfrac{\Delta r^2}{\Delta t^2} = \upsilon^2$ - квадрат швидкості руху частинки (або квадрат швидкості переміщення фізичного процесу відносно СВ K).

Тоді проміжок часу у лабораторній системі відліку Δt зв'язаний зі проміжком власного часу в системі відліку K', в якій процес локалізований, $\Delta t'$ таким чином:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}}. \qquad (3)$$

Нагадаємо, що власним часом називають час, який фіксується годинником, нерухомим відносно фізичного явища чи процесу.

Якщо умовно вважати, що з рухомим процесом (фізичним об'єктом, частинкою) зв'язаний годинник (якраз він показує власний час), то складається враження, що рухомий годинник з точки зору «нерухомого годинника» (спостерігача) «іде» повільніше, ніж нерухомий. На цьому етапі бажано здійснити дидактичну рефлексію: обговорити як слід розуміти формулу (3)

Здобувачі освіти мають усвідомити, що тривалість фізичного процесу в системі відліку, де він нерухомий (проміжок власного часу), завжди менша, ніж тривалість його з точки зору будь-якої іншої інерціальної системи відліку.

Можна також підкреслити, що фізичний процес в СВ, відносно якої він переміщується, протікає повільніше, ніж з точки зору системи відліку, в якій він знаходиться в спокої. Різним виявляється лише відлік проміжків часу.

Зв'язок проміжку часу між двома подіями, що відбулися в деякій СВ в одній і тій самій точці простору (а, отже, цей проміжок часу $\Delta t'$ *фіксується одним годинником) з проміжком часу між тими самими подіями, але який вимірюється двома годинниками іншої СВ, відносно якої ці дві події відбуваються в двох різних точках простору, визначається формулою (3)* [25, с. 24].

На етапі дидактичної рефлексії бажано наголосити, що насправді мова йде не про темп ходу часу у різних системах відліку, а про опис у різних системах відліку будь-якого фізичного процесу, що локалізований у системі відліку K'.

Як це видно із (3), тривалість процесу завжди найменша у тій системі відліку, де частинка (або процес) знаходиться в спокої (має місце просторова локалізація). У будь-якій іншій системі відліку народження і розпад нестабільної частинки, наприклад, (тривалість процесу) відбуватиметься в різних точках простору. А наявність просторової частини квадрату інтервалу

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 \qquad (4)$$

приводить (оскільки він є інваріантним) до зростання часу життя частинки в будь-якій іншій СВ, порівняно із власною СВ, де частинка (процес) знаходиться в спокої.

У розвиток теми слід запропонувати здобувачам освіти здійснити

2.1.2. Обґрунтування формули $\Delta t = \dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-B^2}}$ з допомогою світлового годинника

Етап «Виклик». Це можливо здійснити за допомогою так званого «світлового годинника» [10; 22; 30; 31]. З цією метою здійснимо аналіз ходу світлового променю в «світловому годиннику» в СВ K та СВ K'.

На кінцях стрижня довжиною l закріплені два паралельні дзеркала. Між дзеркалами рухається вверх і вниз світловий промінь (фотон), рис. 2.2.

Кожне віддзеркалення світла від нижнього дзеркала за допомогою спеціального пристрою викликає наступне «клацання» годинника.

Спостерігач, нерухомий відносно годинника, виявить, що інтервал часу між «клацанням» дорівнює:

$$\Delta\tau = \frac{2l}{c}.$$

Та з точки зору спостерігача, відносно якого годинник рухається зі швидкістю V, інтервал часу виявиться іншим.

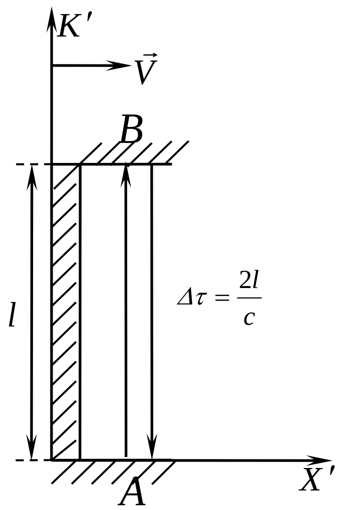


Рис. 2.2. Світловий годинник AB нерухомий в СВ K'

Аналізуємо: чому?

Етап 2 «Осмислення». Будемо вважати, що стрижень (світловий годинник AB) перпендикулярний до вектору швидкості $\vec{V}$.

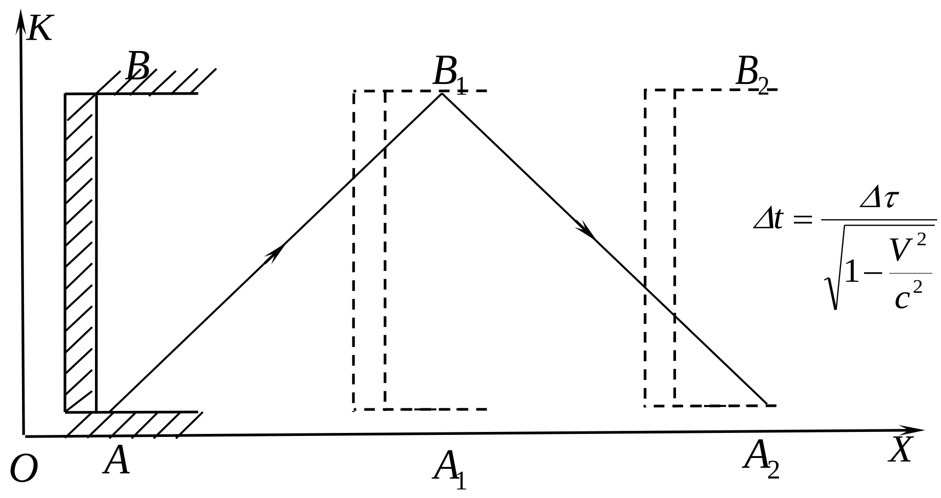


Рис. 2.3. Світловий промінь в світловому годиннику в СВ K розповсюджується вздовж ломаної лінії AB_1A_2

Тоді світло в рухомому годиннику з точки зору СВ K розповсюджується вздовж ломаної лінії AB_1A_2, (рис. 2.3) і проходить між «клацанням» годинника за час Δt шлях:

$$2\sqrt{(AA_1)^2 + (A_1B_1)^2} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2 + l^2}\ .$$

Відповідно, проміжок часу між випромінюванням сигналу в т. A та прийомом його в т. A_2 з точки зору СВ K, дорівнює:

$$t = \frac{2\sqrt{l^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2}}{c}\ .$$

Розв'язуючи це рівняння відносно t і враховуючи, що $\dfrac{2l}{c} = \Delta\tau$, приходимо до формули, яка співпадає з (3):

$$\Delta t = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{1-B^2}}, \qquad (6)$$

де $B = \frac{V}{c}$.

Тобто, якщо проміжок часу між «клацанням» годинника у власній СВ $\Delta\tau$, то з точки будь-якої іншої системи відліку, відносно якої годинник рухається з швидкістю V, проміжок часу між цими ж «клацанням» буде більшим, $\Delta t > \Delta\tau$.

Власний час показує той годинник, який нерухомий відносно певної системи відліку (або деякого процесу). При цьому маємо на увазі довільну систему відліку.

Етап 3. Дидактична рефлексія. Які знання та дидактичні методи можуть бути використані В Вашій майбутній педагогічній практиці, зокрема при вивченні СТВ в ЗЗСО?

2.1.3. Обґрунтування формули $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-B^2}}$ за допомогою методу k– коефіцієнта

Але спочатку опишемо метод k–коефіцієнта (радіолокаційний метод).

У методиці навчання основам СТВ (зокрема, при обґрунтуванні перетворень Лорентца та кінематичних наслідків СТВ) часто використовується радіолокаційний метод [5; 25; 37]. Суть його полягає в наступному.

Нехай в СВ K в початку координат знаходиться пристрій, який посилає у напрямі до СВ K' імпульси через проміжки часу T.

У початковий момент часу, зазвичай, початки координат СВ K та СВ K' співпадають (рис. 2.1), і в цей момент часу посилається перший імпульс до СВ K'. Другий імпульс посилається в момент $t_1 = T$.

Тоді в СВ K' **цей сигнал *за годинником системи*** K' буде прийнятий в момент:

$$t_1' = kT. \tag{7}$$

Тобто, всі наступні сигнали в СВ K' будуть прийматися через такий же проміжок часу $t_1' = kT$.

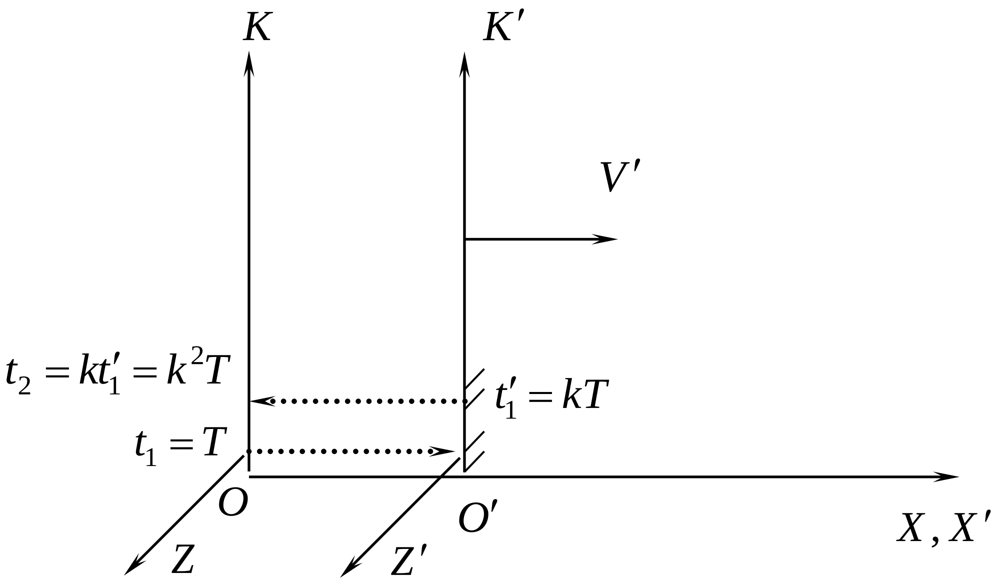


Рис. 2.4. Ілюстрація методу k - коефіцієнта

Аналогічно (в силу рівноправності СВ K та СВ K'), якщо із системи K' в напрямі системи K буде посилатись сигнал через проміжок часу T' за годинником системи K', **то за годинником системи K цей сигнал буде прийматись через проміжок часу** kT' (рис. 2.4).

Нехай в початку координат системи K' знаходиться дзеркало, тоді другий посланий сигнал відіб'ється від K' через проміжок часу kT за годинником K', але спостерігач в СВ K прийме його після віддзеркалення через проміжок часу:

$$t_2 = kt_1' = k \cdot kT = k^2T. \tag{8}$$

Тобто, за годинником СВ K, 2-й віддзеркалений сигнал прийде в т. O в момент $t_2 = k^2T$.

Таким чином, за годинником СВ K проміжок часу $k^2T - T$ – це час розповсюдження радіолокаційного сигналу від СВ K до системи K' і назад. А проміжок часу $\dfrac{(k^2T - T)}{2}$ – час розповсюдження сигналу тільки від СВ

K до системи K'. А в який момент за годинником СВ K відбулося відбивання світового сигналу від дзеркала СВ K'? Безпосередньо виміряти час настання цієї події ми не можемо. Після обговорення цієї тези, здобувачі освіти мають дійти висновку, що цей момент ми повинні *теоретично визначити (етап «Виклику»)* згідно з процедурою синхронізації годинників [22, с. 16-17].

Етап «Осмислення». Час настання події (відбиття сигналу) за годинником СВ K, згідно з означенням, згідно з процедурою синхронізації (див. [22]) дорівнює:

$$T = \frac{(t_1 + t_2)}{2}.$$

Враховуючи (8) для моменту відбиття сигналу від СВ K' маємо:

$$\frac{k^2T + T}{2} = \frac{T(k^2 + 1)}{2}. \tag{9}$$

Тоді, очевидно, що СВ K' «з точки зору» системи відліку K пройшла за цей проміжок часу шлях:

$$\frac{T(k^2 + 1)V}{2},$$

а світловий промінь подолав відстань:

$$\frac{(k^2T - T)}{2} \cdot c = \frac{cT(k^2 - 1)}{2}. \tag{10}$$

Тому одержуємо рівність для визначення коефіцієнта k:

$$\frac{T(k^2 + 1)V}{2} = \frac{cT(k^2 - 1)}{2}. \tag{11}$$

Тоді коефіцієнт k та релятивістський множник Γ, відповідно. дорівнюють:

$$k = \sqrt{\frac{1 + B}{1 - B}},\ \Gamma = \frac{k^2 + 1}{2k}. \tag{12}$$

Тепер, користуючись методом k ***– коефіцієнта,*** можна отримати співвідношення між проміжками часу між двома подіями з точки зору СВ K та СВ K'.

Дійсно, спостерігач в СВ K' (за своїм годинником) приймає сигнали через проміжок часу:

$$\Delta t' = kT\,.$$

З точки зору спостерігача СВ K спостерігач в СВ K' приймає другий сигнал через проміжок часу (див. формулу (9)):

$$\Delta t = \frac{T + k^2 T}{2}\,.$$

Іншими словами, для СВ K цей проміжок дорівнює: $\Delta t = \dfrac{T\left(1 + k^2\right)}{2}$.

Тому проміжки часу Δt та $\Delta t'$ зв'язані співвідношенням:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{1 + k^2}{2k} = \Gamma\,,$$

де $\Gamma = \dfrac{k^2 + 1}{2k} = \dfrac{1}{\sqrt{1 - B^2}}$.

Етап дидактичної рефлексії. При підведені підсумків здобувачі освіти доходять висновку.

Ми ще раз встановили зв'язок проміжку часу між двома подіями, що відбулися в деякій СВ в одній і тій же точці простору (а, отже, цей $\Delta t'$ фіксується одним годинником) з проміжком часу між тими самими подіями, який вимірюється двома годинниками іншої СВ, відносно якої ці дві події відбуваються в двох різних просторових точках:

$$\Delta t' = \Delta t\sqrt{1 - B^2}\,. \tag{13}$$

2.1.4. Формула сповільнення ходу рухомого годинника на основі перетворень Лорентца [25, с. 24; 31-34; 37].

В СВ K' в нерухомій точці x' відбулося явище (процес), а проміжок часу між закінченням та початком цього явища є $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ (іншими словами це проміжок часу між деякими подіями явища), де t'_1 і t'_2 – моменти початку і кінця явища (процесу), визначені за годинником, нерухомим в СВ K'. А в СВ K початок і кінець цього явища, згідно з перетворюваннями Лорентца, відповідно дорівнюють t_1 і t_2:

$$t_{2,1} = \Gamma(t'_{2,1} + \frac{V}{c^2} \cdot x').$$

Тому тривалість процесу в СВ K (ефект сповільнення часу):

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - B^2}} \quad .$$

З опертям на вище зазначене пропонуємо використати методику розвитку критичного мислення здобувачів освіти на інших прикладах СТВ.

2.2 Обґрунтування формули лорентцевого скорочення повздовжніх розмірів рухомих тіл

2.2.1. Обґрунтування формули лорентцевого скорочення з використанням властивості просторово-часового інтервалу [26; 29, с. 43; 24, с. 113].

Нехай стрижень нерухомий у СВ K й орієнтований вздовж осі OX. Тоді квадрат інтервалу у СВ K дорівнює:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2. \tag{14}$$

Оскільки, згідно з процедурою вимірювання довжини рухомого стрижня, у СВ K' ми повинні зафіксувати координати початку і кінця цього рухомого стрижня в один і той же момент часу за годинниками СВ K', то у виразі для $\Delta s'^2$ слід взяти $\Delta t' = 0$.

Нехай дві події відбулися на осі $O'X'$ деякої системи відліку. У випадку просторово-подібного інтервалу завжди можна знайти СВ K', у якій ці дві події відбулися одночасово – $\Delta t' = 0$. Стосовно нашої задачі це означає, що в СВ K' ми зафіксувати координати початку і кінця цього рухомого стрижня в один і той же момент часу за годинниками СВ K' ($\Delta t' = 0$).

Тоді квадрат інтервалу зводиться тільки до просторової віддалі між цими подіями (фіксацією координат початку і кінця цього рухомого стрижня в СВ K'):

$$\Delta s'^2 = -\Delta x'^2 < 0. \quad (15)$$

У будь-якій іншій системі відліку (наприклад, у СВ K) для Δs^2 маємо:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 < 0.$$

Введемо позначення для довжин відрізків (стрижня), що з'єднують просторові точки, в яких відбулися ці дві події:

$$\Delta l_0^2 = \Delta x^2, \ \Delta l'^2 = \Delta x'^2.$$

Тобто, ми вважаємо, що віддаль між точками у СВ K' - це так би мовити довжина відрізка (стрижня), який рухається відносно СВ K'. Бо згідно з умовою задачі та з означенням довжини рухомого відрізка (стрижня) кінці відрізка фіксуються одночасово у СВ K', $\Delta t' = 0$.

Прирівнюючи (14) і (15), одержуємо:

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 = -\Delta x'^2, \quad (16)$$

або, враховуючи введені вище позначення, маємо:

$$c^2 \Delta t^2 + \Delta l'^2 = \Delta l_0^2. \quad (17)$$

Навіть із виразу (17) видно, що довжина відрізка $\Delta l'$ у СВ K' (який рухається відносно СВ K') менша, ніж довжина цього ж відрізка, але нерухомого у СВ K.

У СВ K' ми одночасово ($\Delta t' = 0$) реєструємо координати кінців відрізка $\Delta l' = \Delta x'$. А проміжок часу між цими подіями з точки зору СВ K визначається формулою різночасовості:

$$\Delta t = \Gamma(\Delta t' + \frac{V}{c^2}\Delta x') = \frac{\Gamma V}{c^2}\Delta x',$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + \dfrac{V \cdot \Delta x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}} = \frac{\dfrac{V \cdot \Delta x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}} = \frac{\dfrac{V \cdot \Delta l'}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}}, \qquad (18)$$

оскільки $\Delta t' = 0$.

Підставимо цей вираз для Δt у формулу (17) і одержуємо:

$$c^2 \left(\frac{\dfrac{V \cdot \Delta l'}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}} \right)^2 + \Delta l'^2 = \Delta l_0^2,$$

$$\Delta l'^2 \left(1 + \frac{B^2}{1 - B^2} \right) = \Delta l_0^2.$$

І нарешті:

$$\Delta l' = \Delta l_0 \sqrt{1 - B^2}. \qquad (19)$$

Відтак, у результаті використання цього методу доходимо висновку, що лорентцеве скорочення є наслідком структури 4-вимірного простору-часу й процедури вимірювання рухомого відрізка.

2.2.2. Спосіб, що ґрунтується на аналізі поширення променів у світловому годиннику [13; 25, с. 44-46; 37, с. 45-47].

Обґрунтуємо формулу лорентцевого скорочення, $l = l_0\sqrt{(1 - B^2)}$, за допомогою «світлового годинника», що розташований горизонтально (див. рис. 2.5).

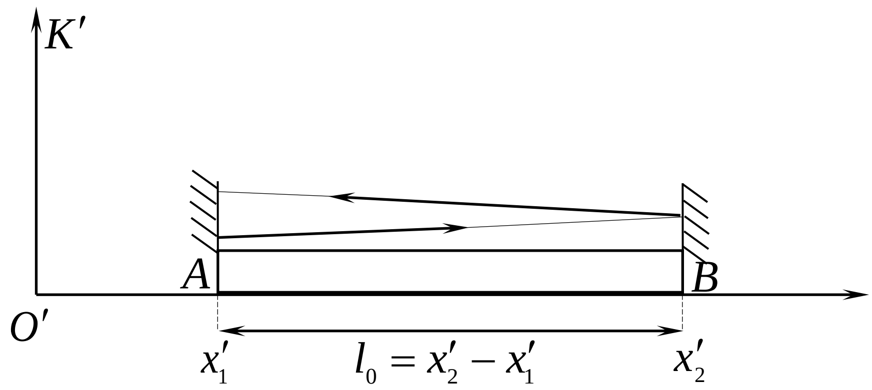


Рис. 2.5. Світловий годинник нерухомий в СВ K' й орієнтований вздовж напряму руху СВ K'

Світловий імпульс, випущений з одного кінця стрижня (A), відіб'ється від дзеркала на іншому кінці стрижня (B) и повернеться назад через інтервал часу τ, який вимірюється по годиннику СВ K'.

Власна довжина стрижня, l_0 зв'язана з часом τ очевидним співвідношенням:

$$c\tau = 2l_0.$$

Проміжок часу між цими ж подіями, але виміряними годинниками СВ K, позначимо через t. Інтервали часу τ і t зв'язані один з одним формулою (6):

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - B^2}},$$

де $B = \dfrac{V}{c}$.

Якщо t_1 - час руху світлового сигналу від A до B з точки зору СВ K, і t_2 - час руху сигналу в протилежному напрямку, то повний час дорівнює:

$$t = t_1 + t_2. \qquad (20)$$

На рис. 2.6 показані положення стрижня відносно СВ K в різні моменти часу:

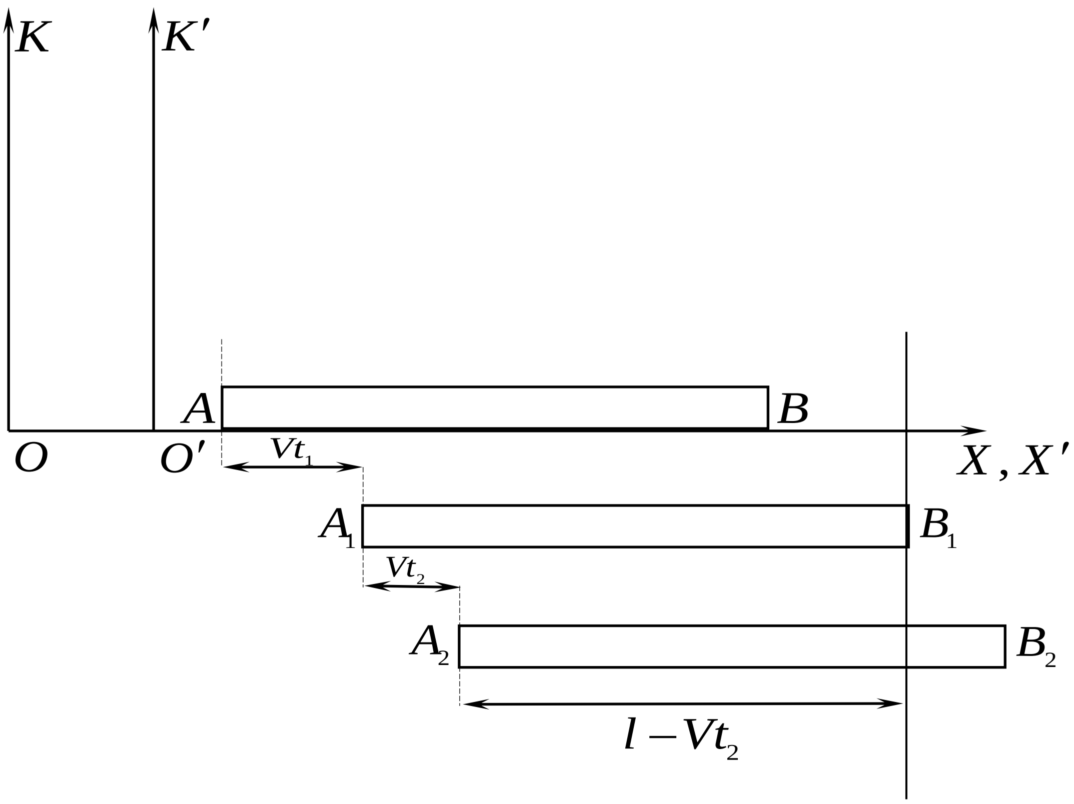


Рис. 2.6. Положення стрижня відносно СВ K в різні моменти часу

а) в момент спалаху світла (положення AB стрижня);

б) через час t_1 (положення A_1B_1);

в) через час $t_1 + t_2$ (положення стрижня A_2B_2).

За час t_1 стрижень змістився відносно системи К на відстань Vt_1. Шлях який проходить світловий імпульс при його русі від А до В, з точки зору спостерігача, зв'язаного з системою K, дорівнює $l + Vt_1$ (де l - довжина рухомого стрижня). Тому можна записати наступне рівняння

$$l + Vt_1 = ct_1.$$

Звідси:

$$t_1 = \frac{l}{c - V}.$$

При русі світлового імпульсу назад від B до A пройдений ним шлях в СВ K дорівнює $l - Vt_2$, оскільки за час t_2 точка A зміститься на відстань Vt_2 назустріч світловому імпульсу. Тому:

$$l - Vt_2 = ct_2.$$

Звідси:

$$t_2 = \frac{l}{c+V}.$$

Повний час руху світлового імпульсу від A до B а потім від B до A за годинником СВ K дорівнює:

$$t = t_1 + t_2 = \frac{2cl}{c^2 - V^2} = \frac{2l}{c}\frac{1}{1-\frac{V^2}{c^2}}. \quad (21)$$

Згідно ж з формулою (6):

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{2l_0}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \quad (22)$$

Прирівнюючи (21) і (22), ми отримуємо відношення:

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

або:

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}. \quad (23)$$

2.2.3. Скорочення повздовжніх розмірів рухомих тіл як наслідок перетворень Лорентца [25, с. 27].

Нехай в СВ K' вздовж вісі $O'X'$ знаходиться в спокої стрижень, координати початку і кінця якого відповідно дорівнюють x_1' та x_2' (рис. 2.7).

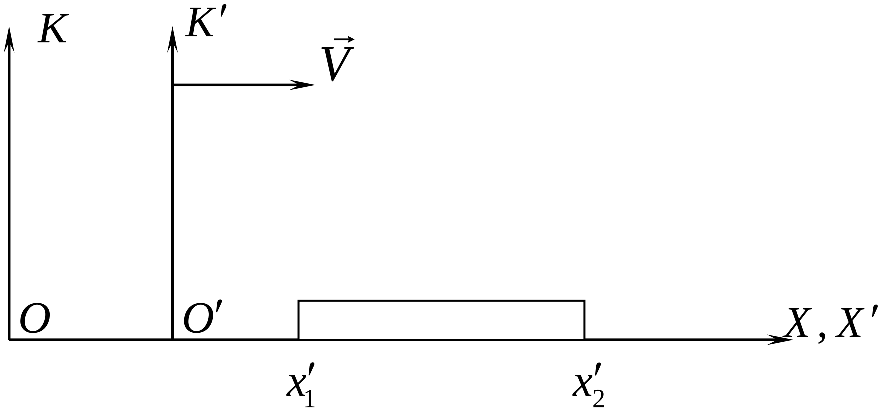


Рис. 2.7. Обґрунтування лорентцевого скорочення на основі перетворень Лорентца

Треба знайти довжину цього стрижня з точки зору СВ K.

Використаємо перетворення Лорентца:

$$x'_1 = \Gamma(x_1 - Vt_1) \tag{24}$$

$$x'_2 = \Gamma(x_2 - Vt_2)\,. \tag{25}$$

Означення: Довжина рухомого стрижня в СВ K - це різниця між координатами кінця і початку цього стрижня, *які вимірюються в один і той же момент часу за годинниками СВ* K.

Тобто, щоб знайти довжину стрижня в СВ K, необхідно зафіксувати координати його x_1 та x_2 одночасно, $t_1 = t_2$. Із формул (24) та (25) одержуємо:

$$l = x_2 - x_1 = \frac{1}{\Gamma}(x'_2 - x'_1) = l_0\sqrt{(1 - B^2)}, \tag{26}$$

де $l_0 = x'_2 - x'_1$ – власна довжина стрижня, тобто довжина його в тій СВ, у якій він знаходиться в спокої. Таким чином $l < l_0$.

Це говорить про відносність повздовжніх розмірів тіла.

Довжина тіла – це величина відносна, що залежить від системи відліку. Відносність довжини зумовлена тим, що довжина визначається співвідношенням двох об’єктів – стрижня та набору лінійок і годинників, за допомогою яких вимірюють довжину.

Тому повздовжня довжина тіла, одержана при використанні набору годинників і лінійок однієї СВ настільки ж реальна, як і довжина, що вимірюється набором годинників і лінійок іншої СВ.

$$l = l_0\sqrt{1-B^2}\ . \qquad (27)$$

Формула (27) описує так зване скорочення Лорентца.

2.2.4. Лорентцеве скорочення як наслідок відносності одночасності. Скорочення Лорентца можна також отримати аналізуючи проміжок часу між спалахами лампочок Δt в СВ K, при умові що на кінцях нерухомого в СВ K' стрижня лампочки спалахнули одночасно (в СВ K') [37, С. 71-72; 25, с. 28-29].

Отже, знайдемо довжину рухомого стрижня по одночасному в СВ K' спалаху лампочок на кінцях нерухомого в СВ K' стрижня й покажемо, що відносність довжин – прямий наслідок відносності одночасності.

Дійсно, нехай в СВ K' вздовж вісі $O'X'$ знаходиться нерухомий стрижень. Власна довжина його, очевидно, дорівнює:

$$l_0 = x_2' - x_1' = \Delta x'\ .$$

Нехай на кінцях стрижня знаходиться лампочки і нехай вони одночасно спалахують в СВ K' ($\Delta t' = 0$) (рис. 2.8).

Ці дві події будемо реєструвати в СВ K. Знайдемо відстань між точками, в яких відбулися ці дві події з точки зору спостерігача СВ K. Використовуючи перетворення Лорентца, одержуємо:

$$\Delta x = \Gamma(\,\Delta x' + V\Delta t'\,) = \Gamma\Delta x' = \frac{l_0}{\sqrt{1-B^2}} = l_0 \cdot \Gamma\ . \qquad (28)$$

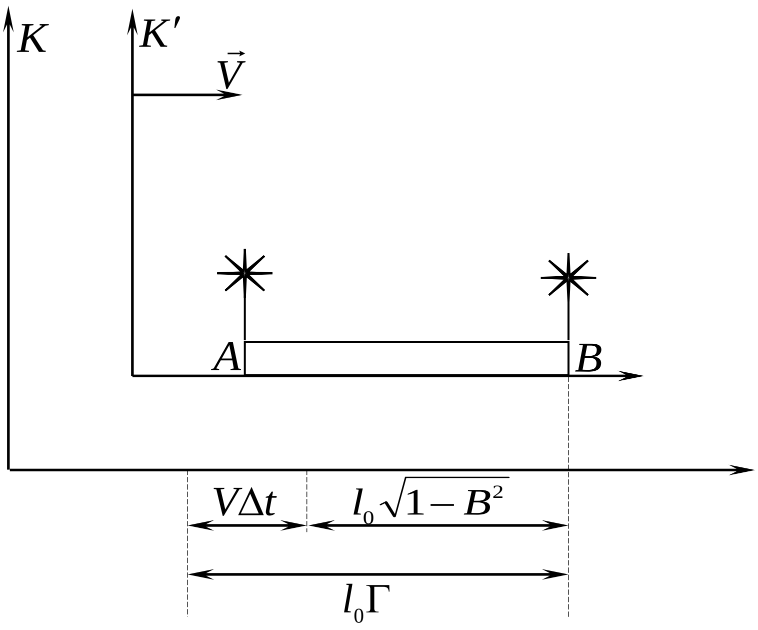


Рис. 2.8. В СВ K' вздовж вісі $O'X'$ знаходиться нерухомий стрижень, а на кінцях стрижня знаходиться лампочки, які одночасно спалахуують в СВ K' ($\Delta t' = 0$)

Оскільки $\Gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-B^2}} > 1$ при будь-якому значенні швидкості СВ K' (швидкості стрижня V), то, як бачимо із (28), $\Delta x > l_0$.

Але в формулі (28) Δx це не довжина стрижня в СВ K. Щоб знайти довжину стрижня в системі відліку K необхідно знайти **координати кінців стрижня в СВ K в один і той же момент часу за годинниками СВ K**. Тобто, одночасно зафіксувати координати т. A та т. B.

Але одночасні в СВ K' події відбуваються в системі в СВ K з відносним запізненням:

$$\Delta t = \Gamma(\,\Delta t' + \frac{V}{c^2}\Delta x'\,) = \frac{\Gamma V}{c^2}\Delta x'. \qquad (29)$$

Тобто, $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$, де t_1 – момент спалаху лампочки в т. A, t_2 момент спалаху лампочки т. B. З точки зору спостерігача в СВ K спочатку спостерігається спалах лампочки в т. A, а потім, через проміжок часу Δt, (29), спалахує і лампочка, яка знаходиться в т. B.

І за цей проміжок часу лівий кінець (т. A) стрижня в напрямі руху пройде відрізок (рис. 2.8):

$$V\Delta t = \Gamma \frac{V^2}{c^2} l_0 .$$

Таким чином, довжина рухомого стрижня буде менша ніж Γl_0 на величину $V\Delta t$ (рис. 2.8). А шукана довжина стрижня в СВ K дорівнює:

$$l = \frac{l_0}{\sqrt{1-B^2}} - \Gamma \frac{V^2}{c^2} l_0 = l_0 \sqrt{1-B^2} \ . \qquad (30)$$

2.2.5. Знаходження довжину рухомого стрижня по його відомій швидкості відносно СВ K [115 С. 146-147; 13; 24; 25].

Нехай в СВ K знаходиться годинник в т. A (рис. 2.9). Мимо цього годинника пролітає зі швидкістю V стрижень. Очевидно, що довжина рухомого стрижня дорівнює $l = V\Delta t$, де Δt – час прольоту стрижня мимо т. A.

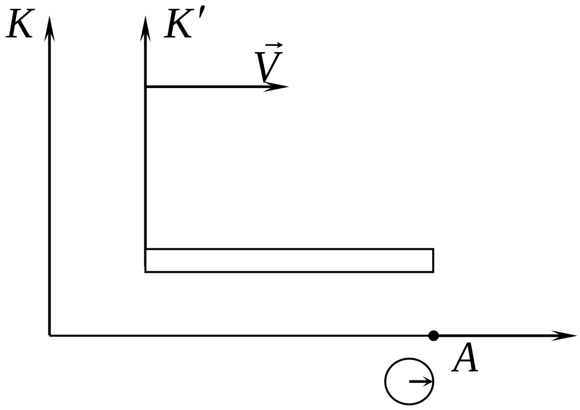


Рис. 2.9. В СВ K мимо годинника A пролітає зі швидкістю V стрижень

Власна довжина стрижня, очевидно, дорівнює:

$$l_0 = V\Delta t' ,$$

де $\Delta t'$- час прольоту стрижня мимо точки A за годинником СВ K', або іншими словами час польоту т. A мимо стрижня за годинником СВ K'.

Але для спостерігача, зв'язаного з СВ K', час прольоту буде іншим, ніж час прольоту його мимо т. A за годинником СВ K, а саме:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-B^2}} . \tag{31}$$

Формула (31) має саме такий вигляд, а не (6) тому, що годинник із СВ K, який показав Δt, рухається відносно СВ K' і його покази порівнюються з показами двох годинників СВ K'.

Для відношення довжин стрижня в СВ K та СВ K' маємо:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{V\Delta t}{\Delta t' V} = \sqrt{1-B^2} .$$

Тобто, знову ми одержали формулу лорентцевого скорочення:

$$l = l_0\sqrt{1-B^2} .$$

2.2.6. Обґрунтування формули лорентцевого скорочення методом k-коефіцієнта [25, с. 34; 37] (див. також [24]).

Тобто знайдемо довжину рухомого стрижня користуючись методом k–коефіцієнта. Нехай вздовж вісі $O'X'$ знаходиться нерухомий стрижень. Власна довжина якого $l_0 = x_2' - x_1'$. На кінцях стрижня закріплені напівпрозорі дзеркала D та N (рис. 2.10).

Як завжди, в початковий момент $t = t' = 0$ початки координат СВ K і K' співпадають.

На рис. 2.10 показано: t_1 – момент посилки світлового сигналу до дальнього (переднього) кінця стрижня;

t_4– момент часу, коли цей сигнал повернувся до СВ K після відбиття від переднього кінця стрижня;

t_2 і t_3 – відповідно моменти посилки світлового сигналу до ближнього (заднього) кінця і прийому цього сигналу в точці O після відбиття.

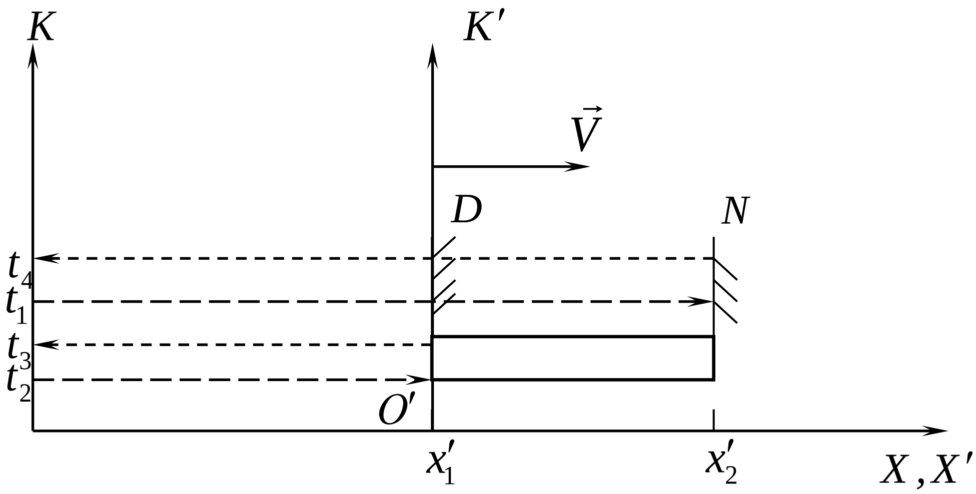


Рис. 2.10. Обґрунтування формули лорентцевого скорочення $l = l_0\sqrt{1 - B^2}$ за допомогою методу k – коефіцієнта

Довжина стрижня в СВ K – це різниця координат початку і кінця стрижня $x_2 - x_1$, зафіксованих одночасно в СВ K. Згідно з означенням (процедура синхронізації), сигнали одночасно відіб'ються від переднього та заднього кінців стрижня за умови:

$$\frac{t_2 + t_3}{2} = \frac{t_1 + t_4}{2}. \qquad (32)$$

Тоді координати переднього та заднього кінців стрижня відповідно дорівнюють:

$$x_2 = \frac{t_4 - t_1}{2} \cdot c, \;\; x_1 = \frac{t_3 - t_2}{2} \cdot c.$$

Звідси одержуємо довжину стрижня в СВ K:

$$l = x_2 - x_1 = \frac{c}{2}(t_4 - t_1 - t_3 + t_2). \qquad (33)$$

Але в т. x_1' спостерігач в СВ K' приймає перший (випущений в момент t_1 в СВ K) сигнал за своїм годинником в момент kt_1. В т. x_1' спостерігач в СВ K' приймає цей вже відбитий від т. x_2' сигнал в момент $\frac{t_4}{k}$ (оскільки, сигнал, який в СВ K приймається в момент t_4, повинен бути випущений з т.

x_1' за годинником СВ K' в момент $\frac{t_4}{k}$ (дійсно, згідно з методом k–коефіцієнту: $t_4 = k\frac{t_4}{k}$).

Ці пояснення дають змогу записати власну довжину стрижня через моменти приходу першого прямого і відбитого сигналу в т. x_1'.

Справді, $(\frac{t_4}{k} - kt_1)$ – час поширення світлового сигналу від т. x_1' до т. x_2' і назад по годиннику СВ K'. Тому власна довжина стрижня:

$$\frac{(\frac{t_4}{k} - kt_1)c}{2} = l_0. \qquad (34)$$

З іншого боку, якщо 2-й сигнал був випущений в момент t_2, то, відбившись від т. x_1', в СВ K він прийде в момент $t_3 = k^2 t_2 = k \cdot kt_2$.

Таким чином, довжина стрижня в СВ K, з урахуванням (32) та (33) дорівнює:

$$l = \frac{c}{2}(t_4 - t_1 - t_3 + t_2) = c(t_2 - t_1), \qquad (35)$$

а власна довжина його, з урахуванням (34) та (32) може бути подана у вигляді:

$$l_0 = \frac{c}{2}(\frac{t_4}{k} - kt_1) = \frac{c}{2}(\frac{t_2 + t_3 - t_1}{k} - kt_1) = \frac{c}{2k}(k^2 + 1)(t_2 - t_1). \qquad (36)$$

І нарешті, зіставляючи (35) та (36), одержуємо:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{2k}{k^2 + 1} = \sqrt{1 - B^2}, \quad l = l_0\sqrt{1 - B^2}.$$

2.3. Деякі способи обґрунтування перетворень Лорентца

Огляд науково-методичної літератури свідчить про використання різних, в залежності від рівня складності та узагальнення, способів обґрунтування ПЛ [24]. Важливим складником розвитку критичного мислення суб'єктів навчальної діяльності є посилення уваги до самостійної роботи.

Тому ми пропонуємо використовувати як для самостійного опрацювання так і на факультативних заняттях наступні способи обґрунтування ПЛ.

2.3.1. Обґрунтування перетворень Лорентца методом, що ґрунтується на застосуванні формули лорентцевого скорочення та формального використання процедури вимірювання довжини рухомого стрижня.

Розглянемо доведення перетворень Лорентца способом, який ґрунтується на застосуванні формули лорентцевого скорочення та дещо формального використання процедури вимірювання довжини рухомого стрижня [15; 25; 34].

Розглянемо дві інерціальні системи відліку K і K'. Нехай система K' рухається відносно K зі швидкістю $\vec{V}$ (Рис. 2.11).

Нехай в момент часу t (в системі K) в точці з координатами x, y сталася подія A, наприклад, спалахнула лампочка. Треба визначити координати x' i y' і момент часу t' цієї події в системі відліку K'.

Відомо, що $y = y'$, оскільки рух здійснюється в напрямі осі OX .

Координата x' точки A характеризує власну довжину відрізка $O'P$, нерухомого в системі K'.

Довжина цього відрізка, $O'P$, в системі відліку K (де відлік довжини цього відрізку відбувається в момент t) дорівнює $x - Vt$ (Рис. 2.11).

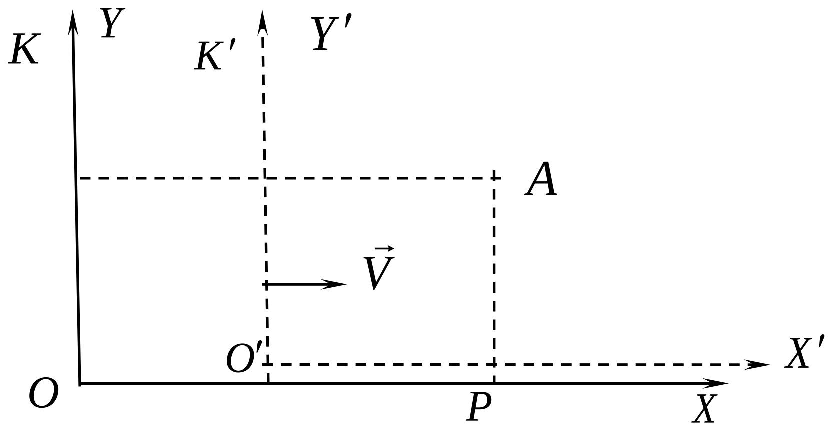


Рис. 2.11. Щодо обґрунтування перетворень Лорентца (згідно з [15]).

Співвідношення між власною довжиною $O'P$, x', та довжиною цього відрізка в системі відліку K, $x-Vt$, визначається виразом (скорочення Лорентца):

$$x - Vt = x'\sqrt{1-B^2},$$

де $B = \dfrac{V}{c}$.

Звідси знайдемо x', координату точки A. Вона дорівнює:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-B^2}}. \qquad (37)$$

З іншої сторони, координата x характеризує власну довжину відрізка OP, нерухомого в системі K.

Згідно з означенням довжини рухомого стрижня, довжина цього відрізка в СВ K', де вимірювання проводиться в момент t', рівна $x' + Vt'$. Тоді, згідно з формулою скорочення Лорентца, маємо наступне співвідношення між цими довжинами:

$$x' + Vt' = x\sqrt{1-B^2}.$$

Звідси одержуємо значення координати x як функцію x' та t':

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1-B^2}}. \qquad (38)$$

Отримані формули (37) і (38) дозволяють встановити зв'язок між моментами часу настання $t \ i \ t'$ події A в обох системах відліку.

Для цього слід розв’язати систему двох рівнянь відносно «невідомих» величин $t \ i \ t'$. У результаті отримаємо:

$$t'(x,t)=\frac{t-\frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1-B^2}}, \qquad t(x',t')=\frac{t'+\frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1-B^2}}. \tag{39}$$

Тобто сукупність рівнянь (37) (38) (39) разом з $y=y'$ визначають перетворення Лорентца.

Для чіткого усвідомлення та розуміння цього методу необхідно знати зміст явища лорентцевого скорочення. А саме, чому стержень (чи відрізок), який рухається вздовж своєї довжини, має довжину меншу власної довжини.

2.3.2. Метод, що ґрунтується на інваріантності квадрату світлоподібного інтервалу з точки зору двох інерціальних систем відліку.

Розглянемо дещо інше обґрунтування перетворень Лорентца [24]. Це – спосіб, оснований на інваріантності квадрату світлоподібного інтервалу між двома подіями з точки зору двох інерціальних систем відліку.

Нехай x,y,z,t і x',y',z',t' - координати і час довільної події в інерціальних системах відліку K і K', а $\vec{V}$ – швидкість їх відносного руху.

Для встановлення аналітичного зв’язку між величинами (x,y,z,t) і (x',y',z',t') розглянемо розповсюдження сферичної електромагнітної хвилі в обох системах відліку. Виберемо за початок відліку часу $t=0$ той момент, в який початок координат системи K' співпадав з початком координат системи K.

Нехай в момент $t=0$ з початку координат почала поширюватися сферична електромагнітна хвиля. В системі K рівняння хвильової поверхні має вигляд:

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0. \tag{40}$$

Оскільки, згідно з принципом відносності Ейнштейна, це рівняння хвильової поверхні і швидкість поширення електромагнітної хвилі повинні бути однаковими в усіх інерціальних системах відліку, то можна записати рівняння цієї сферичної електромагнітної хвилі в системі K':

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 \qquad (41)$$

Формули перетворення координат і часу не повинні порушувати співвідношення (40) і (41), а також бути лінійними. Вимога лінійності пов'язана з однорідністю простору. Нагадаємо ще раз, що однорідність простору означає рівноправність усіх точок простору, тобто в просторі не існує будь-яких точок, відмінних за властивостями (детальніше див. [24; 25; 37]).

У зв'язку з тим, що рух системи K' відбувається тільки вздовж вісі OX , перетворення координат y та z повинно мати вигляд:

$$y = y; \quad z' = z\,. \qquad (42)$$

Якщо в момент часу $t = 0$ початки систем координат K і K'співпадали, то координата площини $x' = 0$ в системі K записується у вигляді: $x = Vt$. Тому в загальному випадку (для довільної точки простору СВ K') можна записати:

$$x' = \alpha(V)(x - Vt), \qquad (43)$$

де коефіцієнт $\alpha(V)$ залежить лише від швидкості відносного руху.

Представимо t' у вигляді лінійної однорідної функції x і t :

$$t' = \beta t + \gamma x \qquad (44)$$

Подання залежності часу t' у вигляді лінійної однорідної функції тільки змінних x і t можна розглядати як наслідок однорідності простору і часу, причому без лінійних доданків пропорційних y і z. Відсутність доданків пропорційних y і z у виразі (44) зумовлена тим, що при $x = 0$ *і* $t = 0$ ми мали би різні значення t' в різних точках площини $x' = 0$.

Для визначення коефіцієнтів α, β, γ необхідно підставити (43) і (44) в (41). Отримаємо:

$$\alpha^2(x - Vt)^2 + y^2 + z^2 - c^2(\beta t + \gamma x)^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

Ця рівність має місце при будь-яких значеннях координат x, y, z, t, що може бути лише за умови рівності коефіцієнтів при x^2, t^2 і xt. Тобто, маємо:

$$a^2 - c^2\gamma^2 = 1,$$

$$a^2V^2 - c^2\beta^2 = -c^2,$$

$$a^2V + c^2\beta\gamma = 0.$$

З цих трьох рівнянь знаходимо невідомі величини α, β, γ:

$$\alpha = \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

$$\gamma = \frac{\alpha V}{c^2} = -\frac{V}{c^2\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

Підставляючи значення α, β, γ в формули перетворення координат (43) і (44) та враховуючи (42), отримаємо перетворення Лорентца:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \; y' = y; z' = z; \; t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \qquad (45)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (45) відносно x, y, z, t та отримаємо обернені ПЛ:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}; \; y = y'; \; z = z'; \; t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \qquad (46)$$

2.3.3. Спрощений метод обґрунтування перетворень Лорентца, (модифікація* методу *2.3.2), оскільки до уваги береться тільки один вимір.

Для цього розглянемо рис. 2.12. Вихідні умови для систем відліку такі ж, як і для рис. 2.1. Точка $x' = 0$ в СВ K має координату $x = Vt$.

Тоді очевидно, що для довільної іншої точки СВ K' маємо:

$$x' = \alpha'(x - Vt). \tag{47}$$

З іншого боку, точка $x = 0$ (точка O, початок координат СВ K) з позиції СВ K' має координату $x' = -Vt'$ (див. Рис. 2.12). Тому для будь-якої іншої точки СВ K можна записати:

$$x = \alpha(x' + Vt'). \tag{48}$$

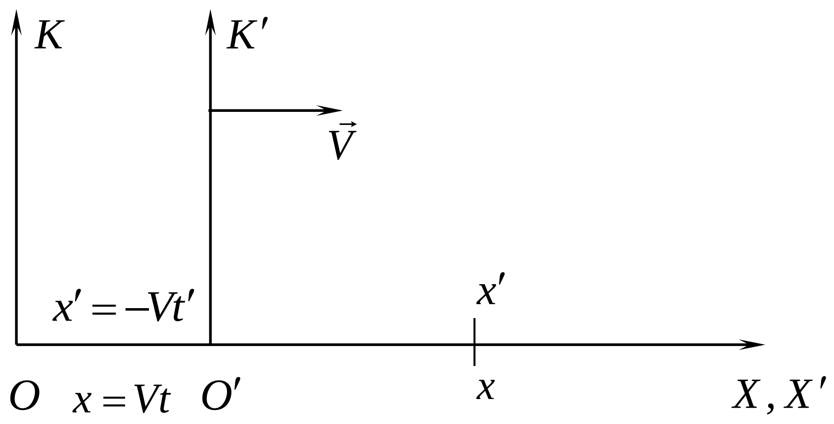


Рис. 2.12. Положення початку координат кожної із систем відліку відносно іншої

Виходячи із принципу відносності, коефіцієнти α та α' повинні бути однакові:

$$\alpha = \alpha'.$$

Дійсно, нехай в СВ K' вздовж осі $O'X'$ знаходиться стержень одиничної довжини. Тобто координати кінців його такі:

$$x_1' = 0,\ x_2' = 1,\ x_2' - x_1' = 1.$$

Тоді в СВ K в один і той же момент часу ($t_1 = t_2$) координати кінців стержня та довжина цього стержня будуть:

$$x_1' = \alpha'(x_1 - Vt_1),$$

$$x_2' = \alpha'(x_2 - Vt_2),$$

$$\frac{x_2' - x_1'}{\alpha'} = x_2 - x_1.$$

Оскільки $x_2' - x_1' = 1$, то одержуємо:

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\alpha'}.$$

Це з точки зору системи відліку K.

Нехай тепер в СВ K знаходиться такий же одиничний стержень. Тобто, $x_2 - x_1 = 1$. Тоді з точки зору СВ K' довжина його буде (при виконанні умови $t_1' = t_2'$):

$$\frac{(x_2 - x_1)}{\alpha} = x_2' - x_1'.$$

Оскільки, згідно з перетвореннями Лорентца:

$$x_1 = \alpha(x_1' + Vt_1')$$

$$x_2 = \alpha(x_2' + Vt_2'),$$

тому $x_2' - x_1' = \dfrac{1}{\alpha}$.

Із рівноправності СВ K і СВ K' випливає, що:

$$x_2 - x_1 = x_2' - x_1',$$

тобто $\dfrac{1}{\alpha'} = \dfrac{1}{\alpha}$, а отже і $\alpha = \alpha'$.

Із цих двох співвідношень, $x' = \alpha(x - Vt)$ та $x = \alpha(x' + Vt')$, можна одержати:

$$t' = \gamma \cdot t + \delta \cdot x, \tag{49}$$

де $\gamma = \alpha$, $\delta = \dfrac{1-\alpha^2}{\alpha V}$.

Тобто, виходячи із принципу відносності та другого постулату Ейнштейна, а також однорідності простору і часу ми дійшли висновку, що між t і t' повинна бути лінійна залежність.

Зокрема, якби вона була нелінійна, наприклад, $t' \sim t^2$, то довільний рівномірний рух в одній системі буде прискореним в іншій системі відліку. Такий висновок суперечить самому поняттю інерціальної системи відліку.

Розглянемо відправлення світлового сигналу із початку координат СВ K і СВ K' в ту мить, коли вони співпадають. Тоді, через відповідні проміжки часу, світловий сигнал досягне точок з координатами, відповідно, на осі OX та $O'X'$:

$$x' = ct' \quad x = ct.$$

Підставимо останні вирази в систему рівнянь:

$$\begin{aligned} x' &= \alpha'(x - Vt) \\ x &= \alpha(x' + Vt'), \end{aligned} \tag{50}$$

й отримуємо:

$$\begin{aligned} ct' &= \alpha(ct - Vt) = \alpha t(c - V) \\ ct &= \alpha(ct' + Vt') = \alpha t'(c + V) \end{aligned}.$$

З останньої системи рівнянь знаходимо:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - B^2}},$$

де $B = \dfrac{V}{c}$.

І нарешті, із (49) та (50) одержуємо перетворення Лорентца.

Очевидно, в основу цього методу обґрунтування ПЛ покладено інваріантність рівняння хвилевої поверхні сферичної електромагнітної хвилі в двох довільних системах відліку K і K'.

2.3.4. Метод k-коефіцієнта та перетворення Лорентца.

Користуючись методом k-коефіцієнта, ми можемо одержати перетворення Лорентца.

Нехай ми маємо деяку подію. Оскільки вона є довільною, то виберемо її такою, що наступає (відбувається) в момент приходу світлового сигналу в т. P (Рис. 2.13). В початковий момент часу $t = t' = 0$, як завжди, початки координат СВ K та СВ K' співпадають.

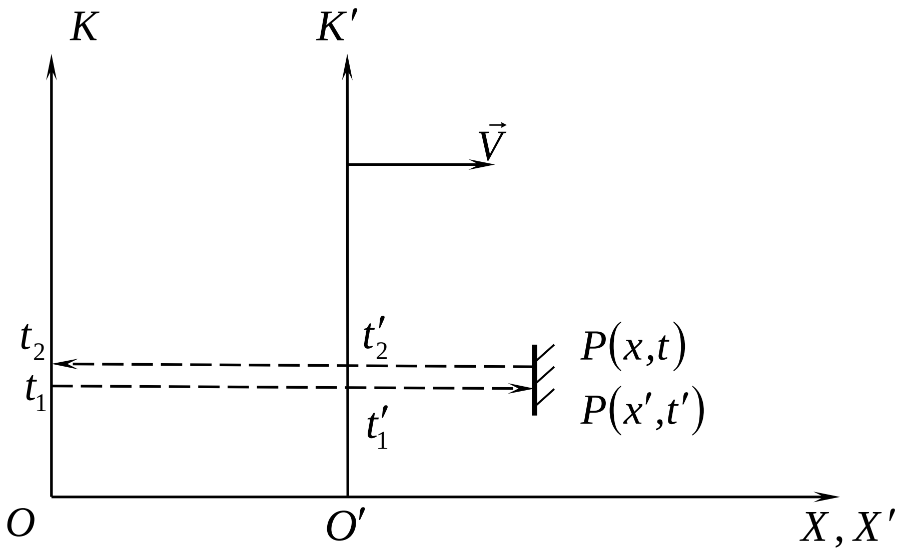


Рис. 2.13. Пояснення щодо знаходження перетворень Лорентца за допомогою методу k - коефіцієнта

Нехай в момент t_1 за годинником СВ K послали сигнал в напрямі СВ K'. Спостерігач, який знаходиться в початку координат СВ K' отримає цей сигнал в момент $t_1' = kt_1$.

І одразу посилає його в точку $P(x',t')$, де знаходиться дзеркало, і після відбиття, цей сигнал знову повертається в початок СВ K' в момент t_2' (Рис. 2.13).

В т. O спостерігач СВ K зареєструє повернення світлового сигналу за своїм годинником в момент $t_2 = kt_2'$, де t_2 – момент приходу в т. O відбитого від т. $P(x,t)$ сигналу за годинником СВ K.

Тоді, згідно з процедурою синхронізації, для моменту настання події (прибуття сигналу в т. $P(x,t)$), з точки зору СВ K, можна записати:

$$t = t_1 + \frac{x}{c},\ t = t_2 - \frac{x}{c}. \tag{51}$$

Аналогічно визначається момент настання події (прибуття сигналу в т. $P(x',t')$) з точки зору СВ K':

$$t' = t_1' + \frac{x'}{c}. \tag{52}$$

$$t' = t_2' - \frac{x'}{c}. \tag{53}$$

(До речі використання формули $t = \dfrac{(t_1 + t_2)}{2}$ дає той самий результат).

Звідси одержуємо такі співвідношення:

$$t_1 = t - \frac{x}{c},\ t_2 = t + \frac{x}{c},$$

$$t_1' = t' - \frac{x'}{c},\ t_2' = t' + \frac{x'}{c}.$$

Але, згідно з методом k - коефіцієнта:

$$t_1' = kt_1,\ t_2 = kt_2'. \tag{54}$$

Тому попередні співвідношення (54) набувають вигляду:

$$t' - \frac{x'}{c} = k(t - \frac{x}{c}). \tag{55}$$

$$t' + \frac{x'}{c} = \frac{1}{k}(t + \frac{x}{c}). \tag{56}$$

Тепер ми можемо знайти зв’язок між координатами однієї і тієї ж події з точки зору СВ K і СВ K'. Додаємо, а потім віднімаємо ліві і праві частини (55) і (56), і в результаті одержуємо:

$$t' = \frac{k^2+1}{2k}t - \frac{k^2-1}{2ck}x$$

$$x' = x\left(\frac{1+k^2}{2k}\right) - t\left(\frac{k^2-1}{2k}\cdot c\right).$$

Але, оскільки $\frac{k^2-1}{2ck} = \Gamma\frac{V}{c^2}$, а $\frac{k^2+1}{2k} = \Gamma$, то

$$t'(x,t) = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1-B^2}}. \qquad (57)$$

$$x'(x,t) = \Gamma(x - Vt). \qquad (58)$$

Тобто, ми одержали перетворення Лорентца (57) (58).

2.4. Деякі методи обґрунтування релятивістських формул додавання швидкостей

У більшості підручників з фізики для ЗЗСО відсутнє будь-яке обґрунтування РФДШ. Подається без доведення лише одна формула для повздовжньої складової швидкості та деякі задачі на використання цієї формули [12; 13; 14; 18; 35].

Такий підхід до організації навчально-пізнавальної діяльності не відповідає сучасним викликам суспільства, яке зорієнтоване на формування особистості, здатної мислити критично.

Тому звертаємо увагу, що в навчально-методичній літературі запропоновано декілька методів обґрунтування РФДШ, причому, на наше переконання, деякі з них можна назвати екзотичними і в той же час не позбавленими певної креативності [6; 30-33]). Так, оригінальність способу доведення формул додавання швидкостей за Малініним О.М полягає в пропозиції обґрунтування не тільки повздовжніх компонентів швидкості, але й її поперечних складових.

Ми вважаємо, що в сучасній практиці навчання СТВ можна використовувати наступні методи обґрунтування РФДШ.

2.4.1. Спосіб, що ґрунтується на використанні перетворень Лорентца

Це найбільш простий і доступний для учнів ЗЗСО спосіб доведення РФДШ. Але попередньо необхідно або вивести ПЛ, або записати та пояснити їх зміст.

Розглянемо випадок напряму швидкості вздовж вісі OX. Нехай за деякий малий інтервал часу Δt у нерухомій ІСВ K координата тіла (матеріальної точки) змінилася на Δx, відповідно в рухомій ІСВ K' за малий інтервал часу $\Delta t'$ координата змінилася на $\Delta x'$. Тоді з перетворень Лорентца маємо:

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + V \cdot \Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V_x^2}{c^2}}}, \qquad \Delta t = \frac{\Delta t' + \frac{V}{c^2}\Delta x'}{\sqrt{1 - \frac{V_x^2}{c^2}}},$$

де ми врахували проекцію швидкості V, з якою ІСВ K' рухається відносно нерухомої ІСВ K (рис. 2.13а)

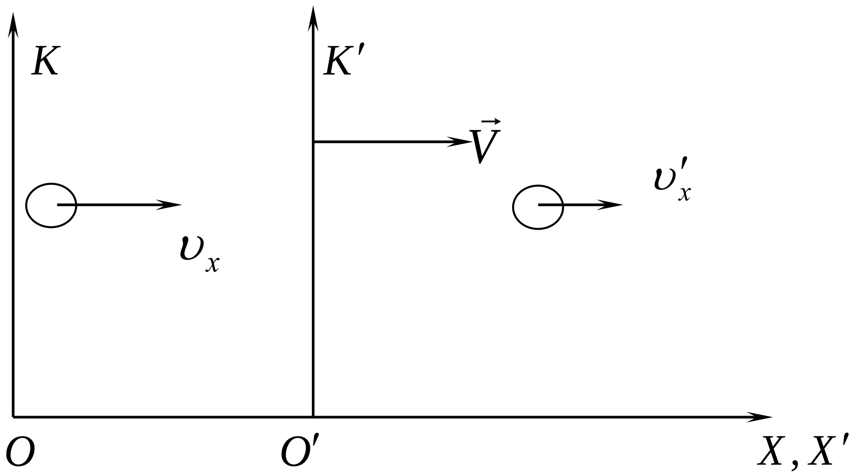


Рис. 2.13а. Тіло в СВ K' має швидкість υ'_x. Тоді швидкість його в СВ K, υ_x, визначається формулою (58а) та (59)

Поділимо почленно перший з цих виразів на другий:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{\Delta x'+V\cdot\Delta t'}{\Delta t'+\dfrac{V}{c^2}\Delta x'}=\frac{\dfrac{\Delta x'}{\Delta t'}+V}{\Delta t'+\dfrac{V}{c^2}\dfrac{\Delta x'}{\Delta t'}}.$$

Урахуємо, що $\dfrac{\Delta x}{\Delta t}=\upsilon_x$ та $\dfrac{\Delta x'}{\Delta t'}=\upsilon'_x$ і отримуємо шуканий релятивістський закон перетворення швидкостей:

$$\upsilon_x=\frac{\upsilon'_x+V}{1+\dfrac{\upsilon'_x\cdot V}{c^2}}. \tag{58a}$$

У відповідності з перетвореннями Лорентца формула для зворотного переходу від нерухомої ІСВ K до рухомої ІСВ K' має вигляд:

$$\upsilon'_x=\frac{\upsilon_x-V}{1-\dfrac{\upsilon_x\cdot V}{c^2}}.$$

2.4.2. Спосіб доведення релятивістських формул додавання швидкостей та перетворень Лорентца (за О.М. Малиніним)

Для учнів ЗЗСО пропонуємо спрощений варіант цього способу виведення РФДШ [31] як для поперечних, так і для повздовжніх компонентів швидкості частинки та перетворень Лорентца. І саме в цьому ми вбачаємо більш узагальнений підхід до виведення РФДШ. А оригінальність цього способу визначається креативним використанням (59) для обґрунтування як РФДШ так і ПЛ.

Виходимо із відомої (або обґрунтованої певним способом) формули додавання для повздовжнього компонента швидкості. Зв'язок повздовжніх компонент швидкості υ_x, υ'_x описується формулою:

$$\upsilon_x=\frac{\upsilon'_x+V}{1+\dfrac{V}{c^2}\upsilon'_x}. \tag{59}$$

Урахуємо очевидні означення: $\upsilon_x \equiv \Delta x / \Delta t$, $\upsilon'_x \equiv \Delta x' / \Delta t'$ й одержимо:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' + V\Delta t'}{\Delta t' + \frac{V}{c^2}\Delta x'} \;.$$

Звідси, взагалі кажучи, можна припустити, що:

$$\Delta x = \Gamma\left(\Delta x' + V\Delta t'\right), \tag{60}$$

$$\Delta t = \Gamma\left(\Delta t' + \frac{V}{c^2}\Delta x'\right), \tag{61}$$

де величина Γ не залежить від величин $\Delta x / \Delta t$, $\Delta x' / \Delta t'$, а залежить лише від відносної швидкості систем відліку K та K', тобто $\Gamma = \Gamma(V)$.

Оскільки відносний рух СВ K' і СВ K має місце лише вздовж осей OX, $O'X'$, тоді отримуємо, що

$$\Delta y = \Delta y', \Delta z = \Delta z' \tag{62}$$

Тепер із співвідношень (61), (62) знаходимо (взявши осі $OY, O'Y'$):

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon'_y}{\Gamma\left(1 + \frac{V}{c^2}\upsilon'_x\right)}, \tag{63}$$

де $\upsilon_y \equiv \Delta y / \Delta t$, $\upsilon'_y = \Delta y' / \Delta t'$.

Для знаходження величини $\Gamma = \Gamma(V)$ слід використати постулат сталості швидкості світла (ПСШС), згідно з яким швидкість світла є інваріантною величиною. І тому застосуємо вирази (59) й (63) до інваріантної швидкості $\vec{c}$. Нехай її компоненти в СВ K' такі: $\upsilon'_x = 0$, $\upsilon'_y = c$.

Тоді згідно (59) й (63) в СВ K маємо такі компоненти швидкості світла: $\upsilon_x = V$, $\upsilon_y = c / \Gamma$.

Але згідно з ПСШС $\upsilon_x'^2 + \upsilon'^2_y = \upsilon_x^2 + \upsilon_y^2 = c^2 = inv$, тому підставивши у цей вираз значення компонент швидкості світла у СВ K, $\upsilon_x = V$, $\upsilon_y = c / \Gamma$, знаходимо:

$$\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2 / c^2}\,. \tag{64}$$

Тобто одержуємо релятивістську формулу додавання для поперечної компоненти швидкості :

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon_y' \sqrt{1 - V^2 / c^2}}{1 + \dfrac{V}{c^2}\upsilon_x'}. \tag{65}$$

Методичний коментар. На наш погляд, шлях визначення величини Γ, запропонований О.М. Малініним, не тільки методично оригінальний, але й довершений з естетичної та фізичної точок зору.

Тепер стосовно перетворень Лорентца.

Після знаходження величини Γ повністю визначаються перетворення Лорентца. Дійсно, якщо одна з подій є $O(0,0,0,0)$, та $O'(0,0,0,0)$, то $\Delta x = x$, $\Delta y = y$, $\Delta z = z$, $\Delta t = t$, і тоді з (60), (61) та (62) випливають перетворення Лорентца (46).

2.4.3. Обґрунтування формули перетворення повздовжньої компоненти швидкості (за О.М. Малініним)

Можна з самого початку припустити, що релятивістський закон додавання повздовжньої складової швидкості має вигляд [33]:

$$\upsilon_x = k(\upsilon_x' + V), \tag{66}$$

де υ_x', υ_x – швидкості частинок відповідно в СВ K' і СВ K, V – відносна швидкість обох СВ, k – невідомий множник, який слід визначити. При цьому при визначенні цього коефіцієнта ми повинні спиратися на загальнофізичні фундаментальні принципи.

По-перше, зрозуміло, що коефіцієнт k не може бути просто числом, тому що тоді із (66) ні за яких умов не можна одержати класичну формулу додавання швидкостей $\upsilon_x = \upsilon'_x + V$.

Дійсно, оскільки, згідно з принципом відповідності при $lim\, k_{c\to\infty} = 1$, ми повинні отримати класичний закон додавання швидкостей.

По-друге, через те, що величина k не має розмірності, в неї повинні входити відношення швидкостей. Але яких? Якщо величини υ'_x, V входять у шуканий закон (66) симетрично (рівноправно, як і в класичному законі) і при граничному переході порівнюються з фундаментальною швидкістю c, то коефіцієнт k повинен мати доданки типу: $\frac{\upsilon'_x}{c}, \frac{V}{c}, \frac{\upsilon'_x}{c}\cdot\frac{V}{c}$.

Беручи до уваги умову $lim\, k_{c\to\infty} = 1$, можна припустити, що коефіцієнт k повинен мати вигляд:

$$k = \left(1 + \frac{\upsilon'_x}{c} + \frac{V}{c} + \frac{\upsilon'_x \cdot V}{c^2}\right)^n, \qquad (67)$$

де величина $n = const \neq 0$.

По-третє, будь-який закон перетворення швидкості повинен задовольняти очевидним вимогам:

а) $\upsilon_x = V$ при $\upsilon'_x = 0$;

б) $\upsilon_x = \upsilon'_x$ при $V = 0$.

Тоді з (67) випливає, що коефіцієнт k, відповідно, повинен мати значення:

$$\text{а) } k = \left(1 + \frac{V}{c}\right)^n; \text{ б) } k = \left(1 + \frac{\upsilon'_x}{c}\right)^n.$$

Але в цьому випадку виникає протиріччя між (66) з такими коефіцієнтами k та принципом відповідності.

Це протиріччя спростовується, якщо в виразі (67) прибрати члени $\frac{\upsilon'_x}{c}$ та $\frac{V}{c}$. Тоді (67) набуває вигляду:

$$k = \left(1 + \frac{\upsilon'_x \cdot V}{c^2}\right)^n \qquad (68)$$

Але згідно з другим постулатом СТВ: при $\upsilon'_x = c$ ми повинні із шуканого релятивістського закону додавання повздовжньої складової швидкості (66) отримати $\upsilon_x = c$.

Це приводить до того, що у виразі (66) коефіцієнт k необхідно взяти у вигляді $k = \left(1 + \frac{V}{c}\right)^{-1}$.

А із (68) при цьому одержуємо значення k вигляду $k = \left(1 + \frac{V}{c}\right)^n$.

Отже, при $n = -1$ коефіцієнту k необхідно надати виразу:

$$k = \left(1 + \frac{\upsilon'_x \cdot V}{c^2}\right)^{-1}. \qquad (69)$$

Підставимо (69) в (66) і отримуємо остаточну релятивістську формулу додавання (за Малініним О.М. – формулу перетворення швидкості) для повздовжнього компоненту швидкості:

$$\upsilon_x = \frac{\upsilon'_x + V}{1 + \frac{\upsilon'_x V}{c^2}}. \qquad (70)$$

2.4.4. Спосіб обґрунтування релятивістських формул додавання швидкостей на основі аналізу поширення світлового променю у світловому годиннику

Шляхом узагальнення процесу поширення світла у світловому годиннику обґрунтуємо релятивістські формули додавання швидкостей для поперечних складових швидкості. Нехай світловий годинник AD рухається зі швидкістю $\vec{V}$ вздовж осі OX СВ K (Рис. 2.14). Тобто СВ K' є власною системою відліку для світлового годинника.

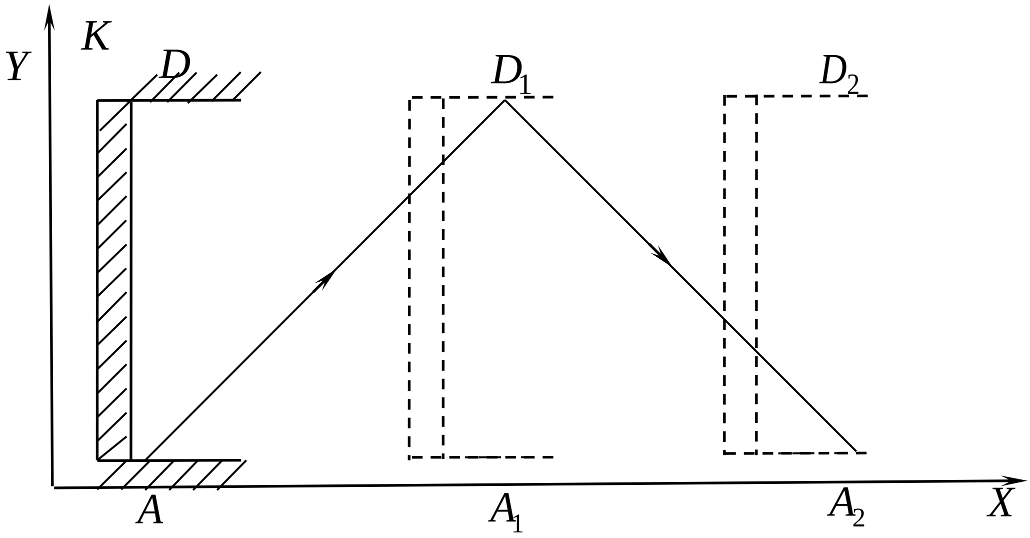


Рис. 2.14. Світловий промінь у «світловому годиннику» в СВ K розповсюджується вздовж ломаної лінії AD_1A_2

З точки зору СВ K швидкість світла вздовж променю AD_1 (яка дорівнює c) є геометричною сумою швидкостей світла вздовж осі OX та поперечної складової швидкості світла вздовж осі OY ($c_x = V$):

$$c^2 = V^2 + c_y^2.$$

Тому ця поперечна складова швидкості світла дорівнює:

$$c_y = \sqrt{c^2 - V^2} = c\sqrt{1 - B^2}\,, \qquad (71)$$

де $B = \dfrac{V}{c}$.

Формулу (71) ми отримали за умови, коли у СВ K' «світловий годинник» не рухається вздовж осі $O'X'$. Тобто СВ K' є власною системою відліку для нього.

Пропустимо тепер, що відносно СВ K' «світловий годинник» переміщується вздовж осі $O'X'$ зі швидкістю υ_x' (Рис. 2.15).

Тоді у СВ K' для поперечної складової швидкості світла маємо співвідношення аналогічне (71):

$$c'_y = c\sqrt{1 - \left(\frac{\upsilon'_x}{c}\right)^2}. \qquad (72)$$

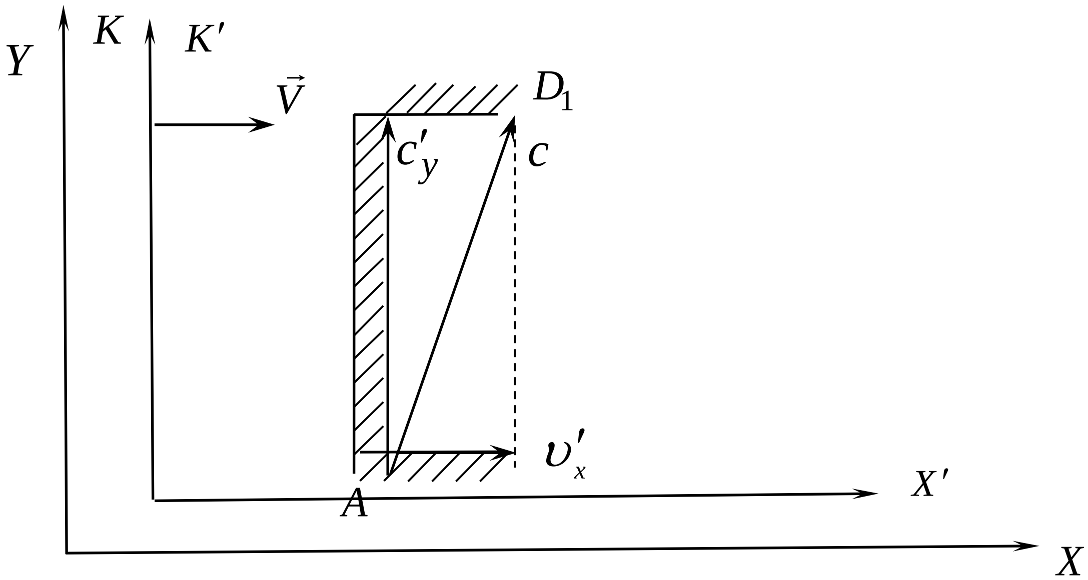


Рис. 2.15. «Світловий годинник» рухається відносно СВ K' вздовж осі $O'X'$ зі швидкістю υ'_x

Але також і з точки зору СВ K, згідно з ПСШС, швидкість світла дорівнює c.

Оскільки складова швидкості світла вздовж осі OX СВ K дорівнює, згідно з, наприклад, (70):

$$c_x = \frac{\upsilon'_x + V}{1 + \frac{\upsilon'_x V}{c^2}}, \qquad (73)$$

то поперечна складова швидкості світла вздовж осі OY СВ K, очевидно, повинна визначатися із рівняння:

$$c^2 = c_x^2 + c_y^2. \qquad (74)$$

Враховуючи (73) для c_y одержуємо:

$$c_y^2 = c^2 - \left(\frac{\upsilon_x' + V}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}} \right)^2 = \frac{\left(c_y'\right)^2 \left(1 - B^2\right)}{\left(1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}\right)^2}. \qquad (75)$$

$$c_y = \frac{c_y' \sqrt{1 - B^2}}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}. \qquad (76)$$

Якщо «світловий годинник» розташувати паралельно вісі OZ, то аналогічно попередньому для проекції швидкості світла на вісь OZ маємо:

$$c_z = \frac{c_z' \sqrt{1 - B^2}}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}. \qquad (77)$$

Для поперечних складових швидкості тіла (і, загалом, будь-якого об'єкта) маємо формули подібні до (76) та (77):

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon_y' \sqrt{1 - B^2}}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}, \qquad \upsilon_z = \frac{\upsilon_z' \sqrt{1 - B^2}}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}. \qquad (78)$$

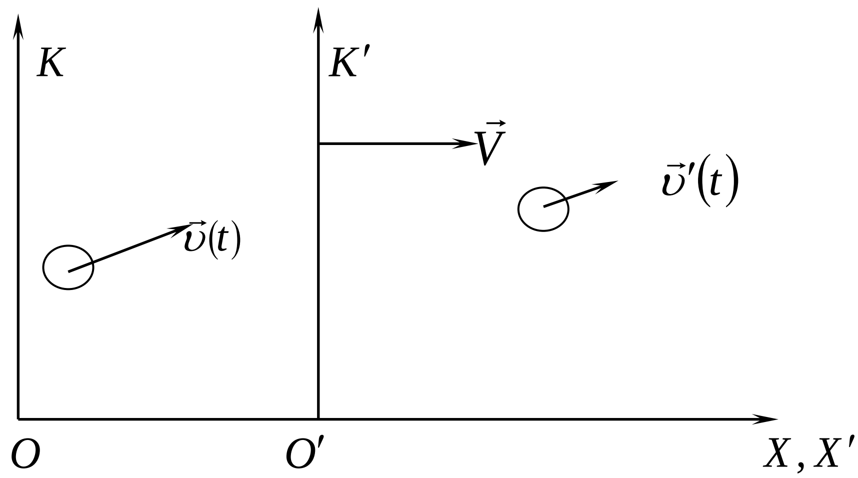


Рис. 2.15а. Тіло в СВ K' має швидкість $\vec{\upsilon}'(t)$. Тоді його швидкість в СВ K, $\vec{\upsilon}(t)$, визначається формулами додавання (79)

Таким чином, узагальнюючи, зазначимо, що релятивістські формули додавання швидкостей мають вигляд:

$$\upsilon_x = \frac{\upsilon'_x + V}{1 + \frac{\upsilon'_x V}{c^2}}, \quad \upsilon_y = \frac{\upsilon'_y \sqrt{1-B^2}}{1 + \frac{\upsilon'_x V}{c^2}}, \ \upsilon_z = \frac{\upsilon'_z \sqrt{1-B^2}}{1 + \frac{\upsilon'_x V}{c^2}}. \quad (79)$$

Методичний коментар. Оскільки модель «світлового годинника» використовується в підручниках з фізики для ЗЗСО, то наведений вище спосіб обґрунтування релятивістських формул додавання поперечних складових швидкості тіла можна рекомендувати учням для самостійного опрацювання з метою поглиблення їх знань з основ СТВ. Ця рекомендація обумовлена ще й тим, що в цьому способі обґрунтування використовуються безпосередньо обидва постулати (принципи) спеціальної теорії відносності.

2.5. Критично–конструктивний аналіз особливостей висвітлення релятивістських кінематичних ефектів у підручниках для ЗЗСО

Для сучасного вчителя вкрай необхідно володіти навичками критичного мислення, вміти мислити гнучко та творчо, адже його учень, сучасний здобувач освіти в ЗЗСО має бути інтелектуальною особистістю з розвиненим критичним мислення, навичками самостійної навчально-дослідницької діяльності. Тому логічно, що пріоритетним напрямком освітньої діяльності в сучасній школі є озброєння учня вміннями критично-конструктивного мислення. Очевидно, що вчитель, який сам володіє критичним мислення, послуговується методикою розвитку критичного мислення, зможе навчити й учня мислити гнучко, творчо, критично. Подібна думка набуває свого втілення у відомій педагогічній аксіомі: «тільки особистість може виховати особистість».

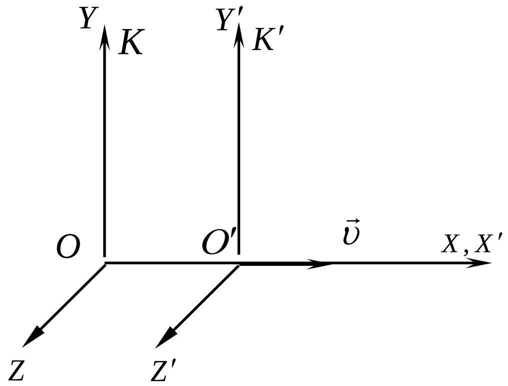
Тому вище було запропоновано матеріал, який «вмотивує» вчителя до критично-пошукової діяльності, до самостійної творчої роботи. Більше того, вказуючи учням на певні неточності, розбіжності, у матеріалі, який вивчається, можна й учнів залучити до самостійної пошукової діяльності, до критичного осмислення інформації. Тому в цьому розділі нашого посібника, проаналізуємо деякі некоректні формулювання, неточності, які іноді мають місце в деяких сучасних підручниках з фізики та навчально-методичних матеріалах.

Підкреслимо також, що на наш погляд, усунення цих неточностей унеможливлює порушення принципу науковості при викладанні СТВ.

Перш за все зауважимо, що в багатьох підручниках з фізики для закладів загальної середньої освіти [3; 7; 18; 38] взагалі не згадуються перетворення Лорентца, не висвітлюється їх місце та значення в релятивістській фізиці. Такий підхід до викладання спеціальної теорії відносності, на нашу думку, не забезпечує системності, послідовності та логічності у викладі матеріалу. Розгляд основних положень СТВ без висвітлення перетворень Лорентца залишає нерозкритим питання переходу від класичної до релятивістської механіки, від перетворень Галілея до перетворень Лорентца. При цьому учням залишається незрозумілим звідки з'являється новий закон додавання швидкостей тощо. Такий підхід не дозволяє сформувати системні знання, створює труднощі, що призводять до нерозуміння цієї фізичної теорії.

Так, в підручнику [12] подаються перетворення Лорентца, і підкреслюється, що вони є узагальненням перетворень Галілея, за умови відносності часу. Однак, форма подання перетворень Лоренца, є, на нашу думку, не зовсім методично вивіреною (а місцями і помилковою), а саме, має вигляд [12]:

«Зв'язок між величинами, що характеризують подію в різних інерціальних системах відліку, називають перетвореннями Лоренца:



$$x' = \frac{x \pm \upsilon t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},\ y = y',\ z = z',\ t' = \frac{t \pm \frac{\upsilon}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \qquad (1)$$

Знак «+» у чисельнику застосовується при переході від системи K' до системи K, знак «–» застосовується при переході від системи K до системи K'. Це зумовлено тим, що система K' рухається відносно системи K зі швидкістю υ, водночас можна вважати, що система K рухається відносно системи K' зі швидкістю $-\upsilon$» [12, с. 250].

Але тоді треба ще додатково пояснювати, що при застосуванні формули в такому вигляді при переході від системи K' до системи K, і навпаки, окрім знаків необхідно ще й змінювати відповідні змінні x' на x, а t' на t. Тобто, зміст речення «Знак «+» у чисельнику застосовується при переході від системи K' до системи K,...» є помилковим.

Аналогічне непорозуміння зустрічаємо і в підручнику [10, с. 145]: «У СТВ місце перетворень Галілея заступають *перетворення Лоренца:*

$$x = \frac{x' + \upsilon t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},\ \ y = y',\ z = z',\ t = \frac{t' + \frac{\upsilon}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}$$

Щоб виразити x', t' через x, t (тобто отримати зворотні перетворення), достатньо змінити знаки перед швидкістю».

Такий об’єм додаткових пояснень здатен лише заплутати учнів, тому доцільно ПЛ подавати у запропонованому нами вигляді (див. (45) та (46)):

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}};\ y' = y; z' = z\ ;\ t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

при переході від системи K до системи K'.

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}};\ y = y';\ z = z';\ t = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

при переході від системи K' до системи K.

Пропоновані нами в п. 2.3 цього посібника та в [24; 25] способи обґрунтування ПЛ та пояснення їх сутності відповідають у більш повній мірі (на відміну від [12; 13; 14]) принципам доступності та науковості.

Далі, при вивченні релятивістського закону додавання швидкостей в підручнику [12; 13; 14] читаємо: «Нехай тіло рухається відносно системи K' зі швидкістю $\vec{u}$. Сама система K' рухається відносно системи K, яка вважається нерухомою, з постійною швидкістю $\vec{\upsilon}$ уздовж осі X. Позначимо швидкість цього самого тіла відносно нерухомої системи K літерою $\vec{\omega}$. Тоді релятивістський закон додавання швидкостей матиме вигляд:

$$\vec{\omega} = \frac{\vec{\upsilon} + \vec{u}}{1 + \frac{\vec{\upsilon}\vec{u}}{c^2}}.$$

Якщо $u << c$ та $\upsilon << c$, маємо класичний закон додавання швидкостей $\vec{\omega} = \vec{\upsilon} + \vec{u}$ » [12, с. 253; 13, с. 225; 14, с. 153].

Як бачимо, отримано зручну форму подання релятивістського закону додавання швидкостей, яка дозволяє, нібито, за малих швидкостей перейти безпосередньо до класичного закону додавання швидкостей, до того ж записаного у векторній формі. Однак, постає питання чи відповідає дійсності така форма запису релятивістського закону додавання швидкостей?

У [24, с. 87] доведено, що векторна релятивістська формула додавання швидкостей має вигляд:

$$\vec{\upsilon} = \frac{\vec{V} + \vec{\upsilon}'\sqrt{1 - B^2} + \frac{1}{V^2}\left(\vec{V}\vec{\upsilon}'\right)\cdot\vec{V}\left(1 - \sqrt{1 - B^2}\right)}{1 + \frac{\vec{V}\vec{\upsilon}'}{c^2}},$$

де $\vec{\upsilon}$ – швидкість руху тіла відносно нерухомої системи відліку K, $\vec{\upsilon}'$ – швидкість руху тіла відносно рухомої системи відліку K', $\vec{V}$ – швидкість рухомої системи відліку K' відносно нерухомої K.

Навіть якщо зробити певні спрощення і розглядати релятивістське додавання швидкостей за умови, що швидкість $\vec{V}$ рухомої системи відліку K' відносно нерухомої K, значно менше швидкості світла у вакуумі, то в цьому випадку отримується вираз:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}' + \vec{V} - \vec{\upsilon}' \frac{\left(\vec{\upsilon}'\vec{V}\right)}{c^2}.$$

Отже, навіть за такого спрощення, релятивістська формула додавання швидкостей суттєво відрізняється від тієї, що наводиться в [12; 13; 14].

З методичної точки зору, зважаючи на складність математичного запису, формулу релятивістського додавання швидкостей у векторній формі в шкільному курсі фізики недоцільно розглядати, навіть у фізико-математичних класах. Необхідно обмежуватись розглядом одновимірного релятивістського руху тіл, коли їх швидкості лежать на одній прямій.

Дійсно, нехай тіло рухається зі швидкістю $\vec{\upsilon}'$ уздовж осі $O'X'$ системи відліку K', яка у свою чергу рухається відносно системи відліку K зі швидкістю $\vec{V}$ так, що під час руху координатні вісі OX і $O'X'$ напрямлені вздовж однієї прямої, а координатні вісі OY і $O'Y'$ та OZ і $O'Z'$ залишаються паралельними.

У цьому випадку релятивістський закон додавання швидкостей слід записувати у вигляді:

$$\upsilon_x = \frac{\upsilon'_x + V_x}{1 + \frac{\upsilon'_x \cdot V_x}{c^2}}$$

Слід зазначити, що в навчально-методичній та шкільній літературі немає загальноприйнятих позначень швидкостей, що вносить певну плутанину.

Різнобій у позначеннях швидкостей тіла в рухомій та нерухомій системах відліку, їх відносної швидкості, який має місце як в підручниках так і в науково-методичній літературі, не сприяє цілісному сприйняттю основ СТВ та розумінню фізичної суті релятивістських ефектів, складає дидактичні труднощі як у поясненні вчителем релятивістської кінематики, так і при самостійному опрацюванні учнями цього складного, але необхідного у формуванні адекватного сучасній науці світогляду суб’єктів навчальної діяльності.

Зазначимо, що варіанти вивчення кінематики СТВ в різних підручниках визначаються різною послідовністю викладу способів обґрунтування кінематичних релятивістських ефектів (сповільнення ходу рухомого годинника, лорентцеве скорочення, перетворень Лорентца, та релятивістських формул додавання швидкостей).

Тому акцентуємо увагу учителів фізики, що вибір підходів та варіантів висвітлення основ СТВ повинен визначатися конкретною дидактичною ситуацією: рівнем підготовки суб’єктів навчальної діяльності, спрямованістю їх пізнавальних інтересів, креативністю вчителя.

Продовжимо аналізувати опис кінематичних ефектів СТВ в наявних підручниках та науково-методичних статтях. Зокрема, при обґрунтуванні формули лорентцевого скорочення, слід уникнути непорозумінь, які іноді мають місце в методичній літературі. Так, наприклад, у статті [26] мають місце деякі помилки. А саме, після співвідношення (5.6) (див. [26]), поданого у вигляді

$$c^2\Delta t^2\left(1-\frac{\Delta x^2}{c^2\Delta t^2}\right)=-(\Delta x')^2,$$

безпідставно і помилково говориться: «Ввівши очевидні позначення

$$l_0 = c\Delta t,\ \ l = \left|(\Delta x')^2\right|,\ \ \upsilon = \frac{|\Delta x|}{\Delta t}$$, дістанемо: $$l_0^2\left(1-\frac{\upsilon^2}{c^2}\right) = l^2$$, або

$$l_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = l$$ » [26, с. 29].

Перш за все із «очевидних позначень» перше $l_0 = c\Delta t$ та третє $\upsilon = \frac{|\Delta x|}{\Delta t}$ - довільні, необґрунтовані та не відповідають суті задачі. А в другому із пропонованих автором [26, с. 29] позначень присутня і просто несуттєва описка (повинно бути $l^2 = \left|(\Delta x')^2\right|$) і в той же суттєва помилка, бо припускається, що $l^2 = -(\Delta x')^2$.

Слід також сприймати критично наступну фразу автора статті [26, с. 29]: «З постулату рівноцінності всіх інерціальних систем зрозуміло, що скорочення є ілюзією». З позиції принципу науковості порівняння явища лорентцевого скорочення з ілюзією є, принаймні, доволі проблематичним.

І далі, як можна зрозуміти твердження автора, що сповільнення часу, яке отримується в [26] теж із інваріантності квадрату інтервалу- це реальний ефект, а лорентцеве скорочення – ілюзія?!

З побажанням учителям фізики удосконалити методику навчання СТВ пропонуємо проаналізувати деякі формулювання положень СТВ та наслідків їх, які викладені у підручниках відомих авторів [12; 27] й які стосуються сповільнення ходу рухомого годинника та лорентцевого скорочення.

Так, питання відносності одночасовості подій подається по різному в сучасних підручниках, з різним ступенем деталізації та інформативності.

На жаль, при висвітленні цього питання деякі автори припускаються фізичних неточностей.

У довіднику [28, с. 86] читаємо: «Время Δt_0, отсчитанное по часам, движущимся вместе с данной системой отсчета, называется собственным временем. Собственное время одинаково во всех системах отсчета.

Движущиеся часы идут медленнее неподвижных: $\Delta t = \Delta t_0\sqrt{1-u^2/c^2}$ ».

Текстове пояснення вірне, а формула $\Delta t = \Delta t_0\sqrt{1-u^2/c^2}$, згідно з цими поясненнями, невірна.

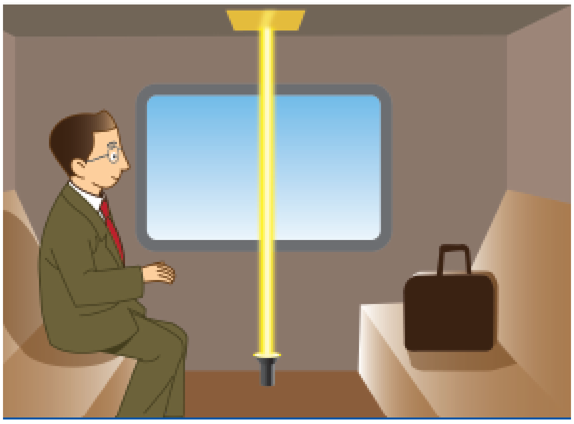
У загалом гарних підручниках [12; 13; 14] розглядається наступний приклад: на підлозі вагона розташоване джерело світла, а на стелі дзеркало. Пропонується знайти інтервал часу, протягом якого світло досягне стелі та, відбившись від дзеркала, повернеться назад. Розглядаючи поширення світлового сигналу відносно спостерігача, що рухається разом із вагоном та відносно нерухомого спостерігача, автори [12; 13; 14] на ілюстраціях неправильно вказують напрям поширення світлового променю [13, с. 249; 14, с. 149].

Дійсно, на малюнку 223, б ([13, с. 249]) та мал. 132 *б* ([14, с. 149]) помилково показано, що відносно нерухомого спостерігача світловий промінь поширюватиметься в напрямі ламаної *ABC*, рис. 2.16. Насправді ж напрям поширення світлового сигналу – *ABC* має проходити так, як це показано на рис. 2.17.

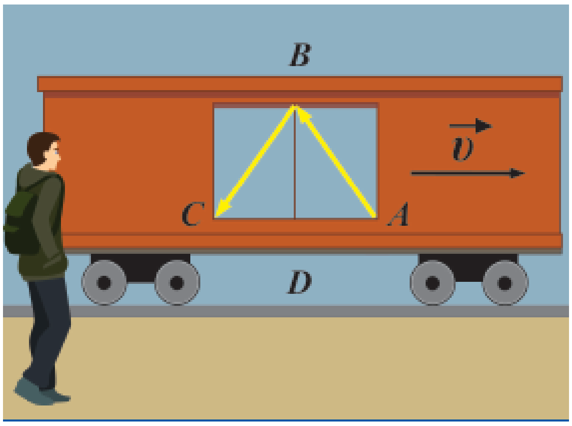
Тому розглянемо цей приклад більш детально.

Відносно системи K', зв’язаної зі спостерігачем, що рухається разом із вагоном, подія *A* – увімкнення ліхтарика і подія *C* – фіксація світлового сигналу мають наступні просторові і часові координати:

подія *A*: $x'_A = 0$, $t'_A = 0$; подія *C*: $x'_C = 0$, $t'_C = \frac{2l}{c}$ (де *l* – висота стелі вагону).



Мал. 223, а. **Поширення світлового сигналу відносно спостерігача, що рухається разом із вагоном**



Мал. 223, б. **Поширення світлового сигналу відносно нерухомого спостерігача**

Рис. 2.16. Пояснення явища поширення світлового сигналу в «світловому годиннику» згідно з підручником [13; 14]

Таким чином, різниці координат і часу в системі *K'*, дорівнюють:

$\Delta x' = x'_C - x'_A = 0$ (зміщення променя світла відносно спостерігача у вагоні);

$\Delta t' = t'_C - t'_A = \dfrac{2l}{c}$ (інтервал часу, протягом якого світло досягне стелі та, відбившись від дзеркала, повернеться назад за годинником спостерігача у вагоні).

Час, виміряний годинником, який рухається разом з тілом у системі відліку K', називають власним часом і позначають $\Delta t'$. Отже, власний час дорівнює $\Delta t' = \dfrac{2l}{c}$.

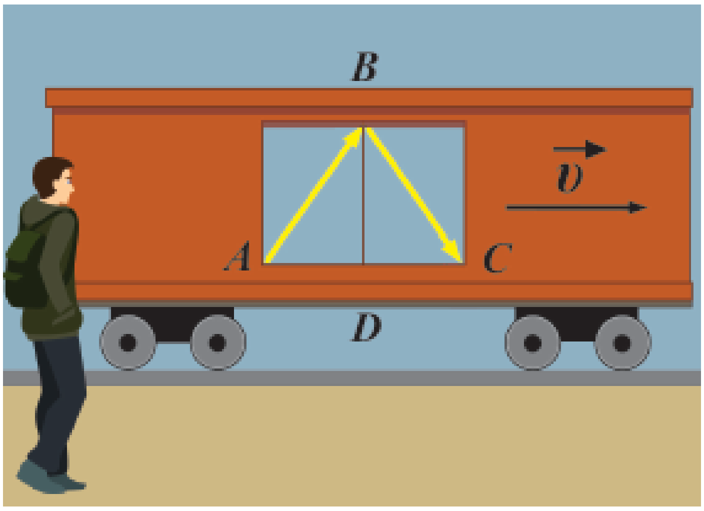


Рис. 2.17. Поширення світлового сигналу в «світловому годиннику» з точки зору спостерігача на платформі (в системі K)

Розглянемо тепер просторові і часові координати подій *A* та *C* в системі K, зв’язаної з нерухомим спостерігачем, що стоїть на платформі, відносно якої вагон рухається зі швидкістю *υ*.

Подія *A*: $x_A = 0$, $t_A = 0$.

З точки зору спостерігача на платформі (в системі K) за той час доки промінь світла дійде до дзеркала, вагон зрушить **вправо** на відстань *AD*. Відповідно на таку ж відстань зміститься і дзеркало на стелі вагону (рис. 2.17).

Світловий промінь відіб’ється від дзеркала на стелі в точці *B* і згідно з законом відбивання під таким самим кутом почне свій рух в напрямі до підлоги вагону. Вагон за цей час зміститься на відстань *DC* (до того ж *DC*=*AD*) і відбудеться фіксація світлового сигналу на підлозі (подія *C*). За весь інтервал часу, протягом якого світло досягне стелі і, відбившись, повернеться назад вагон зміститься відносно спостерігача на платформі на відстань *AC*. А світловий промінь подолає відстань *AB*+*BC*=2*AB* (оскільки *AB*=*BC*).

Таким чином, просторові і часові координати події *C* системі K, дорівнюють: подія *C*: $x_C = AC = AD + DC = 2AD$, $t_C = \dfrac{2AB}{c}$.

Таким чином, різниці координат і часу в системі K, дорівнюють:

$\Delta x = x_C - x_A = 2AD$ (зміщення променю світла відносно спостерігача на пероні);

$\Delta t = t_C - t_A = \frac{2AB}{c}$ (інтервал часу, протягом якого світло досягне стелі та, відбившись від дзеркала, повернеться назад за годинником спостерігача на пероні).

Таким чином, дійсне поширення світлового сигналу у «світловому годиннику» з точки зору СВ K показано на рис. 2.17 (на відміну від рис. 2.16).

Установимо тепер математичну залежність між Δt та $\Delta t'$. Для цього виразимо відповідні відстані: $BD = l = \frac{c\Delta t'}{2}$, $AB = \frac{c\Delta t}{2}$. Враховуючи, що вагон рухається з постійною швидкістю υ, матимемо: $\Delta x = 2AD = \upsilon\Delta t$, звідси отримуємо $AD = \frac{\upsilon\Delta t}{2}$.

За теоремою Піфагора знаходимо: $AB^2 = AD^2 + BD^2$, підставивши відповідні значення, отримуємо:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{\upsilon\Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2.$$

Зробимо елементарні перетворення: $(c^2 - \upsilon^2)\Delta t^2 = c^2(\Delta t')^2$, звідси маємо:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Виходячи з цього, можна дійти висновку, що відносно нерухомого спостерігача (СВ K) тривалість явища (проміжок часу між двома подіями), триває довше, ніж тривалість цього ж явища у власній СВ K'. Або, інакше кажучи, рухомий годинник йде повільніше ніж нерухомий. Підсумовуючи, можна підкреслити, що в релятивістській механіці, на відміну від класичної механіки, час не є абсолютним, він залежить від вибору системи відліку.

У підручнику з фізики [27, с. 129] при розгляді цього питання автори припускаються грубої помилки, подаючи співвідношення для визначення тривалості фізичного процесу в різних системах відліку у вигляді:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Так, згідно з [27, с. 128-129], маємо: «А. Ейнштейн установив, що при переході від однієї системи відліку до іншої перетворення координат збігаються з формулами перетворень Лоренца:

$$\left. x' = \frac{x-\upsilon t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}},\ y' = y,\ z' = z,\ t' = \frac{t-\frac{x\upsilon}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} \right\}, \qquad (1)$$

де *x*, *y*, *z*, *t* – координати і час в нерухомій системі відліку, а *x'*, *y'*, *z'*, *t'* – відповідно у рухомій системі відліку.

Так само в СТВ встановлено, що *виміряна в різних інерціальних системах відліку тривалість подій буде неоднаковою*. Це зумовлено неодночасністю подій, що відбуваються в різних системах відліку.

Нехай у нерухомій системі відліку певна подія триває протягом часу $\Delta t = t_2 - t_1$. Тоді в рухомій системі відліку її тривалість визначатиметься інтервалом часу $\Delta t' = t_2' - t_1'$. З формул перетворень Лоренца (1) після математичних спрощень маємо:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}. \qquad (3)$$

Це співвідношення вказує на те, що в різних інерціальних системах відліку виміряна *тривалість подій* буде різною: *у рухомій системі відліку подія триває довше, ніж у нерухомій* $(\Delta t' > \Delta t)$. Тобто для одного й того самого спостерігача в різних системах відліку час плине неоднаково:

спостерігач в нерухомій системі відліку помічатиме, що годинник сповільнює свій хід у системах відліку, що рухаються відносно нього».

Звертаючись до авторів цієї цитати, зазначимо, якщо, згідно з [27, с. 128], рухома система відліку – це СВ K', то формула (3) ([27, с. 129]) просто невірна.

По-друге, підкреслимо, що автори не конкретизували, в якій СВ годинник нерухомий, іншими словами, не уточнили, який із годинників реєструє власний час.

Водночас виникає запитання: що таке «тривалість події»?

Можливо, при наборі формул колектив авторів припустився технічної помилки, поставивши штрихи у виразах з точністю до навпаки?

Окрім того, у співвідношенні для релятивістського скорочення довжини автори припускаються тієї ж помилки, і доходять неправильного висновку щодо скорочення довжини в рухомій системі відліку [27, с. 128]:

«$l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$. Це означає, що $l' < l$, тобто довжина, виміряна в рухомій системі відліку, менша за довжину в системі, відносно якої та рухається, адже множник $\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$ завжди менший за 1». І далі, «Стержень завдовжки 1м у системі відліку, що рухається із швидкістю, близькою до швидкості світла у вакуумі, наприклад 0,9с, матиме довжину приблизно 87см».

Це неприпустимі неточності для підручника такого рівня, які суперечать принципу науковості. Доречно також зауважити, що принцип науковості навчання вимагає озброєння учнів методами наукового пізнання, а не лише повідомлення їм системи готових наукових істин.

Звважаючи на універсальність принципу науковості, вважаємо слушним рекомендувати авторам діючих та майбутніх підручників з фізики бути більш уважними при висвітленні фундаментальних положень сучасної фізики і, зокрема, СТВ.

Проведений критично-конструктивний аналіз навчальної та науково-методичної літератури, на нашу думку, допоможе вчителеві уникнути неточностей, хиб та некоректних формулювань основних положень та висновків СТВ, що має забезпечити реалізацію принципу науковості у процесі навчання.

Список використаної літератури до другого розділу

1. Державний стандарт базової і повної загальної середньої освіти, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 23 листопада 2011 р. № 1392.
2. Програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. Астрономія. 7–12 кл. Ірпінь: Перун, 2010. 80 с.
3. Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: академічний рівень. Харків: Ранок, 2010. 256 с.
4. Бурак В. І., Коновал О. А., Туркот Т. І. Методика вивчення спеціальної теорії відносності в середній школі в умовах профільної диференціації навчання: навчальний посібник для самостійної роботи студентів / за ред. проф. О.А. Коновала. Кривий Ріг: КПІ ДВНЗ «КНУ», 2014. 160 с.
5. Воробьев И. И. Теория относительности в задачах. Москва: Наука, 1989. 174 с.
6. Глазунов А. Т., Нурминский И. И., Пинский А. А. Методика преподавания физики в средней школе: Электродинамика нестационарных явлений. Квантовая физика: пособ. для учителя. Москва: Просвещение, 1989. 272 с.
7. Гончаренко С. У. Фізика: підруч. для 11 кл. серед. загальноосв. шк. Київ: Освіта, 2002. 319 с.
8. Грибанов Д. П. Философское мировоззрение Эйнштейна. *Эйнштейн и философские проблемы физики XX века*. Москва: Наука, 1979. С. 7–45.
9. Грищук В. В., Мордовець М. Т. Релятивістські ефекти при взаємодії електричних зарядів та струмів. *Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т. Г. Шевченка*. Серія «Педагогічні науки». Чернігів: ЧДПУ, 2002. Вип. 13. Т. 2. С. 180–181.
10. Гельфгат І.М. Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В.М.): підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. Освіти. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.
11. Дущенко В.П., Кучерук І. М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Вища школа, 1987. 431 с.
12. Засєкіна Т. М., Головко М. В. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: профільн. Рівень. Київ: Педагогічна думка, 2010. 304 с.
13. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: академ. рівень, профіл.рівень. Харків: Сиция, 2012.

352 с.

14. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика (профільний рівень): підруч. для 10 кл. закладів загальної середньої освіти. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 304 с.

15. Иродов И. Е. Механика. Основные законы / 6-е изд. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 312 с.

16. Иродов И. Е. Задачи по общей физике / изд. 4-е, исправл. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 432 с.

17. Каменецкий С. Е., Пустыльник И. Г. Электродинамика в курсе физики средней школы: пособ. для уч. Москва: Просвещение, 1978. 127 с.

18. Касьянов В.А. Физика. 10 кл.: учебн. для общеобразоват. учеб. заведений. Москва: Дрофа, 2000. 416 с.

19. Коновал О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. 346 с.

20. Коновал О.А. Електродинаміка і теорія відносності: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Криворізький державний педагогічний університет, 2011. 133 с.

21. Теорія і практика організації самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів: монографія / за ред.: проф. О.А. Коновала. Кривий Ріг: Книжкове видавництво Кирєєвського, 2012. 380 с.

22. Коновал О. А. Відносність електричного і магнітного полів: монографічний навч. посіб. для студ. вищих навч. Закладів. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. 248 с.

23. Коновал О. А. Основи електродинаміки: навч. посіб. для студ. вищ. пед. навч. закл / Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. 347 с.

24. Коновал О.А. Науково-методичний аналіз методів обґрунтування перетворень Лорентца: навчальний посібник для самостійної роботи студентів / Криворізький педагогічний інститут ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2014. 137 с.

25. Коновал О.А. Основи спеціальної теорії відносності: навч.-метод. посіб. для самост. роб. студ. вищ. пед. навч. закл. / Криворізький педагогічний університет ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2014. 272 с.

26. Копчук В. Основи релятивізму в школі. *Фізика та астрономія в школі*.1999. № 3. С. 28-32.

27. Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В. Ф. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: рівень стандарту. Київ: Генеза, 2010. 191 с.

28. Кузмичев В. Е. Законы и формулы физики: справочник / отв. ред. В. К. Тартаковский. Київ: Наук. Думка, 1989. 864 с.

29. Логунов А. А. Лекции по теории относительности и гравитации: Современный анализ проблемы. Москва: Наука. гл. ред. физ.-мат. Лит., 1987. 272 с.

30. Малинин А. Н. Элементы теории относительности и её физических приложений: учеб. пособ. для шк. и кл. с углубл. изуч. физики. Липецк: Изд-во ЛГПИ, 1995. 278 с.

31. Малинин А. Н. Методические вопросы теории относительности: сб. статей. Липецк: Изд-во ЛГПИ, 2000. 267 с.

32. Малинин А. Н. Методические основы изучения теории относительности в курсах физики средних общеобразовательных учреждений и педвузов: автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра пед. Наук: 13.00.02 / Московский пед. ун-т. Москва, 2000. 65 с.

33. Малинин А. Н. Теория относительности в задачах и упражнениях. М: Просвещение, 1983. 176 с.

34. Мороз І.О., Іваній В. С., Холодов Р. І. Спеціальна теорія відносності: навчальний посіб. для студ. вищих навч. закл. Суми: «МакДен», 2011. 335 с.

35. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: учеб. для 10 кл. средней школы. Москва: Просвещение, 1977. 319 с.

36. Сиротюк В. Д., Баштовий В. І. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: рівень стандарту. Київ: Освіта, 2010. 303 с.

37. Угаров В. А. Специальная теория относительности. Москва: Наука, 1977. 384 с.

38. Штепа М. І. Теорія відносності: навч. посібник. Київ: ІЗМН, 1996. 84 с.

39. Konoval O.A., Slysarenko M. A. Analysis of the coverage of kinematic effect of the special theory of relativity in the textbooks for secondary educational establishments. *Scientific words Kamianets-Podilsky Ivan Ohienko National University. Series pedagogical.* 2013. Issue 19. P. 88-91.

40. Пинский А.А. Задачи по физике: учебное пособие. Москва: Наука, 1978. 288 с.

41. Релятивістські кінематичні ефекти: методичні рекомендації до самостійної роботи студентів фізико-математичних факультетів та вчителів фізики / укл. А. О. Соломенко, О. А. Коновал, Н. С. Шолохова. Кривий Ріг-Херсон. 2016. 41 с.

42. Принцип относительности : Сборник работ по специальной теории

относительности. М.: Атомиздат, 1973. 332 с.

43. Соломенко А. О. Методика розвитку критичного мислення майбутніх учителів фізики в процесі вивчення спеціальної теорії відносності. *Педагогічний альманах*. Херсон. 2018. Вип. 39. С. 189-196.

44. Засєкіна Т. М. Фізика (рівень стандарту): підр. для 10 кл. закл. заг. серед. освіти. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 208 с.

45. Сиротюк В. Д. Фізика (рівень стандарту, за навч. програмою авт. колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підр. для 10 кл. закл. заг. серед. освіти. Київ: Генеза, 2018. 256 с.

46. Головко М. В., Мельник Ю. С., Непорожня Л. В., Сіпій В. В. Фізика (рівень стандарту за навч. програмою авт. колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підр. для 10 класу закладів загальної середньої освіти. Київ: Педагогічна думка, 2018. 256 с.

47. Фізика (рівень стандарту за навч. програмою авт. колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підр. для 10 кл. закл. заг. серед. освіти / за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.

48. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика і астрономія (профільній рівень): підр. для 10 кл. закл. заг. серед. освіти. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 304 с.

49. Навчальна програма з фізики для 10 кл. ЗЗСО від 07. 12. 2017. URL: https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/navchalni-programi-dlya-10-11-klasiv/.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА ПІДГОТОВКА СТУДЕНТІВ ДО НАВЧАННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ В ПРОФІЛЬНИХ КЛАСАХ ЗЗСО

Метою розділу 3 ми визначаємо ознайомлення студентів фізико-математичних факультетів університетів з моделями розв'язування задач, практичний досвід з орієнтацією використання набутого досвіду в практиці навчання спеціальної теорії відносності учнів профільних класів ЗЗСО. Підходи до розв'язування задач можуть бути використаними вчителями-практиками на факультативних, гурткових заняттях, олімпіадах з фізики та здобувачами освіти в самостійній роботі по поглибленню знань в галузі фізики (і зокрема, СТВ).

Зміст дібраних задач та моделі їх розв'язання мають, на думку авторів, значний потенціал у розвитку критичного мислення суб'єктів навчальної діяльності. Значна частина задач взята (запозичена) з навчально-методичної літератури, що наведена у списку використаної літератури до третього розділу.

3.1. Моделі розв'язування задач.

Задача 3.1. Експериментально встановлено, що у верхніх шарах атмосфери внаслідок взаємодії космічного випромінювання з атомами газів, які утворюють земну атмосферу, народжуються мюони, маса яких в 207 разів більша за масу електрона. Рухаючись зі швидкістю $\upsilon = 0{,}995c$, вони встигають пролетіти до розпаду $S = 6{,}0 км$. Визначити час життя мюона для спостерігача на Землі, власний час життя мюона, пройдений мюоном шлях у системі відліку, пов'язаній з ним.

Розв'язання. У нерухомій системі відліку, зв'язаній із спостерігачем на поверхні Землі час життя мюона, очевидно, дорівнює $\Delta t = \frac{S}{\upsilon}$. Підставивши числові дані, отримуємо час життя мюона в СВ, що пов'язана з Землею:

$$\Delta t = \frac{6 \cdot 10^3 м}{0.995 \cdot 3 \cdot 10^8 м/с} \approx 2 \cdot 10^{-5} м/с.$$

Власний час $\Delta t'$ життя мюона можна знайти із співвідношення (3):

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{1 - \frac{(0.995c)^2}{c^2}} \approx 2 \cdot 10^{-6} м/с.$$

У системі відліку зв'язаній з мюоном, він за цей час долає шлях:

$$S' = \upsilon \cdot \Delta t' = 0.995 \cdot 3 \cdot 10^8 м/с \cdot 2 \cdot 10^{-6} с = 597 м.$$

Отже, відносно нерухомого спостерігача мюон живе в 10 разів довше, ніж у власній системі відліку. Саме завдяки цьому релятивістському ефекту сповільнення часу мюон проходить відтань $6{,}0 км$.

Задача 3.2. Існує прямокутний трикутник, у якого катет $a = 5.00\, м$ і кут між цим катетом та гіпотенузою $\alpha = 30^\circ$. Знайти у СВ K', яка рухається відносно цього трикутника зі швидкістю $\upsilon = 0.866c$ вздовж катета a:

а) відповідне значення кута α';

б) довжину гіпотенузи l' та її відношення до власної довжини [25].

Розв'язання: Оберемо вісь X нерухомої СВ K, відносно якої трикутник знаходиться в стані спокою відносно катета a, тоді з перетворень Лорентца маємо:

$$a' = a\sqrt{1 - \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}.$$

Враховуючи, що трикутник прямокутний, і рух відбувається вздовж одного з катетів, а саме катета a, то довжина другого катета залишається незмінною, або $b = b'$, причому

$$b = a\, tg\alpha.$$

Із цих формул випливає, що кут α' між катетом a' і гіпотенузою l' у СВ K' задається рівністю:

$$tg\alpha' = \frac{b'}{a'} = \frac{tg\alpha}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}.$$

Довжину гіпотенузи трикутника l' у системі K' знайдемо за теоремою Піфагора:

$$l' = a\sqrt{1+tg^2\alpha - \left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}.$$

Враховуючи, що довжина гіпотенузи у системі K (власна довжина) дорівнює $l = a\sqrt{1+tg^2\alpha}$, отже, відношення гіпотенуз приймає вигляд:

$$\frac{l'}{l} = \sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2\left(1+tg^2\alpha\right)}}.$$

Підставляючи числові значення, маємо:

$$\alpha' \cong 49^\circ,\ l' = 3.8\,м,\ \frac{l'}{l} = 0.66.$$

Відповідь: $\alpha' \cong 49^\circ$; $\frac{l'}{l} = 0.66$.

Задача 3.3. Стрижень пролітає біля нерухомої мітки в СВ K. Час прольоту $\Delta t = 20\,нс$ в СВ K. У СВ, яка пов'язана зі стрижнем, мітка проходить повз нього в за час $\Delta t' = 25\,нс$. Знайти власну довжину стрижня l' [25].

Розв'язання: Очевидно, що довжина рухомого стрижня дорівнює $l = V\Delta t$, де Δt – час прольоту стрижня мимо нерухомої мітки. Власна довжина стрижня, очевидно, дорівнює $l_0 = V\Delta t'$, де $\Delta t'$- час прольоту мітки мимо стрижня за годинником СВ, яка пов'язана зі стрижнем (СВ K') (див. також **п. 2.2.5**). Тому швидкість і час прольоту мітки пов'язані співвідношеннями:

$$\frac{l}{\Delta t} = \frac{l'}{\Delta t'} = V\,,\ \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-B^2}}\,.$$

$$l = l'\sqrt{1-\left(\frac{V}{c}\right)^2}\,,$$

де l - довжина стрижня у лабораторній СВ K, відносно якої стрижень рухається зі швидкістю V, l' - власна довжина стрижня (тобто його довжина в СВ K', відносно якої він нерухомий).

Щоб знайти власну довжину стрижня необхідно знати швидкість руху його V. Використовуючи останню рівність, находимо:

$$V = c\sqrt{1-\left(\frac{l}{l'}\right)^2} = c\sqrt{1-\left(\frac{\Delta t}{\Delta t'}\right)^2}\,.$$

Отже власна довжина стрижня дорівнює:

$$l' = V\Delta t' = c\sqrt{\left(\Delta t'\right)^2 - \left(\Delta t\right)^2} = 4.5\ м\,.$$

Відповідь: $l' = 4.5\ м$.

Задача 3.4. Користуючись принципом відносності, показати, що поперечні розміри тіла не змінюються при переході від однієї системи відліку до іншої.

Розв'язання: Припустимо, що при русі тіла відносно системи відліку його поперечні розміри змінюються, наприклад, скорочуються. Нехай стрижень і отвір у дошці точно збігаються в деякій системі відліку (рис. 3.1а).

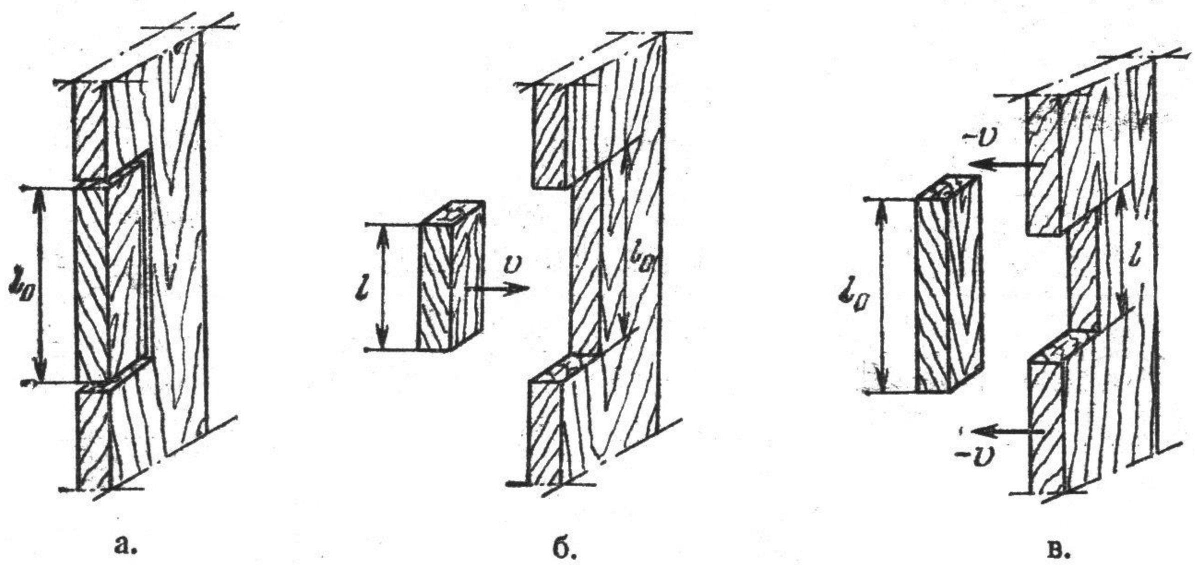


Рис. 3.1. Відносний рух стрижня, власна довжина якого l_0, і дошки в поперечному напрямі

У системі відліку, що зв'язана з дошкою, стрижень рухається зі швидкістю υ (рис. 3.1б). Тоді, згідно з нашим припущенням про скорочення поперечних розмірів, стрижень з легкістю пройде крізь отвір. Якщо ж ми пов'яжемо систему відліку зі стрижнем, то згідно з нашим припущенням зменшуються розміри отвору (рис. 3.1в), і стрижень через нього не пройде. Отримане протиріччя доводить хибність припущення про скорочення поперечних розмірів. Цей же висновок випливає з перетворень Лорентца.

Задача 3.5. У системі відліку K мюон, що рухається зі швидкістю $\upsilon = 0{,}990c$, пролетів від місця свого народження до точки розпаду відстань $l = 3{,}0 км$. Визначити:

а) власний час життя цього мюона;

б) відстань, яку пролетів мюон в системі відліку K з «його точки зору» [10].

Розв'язання: Якщо τ_0 – це власний час життя мюона, то час життя його в системі відліку K дорівнює:

$$\frac{\tau_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}},$$

а шлях, який він пролетів від місця свого народження до точки розпаду:

$$l = \frac{\upsilon\tau_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Отже, $\tau_0 = \frac{l}{\upsilon}\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$. А відстань, яку він пролетів з «його точки зору» у системі відліку K визначається із співвідношення: $\upsilon\tau_0 = l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$.

Відповідь: $\tau_0 = \frac{l}{\upsilon}\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = 1{,}14\,мкс$, $\upsilon\tau_0 = l' = l\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} = 420\,м$.

Задача 3.6. З якою швидкістю рухався в системі відліку K годинник, якщо за час $t = 5{,}0c$ (в системі відліку K) він відстав від годинника цієї системи на $\Delta t = 0{,}10c$? [10]

Розв'язання: Очевидно, що СВ K' слід пов'язати з рухомим годинником.

Тоді проміжок часу за годинником, що рухається відносно СВ K, згідно з формулою (3), дорівнює:

‘ $$t' = t\sqrt{1-\beta^2},$$

де $t = 5{,}0c$ - проміжок часу в системі відліку K, $\beta = \frac{\upsilon}{c}$.

За умовою задачі маємо:

$$t - t\sqrt{1-\beta^2} = \Delta t.$$

Отже, отримуємо $1 - \frac{2\Delta t}{t} + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 = 1-\beta^2$, або $\upsilon = c\sqrt{\frac{\Delta t}{t}\left(2-\frac{\Delta t}{t}\right)}$.

Відповідь: $\upsilon = c\sqrt{\frac{\Delta t}{t}\left(2-\frac{\Delta t}{t}\right)} = 0{,}2c\ \left(м/с\right) = 0{,}6\cdot 10^8\ м/с$.

Задача 3.7. Ознайомимось з одним із «спростувань» релятивістського закону додавання швидкостей. Нехай два тіла знаходяться в одній точці, а потім починають рухатися відносно Землі в протилежних напрямках (рис. 3.2). Сумарне переміщення тіл:

$$\Delta l = \Delta l_1 - \Delta l_2 = \upsilon_1 \Delta l - (-\upsilon_2 \Delta t) = (\upsilon_1 + \upsilon_2)\Delta t.$$

Тоді швидкість: $u = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \upsilon_1 + \upsilon_2$ Ми отримали класичний закон додавання швидкостей, а не релятивістський. Де помилка в міркуваннях? [22].

Розв'язання: Проведене міркування не містить ніяких помилок, і для величини *u* отримано вірний результат.

Рис. 3.2

Однак це не спростовує релятивістської формули додавання швидкостей. Справа в тому, що говорячи про додавання швидкостей, ми розуміємо не додавання цих величин в даній системі відліку, а обчислення швидкості одного і того ж тіла в іншій системі відліку.

А саме, нас цікавить, з якою швидкістю, наприклад, віддаляється праве тіло від лівого в системі відліку, пов'язаної з лівим тілом. Для цього перейдемо до системи відліку, пов'язаної з лівим тілом [22].

Маємо: $u' = \frac{\Delta l'}{\Delta t'}$, оскільки в новій системі відліку змінюється відстань між тілами і темп часу. З перетворень Лорентца випливає:

$$\Delta l' = -x'_2 + x'_1 = \frac{-x_2 - \upsilon_2 \Delta t + x_1 + \upsilon_2 \Delta t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_2^2}{c^2}}} = \frac{-x_2 + x_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\Delta l}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (3.1)$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t + \frac{\upsilon_2 x_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon_2^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(1 + \frac{\upsilon_2 x_1}{\Delta t c^2}\right) = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(1 + \frac{\upsilon_1 \cdot \upsilon_2}{c^2}\right). \quad (3.2)$$

Таким чином:

$$u' = \frac{\Delta l'}{\Delta t'} = \frac{\Delta l}{\Delta t}\frac{1}{1 + \frac{\upsilon_1 \upsilon_2}{c^2}} = \frac{u}{1 + \frac{\upsilon_1 \upsilon_2}{c^2}} = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{1 + \frac{\upsilon_1 \upsilon_2}{c^2}}.$$

Ми отримали, як і варто було очікувати, релятивістський закон додавання швидкостей.

Відповідь: $u' = \frac{\Delta l'}{\Delta t'} == \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{1 + \frac{\upsilon_1 \upsilon_2}{c^2}}.$

Методичний коментар. На наш погляд наведені із [22] міркування та обґрунтування кінцевої *відповіді* є суперечливими й не відображають адекватного стилю мислення та суті РФДШ. Дійсно, чому у формулі (3.1) $\beta = \frac{\upsilon_2}{c}$, тоді як в подібних формулах, що визначають лорентцеве скорочення рухомого стрижня та сповільнення ходу рухомого годинника в релятивістський множник $\sqrt{1-\beta^2}$ входить відносна швидкість руху стрижня (тіла), або відносна швидкість переміщення фізичного явища (швидкість годинника). Але ж не швидкість υ_2 - швидкість переміщення лівого тіла відносно лабораторної СВ.

Аналогічні зауваження стосуються також і формули (3.2).

Щоб не виникали суперечності та помилки (зокрема див. також [7, с. 225, с. 228].) слід, на нашу думку, при застосуванні РФДШ однозначно, у відповідності до способу п. 2.4.1. обґрунтування формули додавання швидкостей $\upsilon_x = \dfrac{\upsilon'_x + V}{1 + \dfrac{\upsilon'_x V}{c^2}}$, встановити (вибрати), яку СВ вважати рухомою (СВ K'), а яку СВ вважати лабораторною. Іншими словами, з яким з двох тіл, що рухаються в СВ K (лабораторна СВ) необхідно (слід) зв'язати СВ K'.

Повертаємося до розв'язання цієї задачі, запропонованої в посібнику Пінського А.А. [22]. Очевидно, згідно з умовою задачі (рис. 3.2) та рис. 2.13а СВ K' доцільно зв'язати з правим тілом (рис. 3.3).

Тобто швидкість руху СВ K' дорівнює υ_1, $\upsilon_1 = V$. Тоді у відповідності до формули (59) маємо:

$$\upsilon_2 = \frac{\upsilon'_2 + \upsilon_1}{1 + \dfrac{\upsilon'_2 \upsilon_1}{c^2}}, \qquad (3.3)$$

де υ'_2 - швидкість руху лівого тілі відносно СВ K' (відносно правого тіла). Або, що те саме, відносна швидкість цих двох тіл.

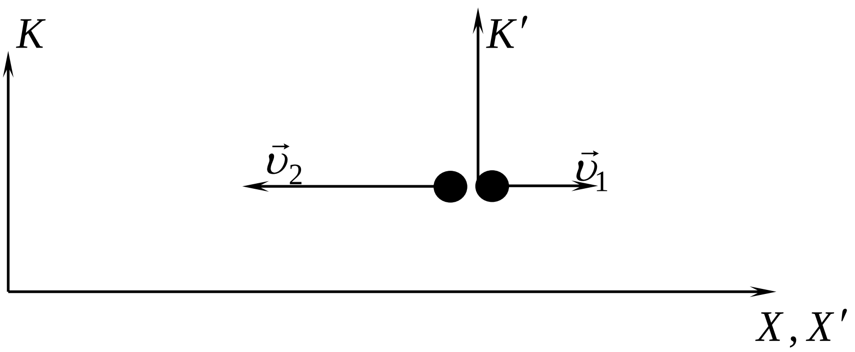


Рис. 3.3. До знаходження відносної швидкості двох рухомих тіл

Із (3.3) для υ'_2 одержуємо:

$$\upsilon'_2 = -\frac{(\upsilon_2 + \upsilon_1)}{1 + \dfrac{\upsilon_2 \upsilon_1}{c^2}},$$

де враховано, що υ_2 в цих формулах слід брати зі знаком мінус.

Задача 3.8. Два реактивні літаки йдуть на зустрічних курсах. Нехай їх швидкості відносно Землі дорівнюють відповідно $\upsilon_1 = 1500 \, {}^{км}\!/_{год}$ та $\upsilon_2 = 3000 км/год$. Якою буде швидкість другого літака, виміряна пасажиром першого літака?

Розв'язання: У відповідності до моделі розв'язання **Задачі 3.7** для розв'язку цієї задачі необхідно коректно зв'язати системи відліку з літаками або літаком. Оскільки швидкості літаків дані, очевидно, відносно Землі, то раціонально СВ K зв'язати якраз із Землею.

Якщо зв'язати СВ K' (рис. 3.4) з першим літаком, то $V = \upsilon_1$.

Швидкість другого літака $-\upsilon_2$, це, очевидно, величина υ_x в формулі (59)

$$\upsilon_x = \frac{\upsilon'_x + V}{1 + \frac{V}{c^2} \cdot \upsilon'_x}.$$

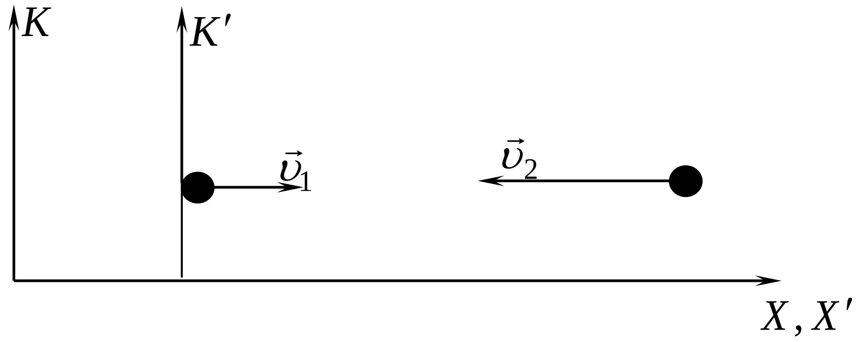


Рис. 3.4. Два літаки рухаються назустріч один одному зі швидкостями υ_1 та υ_2

А знайти нам треба, згідно з умовою задачі, υ_x'. υ_x' - це якраз і є швидкість другого літака відносно першого.

Із попередньої формули знаходимо υ_x':

$$\upsilon_x' = \frac{\upsilon_x - V}{1 - \frac{V\upsilon_x}{c^2}}.$$

Використовуючи умову задачі, остання формула набуває вигляду:

$$\upsilon_x' = \frac{-\upsilon_2 - \upsilon_1}{1 - \frac{\upsilon_1(-\upsilon_2)}{c^2}} = -\frac{(\upsilon_2 + \upsilon_1)}{1 + \frac{\upsilon_1\upsilon_2}{c^2}}.$$

Тому для відносної швидкості другого літака одержуємо:

$$\upsilon_x' = \frac{-3000 - 1500}{1 - \frac{1500\cdot(-3000)}{c^2}} = -\frac{4500}{1 + (1.5\cdot 3)\cdot 10^6 / c^2} = -\frac{4500}{1 + 4{,}5\cdot 10^{-12}} =$$
$$= -4499{,}999999986\, км/год$$

Відповідь: швидкість другого літака відносно першого дорівнює $\upsilon_x' = -4499{,}999999986\, км/год$.

Ми бачимо, що класична формула додавання швидкостей (у нашій задачі - $\upsilon' = \upsilon_1 + \upsilon_2$) забезпечує досить точне наближення до реальності навіть у випадку швидкості руху надзвукових літаків.

Задача 3.9. У площинні XY системи відліку K рухається частинка, проекції швидкості якої рівні υ_x та υ_y. Знайти швидкість υ' цієї частинки в системі K', яка переміщується зі швидкістю V відносно системи K в додатному напрямку її осі OX.

Розв'язання: Скористаємося релятивістськими формулами додавання швидкостей (79):

$$\upsilon_x = \frac{\upsilon_x' + V}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}, \quad \upsilon_y = \frac{\upsilon_y'\sqrt{1 - B^2}}{1 + \frac{\upsilon_x' V}{c^2}}.$$

Але при переході від СВ K до СВ K' ці формули набувають вигляду(штриховані величини замінюються на нештриховані, і навпаки, а перед швидкістю V ставиться протилежний знак):

$$\upsilon'_x = \frac{\upsilon_x - V}{1 - \frac{\upsilon_x V}{c^2}}, \quad \upsilon'_y = \frac{\upsilon_y \sqrt{1 - B^2}}{1 - \frac{\upsilon_x V}{c^2}}.$$

Тоді, $\upsilon' = \sqrt{((\upsilon'_x)^2 + (\upsilon'_y)^2)} = \dfrac{\sqrt{(\upsilon_x - V)^2 + \upsilon_y{}^2\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}}{1 - \frac{V\upsilon_x}{c^2}}.$

Відповідь: швидкість υ' частинки в системі K' дорівнює:

$$\upsilon' = \sqrt{((\upsilon'_x)^2 + (\upsilon'_y)^2)} = \frac{\sqrt{(\upsilon_x - V)^2 + \upsilon_y{}^2\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}}{1 - \frac{V\upsilon_x}{c^2}}.$$

Задача 3.10. Деяка нестабільна частинка рухається зі швидкістю υ' в системі відліку K' вздовж її вісі $O'Y'$. Система K' в свою чергу переміщується відносно системи K зі швидкістю V в додатному напрямі вісі OX . Вісі $O'X'$ та OX обох систем відліку співпадають, а вісі $O'Y'$ та OY паралельні одна одній. Знайти шлях, який частинка пролетить в системі K, якщо її власний час життя рівний Δt_0, [10].

Розв'язання: Щоб знайти шлях, який пройде частинка у СВ K необхідно знати час життя її у цій СВ та швидкість частинки у СВ K.

Оскільки компоненти швидкості цієї нестабільної частинки в системі відліку K дорівнюють:

$$\upsilon_x = V, \ \upsilon_y = \upsilon' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}},$$

то, швидкість частинки відносно СВ K є:

$$\upsilon^2 = (\upsilon'_x)^2 + (\upsilon'_y)^2 = V^2 + \upsilon'^2 - \frac{(V\upsilon')^2}{c^2}.$$

Тому віддаль, яку частинка пролетить дорівнює:

$$l = \sqrt{V^2 + \upsilon'^2 - \frac{(V\upsilon')^2}{c^2}} \cdot \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \Delta t_0 \sqrt{\frac{V^2 + \upsilon'^2 - \frac{(V\upsilon')^2}{c^2}}{(1 - B^2)\cdot\left(1 - \upsilon'^2/c^2\right)}}.$$

Відповідь: шлях, який частинка пролетить в СВ K дорівнює:

$$l = \Delta t_0 \sqrt{\frac{V^2 + \upsilon'^2 - \frac{(V\upsilon')^2}{c^2}}{(1 - B^2)\cdot\left(1 - \upsilon'^2/c^2\right)}}.$$

Задача 3.11. Швидкість світла в нерухомій речовині дорівнює $\frac{c}{n}$, де c — швидкість світла у вакуумі, n-показник заломлення речовини. Знайти швидкість світла в речовині, що рухається рівномірно відносно джерела світла.

Розв'язання: Аналогічно моделі розв'язання **Задачі 3.7** СВ K' слід зв'язати з рухомою речовиною (наприклад з водою, як у відомому досліді Фізо [15, с. 40]). Тоді $\frac{c}{n} = \upsilon'$

Отже, згідно з формулою (59) та змістом *Методичного коментаря **Задачі 3.7***, якщо речовина віддаляється від джерела світла, то швидкість світла в речовині в СВ K (лабораторна система відліку) дорівнює:

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + V}{1 + \frac{\upsilon' V}{c^2}} = \frac{\frac{c}{n} + V}{1 + \frac{V}{cn}}.$$

В експерименті Фізо швидкість руху води відносно СВ K $V << c$, тому

$$\upsilon = \frac{\frac{c}{n}+V}{1+\frac{c\cdot V}{nc^2}} \approx \left(\frac{c}{n}+V\right)\cdot\left(1-\frac{V}{cn}\right) = \frac{c}{n}\left[1+\frac{V}{c}\left(1-\frac{1}{n^2}\right)n-\frac{V^2}{c^2}\right] \approx \frac{c}{n}+V\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$$

,

що експериментально Фізо й отримав.

Відповідь: $\upsilon = \dfrac{\upsilon'+V}{1+\dfrac{\upsilon' V}{c^2}} = \dfrac{\frac{c}{n}+V}{1+\dfrac{V}{cn}}$.

Задача 3.12. В K- системі відліку знаходиться нерухомий стрижень, довжина якого $l=1м$ і який орієнтований під кутом $\alpha = 45^\circ$ до осі OX. Знайти його довжину l' та відповідний кут α' в K'- системі, яка рухається відносно СВ K з швидкістю $V=\dfrac{c}{2}$ вздовж осі OX.

Розв'язання: Довжина стрижня в K'- системі (бо $\Delta x' = \Delta x\sqrt{1-B}$) дорівнює:

$$l' = \sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2} = \sqrt{(\Delta x)^2(1-B^2)+(\Delta y)^2},$$

де $B=\dfrac{V}{c}$.

Оскільки $\Delta x = l\,cos\,\alpha, \quad \Delta y = l\,sin\,\alpha$, то

$$l' = l\sqrt{1-B^2 cos^2\alpha} = 0.94.$$

Кут α' в K'- системі знайдемо через тангенс:

$$tg\alpha' = \frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \frac{\Delta y}{\Delta x\sqrt{1-B^2}} = \frac{tg\alpha}{\sqrt{1-B^2}} = 1.155.$$

Звідси $\alpha' = 49^\circ$

Відповідь: $l' = l\sqrt{1-B^2 cos^2\alpha} = 0.94$, $\alpha' = 49^\circ$.

Задача 3.13. Знайти відстань, яку пройде в системі відліку K нестабільна частинка за час від її народження до розпаду, якщо час її життя в цій системі відліку $\Delta t = 3 \cdot 10^{-6}\ c$, а власний час життя $\Delta t_0 = 2.2 \cdot 10^{-6}\ c$ [10].

Розв'язання: Очевидно, щоб знайти цю віддаль необхідно знати швидкість частинки та час життя її в СВ K. Час життя відомий із умови задачі, тому швидкість знаходимо із співвідношення між Δt та Δt_0.

Оскільки $\Delta t = \dfrac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - B^2}}$, то $\Delta t^2 \left(1 - \dfrac{V^2}{c^2}\right) = \Delta t_0{}^2$,

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

Тоді маємо

$$l = \Delta t \cdot V = \Delta t \cdot c\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t}\right)^2} = 0.6\ км$$

Інший спосіб розв'язання базується на інваріантності інтервалу:

$$c^2 \Delta t_0{}^2 = c^2 \Delta t^2 - l^2,$$

звідси отримується той же результат:

$$l = c \cdot \sqrt{\Delta t^2 - \Delta t_0^2} = \Delta t \cdot c\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t}\right)^2} = 0.6\ км.$$

Відповідь: $l = c \cdot \sqrt{\Delta t^2 - \Delta t_0^2} = \Delta t \cdot c\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t}\right)^2} = 0.6\ км.$

Задача 3.14. Є дві групи синхронізованих годинників K' і K, які рухаються одна відносно іншої зі швидкістю $\vec{V}$ вздовж осі OX. За початок відліку часу беремо момент, коли годинник A' буде знаходитися навпроти годинника A, рис. 3.5. Зобразити положення стрілок всіх годинників в цю мить «з точки зору» СВ K' та СВ K.

Розв'язання: Із відносності одночасовості випливає, що годинники K'-системи, що розміщені вздовж осі $O'X'$ та синхронізовані між собою в цій системі відліку (СВ K'), в СВ K будуть показувати різний час. Тобто, якщо в деякій точці на осі OX годинник СВ K показує час $t = 0$, то годинник СВ K', який в цю мить знаходиться в цій же точці x показує, згідно з перетвореннями Лорентца, час

$$t' = \frac{-xV/c^2}{\sqrt{1-B^2}}. \qquad (3.4)$$

Тоді, наприклад, для довільної точки x СВ K формулу (3.4) перепишемо у вигляді:

$$t'(x, t=0) = -\Gamma \frac{B}{c} x. \qquad (3.5)$$

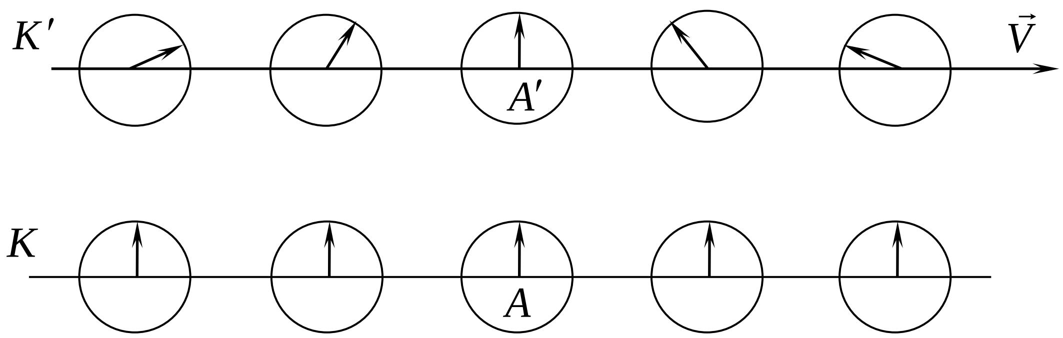


Рис. 3.5. Положення стрілок годинників СВ K' з точки зору СВ K в ту мить, коли годинники СВ K показують $t = 0$

Із формули (3.5) з очевидністю видно, що ж показують в момент часу $t = 0$ (за годинником СВ K) годинники СВ K', які знаходяться в точках з координатою x.

Покази годинників СВ K' графічно подані на рис. 3.6.

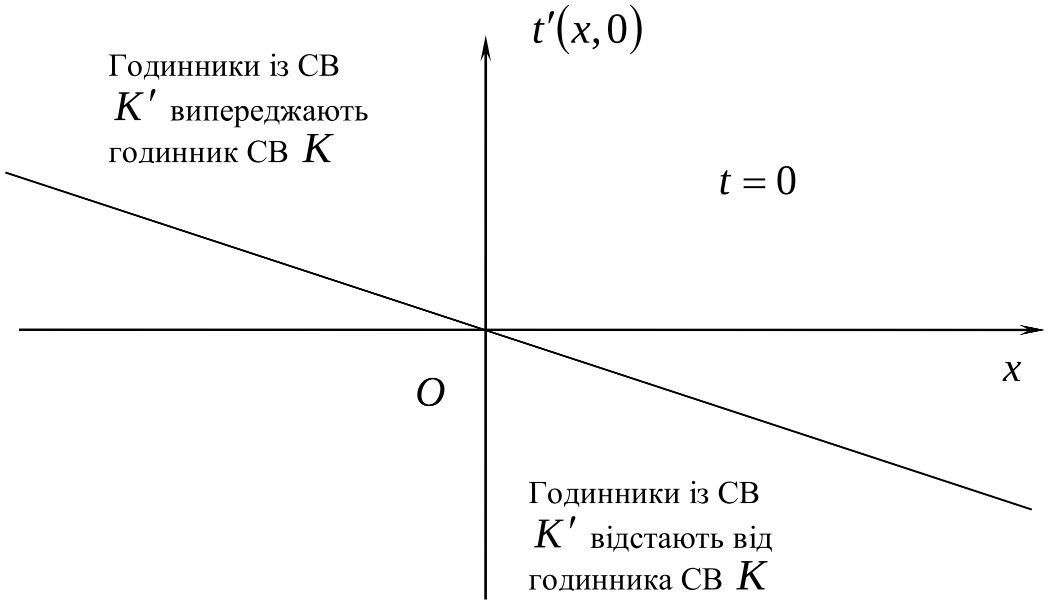


Рис. 3.6. Покази годинників СВ K' в в момент часу $t = 0$ (за годинником СВ K) в точках з координатами x

Зліва від початку відліку, годинники СВ K' все більше і більше випереджають годинники із СВ K, а праворуч – відстають від них (порівняйте з рис. 3.5)

Навпаки з точки зору СВ K', згідно з перетвореннями Лорентца

$$t = \frac{x' V / c^2}{\sqrt{1 - B^2}}, \tag{3.6}$$

годинники СВ K в ту мить коли $t' = 0$, показують час, що зображений на рис. 3.7.

Тоді, наприклад, для довільної точки x' СВ K' формулу (3.6) можна подати в такому вигляді:

$$t(x', t' = 0) = \Gamma \frac{B}{c} x'. \tag{3.7}$$

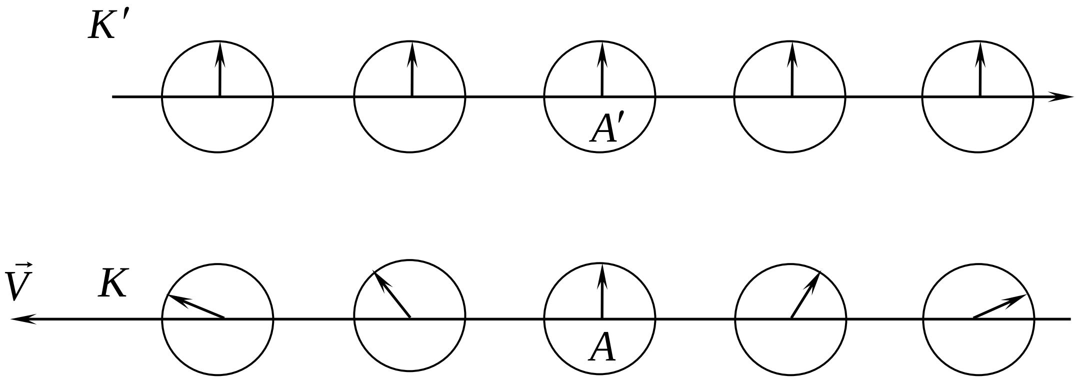


Рис. 3.7. Положення стрілок годинників СВ K з точки зору СВ K' в ту мить, коли годинники СВ K' показують $t' = 0$

Отже, в момент часу $t' = 0$ (за годинником СВ K') годинники СВ K показують різний час і цей час залежить від координати x', в якій у дану мить ($t' = 0$) знаходиться годинник СВ K.

Покази годинників СВ K, (залежність $t(x', t' = 0) = \Gamma \frac{B}{c} x'$ від координати x') подані на рис. 3.8.

Причому, праворуч від початку відліку, годинники СВ K все більше і більше випереджають годинники із СВ K', а зліва – відстають від них (порівняйте з рис. 3.7).

А відповідні проміжки часу, які показують годинники, що знаходяться в різних точках, будуть дорівнювати (із перетворень Лорентца):

$$t'_2 - t'_1 = \frac{-(x_2 - x_1)V / c^2}{\sqrt{1 - B^2}}, \; t_2 - t_1 = \frac{(x'_2 - x'_1)V / c^2}{\sqrt{1 - B^2}}. \qquad (3.8)$$

Формули (3.4) - (3.8) інколи називають формулами розсинхронізації [21, с. 50], або формулами різночасовості [14; 20].

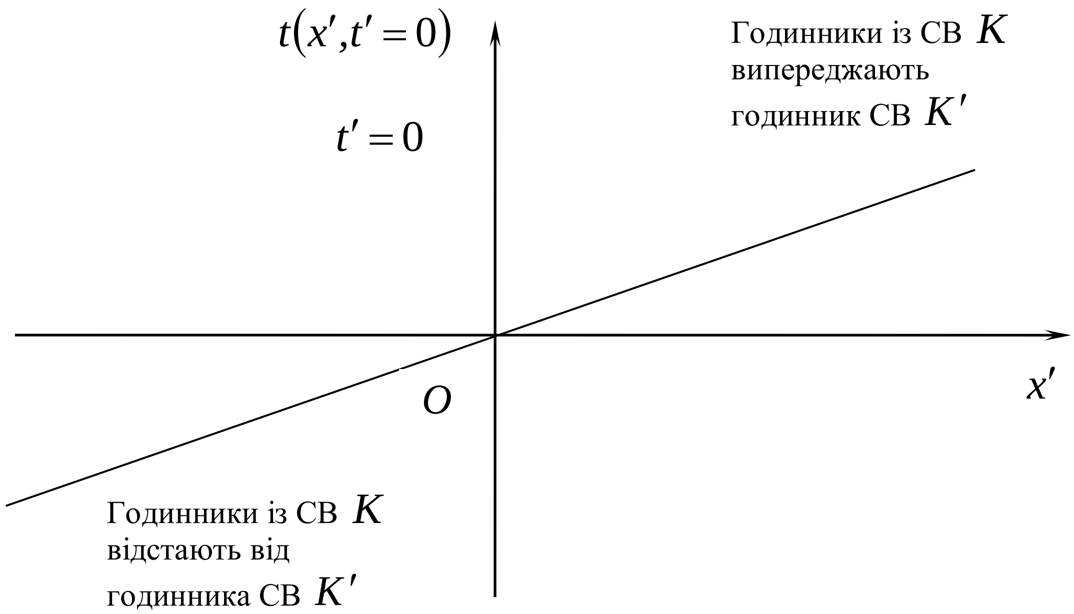


Рис. 3.8. Покази годинників СВ K в в момент часу $t' = 0$ (за годинником СВ K') в точках з координатами x'

Задача 3.15. Стрижень, що орієнтований паралельно вісі OX СВ K, рухається зі швидкістю υ вздовж вісі OY (див. рис. 3.9). Знайти кут θ' між стержнем та віссю $O'X'$ СВ K'. Осі OX та $O'X'$ СВ K та систем K' співпадають, а СВ K' рухається зі швидкістю $\vec{V}$ вздовж вісі OX [9].

Розв'язання: Утворення кута між стрижнем та віссю $O'X'$ СВ K' зумовлене відносністю одночасності.

Дійсно, якщо в деякий момент часу кінці стрижня співпадають з віссю OX в СВ K, то в системі K' ці дві події будуть не одночасними. Проміжок часу між цими подіями в СВ K' дорівнює, згідно з перетвореннями Лорентца (див. також (3.4), або (3.8) формули різночасовості):

$$\Delta t' = -\frac{\Delta x \cdot V / c^2}{\sqrt{1 - B^2}},$$

де Δx – власна довжина стрижня.

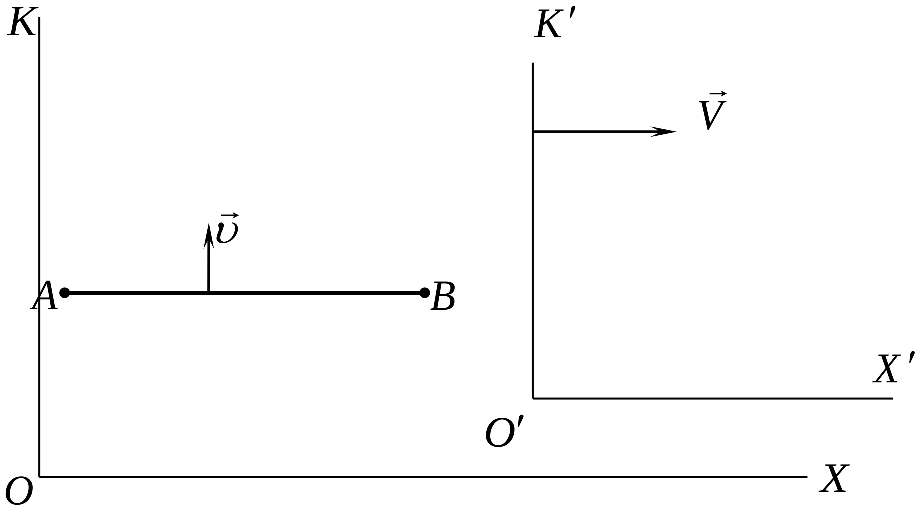


Рис. 3.9. Стрижень АВ, орієнтований паралельно вісі OX СВ K, рухається зі швидкістю υ вздовж вісі OY

Тобто з точки зору СВ K' спочатку (раніше) наступає подія в точці B, а потім в точці A (див. також рис. 3.9). Тобто, під час руху стрижня AB горизонтальну лінію спочатку перетинає точка B стрижня, а потім - точка A.

При цьому за цей час, $\Delta t'$, правий кінець стрижня (точка B) пройде шлях $\Delta y' = \upsilon'_y \cdot \Delta t'$, де $\upsilon'_y = \upsilon\sqrt{1-B^2}$.

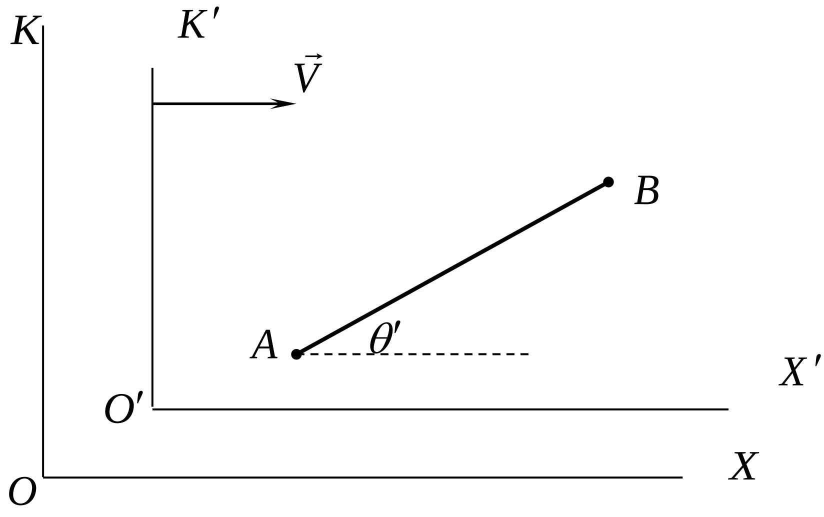


Рис. 3.10. З точки зору СВ K' стрижень буде повернутий проти ходу годинникової стрілки на кут θ'

Таким чином, в СВ K' стрижень буде повернутий проти ходу годинникової стрілки на кут θ' (рис. 3.10), який визначається:

$$tg\theta' = \frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \frac{\upsilon\sqrt{1-B^2}\cdot\Delta x\frac{V}{c^2}}{\sqrt{1-B^2}\cdot\Delta x\cdot\sqrt{1-B^2}} = \frac{B\cdot\upsilon}{c\sqrt{1-B^2}}, \qquad (3.9)$$

де $\Delta x' = \Delta x\sqrt{1-B^2}$.

Відповідь: $tg\theta' = \dfrac{\Delta y'}{\Delta x'} = \dfrac{B\cdot\upsilon}{c\sqrt{1-B^2}}$.

Задача 3.16. Стрижень $A'B'$ рухається з постійною швидкістю $\vec{V}$ відносно стрижня AB (рис. 3.11). Обидва стрижні мають однакову власну довжину l_0, причому на кінцях кожного з них встановлені синхронізовані між собою годинники: A з B та A' з B'. Ту мить, коли годинники B' і A виявилися навпроти один одного будемо вважати за початок відліку часу в системах відліку, які зв’язані з кожним із стрижнів. Визначити:

А) покази годинників B та B' в момент коли вони будуть навпроти один одного;

Б) покази годинників A і A' в ту мить, коли і вони виявляться навпроти один одного [10].

Розв’язання: Щоб годинник B' виявився навпроти годинника B йому, очевидно, необхідно переміститися на віддаль $l_0 = AB$. Час необхідний для цього, за годинниками A з B (за годинником СВ K), дорівнює $\frac{l_0}{V}$. Тобто, годинник B у цю мить буде показувати час $t(B) = \frac{l_0}{V}$.

А годинник B' у момент співпадання B' і B у просторі, згідно з перетвореннями Лорентца (очевидно, що з годинниками A' *та* B' звязана СВ K'), буде показувати час:

$$t'(x,t) = \Gamma\left(t - \frac{B}{c}x\right) = t(B').$$

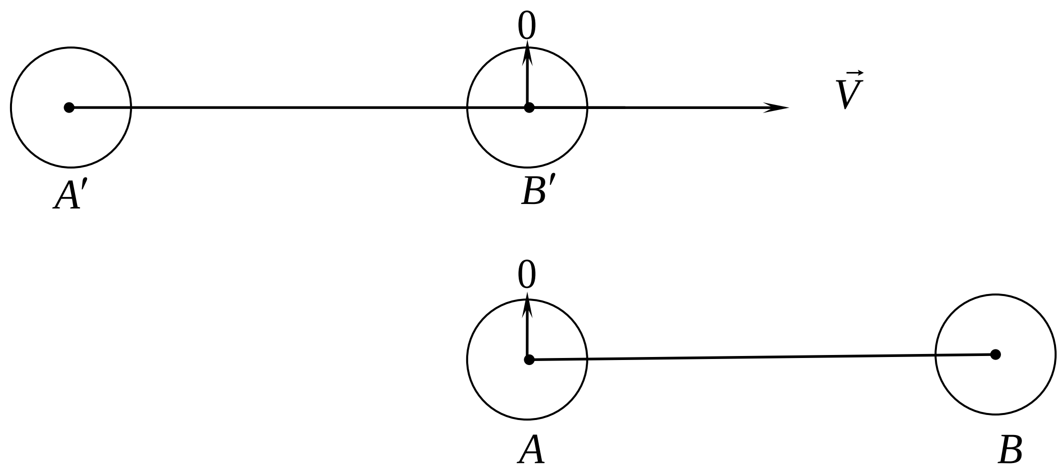


Рис. 3.11. Відносне положення стрижня $A'B'$ та стрижня AB в ту мить, коли годинники B' і A виявилися навпроти один одного

Звідси одержуємо:

$$t(B') = \Gamma\left(t - \frac{B}{c}x\right) = \Gamma\left(t(B) - \frac{B}{c}l_0\right) = \Gamma\left(\frac{l_0}{V} - \frac{B}{c}l_0\right) = \frac{l_0}{V}\sqrt{1 - B^2}.$$

З точки зору СВ K' (годинники A' *та* B', стержень $A'B'$) стрижень AB рухається зі швидкістю $\vec{V}$ у напрямі відємних значень осі $O'X'$. Тому з точки зору СВ K' (з точки зору годинника A') годинник A буде навпроти A' через проміжок часу $\frac{l_0}{V}$. Тобто, годинник A' у момент співпадання у просторі A' та A буде показувати час $t(A') = \frac{l_0}{V}$.

А згідно з перетвореннями Лорентца годинник A буде у цей момент показувати час:

$$t(x',t') = \Gamma\left(t' + \frac{B}{c}x'\right) = t(A).$$

Отже, маємо:

$$t(A) = \Gamma\left(t' + \frac{B}{c}x'\right) = \Gamma\left(t(A') + \frac{B}{c}(-l_0)\right) == \Gamma\left(\frac{l_0}{V} - \frac{B}{c}l_0\right) = \frac{l_0}{V}\sqrt{1-B^2}\ .$$

Відповідь: $t(B) = \dfrac{l_0}{V}$, $t(B') = \dfrac{l_0\sqrt{1-B^2}}{V}$, $t(A) = \dfrac{l_0\sqrt{1-B^2}}{V}$, $t(A') = \dfrac{l_0}{V}$.

Задача 3.17. Дві нестабільні частинки рухаються в СВ K вздовж деякої прямої з швидкістю $V = 0{,}99c$. Віддаль між ними в цій СВ дорівнює $l = 120$*м.* В деякий момент часу частинки розпалися одночасно в системі відліку, яка зв'язана з ними (СВ K'). Знайти проміжок часу між моментами розпаду обох частинок в лабораторній системі відліку [10].

Розв'язання: Згідно з перетвореннями Лорентца, оскільки частинки розпалися одночасно в СВ K', маємо (формула різночасовості):

$$t_2 - t_1 = \frac{(x_2' - x_1')\, V / c^2}{\sqrt{1-B^2}}.$$

Але $x_2' - x_1' = l_0$ - це власна довжина стрижня, яка зв'язана з довжино його в СВ K співвідношенням (рис. 3.12):

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1-B^2}}.$$

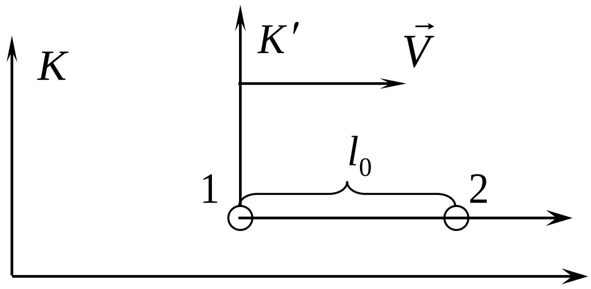


Рис. 3.12. Дві нестабільні частинки рухаються в СВ K вздовж деякої прямої з швидкістю V

Тому проміжок часу між моментами розпаду обох частинок в лабораторній системі відліку дорівнює:

$$t_2 - t_1 = \frac{l\dfrac{V}{c^2}}{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}.$$

$t_2 - t_1 > 0$, тому 2-а частинка (що рухалася першою згідно з рис. 3.12), розпалася раніше.

Відповідь: $t_2 - t_1 = \dfrac{l\dfrac{V}{c^2}}{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}$

Задача 3.18. В двох точках інерціальної системи відліку K відбулися події, розділені проміжком часу Δt. Показати, що події які причинно пов’язані в системі відліку K (наприклад, постріл і потрапляння кулі у мішень,), то ці ж самі події будуть причино пов’язані і в будь-якій іншій ІСВ K' [15].

Розв’язання: Проміжки часу у різних системах відліку пов’язані між собою перетвореннями Лорентца, а значить проміжок часу $\Delta t'$ пов'язаний з проміжком часу Δt наступним чином (див. [15, С. 82-84]):

$$\Delta t' = \Gamma \cdot \left(\Delta t - \frac{V}{c^2} \cdot \Delta x \right) = \Gamma \cdot \Delta t \left(1 - \frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t} \right),$$

де V -швидкість руху СВ K' відносно СВ K, $\Delta x = x_2 - x_1$ - просторова віддаль між подіями в СВ K.

Якщо дві події в СВ K причино пов'язані, $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$, то і в СВ K' ці події можуть бути причино зв'язані, коли $\Delta t' > 0$. Отже, проміжок часу між цими подіями в СВ K', $\Delta t'$, більший за нуль за умови:

$$\left(1 - \frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t} \right) > 0. \qquad (3.10)$$

Оскільки $V < c$, то ця нерівність буде мати місце завжди також й за умови $\left| \frac{\Delta x}{\Delta t} \right| \le c$.

Тому (3.10) може вказувати на можливість причинного зв'язку між подіями, оскільки послідовність подій в часі, за умов $V < c$ та $\left| \frac{\Delta x}{\Delta t} \right| \le c$, носить абсолютний характер. Нерівність (3.10) говорить і про фізичну можливість впливу однієї події на іншу.

Швидкість $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ може бути швидкістю деяких частинок, що передають взаємодію, швидкістю передачі сигналів і т.п. Подія в точці x_2 - наслідок події в точці x_1. Це може бути лише при умові, що швидкість розповсюдження взаємодій менша або рівна швидкості світла: $\frac{\Delta x}{\Delta t} \le c$.

Якщо події, які зв'язані деякою взаємодією, відбулися на віддалі Δx, то швидкість світла встигає передати цю взаємодію між точками x_1 і x_2. За час, що пройшов між настанням подій світло може пройти просторову відстань між цими подіями, оскільки $c\Delta t \ge \Delta x$, де $\Delta x = x_2 - x_1$ - віддаль між подіями.

Якщо допустити, що існує взаємодія, яка передається зі швидкістю більшою ніж швидкість світла, або припустити, що існують такі гіпотетичні частинки, які переносять цю взаємодію, тобто припустити, що:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} > c,$$

то тоді можна знайти таку СВ (що рухається с швидкістю V), в якій доданок $\frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t} = \frac{Vu}{c^2}$ буде більшим ніж одиниця. При цьому, згідно з (3.10), $\Delta t' < 0$ ($t_2' < t_1'$). Тобто, послідовність подій у часі стає зворотною.

Гіпотетичні частинки, які рухаються зі швидкістю $u = \frac{\Delta x}{\Delta t} > c$ називаються тахіонами. Теорія відносності, в принципі, не заперечує їх існування. Якщо вони існують, то послідовність перебігу подій у часі може бути змінена на протилежну в деякій системі відліку.

Відповідь: Дві події, які причино пов'язані в системі відліку K (наприклад, постріл і потрапляння кулі у мішень) будуть причино пов'язані і в будь-якій іншій СВ K' за умов $V < c$ та $\frac{\Delta x}{\Delta t} \leq c$.

Задача 3.19. В системі «Земля» подія B відбулася через $1c$ після події A і на відстані $6 \cdot 10^5 км$ від неї. З якою швидкістю і в якому напрямку має летіти ракета, щоб у СВ K', зв'язаній із нею події A і B були одночасними [26]?

Розв'язання: Оскільки в системі ракети (СВ K') події A і B одночасні, то (3.10) набуває вигляду:

$$\left(1 - \frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t}\right) = 0.$$

Звідси знаходимо швидкість руху ракети (СВ K'):

$$B = \frac{V}{c} = \frac{c\Delta t}{\Delta x}.$$

Нехай вісь OX спрямована від місця, де відбулася подія A, до місця де відбулася подія B, тоді за умовою маємо:

$$\Delta x = 6 \cdot 10^5 км,\ \Delta t = 1\,c, \text{ тоді } B = \frac{V}{c} = \frac{c\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{2}.$$

Значить, ракета має летіти зі швидкістю $V = 0.5c$ в напрямку від точки A до точки B.

Відповідь: $V = 0.5c$.

Задача 3.20. У системі «Зорі» подія P і Q відбулися на відстані $3 \cdot 10^6 км$ одна від одної. Відомо, що спочатку відбулася подія P, а через 15 секунд відбулася подія Q.

А) Чи існує інерційна система відліку, в якій подія Q відбулася раніше події P?

Б) Чи існує СВ, в якій події P та Q відбулися в одному й тому ж місці [23]?

Розв'язання: А) За умовою задачі $t_Q - t_P = \Delta t = 15 сек$, $\Delta x = 3 \cdot 10^6 км$. Скористаємося тепер розв'язанням **Задачі 3.18**. Згідно з (3.10) умовою існування СВ, в якій послідовність подій P і Q буде зворотною, є нерівність:

$$\left(1 - \frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t}\right) < 0.$$

Але другий доданок в дужках цієї нерівності $\frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t} = \frac{V}{c} \cdot \frac{3 \cdot 10^9 м}{c \cdot 15 сек} = \frac{V}{c} \cdot \frac{2}{3} < 1$ не може бути більше за одиницю. Тобто, за умов задачі попередня нерівність не справджується. Очевидно маємо:

$$\left(1 - \frac{V}{c} \cdot \frac{\Delta x}{c \cdot \Delta t}\right) > 0.$$

Отже, послідовність P і Q у часі в жодній інерційній системі відліку не може бути змінена. І, взагалі кажучи, подія P могла бути причиною події Q, оскільки за 15 секунд світло проходить відстань $4.5 \cdot 10^6 км$. Це більше, ніж відстань у просторі між подіями P і Q.

Б) Щоб знайти швидкість, з якою повинна рухатись СВ K', щоб ці дві події відбувались в одній точці цієї СВ K' ($\Delta x' = 0$), скористаємося перетвореннями Лорентца (58):

$$x'(x,t) = \Gamma(x - Vt).$$

Звідси випливає, що:

$$\Delta x' = (\Delta x - V\Delta t) \cdot \Gamma = \Delta t \cdot (u - V) \cdot \Gamma,$$

де $u = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$.

І тоді очевидно, що швидкість СВ K' повинна дорівнювати:

$$u = V.$$

Тобто, СВ K' повинна бути весь час пов'язана з цим явищем, що характеризується подіями P і Q, і яке переміщується з швидкістю $u = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ відносно СВ K.

Відповідь: Відтак, А) не існує інерційної система відліку, в якій подія Q відбулася раніше події P.

Б) Існує СВ, в якій події P та Q відбулися в одному й тому ж місці. Це СВ K' - система відліку, що пов'язана із явищем (можливо із явищем, що відбувається в ракеті), яка рухається зі швидкістю $u = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = 2 \cdot 10^8 \, {}^{м}\!/_{сек}$.

Задача 3.21. У системі «Зорі» подія B відбулася через 1 секунду після події A і на відстані 600000 км від неї. З якою швидкістю і в якому напрямку повинна летіти ракета, щоб у пов'язаній із нею ІСВ події A та B були одночасними [23]?

Розв’язання: Розв’яжемо цю задачу, на відміну від розв’язання **Задачі 3.19**, використовуючи діаграму Мінковського (методику побудови діаграм Мінковського див. у Додатку Б). СВ K' пов’яжемо з ракетою, а СВ K із Зорею. Тоді діаграма Мінковського має вигляд, що зображений на рис. 3.13.

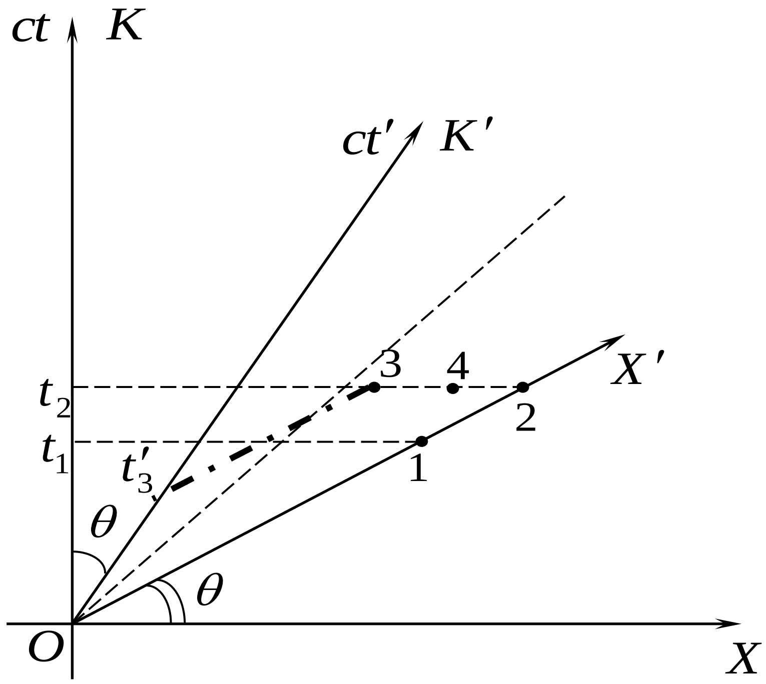


Рис. 3.13. Зображення на діаграмі Мінковського просторових та часових осей СВ K та СВ K'

Нагадаємо, що на рис. 3.13. події 3 та 4 одночасові в СВ K (час настання цих подій t_2), а в СВ K' події 3 та 4 відбуваються неодночасово (зокрема, час настання події 3 в СВ K' дорівнює t'_3).

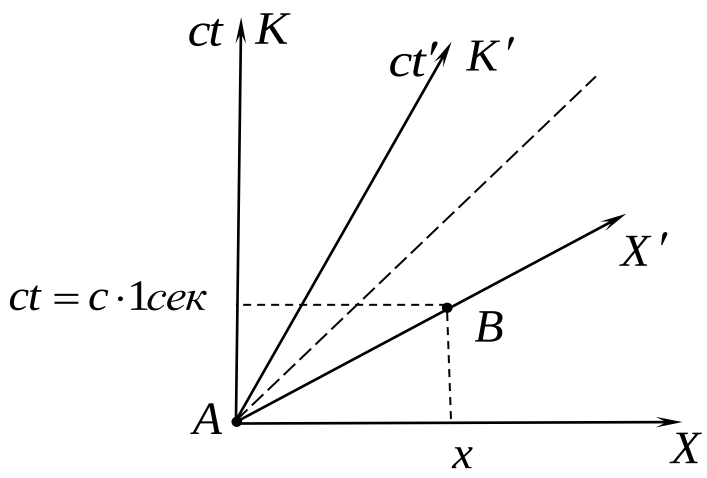


Рис. 3.14. Діаграма Мінковського для умов **Задачі 3.21**

Побудуємо просторово-часовий графік (діаграму Мінковського) (рис. 3.14) у системі «Зорі», прийнявши подію А за початкову і відмітимо на ньому подію В.

Проведемо через А та В вісь нульового часу (це просторова вісь СВ K') тієї СВ, в якій події А та В одночасні. Нахил θ цієї вісі до вісі AX СВ K (див. Додаток Б) такий, що $tg\theta = \frac{V}{c}$.

Із рис. 3.14 $tg\theta = \frac{ct}{x} = \frac{c \cdot 1сек}{6 \cdot 10^5 км} = \frac{3 \cdot 10^8 м}{6 \cdot 10^8 м} = \frac{1}{2}$.

Отже, $V = \frac{1}{2}c$.

Відповідь: $V = \frac{1}{2}c$; вісь Act' є графік руху початку координат СВ K' відносно СВ K (система «Зорі»). Отже, у початковій СВ (система «Зорі») система відліку, що зв’язана з ракетою, повинна рухатися у напрямку від місця більш ранньої події А до місця події, що відбулася пізніше (подія В).

Задача 3.22. На екрані осцилографа спостерігається світна точка в тому місці, куди потрапляє пучок електронів. Пучок відхиляється змінним електричним (найчастіше) полем, внаслідок чого світна точка переміщується вздовж екрана з деякою швидкістю υ. Чи може швидкість υ перевищувати швидкість світла у вакуумі?

Розв'язання: Рух світної точки на екрані не є рухом матеріального об'єкта. Це рух спалахів на екрані від електронів, кожний з яких попадає на екран пізніше попереднього, тобто кожний наступний спалах не зв'язаний з попереднім причинним зв'язком. Швидкість υ переміщення світної точки може перевищувати швидкість світла c і бути як завгодно великою, тому що кожний наступний спалах не зв'язаний з попереднім причинним зв'язком.

Задача 3.23. Знайти швидкість з якою переміщується «світловий зайчик» по поверхні Землі від пульсара PSR B0531+21 в центрі Крабовидної туманності. Кутова швидкість обертання пульсара $\omega = 30\dfrac{1}{сек}$, а віддаль до пульсара $l = 2кпк$. Чи можна вважати, що швидкість переміщення «зайчика» є швидкість переміщення світлового сигналу.

Розв'язання: $\upsilon = l \cdot \omega = 2кпк \cdot 30\dfrac{1}{сек}$.

Парсе́к (скорочено пк) – поширена в астрономії позасистемна одиниця довжини. Це відстань, із якої середній радіус земної орбіти (рівний 1 а.о.) перпендикулярний до променю зору, видно під кутом 1″(одна кутова секунда). При цьому $1пк \approx 3{,}085 \cdot 10^{16}\,м$.

Тому швидкість переміщення «світлового зайчика» дорівнює:

$$\upsilon = l \cdot \omega = 2кпк \cdot 30\frac{1}{сек} \approx 2 \cdot 10^{3} \cdot 3{,}085 \cdot 10^{16}\,м \cdot 30\frac{1}{сек} \approx 1{,}85 \cdot 10^{21}\,\frac{м}{сек}.$$

Відповідь: $1{,}85 \cdot 10^{21}\,\dfrac{м}{сек}$. Ця швидкість не є переміщенням будь-якого об'єкту, а тому не є швидкістю поширення сигналу.

3.2. Завдання для самоконтролю і контролю знань

Завдання 1. Яку відстань пролетить піон (π-мезон) до розпаду, якщо його швидкість $\upsilon = 0{,}99c$, а власний час життя $\tau_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-8} c$? Яка була б довжина прольоту, якби не було релятивістського уповільнення часу? Відстань вимірюється в лабораторній системі відліку.

Відповідь:

$$l = \upsilon t = \frac{\upsilon \tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{0{,}99 \cdot 3{,}0 \cdot 10^8 \cdot 2{,}6 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{1 - 0{,}99^2}} = \frac{0{,}99 \cdot 3{,}0 \cdot 2{,}6}{0{,}1 \cdot 1{,}41} = 55 м;$$

$$l_0 = \upsilon \tau_0 = 0{,}99 \cdot 3{,}0 \cdot 10^8 \cdot 2{,}6 \cdot 10^{-8} = 7{,}7 м.$$

Завдання 2. В K- системі відліку знаходиться нерухомий стрижень, довжина якого $l = 10 м$ і який орієнтований під кутом $\alpha = 60^0$ до осі OX. Знайти його довжину l' та відповідний кут α' в K'- системі, яка рухається відносно СВ K зі швидкістю $V = \frac{c}{2}$ вздовж осі OX.

Відповідь: $l' = l\sqrt{1 - B^2 \cos^2 \alpha} = 0.968 м$, $\alpha' = 63^o 25'$.

Завдання 3. Дві релятивістські частинки рухаються під прямим кутом одна до одної в лабораторній системі відліку, причому перша зі швидкістю υ_1, а друга зі швидкістю υ_2. Знайти їх відносну швидкість.

Відповідь: $\upsilon = \sqrt{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 - \frac{\upsilon_2^2 \upsilon_1^2}{c^2}}$.

Завдання 4. Два стрижня однакової власної довжини l_0 рухаються один одному назустріч в повздовжньому напрямку паралельно спільній горизонтальній вісі з однаковою швидкістю υ відносно лабораторної системи відліку. Чому дорівнює довжина кожного стрижня в системі відліку, що зв’язана з іншим стрижнем?

Відповідь: $l = l_0 \dfrac{1-\beta^2}{1+\beta^2}$, де $\beta = \dfrac{\upsilon}{c}$.

Завдання 5. У двох точках, відстань між якими вздовж осі абсцис СВ K $x_2 - x_1 = l$, одночасно відбулися дві події. Знайти проміжок часу між цими подіями в довільній, наприклад в СВ K', інерціальній системі відліку.

$$\textit{Відповідь: } \tau = t_2' - t_1' = \frac{t_2 + \left(\dfrac{x_2 V}{c^2}\right) - t_1 - \left(\dfrac{x_1 V}{c^2}\right)}{\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}} = \frac{l \cdot V}{c^2\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}},$$

де V – швидкість нової системи відліку, $t_2 - t_1 = 0$. Знак проміжку часу залежить від знаку швидкості V, тобто від напряму руху системи відліку.

Завдання 6. Знайти власний час життя частинки, якщо її швидкість відрізняється від швидкості світла у вакуумі на 0,2%, а відстань, яку пролітає частинка до розпаду, приблизно дорівнює 300 км.

Відповідь:

$$\tau_0 = \tau\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} = \frac{l\sqrt{1-\dfrac{V^2}{c^2}}}{V} = \frac{3\cdot 10^5\sqrt{1-0{,}998^2}}{0{,}998\cdot 3\cdot 10^8} = \frac{10^{-3}\sqrt{0{,}002\cdot 1{,}998}}{0{,}998} = 6{,}3\cdot 10^{-5}c.$$

Завдання 7. У СВ K' частинка рухається зі швидкістю υ' під кутом θ' до осі $O'X'$. Вивести формулу, що визначає зміну напряму швидкості частинки при переході від СВ K' до СВ K.

$$\textit{Відповідь: } tg\theta = \frac{\upsilon'\sqrt{1-B^2}\sin\theta'}{\upsilon'\cos\theta' + V}.$$

Завдання 8. Уведемо таке означення: довжина рухомого стрижня дорівнює добутку його швидкості V на проміжок часу між моментами, коли його початок і кінець проходять повз нерухомий годинник. Власна довжина визначається аналогічно за допомогою годинника, що рухається з такою ж швидкістю вздовж нерухомого стрижня. Знайти співвідношення між довжиною рухомого стрижня l і його власною довжиною l_0.

Відповідь:

$$\frac{l}{l_0}=\frac{\tau_0}{\tau}=\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}};\quad l=l_0\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}.$$

Завдання 9. Оцінити відносну похибку, що виникає при розрахунку, якщо замість релятивістського закону додавання швидкостей скористатися класичним.

Відповідь: $\varepsilon=\dfrac{u_{кл}-u_{рел}}{u_{рел}}=\dfrac{\upsilon_1+\upsilon_2}{\dfrac{\upsilon_1+\upsilon_2}{1+\dfrac{\upsilon_1\cdot\upsilon_2}{c^2}}}-1=\dfrac{\upsilon_1\cdot\upsilon_2}{c^2}.$

Завдання 10. У прискорювачі на зустрічних пучках протони рухаються зі швидкістю $\upsilon=0{,}99000c$ відносно установки. Чому дорівнює швидкість одного протона відносно іншого?

Відповідь: Необхідно скористатися моделлю розв'язання ***Задачі 3.7*** або ***Задачі 3.8.*** У результаті маємо: $\upsilon=\dfrac{\upsilon+\upsilon}{1+\dfrac{\upsilon\cdot\upsilon}{c^2}}$.

Підставляючи дані у формулу, отримуємо: $\upsilon=0{,}99995c$.

Швидкість одного протона відносно іншого дорівнює $0{,}99995c$.

Завдання 11. За допомогою формули перетворень швидкостей отримати результати досліду Фізо. Показним заломлення світла у воді n [15].

Відповідь: (див. **Задачу 3.11**), $\upsilon\approx\dfrac{c}{n}+u\left(1-\dfrac{1}{n^2}\right)$, де u - швидкість СВ K', яка зв'язана з рухомою водою, $u\ll c$.

Завдання 12. Власний час життя деякої нестабільної частинки $10\,нс$. Знайдіть шлях, пройдений цією частинкою допоки вона не зазнає розпаду у нерухомій системі відліку, якщо час її життя в ній $20\,нс$.

Відповідь: $S=\upsilon\cdot t=c\sqrt{1-\left(\dfrac{t'}{t}\right)^2}=3\cdot10^8\sqrt{1-\left(\dfrac{10^{-8}}{2\cdot10^{-8}}\right)^2}\cdot2\cdot10^{-8}=5.2м$, де t' - власний час життя частинки, t - час життя частинки в лабораторній СВ K.

Завдання 13. Ракета рухається відносно нерухомого спостерігача зі швидкістю $\upsilon = 0.99c$ (c-швидкість світла у вакуумі). Який час пройде за годинником нерухомого спостерігача, якщо за годинником, який пов'язаний із ракетою, пройшов один рік? Як зміняться лінійні розміри тіл у ракеті (в напрямі її руху) с точки зору нерухомого спостерігача [24]?

Відповідь: $t \approx 7.1\,роки$; $l \approx 0.14 l_0$, де l_0 - власний лінійний розмір тіла.

Завдання 14. У СВ K мюон, що рухається зі швидкістю $\upsilon = 0.99c$, пролетів від місця свого народження до точки розпаду $l = 3.0\,км$.

Розрахувати:

а) власний час життя частинки;

б) відстань, яку пролетів мюон у СВ K, з «його точки зору» [25].

Відповідь: $\Delta t' = \dfrac{l}{\upsilon}\sqrt{1-\left(\dfrac{\upsilon}{c}\right)^2} = 1.4\,мкс$; $l' = \upsilon\Delta t' = l\sqrt{1-\left(\dfrac{\upsilon}{c}\right)^2} = 420\,м$.

Завдання 15. Два електрони рухаються вздовж однієї прямої зі швидкостями $0.9c$ і $0.8c$ відносно нерухомого спостерігача. Яка відносна швидкість руху електронів при їх русі в одному напрямі? в протилежних напрямах?

Завдання 16. На ракеті, яка летить відносно спостерігача зі швидкістю близькою до швидкості світла c, відбувся спалах. З точки зору космонавта, який знаходиться у ракеті, хвильовий фронт має вигляд сфери, яка рівномірно поширюється. Який буде хвильовий фронт з точки зору спостерігача [26]?

Відповідь: хвильовий фронт, що бачитиме спостерігач, теж буде сферичним, адже світло поширюється однаково у всіх ІСВ.

Завдання 17. Іонізований атом, вилетівши з прискорювача зі швидкістю $\upsilon = 0.8c$, випустив фотон в напрямі свого руху. Знайти швидкість фотона відносно прискорювача.

Відповідь: $\upsilon_c = 1{,}0c$.

Завдання 18. Використовуючи метод діаграм Мінковського розв'язати й пояснити **Задачу 3.20**.

Завдання 19. Прискорювач надав радіоактивному ядру швидкість $\upsilon = 0{,}4c$. У момент вильоту цього ядра із прискорювача, ядро «викинуло» в напрямі свого руху електрон зі швидкістю $\upsilon = 0{,}75c$ відносно прискорювача. Знайти швидкість електрона відносно ядра.

Відповідь: $\upsilon' = 0{,}5c$.

Завдання 20. Фотон летить поперек ракети зі швидкістю світла відносно ракети. Ракета рухається відносно зір зі швидкістю V. Знайти повну швидкість фотона відносно зір.

Відповідь: швидкість фотона відносно зір дорівнює $\upsilon_c = 1{,}0c$.

Завдання 21. Дві ракети рухаються рівномірно та прямолінійно паралельними курсами в одному напрямі зі швидкістю $\upsilon = 0.6c$ відносно Землі. У першій ракеті відбуваються дві послідовні події з проміжком часу $8\,год$. Який час пройшов між цими подіями за годинником спостерігача у другій ракеті? на Землі?

Відповідь: 8 год., 10 год.

Завдання 22. Літак рухається зі швидкістю υ назустріч нерухомому джерелу світла. З якою швидкістю u зближається літак з фотонами, які випромінюються джерелом?

Відповідь: використовуючи модель розв'язання **Задачі 3.7** та **Задачі 3.8** одержуємо, що швидкість фотонів відносно літака (швидкість зближення) $|u| = c$.

Список використаної літератури до третього розділу

1. Бурак В. І., Коновал О. А., Туркот Т. І. Методика вивчення спеціальної теорії відносності в середній школі в умовах профільної диференціації навчання: навчальний посібник для самостійної роботи студентів / за ред. проф. О.А. Коновала. Кривий Ріг: КПІ ДВНЗ «КНУ», 2014. 160 с.
2. Воробьев И. И. Теория относительности в задачах. Москва: Наука, 1989. 174 с.
3. Глазунов А. Т., Нурминский И. И., Пинский А. А. Методика преподавания физики в средней школе: Электродинамика нестационарных явлений. Квантовая физика: пособ. для учителя. Москва: Просвещение, 1989. 272 с.
4. Гончаренко С. У. Фізика: підруч. для 11 кл. серед. загальноосв. шк. Київ: Освіта, 2002. 319 с.
5. Гельфгат І.М. Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В.М.): підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. Освіти. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.
6. Засєкіна Т. М., Головка М. В. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: профільн. Рівень. Київ: Педагогічна думка, 2010. 304 с.
7. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: академ. рівень, профіл.рівень. Харків: Сиция, 2012. 352 с.
8. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика (профільний рівень): підруч. для 10 кл. закладів загальної середньої освіти. Київ: УОВЦ «Оріон», 2018. 304 с.
9. Иродов И. Е. Механика. Основные законы / 6-е изд. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 312 с.
10. Иродов И. Е. Задачи по общей физике / изд. 4-е, исправл. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 432 с.
11. Коновал О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. 346 с.
12. Коновал О.А. Електродинаміка і теорія відносності: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів. Криворізький державний педагогічний університет. Кривий Ріг: Криворізький державний педагогічний університет, 2011. 133 с.
13. Теорія і практика організації самостійної роботи студентів вищих

навчальних закладів: монографія / за ред.: проф. О.А. Коновала. Кривий Ріг: Книжкове видавництво Кирєєвського, 2012. 380 с.

14. Коновал О.А. Науково-методичний аналіз методів обґрунтування перетворень Лорентца: навчальний посібник для самостійної роботи студентів / Криворізький педагогічний інститут ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2014. 137 с.

15. Коновал О.А. Основи спеціальної теорії відносності: навч.-метод. посіб. для самост. роб. студ. вищ. пед. навч. закл. / Криворізький педагогічний університет ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг: Вид. Р. А. Козлов, 2014. 272 с.

16. Коршак Є. В., Ляшенко О. І., Савченко В. Ф. Фізика: підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл.: рівень стандарту. Київ: Генеза, 2010. 191 с.

17. Малинин А. Н. Элементы теории относительности и её физических приложений: учеб. пособ. для шк. и кл. с углубл. изуч. физики. Липецк: Изд-во ЛГПИ, 1995. 278 с.

18. Малинин А. Н. Методические вопросы теории относительности: сб. статей. Липецк: Изд-во ЛГПИ, 2000. 267 с.

19. Малинин А. Н. Методические основы изучения теории относительности в курсах физики средних общеобразовательных учреждений и педвузов: автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра пед. Наук: 13.00.02 / Московский пед. ун-т. Москва, 2000. 65 с.

20. Малинин А. Н. Теория относительности в задачах и упражнениях. М: Просвещение, 1983. 176 с.

21. Угаров В. А. Специальная теория относительности. Москва: Наука, 1977. 384 с.

22. Пинский А.А. Задачи по физике: учебное пособие. Москва: Наука, 1978. 288 с.

23. Соколовский Ю. И. Элементарный задачник по теории относительности (с решениями). М.: Наука, 1971.

24. Гладкова Р. А., Цодиков Ф. С. Задачи и вопросы по физике: Учеб. пособ. для вузов./ под ред. Гладковой Р.А. - 9-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 384 с.

25. Кирилов В. М., Давыдов В. А., Задерновский А. А., Зубов В. Е., Сафронов А. Н. Решение задач по физике: уч. пос. изд. 2-е, испр. и доп. М.: КомКнига, 2006. – 248 с.

26. Кузнецов С. И. Сборник задач по физике с решениями. Специальная теория относительности, атомная и ядерная физика: уч. пос. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 36 с.

27. Ахметов Т.Д., Болеста А.В., Еманов Ф.А., Руденко А.С., Тельнов

В.И., Шошин А.А. Задачи по механике и теории относительности. Под ред. В.И. Тельнова / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016. 170 с.

28. Соломенко А. О., Коновал О. А., Шолохова Н. С. Релятивістські кінематичні ефекти: методичні рекомендації до самостійної роботи студентів фізико-математичних факультетів та вчителів фізики. Кривий Ріг-Херсон: ДВНЗ «КДПУ», 2016. 41 с.

29. Соломенко А. О., Коновал О. А., Туркот Т. І. Дидактичний потенціал фізики у розвитку критичного мислення. *Педагогіка вищої та середньої школи*. Кривий Ріг. 2017. Вип. 1 (50). С. 147-155.

Додатки. Матеріали для творчих роздумів

Додаток А
Традиційний метод обґрунтування перетворень Лорентца

Традиційний метод ґрунтується на поєднанні властивостей однорідності простору і часу та постулатів Ейнштейна В основі цього методу обґрунтування ПЛ лежать 4 положення [37, с. 53] (посилання на літературу в ДОДАТКАХ беремо зі СПИСКУ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2):

а) однорідність простору і часу. Це означає, що вид перетворень не повинен залежати від вибору початку відліку просторових координат або часу;

б) ізотропія простору, тобто рівноправність усіх напрямів в просторі;

в) принцип відносності, тобто повна рівноправність усіх систем відліку;

г) постулат сталості швидкості світла.

Оскільки координати події x, y, z, t та x', y', z', t' описують одну і ту ж подію, яка існує в реальності незалежно від наявності чи відсутності систем відліку K і K', очевидно повинні бути наступні однозначні математичні залежності:

$$\begin{matrix} x' = \varphi_1(x, y, z, t), & y' = \varphi_2(x, y, z, t), \\ z' = \varphi_3(x, y, z, t), & t' = \psi(x, y, z, t) \end{matrix} . \qquad (A.1)$$

Дійсно, знайдемо нескінченно малу зміну dx':

$$dx' = \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} dx + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} dy + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} dz + \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} dt. \qquad (A.2)$$

Але внаслідок однорідності простору і часу співвідношення (А.2) повинно бути однаковим для всіх подій. Тобто величини $\frac{\partial \varphi_1}{\partial x}, \frac{\partial \varphi_1}{\partial y}, \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \frac{\partial \varphi_1}{\partial t}$ не повинні залежати від просторових координат і часу, а отже ці величини є постійними.

Іншими словами, функція $x' = \varphi_1(x, y, z, t)$ має вигляд:

$$x' = \varphi_1(x, y, z, t) = A_1 x + A_2 y + A_3 z + A_4 t + A_5 .$$

Тобто, функція $x' = \varphi_1(x, y, z, t)$ є лінійною функцією своїх аргументів x, y, z, t.

Аналогічно можна впевнитися, що і інші шукані нами функції (функції перетворення просторових і часової координат довільної події при переході від СВ K' до СВ K) $y' = \varphi_2(x, y, z, t)$, $z' = \varphi_3(x, y, z, t)$, $t' = \psi(x, y, z, t)$ є лінійними функціями x, y, z, t.

Далі, оскільки в початковий момент часу ($t = t' = 0$) початки координат СВ K $x = y = z = 0$ й СВ K' $x' = y' = z' = 0$ співпадають, то перетворення (А.1) для y' *і* z' повинні мати вигляд:

$$\begin{aligned} y' &= a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 t \\ z' &= b_1 x + b_2 y + b_3 z + b_4 t \end{aligned}. \tag{А.3}$$

Згідно зі стандартним розташуванням систем відліку K і K' (рис. 2.1), вісь Y' паралельна осі Y, вісь Z' паралельна осі Z.

І оскільки осі OX *і* $O'X'$ співпадають, то, із умови $y = 0$, одержуємо $y' = 0$, а із $z = 0$ - рівність $z' = 0$, і тоді із (А.3) маємо:

$$\begin{aligned} 0 &= a_1 x + a_3 z + a_4 t \\ 0 &= b_1 x + b_2 y + b_4 t \end{aligned} \tag{А.4}$$

при будь яких значеннях x, y, z, t.

Але останнє можливе тоді і тільки тоді, коли $a_1 = a_3 = a_4 = 0$ $b_1 = b_2 = b_4 = 0$.

Більше того, враховуючи, що із-за рівноправності осей OZ та OY відносно напряму руху СВ K', коефіцієнти в перетвореннях (А.3) повинні бути однаковими: $a_2 = b_3 = a$.

Узагальнюючи попереднє можна сказати, що із однорідності простору і часу випливає, що шукані ПЛ для y' та z' повинні мати вигляд:

$$y' = ay, \quad z' = az. \tag{А.5}$$

Коефіцієнти a в формулах (А.5) показують у скільки разів довжина деякого стрижня (що орієнтований вздовж осі OY або вісі OZ, відповідно) у СВ K' більше, ніж у СВ K.

Якщо ж (А.5) переписати у вигляді

$$y = \frac{1}{a} y', \quad z = \frac{1}{a} z', \tag{А.6}$$

то величина $\frac{1}{a}$ показує у скільки разів довжина деякого стрижня (що орієнтований вздовж осі $O'Y'$ або вісі $O'Z'$, відповідно) у СВ K більше, ніж у СВ K'.

Згідно ж із принципом відносності, наші системи відліку K і K' (рис. 2.1) абсолютно рівноправні, і тому при переході від однієї СВ до іншої довжина стрижня, що розташований перпендикулярно напряму відносного руху систем відліку, повинна змінюватися точно таким же чином (у таку ж кількість разів), як при зворотному переході.

Тому у формулах (А.5) та (А.6) ми повинні мати $\frac{1}{a} = a$.

Тобто $a = \pm 1$. І оскільки додатні напрями осей OY, $O'Y'$ та осей OZ, $O'Z'$ збігаються, то слід вибрати для коефіцієнта a значення $a = +1$.

Таким чином, для поперечних просторових координат довільної події маємо:

$$y' = y, \quad z' = z. \tag{A.7}$$

Оскільки координата y' та z' перетворюються окремо від x та t, то змінні x та t будуть зв'язані лінійними перетвореннями тільки самі з собою.

Тобто, $x' = f(x,t)$ і навпаки $x = f'(x',t')$. Знаходження явного виду функцій $f(x,t)$ та $f'(x',t')$ подано п.1.2. посібника [25, с. 18-21].

Додаток Б
Методика побудови діаграм Мінковського [25].

Основним поняттям геометричної інтерпретації СТВ являється поняття події, яка характеризується 4 числами x, y, z, t – місцем настання та часом настання події. Г. Мінковський стверджував, що «Предметом нашого сприйняття завжди являються тільки місце та час взяті разом. Ніхто ще не спостерігав будь-якого місця інакше, ніж в деякий момент часу і будь-який час інакше, ніж в деякому місці» [42, с. 168].

Оскільки подія характеризується координатами x, y, z, t, то вся сукупність координат фізичних подій в довільній системі відліку утворює 4 - вимірний багатовид**, причому зв'язок між координатами багатовидів у двох систем відліку дається перетвореннями Лорентца**.

Як відомо, довільний багатовид можна перетворити у відповідний простір тільки тоді, коли в цьому багатовиді визначити геометричні властивості: «віддаль» між двома нескінченно близькими точками цього багатовиду, кути між прямими, площинами, тощо. Тобто, щоб єдиний просторово-часовий багатовид перетворити у відповідний простір необхідно ввести метрику в цьому багатовиді.

Як же встановити, чи визначити метрику в 4-вимірному багатовиді СТВ? Ця метрика повинна невимушено витікати із теоретичних узагальнень сукупності експериментальних фактів. Але ця сукупність експериментальних фактів привела до формулювання принципів СТВ, а останні, як можна впевнитися в [25, с. 26] дають:

$$\Delta S^2 = c^2 \Delta\tau^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2,$$

(Б.1)

де ΔS^2 (квадрат «віддалі») між двома близькими подіями; $\Delta\tau$ - проміжок часу між цими двома подіями у власній системі відліку; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - просторові віддалі між двома подіями в СВ K, відповідно по осях OX, OY, OZ; $\Delta x', \Delta y', \Delta z'$ - просторові віддалі між *цими ж двома подіями в СВ* K', відповідно по осях $O'X', O'Y', O'Z'$; Δt, $\Delta t'$ - проміжки часу між цими двома подіями з точок зору СВ K та СВ K' відповідно; c - швидкість світла у вакуумі.

Величина ΔS^2 має одне й те саме значення у всіх ІСВ, тобто є інваріантом.

Отже, із постулатів теорії відносності випливає, що квадрат «віддалі» між двома близькими подіями дається квадратом інтервалу між цими двома подіями та є інваріантною величиною.

Таким чином, можна стверджувати, що постулати СТВ дозволяють визначити квадрат віддалі між двома близькими подіями ΔS^2. Значення ΔS^2 не залежить від вибору СВ і тому квадрат інтервалу можна використати для введення метрики в 4-вимірному багатовиді. І таким чином перетворити 4-вимірний багатовид в простір-час Мінковського. Точками цього 4-вимірного простору-часу є сукупність всіх подій в тій чи іншій СВ.

Тобто 3-вимірний простір і одновимірний час об'єднуються в єдиний псевдоевклідовий простір-час Мінковського. В основі об'єднання простору і часу лежить вираз для ΔS^2. Інваріантність квадрату інтервалу приводить до нових поглядів і уявлень на природу просторово-часових відношень. Хоча і зараз видно із форми (Б.1), що як просторова віддаль, так і часова «віддаль» між подіями змінюються при переході від однієї системи відліку до іншої (носять відносний характер), а квадрат інтервалу ΔS^2 залишається незмінним.

Таким чином, просторові відрізки та часові проміжки втрачають свій незалежний (як це було в класичній механіці) один від одного характер і ***стають відносними проявами більш глибокої сутності. Вона не має наглядного подання, наглядних образів, але строго і точно описується з допомогою поняття інтервалу – це простір-час Мінковського.***

Можна вважати, що (Б.1) є результат узагальнення емпіричних фактів. **Тобто, вираз для ΔS^2 не випливає насправді із якихось більш загальних принципів. Він сам виражає фундаментальний принцип сучасної фізики – простір-час єдиний.**

Суть і головний зміст СТВ якраз заключається в єдності простору і часу, геометрія якого псевдоевклідова. Всі фізичні процеси протікають в 4-вимірному просторі-часу.

Для того, щоб дати геометричну інтерпретацію перетворенням Лорентца, та кінематичним наслідкам їх, треба в 4-вимірному часо-просторі Мінковського зобразити СВ K та СВ K' і на осях координат відкласти одиничні відрізки. Оскільки, згідно з перетвореннями Лорентца, «ігрекові» та «зеті» координати події незмінні, то ми на двовимірній евклідовій площині зображаємо просторову і часову осі СВ K. Причому на часовій осі будемо відмічати не просто час настання події, а величину ct. Нехай, як завжди при розгляді відносного руху систем відліку, в початковий момент часу $t = t' = 0$ початки координат СВ K та СВ K' співпадають.

Система K' відносно системи K рухається зі швидкістю V. Тому графік закону руху початку координат СВ K' (точка O') в СВ K буде мати вигляд прямої

$$x = V \cdot t = \frac{V \cdot t \cdot c}{c} = B \cdot ct\,, \tag{Б.2}$$

яка утворює кут θ з часовою віссю СВ K (див. рис. Б.1):

$$\frac{x}{c \cdot t} = B = tg\theta\,.$$

Це означає, що тіло, яке рухається з постійною швидкістю V відносно системи K на діаграмі зображується прямою лінією, яка утворює з часовою віссю системи K кут θ. Така лінія (закон руху) на діаграмі Мінковського називається світовою лінією тіла (матеріальної точки).

«Матеріальна частинка, яку розуміють як сукупність подій, є системою, в якій лінійна протяжність має часовий характер» (А.С. Едінгтон). Це означає, що світова лінія, яка зображає матеріальну частинку всюди часоподібна. Будь-яка пара подій, які розділені часоподібним інтервалом, можуть фізично відповідати двом різним моментам «життя» однієї і тієї ж частинки. І можуть знаходитися на осі часу деякої СВ.

Оскільки для кожної точки світової лінії початку координат СВ K' $x' = 0$, то це часова вісь системи K'.

Знайдемо як орієнтована просторова вісь системи K' на діаграмі Міньковського. Для цього використаємо перетворення Лорентца:

$$c{\cdot}t' = \frac{c{\cdot}t - \dfrac{V{\cdot}x{\cdot}c}{c^2}}{\sqrt{1 - B^2}} = 0\,. \tag{Б.3}$$

(Тут $ct' = 0$ тому, що в кожній точці просторової осі x' час $t' = 0$).

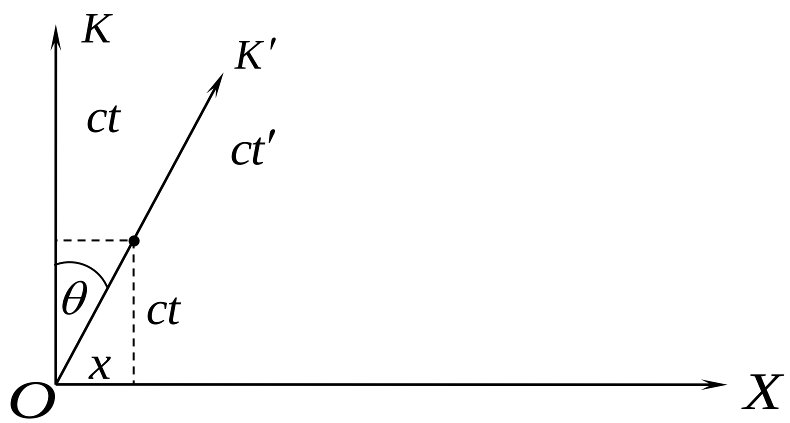


Рис. Б.1. Орієнтація часової осі СВ K' відносно СВ K.

Дійсно, що показують годинники СВ K', що знаходяться на просторовій вісі $O'X'$? Всі вони показують $t'=0$.

Тому із (Б.3) маємо:

$$c \cdot t = \frac{V \cdot x}{c}. \qquad \text{(Б.4)}$$

Тепер ми знаходимо рівняння та графік просторової осі СВ K' відносно системи K на діаграмі Міньковського:

$$\frac{c \cdot t}{x} = tg\theta = B. \qquad \text{(Б.5)}$$

Тобто, просторова вісь СВ K' утворює з віссю OX СВ K кут $\theta = arctg\dfrac{V}{c}$ (рис. Б.2.).

З допомогою (Б.5) знаходимо світову траєкторії кванта світла у вакуумі. Оскільки для кванта світла $V = c$, то світова траєкторія його утворює з віссю OX кут $\theta = 45^o$.

На діаграмі Мінковського особливо очевидна відносність одночасовості.

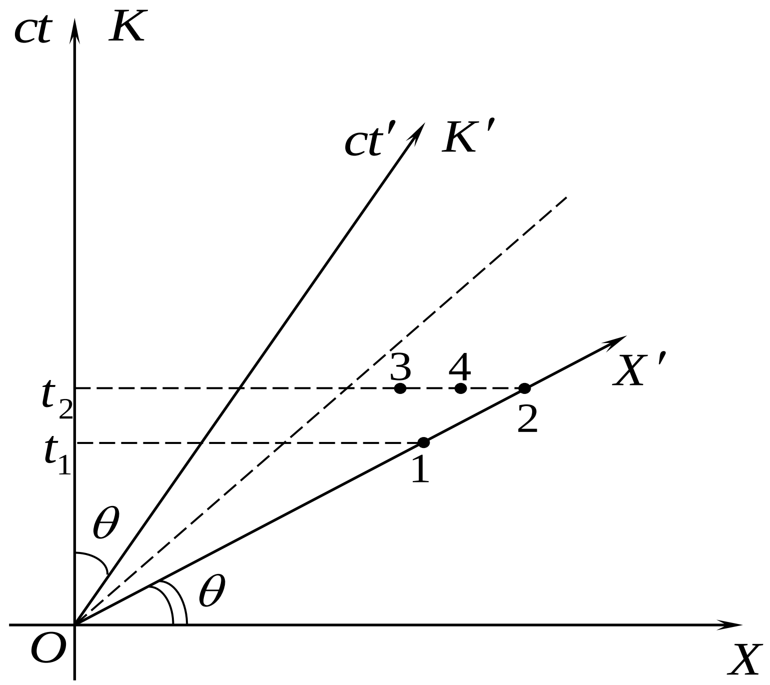


Рис. Б.2. Зображення на діаграмі Мінковського просторових та часових осей СВ K та СВ K'

Дійсно, нехай в точках 1 і 2 відбулися дві події, які з точки зору СВ K' відбулися одночасово, $t_1' = t_2'$.

Але з точки зору СВ K ці події відбулися неодночасово: $t_1 \neq t_2$, що очевидно з діаграми, зображеної на рис Б.2.

Додаток В
Метод доведення релятивістських формул додавання швидкостей та перетворень Лоренца за Маліниним О.М.

Розглянемо ще один спосіб виведення РФДШ як для поперечних, так і для повздовжніх компонентів швидкості частинки та перетворень Лоренца [31].

Нехай $\vec{\upsilon},\vec{\upsilon}'$ - швидкості частинки відповідно в СВ K та СВ K', причому $\vec{\upsilon},\vec{\upsilon}' \uparrow\uparrow \vec{V}$, де $\vec{V}$ - відносна швидкість СВ K, K'. Тому $\upsilon_x \equiv \upsilon$, $\upsilon'_x \equiv \upsilon'$.

Введемо в СВ K й у СВ K', величини u,u' згідно з означенням:

$$u = \frac{c^2}{\upsilon},\; u' = \frac{c^2}{\upsilon'}, \tag{В.1}$$

де $c^2 = in\upsilon$ - квадрат величини інваріантної швидкості c (вводимо згідно з другим постулатом СТВ).

З визначення (В.1) слідує:

а) величини u,u' мають розмірність швидкості,

б) вони входять у вираз (В.1) симетрично величинам υ,υ':

$$u\upsilon = c^2,\; u'\upsilon' = c^2 \tag{В.2}$$

в) якщо $\upsilon,\upsilon' < c$, то і $u,u' < c$.

Наша задача полягає в тому, щоб знайти зв'язок величин υ та υ', і u та u' при заданій величині відносної швидкості $\vec{V}$ СВ K, та $K'(\vec{V}\|Ox,O'x')$. Шукані відношення мають задовольняти наступну умову:

$$u\upsilon = u'\upsilon' = c^2 \tag{В.3}$$

Очевидно, що у зв'язку із рівноправним входженням величин u та υ, і, відповідно u' і υ' у співвідношення (В.3), закон зв'язку величин υ та υ' за формою повинен співпадати за законом зв'язку величин u та u'.

Припустимо, що шукані співвідношення мають такий вигляд:

$$\upsilon = k(\upsilon' + V),\; u = n(u' + V), \tag{В.4}$$

де $k = k(V,\upsilon',c), n = n(V,u',c)$ - невідомі поки що функції, які повинні мати такий вигляд, щоб виконувалась умова (В.3).

Після підстановки виразів (В.4) в перше співвідношення (В.2) маємо:

$$kn\left(u'\upsilon' + Vu' + V\upsilon' + V^2\right) = c \tag{В.5}$$

Враховуючи друге із співвідношень (В.2) маємо:

$$kn = \frac{1}{1 + \frac{V}{c^2}\left(u' + \upsilon' + V\right)} \qquad \text{(В.6)}$$

Оскільки, згідно (В.2): $\frac{V^2}{c^2} = \frac{V^2}{c^4}u'\upsilon'$, то

$$1 + \frac{V}{c^2}\left(u' + \upsilon' + V\right) = \left(1 + \frac{V\upsilon'}{c^2}\right)\left(1 + \frac{Vu'}{c^2}\right) \qquad \text{(В.7)}$$

Таким чином:

$$kn = 1/\left(1 + \frac{V\upsilon'}{c^2}\right)\left(1 + \frac{Vu'}{c^2}\right) \qquad \text{(В.8)}$$

Звідси випливає:

$$k = 1/\left(1 + \frac{V\upsilon'}{c^2}\right),\ n = 1/\left(1 + \frac{Vu'}{c^2}\right) \qquad \text{(В.9)}$$

Отже:

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + V}{1 + \frac{V}{c^2}\upsilon'} \qquad \text{(В.10)}$$

$$u = \frac{u' + V}{1 + \frac{V}{c^2}u'} \qquad \text{(В.11)}$$

Співвідношення (В.10) якраз і є релятивістською формулою перетворення швидкості (у випадку, коли $\vec{\upsilon}, \vec{\upsilon}' \parallel \vec{V}$).

Далі для обґрунтування РФДШ для поперечних складових швидкості тіла необхідно скористатися п. 2.4.2.

Додаток Г
Формули перетворення проекцій сили при переході від однієї СВ до іншої.

Виходячи із вимоги коваріантності рівняння руху при переході від СВ K' до СВ K знайдемо формули згідно яких перетворюються компоненти сили при такому переході [19, с. 318].

Для цього, згідно з означенням, запишемо спочатку компоненти сил в СВ K та СВ K':

$$dp_x/dt = F_x,\ \ dp_y/dt = F_y,\ \ dp_z/dt = F_z$$

$$dp'_x/dt' = F'_x,\ \ dp'_y/dt' = F'_y,\ \ dp'_z/dt' = F'_z$$

Використовуючи далі перетворення Лорентца та формули перетворення компонентів імпульсу:

$$p_x = \frac{p'_x + \left(E'/c^2\right)\cdot V}{\sqrt{1-\beta^2}},\ p_y = p'_y,\ p_z = p'_z$$

Знаходимо:

$$F_x = \frac{dp_x}{dt} = \frac{dp_x}{dt'}\frac{dt'}{dt} = \frac{d}{dt'}\left[\frac{p'_x + \left(E'/c^2\right)V}{\sqrt{1-B^2}}\right]\frac{dt'}{dt} =$$

$$= F'_x + \frac{V\upsilon'_y/c^2}{1+V\upsilon'_x/c^2}F'_y + \frac{V\upsilon'_z/c^2}{1+V\upsilon'_x/c^2}F'_z = \qquad (Г.1)$$

$$= \frac{1}{1+V\upsilon'_x/c^2}\left\{F'_x + \frac{V}{c^2}\left(\vec{F}'\cdot\vec{\upsilon}'\right)\right\}$$

$$F_y = \frac{dp_y}{dt} = \frac{dp'_y}{dt'}\frac{dt'}{dt} = \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+V\upsilon'_x/c^2}F'_y \qquad (Г.2)$$

$$F_z = \frac{dp_z}{dt} = \frac{dp'_z}{dt'}\frac{dt'}{dt} = \frac{\sqrt{1-B^2}}{1+V\upsilon'_x/c^2}F'_z, \qquad (Г.3)$$

де E' - повна енергія тіла в СВ K', $\vec{\upsilon}'\left(\upsilon'_x,\upsilon'_y,\upsilon'_z\right)$- швидкість тіла в СВ K', $\vec{\upsilon}\left(\upsilon_x,\upsilon_y,\upsilon_z\right)$- швидкість цього ж тіла в СВ K.

Враховано також, що $\dfrac{dE'}{dt'} = \dfrac{dT'}{dt'} = \vec{F}'\cdot\vec{\upsilon}'$.

В принципі формулами (Г.1), (Г.2) та (Г.3) питання вирішується.

Але інколи важливо мати перетворення будь-якого компоненту сили із СВ K' до СВ K, в якій компоненти сили в СВ K були б виражені через швидкість υ_x тіла, а не через швидкість цього тіла υ'_x СВ K', як це відображено в (Г.1), (Г.2) та (Г.3).

За допомогою релятивістських формул додавання швидкостей

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon'_y\sqrt{1-B^2}}{1+V\upsilon'_x/c^2}, \upsilon_z = \frac{\upsilon'_z\sqrt{1-B^2}}{1+V\upsilon'_x/c^2}.$$

формула (Г.1) набуває вигляду:

$$F_x = F'_x + \frac{V\upsilon_y/c^2}{\sqrt{1-B^2}}F'_y + \frac{V\upsilon_z/c^2}{\sqrt{1-B^2}}F'_z. \qquad (\Gamma.4)$$

Використовуючи прямі та обернені перетворення для ігрекової проекції швидкості

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon'_y\sqrt{1-B^2}}{1+V\upsilon'_x/c^2}, \upsilon'_y = \frac{\upsilon_y\sqrt{1-B^2}}{1-V\upsilon_x/c^2}.$$

перемножимо почлено ліві і праві частини цих рівностей і одержимо:

$$\left(1+\frac{V\upsilon'_x}{c^2}\right)\left(1-\frac{V\upsilon_x}{c^2}\right) = 1-B^2.$$

Тоді з урахуванням останньої формули наші формули (Г.2) та (Г.3) набувають вигляду:

$$F_y = \frac{1-V\upsilon_x/c^2}{\sqrt{1-B^2}}F'_y. \qquad (\Gamma.5)$$

$$F_z = \frac{1-V\upsilon_x/c^2}{\sqrt{1-B^2}}F'_z. \qquad (\Gamma.6)$$

Додаток Д
Опис взаємодії між двома рухомими зарядженими частинками. Уведення поняття магнітного поля

Задача: Нехай в системі відліку K' в площині $X'Y'$ знаходяться в спокої дві заряджені частинки (далі – протони), величина заряду яких q_1 і q_2, а віддаль між ними r' (рис. Д.1). СВ K' рухається з швидкістю $\vec{V} = const$ відносно лабораторної СВ K уздовж вісі OX. Описати взаємодію між зарядженими частинками [19, С. 88-93].

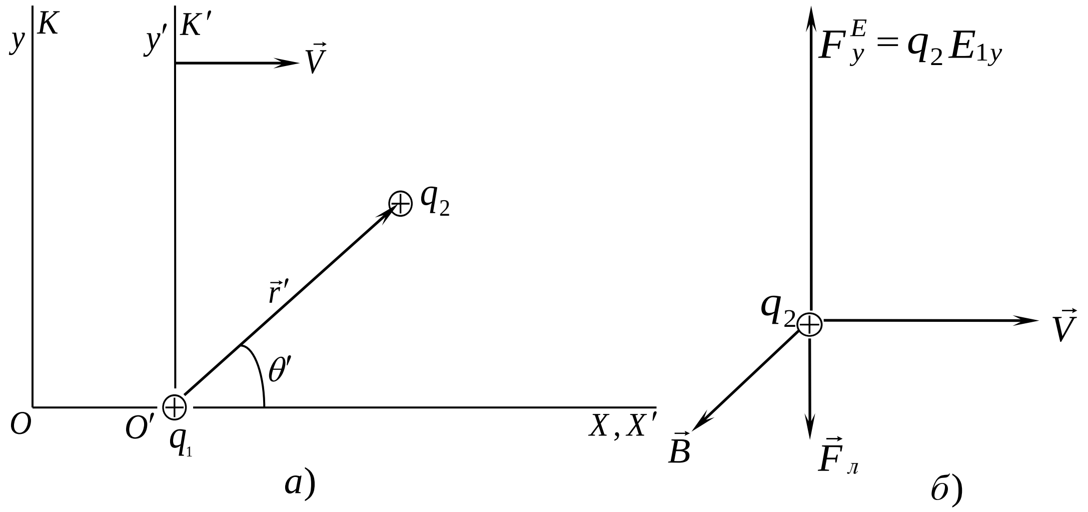


Рис. Д.1. Взаємодія двох заряджених частинок, які рухаються з постійною швидкістю $\vec{V}$ відносно ЛСВ (а) і поперечна складова сили, що діє на другу ЗЧ (б)

Розв'язання**: В СВ K' існує тільки електрична взаємодія між ЗЧ. Тобто на другу ЗЧ (величина заряду якої q_2) діє сила $\vec{F}_2' = q_2\vec{E}_1'$, де $\vec{E}_1'$ – напруженість електричного поля, що створюється першою ЗЧ в точці знаходження заряду q_2:**

$$\vec{E}_1' = \frac{q_1\vec{r}'}{4\pi\varepsilon_0 r'^3}. \tag{Д.1}$$

Але у СВ K напруженість електричного поля визначається формулою:

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \frac{q\vec{r}\left(1 - V^2/c^2\right)}{4\pi\varepsilon_0\left[(x-Vt)^2 + \left(y^2+z^2\right)\left(1-\dfrac{V^2}{c^2}\right)\right]^{3/2}} = f(\beta,\theta)\frac{q\vec{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}, \tag{4.1}$$

де $\vec{r} = (x - Vt)\cdot\vec{i} + y\cdot\vec{j} + z\cdot\vec{k}$ – радіус-вектор, проведений від миттєвого положення ЗЧ до точки поля, $\beta = \frac{V}{c}$, r – це віддаль точки поля від миттєвого положення ЗЧ, а θ – кут між напрямком руху ЗЧ (вектором швидкості $\vec{V}$ ЗЧ) та радіус-вектором проведеним із миттєвого положення ЗЧ в дану точку простору

Неважко впевнитися, використовуючи перетворення Лорентца, що повздовжня складова сили взаємодії між зарядами q_1 і q_2 не змінюється при переході від СВ K' до СВ K.

Тепер здійснимо аналіз поперечної складової взаємодії між цими ЗЧ. Як видно з виразу для напруженості електричного поля рухомої ЗЧ (4.1), поперечна складова сили електричної взаємодії між ЗЧ в СВ K зростає, тобто:

$$F_y^E = q_2 E_{1y} > q_2 E'_{1y}, \tag{Д.2}$$

де E_{1y}, E'_{1y} – поперечні складові напруженості електричного поля, що створюється першою ЗЧ в точці знаходження другої ЗЧ в СВ K і СВ K' відповідно.

Як відомо, принцип відносності стверджує, що фізичні явища протікають однаково (при тотожних початкових умовах) у всіх інерціальних СВ. Іншими словами, математична форма основних законів фізики не повинна змінюватися при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої: рівняння фізики повинні бути лорентцковаріантними. При цьому просторові і часова координати (*x, y, z, t)* будь-якої події в СВ K і СВ K' пов'язані перетвореннями Лорентца.

Щоб основні рівняння фізики мали однакову математичну форму в СВ K і СВ K', проекції сили (зокрема) на координатні осі повинні перетворюватися згідно з формулами (3.6) посібника [22].

Оскільки ЗЧ нерухомі в СВ K', то $\upsilon'_x = 0$, в нашому випадку (рис. Д.1) маємо для ігрекової компоненти сили взаємодії між рухомими ЗЧ в СВ K:

$$F_y = \frac{F'_y\sqrt{1-B^2}}{1+\frac{V\upsilon'_x}{c^2}} = F'_y\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}. \tag{Д.3}$$

Тоді $F_y < F'_y$, бо $\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} < 1$.

Тобто, незважаючи на те, що поперечна складова сили електричної взаємодії між ЗЧ в СВ K зростає, принцип відносності вимагає, щоб повна *поперечна складова сили взаємодії між ЗЧ в нашій задачі була меншою, ніж поперечна складова сили взаємодії між ЗЧ в СВ K', і дорівнювала:*

$$F_y = F'_y \cdot \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\,. \qquad (Д.4)$$

Таким чином, маємо: електрична сила взаємодії в напрямку осі OY збільшується в СВ K, а принцип відносності вимагає, щоб сумарна сила взаємодії між рухомими ЗЧ зменшилася згідно з формулою (Д.4). Це означає лише одне – в СВ K з'явилася додаткова взаємодія між рухомими зарядженими частинками, якої не було в системі K'.

Іншими словами, ми повинні допустити виникнення такої поперечної сили взаємодії між рухомими ЗЧ в СВ K, існування якої необхідне для виконання принципу відносності. Коли ЗЧ нерухомі в СВ K', між ними існує тільки електрична сила $\vec{F}'_2 = q_2 \cdot \vec{E}'_1$, коли ж вони рухаються зі швидкістю $\vec{V}$ відносно СВ K, ми змушенні припустити появу (очевидно, внаслідок руху ЗЧ) деякої додаткової поперечної сили, що діє на другу ЗЧ.

Позначимо цю, невідому, поки що, силу $\vec{F}_Л$. Ця сила зменшує електричну складову сили, яка діє на другу ЗЧ, F_y^E, до значення $F_y = F'_y \cdot \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}$, яке *визначається принципом відносності.*

Таким чином, можемо записати:

$$q_2 E_{1Y} - F_Л = F'_Y \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\,. \qquad (Д.5)$$

Значення абсолютної величини сили знаходимо із (Д.5)

$$F_Л = \frac{q_1 q_2 \left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)\sin\theta \cdot V^2}{4c^2\pi\varepsilon_0 r^2 \left(1-\frac{V^2}{c^2}\sin^2\theta\right)^{\frac{3}{2}}} = q_2 V \frac{V}{c^2} E_1 \sin\theta\,. \qquad (Д.6)$$

Ця сила завжди перпендикулярна до швидкості руху ЗЧ q_2 (див. рис. Д.1б) і паралельна осі OY, де б не знаходився заряд q_2 в площині XOY.

При цьому, поперечна складова сили, що діє на q_2, нами повинна трактуватися як сила, що діє на другу рухому ЗЧ в деякому фізичному полі, існування та появу якого вимагає принцип відносності. Властивості та характеристики цього поля випливають із (Д.5) та (Д.6).

Ураховуючи просторове розташування сил та швидкості руху $\vec{V}$ заряджених частинок, а також інваріантність повздовжнього компоненту електричного поля (та інваріантність повздовжньої складової сили, яка діє на q_2), яке створюється зарядом q_1, вираз у векторній формі тієї сили $\vec{F}_Л$, існування якої вимагає СТВ, необхідно записати в такому вигляді (рис. Д.1):

$$\vec{F}_Л = q_2\left[\vec{V},\left[\frac{\vec{V}}{c^2},\vec{E}_1\right]\right]. \tag{Д.7}$$

Говорять, що $\vec{F}_Л$ – це сила, що діє на заряд q_2, який рухається з швидкістю $\vec{V}$ в деякому фізичному полі. Це поле характеризується величиною $\left[\frac{\vec{V}}{c^2},\vec{E}_1\right]$, і яке створюється рухом першої ЗЧ, величина заряду якої q_1.

Тобто (Д.7) подають у вигляді:

$$\vec{F}_Л = q_2\left[\vec{V},\left[\frac{\vec{V}}{c^2},\vec{E}_1\right]\right] = q_2\left[\vec{V},\vec{B}_1\right]. \tag{Д.8}$$

Це поле називають магнітним, а індукція магнітного поля $\vec{B}_1$ рухомої ЗЧ дорівнює:

$$\vec{B}_1 = \frac{1}{c^2}\left[\vec{V},E_1\right] = \varepsilon_0\mu_0\left[\vec{V},\vec{E}_1\right] = \frac{\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{q_1\cdot\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}{r^3\cdot\left(1-\frac{V^2}{c^2}\cdot\sin^2\theta\right)^{\frac{3}{2}}}\cdot\left[\vec{V},\vec{r}\right]. \tag{Д.9}$$

Якщо швидкість руху зарядів q_1 і q_2 різна ($\vec{\upsilon}_1$ та $\vec{\upsilon}_2$ відповідно), то узагальнюючи (Д.8), одержуємо силу, що діє на рухому електрично заряджену частинку q_2 в полі рухомого заряду q_1:

$$\vec{F}_Л = q_2\left[\vec{\upsilon}_2,\left[\frac{\vec{\upsilon}_1}{c^2},\vec{E}_1\right]\right] = q_2\left[\vec{\upsilon}_2,\vec{B}_1\right]. \tag{Д.10}$$

Очевидно, що коли рухається електрон, то індукція його МП визначається формулою

$$\vec{B}(\vec{r},t) = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q_1\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}{r^3\left(1-\frac{V^2}{c^2}\sin^2\theta\right)^{\frac{3}{2}}}\left[\vec{V},\vec{r}\right]. \tag{Д.11}$$

Додаток Е

Обґрунтування релятивістської формули додавання повздовжньої складової швидкості за допомогою методу k - коефіцієнта

Припустимо, що деяка частинка рухається вздовж осі $O'X'$ системи відліку K'. СВ K', як загально прийнято, рухається рівномірно і прямолінійно вздовж осі OX СВ K, див. рис. Е.1.

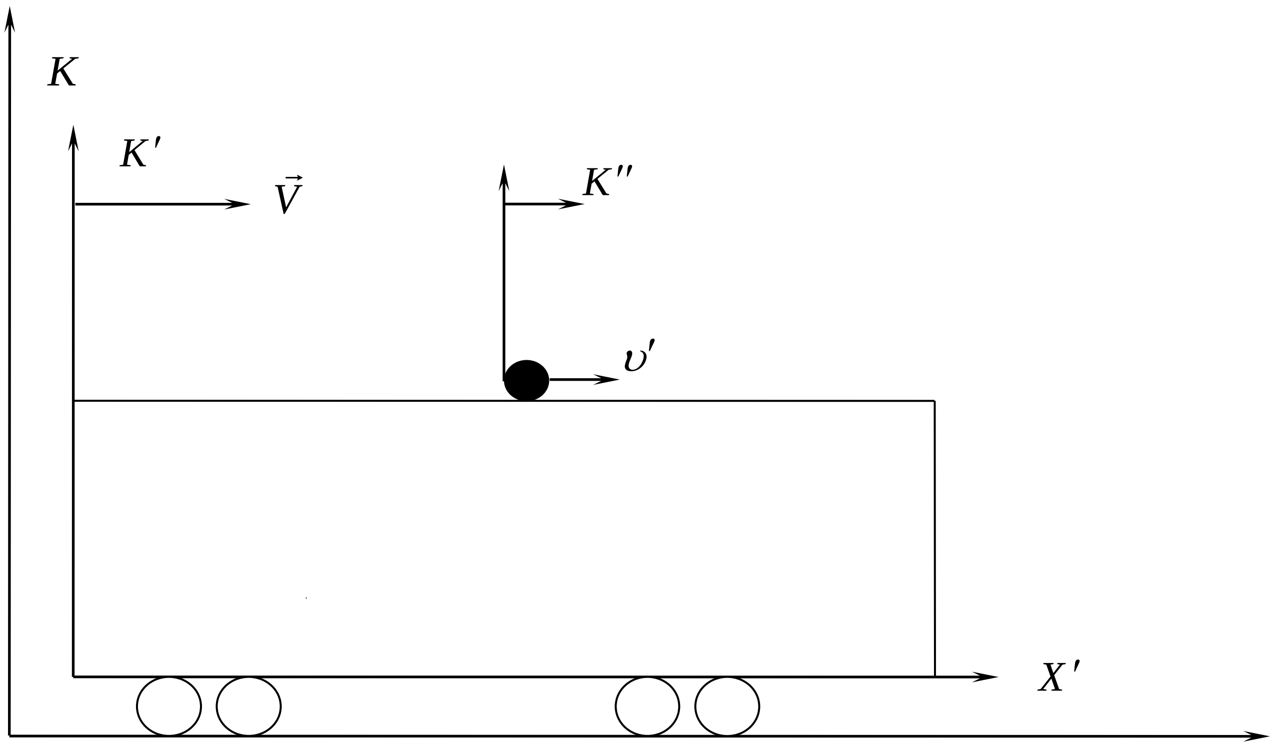


Рис. Е.1. Частинка має швидкість υ' відносно СВ K'. Чому дорівнює її швидкість відносно лабораторної СВ K, якщо K' рухається зі швидкістю $\vec{V}$ вздовж осі OX

Пов'яжемо систему відліку K'' з нашою частинкою, і будемо вважати, що в початку координат кожної із цих трьох систем відліку знаходяться спостерігачі, відповідно, A, A_1, A_2. Тоді світові лінії їх будуть зображені на рис. Е.2 (методика побудови діаграм Мінковського подана в Додатоку Б)

OK - Світова лінія спостерігача A;

OK' - Світова лінія A_1;

OK'' - Світова лінія A_2.

В початковий момент часу, зазвичай, початки координат всіх трьох СВ K та СВ K' та K'' співпадають, і в цей момент часу посилається перший імпульс як до СВ K' так і до СВ K''. Другий імпульс (і наступні імпульси теж) посилається в момент $t = T$.

Спостерігач A_1 буде приймати два послідовні імпульси через проміжки часу k_1T по своєму годиннику.

В ту мить, коли до A_1 приходить сигнал від A, спостерігач A_1 посилає його далі до A_2.

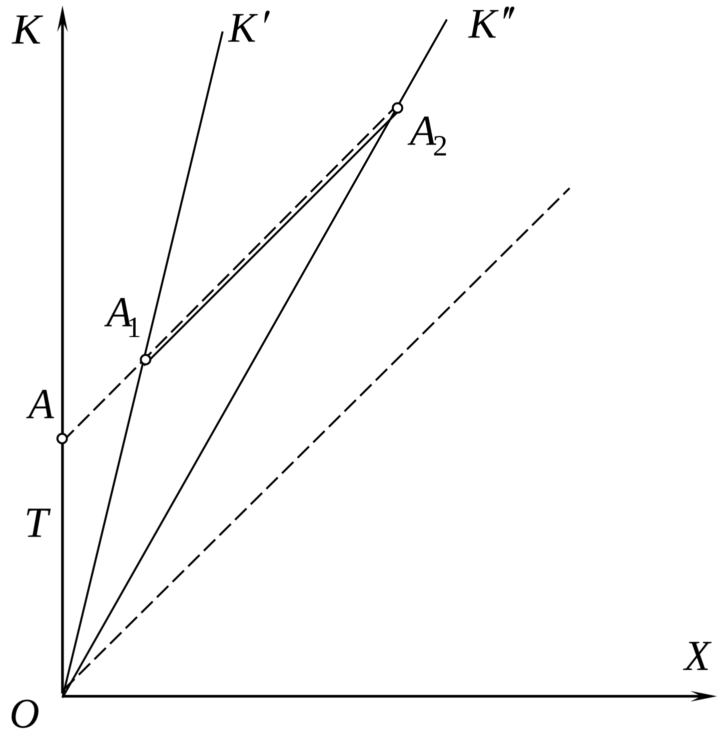


Рис. Е.2. До обґрунтування формули (58а) методом k - коефіцієнта та за допомогою діаграми Мінковського

Згідно означення, (іншими словами, згідно методу k - коефіцієнту, (див. Розділ 2, **п. 2.1.3**) спостерігач A_2 буде приймати послідовність імпульсів від A через проміжки часу k_2T по годиннику СВ K''.

Але можна вважати, що цей другий (і наступні) сигнал A_2 приймає так начебто вони були послані A_1 (тобто, як тільки до A_1 приходить світловий імпульс від A він, A_1, відразу миттєво переправляє його до A_2) через проміжки k_1T. Тоді, очевидно, що A_2 буде приймати їх, згідно з означенням, через проміжки $k_{12} \cdot k_1T$ по годиннику СВ K'', де k_{12} - k- коефіцієнт для спостерігачів A_1 і A_2. На рис. И.2 лінія AA_1A_2 - світова лінія світлового сигналу від A через A_1 до A_2.

Таким чином, маємо

$$k_2T = k_{12} \cdot k_1T .$$

Тобто, якщо ми знаємо k - коефіцієнти для двох пар систем відліку, в які входить одна спільна для них система, то можна знайти k - коефіцієнти для двох інших систем відліку, які залишилися.

Це, власне, і видно із рис. Е.2. Дійсно, $OA = T$, $OA_1 = k_1 T$, $OA_2 = k_2 T$. Але з іншого боку очевидно, що $OA_2 = k_{12} \cdot OA_1 = k_{12} \cdot k_1 T$.

k - коефіцієнти для будь-якої пари систем відліку визначаються згідно з (12):

$$k = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}},$$

де β дорівнює відношенню відносної швидкості систем відліку до швидкості світла в вакуумі.

$$\beta = \frac{\upsilon}{c} = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}.$$

Таким чином, якщо ми цікавимося швидкістю частинки відносно СВ K, то

$$\beta = \frac{\upsilon}{c} = \frac{k_2^2 - 1}{k_2^2 + 1} = \frac{k_1^2 \cdot k_{12}^2 - 1}{k_1^2 \cdot k_{12}^2 + 1}.$$

Але, згідно з означенням:

$$k_1 = \sqrt{\frac{1+B}{1-B}},\ k_{12} = \sqrt{\frac{1+\beta'}{1-\beta'}},$$

тому одержуємо кінцевий результат:

$$\beta = \frac{\upsilon}{c} = \frac{k_2^2 - 1}{k_2^2 + 1} = \frac{k_1^2 \cdot k_{12}^2 - 1}{k_1^2 \cdot k_{12}^2 + 1} = \frac{\left(\frac{1+B}{1-B}\right) \cdot \left(\frac{1+\beta'}{1-\beta'}\right) - 1}{\left(\frac{1+B}{1-B}\right) \cdot \left(\frac{1+\beta'}{1-\beta'}\right) + 1} = \frac{B + \beta'}{1 + B\beta'}.$$

Отже РФДШ для повздовжньої складової швидкості має вигляд:

$$\upsilon = \frac{\upsilon' + V}{1 + \frac{\upsilon' V}{c^2}}.$$

Додаток И. Глосарій

Глосарій педагогічний

Абстрагування – відокремлення у свідомості одних ознак від інших, а також від об’єктів, яким вони властиві.

Акмеологія – міждисциплінарна галузь наукового знання, яка досліджує засоби досягнень особистістю найбільш високого рівня професійної майстерності і реалізації нею власного потенціалу в професійній галузі.

Аналіз – метод наукового пізнання, що полягає в уявному або фактичному розкладанні цілого на його складові.

Аргумент – це довід або твердження на користь або проти певних суджень.

Висновок – одержане логічним шляхом остаточне судження зроблене на основі спостережень, міркувань.

Державний стандарт освіти – сукупність норм, які визначають вимоги до освітнього процесу.

Дидактика – галузь педагогіки, яка розробляє теорію освіти, навчання а також виховання в процесі навчання.

Засоби навчання – джерела інформації або спеціальні пристосування, які допомагають здійснювати навчальний процес.

Зміст вищої освіти – система наукових знань, умінь і навичок, оволодіння якими забезпечує всебічний розвиток розумових і фізичних здібностей студентів. Зміст вищої освіти залежить від освітньо-кваліфікаційних рівнів.

Категорії – найбільш загальні фундаментальні поняття, які відображають загальні властивості і відношення дійсності та пізнання.

Компетенція – здатність особистості мобілізувати в професійній діяльності набуті знання, уміння та навички.

Креативність – творчі можливості людини, які виявляються в здатності знаходити нові варіанти оптимального вирішення проблеми, сприймати та генерувати нові ідеї.

Критичне мислення – це інтелектуально впорядкований процес активного й умілого аналізу, концептуалізації, застосування, синтезування й/або оцінки інформації, отриманої або породженої спостереженнями, експериментом, досвідом, розмірковуванням або комунікацією як орієнтир для переконання й дії.

Метод – спосіб організації практичного й теоретичного освоєння дійсності.

Метод навчання – спосіб упорядкованої взаємодії викладача та студента (вчителя та учня), за допомогою якого досягається дидактична мета.

Методика фізики – основа фахової підготовки вчителя фізики.

Мислення – складний психофізичний процес формування й упорядкування ідей людиною, під час якого формується узагальнене відображення людиною дійсності в найбільш істотних взаємозв’язках.

Навчальна програма – документ, що визначає зміст і обсяг знань з кожного навчального предмета, уміння і навички, які необхідно засвоїти.

Навчальний процес – це система організаційних і дидактичних заходів спрямованих на реалізацію змісту освіти відповідно до державних вимог.

Особистість – відображення соціальної природи людини, розгляду її як індивідуальності та суб’єкта соціокультурного життя.

Поняття – форма мислення, які відображає загальні, істотні ознаки предметів і явищ дійсності.

Принцип – фундаментальна істина, закон або цінність на яких базуються інші закони, доктрини тощо.

Проблема – складне теоретичне або практичне завдання, що потребує вивчення, дослідження й вирішення.

Протиріччя – відношення двох суджень, кожне з яких є запереченням іншого.

Самостійність мислення – якість мислення, що виявляється в здатності людини ставити нові проблеми, знаходити нетривіальні підходи до їх вирішення, виявляти ініціативу у творчому пошуку.

Суб’єкт навчання – людина, яка отримує знання в будь-які освітній системі. Той хто навчається (учень, студент).

Глосарій фізичний

Інваріант (inv) – фізична величина, значення якої в деякому фізичному процесі не змінюється з плином часу (енергія, момент імпульсу, маса, інтервал, швидкість світла у вакуумі).

Інтервал – просторово-часова (див. нижче) віддаленість подій одна від одної. Фізичний зміст має поняття квадрату інтервалу Δs^2 (квадрат «віддалі») між двома подіями, і згідно з означенням, дорівнює $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2$, де $\Delta x,\ \Delta y, \Delta z$ – просторові віддалі між двома подіями в СВ K, відповідно по осях OX, OY, OZ; $\Delta x',\ \Delta y', \Delta z'$ – просторові віддалі між *цими ж двома подіями в СВ* K', відповідно по осях $O'X', O'Y', O'Z'$; Δt, $\Delta t'$ – проміжки часу між цими двома подіями з точок зору СВ K та СВ K' відповідно; c – швидкість світла у вакуумі.

Інерційна (інерціальна) система відліку – система відліку, яка рухається рівномірно зі сталою швидкістю.

Перетворення Галілея – назва перетворень у класичній механіці, згідно з якими змінюються значення фізичних величин при зміні ІСВ. Являють собою граничний випадок більш загальних перетворень Лорентца. Перетворення Галілея мають місце лише при над малих швидкостях $V << c$.

Перетворення Лорентца – назва перетворень у релятивістській фізиці, згідно з якими змінюються значення фізичних величин при зміні ІСВ. Являють собою основоположні перетворення фізики і адекватно описують реальність при будь яких швидкостях.

Принцип відповідності – одне з положень копенгагенської інтерпретації квантової механіки, яке вимагає того, щоб при збільшенні розмірів фізичної системи її квантові властивості переходили б у класичні. Прицнип відповідності застосований і до СТВ, але в тому розумінні, що в граничному випадку, коли $c \to \infty$ (інакше – для взаємодій час не потрібен, миттєва взаємодія) СТВ переходить у класичну механіку.

Простір-час – 4-вимірна $(x;y;z;t)$ фізична модель математичного простору подій. Характеризується трьома просторовими координатами x, y, z і часом t. З точки зору СТВ, Всесвіт має три просторові координати і одну часову координату, і таким чином усі чотири виміри органічно пов’язані в єдиний простір-час. Кожна подія чи явище визначається положенням у просторі і часом.

Подія – зміна або взаємодія об’єктів, що має чітко визначене місце і чітко визначений час.

Спеціальна теорія відносності – фізична теорія згідно з якою простір і час являють собою єдине утворення, і всі фізичні закони мають однакове формулювання у всіх інерційних системах відліку.

Сферична електромагнітна хвиля – електромагнітна хвиля, фронт якої являє собою сферу. Зазвичай для зручності джерело сферичної електромагнітної хвилі поміщають у початок СВ, наприклад спалах світла. Форма хвилі не залежить від вибору СВ.

Просторово-подібний інтервал – інтервал між двома подіями в СВ, в якій ці події відбулися в один і той же час. Події, інтервал між якими є просторово-подібним не можуть бути причино пов’язані. Умова просторово-подібного інтервалу: $ds^2 \le 0$.

Часо-подібний інтервал – інтервал між двома подіями в СВ, в якій ці події відбулися в одному і тому ж місці. Події, інтервал між якими є часо-подібним можуть бути причино пов’язанні. Умова часо-подібного інтервалу: $ds^2 \ge 0$.

Найважливіші фізичні константи

Величина	*Позначення і числове значення*
Гравітаційна стала	$G = 6.6720 \cdot 10^{-11} \dfrac{Нм^2}{кг^2}$
Прискорення вільного падіння (нормальне)	$g_n = 9.80665 \dfrac{м}{с^2}$
Нормальний атмосферний тиск	$p_0 = 101325 Па$
Стала Авогадро	$N_a = 6{,}022045 \cdot 10^{23} моль^{-1}$
Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов	$V = 22.41383 \cdot 10^{-3} \dfrac{м^3}{моль}$
Універсальна газова стала	$R = 8.31441 \dfrac{Дж}{моль \cdot К}$
Стала Лошмідта	$n_0 = 2{,}7 \cdot 10^{25} м^{-3}$
Стала Больцмана	$k = 1.38662 \cdot 10^{-23} \dfrac{Дж}{К}$
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8} \dfrac{м}{с}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \dfrac{Гн}{м} = 1{,}25663706144 \cdot 10^{-6} \dfrac{Гн}{м}$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 0{,}885418782 \cdot 10^{-11} \dfrac{Ф}{м}, \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^{9} \dfrac{м}{Ф}$
Маса електрона	$m_e = \begin{cases} 0{,}9110953410 \cdot 10^{-27} г = 5{,}4858026 \cdot 10^{4} а.о.м \\ 0{,}511 МеВ \end{cases}$
Маса протона	$m_p = 1.6726485 \cdot 10^{-27} кг = 1{,}007276470 а.о.м$
Маса нейтрона	$m_n = 1.6749543 \cdot 10^{-27} кг = 1{,}008665012 а.о.м$
Атомна одиниця маси	$1 а.о.м. = 1{,}6605655 \cdot 10^{-27} кг$ $(відповідає \cdot енергії \cdot 931{,}3 МеВ)$

Елементарний заряд	$e = \begin{cases} 1{,}6021892 \cdot 10^{-19}\, Кл \\ 4{,}803 \cdot 10^{-10}\, СГСЕ \end{cases}$
Відношення заряду електрона до його маси	$\dfrac{e}{m_e} = 1.7588047 \cdot 10^{11}\, \dfrac{Кл}{кг}$
Стала Фарадея	$F = 9.648456 \cdot 10^{4}\, \dfrac{Кл}{моль}$
Стала Планка	$h = 6{,}626176 \cdot 10^{-34}\, Дж \cdot с$
Стала Стефана – Больцмана	$\sigma = 5{,}67032 \cdot 10^{-8}\, \dfrac{Вт}{м^2 К^4}$
Стала Віна	$b = 0{,}00289782 м \cdot К$
Стала Ридберга	$R_\infty = 10973731{,}77 м^{-1}$
Борівський радіус	$a_0 = 0{,}52917706 \cdot 10^{-10}\, м$

Деякі позасистемні одиниці

$$1 Å = 10^{-10}\, м$$

$$1 кал = 4{,}18 Дж = 4{,}1868 \cdot 10^{7}\, эрг \left(1 Дж = 0{,}2388 кал\right)$$

$$1 мм.рт.ст. = 133{,}3 Па$$

$$1 еВ = \begin{cases} 1{,}6 \cdot 10^{-19}\, Дж \\ 1{,}6 \cdot 10^{-12}\, ерг \end{cases}$$

$$1 а.о.м. = \begin{cases} 1{,}66 \cdot 10^{-27}\, кг \\ 931{,}5 МеВ \end{cases}$$

$$1 рік = 3{,}16 \cdot 10^{7}\, с$$

$$1 св.рік = 9{,}5 \cdot 10^{15}\, м$$

$$1 пк = 3{,}261563777167 св.років = 3{,}08567758149 1 \cdot 10^{16}\, м$$

$$1 а.о. = 149597870700\, м \approx 150 \cdot 10^{6}\, км$$