

О. А. ЩЕРБАК, Дніпропетровський національний університет

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА: ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ВИВЕДЕННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ У ПЕРІОД СТАНОВЛЕННЯ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

В статье рассмотрены различные подходы к выводу преобразований Лоренца в работах Л. Й. Кордиша и А. П. Грузинцева, Ч. Бялобржеского, И. Огиеветского, в период становления теории относительности. Проведен их сравнительный анализ, сделаны выводы о характере эволюции представлений о преобразованиях Лоренца.

In the paper studied the different approaches to derivation of Lorentz transformation laws in L. Kordisch', A. Gruzincev', Ch. Byalobrgeskiyu', I. Ogievetkiyu' s papers during becoming the theory of relativity. Their comparative analysis was conducted, the conclusion about character of representations evolution Lorentz transformation laws was made.

На межі XIX та XX сторіччя формування нової фізичної картини світу почалося з вирішення питань, що повстали з теорії електродинаміки середовищ, що рухаються. А саме розв'язок питань, що пов'язані з рухом тіл крізь матеріальне середовище – ефір, викликав появу спеціальної теорії відносності. Рівняння Лоренца, що виникли при цьому відіграли роль тих фундаментальних принципів, які описують наш простір та час.

Історія створення теорії відносності, та як її частини, перетворень Лоренца, розкрита і проаналізована в численній науковій літературі: Е. Уіттекер [1], У. Франкфурт [2]. та інші. Інтегральна картина еволюції підходів до їх виведення має досить багато прогалин, зокрема випали роботи вчених, що працювали в Україні, і були в силу історичних обставин або забуті, або належним чином не оцінені. У статті проаналізовані оригінальні роботи вітчизняних вчених, які у період становлення теорії відносності працювали в Україні.

Історія виникнення рівнянь така: рівняння Максвелла, що характеризують електромагнітне поле, не інваріантні відносно перетворень Галілея. У класичній механіці просте перетворення переводить одну систему відліку в іншу, але при такому перетворенні рівняння Максвелла не зберігають свій вид. Ще В. Фогт у 1887 році показав, що рівняння типу $\varphi = 0$ зберігає свою форму при переході до нових просторово-часових змінних при перетвореннях типу $x' = x - vt$ $y' = y/\gamma$ $z' = z/\gamma$ $t' = t - vx/c^2$. З точністю до масштабного множника це були майбутні перетворення Лоренца. Але згадана робота була маловідомою науковій громадськості. Так уже Фіцджеральд і Лоренц розуміли, що для пояснення досліду Майкельсона – Морлі необхідно

введення нового постулату – скорочення розмірів тіл, що рухаються. У 1900 р., через десять років після того, як Герц і Хевісайд надали рівнянням Максвелла красивої математичної форми, Лармор знайшов перетворення, при якому рівняння залишаються інваріантними. Лоренц незалежно від Лармора запропонував такий спосіб перетворень однієї системи відліку в іншу, при яких рівняння Максвелла зберігають свій вигляд. Перетворення, що зараз мають назву перетворень Лоренца, які при цьому були використані, дозволили по іншому подивитися на фундаментальні поняття часу та простору. Хоч ефірно-польова теорія Лоренца математично збігалася зі спеціальною теорією відносності А. Ейнштейна, але на відміну від Г. Лоренца А. Ейнштейн „наважився” надати перетворенням Лоренца фізичний сенс, тобто надати їм такі характеристики, що описують простір та час. Як писав Г. Лоренц у 1912 р. „Заслуга Ейнштейна полягає у тому, що він перший висловив принцип відносності у вигляді загального строго і точно діючого закону” [2].

Виведення рівнянь спеціальної теорії відносності були проаналізовані за роботами вчених, що працювали на той час в Україні: Л. Й. Кордиша і О. П. Грузінцева, Ч. Бялобржескаго, І. Огієвського. В чому ж полягали їх підходи?

Робота Л. Кордиша „Елементарний висновок основних формул теорії відносності” [3], вийшла друком у 1911 році. Вона починається з формулювання „одного основного положення - принципу відносності”, що автор подає у такий спосіб: „формулювання того закону, за яким відбувається яке-небудь явище, не залежить від того, щодо якої системи координат оцінювати явище; узяті системи координат можуть знаходитися у відносному спокої, чи у відносному рівномірному поступальному руху”.

До цього додають ще один постулат – сталість швидкості світла. На думку Л.Й. Кордиша, цей постулат виявляється зайвим, тому що він „виходить як необхідний наслідок першого”. Аналогічних висновків щодо другого постулату окрім М. Планка, Л. Кордиша незалежно дійшли Ігнатовський, П. Франк (Franck), Розе (Rothe).

Виведення перетворень Лоренца Л. Кордиш проводить у такий спосіб. Уявимо, що у момент збігу систем координат I та II з їх загального початку був випущений світловий сигнал. Виходячи з визначення принципу відносності, як спостерігач системи відліку I , так і спостерігач системи відліку II повинні будуть побачити поширення світлової хвилі з центрами A (для I системи координат) и B (для II системи координат). Система II рухається відносно системи I зі швидкістю v . Для спостерігача I рівняння сфери розповсюдження хвилі буде:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \quad (1)$$

Для спостерігача II рівняння сфери: $x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$. (2)

Показання годинника системи II є функція координат, тобто t' можна представити у вигляді: $t' = At + Bx + Cx + Dz$, (3)

де, x, y, z – координати годинників відносно I , а A, B, C, D – деякі сталі.

Припускаємо, що залежність може бути більш складна:

$$t' = At + Bx + Cx + Dz + Kt^2 + Mx^2 + \dots + Ltx.$$

Нехай у момент $t = 0$ координати годинника будуть $x = l, y = z = 0$, показання годинників, що рухаються, будуть $t'_1 = Bl + Mt^2$. Так як через t секунд система система зміститься на відстань vt , показання годинників, що рухаються, будуть

$$t'_2 = At + B(l + vt) + Kt^2 + Mt^2 + Lt(l + vt);$$

$$\Delta t = t'_2 - t'_1 = At + Bvt + Kt^2 + M(2vtl + t^2) + Lt(l + vt).$$

Виходить, що показання годинників залежать від їхнього місця розташування l в системі, чого бути не може, отже $M = L = 0$

Доведення того, що коефіцієнт $K=0$, вчений проводить наступним чином. Досліджується тривалість явища, з припущенням, що це явище відбувається повторно у різні моменти часу, потім порівнюється тривалість цього явища у системах I та II . При $t = 0$ обидві системи збігаються і годинник у системі II знаходиться на відстані x від початку координат. $t'_1 = Bx$ Нехай явище відбувається θ секунд (за годинником системи I), тоді показання годинника будуть

$$t'_1 = A\theta + B(x + v\theta) + K\theta^2;$$

$$t'_2 - t'_1 = A\theta + Bv\theta + K\theta^2. \quad (4)$$

Повторимо наш дослід в інший час, коли на годиннику системи I буде час t , нехай координата годинника, що рухається, буде $x = l$. Тоді:

$$t'_1 = At + Bl + Kt^2.$$

У кінці явища, показання годинника, що рухається, буде

$$t'_2 = A(t + \theta) + B(l + v\theta) + K(t + \theta)^2;$$

$$t'_2 - t'_1 = A\theta + Bv\theta + K(2t\theta + \theta^2). \quad (5)$$

Відлік часу проводився за годинником системи I , але тривалість цього явища різна, так як (4) \neq (5), що за умовами експерименту не можливо \Rightarrow

$$x' = L(x - vt);$$

$K=0$. Тобто повинно мати місце перетворення: $y' = My$; (6)

$$z' = Mz.$$

Користуючись формулами переходу (6) і (3) і з огляду на те, що (1) повинне тотожно перейти в (2), Л. Кордиш одержує

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad B = \frac{v}{c} \sqrt{\frac{1}{c^2 - v^2}} \quad M = N = 1$$

$$x' = \beta(x - vt);$$

$$y' = y;$$

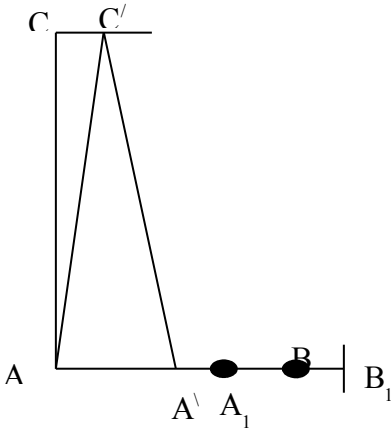
Тобто отримуємо перетворення Лоренца: $z' = z$;

$$\text{, де } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

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

Робота Ч. Т. Бялобржеского [4] 1910 року, була одна з не багатьох, що підтримувала ідеї теорії відносності на початку її становлення. Але вона відрізнялась від роботи Л. Кордиша за підходом до основних фізичних понять, а саме введенням «абсолютного часу». Метою статті було: «утримати по можливості зв'язок з дослідом і залишитись вірним теорії Лоренца - Ейнштейна» [4, с.220]. Бялобржеский зосередив свою увагу на математичному виведенні поняття відносності відстані та часу. Принцип відносності він формулює у такий спосіб:

- «немає ніякої можливості визначити відносний рух, за який можна прийняти рух у порожньому просторі чи у нерухомому ефірі»; [4, с. 224]
- «фізичний час тече таким чином, що швидкість світла є однаковою, незалежно від того в якому стані спокою чи рівномірного та прямолінійного руху знаходиться друг відносно друга спостерігач та джерело світла» [4, с. 224]



Застосовуючи вищезазначені принципи, вчений проводить розрахунки довжини променів світла у дослід Майкельсона – Морлі. Джерело світла знаходиться у точці A . Система відліку рухається у напрямку B . Промінь світла проходить у напрямку до дзеркала B , яке зміщується у B_1 , тоді промінь світла наздоганяє дзеркало з відносною швидкістю $c - v$. Після того, як промінь відбився від дзеркала, зворотній шлях промінь проходить зі швидкістю $c + v$ та потрапляє до спостерігача у точці A_1 , куди за час руху зміститься точка A . $AB_1 > AB$, тому промінь запізнюється в

порівнянні з часом у нерухомій системі. У поперечному розповсюдженні промінь пройде шлях ACA_1 . Розрахунок довжини проводиться таким чином:

$$AB_1A_1 = ABA + 2BB_1 - AA_1, \text{ але } \frac{BB_1}{AB_1} = \frac{v}{c} \text{ та } \frac{AA_1}{AB_1A_1} = \frac{v}{c} \Rightarrow$$

$$2BB_1 - AA_1 = (2AB_1 - AB_1A_1) \frac{v}{c} = AA_1 \frac{v}{c} = AB_1A_1 \frac{v^2}{c^2}, \text{ тобто}$$

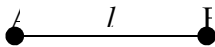
$$\frac{AB_1A_1}{ABA} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Як пише автор: «таке подовження шляху, коли система прийшла до руху зі швидкістю v » [4, с.225] має вигляд:

$$AC'^2 = AC^2 + CC'^2 \Rightarrow 1 - \frac{CC'^2}{AC'^2} = \frac{AC^2}{AC'^2}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{AC^2}{AC'^2} \Rightarrow \frac{AC'A'}{ACA} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ якщо } AB = AC \frac{AB_1A_1}{AC'A'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Зв'язок між часом, у системі, що рухається t' , та «абсолютним часом t , за який приймемо час спостерігача, що вважає себе, таким що знаходиться у стані спокою» [4, с.226]



Припустимо, що у точках A та B нерухомої системи знаходиться годинники. У момент часу $t = t' = 0$ з точки A до B спрямовано сигнал.

Годинники A та B є синхронними, якщо у момент отримання сигналу,

годинник В «показує час l/c ». Розрахунки абсолютного часу, тобто «з точки зору спостерігача, що знаходиться у стані спокою» вчений проводить таким чином: абсолютна відстань між А та В дорівнює l/k , відносно В сигнал рухається зі швидкістю $c-v$, тобто проміжок часу через який світловий сигнал дійде до точки В буде $\frac{l}{k(c-v)}$. Час t' на часах В буде $t - \frac{l}{k(c-v)}$, так

як з моменту прибуття сигналу пройшов «абсолютний час», тобто «відносний час» $\frac{1}{k}(t - \frac{l}{k(c-v)})$, «так як одиниця часу у рухомій системі подовжена у k

разів». Тобто $t' = \frac{l}{c} + \frac{1}{k} \left[t - \frac{l}{k(c-v)} \right] = \frac{1}{k} t - \frac{v}{c^2} l$. Покладемо, що в початковий

момент обидва спостерігача знаходяться у точці А. Змінимо позначення $l = x'$. У момент t «абсолютна відстань x » точки В, що рухається зі

швидкістю v від нерухомого спостерігача буде $x = \frac{x'}{k} + vt \Rightarrow x' = k(x - vt)$,

якщо ввести цю величину у формулу для t' то отримуємо $t' = k \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$.

Робота І. Огієвського «Загальні ідеї сучасного вчення про простір та час» [5] 1925 року є спробою викласти у «доступній формі аналіз класичних виразів простору та часу, а також ... цілеспрямованість введення Мінковським загального поняття «Світ», поглибленого Ейнштейном, Вейлем та Едінгтоном. Загальну ідею вчення про простір та час: таку як «властивість явищ, що відбувається у просторі n -го виміру з відбитком властивостей “ $n+1$ ”- мірного простору»» [5, с.1]. До теорії відносності вчений підійшов з точки зору її геометричної інтерпретації. Попередньо вчений подав загальні визначення такі, як:

- континуум першого та “ n -го” вимірів: «якщо між ансамблем точок і неперервною величиною можна встановити взаємно однозначну відповідність так, що кожному частому значенню неперервної величини відповідає тільки одна точка ансамблю та навпаки, то цей ансамбль називають континуум першого виміру. ... Таким же чином встановлюється поняття о континууму третього та взагалі “ n -го” вимірів, де n , яке завгодно ціле додатне число» [5, с.2]

- метрична геометрія – «ще сукупність пропозицій, що встановлюють кількісний зв'язок між різними образами цього континууму» [5, с.2]
- «за відстань між двома точками простору n -го виміру приймають вираз» $S^2 = (x'_1 - x_1)^2 + (x'_2 - x_2)^2 + \dots + (x'_n - x_n)^2$, якщо точки знаходяться доволі близько, то вираз прийме вид $dS^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + \dots + dx_n^2$. Наприклад, відстань між точками кривої буде «у континуумі третього виміру буде»

$$dS^2 = g_{11}dx^2 + g_{22}dy^2 + g_{33}dz^2 + 2g_{12}dxdy + 2g_{13}dxdz + 2g_{23}dydz .$$

Коефіцієнти $g_{\mu\nu}$, де $\mu = 1, 2, 3, 4$ та $\nu = 1, 2, 3, 4$, - фактори міра - визначення, «так як, вони характеризують метричну структуру простору».

Постулати спеціальної теорії відносності Огієвецький формулює таким чином:

- 1) «Однакові досліди, що були проведені в одній і тій самій обстановці дають одні і ті ж результати у різних місцях і різні часи;
- 2) Закони природи мають одну й ту ж математичну форму в усіх системах;
- 3) Швидкість світла, виміряна однаковими одиницями міри й часами, має одну і ту ж величину в усіх системах, що рухаються відносно одна одної рівномірно та прямолінійно» [5, с. 2].

I. Огієвецький інтерпретував відносність довжини та тривалості за допомогою механічної системи, що складається з двох екранів А (що має тонку щілину) та Д, що може рухатися паралельно один до одного. За допомогою цієї системи вчений доводить, що «час та простір одновимірного спостерігача є ні що інше, як двовимірний континуум, в якому другий вимір не відчувається» [ЦДАВОВ ф. 166, оп. 5, справа 797, с. 17], та продовжуючи міркування, ставить питання «чи не пояснюються парадокси, що пов'язані з коефіцієнтом Фіджеральда, недостатністю нашого сприйняття, розмірність якого нижче за розмірність простору, у якому розташовані зовнішні факти фізичного світу». [ЦДАВОВ ф. 166, оп. 5, справа 797, с. 18]. Слід додати, що ця праця, за даними архівних матеріалів ЦДАВОВ, була подана на конкурс до Наркомосвіти та значиться, як така, що не має прізвища автора.

О. П. Грузінцев відомий тим, що розвинув і узагальнив електродинаміку Герца для світлових хвиль, що поширюються в непровідних середовищах. Він був прихильником теорії ефіру, розвиваючи погляд на ефір, як на структуру, тісно зв'язану з електромагнітним полем. Тому і до питань теорії

відносності в статті „Перетворення Лоренца і принцип відносності” [6] він підійшов з позицій електродинаміки.

Механічна теорія ефіру, що була створена О. П. Грузінцевим самостійно, мала ряд загальних рис з аналогічною теорією Больцмана. Надалі вчений розвинув цю теорію і значно доповнив її.

Робота „Перетворення Лоренца і принцип відносності” [6], вийшла у 1911 р., (майже паралельно із статтею Л.Й. Кордиша), та була присвячена тій самій темі, але підхід до цього питання був інший. Так як О. Грузінцев, як вже було зазначено, розробляв теорію електромагнітного поля, він був одним з тих, хто вперше в Україні критично розглянув спеціальну теорію відносності, та застосував її до опису явищ у електромагнітному полі. Розглядаючи лише математичний бік цього питання та не зупиняючись на тих фізичних інтерпретуваннях, що стосуються понять простору та часу, які випливають з перетворень Лоренца, вчений говорить: „Пояснюючи свої формули перетворень фізично, він (Лоренц – *Авт.*) прийшов до вкрай цікавого висновку по відношенню до наших понять про простір і час, не говорячи вже про висновки стосовно „ньютонівної” механіки; але ці висновки, строго говорячи, вже виходять зі сфери чистої фізики і належать чи до механіки, чи до загальної теорії пізнання (гносеології); тому обмежимося лише розглядом їх математичного і чисто фізичного характеру” [6, с.1]. В передмові до роботи вказано, що перетворення Лоренца, які були проаналізовані А. Ейнштейном, А. Пуанкаре, Г. Мінковським, розглядалися ними лише для ефіру. Метою ж роботи О. П. Грузінцева було: показати, що „пропозиція Лоренца виявляється справедливою для усякого фізичного середовища, що характеризується діелектричною постійною і коефіцієнтом магнітної проникності відмінним від одиниці (для ефіру $K=1, \mu=1$); більш того, воно справедливе і для поглинаючих середовищ (метала)” [6, с.1]. При розв’язку цієї проблеми він накладає умови, щоб „швидкість світла була не „універсальною” константою, тобто швидкістю в ефірі, як припускає наприклад А. Ейнштейн, а взагалі швидкістю світла у середовища, що розглядається” [6, с.2].

Робота починається з виведення перетворень Лоренца шляхом, що запропонував А. Ейнштейн у роботі 1905 року. Тобто використання залежності координат та часу x, y, z, t системи A від координат та часу x', y', z', t' системи B , що рухається відносно A з постійною швидкістю за допомогою визначення часу, як фізичного фактору явища, що спостерігається. Хоча підхід до цього питання взагалі збігається з підходом А. Ейнштейна, але існує суттєва відмінність. Як було вище зазначено –

швидкість світла ω , що фігурує у роботі О. Грузінцева, є „швидкістю світла в тому середовищі, яким наповнений простір” [6, с.2].

Надалі, розглядаючи діелектрик та відповідні рівняння електромагнітного поля для системи відліку (x, y, z, t) , та зробивши перехід за допомогою перетворень Лоренца до нової системи x', y', z', t' , вчений дійшов наступного висновку: система рівнянь перетворюється за допомогою перетворень Лоренца в подібну систему, якщо між коефіцієнтами K і μ буде виконуватися співвідношення $A^2 K \mu \omega^2 = 1$, у цьому випадку отримуємо співвідношення Максвела $K \mu = n^2$, де n – „показник заломлення нашого середовища”. Хочу зазначити, що в позначенні О. Грузінцева $A = \frac{1}{\omega_0}$, де ω_0 – швидкість світла в „пустоті”. На жаль, вчений, який був прихильником теорії ефіру, це позначення ніяк не коментує.

Наступний крок, зроблений вченим – розгляд середовища, в якому „існують електрони з зарядами, що рухаються, тобто коли середовище буде мати дисперсію” [6, с.12]. Розглянувши рівняння електромагнітного поля для даного випадку з урахуванням того вкладу, який вносить дисперсія, вчений отримав вираз $A^2 K \mu \omega^2 D_1 = 1$ – з якого можна отримати „дисперсійне відношення загальноприйняте в теперішній час...Таким чином перетворення Лоренца приводять до важливого результату, звичайно яке отримують через інтегрування рівнянь електромагнітного поля.” [6, с.14]. А коли О.П. Грузінцев враховує струми провідності ”в загальному сенсі слова” для випадку „періодичної зміни кінетичного стану середовища”, та коефіцієнт електропровідності середовища C , то отримує рівність $A^2 K \mu \omega^2 E = 1$. За визначених умов він виводить „формули Максвела для провідників (металів), або для середовищ, що поглинають”. [6, с.15].

Таким чином, О. П. Грузінцев довів, що рівняння електродинаміки, „...що теж саме при відомих умовах, оптики для чистого ефіру...” [6, с.1], зберігають свій вигляд при перетвореннях Лоренца. Це означає, що він довів інваріантність рівнянь Максвела для середовища щодо перетворень Лоренца. Зроблений вченим, незалежно від інших дослідників, подібний висновок був дуже важливий з погляду обґрунтування теорії відносності.

Аналіз підходів до виведення перетворень Лоренца свідчить, що вони мали еволюційний характер, який був пов’язаний з розширенням можливостей їх застосування для різних фізичних систем і середовищ, та ступенем розвитку математичного апарату. Поступово відбувається перехід

від розгляду можливостей застосування перетворень Лоренца для процесів, що відбуваються у вакуумі, до поширення їх на процеси у середовищах з різними властивостями, що можна побачити на прикладі роботи О. П. Грузінцева. На самому початку йде переосмислення інтерпретації висновків, що простежується у роботах Л. Й. Кордиша і Ч. Бялобржеского. На початку розвитку СТВ, не наважуючись на радикальний перегляд концепцій простору та часу, деякі вчені, підтримуючи СТВ, дуже обережно висловлювались з боку інтерпретацій наведених рівнянь. Але з точки зору перспективи розвитку концептуальних ідей СТВ кожний такий етап надавав нові підтвердження обґрунтованості її засад та свідчив про нові її можливості. Поступово, перетворення Лоренца стали повсякденним інструментом дослідження фізичних систем, до яких можуть застосовуватися ідеї спеціальної теорії відносності.

Список літератури: 1. *Уиттекер Э.* История теории эфира и электричества: Современные теории (1900-1926). – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2004. – с.464. 2. *Франкфурт У. И.* Специальная и общая теория относительности. – М.: Наука. – 1968. – 320 с. 3. *Кордыш Л.Й.* Элементарный вывод основных формул теории относительности // Изв. Киев. политехн. ин-та. – 1911. – Год 11. – Кн. 1. – С. 43-51. 4. *Бялобржеский Ч.Ф.* Принцип относительности и его применение к механике. – Физическое обозрение. – 1910. – т.11. – №1-6. – с. 220-232. 5. *Огиевецкий И. Е.* Эволюция геометрии физического мира.–Записки Днепропетровского инст.нар освыти. – 1927. – т.1 –с. 75-98. 6. *Грузинцев А. П.* Преобразования Лоренца и принцип относительности // Сообщения ХМО. – Сер. 2.- Харьков, 1911. – Т. 12, № 6. – С. 269-288. То же. – Харьков, 1911. – 20 с. (отд. оттиск).

Надійшла до редколегії 11. 03. 08