

Терещук С.І.

доктор педагогічних наук
професор кафедри фізики та інтегративних
технологій навчання природничих наук

Колмакова В.О.

старший викладач кафедри інформатики і
інформаційно-комунікаційних технологій
Уманський державний педагогічний університет
імені Павла Тичини

ЧИ ПОТРІБНО ВИВЧАТИ ПОНЯТТЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ МАСИ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ?

***Анотація.** У статті розглянуто історичний аспект вивчення поняття релятивістської маси в різні часи у шкільному курсі фізики. На основі аналізу генезису становлення поняття маси у фізичній науці, показана необхідність більш детальної розробки методики її вивчення у курсі фізики старшої школи. На прикладі експерименту з пошуку зв'язку між масою та швидкістю руху частинки показано, виникнення поняття «релятивістська маса» та необхідність уникнення вказаного зв'язку у шкільному курсі фізики.*

***Ключові слова:** релятивістська маса, маса спокою, власна маса, фотон, шкільний курс фізики.*

***Tereshchuk S., Kolmakova V. Is it Necessary to Study the Concept of Relativistic Mass in a School Physics Course?** The article examines the historical aspect of studying the concept of relativistic mass at different times in the school physics course. Based on the analysis of the genesis of the formation of the concept of mass in physical science, the need for a more detailed development of the methodology for its study in the high school physics course is shown. Using the example of an experiment to find the connection between the mass and the velocity of a particle, it is shown the emergence of the concept of "relativistic mass" and the need to avoid this connection in a school physics course.*

***Key words:** relativistic mass, rest mass, own mass, photon, school physics course.*

Актуальність дослідження. Використання у навчальній та методичній літературі понять «релятивістська маса», «маса спокою», «власна маса», «маса фотона» може призвести до некоректного сприйняття та розуміння учнями деяких понять квантової фізики та спеціальної теорії відносності (СТВ) [1-4]. Наприклад, чому при відсутності маси фотона існує тиск світла?

Метою статті є ретроспективний аналіз поняття «маса» для з'ясування відповідності змісту цього поняття із сучасними науковими уявленнями та їх відображення у підручниках фізики.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо історичний аспект цієї проблеми. В різні часи (1901-1933 рр.) Кауфманом, Бухерером, Нейманом, Герлахом, Гюї та іншими дослідниками [5-9], були здійснені спроби експериментально перевірити залежність маси від швидкості з використанням заряджених частинок. Мета експерименту – перевірка збільшення маси частинок відповідно до формули $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Ідея досліду полягала в тому, що заряджені частинки відхилялися електричним і магнітним полями, а тому лінія сліду частинки на фотопластинці відповідала графіку функції швидкості та заряду частинки $\frac{e}{m} = f_1(v)$. Величина заряду відома, тому можна визначити масу $m = f_2(v)$. Рівняння $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ та $m = f_2(v)$ порівнювали та робили висновок про наявність (чи відсутність) залежності маси частинки від її швидкості (див табл.1).

За Нейманом, якщо $\beta = 0,85$, то маса зростає приблизно у 3 рази, а заряд теж зростає у 3 рази, що свідчить про помилку (Табл.1).

Таблиця 1

Результати дослідження залежності маси зарядженої частинки від її швидкості (1901 - 1933 рр.) [5-9]

	Відношення $\beta = v/c$	Відношення e/m	Джерело частинок	Висновок дослідників
Кауфман	$\beta = 1,034$ (помилка)	не обчислювалось	Радіоактивний радій	висновок невизначений

Бухерер	$0,3173 \leq \beta \leq 0,687$	$1,752 \cdot 10^7 \leq \frac{e}{m} \leq 1,767 \cdot 10^7$	Радіоактивний радій	принцип відносності підтвердився
Нейман	$0,3915 \leq \beta \leq 0,850$	$1,767 \cdot 10^7 \leq \frac{e}{m} \leq 1,771 \cdot 10^7$	Радіоактивний радій	висновок невизначений
Гюї, Лаванші	$0,2581 \leq \beta \leq 0,4829$	$1,041 \cdot 10^7 \leq \frac{e}{m} \leq 1,139 \cdot 10^7$	катодні промені	принцип відносності підтвердився

Вкажемо на ряд помилок, пов'язаних з отриманими експериментальними даними, які не з'ясовані до сьогодні. До них належать: а) результати Неймана, з яких випливає самочинне зростання заряду частинок при зростанні її швидкості та маси; б) результати Кауфмана, з яких випливає, що деякі частинки вилітають з ядра зі швидкістю $v > c$.

Слід підкреслити, що отримані дані можна інтерпретувати в контексті уявлень про незалежність маси частинки від зростання її швидкості. Так, наприкінці XIX та початку XX століття серед науковців жваво обговорювалися ідеї теорії електромагнітного походження маси. Існування тензора напруженості електромагнітного поля Максвелла в якості просторової складової тензора енергії-імпульсу електромагнітного поля, допускало в неявній формі ідею електромагнітної маси, згідно з якою інертна маса є ефектом індукції.

Вперше цю думку висловив Дж. Дж. Томсон у 1881 році [10]. Згодом О. Хевісайд [11], М. Абрагам [12] та інші дослідники продовжили розвивати теорію електромагнітної маси, започатковану Томсоном.

М. Абрагам в статті «Принципи динаміки електрона» сформулював електромагнітний варіант закону інерції: «Якщо з самого початку рух електрона був рівномірним ... і якщо його швидкість була менша швидкості світла, то для продовження рівномірного руху не потрібно ніяких зовнішніх сил або моментів обертання» [12, с. 142]. На думку Абрагама, результати експерименту Кауфмана підтверджують електромагнітне трактування маси. За Абрагамом механічна маса m ,

відповідно до механіки Ньютона, не залежить від швидкості, водночас електромагнітна маса завдяки множнику $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ залежить від швидкості.

Дана теорія не набула загального визнання, однак була сприйнята з ентузіазмом більшістю відомих вчених (Г.А. Лоренцом, А. Пуанкаре та ін.). Після створення СТВ, поступово про теорію електромагнітної маси забули, дослідження у цьому напрямку припинилися, а дані, що були отримані, неможливо було узагальнити на будь-які частинки, які мали властивості відмінні від тих, що має електрон.

Таким чином, наведені вище експериментальні дані не мають однозначної інтерпретації. Частина з них (Бухерер, Гюї та Лаванші) підтверджують справедливість $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, однак ці результати можуть трактуватися по-різному. Натомість інша частина досліджень показала, що формула залежності маси від швидкості руху тіла не відповідає рівнянням СТВ (результати Кауфмана, Неймана). Загалом можна здійснити повторну перевірку цих даних, тому їх не можна вважати доказом чи спростуванням залежності $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$.

Цікавим є питання щодо врахування зростання маси для розрахунків заряджених частинок в прискорювачах. Результати розрахунків згідно СТВ, використовуються при розробці методів прискорення важких заряджених частинок – протонів, дейтронів, альфа-частинок в магнітному полі. Не врахування збільшення маси призводить до втрати синхронізації між дією прискорювального поля і рухом зарядженої частинки. Р. Фейнман після тривалих розмірковувань про релятивістську масу, відзначив, що формула $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ дуже рідко використовується на практиці, натомість незамінними виявляються два співвідношення, які можна переконливо довести: $E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4$ та $pc = \frac{Ev}{c}$ [15].

Аналіз наукових праць А. Ейнштейна, засвідчує, що погляди видатного фізика на поняття маси та залежності її від швидкості і енергії змінювалися впродовж створення СТВ та загальної теорії відносності (далі ЗТВ).

А. Ейнштейн у своїх ранніх працях підкреслював, що маса тіла залежить від енергії, яку має тіло, але не залежить від його швидкості. В

статті [19] ним було введено поняття маси спокою масивного тіла, яке випромінює енергію $\frac{L}{2}$ у протилежних напрямках. Ейнштейн показав, що якщо цей процес відбуватиметься у системі відліку, яка рухається відносно тіла з швидкістю v , то різниця кінетичних енергій тіла до і після випромінювання дорівнюватиме:

$$K_0 - K_1 = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

де v - швидкість світла.

Швидкість v до і після випромінювання однакова, а кінетична енергія зменшилась, тому маса тіла зменшилась на величину $\frac{L}{c^2}$ [19]. Однак, у 1906 році Ейнштейн опублікував статті [20] та [21], якими практично спростував попередній результат, отриманий у [19]. Так, в роботі [20] ним було розглянуто перенесення маси всередині порожнього циліндра між протилежними торцями. Спираючись на Пуанкаре [14], автор припускав, що циліндр має масу $\frac{E}{c^2}$, тому $E = mc^2$ [20]. В [21] Ейнштейн повернувся до понять повздожньої та поперечної мас, введених ще Лоренцем та Абрагамом.

Завдяки переважно працям Ейнштейна [16-21] до 1927 року стало зрозуміло, що інертна маса тіла визначається енергією E , а гравітаційна маса визначається величиною $\frac{p_\mu p_\nu}{E}$, де p_μ – вектор енергії-імпульсу. В ньютонівській механіці при дорелятивістських швидкостях обидві величини дорівнюють енергії спокою (звідси, зокрема, впливає еквівалентність інертної та гравітаційної мас в рамках ТВ).

Питання маси та зв'язок її з енергією частинки було детально розглянуто А. Ейнштейном в роботі [16] у співавторстві з Л. Інфельдом. Розкриваючи зміст формули $E = mc^2$ через поняття «маса енергії випромінювання», автори вказують на штучність (умовність) поділу матерії на речовину і поле, а відтак висловлюють, у зв'язку з цим, упевненість, що від поняття речовини можна відмовитись.

В статті [17] Ейнштейн знову повертається до виведення еквівалентної маси та енергії, яке здійснив раніше в [19] у 1905 році. Однак, в [17] умови дещо змінені – нерухоме тіло відносно Землі поглинає радіацію. Причому автор спирається тепер на закон збереження

імпульсу та використовує не формулу перетворення енергії та імпульсу випромінювання, а кут аберації зоряного світла $\alpha = \frac{v}{c}$. На підставі цього, Ейнштейн показав, що збільшення енергії спокою пов'язане зі збільшенням маси на $\frac{E_0}{c^2}$, отже $E_0 = mc^2$.

В науково-популярній статті [18] Ейнштейн узагальнює раніше отримані результати і робить висновок – в теорії відносності мірою інертності є не маса, енергія; гравітаційне поле характеризується величиною $\frac{p_\mu p_\nu}{E}$, а принцип збереження енергії не є визначальним, оскільки енергія та імпульс разом визначають масу і остання еквівалентна енергії спокою [18].

Підсумовуючи, можемо стверджувати, що зміст поняття інертної маси в історичній ретроспективі є однаковим для ньютонівської та релятивістської теорій. Для категоричного твердження про залежність маси від швидкості немає достатніх підстав.

Ще до створення теорії відносності, Пуанкаре отримав співвідношення між енергією електромагнітного поля та його масою $E = mc^2$. Вчений застосував до співвідношення між енергією та імпульсом нерелятивістську формулу для імпульсу, що було помилковим. Ейнштейн погодився з його думкою в роботі [20] і пов'язав отриманий Пуанкаре результат з теорією відносності в роботі [22]. Ці хибні погляди Ейнштейна підтримали інші дослідники [23]. Однак, після того, як Ейнштейн змінив свій погляд на це питання – після завершення ЗТВ – переважна більшість вчених-методистів та популяризаторів науки продовжували підтримувати ідею релятивістської маси.

Поняття релятивістської маси виникло внаслідок відмінності формул $\frac{d}{dt}(mv) = F$ та $\frac{d}{dt}(m\gamma v) = F$, які «майже» схожі. Величину $m\gamma$ називають релятивістською масою (серед перших, хто почав саме так чинити, можна згадати Макса Борна, Льюїса і Толмена, М. Джеммера та багатьох інших). Згодом це положення поширилося серед більшості підручників та методичної літератури.

Наведемо приклад, який є характерним, на наш погляд, щодо обговорюваної проблеми і найбільш яскраво ілюструє методичний аспект формування поняття маси, він панував в методичній науковій школі часів СРСР, і, на жаль, зустрічається до сьогодні в українських підручниках.

У методичному посібнику для вчителів фізики за 1973 рік підкреслювалось, що «... в релятивістський закон входить не інваріантна маса m_0 , а релятивістська маса m , що залежить від швидкості ...». Автори посібника на цьому не зупиняються і вводять ще один термін маси (новий для учнів тогочасної старшої школи): «... це означає, що маса тіла, як і його швидкість, – величина відносна: вона залежить від системи відліку. Одне й те саме тіло має різні маси у різних системах відліку ... тому маса спокою називається в СТВ власною масою тіла». Використання маси, яка залежить від швидкості, призводить до неправильного використання класичної формули $p = m \cdot v$ в релятивістській механіці. Окрім цього, введення релятивістської маси призводить до хибного висновку про те, що величина $\frac{E}{c^2}$ є інертною і водночас гравітаційною масою, що не відповідає положенням теорії відносності. Саме до такого неправильного висновку приходять Л.А. Кирик [24], вказуючи, що маса «... є міра інертних властивостей ($m = \left(\frac{a_{\text{ерт}}}{a}\right) \cdot m_{\text{ерт}}$), міра гравітаційних властивостей $F = G \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{R}\right)$ і міра енергетичних властивостей ($m = \frac{E}{c^2}$) будь-якого матеріального об'єкта» [24, с. 291].

Який механізм збільшення маси релятивістської частинки? Відповідь на це запитання теорія відносності не дає (з погляду прибічників релятивістської маси). Натомість зростання маси частинки при збільшенні її швидкості не суперечить концепції світового ефіру, що власне порушує логіку СТВ, оскільки остання заперечує існування ефіру. Модель газоподібного ефіру дозволяє пояснити збільшення маси частинки через «налипання» частинок ефіру на рухому частинку. Непрямо, але на користь цієї моделі вказують наступні міркування. Збільшення маси частинки зі зростанням швидкості повинно зрештою призвести до її руху із надсвітловою швидкістю:

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

$$\text{звідси випливає, що } \int dv \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{m_0} \int F dt.$$

Оскільки $F = \text{const}$, то час T , протягом якого частинка могла б досягти швидкості світла $T = \frac{pm_0}{2Fc}$. Якщо ж замість релятивістської маси

у формулу $a = \frac{F}{m}$ підставляти «поздовжню масу», то отриманої хибної формули вдається уникнути. Звідси випливає, що уведення релятивістської маси, під час вивчення СТВ, призводить також до уведення поняття «поздовжня маса», що є не просто обтяжливим для сприйняття учнями, але й абсурдним, оскільки дане поняття виникло під час розробки електромагнітної теорії маси у працях Абрагама, Хевісайда та ін., і з розвитком СТВ втратило свою актуальність. Таким чином, уведення релятивістської маси у методологічному та методичному аспектах – це крок назад, повернення до теорій, що розвивалися до створення СТВ (теорій електромагнітної маси та світового ефіру).

Висновки. Проблема релятивістської маси є суто методико-методологічною. Тому її розв'язання лежить в площині теорії методики навчання фізики, а не критики чи перегляду основ СТВ та ЗТВ. Історія становлення понять СТВ та ЗТВ свідчить про необхідність в адекватній до освітнього процесу формі та відповідно до математичної підготовки учнів 10 класу, демонстрації розвитку та еволюції змісту поняття «маса» від ньютонівської маси як міри інертності та гравітаційної взаємодії до поняття маси, яка входить до складнішого поняття – енергії спокою тіла (або частинки мікросвіту).

Література

1. Фізика: підруч. для 10 кл. закладів загальної середньої освіти / В. Г. Баряхтар та ін. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.
2. Фізика (рівень стандарту): підруч. для 10 кл. закладів загальної середньої освіти / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. К. : УОВЦ «Оріон», 2018. 208 с.
3. Фізика і астрономія. 10-11 класи. Рівень стандарту. Профільний рівень: навчальні програми (авторський колектив під керівництвом Ляшенка О.І.), затверджені МОН України від 24.11.2017 №1539.
4. Фізика: навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів (авторський колектив під керівництвом Локтева В.М.), затверджені МОН України від 24.11.2017 №1539.
5. Bucherer A., Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz - Einsteinschen Theorie/ Phys. Z.4 54-57, (1908).
6. Kaufmann W., Die elektromagnetische Masse des Elektrons/ Phys. Z.4 54–57, (1902).

7. Neumann G., *Ann. d. Phys.*, 1914. 45 S. 529.
8. Gerlach W., *Handbuch d. Phys.*, 1933. 22. S. 11.
9. Guye Ch. E., Lavansky C., *C. Arch. Sc. Phys. Nat. Geneve.*, 1916. 41. 363–441.
10. Tomson J., On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies. *Philos. Mag.* 1881. 11(8). pp. 229-249.
11. Heaviside O., On the electromagnetic effects due to the motion of electrification through a dielectric. *Philos. Mag.* 1889. No. 27. pp. 324-339.
12. Abraham M., *Prinzipien der Dynamik des Elektrons*, *Ann. Phys. (Leipzig)*. 1902. 10 [315] (1). pp. 105–179.
13. Lorentz H., Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, *Proc. Acad. of Sci., Amsterdam*. 1904. No. 6. pp. 809–831.
14. Poincare H. La theorie de Lorentz et le principe de reaction. *Arch. Neerland. Sci. Exactes Naturelles*, 1900. No. 5. pp. 252-278.
15. Feynman R., Leighton R., Sands M. *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963-1965).
16. Einstein A., Infeld L. *The Evolution of Physics: the Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta* (New York: Simon and Schuster), 1938.
17. Einstein A. Elementary derivation of the equivalence of mass and energy *Technion J.* 5 16, (1916).
18. Einstein A. $E=mc^2$: The most urgent problem of our time *Sci. Illustrated* I, 1946. pp. 16-17.
19. Einstein A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik* (ser. 4), 1905. No. 18. pp. 639–641.
20. Einstein A. Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, *Annalen der Physik* (ser. 4), 1904. No. 20. pp. 627-633.
21. Einstein, A., Eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons, *Annalen der Physik* (ser. 4), 1906. No. 21. pp. 583–586.
22. Einstein A. Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik* (ser. 4), 1905. No. 17. pp. 891–921.
23. Lewis G., Tolman R. The principle of relativity and non-Newtonian mechanics. *Philosophical Magazine*. 1909. Vol.18. pp. 510–523.
24. Кирик Л.А. Фізика. 11 клас: Розробки уроків. 2-ге вид. Х.: Веста: «Ранок», 2008. 448 с.