

2. Довженко О. Какова наша школа (по результатам международного сравнения) // Вест. выш. шк. (Alma mater). – 2002. – №3. – С.37-42.
3. Коваленко О.Е. Методика професійного навчання: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Нар. укр. акад. – Х.: Вид-во НУА, 2005. – С. 335-367.
4. http://www.kmu.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=60649346
5. http://revolution.allbest.ru/pedagogics/00014847_0.html
6. http://forca.com.ua/knigi/navchannya/metodika-profesiinogonavchannya_4.html

Criteria of quality of formation are investigated, and ways of its increase using an intensification of methods on introduction effectiveness of knowledge are offered.

Key words: effectiveness of knowledge's, quality of education, oriented basis of activity, forming of effective knowledge's.

Отримано: 30.03.2008

УДК 372.853

Ю. П. Бендес

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «КПІ»

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ В ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

В статті розглядається використання інноваційних технологій при викладанні теорії відносності. Розглянутий підхід полягає в широкому застосуванні комп'ютерних технологій та контрприкладів, що дозволяє глибше розкрити теоретичну бездоганність та прикладний характер теорії відносності.

Ключові слова: теорія відносності, контрприклад, комп'ютерна технологія.

Одним з головних складових елементів розвитку наукового стилю мислення учнів та студентів є формування у них сучасних уявлень про простір і час, взаємозв'язок маси та енергії, принципу сталості швидкості світла у вакуумі. Ці знання складають основу теорії відносності, яка здійснила переворот у фізичному світогляді та у розумінні фундаментальних понять: маси та енергії, простору і часу, абсолютності та відносності.

Теорія відносності для людини, яка тільки починає з нею ознайомлюватись, здається дещо парадоксальною, тому її викладання вимагає особливих підходів. Важливо, щоб при викладанні розкривались її логічність, теоретична бездоганність, перевіреність експериментами та використання на практиці її положень.

В даній роботі розроблено підхід до викладання теорії відносності із застосуванням комп'ютерних технологій та контрприкладів [1]. Оскільки учні вже добре знайомі із механікою Ньютона, то в даному разі під контрприкладами будемо розуміти наукові факти, які не узгоджуються з нею, тобто є до класичної механіки заперечуваними прикладами [2]. Такий підхід дасть змогу глибше розкрити необхідність і прикладний характер теорії відносності.

В середині XIX століття гіпотеза пружних коливань ефіру відразу поставила проблему: рухається ефір чи він нерухомий? Явище аберації світла вказувало на те, що ефір нерухомий, а дослід Фізо – на часткове захоплення ефіру тілами при їх русі. Згідно гіпотези про нерухомий ефір можна спостерігати «ефірний вітер» при русі Землі по орбіті навколо Сонця зі швидкістю 30 км/с, а швидкість світла по відношенню до Землі повинна залежати від напрямку її руху в ефірі. Для перевірки цього А. Майкельсон у 1881 році за допомогою інтерферометра провів експеримент, який дав негативний результат, оскільки зміщення інтерференційної картини не відбувалося. Модель інтерферометра Майкельсона можна виготовити за допомогою навчального набору ЕСФЕ-1М «Оптика», а спостерігати інтерференційну картинку та обробити отримані результати дозволяє програма відеоаналізу програмно-методичного комплексу «eФізик@» (рис. 1) [3].

Пояснити негативний результат дослідження Майкельсона змогла гіпотеза голландського фізика Г.А. Лоренца, згідно якої всі рухомі тіла зменшують свої лінійні розміри в напрямку руху. Однак ця гіпотеза була занадто штучною і висувалась тільки для пояснення одного часткового явища.

З іншого боку, рівняння Максвелла не залишались інваріантними по відношенню до перетворень Галілея. Тому ще за 10 років до того, як Ейнштейн висунув теорію відносності, Лоренц отримав рівняння для перетворень, які пізніше були названі його ім'ям. Ці перетворення, за допомогою яких можна було пояснити експеримент Майкельсона, забезпечили інваріантність рівнянням Максвелла, але не усунули протиріччя між ними та класичною механікою. Згідно з перетвореннями Лоренца час рівноправний з ін-

шими координатами, він не існує окремо від них, а зв'язаний із простором за допомогою функціональної залежності.

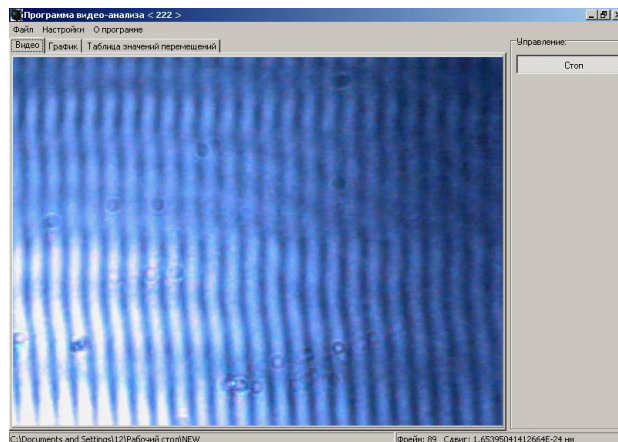


Рис. 1. Інтерфейс програми відеоаналізу програмно-методичного комплексу «eФізик@»

Ця ідея стала початком для спеціальної теорії відносності А.Ейнштейна, який у 1905 р. опублікував роботу «До електродинаміки рухомих тіл», що містила в своїй основі два постулати. Перший постулат: ніякими фізичними дослідами неможливо встановити, яка із двох інерціальних систем знаходиться у спокої, а яка рухається. Цим самим постулюється неможливість виявлення «абсолютного руху» тіл, тобто заперечується існування ефіру. Другий постулат: швидкість світла у вакуумі однакова в усіх напрямках і дорівнює c . Вона не залежить від руху джерела світла і спостерігача.

Незалежність швидкості світла від руху джерела була підтверджена класичними дослідженнями, які були виконані у 1956 р. А.М. Бонч-Бруєвичем і В.А. Молчановим. Вони порівнювали швидкість світла від правого і лівого країв диску Сонця. Внаслідок його обертання один із цих країв наближається до нас зі швидкістю 2,3 км/с, а другий віддаляється з тією ж швидкістю. Дослідженнями було показано, що швидкості світла в обох випадках з достатньою точністю однакові.

Отже, сформульована теорія відносності не тільки збільшила уявлення про простір та час, а й посприяла створенню інших взаємозв'язків. Вона призвела до радикальної зміни картини світу, створеною класичною фізикою на основі важливих фізичних співвідношень та вихідних принципів. Це підтверджує й те, що застосування перетворень Лоренца до законів руху Ньютона привело Ейнштейна до гіпотези про залежність маси тіла від системи відліку, в якій вона знаходиться.

Як змінюється маса зі швидкістю, показує наступне рівняння. Нехай маса спокою рівна m_0 , а маса того ж само-

го тіла, яке знаходиться у русі, рівна m , тоді справедлива рівність

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Походження ж додаткової маси знаходить своє пояснення у законі, до якого прийшов Ейнштейн при подальшому розвитку своєї теорії. Цей закон описується рівнянням, про яке говорять, як про найбільш значне рівняння минулого століття:

$$E = mc^2,$$

з нього отримуємо

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Звідси бачимо, що існує принципова можливість перерахувати будь-яку масу в енергію і навпаки, тому співвідношення між масою і енергією іноді називають принципом інертності енергії. Еквівалентність маси та енергії є найбільш парадоксальним твердженням теорії відносності.

Зміну маси експериментально можна виявити лише при зміні великої швидкості, яка близька до швидкості світла. Ідеальним об'єктом для цієї перевірки є електрони. І дійсно, в 1902 р. вчений Кауфман встановив залежність поперечної маси β -частинок від їх швидкості, підтвердивши тим самим цей наслідок теорії відносності ще до того, як вона була сформульована. А вже пізніше, в 1914 р., Глетчер, а роком пізніше Зоммерфельд, аналізуючи дані деяких експериментів Пашена, які стосувалися перш за все структури спектральних ліній гелію, підтвердили, що маса електронів, які обертаються навколо ядра, задовольняє релятивістському відношенню до маси. Більше того, у 1935 р. вчений Наккен у своїх експериментах з катодними променями при напрузі 200 000 В, підтвердив релятивістську формулу залежності маси від швидкості з точністю 1%. Інші експериментальні підтвердження були отримані при вивченні треків електронів у камері Вільсона, а також по даних про космічні промені [4].

Загалом теорія відносності Ейнштейна викликала великий переворот у розвитку фізичної науки, яка захопила собою ціле покоління вчених. Доказами правдивості теорії відносності виявились: відхилення світла поблизу краю Сонця, зміщення перигелію планети Меркурій та зміна довжини хвилі світла у гравітаційному полі.

Першим контрприкладом до класичної механіки та, одночасно, доказом теорії Ейнштейна, стало виявлення Левер'є у 1859 році того, що рух самої близької до Сонця планети – Меркурія дещо відрізняється від передбаченого механікою Ньютона. Виявилось, що, перигелій – найближча до Сонця точка орбіти планети – повертається з кутовою швидкістю, яка на 43 кутових секунди у сторіччя відрізняється від тієї, яку слід було б чекати при врахуванні всіх відомих збурень від інших планет і їх супутників. Ще раніше Левер'є і Адамс зіткнулися з аналогічною, по суті справи, ситуацією при аналізі руху Урана – найбільш віддаленої від Сонця планети серед відомих на той час. І вони пояснили розходження розрахунків зі спостереженнями, припустивши, що на рух Урана чинить вплив ще більш віддалена планета, яку назвали Нептуном. У 1846 році Нептун дійсно був знайдений в передбаченому місці і ця подія вважається тріумфом Ньютонівської механіки. Звичайно, що Левер'є намагався пояснити згадану аномалію Меркурія існуванням невідомої планети – в даному разі деякої планети Вулкан, яка знаходилась ще ближче до Сонця. Але виявилось, що ніякого Вулкана не існує і тоді почали намагатися змінити ньютонівський закон всесвітнього тяжіння, згідно якого гравітаційна сила при застосуванні до системи

Сонце – планета змінюється за законом $F = \frac{mM_0}{r^2}$, де

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \times \text{с}^2}$, – гравітаційна стала, m – маса частинки (планети), $M_0 = 2 \cdot 10^{30}$ кг – маса Сонця і r – відстань

від центра Сонця до планети. Зміни зводились, в першу чергу, до спроб використання закону $F \sim \frac{1}{r^{2+\epsilon}}$, де ϵ – деяка невелика величина. До речі, аналогічний прийом використовують (щоправда без успіху) і в нашні дні для пояснення деяких неясних питань астрономії (мова йде про проблему прихованої маси). Цього нікому не вдалося і питання про поворот перигелію Меркурія залишався відкритим до 1915 року. Саме тоді, у розпалі першої світової війни, коли тільки деяких вчених цікавили абстрактні проблеми фізики і астрономії, Ейнштейн завершив (після приблизно 8 років напружених зусиль) створення загальної теорії відносності (ЗТВ). У ній Ейнштейн розрахував додатковий порівняно з ньютонівським поворот перигелію Меркурія, який виявився рівним (у радіанах за один оберт планети навколо Сонця)

$$\psi = \frac{6\pi GM_0}{c^2 a(1-e^2)} = \frac{24\pi^2 a^2}{c^2 T^2(1-e^2)}. \quad (1)$$

Крім величин G і M_0 , зміст і значення котрих зазначені вище, a – велика піввісь орбіти планети, $e = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$ – ексцентриситет орбіти (b – її мала піввісь) і $c = 3 \cdot 10^8$ і $\cdot \text{с}^{-1}$ – швидкість світла у вакуумі. При переході до останнього виразу (1) використано третій закон Кеплера $a^3 = \frac{GM_0}{4\pi^2} T^2$,

де T – період обертання планети. Якщо в формулу (1) підставити найкращі відомі значення усіх величин, а також провести елементарний перерахунок від радіанів за оберт до повороту у кутових секундах за сторіччя, то отримаємо значення $\psi = 42,98''/\text{сторіччя}$. Спостереження співпадають з цим результатом з точністю близько $\pm 0,1''/\text{сторіччя}$ і цей результат став справжнім тріумфом ЗТВ (Ейнштейн у своїй першій роботі використав менш точні дані, але у межах помилок отримав повну відповідність теорії і спостережень).

У 1914 р. Ейнштейн зробив важливе передбачення: промені світла, проходячи поблизу Сонця, повинні викривлятися, причому їх відхилення повинно складати

$$\alpha = \frac{4GM_0}{c^2 r} = 1'',75 \frac{r_0}{r}, \quad (2)$$

де r – найближча відстань між променем і центром Сонця, а $r_0 = 6,96 \cdot 10^8$ м – радіус Сонця (точніше, радіус сонячної фотосфери); таким чином, максимальне відхилення, яке можна спостерігати, складає 1,75 кутові секунди. Як не малий такий кут (приблизно під таким кутом видно дорослу людину на відстані 200 км), він міг вже тоді бути вимірним оптичним методом, шляхом фотографування зір на небі в околі Сонця. Саме такі спостереження були проведені двома англійськими експедиціями під час повного сонячного затемнення 29 травня 1919 року. Ефект відхилення променів в околі Сонця, який був встановлений, узгоджувався з формулою (2), хоча точність вимірів, у зв'язку з малим ефектом, була невелика. Однак відхилення вдвічі менше, ніж згідно (2), тобто на $0,87''$, було виключено. Останнє дуже важливо, бо відхилення на $0,87''$ (при $r = r_0$) можна отримати вже із ньютонівської теорії (сама можливість відхилення світла в полі тяжіння була відмічена ще Ньютоном, а вираз для кута відхилення, вдвічі менший, ніж згідно формули (2), було отримано ще у 1801 році).

Після оприлюднення отриманих результатів експедиції на сумісному засіданні Королівського товариства і Королівського астрономічного товариства 6 листопада 1919 року відомий вчений Дж. Дж. Томсон сказав: «Це найважливіший результат, отриманий у зв'язку з теорією гравітації з часів Ньютона... Він являє собою одне з найвеличніших досягнень людської думки».

Ефекти ЗТВ в Сонячній системі, як ми бачили, дуже малі. Пояснюється це тим, що гравітаційне поле Сонця (не кажучи вже про планети) є досить слабким. Останнє означає, що ньютонівський гравітаційний потенціал Сонця $\varphi_0 = -\frac{GM_0}{r}$ по абсолютній величині малий порівняно з

квадратом швидкості світла c^2 . Так, навіть при $r = r_0$ (тобто на фотосфері Сонця) $|\varphi_0|/c^2 = \frac{GM_0}{c^2 r_0} = 2,12 \cdot 10^{-6}$. Нагадаємо

тепер результат, відомий зі шкільного курсу фізики: для колових орбіт планет $|\varphi_0| = g^2$, де g – швидкість планети.

Тому слабкість гравітаційного поля можна характеризувати більш наочним параметром $\frac{g^2}{c^2}$, який для Сонячної системи, як ми бачили, не перевищує значення $2,12 \cdot 10^{-6}$.

На земній орбіті $g = 3 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і $\frac{g^2}{c^2} = 10^{-8}$, для близьких

супутників Землі $g \approx 8 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і $\frac{g^2}{c^2} \approx 7 \cdot 10^{-10}$. Перевірка

згаданих ефектів ЗТВ навіть з досягнутою зараз точністю 0,1%, тобто з похибкою, не переважаючою 10^{-3} від вимірювальної величини (відхилення світлових променів в гравітаційному полі Сонця), ще не дозволяє перевірити ЗТВ з

точністю до членів порядку $(\varphi_0/c^2)^2 = \frac{g^4}{c^4} \leq 4 \cdot 10^{-12}$. Про

виміри з потрібною точністю, скажемо, відхилення променів в межах Сонячної системи можна тільки мріяти, хоча проекти відповідних експериментів вже обговорюються. У зв'язку зі сказаним фізики говорять, що ЗТВ перевірена лише для слабого гравітаційного поля.

Третій контрприклад до класичної механіки та доказ теорії відносності безпосередньо взаємопов'язаний з двома попередніми. Його називають так званим «ефектом Ейнштейна» – це зміщення спектральних ліній випромінювання зірок. Із загальної теорії випливає, що світло, якому властива інертна маса, втрачає енергію на подолання гравітаційного тяжіння тіла, що його випромінює. Очевидно, що зі зменшенням енергії фотонів, збільшується його довжина хвилі. Цей факт називають гравітаційним червоним зміщенням, яке спостерігається в спектральних лініях Сонця та важких зірок. Також загальна теорія відносності передбачала, що всі годинники в полі тяжіння мають сповільнювати свій хід, і оскільки коливальний рух можна порівняти з часом, то теорія передбачає зменшення частоти світлового випромінювання у присутності поля сили тяжіння. Звідси слідує, що спектральні лінії світла, які випромінюють зірки, повинні бути зміщені в червону сторону в порівнянні з існуючими лініями в спектрах земних джерел. Цей факт був підтверджений у дослідженні спектру світла карликових зірок, згідно нього було доведено, що середня густина зірок в 10 тис. раз більша густини води. Безпосередньо це було підтверджено багатьма іншими експериментами різних вчених, так, наприклад, у 1925 р. Адамс, фотографуючи спектри Сиріуса і його супутника Сиріуса В, спостерігав відносно них червоне зміщення. Початок досліджень таких зміщень було проаналізовано ще у 1919 р. англійським вченим В. Слайфером. Виходячи з ефекту Доплера, вчений зробив відкриття, яке привело до зовсім нових уявлень про Всесвіт. Його вимірювання червоних зміщень у спектрах ряду туманностей показали, що всі вони віддаляються від Землі з величезною швидкістю – 1800 км/с. Також у 1928 р. американськими астрономами Е. Хабблом і М. Хьюмасоном було виявлено істотне червоне зміщення при вивченні спектра галактики NGC 7619, а деякі галактики в межах Великої Ведмедиці рухаються зі швидкістю 40 000 км/с, а швидкість віддалених галактик досягла 65 000 км/с і більше. Е. Хаббл пояснив це червоне зміщення як в спектрах галактик їх розбіганням. І у 1929 р. він пов'язав збільшення швидкостей галактик зі збільшенням віддалі їх від Землі:

$$v = Hr,$$

де H – стала Хаббла. Е. Хаббл передбачив, а експерименти підтвердили, що більш віддалені галактики мають більше

червоне зміщення. Для галактик, що розміщуються від Землі на віддалі до одного мільярда світових років, швидкість віддалення на 10 000 км/с перевищуватиме ту швидкість, яка має бути у випадку справедливості лінійної залежності. Але за теорією відносності ніяке тіло не може рухатись зі швидкістю, більшою від світла у вакуумі. Тому зі збільшенням відстані швидкість має зростати повільніше, якщо закон Хаббла справедливий для таких великих ділянок Всесвіту. Зміщення спектральних ліній випромінювання зірок у сторону червоного зміщення вдалося підтвердити завдяки ефекту Месбауера, який дає змогу досягти високої точності вимірювання частоти.

Четвертий доказ теорії відносності можна отримати при дослідженні елементарних частинок, насамперед мезонів. При вивченні космічних променів були відкриті частинки, які називаються μ -мезонами. Існує два типи μ -мезонів, які відрізняються електричним зарядом: позитивно заряджені μ^+ , та негативно заряджені μ^- . Мюони (μ -мезонами) розпадаються на електрон (позитрон) і два нейтрино, їх власний час життя складає у середньому приблизно 2 мкс. Тому мюони рухаючись зі швидкістю, яка мало відрізняється від c , можуть пройти лише шлях, рівний $3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600$ м. Однак мюони, які утворюються в космічних променях на висоті 20-30 км, досягають поверхні Землі. Це пояснюється тим, що їх час життя у системі експериментатора, який пов'язаний із Землею, значно більший і визначається формулою

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}}.$$

Сама теорія відносності відіграла важливу роль у розвитку теоретичної фізики. Слід зазначити, що наявність величезних запасів енергії в ядрі атома була доведена саме на основі відкритого А.Ейнштейном взаємозв'язку маси і енергії, що стимулювало експериментальні й теоретичні відкриття в галузі фізики атомного ядра. А послідовне застосування ідей теорії відносності в різних сферах фізики висунула низку нових важливих, ще нерозв'язаних проблем. Дослідження їх сприяє прогресу науки, поглиблює наші знання про властивості й закономірності реального світу. Пізнавальне значення теорії відносності безперечне, бо торкаючись найважливіших проблем простору, часу і руху, енергії й маси, теорія відносності відіграє значну роль у формуванні наукового матеріального світогляду, а також правильного наукового уявлення про властивості й закономірності навколишнього світу.

Список використаних джерел:

1. Бендес Ю.П. Використання інноваційних технологій навчання при формуванні уявлень про будову речовини // Фізика та астрономія в школі. – № 1 (50). – 2006. – С. 25-28.
2. Бендес Ю.П., Бендес Н.О. Використання контрприкладів при викладанні математики та фізики // Наукові записки Полтавського державного педагогічного університету ім. В.Г.Короленка. Серія фізики-математична. – 2002. – С. 144-149.
3. Бендес Ю.П. Лабораторний практикум з фізики з використанням персонального комп'ютера. – Полтава: Видавництво «Оріяна», 2007. – С. 162.
4. Льюїс М. История физики. – М.: Мир, 1970. – 258 с.

In the article, using of innovative technologies is examined for teaching of theory of relativity. The considered approach consists in the wide use of computer technologies and opposite examples, that allows deeper to expose theoretical irreproachability and applied character of theory of relativity.

Key words: theory of relativity, opposite example, computer technology.

Отримано: 18.04.2008