

ЕНЕРГІЯ РУХУ У МЕХАНІЦІ ТА ОПТИЦІ

З появою дослідної трактовки, що енергія $E=mc^2$ є енергією руху світла, постає запитання: чому вираз енергії руху в оптиці не такий, як у механіці? Та ще й при тому, що вирази кількості руху в обох випадках однакові. Саме на це запитання і зроблено спробу дати відповідь.

With appearance of empirical treatment that $E=mc^2$ energy is light motion energy a question arises: why energy motion expression in optics is not the same as in mechanics? And adding furthermore the fact that momentum expressions in both cases are the same. An attempt is made to answer this question.

Із досліду Лебедева довідуємося [1], що енергія за виразом

$$\text{"маса, помножена на квадрат швидкості світла"} \quad (1)$$

є енергією віддачі світла. Доказом цього може бути такий простий уявний приклад, ілюструючий ідею досліду Лебедева.

Нехай ідеальне дзеркало, яке має масу M , повністю відбиває світловий об'єкт маси m і при цьому отримує віддачу

$$p=E/c. \quad (2)$$

Зауважимо, що віддача світла за визначенням (2) теоретично передбачається рівняннями Максвелла і раніше за інших була розрахована самим Максвеллом. У результаті отриманої віддачі (2) наше дзеркало почне рухатись зі швидкістю

$$v=p/M=E/Mc, \quad (3)$$

яку вперше у такому вигляді і з подібного приводу записав Ейнштейн [2]. Замінюючи M на mc/v , одержане із рівності

$$Mv=mc, \quad (4)$$

і визначаючи E , маємо із (3):

$$E=mc^2. \quad (5)$$

Усі приклади такого роду покажуть нам одне: добуток (1), більш відомий як співвідношення (5) між масою і енергією, насправді є формулою для енергії світлової віддачі, а значить, – енергії руху світла. Виникає фундаментальне запитання: чому вираз енергії руху з оптики відрізняється від виразу енергії руху з механіки?

І справді. Ось перед нами два вирази енергії руху об'єкта:

$$E_{MS}=Mv^2/2 \quad (6)$$

– у механіці (v – швидкість механічного об'єкта, M – його інертна маса) і

$$E_{OS}=mc^2 \quad (7)$$

– в оптиці (c – швидкість світлового об'єкта (фотона), m – його інертна "маса"). Чому у формулі (7) нема звичного дільника "2"?

Більше того, нема однакових відповідностей між енергією руху та кількістю руху у механіці і оптиці.

Запишемо ті відповідності, які є насправді:

$$Mv^2/2 \quad \text{і} \quad Mv$$

– у механіці,

$$mc^2 \quad \text{і} \quad mc$$

– в оптиці. Як бачимо, на створення певної кількості руху з відповідною їй енергією руху у механіці затрачається у два рази менша відповідна робота, ніж в оптиці. Чому це так?

Відповідь на ці запитання будемо шукати в природі енергій руху, розглядаючи їх у порівнянні.

Зрозуміло, що розглядати енергію руху тіла у порівнянні з енергією руху фотона ліпше на прикладі руху у невагомості. Бо невагомість є тією фізичною ситуацією, у якій ці дві енергії зводяться до одного типу – до енергії протидії силам інерції і максимально спрощується задача.

З урахуванням такого спрощення, перше і, мабуть, єдине, що спадає на думку при обдумуванні відповіді на наші запитання, є таке.

У механіці інерція руху пов'язана з однією силою – гравітаційною, а в оптиці з двома – електричною і магнітною. Наявність двох сил в оптиці і є причиною того, що для створення (чи розсіяння) кількості руху mc в електромагнітному полі інерції потрібно виконати подвійну роботу у порівнянні з тим випадком, коли б діяла одна сила, як у гравітаційному полі інерції.

Ми покажемо, що ця думка заслуговує на увагу. Але спочатку зробимо два зауваження стосовно загальних вимог до того, що треба мати на увазі при знайомстві з ідеєю цієї роботи.

Зауваження перше. Як відомо, загальна теорія відносності (ЗТВ) стверджує, що сили інерції еквівалентні силам гравітації (див., наприклад, [3]). Повністю поділяючи її позицію, ми, однак, робимо таке уточнення: твердження ЗТВ про еквівалентність сил інерції й гравітації справедливе тоді, коли матеріальний об'єкт, інерція якого нас цікавить, характеризується лише однією масою і не несе електричного чи іншого заряду. При наявності інших зарядів (факторів) в додаток до маси інерційні властивості об'єкта залежатимуть від всіх факторів [4].

Уявімо собі два матеріальних об'єкта, один із яких є носієм тільки маси, а другий – маси й електричного заряду. Такі об'єкти матимуть різні інерційні властивості, бо прискоренню першого із них буде протидіяти тільки гравітаційне поле, а прискоренню другого – гравітаційне та електричне і магнітне (електромагнітне). Тобто поле інерції першого об'єкта буде односиловим, а поле інерції другого об'єкта – трисиловим. Однак у випадку електрично заряджених мікрооб'єктів воно практично є двосиловим.

Пояснимо це на прикладі електрона, у якого є і маса, і електричний заряд. Якщо стан руху електрона змінювати (прискорювати чи уповільнювати), то буде виникати протидія цій зміні за рахунок того, що він має масу, і окремо за рахунок того, що у нього є заряд. Але якщо порівняти силу, з якою два електрони притягуються один до одного, бо у кожного із них є маса, з силою, з якою вони відштовхуються один від одного, бо у них є однойменні заряди, то відношення електричного відштовхування до гравітаційного притягання дасть величину $1/4,17 \cdot 10^{42}$ [5]. Тобто у протидії цих сил гравітаційне притягання складає $1/4,17 \cdot 10^{42}$ від електричного відштовхування. (Для протонів ми мали б величину $1/2,27 \cdot 10^{39}$, що уточнює висновок у роботі [4] про можливість помітити різницю в залежності інертної "маси" від швидкості між електроном і протоном, якщо цю залежність визначати експериментально).

Отже, такий мізерний вклад гравітаційної сили в трисилове інерційне поле електронів (чи протонів) дозволяє розглядати його як двосилове поле інерції суто електромагнітної природи.

До речі, відчуття, що інертна "маса" електро-

на (протона) має виключно електромагнітне походження (у зв'язку з чим ми беремо її в лапки), неспроста виникало ще у класиків електродинаміки (Лоренц та інші [6, с.151-162]). Але невдовзі релятивістська ідея еквівалентності маси й енергії, яка є позадослідною трактовкою формули (5), розсіяла те відчуття і цим самим припинила розвиток електромагнітного підходу.

Наші міркування про інерційні властивості електрично заряджених мікрочастинок, особливо електрона, такі.

Виникнення електромагнітних хвиль тісно зв'язано зі станом руху електрона. Електромагнітні хвилі є проявом дії електромагнітного поля інерції, у якому рухається електрон. Інертна "маса" електрона, маючи електромагнітну природу, описується завдяки цьому такою формулою:

$$\mu_i = \mu_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (8)$$

де μ_0 – "маса" електрона у стані спокою по відношенню до носія електромагнітних хвиль, v – швидкість електрона відносно цього носія. Для інертної "маси" протона формула має практично такий же самий вигляд, як і для електрона, принаймі в межах тієї розрахункової точності, з якою можна вважати, що числа $1/4,17 \cdot 10^{42}$ і $1/2,27 \cdot 10^{39}$ практично однакові.

Зауваження друге. Воно стосується нашого визначення полів інерції – гравітаційного та електромагнітного, особливо аналогії між ними, на якій можливі порівняльні розрахунки.

Під гравітаційним полем інерції ми розуміємо таке згідно із дійсністю: у невагомості (вона спрощує виклад) кожна точка простору характеризується тим, що у ній виникає протидія зміні стану руху тіла, яке покоїться у точці чи потрапляє туди, не прискорено рухаючись. Припустимо, що пробне тіло перебуває у стані спокою. У цьому стані (як і у стані будь-якого неприскореного руху) тіло знаходиться у рівновазі з полем інерції. Такий стан системи "гравітаційне поле інерції – пробне тіло" буде зберігатись як завгодно довго (вічно). Щоб стан системи змінився, над системою потрібно виконати відмінну від нуля роботу, а саме: створити у системі додаткову кількість руху, що виражається формулою

$$P = Mv. \quad (9)$$

На це треба затратити відповідну енергію

$$E_{MS} = Mv^2/2, \quad (10)$$

яка залишиться у системі, як енергія руху тіла. Поява у системі завершеної (більше не міняється) кінетичної енергії $Mv^2/2$ і відповідно завершеної кількості руху Mv , як додатків до поперед-

нього стану рівноваги, створить у системі новий стан рівноваги, який знову буде самозберігатись.

Зрозуміло, що все сказане відноситься також і до системи "електромагнітне поле інерції – фотон". З тією лише відмінністю, що замість тіла треба уявляти собі фотон, виникнення якого уособлює зміну швидкості його руху від 0 до c .

Ні тіло, ні фотон самі по собі, якщо б можливою була їх повна ізоляція від решти фізичного світу, не мали б таких властивостей самозбереження стану руху, які вони проявляють у своїх системах. Ця думка, зрозуміло, ніколи не зможе бути перевіреною прямим експериментом, але у всьому нашому сукупному досвіді для неї є більше підстав, ніж у тому, якщо б ми вважали, що інерційні властивості об'єктів йдуть від їх внутрішньої природи. Тобто є більше підстав проголосити таке: нема у природі вільного руху у кінематичному розумінні (поза всякою взаємодією), є вільний рух у динамічному розумінні (в урівноваженій взаємодії), тому кінематику потрібно сприймати як безсилову (скомпенсовану) динаміку.

Тепер приступаємо до виведення виразів енергії руху у механіці та оптиці. Спочатку одержимо вираз енергії руху у механіці.

Нехай у даліні від вагомих мас, у космічному просторі, у точці $x_0=0$, покоїться пробне тіло, яке має масу M . У цій точці імпульс тіла, зрозуміло, дорівнює нулю ($P_0=0$), бо його початкова швидкість $v_0=0$ (зауважимо, що всі вектори, які й пізніше будуть вводиться, матимуть однакове направлення вздовж позитивного напрямку x , тому скрізь писатимемо тільки їх числові значення). Від прикладеної сили F тіло почне рухатись, а його імпульс зростати, і у точці $x=N$ (остання точка дії сили F), у якій швидкість тіла досягла величини v у момент часу t , кількість руху стане дорівнювати величині, представленій формулою (9). Робота, яка при цьому була виконана, є за визначенням [7]

$$A_{MS} = \int_0^N F dx \quad (11)$$

або, інакше,

$$A_{MS} = M \int_0^N \frac{dv}{dt} dx, \quad (12)$$

якщо її виразити через зміну імпульсу (кількості руху). Враховуючи, що

$$dx = \frac{dx}{dt} dt = v dt,$$

матимемо замість (12)

$$A_{MS} = M \int_0^N \left(\frac{dv}{dt} v \right) dt. \quad (13)$$

А прийнявши до уваги, що

$$\frac{d}{dt} v^2 = \frac{d}{dt} (v \cdot v) = 2 \frac{dv}{dt} v,$$

можемо написати таке:

$$2 \int_0^N \left(\frac{dv}{dt} v \right) dt = \int_0^N \frac{d}{dt} (v^2) dt = \int_0^N d(v^2) = v^2.$$

Підставляючи написане в (13) і порівнюючи результат з виразами (11) та (12), одержуємо дуже цікаве співвідношення:

$$A_{MS} = \int_0^N F dx = M \int_0^N \frac{dv}{dt} dx = M v^2 / 2. \quad (14)$$

Про що говорить це співвідношення? А ось про що.

У невагомості, у якій перебуває наше пробне тіло, виникає сила інерції, еквівалентна силі гравітації, як тільки спробувати змінити швидкість руху тіла дією прикладеної сили F . Значить, у даліні від вагомих мас існує гравітаційне поле інерції, з яким тіло перебуває у рівновазі, поки його не прискорювати. Створення прискоренням нової кількості руху Mv у системі "гравітаційне поле інерції – пробне тіло" потребує виконання над системою проти сили інерції роботи A_{MS} , наслідком якої є зміна у системі кінетичної енергії на величину, що має вигляд (10).

Підкреслюємо: такий вираз кінетичної енергії ми одержуємо у випадку, коли інерційне поле – односилове.

А як порівняно з (11) та (10) повинні бути виражені робота і відповідна кінетична енергія при створенні кількості руху mc у системі "електромагнітне поле інерції – фотон"?

Нехай у точці $r_0=0$ у момент часу $t_0=0$ починає народжуватись фотон під дією зовнішньої сили \vec{f} , яка діє протягом часу t , достатнього для створення фотона (кількості руху mc). Народження фотона – не миттєвий акт, а процес у просторі і часі. Його ми уявлятимемо собі таким: відбувається розповсюдження дії зовнішньої сили \vec{f} з точки $r_0=0$ поступово на всю область до точки $r=n$ включно за проміжок часу t ; за цей проміжок часу швидкість електромагнітної взаємодії, створюваної силою \vec{f} , зростає від 0 до c ; кінцевим результатом процесу народження

фотона є створення кількості руху (імпульсу)

$$\vec{G} = m\vec{c}, \quad (15)$$

де m – інерція ("маса") фотона. При цьому, дією сили \vec{f} , була виконана робота A_{OS} , яку можна представити так:

$$A_{OS} = \int_0^n \vec{f} d\vec{r}. \quad (16)$$

Сила \vec{f} , яка входить у рівняння (16), складається із двох сил – електричної і магнітної:

$$\vec{f} = \vec{f}_e + \vec{f}_m.$$

З урахуванням цього факту

$$A_{OS} = \int_0^n (\vec{f}_e + \vec{f}_m) d\vec{r},$$

або, за відомим правилом математики,

$$A_{OS} = \int_0^n \vec{f}_e d\vec{r} + \int_0^n \vec{f}_m d\vec{r} = A_e + A_m. \quad (17)$$

Займемося спочатку роботою A_e , яку в подібність до (12) запишемо так:

$$A_e = m \int_0^n \frac{d\vec{c}}{dt} d\vec{r}. \quad (18)$$

Взагалі кажучи, m є змінною величиною (зростає від 0 до m). Але оскільки йдеться про зміну не за формулою (8), а про ту, що є процесом виникнення інерції ("маси"), постійної для конкретного фотона, то без шкоди для визначення кількості роботи ми прийняли m за постійну величину.

Виконуючи всі процедури, з допомогою яких ми раніше переходили від формули (12) до формули (14), матимемо замість (18) такий вираз роботи:

$$A_e = mc^2/2. \quad (19)$$

Тепер ми зробимо одне припущення. Будемо вважати, що магнітна сила за величиною дії така ж, як і електрична. Підстава для цього та, що сили рівнозначні у спільній дії у просторі. Інакше, розповсюдження електромагнітних хвиль не було б прямолінійним, яким воно є насправді.

Отже, за аналогією до (19) маємо

$$A_m = mc^2/2. \quad (20)$$

Підставляючи (19) і (20) у (17), отримуємо вираз повної роботи A_{OS} :

$$A_{OS} = mc^2/2 + mc^2/2 = mc^2. \quad (21)$$

Отже, для створення кількості руху mc у системі "електромагнітне поле інерції – фотон" потрібно виконати над системою проти сили інерції роботу A_{OS} , наслідком якої є зміна у системі кінетичної енергії на величину

$$E_{OS} = mc^2.$$

Як бачимо, такий вираз для енергії руху в оптиці одержується внаслідок того, що поле інерції – двосилкове. Це і треба було показати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров Р.В. Два аргументи проти принципу відносності в електродинаміці // Науковий вісник ЧДУ. Вип. 40: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.73-78.
2. Эйнштейн А. Закон сохранения движения центра тяжести и инерция энергии // Собр. науч. трудов. - М.: Наука, 1965. Т.1.
3. Хайкин С.Э. Силы инерции. - М.: Наука, 1967.
4. Федоров Р.В. Чи відповідає реальності релятивістське визначення маси? // Науковий вісник ЧДУ. Вип. 32: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1998. - С.153-156.
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: В 2 т. - М.: Мир, 1976. - С.137-14. Т.1,2.
6. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. - М.: Наука, 1989. - С.151-152.
7. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Берклевский курс физики. Механика. - М.: Наука, 1971. Т.1