

НОВА МЕТРОЛОГІЧНА ПРОБЛЕМА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ СВІТЛА У ВАКУУМІ

Vasyl Chaban, Dr. Sc., Prof.
Lviv Polytechnic National University, Lviv
Ukraine, e-mail: v1z4d5@gmail.com

Анотація

На підставі запропонованих нових диференціальних рівнянь взаємодії електричного сигналу з гравітаційним полем досліджено спостережувані явища, відомі під назвою гравітаційної лінзи і ефекту Шапіто. Просимульовано відхилення світлового променя в полі Сонця. Показано, що рухомий фотон зазнає в гравітаційному полі не тільки поперечної дії, зумовленої викривлення траєкторії, але й поздовжньої, вступаючи в розгінно-гальмівні процеси. У результаті виявлено непостійність швидкості світла у вакуумі.

Ключові слова

Диференціальні рівняння, гравітаційна лінза, світловий сигнал у полі тяжіння, швидкість світла у вакуумі, квазіконстанта.

1. Вступ

З давніх часів люди переймаються методами вимірювання швидкості світла c . Передбачається, що гравітація та гравітаційні хвилі розповсюджуються теж зі швидкістю світла [1][2]. Досліди з визначення швидкості світла робив ще Г. Галілей. Але він дійшов висновку, що швидкість світла набагато більша за можливості тодішніх методів вимірювання. Традиційні методи, які застосовуються для визначення швидкості світла, ґрунтуються на вимірюванні часу, протягом якого світло долає певний шлях. Однак із більшою точністю можна визначити швидкість світла з інших вимірювань, наприклад з вимірювання співвідношення між величинами, зв'язок між якими визначається константою c . Прикладом таких вимірювань є незалежне визначення частоти та довжини хвилі певного випромінювання. Історично першу оцінку швидкості світла зробив О. Ремер 1675 р. за спостереженням затемнення супутників Юпітера. Затим досліди ставилися один за одним аж до ХХ ст. аж поки крапку не поставила 17-та конференція Головної комісії мір і ваг (ГКМВ) Результати досліджень зведено в таблицю, де швидкість світла подано в km/s:

1675	Ремер і Гюйгенс	220000
1729	Бредлі	301000
1849	Фізо	315000
1862	Фуко	298000±500
1907	Роза і Дорсі	299710±30
1926	Майкельсон	299726±4
1950	Ессен і Гордон-Сміт	299792±3
1958	Фроом	299792±0,1
1972	Евенсон та ін.	299792,4562±0,0011
1983	17-та ГКМВ	$c=299792,458$

Принциповим для подальшого розвитку фізики стало не чисельне значення швидкості, а експериментальне підтвердження того, що швидкість світла скінченна. А крім того, вона чітко обмежена зверху, як цього вимагає Лоренц-фактор зі спеціальної теорії відносності (СТВ)

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}, \quad (1)$$

де v – поточна швидкість руху.

У загальній теорії відносності (ЗТВ) у гравітаційно викривленому просторі або в системах відліку, що рухаються з прискоренням, локальна швидкість світла також є постійною та дорівнює c . Однак, деякі теорії припускають, що швидкість світла може змінюватись із часом [3][4]. А тим більше, що є переконливі спостережувані явища, що підтверджують сказане. Серед них явище гравітаційної лінзи і ефект Шапіро.

Гравітаційна лінза – це масивне тіло (зоря, планета), або система тіл (галактика, скупчення галактик), що викривлює своїм гравітаційним полем напрямок поширення електричного випромінювання, подібно до того, як викривлює світловий промінь, звичайна лінза. Серед спостережуваних космічних ефектів цього явища відомі такі як кільця і хрест Ейнштейна, названі його іменем за особистий вклад у ЗТВ. *Кільця Ейнштейна* – це тип гравітаційної лінзи, який має місце, коли спостерігач знаходиться на одній прямій з джерелом гравітаційного поля і джерелом світла за ним. *Хрест Ейнштейна* – це спотворене гравітаційною лінзою зображення квазара,

що розташований по осі зору за галактикою 2W2237+030. Це збільшене учетверо зображення утворює ідеальний хрест з галактикою-лінзою в центрі.

Ефект Шапіро [5] – це відомий ефект гравітаційної затримки сигналу, до якого належать і дані спостережень за надною SN1987A, яка вибухнула в 1987 р. за 50000 пс від Сонця. У результаті чого було зафіксовано потік фотонів і нейтрино, але фотони появилися на 4,7 год. пізніше, ніж очікувалися.

На підставі сказаного треба признати що рано ставити крапку над швидкістю c в приведній таблиці. Метрологічна проблема вимірювання швидкості поширення електричного і гравітаційного полів тільки вступає в новий виток досліджень, але вже не як константи, а що найменше як квазіконстанти. На підтвердження сказаного пригадаймо, що перший, хто поставив під сумнів сталість швидкості c був чи не основний творець нової фізики Г. Пуанкаре. А до слів великих треба ставитися належно!

2. Недоліки

У ЗТВ ефект взаємодії електричного сигналу з гравітаційним полем обчислюється, не виходячи з диференціальних рівнянь руху, а традиційно – пошуком зручного алгебраїчного виразу даних спостережень, як це має місце у випадку обчислення прецесії траєкторії Меркурія [6,7]. Так, Шапіро пропонує вираз гравітаційної затримки часу світлового сигналу Δt у вигляді:

$$\Delta t = -R_g \log(1 - \mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{x}_0), \quad (2)$$

де R_g – гравітаційний радіус гравітуючого тіла (2.9); $\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0$ – одиничні вектори, спрямовані від спостерігача до джерела і гравітуючої маси. Цій затримці часу відповідає деформація простору при $\Delta x = c\Delta t$, причому

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (3)$$

Питається, а хіба не природніше допустити, що $c = var$ і залишити в спокої багатостраждальні і час, і простір?

3. Мета роботи

Пояснити явище гравітаційної лінзи та ефекту Шапіро на підставі диференціальних рівнянь руху небесних тіл. Просимулювати згадані явища в динаміці.

4. Моделювання динаміки взаємодії світлового сигналу з гравітаційним полем у вакуумі

Якщо прискіпливо підійти до вивчення явища взаємодії гравітаційного й електричного полів теоретично, то на перешкоді постають деякі спірні питання. Найперше з них – це поняття маси електричного носія енергії. Вважатимемо її такою, що постає за формулою $m = E/c^2$. А раз вона наявна, то мусить вступати не тільки в гравітаційні процеси, але й – у інерційні. Чому в інерційні, адже швидкість світла $c = const$? Та ні, якщо ми визнали саму взаємодію, то вона не тільки викривлює траєкторію руху, але неминуче зумовлює і розгінно-гальмівну дію! Ось тут і постає карколомна проблема – принцип сталості швидкості світла у вакуумі.

Зрозуміло, що цієї проблеми не розв'язати за письмовим столом, тому дещо поступимося в мізерному околі світлової швидкості ($c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$), інакше факт існування гравітаційної лінзи й ефект гравітаційної затримки сигналу губить фізичний сенс, а це суперечить практиці спостережень.

За такої домовленості ми одержуємо змогу скористатися запропонованими нами новими диференціальними рівняннями руху небесних тіл у 3D просторі [8,9].

Щоб побудувати адекватні рівняння руху достатньо скористатися адаптованим законом Ньютона на випадок взаємно рухомих взаємодіючих мас [8]

$$\mathbf{F} = G \frac{mM}{r^2} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{v}{c} \mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{v}_0 \right) \mathbf{r}_0, \quad (4)$$

де \mathbf{F} – вектор сили тяжіння між масами m (гравітованою) і M (гравітуючою); r – відстань між центрами мас; G – гравітаційна стала; $\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0$ – одиничні вектори тректорії і взаємної миттєвої швидкості руху \mathbf{v} .

Рівняння рухомої маси очевидні

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}; \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (5)$$

де \mathbf{v}, \mathbf{r} – вектори швидкості і відстані, але вони потребують пояснення, оскільки йтиметься про світлові швидкості. Функціональна залежність $m = m(v)$ – це одне з прикрих непорозумінь у фізиці, далеко не математичне, а неправильного фізичного трактування. Насправді йдеться про залежність від швидкості взаємодії мас, а не самих мас! Це викристалізовується в процесі врахування скінченної швидкості поширення поля.

Баланс сил (4), (5) в декартових координатах буде [8,9]

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{GM r_x}{r^3} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{r_x v_x + r_y v_y + r_z v_z}{cr} \right); \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{GM r_y}{r^3} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{r_x v_x + r_y v_y + r_z v_z}{cr} \right); \\ \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{GM r_z}{r^3} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{r_x v_x + r_y v_y + r_z v_z}{cr} \right); \\ \frac{dr_x}{dt} &= v_x; \quad \frac{dr_y}{dt} = v_y; \quad \frac{dr_z}{dt} = v_z; \\ r &= \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

де \mathbf{v} , \mathbf{r} – вектори швидкості і відстані (у проєкціях); M – гравітуюча маса; G – гравітаційна стала.

Якщо здійснити в межах прийнятого компромісу адаптацію (6) до розв'язання поставленої задачі, то в 2D просторі одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -2 \frac{GM r_x}{r^3} \left(1 + \frac{r_x v_x + r_y v_y}{rv} \right); \quad \frac{dr_x}{dt} = v_x; \\ \frac{dv_y}{dt} &= -2 \frac{GM r_y}{r^3} \left(1 + \frac{r_x v_x + r_y v_y}{rv} \right); \quad \frac{dr_y}{dt} = v_y. \end{aligned} \quad (7)$$

На підставі (7) просимулюємо викривлення траєкторії електричного сигналу під дією гравітаційного поля зорі. Заодно обмовимо суперечливість одержаних результатів з погляду спостережень.

Приклад 1. Просимулюємо корекцію траєкторії руху світлового променя в гравітаційному полі Сонця при максимальному зближенні до $0.5 \cdot 10^8$ m з його розрахунковою поверхнею.

Результати числового інтегрування рівнянь (7) показані на рис.1 і рис.2 при сталих параметрах $GM = 13,27128 \cdot 10^{19} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$, що відповідають Сонцю, і початкових умовах:

$$r_x(0) = -12.0 \cdot 10^8; \quad r_y(0) = 7.5 \cdot 10^8; \quad v_x(0) = c; \quad v_y(0) = 0.$$

На рис. 1 показано викривлення траєкторії руху світлового променя в гравітаційному полі Сонця. Аналіз числових даних комп'ютерної симуляції показав, що промінь у часовому полі захвату 12 с відхилився на дуже мізерний кут – $0.857503''$ кутової дуги.

У розрахунках за класичними рівняннями (за дії лише сили Ньютона) цей кут виявився значно меншим $0.468197''$ кутової дуги, а при залученні на додачу до сили Ньютона гравітомагнетної сили (аналога сили Лоренца в магнетному полі) [10–14] він навіть дещо побільшав $0.936394''$ кутової дуги. Розрахунки, Виконані різними методами, тільки посилюють реальну наявність фізичного ефекта, підтвердженого натурними спостереженнями.

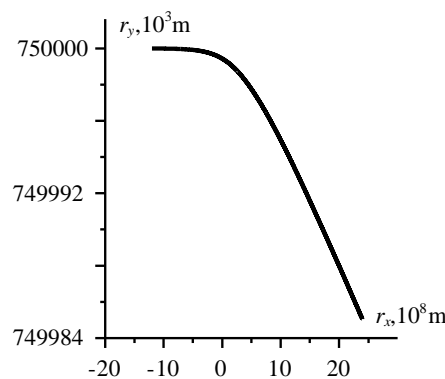


Рис. 1. Викривлення траєкторії світлового сигналу $c(t)$, що пролітає коло Сонця на відстані 750 000 км від його центра

Дальший хід думок буде прикований до часової залежності швидкості поширення сигналу (рис. 2). Саме її перебіг і становить принципову проблему теоретичної фізики – is the speed of light constant [13]?

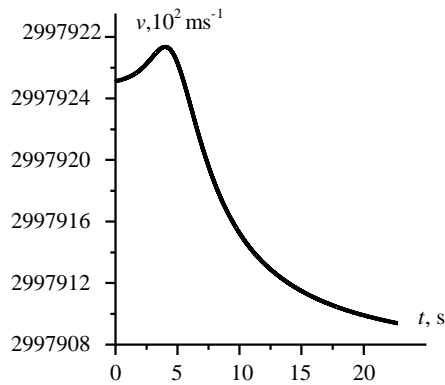


Рис. 2. Часова залежність швидкості гравітованого сигналу $c = c(t)$, у перехідному процесі, що відповідає рис. 1

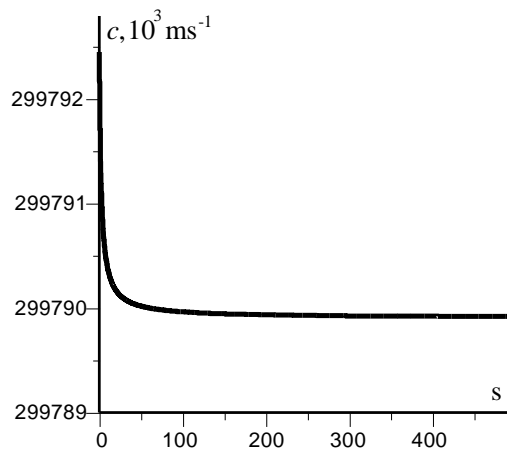


Рис. 3. Швидкість світлового сонячного променя $c = c(t)$ на прямій траєкторії від Сонця до Землі

Позитивна відповідь на це питання не тільки відома, але й наділена ликом святости. У той час, як у нашому числовому експерименті вона під дією гравітації Сонця на етапі зближення зі світилом перевершила c на 213 ms^{-1} (299792671), а на етапі віддалення понизилася від c на 1616 ms^{-1} (299790842). Саме заради цієї важливої інформації час тривалості перехідного процесу було збільшено від 12 s до 25 s.

На підставі залежності $c = c(t)$, отриманої за фундаментальними законами фізики, можна сміло швидкість світла у вакуумі c , як фізичну константу, перевести в лик квазіконстанти, тим більше, що цей феномен підтверджений спостереженнями.

Результати симуляції чистого ефекту Шапіро показані на рис. 3. Тут бачимо часову залежність швидкості світла вздовж прямолінійної траєкторії руху від Сонця до Землі. Така задача порівняно з попередньою є значно простіша, бо може бути розв'язана в 1D просторі. У результаті чого диференціальні рівняння руху (5) набувають найпростішого вигляду [8]

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{GM}{(R_g + h)^2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)^2; \quad \frac{dh}{dt} = -v; \quad \frac{v_0 \leq v \leq c;}{h_0 \geq h \geq 0}, \quad (6)$$

де v_0, h_0 – початкові умови.

Приклад 2. Просимулюємо траєкторію руху фотона від Сонця до Землі.

Швидкісна характеристика сонячного променя (рис. 3), отримана в результаті інтегрування рівнянь (6) за значення $GM = 13,27128 \cdot 10^{19}$ і початкових умовах: $v_0 = c; h_0 = 6,934 \cdot 10^8$. Сигнал за час польоту втратив 2542 ms^{-1} швидкості, причому третина цієї втрати припадає на першу секунду. Затримка часу на мові (2) – $0,004 \text{ s}$. Якщо задіяти в розрахунках лише силу Ньютона, то ця затримка зменшиться вчетверо $0,001 \text{ s}$. До речі, формула (7) тут не застосовна.

Дж. Френсон з університету Маріленда (США), прихильник змінної швидкості світла у вакуумі в сторону її пониження, явище обґрунтовує з квантової позиції [3]. Аргументація Френсона будується на даних спостережень саме за надновою SN 1987A, про що йшлося вище. Він вважає, що фотони можуть сповільнюватися з причини поляризації вакууму: фотон спонтанно розділяється на позитрон і електрон, а затим знову рекомбінує

у фотон. У цю мить між частинками може виникнути гравітаційний диференціал, здатний вказати на них незначний енергетичний вплив і дещо затримати рух фотона. На довгому шляху довжиною в 168 тис. св. р. такі незначні затримки цілком можуть скласти запізнення на 4,7 години.

Як би там не було, але ми не одинокі на шляху до істини, а це найважливіше. Головне, що результати спостережень фіксують реальність існування проблеми.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що над працею не існує можливих фінансових чи інших конфліктів.

4. Подяка

Автор складає подяку проф. Святославу Яцишину за поради в презентації матеріалу до друку.

5. Висновок

Результати симуляції показали, що рухомий фотон у полі тяжіння вступає не тільки в поперечну взаємодію, яка зумовлює викривлення траєкторії, але й у поздовжню, яка зумовлює розгінно-гальмівні процеси. Це приводить до коливання швидкості світла у вакуумі в мізерному околі значення c . У такому разі постає нова метрологічна проблема вимірювання швидкості світла у вакуумі вже не як константи, а як функції часу. Найближчим часом тут аж ніяк не обійтися без тісного поєднання експериментальних, теоретичних та симуляційних зусиль.

6. Література

1. An overview лясан be found in the dissertation of Mota, DF (2006). «Variations of the fine structure constant in space and time». [arXiv:astro-ph/0401631](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401631) [astro-ph].
2. Uzan, J-P (2003). The fundamental constants and their variation: observational status and theoretical motivations. *Reviews of Modern Physics* **75** (2): 403. [Bibcode:2003RvMP...75..403U](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0205340). [arXiv:hep-ph/0205340](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0205340). doi:10.1103/RevModPhys.75.403.
3. Herrmann, S та ін. (2009). Rotating optical cavity experiment testing Lorentz invariance at the 10^{-17} level. *Physical Review D* **80** (100): 105011. [Bibcode:2009PhRvD..80j5011H](https://arxiv.org/abs/1002.1284). [arXiv:1002.1284](https://arxiv.org/abs/1002.1284). doi:10.1103/PhysRevD.80.105011.
4. Lang, KR (1999). *Astrophysical formulae* (вид. 3rd). Birkh?user. с. 152. ISBN 3-540-29692-1
5. Irwin I. Shapiro. «Fourth Test of General Relativity». *Physical Review*, 1964, Letters 13: 789–791. doi: 10.1103/PhysRevLett.13.789.
6. Earman J., Janssen M. “Einstein’s Explanation of the Motion of Mercury’s Perihelion” // *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity: Einstein Studies*, Vol. 5. – Boston : Birkhuser, 1993. – С. 129–149.
7. Ruswer N. T. *Mercury's perihelion. From Le Verrier to Einstein*, М. : “Мир”, 1985, 244 p↑
8. V. Tchaban. *Panta Rhei*, Lviv: "Space M", 2020, 118 p.
9. V. Tchaban. “On some Joint Lavs of the Field of Gravity- and Electrometry”. *Measuring, Equipment and Metrology*. Vol 81, No 3, 2020, pp. 37–40 (DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.03.037>)
10. B. Mashhoon, F. Gronwald, H.I.M. Lichtenegger (1999). «Gravitomagnetism and the Clock Effect». [arXiv:gr-qc/9912027](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9912027) [gr-qc].
11. M. L. Ruggiero, A. Tartaglia. Gravitomagnetic effects. *Nuovo Cim.* 117B (2002) 743—768 ([gr-qc/0207065](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0207065)), формулы (24) и (26). M. L. Ruggiero, A. Tartaglia. Gravitomagnetic effects. *Nuovo Cim.* 117B (2002) 743—768 ([gr-qc/0207065](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0207065)), формулы (24) и (26).
12. M. L. Ruggiero, A. Tartaglia. Gravitomagnetic effects. *Nuovo Cim.* 117B (2002) 743—768 ([gr-qc/0207065](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0207065)), формулы (24) и (26).
13. Amelino-Camelia, G (2008). «Quantum Gravity Phenomenology». [arXiv:0806.0339](https://arxiv.org/abs/0806.0339) [gr-qc].
14. S.J. Clark, R.W. Tucker. Gauge symmetry and gravito-electromagnetism // *Classical and Quantum Gravity* : journal. — 2000. — Vol. 17 (25 February). — P. 4125—4157. — DOI: