



ПАРНОВСЬКИЙ

Сергій Людомирович — доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ МАЙЖЕ БЕЗ ФОРМУЛ

У статті автор коротко і доступно пояснює складні особливості загальної теорії відносності, яку Альберт Ейнштейн сформулював у 1916 р. і яка описує гравітацію не як силу, а як спричинене масивними об'єктами викривлення тканини простору-часу, що впливає на рух тіл і світла. На сьогодні загальна теорія відносності є найуспішнішою теорією гравітації, неодноразово підтвердженою численними спостереженнями та результатами експериментів.

Загальна теорія відносності (ЗТВ) — загальноприйнята нині теорія тяжіння, яка описує тяжіння як прояв геометрії простору-часу і вважається однією з вершин сучасної фізики. За відсутності гравітаційного поля ЗТВ переходить у спеціальну теорію відносності (СТВ), а в разі слабкого поля і рухів зі швидкостями, значно меншими за швидкість світла, — в класичну механіку, засновану на законі всесвітнього тяжіння Ньютона. ЗТВ успішно пройшла всі перевірки та передбачила низку ефектів, виявлених в експериментах.

Історія питання. Загальну теорію відносності розробив Альберт Ейнштейн за участі математика Марселя Гроссмана. Це рідкісний у сучасній фізиці випадок, коли одна людина запропонувала теорію, що вже понад століття існує у незмінному вигляді. За цей час багато вчених доповнили ЗТВ і здобули чимало нових результатів.

В основі ЗТВ лежать рівняння Ейнштейна, які він уперше представив 25 листопада 1915 р. на засіданні Пруської академії наук [1, 2]. Перший варіант рівнянь було запропоновано в 1913 р. у статті [3], в якій А. Ейнштейна вказано як автора фізичної частини, а М. Гроссмана — як автора математичної частини. Після доопрацювання, внесення уточнень, а також доказів виконання умов, необхідних для коректного математичного опису простору-часу, систему рівнянь було опубліковано в [2]. Переклад цієї та інших статей Ейнштейна, що стосуються ЗТВ, можна знайти в книзі [4].

Особливістю появи ЗТВ є те, що для цього не було передумов, пов'язаних із явищами чи експериментами, які б суперечи-

ли попереднім теоріям. Єдиним відомим ефектом, пов'язаним із ЗТВ на момент її створення, була прецесія перигелію орбіти Меркурія, але її можна було пояснити різними причинами, наприклад впливом гіпотетичної планети Вулкан, що нібито обертається навколо Сонця всередині орбіти Меркурія.

Однак для розроблення нової теорії тяжіння були вагомі причини, пов'язані зі спеціальною теорією відносності, запропонованою в 1905 р. А. Ейнштейном і незалежно від нього іншими науковцями. СТВ забороняє рух та поширення будь-яких сигналів і взаємодій зі швидкістю, більшою за швидкість світла у вакуумі. Втім, закон всесвітнього тяжіння передбачає миттєву дію гравітації.

Фізичні засади підходу ЗТВ до опису гравітації. Створенню ЗТВ значною мірою сприяв факт пропорційності мас тіл, визначених двома різними способами. Експерименти підтвердили, що інертна маса тіла, яка визначається як відношення сили до спричиненого нею прискорення, дорівнює (строго кажучи, є пропорційною) його гравітаційній масі, визначеній за допомогою закону всесвітнього тяжіння. У фізиці ця обставина здобула назву *принцип еквівалентності*. З нього випливає, що за відсутності сторонніх сил тіла падають у гравітаційному полі з однаковим прискоренням, яке називається прискоренням вільного падіння. Більше того, два точкових тіла, що проходять через якусь точку простору в один і той самий час і з тією самою швидкістю, рухатимуться по одній і тій самій траєкторії незалежно від їхньої маси, якщо на них не діють негравітаційні сили. Ця обставина принципово відрізняє гравітаційне поле від інших фізичних полів.

Закон всесвітнього тяжіння, запропонований Ньютоном, припускав миттєву дію гравітації на будь-якій відстані, що було несумісним із СТВ. Необхідно було запропонувати нову релятивістсько-інваріантну (тобто сумісну з СТВ) теорію тяжіння, над якою Альберт Ейнштейн почав працювати в 1907 р.

За відсутності гравітаційного поля всі фізичні процеси підпорядковуються законам СТВ. Для розуміння цієї теорії вводять поняття чо-

тиривимірного простору-часу, який описується трьома просторовими та однією часовою координатами. Без гравітації — це так званий *простір-час Мінковського*.

У ньютонівській фізиці існують виділені системи відліку, які називають інерційними. Тіло, на яке не діє жодна сила, в такій системі має бути нерухомим або рухатися з постійною швидкістю. У просторі-часі Мінковського його траєкторія описується прямою лінією.

У ЗТВ також існують виділені системи відліку. В них на тіло не діє жодна негравітаційна сила. Це системи відліку спостерігача, який вільно падає. Траєкторію руху такого спостерігача називають *геодезичною лінією простору-часу*. Такі лінії можуть бути викривленими, наприклад траєкторія кинутого каменю. В системах спостерігача, який вільно падає, виконуються всі фізичні закони, які в класичній фізиці діють в інерційних системах, зокрема закони електродинаміки. Приклади зв'язку таких систем відліку з інерційними системами проаналізовано у книзі [5].

Основна ідея ЗТВ полягає в тому, що гравітаційне поле змінює простір-час, викривляючи його. Це проявляється у викривленні геодезичних ліній і дозволяє описати тяжіння як прояв геометрії простору-часу. Отже, гравітаційні ефекти зумовлені деформацією простору-часу, яка пов'язана, зокрема, з присутністю масивних тіл та негравітаційних полів.

Це дозволило використати розроблені в XIX ст. методи диференціальної геометрії для математичного опису гравітації в ЗТВ. Їх застосовують до ріманових просторів, які часто називають неевклідовими. Властивості простору-часу в ЗТВ описують за допомогою так званого *метричного тензора*, за яким можна визначити всі геодезичні лінії простору-часу та пов'язані з ними системи відліку спостерігача, що вільно падає. Для того щоб тіло рухалося інакше, необхідно докласти зовнішні сили, подібно до того, як у класичній механіці необхідно докласти силу для неінерційного руху в інерційних системах відліку. При використанні неінерційних систем відліку на тіло діють сили інерції.

Якщо невеликий супутник обертається навколо Землі за круговою орбітою, то в класичній механіці в разі використання інерційної системи відліку, пов'язаної із Землею, ми кажемо, що сила тяжіння Землі є доцентровою силою, яка викривляє орбіту, а в разі використання неінерційної системи відліку, пов'язаної з супутником, вона компенсується відцентровою силою. У ЗТВ ми кажемо, що супутник перебуває в стані вільного падіння, тому пов'язана з ним система відліку є виділеною системою, тобто на нього не діє жодна зовнішня негравітаційна сила.

Якщо людина стоїть на поверхні Землі, то в класичній механіці сила її тяжіння до планети врівноважується реакцією опори, тобто силою, що діє вертикально на підшви її взуття. У ЗТВ на людину діє тільки сила реакції опори, яка змушує її рухатися прискорено відносно системи, що вільно падає вниз у цій точці.

У ЗТВ немає специфічної сили тяжіння, є тільки зовнішні сили, які зумовлюють відхилення від вільного падіння. Отже, гравітація в ній дуже схожа на сили інерції в класичній механіці, які виникають у разі використання неінерційних систем відліку. Скажімо, пасажери відчувають перевантаження в ліфті, що рухається вгору з прискоренням (приклад, використаний Ейнштейном у 1907 р.).

Чи означає це, що у ЗТВ немає гравітації як окремої сили? Ні, це не так. Гравітація не зводиться лише до інерції. Але для цього потрібно розглянути рух не однієї матеріальної точкової частинки, а безлічі близьких частинок.

Нехай хмара дрібних частинок одночасно починає падати з нерухомого стану в гравітаційному полі планети без атмосфери. Їхнім взаємним тяжінням можна знехтувати, ніякі негравітаційні сили на них не діють, і кожна з частинок вільно падає. З часом форма хмари спотворюється. Прискорення вільного падіння частинок, віддалених від планети, є меншим, ніж у ближчих, і відстань між верхніми та нижніми по вертикалі частинками з часом зростатиме. Окремі частинки падають у напрямку до центру сферично-симетричної планети, і напрямки їх падіння дещо різняться, тому з

часом відстані між ними по горизонталі зменшуються. У ЗТВ це називають *девіацією* (відхиленням) *геодезичних*.

Сили, що викликають спотворення форми хмари, в класичній механіці називають припливними силами. Назва пов'язана з морськими припливами, які на Землі спричинені дією припливних сил від Сонця і Місяця. У ЗТВ гравітація проявляється не як взаємне тяжіння, а як дія припливних сил і як девіація геодезичних, зумовлена кривизною простору-часу. Девіація описується рівнянням, до якого входять початкові відхилення в положеннях частинок, їхні швидкості і тензор кривизни, що характеризує кривизну простору-часу [6—8].

У випадку, коли компоненти тензора кривизни дорівнюють нулю, гравітація відсутня, а простір-час є плоским, не викривленим. Цей випадок називають *простором-часом* Мінковського.

Математичний апарат ЗТВ. Чотиривимірний простір-час описується в системі координат $x^i = (x^0, x^1, x^2, x^3)$ (тут і далі індекси, позначені латинськими літерами, пробігають значення від 0 до 3). Координата $x^0 = ct$ описує час, помножений на одну з найважливіших фізичних констант — швидкість світла у вакуумі ($c = 299792458$ м/с); координати x^1, x^2, x^3 — це три просторові координати.

Нехай спостерігач під час руху змістився так, що значення цих координат змінилися на dx^i і за його годинником це переміщення відбулося за час dt . Введемо так званий інтервал між зміщенням і початковим положенням у просторі-часі, який дорівнює $ds = cdt$.

У СТВ використовують простір-час Мінковського, в якому інтервал виражається формулою:

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2, \quad (1)$$

де (x^1, x^2, x^3) — звичайні декартові просторові координати.

У викривленому просторі-часі інтервал описується більш загальною формулою:

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k. \quad (2)$$

У цій формулі і далі в тексті використовується правило Ейнштейна: за індексами, що

повторюються (тут це i та k), передбачається підсумовування за всіма їхніми значеннями. Тензор g_{ik} називають метричним тензором, або скорочено *метрикою*. Він є симетричною матрицею 4×4 , компоненти якої залежать від координат x^i і змінюються за певними законами при перетворенні системи координат. Метрика в кожній точці простору-часу визначає всі його властивості. У кожній точці можна вибрати таку систему координат (лоренцову або галілеєву), при переході в яку метричний тензор перетворюється на метрику (1), але тільки локально, в цій точці. Це відповідає переходу в одну з систем відліку спостерігача, який знаходиться в заданій точці з координатами (x^1, x^2, x^3) в заданий момент часу x^0 та вільно падає. В інших точках метрика простору-часу після переходу в лоренцову систему відрізняється від метрики Мінковського (1). Це пов'язано з існуванням припливних сил.

Знаючи залежність $g_{ik}(x^i)$, можна визначити всі геометричні властивості викривленого простору-часу. ЗТВ використовує математичний апарат диференціальної геометрії і тензорного аналізу. Його неможливо стисло викласти, але з ним можна детально ознайомитися в книгах [6–8].

Формула для тензора кривизни R_{iklm} має вигляд

$$R_{iklm} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g_{im}}{\partial x^k \partial x^l} + \frac{\partial^2 g_{kl}}{\partial x^i \partial x^m} - \frac{\partial^2 g_{il}}{\partial x^k \partial x^m} - \frac{\partial^2 g_{km}}{\partial x^i \partial x^l} \right) + g_{np} (\Gamma_{kl}^n \Gamma_{im}^p - \Gamma_{km}^n \Gamma_{il}^p), \quad (3)$$

де використовуються так звані символи Крістоффеля

$$\Gamma_{kl}^i = \frac{1}{2} g^{im} \left(\frac{\partial g_{mk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{ml}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m} \right), \quad (4)$$

а g^{ik} — тензор, обернений до метричного. За тензором кривизни та метрикою можна обчислити так званий тензор Річчі $R_{ik} = g^{lm} R_{limk}$ та скалярну кривизну простору-часу $R = g^{ik} R_{ik}$.

У різних підручниках із ЗТВ застосовують різні знаки у формулах (2) і (3). У книзі [8] наведено таблицю знаків у формулах, використаних у десятках найбільш відомих книг. У цій статті використано такі позначення і знаки, як у книзі [6].

Рівняння Ейнштейна. Система рівнянь ЗТВ пов'язує геометричні властивості простору-часу з тензором енергії-імпульсу T_{ik} матерії (включно з негравітаційними полями та випромінюванням), яка викривляє простір-час і є джерелом гравітаційного поля. У тензорному вигляді вона записується як система нелінійних щодо компонентів метричного тензора диференціальних рівнянь у часткових похідних другого порядку

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} - \Lambda g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (5)$$

Літерою G позначено гравітаційну сталу, а літерою Λ космологічну сталу, яку ми обговоримо нижче. Ейнштейн увів її для вирішення космологічних проблем, потім від неї відмовилися, але астрономічні дані довели наявність цього доданка, що забезпечує прискорене розширення Всесвіту. Однак його впливом на процеси з масштабом, меншим за розміри галактик, можна знехтувати. Знак перед доданком, що містить Λ , залежить від сигнатури метрики, тобто від вибору знаків у формулі (2), і тому можна зустріти рівняння (5) зі знаком плюс перед Λ .

Рівняння (5) при $\Lambda = 0$ мають дві важливі межі. За відсутності в усьому просторі-часі матерії та спричинених нею гравітаційних полів ($T_{ik} = 0$), а також гравітаційних хвиль, метрика переходить у метрику Мінковського (1), і рух пробних тіл підпорядковується законам релятивістської механіки та електродинаміки в рамках СТВ скрізь і будь-якої миті часу в єдиній системі. Нагадаю, що у ЗТВ вони виконуються локально, в системах спостерігача, що вільно падає, в конкретному місці й часі для різних систем. Відхилення у просторі або часі приводять до виникнення припливних сил, відсутніх у плоскому просторі-часі (1).

У граничному випадку слабких гравітаційних полів і руху зі швидкостями, істотно меншими за світлові, система (5) переходить у рівняння руху в гравітаційному полі в рамках ньютонівської механіки.

Перевірка ЗТВ. За сторіччя свого існування ЗТВ успішно пройшла всі перевірки в численних експериментах [5, 9, 10]. Крім того, відхи-

лення від ЗТВ було б виявлено під час роботи систем глобального позиціонування, наприклад GPS, а також в астрономічних спостереженнях.

Перевіряли й основи ЗТВ, наприклад принцип еквівалентності, причому в різних експериментах. Так, у 2017 р. на французькому супутнику MICROSCOPE принцип еквівалентності експериментально було протестовано з відносною похибкою близько 10^{-15} . NASA запустило дві космічні місії — Gravity Probe A у 1976 р. та Gravity Probe B у 2004 р. — спеціально для перевірки ЗТВ.

Було виявлено всі ефекти, теоретично передбачені в рамках ЗТВ, причому їхня величина відповідала розрахункам. Те саме стосується і нових об'єктів, на зразок гравітаційних хвиль і, швидше за все, чорних дір [11].

Ефекти ЗТВ. Під час створення ЗТВ було передбачено три нові ефекти [5]. Перший — прецесія перицентра орбіти легкого тіла, що обертається навколо масивного. Вона пояснила додаткову до ефекту, спричиненого іншими чинниками, прецесію перигелію орбіти Меркурія. Потім було виявлено та виміряно прецесію перигелію Венери. Міжнародний астрономічний союз (IAU) ухвалив рішення про те, що в разі особливо точних розрахунків руху тіл у Сонячній системі необхідно враховувати ефекти ЗТВ.

Другий передбачений ефект — це відхилення світла в гравітаційному полі. Цей ефект існує і в класичній фізиці, але в ЗТВ кут відхилення світла в полі зорі вдвічі більший. У 1919 р. експедиції під керівництвом Артура Еддінгтона вдалося під час повного сонячного затемнення виміряти кут відхилення світла від зір, повз які проходило Сонце, і результати збіглися з прогнозом ЗТВ.

Третій ефект — це гравітаційне червоне зміщення, пов'язане з різницею швидкості часу в місцях з різним гравітаційним потенціалом. Час тече швидше у місцях з вищим гравітаційним потенціалом, хоча ця відмінність дуже мала. Сьогодні це засвідчують прямі спостереження, проведені за допомогою надточних стандартів часу. Наприклад, на оглядовому майданчику поблизу вершини телевізійної вежі в Токіо годинник ішов приблизно на п'ять

стотрильйонних швидше, ніж біля землі. Це підтвердило ЗТВ з точністю 99,9986 %. Тому частота випромінюваного світла спадає, коли воно потрапляє в місця з меншим гравітаційним потенціалом та прискореним плином часу. Цей ефект спостерігають астрономи у випромінюванні Сонця та білих карликів. На Землі його було багаторазово підтверджено і виміряно, починаючи з експерименту Роберта Паунда та Глена Ребки у 1959 р. Гравітаційне червоне зміщення підтверджено і під час космічної місії Gravity Probe A.

Є й менш відомі ефекти, передбачені ЗТВ і підтверджені експериментально. Можна відзначити експеримент з вивчення зсуву перицентра зорі, що обертається навколо надмасивної чорної діри Sagittarius A* в центрі Галактики, оскільки в ньому вимірювали ефект впливу гравітаційного поля, яке є значно сильнішим, ніж слабке за мірками ЗТВ гравітаційне поле в Сонячній системі.

Передбачені ЗТВ об'єкти та явища. ЗТВ передбачила деякі феномени, які не мають аналогів у класичній фізиці. Насамперед це гравітаційні хвилі — збурення простору-часу, які здатні поширюватися у вакуумі чи середовищах, подібно до електромагнітних хвиль. У слабких полях швидкість поширення гравітаційних хвиль дорівнює швидкості світла у вакуумі c . Квант гравітаційного випромінювання, який називають гравітоном, не має маси спокою, його момент імпульсу пропорційний $2\hbar$. Гравітаційні хвилі випромінюються у змінному гравітаційному полі і змінюють властивості простору-часу, наприклад відстань між двома початково нерухомими відносно один одного точковими тілами за відсутності геодезичних девіацій, спричинених гравітацією близьких тіл.

Експериментально гравітаційні хвилі було зафіксовано у 2016 р. в обсерваторії LIGO, за що й присуджено Нобелівську премію з фізики 2017 р. Зараз активно розвивається нова наука — гравітаційно-хвильова астрономія, проводяться спостереження хвиль, випромінюваних у космічних катаклізмах, на кшталт злиття чорних дір чи нейтронних зір.

Відкриття гравітаційних хвиль було очікуваною подією не лише тому, що ЗТВ теоретично передбачила їх існування. Непрямі свідчення існування гравітаційних хвиль мали й астрономи, які спостерігають за зміною в часі елементів орбіт подвійних пульсарів. Обертаючись навколо спільного центра мас, пульсари втрачали енергію через гравітаційне випромінювання, що прискорювало їхнє обертання та зменшувало орбітальний період. Ефект повністю збігся з прогнозами ЗТВ щодо випромінювання гравітаційних хвиль. У 1993 р. відкривачів першого подвійного пульсара PSR B1913+16 Рассела Галса і Джозефа Тейлора-молодшого було удостоєно Нобелівської премії з фізики.

Передбаченим ЗТВ компактним об'єктам — чорним дірам та гіпотетичним голим сингулярностям — присвячено окрему статтю [11].

Релятивістська космологія. Наука космологія в сучасному вигляді з'явилася, коли Ейнштейн у роботі [12] застосував рівняння ЗТВ до опису еволюції Всесвіту як цілого. Тому вона є релятивістською, тобто задовольняє законам ЗТВ. Через деякий час з'ясувалося, що багато її важливих результатів можна отримати й без знання цих законів, у рамках нерелятивістської космології, заснованої на застосуванні закону всесвітнього тяжіння Ньютона [5].

Стисло згадаємо основні висновки. Всесвіт з'явився внаслідок того, що прийнято називати Великим вибухом. З того моменту він безперервно розширюється, що проявляється в космологічному червоному зміщенні, яке спостерігають астрономи. Червоне зміщення — це зсув спектрів випромінювання позагалактичних об'єктів у бік зменшення частоти. Вперше його виявив Едвін Хаббл. Докладніше про космологію можна прочитати у книзі [5].

Космологічний член, антигравітація, темна енергія. Закон всесвітнього тяжіння Ньютона стверджує, що тіла завжди притягуються одне до одного. Тому речовина, що рівномірно заповнює весь Всесвіт, повинна безупинно стискатися. Цей висновок не сподобався фізикам. З'явилися ідеї про існування якоїсь антигравітації, тобто сили відштовхування, що

компенсує силу притягання і дозволяє Всесвіту існувати вічно з постійною густиною.

У статті [12] Ейнштейн спробував описати саме такий статичний Всесвіт, для чого додав у рівняння ЗТВ (5) космологічний член, тобто доданок, що містить космологічну сталу Λ і описує уможливно введену антигравітацію. Невдовзі було доведено, що статичний Всесвіт нестійкий, і Ейнштейн відмовився від космологічної сталої. Тим більше, що тоді вже було отримано розв'язок Фрідманна—Леметра—Робертсона—Вокера рівнянь ЗТВ, що описує Всесвіт, який розширюється, і відкрито червоне зміщення в спектрі випромінювання далеких галактик.

Упродовж близько пів століття вважали, що немає підстав для введення космологічного члена в систему рівнянь (5). За цей час значно поліпшилися інструменти та методи позагалактичної астрономії. За спостереженнями спалахів наднових типу Ia було виявлено, що в нинішній час Всесвіт розширюється з прискоренням, що можна пояснити дією космологічного члена, який описує антигравітацію. За астрономічними даними, зокрема спостереженнями космічних місій WMAP і Planck, $\Lambda \approx 1,1 \times 10^{-52} \text{ м}^{-2}$ і розширення Всесвіту буде вічним [13].

У рівнянні (5) можна перенести космологічний член у праву частину й інтерпретувати його як внесок певної субстанції (її іноді називають фізичним вакуумом) з постійною густиною енергії

$$\varepsilon_{\Lambda} = \frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} \quad (6)$$

та постійним від'ємним тиском $P_{\Lambda} = -\varepsilon_{\Lambda}$ у тензорі енергії-імпульсу. Оцінка дає величину $\varepsilon_{\Lambda} \approx 5 \times 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$, що відповідає густині маси близько $5,5 \times 10^{-27} \text{ кг/м}^3$.

Розширюючись, Всесвіт здійснює негативну роботу проти від'ємного тиску, яка йде на продукування енергії, необхідної для підтримання постійної густини ε_{Λ} при збільшенні об'єму будь-якої виділеної частини Всесвіту.

Найбільш загальним є поняття *темної енергії*, в якій густина енергії і тиск можуть змінюватися з часом. Її тиск є від'ємним, причому

від'ємною є також комбінація $\epsilon + 3P$, і це забезпечує антигравітацію. Темну енергію у вигляді космологічної сталої розглядають як частковий випадок більш загальної концепції, в якій замість космологічного члена в рівняннях (5), походження якого невідоме, ми маємо справу із загадковим феноменом, що пов'язаний із ЗТВ, але не описується цією теорією. Невідомо навіть, наскільки рівномірно темна енергія розподілена в просторі-часі.

Невирішені проблеми ЗТВ. Рівняння Ейнштейна (5) є нелінійними, тому у ЗТВ не працює принцип суперпозиції полів. Це ускладнює як пошук, так і фізичну інтерпретацію отриманих точних розв'язків. У рамках ЗТВ не вирішено проблему двох тіл навіть у найпростішому варіанті. І це можна зрозуміти, якщо перейти до фізики процесу. У класичній механіці ми розглядаємо рух двох матеріальних точок у гравітаційному полі одна одної. У рамках ЗТВ ми намагаємося описати рух двох чорних дір, які наприкінці процесу зливаються в одну. Їхні горизонти подій відмінні від сфери внаслідок дії як гравітації іншої діри, так і гравітаційних хвиль, що виникають у процесі руху дір і заповнюють увесь простір. Через генерацію та поглинання хвиль маси чорних дір стають змінними, та й саме поняття маси в цьому випадку потребує більш чіткого визначення.

Складно ввести локальну густину енергії гравітаційного поля або розглянути рух тіла, що обертається, хоча існують різні підходи до вирішення цих проблем.

ЗТВ і квантова теорія. На сьогодні дві вершини сучасної фізики — ЗТВ і квантова механіка — погано сумісні одна з одною з багатьох причин, як математичних, так і фундаментальних. Незважаючи на численні заяви у статтях, що претендують на вирішення цієї проблеми, квантової гравітації не існує ні як завершеної теорії, ні у вигляді перспективних гіпотез. Очевидно, квантування гравітації вимагає принципово нового підходу, подібно до того, як квантова механіка не є модифікацією класичної.

Однак ми можемо розглянути квантові ефекти на тлі класичного простору-часу, описати їх-

ній внесок у тензор енергії-імпульсу, який іноді називають поляризацією вакууму, і потім додати його в праву частину рівняння (5) як зворотну реакцію (backreaction), тобто дослідити вплив квантових ефектів на метричний тензор. Це називається *наближенням фонового поля*.

У рамках цього підходу найбільш дослідженими є квантові ефекти на ранніх стадіях існування Всесвіту і поблизу чорних дір [11].

Альтернативні теорії гравітації. Є величезна кількість таких альтернативних теорій, навіть якщо відкинути явно хибні, наприклад ті, що не переходять у класичну механіку за відсутності гравітації або не підпорядковуються локально законам СТВ. Деякі з них переходять у ЗТВ у наближенні слабкого гравітаційного поля, тому формально задовольняють результатам експериментів з перевірки ЗТВ. Деякі використовують принципово інший математичний апарат. Є теорії, в яких простір-час не описується метричним тензором, а є такі, де існують два різні тензори для різних полів або метричний тензор несиметричний.

Нерідко модифікують рівняння (5), уможливно додаючи в них доданки, які часто називають квантовими поправками.

Втім, поки не з'являться відхилення експериментальних даних від передбачень ЗТВ, немає підстав для віддання переваги альтернативним теоріям. Однак їх варто розглядати як гіпотетичні варіанти, які можуть стати новою теорією гравітації в разі появи в майбутньому розбіжностей між ЗТВ та результатами експериментів.

ЗТВ та Нобелівські премії з фізики. Впродовж багатьох років Нобелівський комітет не присуджував премії з фізики за досягнення, пов'язані із ЗТВ, можливо, через відсутність експериментального підтвердження цієї теорії. Сам А. Ейнштейн отримав Нобелівську премію у 1921 р. з формулюванням «за заслуги перед теоретичною фізикою і особливо за відкриття закону фотоелектричного ефекту».

Лише в 1978 р. Арно Аллан Пензіас та Роберт Вудро Вільсон здобули премію «за відкриття мікрохвильового реліктового випромінювання». Це відкриття підтвердило висновок реля-

тивістської космології про існування Великого вибуху.

У 1993 р. Рассела Галса і Джозефа Тейлора-молодшого було відзначено Нобелівською премією «за відкриття нового типу пульсарів, що дало нові можливості у вивченні гравітації».

У 2011 р. премію здобули Сол Перлматтер, Браян П. Шмідт та Адам Рісс «за відкриття прискореного розширення Всесвіту за допомогою спостережень над далекими надновими».

У 2017 р. Нобелівську премію «за вирішальний внесок у розроблення детектора LIGO та

спостереження гравітаційних хвиль» здобули Райнер Вайс, Беррі Беріш та Кіп Торн. Це була перша премія, прямо пов'язана із ЗТВ.

У 2019 р. Джеймс Піблс отримав Нобелівську премію «за теоретичні відкриття у фізичній космології».

ЗТВ було безпосередньо згадано у формулюванні Нобелівської премії з фізики за 2020 р., присудженої Роджеру Пенроузу, — «за відкриття того, що утворення чорної діри є впевненим передбаченням загальної теорії відносності». Більш детально про це написано у статті [14].

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Einstein A. Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. 25. November 1915. S. 844—847.
2. Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*. 1916. 354(7): 769—822. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>
3. Einstein A., Grossmann M. Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*. 1913. 62: 225—261.
4. Einstein A. *Sobraniye nauchnykh trudov v chetyrekh tomakh*. Vol. 1. Moscow: Nauka, 1965 [in Russian]. [Эйнштейн А. *Собрание научных трудов в четырех томах*. Том 1. Москва: Наука, 1965.]
5. Parnovsky S., Parnovsky O. *Yak vlashtovano Vsesvit. Vstup do suchasnoyi kosmologiyi* [How the Universe Works. An Introduction to Modern Cosmology]. Lviv, 2019 [in Ukrainian]. [Парновський С., Парновський О. *Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології*. Львів: Видавництво Старого Лева, 2019.]
6. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Course of Theoretical Physics*. Vol. 2. *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press, 1971. [Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория поля*. Москва: Наука, 1973.]
7. Zhdanov V.I. *Vstup do teorii vidnosnosti* [Introduction to the Theory of Relativity]. Kyiv, 2008 [in Ukrainian]. [Жданов В.І. *Вступ до теорії відносності*. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008.]
8. Misner Ch.W., Thorne K.S., Wheeler J.A. *Gravitation*. Princeton University Press, 2017. [Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. *Гравитация*: в 3 томах. Москва: Мир, 1977.]
9. Yatskiv Ya.S., Aleksandrov O.M., Vavilova I.B., Zhdanov V.I., Kudrya Yu.M., Parnovsky S.L., Fedorova O.V., Khmil S.V. *Zahalna teoriia vidnosnosti: vyprobuвання chasom* [General Theory of Relativity: Test of Time]. Kyiv, 2005 [in Ukrainian]. [Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Кудря Ю.М., Парновський С.Л., Федорова О.В., Хміль С.В. *Загальна теорія відносності: випробування часом*. Київ, 2005.]
10. Yatskiv Ya.S., Aleksandrov O.M., Vavilova I.B., Zhdanov V.I., Zhuk O.I., Kudrya Yu.M., Parnovsky S.L., Fedorova O.V., Khmil S.V. *Zahalna teoriia vidnosnosti: horyzonty vyprobuвання* [General Theory of Relativity: Testing Horizons]. Kyiv, 2013 [in Ukrainian]. [Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Жук О.І., Кудря Ю.М., Парновський С.Л., Федорова О.В., Хміль С.В. *Загальна теорія відносності: горизонти випробувань*. Київ, 2013.]
11. Parnovsky S.L. Black holes in physics and the Universe. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2025. (9): 3—12. <https://doi.org/10.15407/visn2025.09.003> [Парновський С.Л. Чорні діри у фізиці та Всесвіті. *Вісник НАН України*. 2025. № 9. С. 3—12.]
12. Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*. 1917. S. 142—152.

13. Aghanim N. et al. (Planck Collaboration). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy and Astrophysics*. 2020. **641**: A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
14. Parnovsky S.L. The Nobel Committee continues to pay its debts (Nobel Prize in Physics for 2020). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2020. (12): 21—30. <https://doi.org/10.15407/visn2020.12.021>
 [Парновський С.Л. Нобелівський комітет продовжує віддавати борги. Деякі думки з приводу Нобелівської премії з фізики 2020 року. *Вісник НАН України*. 2020. № 12. С. 21—30.]

Serge L. Parnovsky

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1855-1404>

GENERAL RELATIVITY ALMOST WITHOUT FORMULAS

In this article, the author briefly and clearly explains the complex features of the general theory of relativity, which Albert Einstein formulated in 1916 and which describes gravity not as a force, but as a distortion of the fabric of space-time caused by massive objects, which affects the motion of bodies and light. Today, the general theory of relativity is the most successful theory of gravity, repeatedly confirmed by numerous observations and experimental results.

Cite this article: Parnovsky S.L. General relativity almost without formulas. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (1): 24—32. <https://doi.org/10.15407/visn2026.01.024>