

І. Б. Вавилова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ: ПЕРЕВІРКИ В НАЗЕМНИХ І КОСМІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ

Подається короткий огляд експериментів з перевірки ефекту гравітаційного червоного зміщення (ГЧЗ) у наземних і космічних експериментах. Зокрема, розглянуто ефект ГЧЗ у гравітаційному полі Землі, великих планет Сонячної системи, компактних зір (білі карлики і нейтронні зорі), де ефект підтверджується з великою точністю. Окремо обговорюються можливості перевірки ефекту ГЧЗ для галактик і скупчень галактик в оптичному і рентгенівському діапазоні електромагнітного спектру.

Ключові слова: гравітаційне червоне зміщення, загальна теорія відносності, навігаційні системи, компактні зорі, скупчення галактик.

ВСТУП

Астрономічне червоне зміщення частоти електромагнітної хвилі, яку реєструє спостерігач, пов'язане з рухом небесного тіла. Частота хвилі зменшується, коли об'єкт віддаляється від спостерігача, та збільшується, коли об'єкт наближається, а спектральні лінії відповідно зсуваються у червону (довгохвильову) частину спектру або у синю (короткохвильову), зберігаючи при цьому своє відносне розташування. Зсув спектральних ліній у червоний бік (зумовлений віддаленням об'єкта) називається «червоним зміщенням». Є три типи червоних зміщень: червоне зміщення в результаті ефекту Доплера, гравітаційне червоне зміщення, космологічне червоне зміщення. Доплерівське зміщення спектральних ліній спричиняється відносним радіальним рухом між спостерігачем і небесним об'єктом, що спостерігається. Гравітаційне червоне зміщення виникає, коли фотони випромінювання небесного тіла

втрачають енергію, долаючи гравітаційне поле. Космологічне червоне зміщення спричиняється релятивістським розширенням Всесвіту і пов'язане з постійною Габбла H_0 . У загальному випадку червоне зміщення можна представити як суму цих величин.

Зокрема червоне зміщення z спектральних ліній в результаті ефекту Доплера (відкритий у 1842 р.) при швидкості небесного тіла, яка становить до 10 % від швидкості світла, дорівнює

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{v}{c}, \quad (1)$$

а у релятивістському випадку (для червоних зміщень $z \geq 0.1$):

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

де λ_o — довжина хвилі, яка реєструється («observed») спостерігачем, λ_e — довжина хвилі, яка випромінюється («emitted») небесним тілом, v — швидкість небесного тіла, c — швидкість світла. Таким чином, для небесних тіл, які спо-

стерігаються на великих червоних зміщеннях, УФ-випромінювання зміщується в ГЧ-діапазон, а ГЧ-випромінювання — у радіодіапазон.

Гравітаційне червоне зміщення (ГЧЗ) для фотонів, які втрачають енергію на подолання гравітації, записується у такий спосіб:

$$z_g = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1/2} - 1, \quad (3)$$

де G — гравітаційна стала, M — маса небесного тіла, r — відстань до небесного тіла. Зокрема, ефект ГЧЗ для променя світла, що проходить край Сонця, становить приблизно $2 \cdot 10^{-6}$. Принагідно зазначимо, що однією з перевірок Загальної теорії відносності (ЗТВ) Альберт Ейнштейн вважав вимірювання відхилення променів світла зір у 1.75 дугових секунд у полі тяжіння Сонця. Це передбачення ЗТВ було підтверджено в експерименті Артура Еддінгтона під час повного затемнення Сонця у 1919 р.

Космологічне червоне зміщення пов'язане з «розтягуванням» простору-часу, а не з радіальними рухами небесних тіл, і домінує для об'єктів Всесвіту за межами Місцевої групи галактик. Світло, що рухається в цьому просторі-часі, також буде «розтягуватися», а його довжина хвилі збільшуватися («червонішати»). За даними космічної обсерваторії WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), яка вела спостереження реліктового мікрохвильового випромінювання ($T = 2.7250$ К), були уточнені, зокрема, постійна Габбла H_0 , яка є мірою розширення Всесвіту ($H_0 = 71$ (км/с)/Мпк); червоне зміщення реліктового мікрохвильового випромінювання ($z_{\text{СМВ}} = 1089$); вік Всесвіту (≈ 13.8 млрд років). Найвіддаленіші галактики, які ми можемо спостерігати сучасними засобами, мають червоне зміщення близько $z = 10$, що означає, що світло від них йшло 13.18 млрд років. Із рівняння (2) можна отримати швидкість реліктового мікрохвильового випромінювання в одиницях швидкості світла, яка дорівнює 0.9999983 с.

ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ

Альберт Ейнштейн вважав ефект гравітаційного червоного зміщення або гравітаційного зсуву частоти спектральних ліній атома одним із найваж-

ливіших ефектів для перевірки Загальної теорії відносності [6, 29]. Пізніше з'ясувалася значущість ефекту ГЧЗ для перевірок ейнштейнівського принципу еквівалентності¹ [7], а саме його третього складника — *принципу локальної позиційної інваріантності*: ефект ГЧЗ є однаковим у будь-якій метричній теорії², що має правильну ньютонівську границю³. Тобто, у певній системі координат згідно з *принципом відповідності* наближена формула для метричного тензора g_{00} має вигляд

$$g_{00} \approx 1 + \frac{2U}{c^2}, \quad (4)$$

де U — ньютонівський гравітаційний потенціал. Це співвідношення повинне виконуватися у лінійному за величиною U/c^2 наближенні та є необхідною і достатньою умовою, щоб рівняння руху пробних тіл мали ньютонівську границю при $U/c^2 \ll 1$.

Ефект ГЧЗ базується на залежності частоти фотона від потенціалу гравітаційного поля U_2 і проявляє себе, коли приймач фотона світла перебуває в області з меншим гравітаційним потенціалом U_1 . Якщо виключити звичайний ефект Доплера, залежний від швидкості, то виміряна спостерігачем частота випромінювання атома

¹ Принцип еквівалентності має три складники:

Слабкий принцип еквівалентності (СПЕ) — траєкторія незарядженого пробного тіла залежить тільки від його початкового положення і початкової швидкості та не залежить від його внутрішнього складу (структури).

Принцип локальної лоренц-інваріантності (ПЛЛІ) — результат будь-якого негравітаційного локального експерименту не залежить від швидкості лабораторії, яка вільно падає.

Принцип локальної позиційної інваріантності (ПЛПІ) — результат будь-якого негравітаційного локального експерименту не залежить від того, де і коли у Всесвіті він проводиться (зокрема, значення фундаментальних фізичних констант не змінюється ні з часом, ні у просторі).

² Теорія гравітації є метричною, якщо безпосередній вплив гравітаційного поля на динаміку тіл та інших фізичних полів описується лише через метричний тензор. Тоді параметри інших полів, що можуть брати участь в описі гравітації, входять до рівнянь, що визначають метрику (саме цими рівняннями метричні теорії гравітації різняться одна від одної).

³ Існування ньютонівської границі для експериментів у слабкому гравітаційному полі є так званим принципом відповідності.

ω_1 , який перебуває в гравітаційному полі масивного небесного тіла, буде меншою за виміряну частоту випромінювання атома ω_2 цього самого елемента, який перебуває у вільному просторі, тобто $\omega_2 - \omega_1 > 0$ (зміщення вимірюваної частоти атома у червону ділянку електромагнітного поля під дією гравітаційного поля). Зміщення може відбуватися і у фіолетову частину спектру, якщо спостерігач перебуває у сильнішому гравітаційному полі, ніж джерело.

Фактично ГЧЗ — це той самий ефект, що й гравітаційне уповільнення часу: що сильніше гравітаційне поле, то більшим є уповільнення часу (спостерігач, який перебуває у місці з іншим гравітаційним потенціалом, буде інтерпретувати зсув частот як зміну ходу часу).

Ейнштейн отримав формулу ефекту ГЧЗ, користуючись законом збереження енергії. А саме, в статичному гравітаційному полі

$$[g_{00}(r)]^{1/2} E_{\text{лок}} = \text{const},$$

де $E_{\text{лок}} = hc/\lambda_{\text{лок}}$ — локально виміряна енергія частинки, $\lambda_{\text{лок}}$ — локально виміряна довжина її хвилі, $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — стала Планка. У такій формі закон збереження енергії справедливий для частинок з нульовою (фотон) і ненульовою масою спокою. Звідси $\lambda_{\text{лок}}(g_{00})^{-1/2} = \text{const}$, або

$$1 + z = \left[\frac{g_{00}^{(1)}}{g_{00}^{(2)}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

де z_g — гравітаційне червоне зміщення. Такий самий результат впливає в усіх метричних теоріях із розгляду власного часу для нерухомих випромінювача та спостерігача у статичному полі тяжіння. Звідси, у випадку слабкого гравітаційного поля, використовуючи наближену формулу (4) для g_{00} , дістанемо

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \approx - \frac{U_1 - U_2}{c^2}, \quad (6)$$

де ω , U — частота випромінювання і потенціал поля у відповідних точках. Цю формулу легко отримати як результат збереження енергії: фотони втрачають частину своєї енергії $E = h\omega$ на подолання гравітації, і їхня частота зменшується. При цьому неявно використовується припущен-

ня про рівність інертної та гравітаційної маси фотона.

На якісному рівні ефект ГЧЗ відіграє принципову роль для з'ясування факту викривленості простору-часу. Розглянувши світові лінії двох частинок, що перебувають у спокої відносно статичного гравітаційного поля та обмінюються світловими сигналами, Шилд [51] помітив, що ефект ГЧЗ є несумісним з геометрією простору-часу Мінковського. Це можна інтерпретувати як свідчення викривленості простору-часу (див. також відповідні розділи у книзі [5]).

ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПОЛІ ЗЕМЛІ

Ефект ГЧЗ (і, разом із тим, принцип локальної позиційної інваріантності) у полі Землі стало можливим ефективно перевірити лише у 1960—1965 роках у серії експериментів Паунда — Ребки — Снайдера [43, 44]. Перевірка полягала у вимірюванні зсуву частоти між двома однаковими стандартами частоти (атомними годинниками), розташованими на різних висотах над поверхнею. Власна частота кожного із атомних годинників у локальній лоренцевій системі відліку не залежить від положення і швидкості цієї системи відліку. Порівняння частот двох атомних годинників, розташованих на різних висотах, відповідає порівнянню швидкостей двох локальних лоренцевих систем відліку. А саме, одна з них пов'язана з годинником під час випромінювання його сигналу, а друга система відліку — з другим годинником у час прийому цього сигналу. Якщо в такому експерименті буде зареєстровано зсув частоти між двома атомними годинниками, то це є наслідком доплерівського зсуву першого порядку між двома локально лоренцевими системами відліку. Якщо принцип локальної позиційної інваріантності порушується, то зміщення частот відбуватиметься не за формулою (6), а за формулою

$$z_g = (1 + \alpha) \Delta U/c^2, \quad (7)$$

де α — тестовий параметр принципу локальної позиційної інваріантності, що характеризує го-

динник, зсув частоти якого вимірюється. Він може бути ненульовим і залежним від типу годинника при відхиленні від принципів метричних теорій.

Постановка експериментів Паунда — Ребки — Снайдера, як і багатьох подальших експериментів з перевірки принципу локальної позиційної інваріантності, стала можливою завдяки відкриттю ефекту Мессбауера у 1959 р. У зазначених експериментах ефект Мессбауера було використано для оцінки впливу однорідного гравітаційного поля на зміщення вузької резонансної лінії поглинання, утвореної фотонами гамма-променів з енергією 14.4 кеВ від ізотопу ^{57}Fe . Випромінювач і поглинач гамма-променів були встановлені у стані спокою в підземній частині і нагорі башти Джеферсонівської фізичної лабораторії Гарвардського університету ($h = 22.5$ м). Отже, ефект ГЧЗ, який на основі принципу еквівалентності становив (і з урахуванням величини прискорення вільного падіння у місці проведення експерименту і висоти башти) $\Delta\lambda/\lambda = 2gh/c^2 = 4.9 \cdot 10^{-15}$, було підтверджено з точністю до 1 % [39]. Таким чином, довжина хвилі фотонів залежить лише від властивостей атомів (або ядер), які їх випромінюють. Це так само стосується і вимірювання часу атомними годинниками. Варто зазначити, що в цих експериментах оцінці підлягала саме відмінність власного часу Δt двох атомних годинників або двох локальних лоренцевих систем відліку (див. [5, С. 399]).

Іншу серію експериментів з перевірки ГЧЗ, обумовленого гравітаційним полем Землі, було виконано у 1960—1970 рр. із використанням атомних годинників, встановлених на літаках, ракетах і космічних апаратах (КА). Зокрема в експерименті Оллея та ін. [13] різниця у показі часу двох ідентичних атомних годинників, встановлених у спеціальному пристрої, вимірювалася до і після того, як один із пристроїв транспортувався на літаку в супроводі радіолокатора упродовж 15 год на висоті 10 км (у ході експерименту було виконано п'ять незалежних польотів). Наростання різниці часу Δt у показах годинників реєструвалося телеметрично за допомогою лазерних імпульсів тривалістю 0.1 нс. Теоретична оцінка різниці часу становила

$\Delta t_{\text{теор}} = 47.1 \pm 0.25$ нс, і у результаті експерименту було отримано $\Delta t_{\text{вимір}}/\Delta t_{\text{теор}} = 0.987 \pm 0.010$.

Більш точну оцінку параметра α з формули (7) було отримано наприкінці 1970-х років в експерименті Вессо — Левіна [58, 59] з вимірювання ГЧЗ у полі Землі. Частота воднево-мазерного годинника, встановленого на ракеті, порівнювалася з годинниками, встановленими у наземній лабораторії. Висота підйому ракети становила 10000 км. Це був перший спеціалізований космічний проект (місія «Gravity Probe А»), призначений для перевірок ЗТВ і фундаментальних положень фізики взагалі. Експеримент показав високу точність ефекту ГЧЗ $|\alpha| < 1.4 \cdot 10^{-4}$.

Серед цікавих інших перевірок принципу локальної позиційної інваріантності відзначимо насамперед «нульовий» експеримент із порівняння відносних ходів різних типів годинників у залежності від їхнього місцезнаходження, який було проведено у квітні 1976 р. у Стенфордському університеті (див. зокрема огляд [42]). Ідея полягала у використанні факту, що варіація сонячного гравітаційного потенціалу $\Delta U/c^2$ має два компоненти: синусоїдальний із 24-годинним періодом і амплітудою $3 \cdot 10^{-13}$, викликаний обертанням Землі, та лінійний з темпом $3 \cdot 10^{-12}$ на добу, обумовлений рухом Землі по орбіті. Для оцінки параметра α було використано систему з двох воднево-мазерних годинників (ВМГ) та трьох генераторів, стабілізованих надпровідним контуром (ГСНК). Відхилені від принципу локальної позиційної інваріантності у межах тестового параметра $|\alpha^{\text{ВМГ}} - \alpha^{\text{ГСНК}}| < 2 \cdot 10^{-2}$ знайдено не було (цю точність в 1995 р. покращили Годон та ін. [30]).

Врахування поправок за ГЧЗ і уповільнення часу стало необхідним елементом міжнародних Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), GPS, європейська GALILEO, російська ГЛОНАСС та ін., а також при розгляді задач астрономії та геодезії ([10, 15], див. також відповідні розділи в роботах [1, 4, 8, 9]). Якщо не враховувати ефекти спеціальної і загальної теорій відносності, то розбіжність показів між бортовими і наземними годинниками сягає 39 мкс за добу, що може призводити до втрати точності позиціонування у декілька кілометрів за добу. Цей

ефект було підтверджено ще у 1972 р. в експерименті Хейфела — Кетінга [32]. Упродовж цього експерименту в жовтні 1971 р. чотири цезієві атомні годинники були встановлені на літаках двічі (перший раз — у польотах у напрямку на схід, другий раз — у напрямку на захід). Наземні годинники знаходилися в Морській обсерваторії США. Передбачення ЗТВ, що бортові годинники повинні запізнюватися на 40 ± 23 нс у русі на схід і випереджати наземні годинники на 275 ± 21 нс у русі на захід, були підтверджені з високою точністю.

Подальші перевірки за допомогою Глобальної позиційної системи GPS, які відповідали гравітаційному червоному зміщенню у системі синхронізації, були проаналізовані щодо часових даних із GPS для підтвердження інших перевірок. Дані першого з супутників, який показав прогнозовану зміну у 39 мікросекунд на день, підтвердили, що ця швидкість розбіжності достатня, щоб суттєво погіршити функціонування GPS протягом години, якщо цю похибку не враховувати. Про роль, яку відіграє ЗТВ при розробці GPS, докладно виклав Ашбай у 2003 р. [16].

Побіжно зазначимо, що експерименти з перевірки ГЧЗ, зокрема з атомними цезієвими годинниками, привернули увагу астрономів, і на початку 1990-х років були ініційовані теоретичні дослідження із запровадження нової просторово-часової метрики для міжнародних систем відліку (у т. ч. барицентричних і геоцентричних) та шкали власного часу (Міжнародного атомного часу ТАІ). У 2000 р. ці поправки були враховані в Резолюціях Міжнародного астрономічного союзу щодо міжнародних систем відліку (див. зокрема [4, 8, 9, 31] та “IAU Resolutions adopted at the 24th General Assembly (Manchester, August 2000)” (http://syrtel.obspm.fr/IAU_resolutions/Resolution_UAI.htm.3)).

Отже, на сьогодні основною концепцією всіх глобальних навігаційних супутникових систем є синхронізація годинників, яка базується на локально інерційній системі відліку, що вільно падає разом із Землею. Ця концепція цілком підтверджується успіхом навігаційних систем, які зараз використовуються у різних галузях економіки країн та побуті людей.

На завершення цього розділу відмітимо, що у 2018 р. заплановано провести унікальний метрологічний експеримент із атомними лазер-охолоджуваними годинниками «Atomic Clocks Ensemble in Space» (ACES/PHARAO) на Міжнародній космічній станції (МКС) (див. детальний опис у роботах ([24, 38, 41])). Передбачається, що їхня стабільність становитиме $5 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$, що відповідає точності вимірювання частоти ансамблю годинників у 10^{-16} . Корисне навантаження для цього експерименту буде запущено ракетою «Space X» і приєднано до Європейського модуля «Columbus» МКС, тривалість експерименту становитиме 18 місяців із можливим продовженням до 3 років). Цезієвий охолоджуваний атомний годинник (PHARAO) і водневий лазер (SHM) дозволять порівнювати час і частоту з годинниками на Землі завдяки спеціальному мікрохвильовому (лазерному) зв'язку MicroWave Link. Такий зв'язок є принциповою особливістю цього експерименту, — частина наземних терміналів, які будуть приймати сигнали, буде рухатися під час польоту годинників ACES, частина буде нерухомими і розташовуватися у метрологічних лабораторіях (Центр аналізу даних вже створено в Паризькій обсерваторії, SYRTE). Хоча принцип еквівалентності і гравітаційне червоне зміщення годинників пов'язані між собою, їхня перевірка буде здійснюватися окремо. Вважається, що космічний експеримент ACES/PHARAO здатний покращити результати експериментів проекту «Gravity Probe A» [58, 59] та на супутнику MICROSCOPE (у 2017 р. слабкий принцип еквівалентності з вимірювання параметра Етвотша перевірено з точністю 10^{-14} [54]) на два порядки.

ПЕРЕВІРКИ ЕФЕКТУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У СОНЯЧНІЙ СИСТЕМІ

Декілька важливих експериментів було виконано для перевірки ефекту ГЧЗ під дією гравітаційного поля планет Сонячної системи і Сонця (див. зокрема [2, 3, 6, 61–63]).

Свого часу Ейнштейн оцінив, що для Сонця значення гравітаційного червоного зміщення у ньютонівському наближенні складає приблизно

$2 \cdot 10^{-6}$ довжини хвилі. Цю оцінку можна отримати з формули (3): для сферично-симетричного небесного тіла з масою M і радіусом R вона набуває вигляду

$$z_g = (1 - r_g / R)^{-1/2} - 1, \quad (8)$$

нагадаємо, що параметр $r_g = 2GM/c^2$ має розмірність довжини. Для Сонця $r_g = 3$ км, $z_g \approx 2 \cdot 10^{-6}$ [7]. Зокрема, для довжини хвилі $\lambda = 500$ нм отримуємо $\Delta\lambda \approx 10^{-3}$ нм.

Визначення ефекту ГЧЗ для Сонця ускладнено через ефект Допплера, а саме доплерівські внески першого порядку, які залежать від місця на Сонці, де перебуває джерело випромінювання. Це пов'язано, насамперед, зі значними конвективними рухами (гарячі потоки — на поверхню, холодні — до нижчих шарів атмосфери), які спричинюють доплер-ефект у фіолетову частину спектру. Зокрема, доплерівська півширина лінії атома водню, яка в умовах сонячної фотосфери у п'ятнадцять разів більша за лабораторну, сильно маскує ГЧЗ. Проте у 1962 р. Броулту [22], аспіранту проф. Дікке, за допомогою спеціально сконструйованого фотоелектричного спектрометра з досить вузькою щілиною, вдалося виміряти ГЧЗ потужної спектральної лінії натрію D_1 ($\lambda = 589.5923$ нм), що утворюється у високих шарах фотосфери Сонця. Ефект ГЧЗ для цієї лінії $z_g = \Delta\lambda/\lambda \equiv GM_{\odot}/R_{\odot}c^2$ було підтверджено з точністю до 5 %. Пізніше в експерименті з вимірювання ГЧЗ для триплету лінії кисню в інфрачервоній ділянці спектру лімба Сонця була досягнута точність 2 %. Так само точність вимірювання сонячного ГЧЗ за допомогою атомних годинників, встановлених на КА «Галілео», становила 1 %.

Вивчення гравітаційного червоного зміщення — відносно збільшення довжини хвилі в гравітаційному полі Сонця — все ще залишається важливим предметом досліджень сучасної фізики і дискусії, чи можуть атомні інтерферометричні експерименти застосовуватися для гравітаційного вимірювання червоного зміщення. Окремі відповіді на це запитання можна знайти зокрема в статті Вілгелма та Двіведі [60]. А саме, в ній аналізуються базисні положення атомної фізики та параметри інтерферометрів, задіяних у

таких експериментах, і доводиться, що відношення гравітаційної до електростатичної сил, як правило, досить маленьке. Автори пишуть: «*гравітаційна сила, що діє на електрон у атомі водню, розташований у фотосфері Сонця, до електростатичної сили між протоном і електроном становить приблизно $3 \cdot 10^{-21}$. Порівняння цього співвідношення із прогнозованим і спостережуваним сонячним червоним зміщенням показує розбіжність багатьох порядків. Отже, якщо розглядати припущення Ейнштейна щодо частоти спектральних ліній, яка залежить тільки від самого генеруючого іона як відправної точки, тоді рішення можна сформулювати на основі двоетапного процесу, аналогічно підходу Фермі щодо доплерівського ефекту. Цей підхід забезпечує послідовність фізичних процесів у відповідності зі збереженням енергії та імпульсу, що призводить до спостереженого зміщення частоти, і не використовує геометричний опис. Гравітаційне поле впливає на вивільнення фотона, а не на атомний міжрівневий перехід. Єдиним «контрольним» параметром є швидкість світла. Випромінювання атома тоді контрастує з гравітаційним червоним зміщенням аннігіляційних подій матерія-антиматерія» [60].*

У 1980—1981 рр. із точністю 1 % було перевірено ефект ГЧЗ, викликаний гравітаційним полем Сатурна, за допомогою стабільних атомних годинників, встановлених 1977 р. на КА «Вояджер» (див. також [58, 59]). Нагадаємо, що американські КА «Вояджер-1, 2» були запущені у 1977 р. для досліджень зовнішніх планет Сонячної системи. У 1980-х роках траєкторії КА після обльотів планет-гігантів було скеровано так, щоб вони у різних напрямках залишили Сонячну систему («Вояджер-2» летить у південній півсфері під кутом 48° до екліптики, «Вояджер-1» — під кутом 38° над екліптикою). Вважають, що потужності трьох радіоізотопних термоелектричних генераторів, паливом для яких слугує ^{238}Pu , вистачить до 2025 р., при цьому швидкість руху станцій становить близько 3.3 астрономічних одиниць у рік. У грудні 2011 р. КА «Вояджер-1» подолав зону геліопаузи Сонячної системи і став першим штучним об'єктом Землі, який вийшов у міжзоряний простір (за його рухом можна слідкувати у режимі реального часу на сайті NASA).

ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ПОЛІ КОМПАКТНИХ ЗІР

Дослідження таких небесних тіл, як білі карлики, нейтронні зорі, квазари, галактики з активними ядрами ведуться з урахуванням ЗТВ, оскільки компактні зорі на останніх стадіях своєї еволюції є релятивістськими об'єктами, а активність ядра галактики добре пояснюється акрецією речовини на центральну масивну (надмасивну) чорну діру. Для таких об'єктів ЗТВ не є теорією, що потребує підтвердження, а є теорією, що дозволяє здійснити критичні тести для перевірки астрофізичних моделей. Стосовно ефекту ГЧЗ варто відзначити, що на поверхні деяких компактних об'єктів його величина може бути порівняною з доплерівською шириною лінії (див. таблицю). Вимірювання ГЧЗ надає можливість отримати дані про радіус цих небесних тіл, при цьому зорі з великим відношенням «масарадіус» мають і більше значення ГЧЗ.

На поверхні білих карликів ГЧЗ сягає $z_g \approx 10^{-4}$ і переважає над доплерівською шириною лінії. Якщо білий карлик входить до подвійної системи, з надійною точністю можна оцінити його масу M . Тоді у формулі (8) залишається один вільний параметр — радіус R білого карлика, який визначають з цієї формули за результатами вимірювання z_g та M . Як і у формулі (3), можемо записати, що спектральна лінія, випромінювана атомом, що перебуває на певній відстані r від поверхні зорі, має гравітаційне червоне зміщення

$$z_g \approx \frac{GM_*}{rc^2}. \quad (9)$$

На відміну від Сонця, ефект ГЧЗ є суттєвим для білих карликів [55]: вперше він був вимірянний Поппером у 1954 р. для білого карлика 40 Eridani, а саме $z_{g_{\text{БК}}} = (7 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ (див. таблицю).

Найбільш цікавим з цього класу небесних тіл довгі роки залишався компаньйон найближчої до Сонця зорі Сиріус (відстань становить 8.6 св. років), яка, як відомо, є подвійною зорею. Хоча Сиріус В (білий карлик) був відкритий А. Кларком ще у 1862 р., проблема його спостережень полягала в тому, що випромінювання від цього компонента маскувалося випромінюванням го-

ловної зорі системи, Сиріусом А. І лише у 2005 р. Барстоу та ін. [21], використовуючи можливості спектрографа STIS Космічного телескопа Габбла щодо розділення обох компонентів Сиріуса і дату найближчого зближення з Землею у 1993 р., коли ця роздільна здатність була найвищою, вдалося обробити дані повної серії бальмерівських ліній Сиріуса В. Вони отримали як значення ефекту ГЧЗ $z_g = 80.42 \pm 4.83$ км/с, так і точні дані про масу і радіус: $m_{\text{SiriusB}} = (1.02 \pm 0.02)M_{\odot}$, $R_{\text{SiriusB}} = 0.0081 \pm 0.0002R_{\odot}$. Для визначення радіуса і маси (до цього часу масу Сиріуса В визначали за гравітаційною взаємодією з Сиріусом А) було використано фотометричні дані та паралакси, отримані КА HIPPARCOS. Виявилось, що при масі у 98 % маси Сонця і діаметрі 12 км сила гравітації на його поверхні у 350 тис. разів більша за земну (нагадаємо, що чим більша маса білого карлика, тим менший його діаметр), при цьому головний компаньйон системи, Сиріус А, має масу $2M_{\odot}$, діаметр — близько 2.4 млн км, поверхневу температуру — 10 500 К.

У 2013 р. Ренсом та ін. [48] повідомили про багатохвилові спостереження відкритого ними унікального мілісекундного пульсара PSR J0337+1715 (пульсація осі цієї нейтронної зорі становить 365.953363096 с⁻¹), який знаходиться у напрямі сузір'я Тільця на відстані 4200 св. років. Унікальність його полягає ще й у тому, що цей пульсар компаньйонами має дві компактні зорі — близький і зовнішній білі карлики. Тобто, всі компоненти потрійної системи є сильними самогравітуючими тілами, які показують ще й сильну гравітаційну взаємодію в системі: гравітаційне поле зовнішнього білого карлика суттєво прискорює внутрішню подвійну систему «нейтронна зоря + близький білий карлик». Це дозволило точно встановити їхні маси — $(1.4378 \pm 0.0013)M_{\odot}$ для радіопульсара та $(0.19751 \pm 0.00015)M_{\odot}$ і $(0.4101 \pm 0.0003)M_{\odot}$ для внутрішнього і зовнішнього білих карликів. Виявлені дуже компланарні та майже колові орбіти (нахил орбіт 39.2°) обох білих карликів свідчать про стійку спільну еволюцію потрійної системи у минулому. Спостереження показали, що внутрішній білий карлик обертається навколо пульсара ближче, ніж Меркурій навколо Сонця, з періодом 1.63 доби. Зовнішній білий карлик обертається з періодом

Ефект гравітаційного червоного зміщення та ефект Доплера для білих карликів у порівнянні з відомими зорями різних типів (узагальнений варіант таблиці див. у роботі [45])

Зоря	Тип	M/M_{\odot}	R , км	Зміщення $\Delta\lambda$ за рахунок ефекту ГЧЗ, %	Зміщення $\Delta\lambda$ за рахунок ефекту Доплера, %
Rigel A	Блакитно-білий надгігант	20.9	$5.5 \cdot 10^7$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	-0.0059
Epsilon Eridani	Коричневий карлик	0.76	$5.1 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0134
61 Cygni A	К-карлик	0.69	$4.6 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0214
Wolf 359	N/A	0.089	$1.1 \cdot 10^5$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	-0.0063
Proxima Centauri	Червоний карлик	0.123	$9.8 \cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0072
DX Cancri	Червоний карлик	0.089	$7.7 \cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	-0.0030
Ross 128	Червоний карлик	0.149	$1.5 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0103
Barnard's Star	Червоний карлик M4Ve	0.143	$1.4 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0369
UY Scuti	Червоний надгігант	7.9	$1.2 \cdot 10^9$	$9.9 \cdot 10^{-7}$	N/A
Altair	Тип A гол послід	17.75	$1.3 \cdot 10^6$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0087
Procyon A	Жовтий гол послід	1.41	$1.4 \cdot 10^6$	$0.1 \cdot 10^{-4}$	0.0010
Zeta Ophiuchi	Жовтий надгігант	19.9	$5.9 \cdot 10^6$	$0.4 \cdot 10^{-4}$	0.0050
Alpha Centauri A	Жовтий карлик G2V	1.09	$8.5 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	0.0072
Сонце	Жовтий карлик G2V	1	$6.9 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^{-4}$	N/A
Procyon B	Білий карлик	0.59856	$8.6 \cdot 10^3$	0.010	0.0011
Sirius B	» »	0.9724	$5.9 \cdot 10^3$	0.025	0.0025
IK Pegasi B	» »	1.15	$4.2 \cdot 10^3$	0.041	0.0038
Van Maanen 2	» »	0.68	$7.7 \cdot 10^3$	0.013	0.0127
40 Eridani B	» »	0.497	$9.8 \cdot 10^3$	0.008	0.0143

327.257541 діб по орбіті, яка віддалена від пульсара приблизно як орбіта Землі від Сонця. Автори роботи [48] вважають, що саме відкрита ними система PSR J0337 + 1715 надасть можливість встановити порушення сильного принципу еквівалентності та межі застосування ЗТВ, — моніторинг пульсацій нейтронної зорі буде тривати щонайменше рік (час обертання зовнішнього білого карлика, у сильному гравітаційному полі якого опинився пульсар).

Кількість білих карликів у Галактиці складає приблизно 10 % від кількості загального зоряного населення. Але їхня роль у загальній еволюції матерії у Всесвіті, як і у встановленні наших знань про його еволюцію, набагато більша. Бага-

ту інформацію про білі карлики надала космічна обсерваторія «Кеплер», зокрема серед них були виділені ті, для яких можна дослідити їхні коливання. Так зване «астросейсмологічне» дослідження об'єкта KIC08626021 (J192904.6+444708), який перебуває на відстані 1375 св. років, дозволило за характером його коливань встановити масу його гомогенного ядра у $0.45 M_{\odot}$, а 86 % його маси становить кисень, що виходить за межі сучасних положень теорії зоряної еволюції (ці величини на 40 % і 15 % відповідно є більшими), або може бути прикладом існування аномальних білих карликів. Нагадаємо, що компактні білі карлики, внаслідок акреції речовини на них від гігантських компаньйонів у подвійних

зоряних системах, із часом вибухають як наднові зорі типу Ia. Вимірювання відстаней до цих наднових у 1998 р., разом із даними про мікрохвильове реліктове випромінювання, засвідчили нову космологічну парадигму про прискорене розширення Всесвіту.

Особливо важливим є вимірювання ефекту поверхневого ГЧЗ для нейтронних зір, оскільки радіус нейтронної зорі важко піддається оцінюванню, насамперед у випадку радіопульсарів. Нагадаємо, що Вейнберг у 1972 р. показав, що для будь-якої нейтронної зорі, що описується рівняннями Толмена — Оппенгеймера — Волкова, повинна задовольнятися умова стабільності $r_g/R_{\text{H3}} < 8/9$, тобто $z_g < 2$. Звідси виходить, що для нейтронної зорі, що не обертається, $z_g = 0.13$, а для нейтронної зорі, що обертається, $z_g = 0.184 \dots 0.854$. Надійніше ефект ГЧЗ вимірюється для пульсарів, — унікальних об'єктів, відкритих на початку 1970-х років за допомогою космічної обсерваторії UHURU. Пізніші дослідження показали, що деякі пульсари мають емісійні лінії в діапазоні від 10 до 40 кеВ, які можуть бути гравітаційно зміщеними циклотронними лініями в сильних магнітних полях (наприклад, для поля з напруженістю $B = 10^{12}$ Гс базова циклотронна частота становить $11.6(1+z)$, і для пульсара Нег Х-1 для емісійної лінії на 40 кеВ вона може бути інтерпретована як вища гармоніка циклотронної частоти). Важливо додати, що ефект ГЧЗ модифікує спостережуваний спектр поверхні нейтронної зорі, а саме, він зменшує поверхневу температуру на фактор $(1+z)$. Детальніше з цим питанням можна ознайомитися у монографії [35].

Перший надійний результат із ототожнення спектральних ліній нейтронної зорі було отримано за допомогою космічного телескопа «ХММ-Ньютон» у спостереженнях 2000 р. за рентгєнівським джерелом EXO0748-676 [25, 49]. У спектрі цієї нейтронної зорі вдалося ідентифікувати лінії обідраних атомів Fe XXVI та FeXXV (з переходами $n = 2-3$), OVII та OVIII (з переходами $n = 1-2$). Довжини хвиль цих ліній зміщено у червону частину спектру однаково на величину $z_g = 0.35$. Із формули (8) отримуємо, що радіус нейтронної зорі становить $R_{\text{H3}} \approx 2.2 r_g$, а $R_{\text{H3}} \cdot M_{\odot} / M_{\text{H3}} R_{\odot} \approx 6.6$ км (нагадаємо, що $M_{\odot} = (1.98892 \pm 0.00025) \cdot 10^{30}$ кг).

Якщо припустити, що маса зорі є стандартною для більшості пульсарів ($1.4 M_{\odot}$), то тоді отриманий результат відповідає моделі звичайної нейтронної зорі без урахування фазових переходів у піон-каонний конденсат або кварк-глюонну плазму. Якщо маса нейтронної зорі $M_{\text{H3}} < 1.1 M_{\odot}$, то отримане значення радіуса виявляється досить малим, і рівняння стану нейтронної зорі потребує уточнень. Для порівняння зазначимо, що маса і радіус найвідомішого пульсара PSR B0531+21 у Крабовидній туманності становить $1.14 M_{\odot}$ і 9.945 км відповідно [45].

Зокрема, у роботах [65, 66] подано результати розрахунків поверхневого ГЧЗ для масивних нейтронних (гіперонних) зір PSR J0348+0432 ($z_g = 0.35 \dots 0.40$) та PSR J1614-2230 ($z_g = 0.41 \dots 0.54$), отримані в рамках релятивістської теорії в наближенні середнього поля, яке найчастіше застосовується для опису процесів у нейтронній зорі. Якщо ж застосовувати складову кваркову модель (симетрія SU(6)), то для PSR J1614-2230 поверхнєве значення ГЧЗ буде становити $z_g = 0.25$. Нагадаємо, що пульсар PSR J0348 + 0432, радіус якого становить $R_{\text{H3}} \approx 12.062 \dots 12.957$ км, був відкритий у 2007 р., а величину його маси $M_{\text{H3}} = (2.01 \pm 0.04) M_{\odot}$ було виміряно у 2013 р. [14] завдяки тому, що він є подвійною системою (супутник — білий карлик, співвідношення мас у системі 1:11.7). Оскільки він має дуже короткий орбітальний період у 2 год 27 хв, це дозволило виміряти його орбітальну затримку, викликану випромінюванням гравітаційних хвиль. Пульсар PSR J0348 + 0432 є одним із наймасивніших відомих пульсарів, а його маса трохи вища за масу пульсара PSR J1614-2230 (теж подвійна система: нейтронна зоря і білий карлик), яка була виміряна за допомогою ефекту Шапіро ($M_{\text{H3}} = (1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$) у 2010 р. [28]. Маси цих обох пульсарів окреслюють нижню емпіричну межу Толмана — Оппенгеймера — Волкова для умови стабільності нейтронної зорі.

Найголовнішим співвідношенням для нейтронних і гіперонних зір залишається співвідношення «радіус-маса» зорі, яке надає необхідну інформацію на обмеження рівняння стану надщільного стану речовини зорі. Саме тому гравітаційне червоне зміщення на поверхні нейтронної

зорі, що відповідає співвідношенню «радіус-маса» нейтронної зорі, є головним спостережуваним методом дослідження, яке досить нелегко здійснити. Допомогти в цьому можуть спостереження термоядерних рентгенівських всплесків на поверхні цих зір. Як приклад, приведемо дані з роботи [40], де було проаналізовано термоядерний рентгенівський вибух із маломасивної рентгенівської подвійної системи GRS 1747-312. Використовуючи архівні дані КА «Сузаку», автори цієї статті дослідили рентгенівський вибух, який був послідовно виявлений під час моніторингових спостережень балджа Галактики і тривав достатньо часу із помірним фотосферичним радіусом від цієї системи. За оцінками цих авторів, поверхнєве значення ГЧЗ становило $z_g = 1.56 \pm 0.03$, при цьому, щоб відокремити цей ефект від доплєрівського зсуву спектральних ліній, потрібно припустити, що водневоподібні лінії іонів заліза і цинку відповідають за крила спектральних ліній. Отримане значення відповідає радіусу та масі цієї системи $R_{\text{нз}} \approx 7 \dots 10$ км та $M_{\text{нз}} \approx 1.4 \dots 2 M_{\odot}$.

При цьому відмітимо, що якщо до класичного розгляду ГЧЗ для нейтронної зорі підключити нелінійну електродинаміку, це призводить до модифікації базисної основи ГЧЗ, насамперед для надсильно намагнічених компактних об'єктів, таких як пульсари. Такі теорії використовують точний нелінійний лагранжіан Борна — Інфельда. А саме, на відміну від ЗТВ, де ГЧЗ не залежить від будь-якого фонового магнітного поля (B -поля), якщо ввести нелінійну електродинаміку для фотонів, то виявляється, що ефект ГЧЗ залежить від фонового магнітного поля, що діє на пульсар. Зокрема, Квеста і Салім [26] показали, що ефект ГЧЗ може прямувати до нескінченності зі зростанням B -поля. Така ситуація може вводити в оману при розрахунках співвідношення «радіус-маса» нейтронної зорі і, у свою чергу, рівняння стану речовини компактної зорі, а отже, вимагає акуратного розділення ефектів нелінійної електродинаміки і ефекту ГЧЗ у випадках ультрамагнітних пульсарів.

Додамо також, що компактні об'єкти — зорі на останніх стадіях еволюції, такі як білі карлики або нейтронні зорі, — є ідеальними об'єктами для пе-

ревірки *сильного принципу еквівалентності*⁴ (такі перевірки у Сонячній системі практично унеможливлені відсутністю в ній сильних самогравітуючих тіл). Пульсари (нейтронні зорі) характеризуються високоточним періодом обертання, і у випадку, коли вони є компонентами подвійних зоряних систем, як це згадувалось, надають унікальні можливості для перевірки ЗТВ у сильних гравітаційних полях та непрямі підтвердження існування гравітаційних хвиль. Найбільш вивченими є пульсар PSR1913 + 16 — член подвійної системи (дві нейтронні зорі з приблизно однаковими масами $M_{\text{нз}} \approx 1.4 M_{\odot}$), відкритий Халсом і Тейлором в 1975 р. [34] та досліджений у багатьох працях (див. зокрема [27]), а також подвійний радіопульсар PSR J0737-3039 A+B, відкритий Бурже та ін. у 2003 р. [23]. Про важливість останньої подвійної системи для перевірок ЗТВ вперше було відзначено в роботі [39]. Це єдина на даний момент система, що містить два пульсари (їхні маси становлять $1.337 M_{\odot}$ і $1.250 M_{\odot}$): вона має найменший орбітальний період 2.45 години з відомих подібних систем, де спостерігаються найсильніші релятивістські ефекти (див. також [37, 47]). Найточнішими для перевірки сильного принципу еквівалентності могли би стати компактні зорі у потрійних системах, до яких можна застосувати класичну задачу трьох тіл, але вони є досить екстраординарними поки що для спостережень. До недавня була відома лише одна така система, відкрита у 1999 р. Сорсеттом та ін. [53] — мілісекундний пульсар PSR B1620-26, компаньйонами якого є білий карлик та екзопланета юпітеріанської маси. Роки спостережень поки що не дали очіку-

⁴ *Сильний принцип еквівалентності* — у кожній точці простору-часу в довільному гравітаційному полі можна вибрати «локально-інерційну систему координат» таку, що в досить малому околі даної точки закони природи будуть мати таку ж форму, як і в неприскорених декартових системах координат, де під «законами природи» мають на увазі всі закони природи [1]. Різниця між сильним і слабким принципами еквівалентності в тому, що слабкий принцип — це локальне твердження, а сильний принцип — це твердження, що стосується будь-якої точки простору часу, тобто будь-якого місця у Всесвіті та будь-якого часу в минулому чи майбутньому.

ваних результатів, оскільки виявилось, що ця потрійна система є слабко взаємодіючою [52].

Нагадаємо, що на сьогодні відомо близько двох тисяч пульсарів, 10 % яких є мілісекундними.

У 2017 р. спеціалісти НАСА провели перші випробування нової рентгенівської системи автономної навігації NICER (Neutron-star Interior Composition Explorer) та спорідненого експерименту SEXTENT (Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology) на Міжнародній космічній станції. Система NICER, яка в майбутньому може бути використана як «космічна GPS», містить у собі дві незалежні підсистеми, які реєструють сигнали віддалених пульсарів у рентгенівському діапазоні. З одного боку, ці пульсари слугують опорними об'єктами, що надають можливість точного визначення положення МКС на орбіті (тобто пульсари використовуються як атомні годинники). Сигнали від цієї системи приймаються антенами мережі далекого зв'язку NASA Deep Space Network (DSN) та European Space Tracking (ESTRACK), що дозволяє розрахувати траєкторію і швидкість польоту МКС. А саме, система NICER містить 52 невеликих рентгенівських телескопів та кремнієві датчики, які відслідковують дрейф нейтронних зір і пульсарів; інструмент SEXTENT приймає видиме світло від цих об'єктів та виконує процедуру триангуляції; все разом дозволяє точно визначити точку орбіти МКС та порівняти її координати з даними від супутників системи GPS. З другого боку, випробування показали високу ефективність використання сигналів мілісекундних пульсарів для точного визначення місцеположення космічних апаратів, що рухаються зі швидкістю до 1000 км/с, не лише в Сонячній системі, а і в Галактиці. На першому етапі випробувань точність оцінки місцеположення МКС на орбіті становила 10 км (що краще, ніж точність оцінки за допомогою мережі антен далекого зв'язку), на другому етапі точність рентгенівської GPS буде покращено до 5 км.

Отже, перевірки ГЧЗ для нейтронних зір дозволяють отримати не тільки динамічні параметри зорі, а й уточнювати теоретичні моделі, якими описується фізичний стан зорі. Саме існування масивних пульсарів дало поштовх розвитку

нової фізики екзотичних видів ядерної речовини, таких як гіперонні і каонні конденсати. Обертання таких найщільніших об'єктів довкола своєї осі з неймовірною швидкістю у декілька сотень обертів на секунду призводить, у разі відхилення форми нейтронної зорі від сферичної всього на декілька сантиметрів, до створення власних гравітаційних хвиль. Зіткнення та злиття нейтронних зір спричиняє короткий імпульс енергії, який за потужністю переважає потужність усіх зір у Галактиці. Цього достатньо, щоб змусити сам простір коливатись та поширювати гравітаційні хвилі.

Така подія — безпосередня реєстрація гравітаційних хвиль від джерела злиття нейтронних зір, що отримала назву «гравітаційна хвиля GW170817», — стала можливою після об'єднання потужностей двох гравітаційних детекторів, американського LIGO та європейського VIRGO. Реєстрація відбулася 17 серпня 2017 р., а офіційне повідомлення з підтвердженням вийшло 16 жовтня 2017 р.: спостереженнями на наземних і космічних обсерваторіях займалися 70 груп вчених, а співавторами однієї зі статей, присвячених цій події, стали понад 3.6 тис. учених [11]. Спалах гамма-випромінювання від джерела у напрямі сузір'я Гідра тривав дві секунди і був зареєстрований космічним телескопом «Фермі» і, трохи пізніше, космічною обсерваторією INTEGRAL [69], а післясвітіння у всіх спектральних діапазонах тривало декілька тижнів. Це дозволило через дев'ять днів отримати зображення джерела в рентгенівському діапазоні, а через 25 днів — у радіодіапазоні. Спалах був настільки потужним, що потрапив в зону чутливості гравітаційних детекторів LIGO/Virgo і тривав одну хвилину, — все разом дало можливість довести, що гамма-спалах відбувся від злиття нейтронних зір масою від 1.1 до 1.6 M_{\odot} , які перебували на відстані 130 млн св. років від Землі, у галактиці NGC 4993. Такі гамма-спалахи називаються короткими гамма-сплесками, а гамма-телескопи реєструють їх приблизно раз на тиждень. Якщо природа довгих гамма-сплесків зрозуміліша (їхні джерела — спалахи наднових), то єдиної думки щодо джерел коротких сплесків немає, — вважалося, що їх породжують злиття нейтронних зір. Оскільки за-

вдяки реєстрації гравітаційних хвиль детекторами LIGO/Virgo було отримано масу компонентів, то гіпотеза щодо природи коротких гамма-спалахів знайшла своє перше підтвердження (див. [11, 36, 69] та веб-сайт <http://www.sciencemag.org/news/2017/10/merging-neutron-stars-generate-gravitational-waves-and-celestial-light-show>).

ЕФЕКТ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ ДЛЯ ГАЛАКТИК І СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК

Перевірка ефекту ГЧЗ на галактичних відстанях має свої труднощі не тільки тому, що потрібно виділяти космологічне червоне зміщення. Відкриття прискореного розширення Всесвіту (Нобелівська премія з фізики 2011 р.) вступає у протиріччя з багатьма спостережуваними даними, які потребують пояснення. Зокрема з тими, які свідчать, що це розширення має бути сповільненим. Є два найпоширеніші підходи пояснення невідповідностей спостереженням. Перший пов'язаний із припущенням існування невідомої субстанції з від'ємним тиском — темної енергії, яка домінує в енергетичному балансі Всесвіту, прискорюючи його розширення. Другий підхід пов'язаний з тим, що ЗТВ не спрацьовує на космологічних масштабах і не може пояснити гравітаційні зміни простору-часу, які могли б призвести до уповільнення розширення Всесвіту. Одним із методів підтвердження висновків ЗТВ на таких масштабах є вимірювання ефекту ГЧЗ для галактик і скупчень галактик.

Загальна теорія відносності передбачає, що при розгляді, наприклад, пари галактик більш масивна галактика буде деформувати простір-час у більшій мірі, ніж менш масивна галактика. У результаті світло, що випромінює масивніша галактика, буде більш червоним (з довшою довжиною хвилі). Нещодавно, у 2017 р., в серії робіт Алама та ін. [12, 67] опубліковано результати обробки даних півмільйона галактик вибірок CMASS і SDSS/BOSS зі Слоунівського цифрового огляду неба (SDSS) та показано, що масивніші галактики мають у середньому більше значення ГЧЗ, ніж менш масивні. При цьому для отримання гравітаційного червоного зміщення

галактик за їхніми спектрами використовувалися фотометричні дані про видимі величини і колір, на величину яких впливають пекулярні швидкості галактик (у т. ч. ефект Доплера та релятивістські наближення).

У серії робіт нами було виконано мультихвильовий аналіз параметрів ізольованих галактик з активними ядрами (АЯГ) на червоних зміщеннях $z < 0.1$ [46], у т. ч. спектральний та часовий аналіз рентгенівських даних для 13 ізольованих АЯГ із цієї вибірки у широкому діапазоні енергій від 0.5 до 500 кеВ [57] за даними «Chandra», «Suzaku», «XMM-Newton», «Swift», «INTEGRAL», «NuStar». У залежності від якості спектрів, для них були отримані значення таких величин як «внутрішня» (виправлена за поглинання) світність у діапазоні 0.5...2.0 кеВ та 2...10 кеВ у одиницях 10^{33} Дж/с, значення степеневого індексу Γ , величини нейтрального поглинання (стовпчикова густина N_H) в одиницях 10^{20} см⁻², енергії експоненційного обрізання E_{cut} та параметра відбиття R , проведено оцінку мас центральної чорної діри. Така вибірка ізольованих АЯГ може слугувати тестовою вибіркою для галактик Місцевого Всесвіту, оскільки ці галактики не мали впливу навколишніх галактик упродовж останніх 3 млрд років. Отримано, що основні спектральні характеристики активного ядра ізольованих галактик у діапазоні 0.5...12 кеВ не відрізняються від таких характеристик галактик у щільнішому оточенні, а отже, доведено, що активність ядра галактик зумовлена здебільшого внутрішніми фізичними процесами. Зокрема, за порівнянням спостережуваного прояву різних сценаріїв темпів акреції на центральну надмасивну чорну діру вперше виявлено, що окремі представники ізольованих галактик демонструють субедінгтонівську акрецію з характерним надлишком у м'якому рентгенівському діапазоні. Зважаючи на високу якість рентгенівських спектрів, можливість доповнення цих даних даними із інших діапазонів електромагнітного спектру (УФ, видимий), точні визначення червоного зміщення, ізольовані АЯГ можуть бути використані для оцінки ефекту ГЧЗ у близьких галактиках у рентгенівському діапазоні (надійнішими у такій постановці задачі будуть об'єкти типу Sy1 з вузькими лініями).

Варто відзначити нещодавню роботу, виконану у 2011 р. під керівництвом Р. Войтака для досліджень скупчень галактик, відібраних із огляду SDSS [64]. Ефект ГЧЗ у цьому випадку полягає в тому, що фотони, які надходять із центра масивного скупчення галактик, повинні зміщуватися сильніше в червону частину спектру, ніж фотони, які надходять із зовнішніх областей скупчення. Але для типового скупчення ефект ГЧЗ значно менший (на два порядки), ніж кінематичний ефект за рахунок руху галактик у скупченні. Ідея методу, що дозволяє розділити гравітаційний та кінематичний ефекти, враховує, що останній призводить до симетричного розширення спостережуваного розподілу швидкостей, тоді як ГЧЗ зсуває центральну частину цього розподілу. Зважаючи на порядок величини ГЧЗ, цілком ясно, що для впевненого вимірювання необхідно мати дуже велику кількість галактик зі спектроскопічно вимірними швидкостями, які пов'язані з ірегулярностями структури скупчень. Щоб вирішити цю задачу, було проведено усереднення даних для близько 8000 скупчень галактик та показано, що зміщення до червоного кінця спектру узгоджується з передбаченнями ЗТВ на 99 % рівні статистичної достовірності. Вперше ефект ГЧЗ було підтверджено астрономічними спостереженнями на масштабах, у 10^{22} разів більших, ніж у лабораторних наземних експериментах. У роботі [64] зазначено, що цей результат може бути пояснений у рамках ЗТВ і не відповідає деяким альтернативним космологічним моделям без темної матерії.

Чи можлива перевірка ефекту ГЧЗ для рентгєнівських скупчень галактик, статистична вибірка яких зростає з появою нових спостережуваних даних, отриманих діючими космічними обсерваторіями? Перевірка ефекту ГЧЗ для рентгєнівських скупчень галактик є більш складним завданням, оскільки потребує детальної обробки центральної частини рентгєнівського спектру скупчення галактик, а саме виділення найяскравішої галактики скупчення. Зважаючи на те, що такі методи обробки вже впроваджуються [33], постає необхідність створення програмного забезпечення, яке б надавало детальнішу картографію різних за енергетичними показниками зон центральної

частини скупчення галактик з метою виявлення типових спектральних особливостей. Надійнішими тут будуть дані рентгєнівської космічної обсерваторії «Сузаку», інструменти якої можуть спостерігати розподіл міжгалактичного газу в складі скупчень уздовж усього віріального радіуса. У наших роботах [19, 20] досліджувалася еволюція світності L_x , температури газу T_g і маси газу M_g для понад 20 рентгєнівських скупчень галактик на червоних зміщеннях $z < 1.4$, що спостерігалися космічними обсерваторіями «Чандра» і «ХММ-Ньютон». У припущенні гідростатичної рівноваги міжгалактичного газу і сферичної симетрії скупчення було показано, що еволюція $M_g - T_g$ є незначною, в той час як світність і маса $M_g - L_x$ еволюціонують стрімко з червоним зміщенням. Для близько 130 скупчень галактик, що спостерігалися КА «Чандра», було отримано спостережні профілі густини матерії і температури газу, визначено профілі повної маси (у т. ч. баріонної і темної матерії), а також профілі розподілу газу вздовж віріального радіуса [17, 18, 56] з урахуванням впливу найяскравішої галактики скупчень. Статистична вибірка наявних даних щодо рентгєнівських скупчень галактик ще не є достатньою для перевірки ефекту ГЧЗ, хоча відповідне програмне забезпечення і його апробація вже виконані. Варто відзначити, завдяки ефекту ГЧЗ рентгєнівське випромінювання, зокрема скупчень галактик, може мати зсув, який буде спостерігатися у видимому діапазоні. У випадку рентгєнівського випромінювання (довжина хвилі нижча за 1 нм) є просте правило: коротша довжина хвилі означає більшу пропускну здатність, а пропускну здатність в цьому діапазоні довжин хвиль залежить лише від атомного числа хімічних елементів (що вище атомне число, то менша пропускну здатність). Це правило можна використовувати для ототожнення спектральних ліній в рентгєнівському діапазоні, які завдяки ефекту ГЧЗ змістилися в оптичний діапазон електромагнітного спектру. Наочну візуалізацію ефекту ГЧЗ в рентгєнівському діапазоні запропоновано в роботі [50].

ВИСНОВКИ

У роботі представлено короткий огляд досліджень з перевірок ефекту гравітаційного черво-

ного зміщення. Зокрема, експерименти перевірок ефекту ГЧЗ у гравітаційному полі Землі, Сонця і великих планет Сонячної системи, компактних зір і скупчень галактик показують, що він справедливий з високою точністю. Описані експерименти достовірно свідчать про справедливність висновків Загальної теорії відносності Альберта Ейнштейна, даючи підстави стверджувати, що межі її застосування слід шукати на рівні фізики елементарних частинок.

Основні результати цієї статті були представлені автором на міжнародній конференції EWASS-2017, Спеціальній сесії «*Relativity at 100: Past, Present, and Future of observational and theoretical puzzles*» (Прага, Чеська Республіка, 2017 р.), під час якої була презентована монографія «Общая теория относительности: признание временем» [1], написана українськими авторами до 100-річчя Загальної теорії відносності.

Автор висловлює подяку академіку НАН України Я. С. Яцківу і члену-кореспонденту НАН України В. П. Гусиніну за корисні зауваження до статті, яка підготовлена в рамках виконання Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (2012—2017).

ЛІТЕРАТУРА

1. Александров А. Н., Вавилова И. Б., Жданов В. И., Жук А. И., Кудря Ю. Н., Парновский С. Л., Федорова Е. В., Яцкив Я. С. Общая теория относительности: признание временем. — К.: Наук. думка, 2015. — 332 с.
2. Брагинский В. Б., Денисов В. И. (ред.). Экспериментальные тесты теории гравитации. — М.: МГУ, 1989. — 254 с.
3. Коркина М. П., Григорьев С. Б. Эксперименты ОТО в Солнечной системе // Вісник астрон. шк.. — 2000. — 1, № 2. — С. 29—37.
4. Корсунь А. О. Вимір часу від давніх-давен до сучасності. — К.: Техніка, 2009. — 176 с.
5. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — М.: Мир, 1977.
6. Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 296 с.
7. Эйнштейн А. О специальной и общей теории относительности / Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — С. 530—600.
8. 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. — К.: ГАО НАН України, 2005. — 288 с.
9. 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. — К.: ГАО НАН України, 2013. — 264 с.
10. Яцків Я. С., Корсунь А. О., Хода О. О. Базове координатно-часове забезпечення розвитку в Україні топографо-геодезичної діяльності, землевпорядкування та навігації рухомих об'єктів // Інноваційні технології. — 2003. — № 4—5. — С. 4—21.
11. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // Phys. Rev. Letters. — 2017. — 119. — P. 161101.
12. Alam Shadab, Croft Rupert A. C., Ho Shirley, Zhu Hongyu, Giusarma Elena. Relativistic Effects on Galaxy Redshift Samples due to Target Selection (2017) arXiv:1709.07856
13. Alley C. O., Cutler L. S., Reisse R., et al. Experimental Gravitation // Proc. of the conf. at Pavia (1976) / Ed. B. Bertotti. — Academic Press, 1977.
14. Antoniadis J., Freire P. C. C., Wex N., et al. A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary // Science. — 2013. — 340 (6131): 1233232.
15. Ashby N. Relativistic effects in the Global Positioning System // Dadhich N. and Narlikar J. V. eds., Gravitation and Relativity: At the Turn of the Millennium. 15th International Conference on General Relativity and Gravitation. — Inter-University Center for Astron. Astroph., Pune, India. — 1998. — P. 231—258.
16. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativ. — 2003. — 6, N 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>
17. Babyk Iu. V., Vavilova I. B. Comparison of Optical and X-ray Mass Estimates of the Chandra Galaxy Clusters at $z < 0.1$ // Odessa Astron. Publ. — 2013. — 26. — P. 175—178.
18. Babyk Yu. V., Del Popolo A., Vavilova I. B. Chandra X-ray galaxy clusters at $z < 1.4$ // Astron. Reports. — 2014. — 58, N 9. — P. 587—610.
19. Babyk I., Vavilova I. The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the LX-TX-M scaling relations using Chandra and XMM-Newton observations // Astrophys. and Space Sci. — 2014. — 353, N 2. — P. 613—619.
20. Babyk I., Vavilova I. The Chandra X-ray galaxy clusters at $z < 1.4$: constraints on the evolution of LX-T Mg relations // Astrophys. and Space Sci. — 2014. — 349, N 1. — P. 415—421.
21. Barstow M. A., Bond H. E., Holberg J. B., et al. Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2005. — 362. — P. 1134—1142.
22. Brault J. W. The gravitational redshift in the Solar spectrum: Doctoral dissertation. — Princeton Univ., 1962. // Abstract: Bull. Amer. Phys. Soc. — 1963. — 8. — P. 28.

23. Burgay M., D'Amico N., Possenti A., Manchester R. N., et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system // Nature. — 2003. — **426**. — P. 531–533.
24. Cacciapuoti L., Salomon Ch. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment // Eur. Phys. J. — Special Topics. — 2009. — **172**. — P. 57–68.
25. Cottam J., Paerels F., Mendez M. Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star // Nature. — 2002. — **420**. — P. 51–54.
26. Cuesta H. J. M., Salim J. M. Non-linear electrodynamics and the gravitational redshift of highly magnetized neutron stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2004. — **354**. — P. L55–L59.
27. Damour T., Taylor J. H. On the orbital period change of the binary pulsar RSR 1913+16 // Astrophys. J. — 1991. — **366**. — P. 501–511.
28. Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., Roberts M. S. E., Hessels J. W. T. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay // Nature. — 2004. — **467** (7319). — P. 1081–1083.
29. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // Ann. Phys. — 1911. — **35**. — P. 898–908.
30. Godone A., Novero C., Tavella P. Null gravitational redshift experiment with nonidentical atomic clocks // Phys. Rev. D. — 1995. — **51**. — P. 319–323.
31. Guinot B. Time scales in the context of general relativity // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. — 2011. — **369**, N 1953. — P. 4131–4142.
32. Hafele J. C., Keating R. E. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains // Science. — 1972. — **177**, N 4044. — P. 166–168.
33. Hogan M. T., McNamara B. R., Pulido F. A., et al. The Onset of Thermally Unstable Cooling from the Hot Atmospheres of Giant Galaxies in Clusters: Constraints on Feedback Models // Astrophys. J. — 2017. — **851**, N 1. — article id. 66. — 20 p.
34. Hulse R. A., Taylor J. H. Discovery of a pulsar in a binary system // Astrophys. J. Lett. — 1975. — **195**. — P. L51–L53.
35. Iyer B.R., Bhawal B. Black holes, gravitational radiation and the Universe. Essays in honor of C. V. Vishveshwara. — Springer-Science+Business Media, B.V., 1999.
36. Kasliwal M. M., et al. Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger // Science (16 October 2017). — eprint arXiv:1710.05436.
37. Kramer M., Stairs I. H., Manchester R. N., et al. Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar // Science. — 2006. — **314**, N 5796. — P. 97–102.
38. Laurent Ph., Massonnet D., Cacciapuoti L., Salomon Ch. The ACES/PHARAO space mission // C. R. Phys. — 2015. — **16**, N 5. — P. 540–552.
39. Lyne A. G., Burgay M., Kramer M., et al. A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics // Science. — 2004. — **303**, N 5661. — P. 1153–1157.
40. Masachika I., Tadayasu D., Masanobu O., et al. Estimation of the surface gravitational redshift of a neutron star with the broad spectral feature detected during the thermonuclear X-ray Burst. Retrieved from: http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/content/files/NSMAT2016/Presentation/Iwai_NSMAT2016.pdf.
41. Meynadier F., Delva P., le Poncin-Lafitte C., et al. Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) data analysis // arXiv 1709.06491v1 (2017)
42. Overduin J. Testing Einstein (2007, December). Retrieved from <https://einstein.stanford.edu/SPACETIME/space-time3.html>
43. Pound R. V., Rebka G. A. Apparent weight of photons // Phys. Rev. Lett. — 1960. — **4**, N 7. — P. 337–341.
44. Pound R. V., Snider J. L. Effect of Gravity on Nuclear Resonance // Phys. Rev. Lett. — 1964. — **13**, N 18. — P. 539–540.
45. Procyk R., Truong B. Gravitational redshift. Retrieved from: http://www.physics.brocku.ca/Courses/1P22_DAgostino/samples/GravRed.pdf
46. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., et al. The 2MIG isolated AGNs — I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2015. — **447**, N 3. — P. 2209–2223.
47. Rafikov R. R., Lai D. Effects of Pulsar Rotation on Timing Measurements of the Double Pulsar System J0737-3039 // Astrophys. J. — 2006. — **641**. — P. 438–446.
48. Ransom S. M., Stairs I. H., Archibald A. M., et al. A millisecond pulsar in a stellar triple system // Nature. — 2014. — **505**. — P. 520–524.
49. Sanwal D., Pavlov G. G., Zavlin V. E., Teter M. A. Discovery of absorption features in spectrum of an isolated neutron star // Astrophys. J. — 2002. — **574**. — P. L61–L64.
50. Šimkovič S., Teleki A. Visualization of the X-ray by gravitational redshift. <https://conferences.ukf.sk/index.php/phdconf/phdconf2012/paper/download/977/287>
51. Schild A. Gravitational theories of the Whitehead type and the Principle of Equivalence. // Evidence for Gravitational theories / Ed. Muller C. — New York: Academic Press, 1962.
52. Sigurdsson S., Richer H. B., Hansen B. M., et al. A young white dwarf companion to pulsar B1620–26: evidence for early planet formation // Science. — 2003. — **301**. — P. 193–196.
53. Thorsett S. E., Arzoumanian Z., Camilo F., Lyne A. G. The triple pulsar system PSR B1620–26 in M4 // Astrophys. J. — 1999. — **523**. — P. 763–770.

54. Touboul P., Metris G., Rodrigues M., et al. MICROSCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — **119**. — article 231101.
55. Trimble V., Barstow M. (2010). Gravitational redshift and White Dwarf stars. *Einstein Online*, 04. Retrieved from http://www.einstein-online.info/spotlights/redshift_white_dwarfs University of Illinois (November, 1995).
56. Vavilova I. B., Bolotin Yu. L., Boyarsky A. M., et al. Dark matter: Observational manifestation and experimental searches. — Kiev: Akadempriodyka, 2015. — 375 p.
57. Vavilova I. B., Vasylenko A. A., Babyk Iu. V., Pulatova N. G. X-Ray Spectral Properties of the Isolated AGNs: NGC 1050, NGC 2989, ESO 317-038, ESO 438-009 // *Odessa Astron. Publ.* — 2015. — **28**. — P. 150—153.
58. Vessot R. F. C., Levine M. V. A test of the equivalence principle using a space-borne clock // *Gen. Rel. Grav.* — 1979. — **10**. — P. 181.
59. Vessot R. F. C., Levine M. V., Mattison E. M., et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — **45**. — P. 2081—2084.
60. Wilhelm K., Dwivedi B. N. On the Gravitational redshift // arxiv.org/abs/1708.06609.
61. Will C. M. *Theory and experiment in gravitational physics.* — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
62. Will C. M. The confrontation between General Relativity and experiment // *Astrophys. and Space Sci.* — 2003. — **283**, N 4. — P. 543—552.
63. Will C. M. The confrontation between General Relativity and Experiment // *General Relativity and John Archibald Wheeler* / Eds I. Ciufolini, R. Matzner. — Springer, 2010. — P. 73—93.
64. Wojtak R., Hansen S. H., Hjorth J. Gravitational redshift of galaxies in clusters as predicted by general relativity // *Nature.* — 2011. — **477**. — P. 567—569.
65. Zhao Xian-Feng. The surface gravitational redshift of the neutron star PSR J1614-2230 // *Acta phys. pol. B.* — 2013. — **44**, N 2. — P. 213—219.
66. Zhao Xian-Feng, Jia Huan-Yu. The surface gravitational redshift of the massive neutron star PSR J0348+0432 // *Rev. mex. astron. y astrofis.* — 2014. — **50**. — P. 103—108.
67. Zhu Hongyu, Alam Shadab, Croft Rupert A. C., et al. N-body simulations of gravitational redshifts and other relativistic distortions of galaxy clustering // [arXiv:1709.07859](https://arxiv.org/abs/1709.07859), 2017.
68. Giammichele N., Charpinet S., Fontaine, et al. A large oxygen-dominated core from the seismic cartography of a pulsating white dwarf // *Nature. Lett.* — 07 November 2017. — doi:10.1038/nature25136.
69. Savchenko V., Ferrigno C., Kuulkers E., et al. INTEGRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817 // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — **848**, N 2. — L15.

Стаття надійшла до редакції 18.01.18

REFERENCES

1. Alexandrov A. N., Vavilova I. B., Zhdanov V. I., et al. *General Relativity Theory: Recognition through Time.* Kiev, *Naukova dumka*, 332 pp. (2015).
2. Braginsky V. B., Denisov V. I. (Eds.). *Experimental tests of the theory of gravitation.* Moscow, MSU, 254 P. (1989). (In Russian).
3. Korkina M. P., Grigorev S. B. GRT Experiments in the Solar System. *Astronomical School's reports*, **1(2)**: 29—37 (2000). (In Russian).
4. Korsun' A.O. *Measurement of time from ancient times to the present.* Kyiv: Tekhnika, 176 P. (2009). (In Ukrainian).
5. Misner Charles W., Thorne Kip S., Wheeler John A. *Gravitation.* San Francisco: W.H. Freeman and Co. (1973).
6. Will Clifford M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 396 P. (1993).
7. Einstein A. *Relativity: The Special and General Theory* (1916). In: Methuen & Co Ltd, Authorised translation by Robert W. Lawson (1920).
8. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., et al. *General Relativity theory: tests through time.* Kyiv, *MAO NAS of Ukraine*, 288 p. (2005).
9. Yatskiv Ya. S., Alexandrov A. N., Vavilova I. B., et al. *General Relativity: horizons for tests.* Kyiv: *MAO NAS of Ukraine*, 264 pp. (2013). (In Ukrainian).
10. Yatskiv Ya. S., Korsun' A. O., Khoda O. O. Basic coordinate-time protection of development in Ukraine of topographic and geodetic activity, land-regulation and navigation of moving objects. *Innovation technologies*, **4-5**: 4-21 (2003). (In Ukrainian).
11. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Letters*, **119**, 161101 (2017)..
12. Alam Shadab, Croft Rupert A. C., Ho Shirley, Zhu Hongyu, Giusarma Elena. Relativistic Effects on Galaxy Redshift Samples due to Target Selection. *arXiv:1709.07856* (2017)
13. Alley C.O., Cutler L.S., Reisse R., et al. *Experimental Gravitation. Proc. of the conf. at Pavia* (1976), ed. B. Bertotti, Academic Press, 1977.
14. Antoniadis J., Freire P. C. C., Wex N., et al. A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary. *Science*, **340** (6131): 1233232 (2013).
15. Ashby N. Relativistic effects in the Global Positioning System. Dadhich N. and Narlikar J. V. eds., *Gravitation and Relativity: At the Turn of the Millennium. 15th International Conference on General Relativity and Gravitation.* Inter-University Center for Astron. Astroph., Pune, India, P. 231—258 (1998).
16. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System. *Living Rev. Relativ.*, **6**: 1 (2003). <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.

17. Babyk Iu. V., Vavilova I. B. Comparison of Optical and X-ray Mass Estimates of the Chandra Galaxy Clusters at $z < 0.1$. *Odessa Astron. Publ.*, **26**: 175—178 (2013).
18. Babyk Yu.V., Del Popolo A., Vavilova I. B. Chandra X-ray galaxy clusters at $z < 1.4$. *Astron. Rep.*, **58**(9):587—610 (2014).
19. Babyk I., Vavilova I. The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the LX-TX-M scaling relations using Chandra and XMM-Newton observations. *Astrophys. Space Sci.*, **353**(2):613—619 (2014).
20. Babyk I., Vavilova, I. The Chandra X-ray galaxy clusters at $z < 1.4$: constraints on the evolution of LX-T Mg relations. *Astrophys. Space Sci.*, **349**(1): 415—421 (2014).
21. Barstow M. A., Bond H. E., Holberg J. B., et al. Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **362**: 1134—1142 (2005).
22. Brault J. W. The gravitational redshift in the Solar spectrum. Doctoral dissertation. Princeton Univ, 1962, Abstract: *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **8**: 28 (1963).
23. Burgay M., D'Amico N., Possenti A., et al. An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system. *Nature*, **426**: 531—533 (2003).
24. Cacciapuoti L., Salomon Ch. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment. *The European Physical Journal — Special Topics*, 172: 57—68 (2009). — DOI: 10.1140/epjst/e2009-01041-7 (2009).
25. Cottam J., Paerels F., Mendez M. Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star. *Nature*, **420**: 51—54 (2002).
26. Cuesta H. J. M., Salim J. M. Non-linear electrodynamics and the gravitational redshift of highly magnetized neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **354**: L55—L59 (2004). doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08375.x
27. Damour T., Taylor J. H. On the orbital period change of the binary pulsar RSR 1913+16. *Astroph. J.*, **366**: 501—511 (1991).
28. Demorest P. B., Pennucci T., Ransom S. M., et al. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature*, **467** (7319): 1081—1083 (2010).
29. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Ann. Phys.*, 35:898—908 (1911).
30. Godone A., Novero C., Tavella P. Null gravitational redshift experiment with nonidentical atomic clocks. *Phys. Rev. D.*, **51**: 319—323 (1995).
31. Guinot B. Time scales in the context of general relativity. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, **369**(1953): 4131—4142 (2011).
32. Hafele J. C., Keating R. E. Around the world atomic clocks: predicted relativistic time gains. *Science* (14.07.1972), **177**(4044): 166—168 (1972).
33. Hogan M. T., McNamara B. R., Pulido F. A., et al. The Onset of Thermally Unstable Cooling from the Hot Atmospheres of Giant Galaxies in Clusters: Constraints on Feedback Models. *Astrophys. J.*, **851**(1), article id. 66, 20 pp. (2017).
34. Hulse R. A., Taylor J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J. Lett.*, **195**: L51—L53 (1975).
35. Iyer B. R., Bhawal B. Black holes, gravitational radiation and the Universe. Essays in honor of C.V. Vishveshwara. Springer-Science+Business Media, B.V. (1999)
36. Kasliwal M. M., et al. Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger. *Science* (16 October 2017), eprint *arXiv:1710.05436* (2017).
37. Kramer M., Stairs I. H., Manchester R. N., et al. Tests of General Relativity from Timing the Double Pulsar. *Science*, **314**(5796):97—102 (2006).
38. Laurent Ph., Massonnet D., Cacciapuoti L., Salomon Ch. The ACES/PHARAO space mission. *C. R. Phys.*, **16**(5): 540—552 (2015).
39. Lyne A. G., Burgay M., Kramer M., et al. A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics. *Science*, **303**(5661): 1153—1157 (2004).
40. Masachika I., Tadayasu D., Masanobu O., Yoshitomo M., Hideyuki M., Shigetaka S. Estimation of the surface gravitational redshift of a neutron star with the broad spectral feature detected during the thermonuclear X-ray Burst. Retrieved from: http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/content/files/NSMAT2016/Presentation/Iwai_NSMAT2016.pdf.
41. Meynadier F., Delva P., le Poncin-Lafitte C., Guerlin C., Wolf P. Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) data analysis. *arXiv 1709.06491v1* (2017)
42. Overduin, J. (2007, December). Testing Einstein. Retrieved from <https://einstein.stanford.edu/SPACETIME/spacetime3.html>
43. Pound R. V., Rebka G. A. Apparent weight of photons. *Phys. Rev. Lett.*, **4**(7): 337—341(1960).
44. Pound R. V., Snider J. L. Effect of Gravity on Nuclear Resonance. *Phys. Rev. Lett.*, **13**(18): 539—540(1964).
45. Procyk R., Truong B. Gravitational Redshift. Retrieved from http://www.physics.brocku.ca/Courses/1P22_DAgostino/samples/GravRed.pdf
46. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., et al. The 2MIG isolated AGNs — I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **447**(3): 2209—2223(2015).
47. Rafikov R. R., Lai D. Effects of Pulsar Rotation on Timing Measurements of the Double Pulsar System J0737-3039. *Astrophys. J.*, **641**: 438—446 (2006).
48. Ransom S. M., Stairs I. H., Archibald A. M., et al. A millisecond pulsar in a stellar triple system. *Nature*, **505**: 520—524 (2014).
49. Sanwal D., Pavlov G. G., Zavlin V. E., Teter M. A. Discovery of absorption features in spectrum of an isolated neutron star. *Astroph. J.*, **574**: L61—L64 (2002).
50. Šimkovič S., Teleki A. Visualization of the X-ray by gravitational redshift. <https://conferences.ukf.sk/index.php/phdconf/phdconf2012/paper/download/977/287>

51. Schild A. Gravitational theories of the Whitehead type and the Principle of Equivalence. In: *Evidence for Gravitational theories*, Ed. Muller C. — New York: Academic Press, 1962.
52. Sigurdsson S., Richer H. B., Hansen B. M., et al. A young white dwarf companion to pulsar B1620–26: evidence for early planet formation. *Science*, **301**: 193–196 (2003).
53. Thorsett S. E., Arzoumanian Z., Camilo F., Lyne A. G. The triple pulsar system PSR B1620–26 in M4. *Astrophys. J.*, **523**: 763–770 (1999).
54. Touboul P., Metris G., Rodrigues M., et al. MICROSCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, article 231101 (2017).
55. Trimble V., Barstow M. Gravitational redshift and White Dwarf stars (2010). Einstein Online, 04. Retrieved from http://www.einstein-online.info/spotlights/redshift_white_dwarfs University of Illinois (November, 1995).
56. Vavilova I. B., Bolotin Yu. L., Boyarsky A. M., et al. Dark matter: Observational manifestation and experimental searches. Kyiv, Akadempriodyka, 375 P. (2015).
57. Vavilova I. B., Vasylenko A. A., Babyk Iu. V., Pulatova N. G. X-Ray Spectral Properties of the Isolated AGNs: NGC 1050, NGC 2989, ESO 317-038, ESO 438-009. *Odessa Astron. Publ.*, **28**: 150–153 (2015).
58. Vessot R. F. C., Levine M. V. A test of the equivalence principle using a space-borne clock. *Gen. Rel. Grav.*, **10**: 181 (1979).
59. Vessot R. F. C., Levine M. V., Mattison E. M., et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser. *Phys. Rev. Lett.*, **45**: 2081–2084 (1980).
60. Wilhelm K., Dwivedi B.N. 2013 On the Gravitational redshift. arxiv.org/abs/1708.06609
61. Will C. M. Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993.
62. Will C. M. The confrontation between General Relativity and experiment. *Astroph. Space Sci.*, **283**(4): 543–552 (2003).
63. Will C. M. The confrontation between General Relativity and Experiment. In: General Relativity and John Archibald Wheeler, P.73–93. Eds. Ciufolini I., Matzner R. *Springer*, 547 p. (2010).
64. Wojtak R., Hansen S. H., Hjorth J. Gravitational redshift of galaxies in clusters as predicted by general relativity. *Nature*, **477**: 567–569 (2011).
65. Zhao Xian-Feng. The surface gravitational redshift of the neutron star PSR J1614-2230. *Acta Physica Polonica B*, **44**(2): 213–219 (2013).
66. Zhao Xian-Feng and Jia Huan-Yu. The surface gravitational redshift of the massive neutron star PSR J0348+0432. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, **50**: 103–108 (2014).
67. Zhu Hongyu, Alam Shadab, Croft Rupert A. C., et al. N-body simulations of gravitational redshifts and other relativistic distortions of galaxy clustering. [arXiv:1709.07859](https://arxiv.org/abs/1709.07859) (2017).
68. Giammichele N., Charpinet S., Fontaine et al. A large oxygen-dominated core from the seismic cartography of a pulsating white dwarf. *Nature Letters*, 07 November 2017, doi:10.1038/nature25136
69. Savchenko V., Ferrigno C., Kuulkers E., et al. INTEGRAL detection of the first prompt gamma-ray signal coincident with the gravitational-wave event GW170817. *Astrophys. J. Let.*, **848**(2), L15 (2017).

Received 18.01.18

І. Б. Вавилова

Главная астрономическая обсерватория
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

ЭФФЕКТ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ: ПРОВЕРКИ В НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Представлен краткий обзор экспериментов по проверке эффекта гравитационного красного смещения (ГКС) в наземных и космических экспериментах. В частности, рассмотрены эффект ГКС в гравитационном поле Земли, планет-гигантов Солнечной системы, компактных звезд (белые карлики и нейтронные звезды), где эффект подтверждается с большой точностью. Отдельно обсуждаются возможности проверки ГКС для галактик и скоплений галактик в оптическом и рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра.

Ключевые слова: гравитационное красное смещение, общая теория относительности, навигационные системы, компактные звезды, скопления галактик.

I. B. Vavilova

Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

TESTS OF THE GRAVITATIONAL REDSHIFT EFFECT IN SPACE-BORN AND GROUND-BASED EXPERIMENTS

This paper provides a brief overview of experiments as concerns with the tests of the gravitational redshift (GRS) effect in ground-based and space-borne experiments. In particular, we consider the GRS effects in the gravitational field of the Earth, the major planets of the Solar system, compact stars (white dwarfs and neutron stars) where this effect is confirmed with a higher accuracy. We discuss availabilities to confirm the GRS effect for galaxies and galaxy clusters in visible and X-ray ranges of the electromagnetic spectrum.

Keywords: gravitational redshift, General Relativity Theory, navigation systems, compact stars, galaxy clusters.