



УДК 530.122

CHASING GRAVITATIONAL WAVES

ПЕРЕСЛІДУЮЧИ ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ

Chesnokov Y.D. / Чесноков Є.Д.

Student / студент

Chursanova M.V. / Чуранова М.В.

PhD, as.prof. / к.ф.-м.н, доцент

ORCID: 0000-0001-6977-7473

Linchevskiy I.V. / Лінчевський І.В.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor / доктор ф.-м. н., професор

ORCID: 0000-0002-2896-9580

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, Beresteyskiy prospekt (Peremohy), 37, 03056

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені

Ігоря Сікорського», Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37, 03056

Анотація. Робота представляє огляд новітніх експериментальних методів спостереження гравітаційних хвиль, аналіз досягнутого прогресу, а також розгляд найбільш перспективних технологій і майбутніх напрямів розвитку галузі. Двадцять перше століття стало епохою прориву в теорії гравітаційних хвиль, бо тепер їх існування безпосередньо підтверджене експериментально. Історичне перше пряме спостереження (GW150914), здійснене колабораціями LIGO та Virgo, підтвердило останні передбачення загальної теорії відносності Альберта Ейнштейна та відкрило нове вікно у Всесвіт – гравітаційно-хвильову астрономію. Було зроблено безцінні відкриття, які наблизили нас до розгадки природи Всесвіту, процесів зоряної еволюції. Однак, надзвичайно мала амплітуда гравітаційних хвиль, а як наслідок слабка гравітаційна взаємодія вимагає постійного вдосконалення чутливості та надійності детекторів, які їх уловлюють, через що дослідники не планують зупинятись на досягнутому.

У найближчій перспективі ключовим завданням є досягнення робочого діапазону частот від 1 Гц до 10 кГц з покращеною в 10-15 разів чутливістю, що дозволить реєструвати події по всьому видимому Всесвіту і, можливо, скласти всю отриману інформацію в один логічний пазл.

Ключові слова: гравітаційні хвилі, інтерферометр, LIGO, Virgo

Вступ

Про існування гравітаційних хвиль стверджував ще сам Альберт Ейнштейн після виходу його знаменитої теорії відносності у світ [1]. Завдяки фізичному доведенню того, що надмасивні тіла спотворюють простір-час, була поставлена цілком логічна теорія – під час взаємодії таких тіл між собою виникає збурення простору, тобто утворюються коливання, які і є так званими гравітаційними хвилями. Проте вчені, очевидно, мають знайти практичне, експериментальне підтвердження цього висунутого концепту. Саме тут і з'явилися основні перешкоди для доведення існування гравітаційних хвиль – справа в тому, що



гравітаційна взаємодія настільки слабка, що між об'єктами на Землі вона фактично невідчутна для людського сприйняття [2]. Щоб зареєструвати гравітаційну хвилю, нам потрібно мати надмасивне небесне тіло, яке рухається з величезною швидкістю, якомога більш близькою до швидкості світла.

Створення гравітаційно-хвильових детекторів

Починаючи з 1962 року, коли було виділено величезні кошти на фінансування подібних проєктів, було побудовано перші детектори, які загалом поділені на два типи – резонансні та інтерферометричні [2]. Функціонування першого виду гравітаційно-хвильових детекторів пов'язане з усім добре знайомим явищем резонансу. Пристрій складається з важкої чавунної болванки, так званої гравітаційної антени, охолодженої до низьких температур. Оскільки при потраплянні гравітаційної хвилі на площину болванки розмір антени змінюється, це зумовлює утворення резонансних хвиль антени, потрібна частота яких була наперед запрограмована вченими. Це потрібно для того, щоб частота гравітаційних хвиль максимально збіглася з резонансною частотою антени, оскільки за цієї умови відбудеться резонанс – амплітуда коливань антени може стати настільки великою, що її можна буде зафіксувати. Цей тип детекторів, беззаперечно, є масштабним винаходом, проте справжній революційний прорив у дослідженні гравітаційних хвиль принесли саме інтерферометричні детектори. Ці детектори, як-от LIGO [3], є надзвичайно чутливими інструментами, призначеними для фіксації крихітних збурень простору-часу, спричинених гравітаційними хвилями [2, 4]. В основі детектора лежить інтерферометр Майкельсона. Він складається з потужного лазера, центрального світлоподільвача і двох довгих, перпендикулярних плечей (тунелів) з дзеркалами на кінцях (рисунок 1). Світлоподільвач розділяє лазерний промінь на два промені, які рухаються туди й назад у плечах, перш ніж знову об'єднатися і потрапити на фотодетектор. Принцип дії ґрунтується на оптичній інтерференції. У стані спокою промені налаштовані так, щоб взаємно гасити один одного на детекторі (темний сигнал), оскільки довжини плечей однакові. Коли ж через детектор проходить гравітаційна хвиля, вона розтягує одне плече і



стискає інше. Ця навіть мікроскопічна різниця в довжині ходу призводить до того, що промені більше не гасять один одного і на детекторі з'являється помітний світловий сплеск. Ця зміна інтенсивності світла і є сигналом виявленої гравітаційної хвилі. Що є не менш цікавим, так це факт, що ключову роль у розробці цього методу детектування взяв В. І. Пустовойт, фізик українського походження, який доклав руку у перше теоретичне обґрунтування методу інтерферометричного детектування гравітаційних хвиль [5].

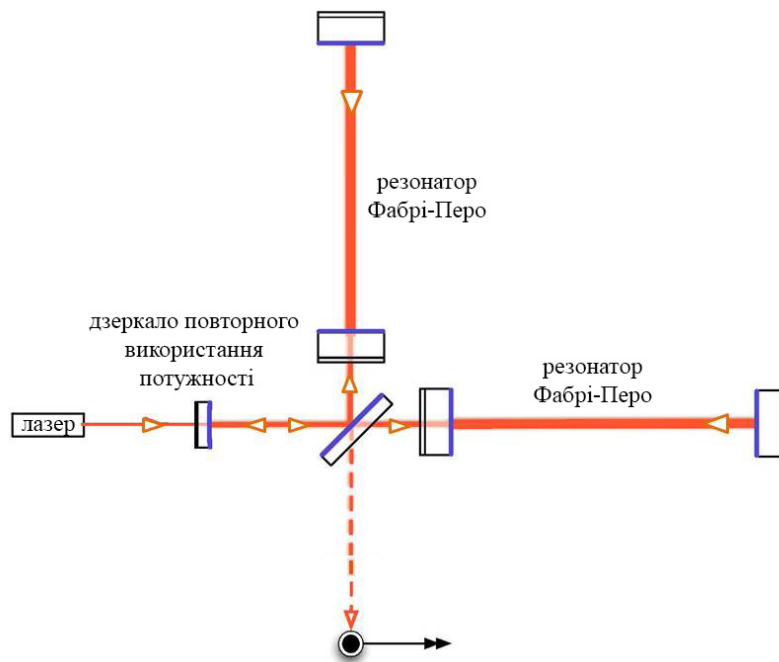


Рисунок 1 - Схема інтерферометричного детектора LIGO, джерело Caltech/MIT/LIGO Lab [3]: базовий інтерферометр Майкельсона з 4-кілометровими резонаторами Фабрі-Перо та дзеркалом повторного використання потужності

Новітні відкриття у фізиці гравітації

Протягом останнього десятиліття відбулася революція в астрономії. Пряме виявлення гравітаційних хвиль, що випромінюються внаслідок злиття подвійної чорної діри, інтерферометричним детектором LIGO 14 вересня 2015 року – гравітаційно-хвильова подія GW150914 – стало переломною подією не лише для демонстрації можливості безпосереднього виявлення гравітаційних хвиль, але й, що більш фундаментально, для відкриття нових знань про ці екзотичні об'єкти та



сам Всесвіт [1, 2]. 17 серпня 2017 року детектори LIGO та Virgo3 спільно виявили злиття подвійної нейтронної зірки, що стало не менш важливою подією, яка призвела до спостереження електромагнітного (ЕМ) випромінювання по всьому спектру завдяки одній з найінтенсивніших астрономічних спостережних кампаній, коли-небудь проведених [6]. 2023 рік ознаменувався проривом у гравітаційно-хвильовій астрономії, який відкрив абсолютно нове «вікно» у низькочастотний Всесвіт. Якщо попередні роки були присвячені виявленню високочастотних «сплесків» від катастрофічних подій, як-от злиття зірок і звичайних чорних дір, то головне відкриття 2023 року – це виявлення стійкого, стохастичного (випадкового) фону низькочастотних гравітаційних хвиль, що безперервно пронизує простір-час. Хоч цей феномен був зафіксований не завдяки наземним лазерним інтерферометрам на кшталт LIGO, а завдяки міжнародним науковим колабораціям, зокрема NANOGrav, які використовували унікальний метод – масиви синхронізації пульсарів (PTA) [7], про цю подію було важко не згадати. Астрономи протягом понад п'ятнадцяти років надзвичайно точно відстежували час прибуття радіоімпульсів від мілісекундних пульсарів, що слугують ідеальними, надзвичайно стабільними космічними годинниками.

Більш чутливі детектори – більш точні результати

Цілком зрозуміло, що зі збільшенням чутливості детекторів результати ставали більш точними і обґрунтованими. Останнім офіційним збірником підтверджених або високоімовірних подій гравітаційних хвиль, зафіксованих та оприлюднених міжнародною колаборацією LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration та KAGRA Collaboration (його ж називають каталогом гравітаційних хвиль) був GWTC-4.0, випущений 26 серпня 2025 року [8]. Спостереження відбувалися з 24 травня 2023 року до 16 січня 2024 року, і було додано 128 нових значущих кандидатів гравітаційно-хвильових сигналів. Загальна кількість подій у каталозі з високою ймовірністю астрофізичного походження ($p_{astro} \geq 0.5$) зросла до 218. Також спостерігалось найбільш масивне злиття бінарної чорної діри, яке спостерігалось на сьогодні, з масою в 236 мас Сонця. Всі ці зрушення відбулись завдяки удосконаленню



інтерферометричних детекторів LIGO, VIRGO та KAGRA (наприклад, у випадку першого було впровадження так званого стиснутого світла, яке зменшило квантовий шум).

Основні плани на майбутнє

Мабуть, одним з найбільш амбіційних задумів є Einstein Telescope – гігантська європейська підземна обсерваторія з трьома плечима завдовжки 10 км, розташованими у формі трикутника, яка буде використовувати криогенну технологію для досягнення безпрецедентної чутливості. ET оперуватиме у високочастотному діапазоні (1 Гц – 10 кГц), продовжуючи роботу LIGO/Virgo/KAGRA, але зі значно більшою чутливістю [9]. Наразі цей проект знаходиться на стадії планування та вибору місця розташування. Очікується запуск у середині 2030-х років.

Не менш цікавим проектом є LISA – спільна місія ESA та NASA. Складатиметься з трьох супутників, розташованих у вигляді трикутника на відстані 2,5 мільйона кілометрів один від одного, і система оперуватиме у низькочастотному діапазоні. Вимірюватиме гравітаційні хвилі від злиття надмасивних чорних дір (які виявити на Землі неможливо через сейсмічний шум) [10].

Висновок

Фізика гравітаційних наразі є передовим театром розвитку для сучасної науки – протягом останнього десятиліття людство значно просунулося у розкритті таємниці цього фізичного явища [1, 2, 6, 7, 8]. Проте заради нових фундаментальних відкриттів про наш Всесвіт вчені потребують нових технологічних рішень та значного покращення наявних детекторів. Є багато амбіційних планів щодо дослідження гравітаційних хвиль [9, 10], що реалізуються просто в цю мить, і, хто знає, що ще сенсаційне ми довідаємось у найближчі роки. Можна сказати лише єдине – допитливі люди ніколи не наситяться розгаданням таємниць, навіть якщо це породжуватиме нові, не менш складні, задачі.



Література:

1. Cervantes-Cota, J. L., Galindo-Uribarri, S., & Smoot, G. F. A brief history of gravitational waves // *Universe*, 2016. – Vol. 2(3). – P. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe2030022>
2. Максименко М. Відкриття століття: гравітаційні хвилі // Матеріали Дев'ятої Всеукраїнської студентської наукової конференції з міжнародною участю «Наука. Освіта. Молодь», м. Умань, 28 квітня 2016 р. – Частина 2. – С. 12-13. Available at: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2016_2/2.pdf
3. LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory // [Electronic resource]. Available at: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo?highlight=interferometer>
4. Pitkin, M., Reid, S., Rowan, S., & Hough, J. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space) // *Living reviews in relativity*, 2011.– Vol. 14(1). – P. 5. DOI: <https://doi.org/10.12942/lrr-2011-5>
5. Бакуменко К. Г. Внесок українських вчених у відкриття гравітаційних хвиль // Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених з міжнародною участю, м. Суми, 24-25 квітня 2018 р. – С. 7-8. Available at: <http://fizmatsspu.sumy.ua/Konferencii/sbor/spetf/spetf-2018.pdf#page=8>
6. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C. et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // *Physical review letters*, 2017. – Vol. 119(16). – P. 161101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
7. Agazie, G., Anumarlapudi, A., Archibald, A. M., Arzoumanian, Z., Baier, J. G., Baker, P. T., ... & NANOGrav Collaboration. The NANOGrav 15 yr Data Set: Harmonic Analysis of the Pulsar Angular Correlations // *The Astrophysical Journal*, 2025. – Vol. 985(1). – P. 99. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adc997>
8. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA



Collaboration: Abac, A. G., Abouelfettouh, I., Acernese, F., Ackley, K., Adhicary, S., Adhikari, D. et al. GWTC-4.0: An introduction to version 4.0 of the gravitational-wave transient catalog // arXiv preprint, 2025. – P. 1-47 DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.18080>

9. Coccia, E. The Einstein Telescope // Proceedings of Science: 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023), Nagoya, Japan, 26 July - 3 August, 2023. – P. 1591: 1-6. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/e902/75ddc7f8b771850fd394780ce6b5199d411c.pdf>

10. Caprini, C., Heffernan, A., Brito, R., Franciolini, G., Nardini, G., Tamanini, N., & Steer, D. Science of the LISA mission: A Summary for the European Strategy for Particle Physics // arXiv preprint, 2025. – P. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.05130>

Abstract. *This paper presents a review of the latest experimental methods for observing gravitational waves, an analysis of the progress achieved to date, as well as a discussion of the most promising technologies and future directions in the field. The twenty-first century has become an era of breakthroughs in gravitational-wave theory, as their existence has now been directly confirmed experimentally. The first historic direct detection (GW150914), carried out by the LIGO and Virgo collaborations, confirmed the final predictions of Albert Einstein's general theory of relativity and opened a new window on the Universe – gravitational-wave astronomy. Invaluable discoveries have been made that have brought us closer to understanding the nature of the Universe and the processes of stellar evolution. However, the extremely small amplitude of gravitational waves, and consequently the weakness of gravitational interaction, requires continuous improvement of the sensitivity and reliability of the detectors that observe them, which is why researchers do not intend to stop at the achievements attained.*

In the near future, a key objective is to reach an operational frequency range from 1 Hz to 10 kHz with a sensitivity improved by a factor of 10-15, which will make it possible to detect events throughout the entire observable Universe and, possibly, to assemble all the acquired information into a single logical puzzle.

Keywords: *gravitational waves, interferometer, LIGO, Virgo*

Стаття відправлена: 20.12.2025 р.

© Чесноков Є.Д., Чурсанова М.В., Лінчевський І.В.