

# ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ – НОВИЙ СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ВСЕСВІТУ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Розглядаються фізична природа гравітаційних хвиль як збурень просторово-часового континууму, передбачених загальною теорією відносності Ейнштейна. Проаналізовано принцип роботи лазерно-інтерферометричних детекторів LIGO та Virgo, описано ключові астрофізичні джерела гравітаційного випромінювання. Оцінено перспективи гравітаційно-хвильової астрономії як нового методу спостереження Всесвіту.

**Ключові слова:** гравітаційні хвилі, загальна теорія відносності, LIGO, гравітаційно-хвильова астрономія, нейтронні зірки, чорні діри.

## Abstract

The physical nature of gravitational waves as perturbations of the spacetime continuum predicted by Einstein's general theory of relativity is considered. The operating principle of laser-interferometric detectors LIGO and Virgo is analyzed, and the key astrophysical sources of gravitational radiation are described. The prospects of gravitational-wave astronomy as a new method of observing the Universe are assessed.

**Keywords:** gravitational waves, general theory of relativity, LIGO, gravitational-wave astronomy, neutron stars, black holes.

## Вступ

У 1916 році Альберт Ейнштейн передбачив існування гравітаційних хвиль як невід'ємний наслідок загальної теорії відносності (ЗТВ). Проте протягом майже століття це явище залишалось суто теоретичним: надзвичайно мала величина очікуваного сигналу вважалась недосяжною для тодішніх технологій [1].

Справжня революція відбулася 14 вересня 2015 року, коли детектор LIGO вперше зареєстрував гравітаційно-хвильовий сигнал від злиття двох чорних дір масами приблизно 29 та 36 сонячних мас на відстані близько 1,3 млрд світлових років [2]. Це відкриття, відзначене Нобелівською премією з фізики 2017 року, поклало початок новій ері – гравітаційно-хвильовій астрономії.

Метою роботи є аналіз фізичної природи гравітаційних хвиль, принципів їх детектування та перспектив застосування як нового інструменту дослідження Всесвіту. Основні етапи дослідження:

1. Вивчення теоретичних основ гравітаційного випромінювання в рамках ЗТВ.
2. Аналіз конструкції та принципу роботи лазерних інтерферометрів LIGO та Virgo.
3. Дослідження астрофізичних джерел та зареєстрованих подій.
4. Оцінка перспектив розвитку гравітаційно-хвильової астрономії.

## Результати досліджень

Гравітаційні хвилі – це поперечні збурення метрики простору-часу, що поширюються зі швидкістю світла та виникають внаслідок прискореного руху масивних тіл з несферичним розподілом маси. Їх амплітуда характеризується безрозмірною деформацією метрики – штаммом  $h$ :

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

де  $\Delta L$  – зміна відстані між пробними масами,  $L$  – базова відстань. Для зареєстрованих сигналів  $h \sim 10^{-21}$ , що відповідає зміні відстані, меншій за діаметр протона, на базі 4 км [3].

Принцип детектування базується на лазерній інтерферометрії Майкельсона (рис. 1). Детектор LIGO складається з двох взаємно перпендикулярних плечей довжиною 4 км. Прохідна гравітаційна хвиля деформує простір-час несиметрично: одне плече стискається, інше – розтягується. Це призводить до зміни різниці оптичних шляхів і виявляється як зміна інтенсивності інтерференційної картини.

Ефективна чутливість системи підвищується завдяки резонаторам Фабрі-Перо, що збільшують ефективну довжину плеча порядку тисячі кілометрів [2].

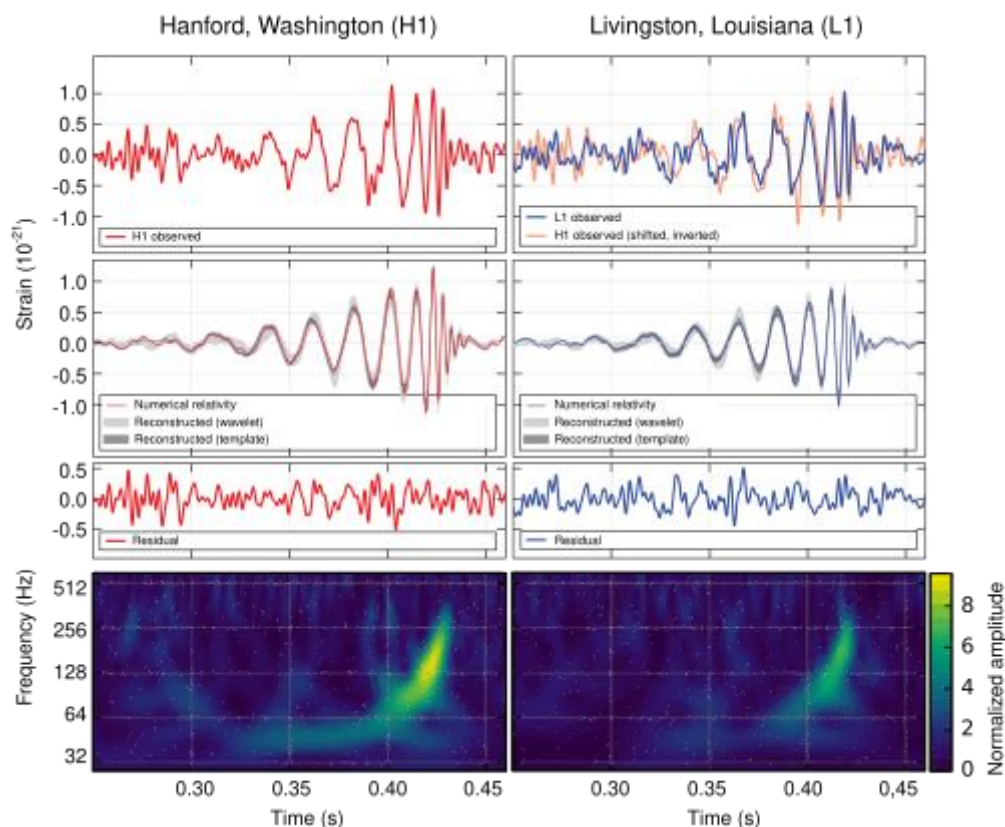


Рисунок 1 – Схема лазерного інтерферометра LIGO для реєстрації гравітаційних хвиль

Основними астрофізичними джерелами гравітаційних хвиль є:

- злиття компактних подвійних систем (чорна діра – чорна діра, нейтронна зірка – нейтронна зірка);
- асиметричні вибухи наднових;
- пульсари з несферичною формою (безпервне випромінювання);
- реліктовий гравітаційно-хвильовий фон від ранньої епохи Всесвіту.

Особливе значення має подія GW170817 – злиття двох нейтронних зірок, зафіксоване одночасно у гравітаційних хвилях і в електромагнітному діапазоні. Це перший приклад багатоканальної астрономії: спостереження однієї події різними методами дало змогу підтвердити, що гравітаційні хвилі поширюються зі швидкістю світла з точністю до  $10^{-15}$  та встановити кілонову як джерело важких елементів (золото, платина) [4].

### Перспективи застосування

Наступне покоління детекторів – Einstein Telescope (підземний, плечі 10 км) та Cosmic Explorer (плечі 40 км) – підвищить чутливість у 10–100 разів порівняно з LIGO, що дозволить реєструвати злиття по всьому видимому Всесвіту [3]. Космічна антена LISA, яку планується запускити у 2035 році, охопить низькочастотний діапазон і дасть змогу спостерігати надмасивні чорні діри в центрах галактик.

Гравітаційно-хвильова астрономія відкриває можливості, недоступні для електромагнітних спостережень: дослідження внутрішньої структури нейтронних зірок, перевірку ЗТВ у сильногравітаційному режимі та вивчення чорних дір як об'єктів, що не випромінюють світла.

## Висновки

Відкриття гравітаційних хвиль стало найважливішим досягненням фізики початку XXI століття, відкривши нове «вікно» у Всесвіт. Лазерно-інтерферометричні детектори перетворили теоретичне передбачення Ейнштейна на потужний інструмент астрофізики. Подальший розвиток мережі детекторів і перехід до багатоканальних спостережень обіцяє революційні відкриття в розумінні природи чорних дір, нейтронних зірок і фундаментальних основ гравітації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Physical Review Letters. – 2016. – Vol. 116. – P. 061102.
2. Cervantes-Cota J. L., Galindo-Uribarri S., Smoot G. F. A Brief History of Gravitational Waves // Universe. – 2016. – Vol. 2, No. 3. – P. 22.
3. Maggiore M. Gravitational Waves: Theory and Experiments. – Oxford : Oxford University Press, 2007. – Vol. 1. – 572 p.
4. Abbott B. P. et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral // Physical Review Letters. – 2017. – Vol. 119. – P. 161101.

**Чорноморець Назар Миколайович** – студент групи ІПІ-25Б, Факультет Інформаційних Технологій та Комп'ютерної Інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [nazarchornomorec@gmail.com](mailto:nazarchornomorec@gmail.com)

Науковий керівник – **Мартинюк Володимир Валерійович**, доцент кафедри загальної фізики

**Chornomorets Nazar** – student of group IPI-25B, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Scientific advisor – **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych**, Associate Professor of the Department of General Physics, VNTU