



## ВЕЛИКІ ПЕРСПЕКТИВИ СЛАБКОГО СИГНАЛУ

### Нобелівська премія з фізики 2017 р.

*З жовтня Шведська королівська академія наук оголосила лауреатів Нобелівської премії з фізики за 2017 рік. Нагороду отримали троє американських учених: Райнер Вайс, Баррі Беріш і Кіп Торн за «вирішальний внесок у проект детектора LIGO та спостереження гравітаційних хвиль». Редакція журналу «Вісник НАН України» звернулася до провідних українських учених з проханням прокоментувати цю подію.*

Нобелівську премію з фізики за 2017 рік було присуджено Райнеру Вайсу, Баррі Берішу і Кіпу Торну, лідерам міжнародної колаборації LIGO — лазерно-інтерферометричної гравітаційно-хвильової обсерваторії, на детекторах якої вперше вдалося достовірно і безпосередньо зафіксувати гравітаційні хвилі. Існування гравітаційних хвиль передбачено загальною теорією відносності (ЗТВ) Альберта Ейнштейна, однак це гравітаційне випромінювання настільки слабке і, проходячи крізь матерію, так мало на неї впливає, що зареєструвати його на практиці було надзвичайно складно.

Уперше гравітаційні хвилі було виявлено відразу на двох детекторах LIGO 14 вересня 2015 р. Сигнал походив від злиття двох чорних дір масами 36 і 29 сонячних мас, яке відбулося на відстані близько 1,3 млрд світлових років від Землі. Про своє відкриття вчені повідомили 11 лютого 2016 р. (докладно про це див. інтерв'ю з фізиками-теоретиками В.І. Ждановим і Ю.В. Штановим, опубліковане у «Віснику НАН України», 2016, № 4). Максимальна амплітуда сигналу мала порядок  $10^{-21}$ , що становить приблизно одну тисячну діаметра протона. Втім, як зазначено у прес-релізі Нобелівського комітету, цей слабкий сигнал поклав початок революції в астрофізиці, а можливість його детектування стала справжнім тріумфом сучасних технологій.

У червні 2016 р. стало відомо і про другий випадок реєстрації гравітаційних хвиль на детекторах LIGO. Це сталося 26 грудня 2015 р. під час циклу досліджень, що розпочався 30 листопада 2015 р. На відміну від першого сигналу, який було чітко





Райнер Вайс (Rainer Weiss)



Кіп Торн (Kip S. Thorne)



Баррі Беріш (Barry C. Barish)

видно на фоні завад, другий сигнал виявився слабкішим і не таким явним. Проаналізувавши дані, вчені дійшли висновку, що виявлені гравітаційні хвилі були також породжені злиттям двох чорних дір, проте цього разу з меншими масами — 14 і 8 мас Сонця.

У третій раз детектори LIGO зафіксували гравітаційні хвилі 4 січня 2017 р. Як і в попередніх випадках, хвилі утворилися внаслідок злиття чорних дір на відстані близько 3 млрд світлових років, у результаті чого утворилася нова чорна діра з масою, яка еквівалентна приблизно 49 масам Сонця. Проаналізувавши зареєстровані сигнали, дослідники встановили, що у цієї пари чорних дір напрямки власного обертання, тобто спіни, не збігаються, а отже, вони спочатку сформувалися далеко одна від одної, а вже потім утворили подвійну систему.

Вчетверте гравітаційні хвилі вдалося зареєструвати 14 серпня 2017 р., і спочатку навіть з'явилося припущення, що у цьому випадку сигнал утворився від зіткнення між нейтронною зорею і чорною дірою або між двома нейтронними зорями. Однак надалі з'ясувалося, що джерелом гравітаційних хвиль знову було зіткнення двох чорних дір — 31 і 25 сонячних мас. Цього разу гравітаційні хвилі зафіксували не лише детектори LIGO, а й європейський гравітаційно-хвильовий детектор Virgo, який влітку 2017 р. приєднався до спостережень. Детектор Virgo розташований у Європейській гравітаційній обсерваторії (EGO) неподалік

від італійського міста Пізи. І хоча чутливість Virgo менша, ніж у детекторів LIGO, працюючи разом, вони можуть підвищити точність відстеження джерел гравітаційних хвиль.

І нарешті 16 жовтня 2017 р., вже після повідомлення про присудження Нобелівської премії, наукові колаборації LIGO, Virgo та їх партнери оголосили, що 17 серпня вони вперше зафіксували гравітаційні хвилі від орбітального руху пари нейтронних зір на відстані близько 130 млн світлових років від Землі. Електромагнітне випромінювання, що виникло в результаті зіткнення цих зір, зареєстрували також понад 70 наземних і космічних телескопів, які проводять спостереження в різних діапазонах довжин хвиль. Це перший випадок, коли космічну подію спостерігали як за гравітаційними хвилями, так і за електромагнітним випромінюванням.

Коротко про лауреатів цьогоорічної Нобелівської премії з фізики.

**Райнер Вайс (Rainer Weiss)** народився в 1932 р. в Берліні у сім'ї лікаря-невропатолога. Після приходу до влади нацистів його родина, через єврейське походження батька, переїхала спочатку до Праги, а потім у США. У 1955 р., завершивши навчання в Массачусетському технологічному інституті (MIT), Р. Вайс отримав диплом бакалавра, у 1962 р. здобув ступінь PhD, постдокторантуру проходив у Принстонському університеті в лабораторії

відомого астрофізика Р. Дікке, з 1964 р. викладає в МІТ. Р. Вайс — автор десятків відомих наукових робіт з астрофізики, гравітації і використання лазерів, але найбільш знайомі стали його праці, присвячені розробленню лазерної інтерферометричної техніки, яка і становила основу проекту LIGO.

**Кіп Торн (Kip S. Thorne)** народився в 1940 р. в штаті Юта в сім'ї університетських професорів. Його батьки були мормонами, але сам учений позиціонує себе, скоріше, як атеїст. У 1962 р. закінчив бакалаврат у Каліфорнійському технологічному інституті (Калтех). У 1965 р. здобув ступінь PhD у Принстонському університеті, захистивши дисертацію з геометродинаміки (динаміки гравітаційного поля у ЗТВ). З 1967 р. викладає теоретичну фізику в Калтех. На сьогодні Кіп Торн відомий як один із провідних світових експертів з астрофізичних наслідків загальної теорії відносності.

Для проекту LIGO він побудував математичні моделі та алгоритми аналізу даних, за допомогою яких ведеться пошук гравітаційних хвиль, виконав інженерні розрахунки тих елементів детектора, які не можна було сконструювати експериментально. Зараз Кіп Торн здійснює теоретичну підтримку LIGO, спрямовану, зокрема, на ідентифікацію джерел гравітаційних сплесків, конструювання поглиначів розсіяного світла в плечах інтерферометра, розроблення нових методів квантових вимірювань, які дозволяють зменшити вплив найбільшого джерела завад — теплового шуму.

Кіп Торн відомий також тим, що цікавиться можливим практичним застосуванням знань з теоретичної фізики — переміщенням у часі і просторі, ймовірністю існування так званих червоточин, або кротовин, і сподівається, що прорив у вивченні гравітаційних хвиль допоможе наблизити людство до вирішення цих питань. Він брав активну участь у створенні фільму «Інтерстеллар» (2014), що дозволило йому змодельовувати на екрані прояв гравітаційних теорій і показати широкому загалу, як зблизька може виглядати чорна діра. «Мені пощастило взяти участь у його створенні з самого початку, допо-

магаючи [режисеру Крістоферу] Нолану і його колегам вплести в тканину розповіді компоненти справжньої науки», — зізнавався К. Торн в одному з інтерв'ю. Його другом, а іноді й науковим опонентом є інший відомий популяризатор науки і дослідник Всесвіту Стівен Хокінг.

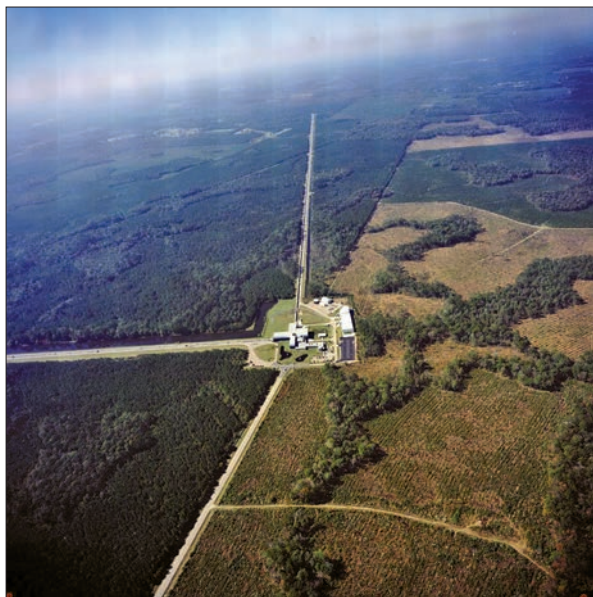
**Баррі Беріш (Barry C. Barish)** народився в м. Омаха шт. Небраска в 1936 р. у родині єврейських емігрантів зі східної частини Польщі. Невдовзі сім'я переїхала до Каліфорнії, де він навчався в Університеті Берклі, у якому в 1962 р. здобув ступінь PhD. Надалі працював у Калтех, де був головним дослідником групи з фізики високих енергій. З 1980-х років Баррі Беріш цікавився створенням обладнання для уловлювання магнітних та інших видів хвиль. У 1994 р. став одним із діяльних натхненників створення об'єданого проекту LIGO, з 1997 р. очолив його, перетворивши невелику (близько 40 чоловік) групу ентузіастів на величезну міжнародну колаборацію.

До недавнього часу наше розуміння структури Всесвіту і процесів, що в ньому відбуваються, було основане на вивченні електромагнітного випромінювання різних діапазонів, але з дуже далекого космосу до нас не доходять навіть найпотужніші електромагнітні хвилі. Більше інформації про ці області Всесвіту можуть дати потоки нейтрино та гравітаційні хвилі, однак щоб зареєструвати їх, потрібні були прилади нового покоління. Саме тому присудження Нобелівської премії представникам міжнародної колаборації LIGO за безпосереднє спостереження гравітаційних хвиль було досить очікуваним у світовій науковій спільноті.

Редакція журналу «Вісник НАН України» звернулася до провідних українських учених з проханням прокоментувати цю подію.

**Яцків Ярослав Степанович** — академік НАН України, директор Головної астрономічної обсерваторії НАН України

Гравітаційні хвилі — це коливання простору-часу, які поширюються зі швидкістю світла.



До складу колаборації LIGO входять дві обсерваторії, розташовані на відстані 3 тис. км одна від одної: у Лівінгстоні, штат Луїзіана (фото ліворуч) і на тихоокеанському узбережжі США поблизу Хенфорда, штат Вашингтон (фото праворуч)

Вони були передбачені загальною теорією відносності А. Ейнштейна ще 100 років тому. Упродовж багатьох десятиліть науковці в усьому світі намагалися експериментально виявити гравітаційні хвилі (докладніше про це див., наприклад, у книзі «Загальна теорія відносності і горизонти випробувань»<sup>1</sup>).

І ось, 14 вересня 2015 р. вперше були виявлені надзвичайно слабкі сигнали гравітаційних хвиль Всесвіту як наслідок зіткнення двох чорних дір. Знадобилося 1,3 млрд років, щоб ці хвилі надійшли до надзвичайно чутливого детектора LIGO у США. А повідомлення про цю епохальну подію пролунало 11 лютого 2016 р. на міжнародній науковій конференції LIGO у Вашингтоні.

В інтерв'ю з В.І. Ждановим та Ю.В. Штановим<sup>2</sup> на запитання: «Як Ви вважаєте, чи да-

дуть Нобелівську премію за це досягнення?» було дано впевнену відповідь: «Те, що дадуть, сумнівів не викликає, питання лише — кому... Детектування гравітаційних хвиль відкриває абсолютно новий фронт науки, який досі був виключно теоретичним».

Так і сталося. 3 жовтня 2017 р. Нобелівський комітет присудив премію за виявлення гравітаційних хвиль за допомогою детекторів LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) — лазерно-інтерферометричної гравітаційно-хвильової обсерваторії. Участь у цьому спільному проекті беруть понад 1000 дослідників з більш ніж 20 країн світу.

Отже, експериментальне відкриття гравітаційних хвиль означає, що гравітаційно-хвильова астрономія стає повноправним розділом науки.

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

Як відомо, Нобелівську премію з фізики цього року присуджено Райнеру Вайсу, Баррі Берішу

<sup>1</sup> 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 і горизонти випробувань*. К.: ГАО НАН України, 2013.

<sup>2</sup> У пошуках гравітаційних хвиль: шлях до відкриття, триумф, перспективи: інтерв'ю з В.І. Ждановим та Ю.В. Штановим. *Вісник НАН України*. 2016. № 4. С. 3.

та Кіпу Торну. При цьому всі розуміють, що це просто «перші серед багатьох» — представники великої міжнародної команди, яка створила детектор LIGO і зареєструвала прихід кількох гравітаційних хвиль.

**Який статус гравітаційних хвиль у сучасній фізиці?** Кожний, хто знає ситуацію з експериментальними перевірками ЗТВ та її передбачень, не мав жодного сумніву щодо їх існування. Ця теорія витримала всі випробування у численних і різноманітних експериментах, точність яких постійно зростала. Підтверджено було як три класичні ефекти ЗТВ — зміщення перигелію Меркурія, відхилення світла у гравітаційному полі масивних тіл та різна швидкість плину часу залежно від гравітаційного потенціалу, так і багато інших ефектів. Про це можна прочитати у монографії, присвяченій саме цим питанням<sup>3</sup>. Додатково було відкрито космічні об'єкти, які передбачала ЗТВ, насамперед чорні діри. ЗТВ дала початок новій науці — космології, яка має багато важливих і цікавих досягнень<sup>4</sup>.

Проте було єдине передбачення ЗТВ, яке не мало експериментального підтвердження — це саме існування гравітаційних хвиль. Усі розуміли, що їх детектування дуже складне через технічні проблеми, але фахівці не мали сумнівів в їх існуванні. Тим більше, що було непряме, але переконливе свідчення на користь цього. Джозеф Тейлор мол. (Joseph Taylor, Jr.) і Рассел Халс (Russell Hulse) у 1974 р. виявили подвійну систему нейтронних зір PSR B1913+16. Параметри руху системи змінювалися в часі саме так, як цього вимагала втрата енергії внаслідок випромінювання зорями гравітаційних хвиль за формулами ЗТВ. За це відкриття Халс і Тейлор отримали Нобелівську премію у 1993 р.

Спроби «спіймати» гравітаційні хвилі тривали кілька десятиліть, апаратура удосконалю-

валася, і не дивно, що їх зрештою все ж зафіксували, причому одночасно на двох віддалених одна від одної установках. Зробила це команда з кількох сотень фахівців з усього світу. Її основу становили американські вчені, зокрема К. Торн — один з авторів відомого підручника із ЗТВ.<sup>5</sup>

**Приречені на Нобелівську премію.** Всі також розуміли, що це відкриття найближчим часом буде відзначено Нобелівською премією. Чому? По-перше, це саме таке відкриття, за яке її дають. Це складний експеримент, у якому отримано важливі фундаментальні результати. Теоретикам інколи складніше отримати Нобелівську. Зазначимо, що сам Ейнштейн здобув цю премію зовсім не за ЗТВ, оскільки тоді ця теорія не мала доказів, які б переконали Нобелівський комітет. Хіггс з колегами довго чекали, поки передбачений ним бозон буде відкрито на прискорювачі, автори теорії інфляційного розширення Всесвіту поки що не мають премії. По-друге, підтвердити висновки, зроблені ще сторіччя тому, що довго не вдавалося зробити, означає отримати результат нобелівського рівня. По-третє, керівники проекту дуже професійно його просуvalи. Вони розуміли, що поки вони не мають конкурентів, слід поспішати. Результати вони оприлюднювали не одразу ж після отримання, а через певний час. Про саму реєстрацію гравітаційних хвиль було оголошено перед сторіччям виходу друком статті Ейнштейна, з якої бере початок сама ідея про них. У вересні, напередодні рішення Нобелівського комітету, було оголошено про чергову реєстрацію приходу гравітаційної хвилі одночасно на трьох установках, що знімало всі питання про можливий збіг обставин. Робота отримала відповідну рекламу у ЗМІ.

Тому всі розуміли, що цей результат премію одержить. Минулого року Нобелівський комітет не став ризикувати та дав рік на те, щоб перевірити чергову реєстрацію і впевнитися у відсутності скарг на недоліки установки, методик та будь-які інші деталі, пов'язані з до-

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> Парновский С.Л., Парновский А.С. *Введение в современную космологию*. К.: Наук. думка, 2013.

<sup>5</sup> Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. *Гравитация*. В 3 т. М.: Мир, 1977.



Для того щоб мінімізувати шуми від зіткнення лазерного променя з молекулами газів, у детекторі LIGO використовують унікальну вакуумну систему; її об'єм становить близько  $10\,000\text{ м}^3$ , а рівень вакууму —  $10^{-12}$  атм, утримати такий високий вакуум у такому великому об'ємі досі ще нікому не вдалося. На фото — труби вакуумної системи (діаметром 1,24 м) на кутовій станції в Хенфордї, направо відходить 4-кілометрове вимірювальне плече. Фото: Caltech/MIT/LIGO Lab

слідами. А цього року все свідчило на користь саме того вибору, який і було зроблено.

**Що таке гравітаційні хвилі?** Це невеликі відхилення у метриці, кривині простору-часу, які поширюються в усі боки від їх джерела зі швидкістю світла у вакуумі (принаймні у слабких гравітаційних полях, але з сильними ми не маємо справи). Коли вони доходять до якихось предметів, то незначно змінюють відстань між ними, що й дало можливість зафіксувати їх прихід. Вони схожі на електромагнітні хвилі: та сама швидкість, поперечність, поляризація, але відрізняються у деяких моментах. Зокрема, це не векторні, а тензорні хвилі (мають спіні 2), вони можуть взаємодіяти між собою тощо.

Електромагнітні хвилі виникають через прискорення зарядів, гравітаційні — через прискорення мас. Тобто їх джерело це будь-який рух з прискоренням (але не вільне падіння у гравітаційному полі). Махніть рукою, і ви будете випромінювати гравітаційні хвилі. Природно, дуже слабкі для реєстрації. Ті хвилі, що зареєстровано, це хвилі від космічних катаклізмів. Конкретно від злиття двох масивних чорних дір. Їх джерело далеко, але воно дуже потужне. Зрозуміло, що чим далі така подія, тим чутливішою має бути установка, щоб зареєструвати хвилю. Зі зростанням чутливості ми зможемо зафіксувати хвилі з більшої ділянки космосу, тобто сигнали будуть реєструватися частіше.

Поки що на детекторі LIGO вчені насамперед підтвердили існування гравітаційних хвиль і процесів злиття чорних дір, але з часом

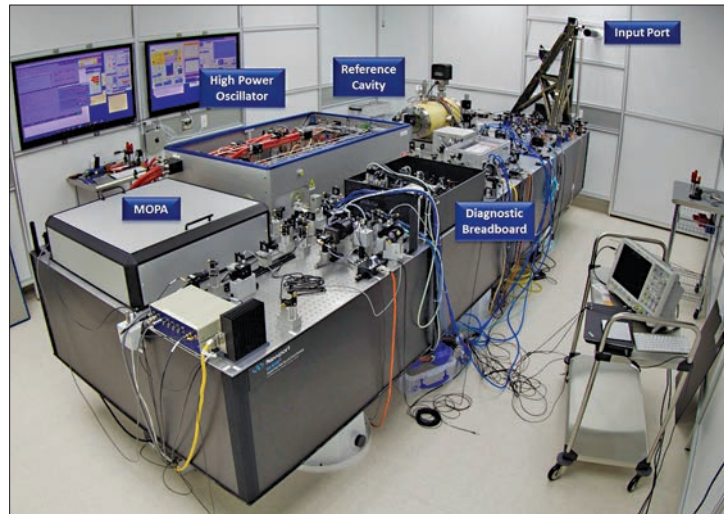
він стане додатковим джерелом інформації про процеси у космосі, особливо з подальшим підвищенням його чутливості.

**Як працює апаратура LIGO?** Це чудо сучасної експериментальної думки та винахідливості дуже добре описано у статті<sup>6</sup>.

**Яка практична користь для людства від гравітаційних хвиль?** Вони напевно не підвищать удій на одне вим'я, не зроблять ваше волосся шовковистим та без лупи і навіть не знищать вапно та іржу на крані. Можливо, від них не буде повсякденної користі ще довго. Але коли Ейнштейн передбачив стимульоване випромінювання, він і гадки не мав про те, що на цій основі з'являться лазери. Коли Фарадей показував англійській королеві створений ним перший у світі електромотор і та спитала, яка від нього користь, Фарадей відповів, що його, мабуть, можна показувати людям за гроші. Багато речей мають несподівані застосування. Коли Герц уперше продемонстрував існування електромагнітних хвиль, ніхто гадки не мав про радіо, телебачення, стільниковий зв'язок, Wi-Fi та ін. Може, з часом з'явиться і зв'язок за допомогою гравітаційних хвиль. Крім того, це чергове підтвердження правильності ЗТВ. А ця теорія вже на межі практичного застосування. ЗТВ описує тонкі ефекти, але вже зараз їх потрібно враховувати при користуванні GPS-навігацією і в точних астрономічних спостереженнях.

<sup>6</sup> <https://tnenergy.livejournal.com/118849.html>

Лазерна кімната LIGO, в якій генерується основний 200-ватний суперстабільний за частотою і амплітудою ( $10^{-7}$  і  $10^{-9}$  відповідно) лазерний пучок з довжиною хвилі 1064 нм. Спочатку за допомогою спеціального непланарного кільцевого генератора (NPRO) отримують стабільний початковий пучок потужністю 2 Вт, який надалі посилюється в два етапи. На першому етапі пучок проходить через пристрій, який називається підсилювачем потужності генератора (MOPA), де він накачується до 35 Вт зі збереженням довжини хвилі 1064 нм, на другому — через генератор великої потужності (HPO), на виході з якого лазерний промінь досягає необхідної потужності в 200 Вт. Далі через дільник променя він потрапляє у вимірювальні плечі інтерферометра. Фото: Caltech/MIT/LIGO Lab



### **Жданов Валерій Іванович** —

*доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка*

Для команд LIGO і Virgo очікувати на успішну реєстрацію гравітаційних хвиль було цілком реальною справою. Була навіть думка, що вдасться зловити гравітаційний сплеск саме до століття ЗТВ Ейнштейна. Адже, по-перше, учасники проекту розуміли, що встигають вийти на потрібний рівень точності по амплітуді хвилі  $h \sim 10^{-21}$ , для чого були всі технологічні передумови і фінансове забезпечення. По-друге, існувала оцінка очікуваної частоти сплесків з необхідною амплітудою, зумовлених космічними катастрофами. Ця оцінка ще буде уточнюватися, але грубо, за порядком величини вона відповідає вже наявним результатам гравітаційно-хвильових спостережень.

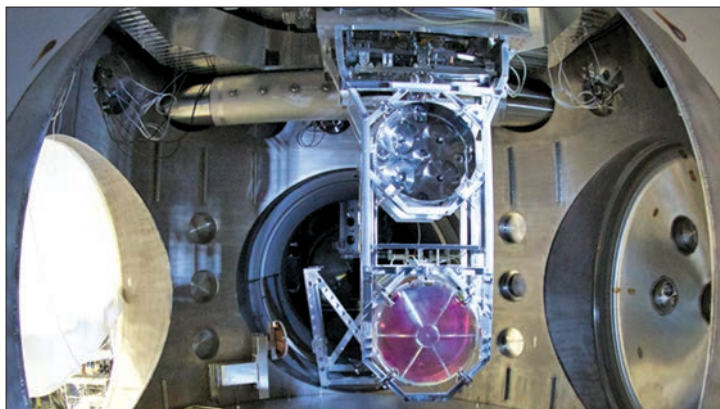
Кілька десятиліть тому в можливість дожити до надійного детектування гравітаційного випромінювання вірили далеко не всі науковці, хоча мало хто із серйозних фахівців піддавав сумніву існування гравітаційних хвиль у тому вигляді, як їх передбачає ЗТВ. Можна сказати, що певний консенсус серед теоретиків склався вже півстоліття тому, навіть до спостережень

Р. Халса і Дж. Тейлора за пульсаром B1913+16. Отже, Нобелівську премію 2017 р. присуджено не за відкриття гравітаційних хвиль, а саме за «вирішальний внесок у створення детектора LIGO та спостереження гравітаційних хвиль».

**Нове вікно у Всесвіт.** Створення таких детекторів — це саме по собі грандіозне технологічне досягнення. Так часто буває: в гонитві за фундаментальним результатом виникає безліч паралельних можливостей. Можна по-різному сприймати закон непередбачених наслідків Мертона<sup>7</sup> з соціології, але в контексті LIGO він набуває явно позитивного відтінку. Є значна кількість впроваджень у лазерній техніці, в оптиці, у метрології стандартів частоти, в техніці опрацювання даних та інших галузях, які беруть початок саме з розробок у сфері гравітаційного експерименту (докладнішу інформацію про це наведено на сайті Advanced LIGO<sup>8</sup>). Проте головне, на мою думку, досягнення полягає у створенні принципово нового засобу астрономічних спостережень. Уже зараз отримано низку важливих параметрів, що характеризують системи чорних дір до злиття і після нього. Розширення каталогу подій дасть

<sup>7</sup> Закон непередбачених наслідків: потужні дії, спрямовані на досягнення певної мети, мають непередбачені або неочікувані наслідки.

<sup>8</sup> [https://www.advancedligo.mit.edu/tech\\_overview.html](https://www.advancedligo.mit.edu/tech_overview.html)



Одна з тестових мас (диск внизу), підвішена в кінці вакуумної камери. Металева рама є допоміжним елементом, насправді тестова маса висить на тонких (0,4 мм) кварцових нитках. Виділити сигнал від проходження гравітаційних хвиль серед безлічі зовнішніх шумів було б неможливо без унікальної системи демпфування, що в свою чергу складається з кількох систем активної і пасивної віброізоляції. Фото: G. Grabeel / LIGO

більш точні оцінки розподілу мас та спінів подвійних чорних дір і частоти злиттів. Для перевірок ЗТВ, яка, як і будь яка фізична теорія, має межі застосування, відкривається нове вікно для вивчення цих меж та отримання більш жорстких обмежень на модифікації ЗТВ — адже процес злиття залучає екстремальні гравітаційні поля.

Нещодавно з'явилася чудова ілюстрація нових горизонтів, які відкриває гравітаційно-хвильова астрономія. 16 жовтня опубліковано цілу низку статей про сигнали від зіткнення двох нейтронних зір, які було зареєстровано 17 серпня як гравітаційними детекторами (GW170817), так і в  $\gamma$ -променях та інших діапазонах електромагнітних хвиль. Те, що GW170817 є відлунням саме зіткнення нейтронних зір, впливає з аналізу гравітаційно-хвильового сигналу<sup>9</sup>, який дав маси компонентів, що злилися, з інтервалу від 0,86 до 2,26 сонячних мас. Якщо виключити варіант з дуже швидким обертанням, інтервал звужується приблизно до 1,2–1,6 мас Сонця. Типові маси чорних дір у подвійних системах значно більші, тоді як цей інтервал є характерним для нейтронних зір. Втім, автори зазначеної статті не виключають і якусь екзотику. З іншого боку, майже одночасно з GW170817 супутниками Fermi та INTEGRAL зареєстровано короткий

$\gamma$ -спалах GRB 170817A<sup>10</sup>; невелику затримку (близько 2 с) можна пов'язати з різними моментами формування електромагнітного та гравітаційного сигналів. У разі зіткнення чорних дір такого спалаху б не було.

Припущення, що короткі  $\gamma$ -спалахи пов'язані зі злиттям нейтронних зір, висловлено вже давно, але не було такого ґрунтовного підтвердження. Після GRB 170817A почалися інтенсивні спостереження післясвітіння в різних діапазонах за участю багатьох обсерваторій. Через годину кілька обсерваторій зафіксували яскраве швидкозмінне оптичне джерело (що дістало позначення AT 2017gfo) в галактиці NGC 4993 на відстані 40 мегапарсеків. Післясвітіння спостерігали в оптичному та ІЧ-діапазоні (10 діб), в УФ-діапазоні (близько 2 діб), в рентгенівському (9 діб) та радіодіапазоні (16 діб).

Спостереження злиття нейтронних зір із залученням детекторів типу LIGO допоможуть розв'язати чимало не вирішених проблем астрофізики та ядерної фізики. Досі невідомо, як поводить себе речовина за екстремальних густин центру нейтронної зорі. Для вивчення аналогічних питань у сучасних прискорювачах влаштовують зіткнення важких ядер. А тут задарма маємо релятивістські зіткнення надгустих тіл розмірами в десятки кілометрів! Їх можна вивчати завдяки як гравітаційному, так і електромагнітному випромінюванню, почи-

<sup>9</sup> Abbott B.P. et al. (LIGO & Virgo Collaboration). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Phys. Rev. Lett.* 2017. **119**: 161101.

<sup>10</sup> Abbott B.P. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys. J. Lett.* 2017. **848**: L12.



наючи з  $\gamma$ - і до радіодіапазону. Ці дослідження дозволяють уточнити маси та радіуси нейтронних зір, перевірити теорії надгустої матерії. Одним із важливих застосувань цих досліджень є ймовірне підтвердження гіпотези про вирішальну роль зіткнень нейтронних зір для синтезу важких елементів. Звідки виникають такі елементи, як золото і платина, що у достатній кількості є у молодих зорях, але немає в старих. Поширене пояснення пов'язує це з так званим  $r$ -процесом швидкого захоплення нейтронів ядрами. Після злиття нейтронних зір це приводить до появи великої кількості важких радіоактивних ізотопів, розпад яких живить потужне електромагнітне випромінювання. Ознаки цього явища спостерігалися і в післясвітінні GRB 170817A<sup>11</sup>.

Отже, застосування засобів гравітаційно-хвильової астрономії обіцяє рясну зливу нових знань.

### **Штанов Юрій Володимирович** —

*доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії астрофізики і космології Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України*

**Внесок співвітчизників.** Як зазначено у науковому описі Нобелівського комітету, фундаментальну ідею використання інтерферометра Майкельсона для детектування гравітаційних хвиль було висловлено у статті<sup>12</sup> радянських фізиків М.Є. Герценштейна і В.І. Пустовойта<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Pian E. et al. Spectroscopic identification of  $r$ -process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature Lett.* 2017. 24298 (Published online 16 October, arXiv:1710.05858).

Arcavi I. et al. Optical Follow-up of Gravitational-wave Events with Las Cumbres Observatory. *Astrophys. J. Lett.* 2017. 848: L33.

<sup>12</sup> Герценштейн М.Є., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот. *ЖЭТФ.* 1962. Т. 43. С. 605.

<sup>13</sup> Герценштейн Михайло Євгенович (1926–2010) — радянський і російський інженер-фізик, уродженець м. Ленінград, автор ряду прикладних ідей у галузі радіо- і відеотехніки та ядерної енергетики. Пустовойт Владислав Іванович — радянський і російський фізик, народився в 1936 р. в м. Бердянськ

у 1962 р. Цю ідею з ентузіазмом сприйняли в США: Джозеф Вебер і один із цьогорічних нобелівських лауреатів Райнер Вайс на початку 1970-х років розпочали теоретичні та практичні розробки з цього напрямку, що в результаті і привело до створення проекту LIGO та інших гравітаційно-хвильових обсерваторій, які діють за цим принципом.

Значний внесок у реалізацію проекту LIGO зробила група вчених під керівництвом В.Б. Брагінського<sup>14</sup>. Разом з колегами на фізичному факультеті Московського державного університету ім. М.В. Ломоносова він розробив кілька ключових елементів, що використовуються в детекторах гравітаційних хвиль, зокрема підвіс пробної маси з часом релаксації понад 5 років. Починаючи з 1992 р. наукова група В.Б. Брагінського працює в рамках міжнародного наукового проекту LIGO, який уперше в 2015 р. зареєстрував гравітаційні хвилі. Внесок Брагінського у це відкриття якнайкраще описують слова нинішнього нобелівського лауреата Кіпа Торна: «Володимир Борисович Брагінський був одним з великих фізиків-експериментаторів другої половини двадцятого століття, а також видатним теоретиком. Його відкриття в галузі квантових шумів у макроскопічних системах і способів керування ними, починаючи з 1968 р. і в новому тисячолітті, мають глибокий вплив на оптичну науку і технологію, нанотехнологію

Запорізької області. На сьогодні він академік РАН, директор Науково-технологічного центру унікального приладобудування РАН, завідувач кафедри «Оптико-електронні прилади наукових досліджень» Московського державного технічного університету ім. М.Є. Баумана.

<sup>14</sup> Брагінський Володимир Борисович (1931–2016) — радянський і російський фізик-теоретик і експериментатор. Фахівець у галузі прецизійних і квантових вимірювань, детектування гравітаційних хвиль, систем з малою дисипацією, фундаментальних термодинамічних флуктуацій. Професор, головний науковий співробітник кафедри фізики коливань фізичного факультету Московського державного університету ім. М.В. Ломоносова, запрошений професор Каліфорнійського технологічного інституту (США), член-кореспондент РАН, член Європейської академії, почесний зарубіжний член Американської академії мистецтв і наук, іноземний член Національної академії наук США.

та науку про гравітаційні хвилі. Його глибоке розуміння походження та контролю над дисипацією в механічних системах мало вирішальне значення для доведення макроскопічних систем, таких як LIGO, до режиму, в якому проявляється квантовий шум. Протягом двох десятиліть він був «совістю» LIGO, визначивши і охарактеризувавши ряд несподіваних джерел шумів, розуміння яких було вирішальним для остаточного відкриття LIGO у вересні минулого року гравітаційних хвиль, що надходять до Землі з далекого всесвіту»<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Thorne K.S. In memory of Vladimir Borisovich Braginsky. March 31, 2016. [http://ufn.ru/dates/pdf/in\\_memory\\_of\\_braginsky\\_by\\_thorne.pdf](http://ufn.ru/dates/pdf/in_memory_of_braginsky_by_thorne.pdf)

Нарешті, приємно відзначити, що першим в авторському списку у статтях і повідомленнях про реєстрацію  $\gamma$ -випромінювання супутником INTEGRAL від області злиття нейтронних зір у 2017 р.<sup>16</sup> став випускник (2007) фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка Володимир Савченко, нині співробітник Наукового центру даних супутника INTEGRAL університету Женеви.

Розмову вела  
Олена МЕЛЕЖИК

<sup>16</sup> Savchenko V. et al. *GCN*. 2017. **21507**: 1; Savchenko V. et al. *Astrophys. J. Lett.* 2017. **848**: L15; Savchenko V. et al. *Astron. Astrophys.* 2017. **603**: A46.

## GREAT PROSPECTS OF WEAK SIGNALS

### Nobel Prize in Physics for 2017

On October 3, the Royal Swedish Academy of Sciences announced the winners of the Nobel Prize in Physics for 2017. The award was given to three American scientists: Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne for “decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”. The journal “Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine” asked leading Ukrainian scientists for comments on this event.