

СЕНСАЦІЯ XXI СТОРІЧЧЯ:

ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ ЗНАЙДЕНО!

Чим є гравітаційні хвилі?



Леонід Черногор
доктор фіз.-мат. наук,
професор,
професор кафедри
космічної радіофізики
факультету радіофізики,
біомедичної електроніки
і комп'ютерних систем
Харківського національного
університету
імені В.Н. Каразіна,
м. Харків

Типи взаємодії. На сьогодні відомо чотири типи взаємодій: сильна, електромагнітна, слабка і гравітаційна. Основні параметри цих взаємодій наведено в табл. 1.

Загальновідомо, що *сильна взаємодія* утримує нуклони (протони і нейтрони) в ядрі атома, а також кварки (складові нуклонів) усередині нуклонів. Сильна взаємодія близькодіюча, вона істотна лише в межах ядра, тобто на відстанях близько 10^{-15} м.

Електромагнітна взаємодія відповідальна за утворення атомів і молекул. Електромагнітні сили належать до сил далекої дії.

Слабка взаємодія характерна для лептонів (класу елементарних частинок, яким не властива сильна взаємодія, — електронів, мюонів, нейтрино та ін.) і баріонів (класу важких елементарних частинок — протонів, нейтронів, гіперонів та ін.). На відміну від інших взаємодій, слабка взаємодія відповідає не за “скріплювання” речовини, а за її руйнування (наприклад, радіоактивний розпад). Зокрема, завдяки наявності слабкої взаємодії у надрах Сонця та інших зір відбуваються ядерні реакції з вивільненням величезної кількості енергії.

Гравітаційна взаємодія — взаємодія далекої дії. Вона стає визначальною для великих мас планетарного і космічного масштабів. Гравітаційні сили винятково слабкі. Наприклад, сила електричного відштовхування двох електронів у $4,2 \cdot 10^{42}$ рази більша від сили їхнього гравітаційного тяжіння.

Фізики давно мріють про створення єдиної теорії поля, яка б об'єднала всі чотири типи взаємодії. Спочатку вдалось побудувати теорію електрослабкої взаємодії, потім теорію Великого об'єднання, яка поєднує в собі електричні, слабкі й сильні взаємодії. У теорії Супероб'єднання мають бути присутніми всі типи взаємодій. Гравітаційна взаємодія, проте, вперто “не погоджується залучатись” до складу єдиної теорії поля.

Гравітаційні сили і взаємодія були відкриті першими, ще в часи **Кеплера** і **Ньютона**. Однак вони залишаються найбільш загадковими. Дотепер неясно, чи існує квант гравітаційного поля (гіпотетичний гравітон). Гравітуюча частинка має однаковий “заряд”. Тому спостерігається лише притягання таких частинок. На відміну від електричного диполя, гравітаційний диполь неможливий. Проте слід зазначити, що близько 20 років тому виявлено прискорене розширення Всесвіту, яке пов'язують з темною енергією. Чи є розширення наслідком дії антигравітації? На сьогодні однозначної відповіді на це запитання немає.

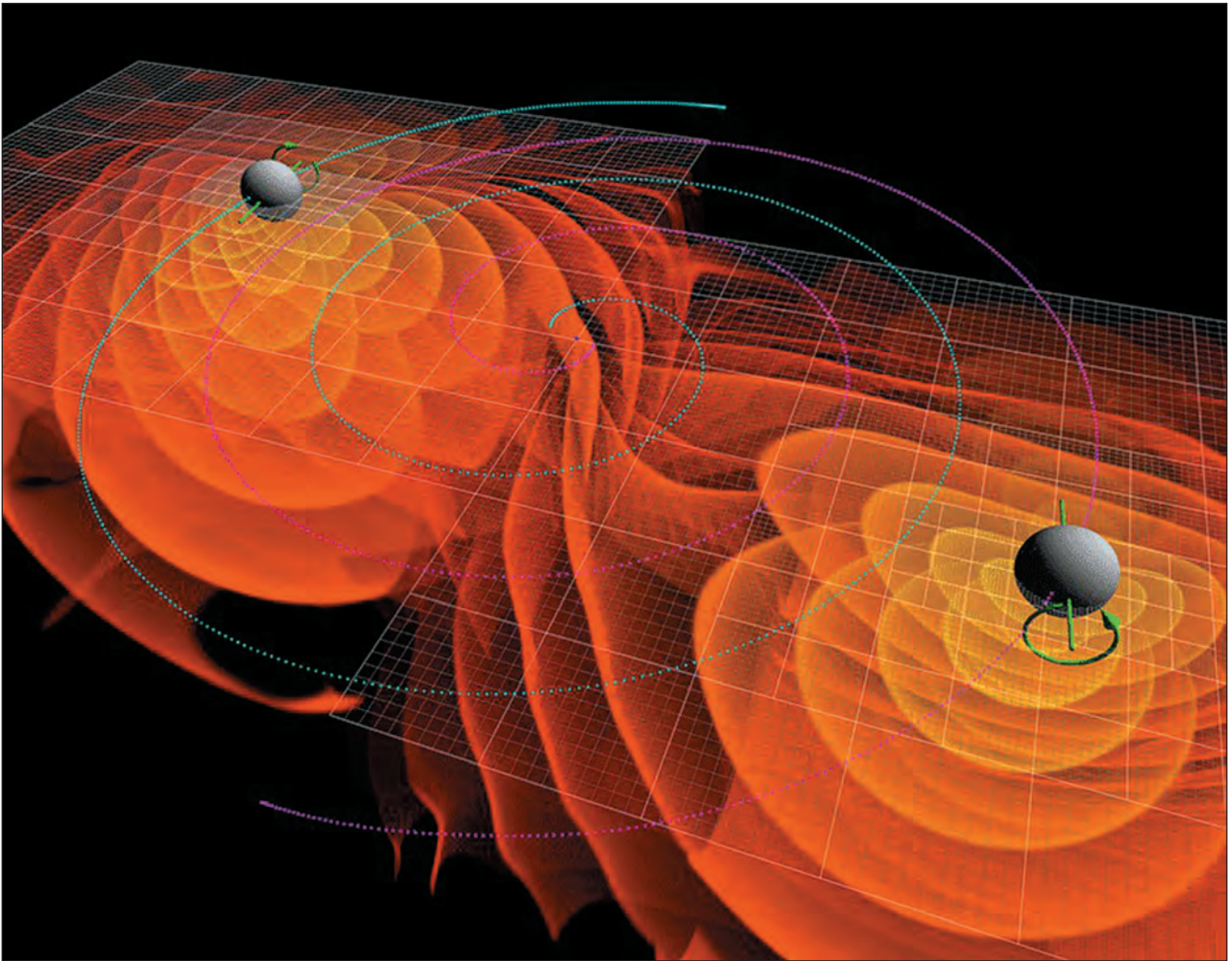
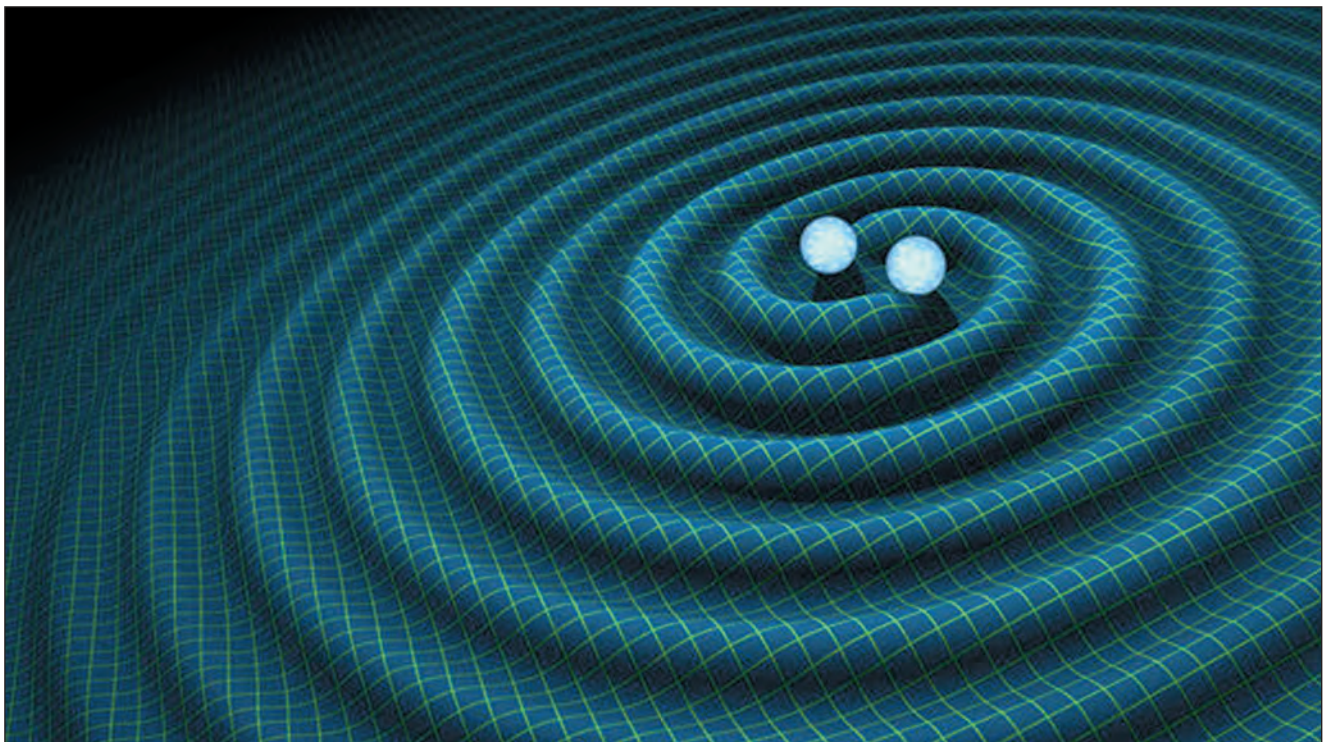


Рис. 1. Дві моделі злиття бінарних чорних дір, які випромінюють гравітаційні хвилі



Таблиця 1. Взаємодія протонів (із енергією 1 ГэВ ~ 10⁻¹⁰ Дж)

Взаємодія	Відносна величина	Дальність взаємодії, м	Тривалість взаємодії, с	Квант поля
сильна	1	10 ⁻¹⁵	10 ⁻²³ — 10 ⁻²²	глюон
електромагнітна	1/137	будь-яка	10 ⁻²⁰ — 10 ⁻¹⁸	фотон
слабка	10 ⁻⁵	2·10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹⁰ — 10 ⁻⁸	проміжний бозон
гравітаційна	10 ⁻³⁸	будь-яка	> 10 ¹⁸	гравітон

Гравітаційні хвилі. Всі типи взаємодії мають скінченну швидкість її поширення. Не є винятком і гравітаційна взаємодія. Вільне гравітаційне поле, не зв'язане з тілом, становить собою гравітаційну хвилю, яка поширюється зі швидкістю світла.

Гравітаційні хвилі (ГХ) генеруються тілами (масами), які рухаються зі змінним прискоренням.

При достатньо слабких збуреннях ГХ — поперечні, тобто коливання відбуваються у площині, яка перпендикулярна напрямку поширення. ГХ містять дві незалежні компоненти, розташовані під кутом 45° одна до одної, які визначають два стани поляризації хвилі. ГХ переносять енергію та імпульс. Діючи на тіла, названі хвилі викликають деформацію тіл. На цій властивості базуються принципи виявлення (детектування) гравітаційних хвиль.

Спроби знайти їх були безуспішними впродовж майже півсторіччя. Це пов'язано з украй малою потужністю хвиль.

Наприклад, для лабораторних джерел ГХ їхня потужність не перевищує 10⁻²⁰ Вт. Для порівняння значно, що ця потужність у тисячу разів менша від потужності світла, на яке реагує людське око. Для збільшення потужності ГХ у лабораторних умовах необхідно збільшувати масу випромінювальних тіл і швидкість зміни прискорення (ривок). Збільшення маси обмежено значеннями 1—10 т, а збільшення ривка — руйнуванням тіла.

Причина малої потужності ГХ полягає у малості гравітаційної сталої, яка входить у закон всесвітнього тяжіння *Ньютона*, а також в рівняння *Ейнштейна*, що описують генерацію ГХ. Друга причина полягає в тому, що для ГХ є неможливим дипольне випромінювання, для них реалізується квадрупольне, слабше, випромінювання.

Потужність випромінювання ГХ для двох взаємодіючих тіл зростає пропорційно до п'ятого степеня маси тіл, а запас енергії — пропорційно масі в першому степені. Це означає, що при великих масах ефективність випромінювання ГХ різко зростає.

Великі маси властиві космічним об'єктам. Прикладами космічних джерел ГХ є система зоря—планета, подвійні зорі (рис. 1), вибухи наднових зір, зіткнення нейтронних зір, злиття чорних дір, несиметричний колапс (швидке стиснення) зір. Саме від таких джерел проводився пошук гравітаційних хвиль упродовж останніх 40—45 років.

Результати розрахунків. Обертальний рух планет навколо Сонця (точніше, їхній рух навколо загального центра мас) є джерелом ГХ. Для найбільшої планети Сонячної системи — Юпітера — потужність випромінювання становить 5.2 кВт. При цьому обидва тіла втрачають свою енергію і зближуються у радіальному напрямі зі швидкістю 2.5·10⁻²⁰ м/с. Тобто, через 2.5·10²³ років Юпітер, витративши частину своєї енергії, міг би впасти на Сонце. Проте цього не станеться, бо Сонцю залишилось існувати близько 5 млрд років.

Розрахунки показують, що подвійна зоря з масою кожної зорі 1000 мас Сонця, які розміщені на відстані 100 млн км, випромінює гравітаційні хвилі потужністю 3·10²⁹ Вт (енергія цих зір 3.6·10⁵⁰ Дж). Швидкість їх зближення становить 2.5 мм/с. Через мільйон років ці зорі мають злитись. При цьому в енергію ГХ перейде лише близько 3·10⁻⁸ енергії зір.

Зовсім інша картина очікується при обертанні двох чорних дір навколо загального центра мас на відстані одна від одної, приблизно рівній гравітаційному радіусу, та з орбітальною швидкістю, близькою до швидкості світла. У цьому випадку для тіл з масою Сонця (2·10³⁰ кг) гравітаційний радіус дорівнює 3 км, кутова швидкість обертання — 10⁵ с⁻¹ (близько 16 кГц), потужність випромінювання — близько 1.4·10⁴⁷ Вт. При сумарній енергії спокою цих тіл, яка дорівнює 3.6·10⁴⁷ Дж, в енергію ГХ перейде близько 10 % енергії спокою зір.

Гравітаційні хвилі очима фізика-теоретика. ГХ — збурення метрики простору-часу, які відриваються від джерела, тобто гравітуючого тіла, і поширюються хвильовим способом, викликаючи “брижі простору-часу”. Не зрозуміло, чи не так? Мова фізика-теоретика дуже відрізняється від науково-популярної мови. І все ж спробуємо пояснити, про що йдеться. Метрика — математичне поняття, яке означає правило (формулу) для визначення відстані між будь-якими двома точками заданого простору чи елементами цієї множини. Так, в евклідовій геометрії найкоротша відстань між двома точками — відрізок прямої, який їх з'єднує.

Всесвіт не описується евклідовою геометрією. Все через наявність гравітуючих мас. Як показав 100 років тому *А. Ейнштейн* в загальній теорії відносності, гравітуюча матерія визначає структуру простору-часу, ця матерія не просто заповнює простір-час, вона його

формує. Матерія, простір і час нерозривно пов'язані між собою. Гравітуюча матерія викривляє простір-час, змінюючи метрику. В такому просторі найкоротший шлях уже не відрізок прямої, а геодезична лінія. В загальному випадку досить чудернацька лінія. Звісно, метрика помітно змінюється лише у присутності достатньо великих гравітуючих мас.

Отже, ГХ у рамках загальної теорії відносності — розв'язок рівнянь Ейнштейна хвильового типу, які представляють збурення метрики простору-часу, що рухаються зі швидкістю світла (строго кажучи, в лінійному наближенні). Ступінь викривлення простору-часу кількісно характеризується амплітудою ГХ, безрозмірною величиною, яка чисельно дорівнює відносній зміні відстані (відносній деформації). Згідно з розрахунками, максимальні амплітуди ГХ, викликані космічними явищами й астрофізичними процесами в Сонячній системі, коливаються в інтервалі 10^{-23} — 10^{-18} .

Важкий шлях до відкриття

Ще в 1900 р. *Х.А. Лоренц* припустив, що гравітаційна взаємодія “*може поширюватися зі швидкістю, не більшою від швидкості світла*”. Термін “*гравітаційна хвиля*” був уведений *А. Пуанкаре* в 1905 р. Він же й обґрунтував ідею, що існування ГХ не суперечить спостереженням за рухомими тілами.

У 1916 р. (рівно сто років тому!) *А. Ейнштейн* створив загальну теорію відносності і показав, що механічна система, яка рухається зі змінним прискоренням, випромінюватиме ГХ. У 1918 р. він продемонстрував, що інтенсивність випромінювання ГХ обернено пропорційна швидкості світла в п'ятій степені, тобто дуже мала.

1920—1930 рр. — це роки сумнівів. Дебатувалось питання: а чи можуть реально існувати гравітаційні хвилі? В їхньому існуванні засумнівався навіть сам *А. Ейнштейн*.

Друга світова війна надовго перервала дискусію про реальність ГХ.

У 1957 р. англійський фізик *Ф. Пірані* довів можливість детектування ГХ, а американські фізики *Г. Бонді* та *Р. Фейнман* обґрунтували існування фізичних наслідків ГХ. Того ж року на конференції в Чейпел Гил (Chapell Hill) відбулися бурхливі дискусії щодо реальності ГХ.

У 1962 р. радянські вчені *В.І. Пустовойт* і *М.Е. Герцеништейн* описали принципи використання інтерферометрів (рознесених у просторі антен і приймачів) для виявлення ГХ.

У 1964 р. теоретики *Ф. Петерс* і *Дж. Метью* розрахували параметри ГХ, які випромінюються подвійними системами.

У 1967 р. американський фізик *У. Фербенк* запропонував охолоджувати детектори ГХ рідким гелієм.

У 1969 р. *Дж. Вебер* — засновник гравітаційно-хвильової астрономії — повідомляє, що він знайшов ГХ. Як детектор ГХ він застосував механічні гравітаційні антени. Впродовж наступних 45 років нікому не вдалось підтвердити результат *Дж. Вебера*. Його робота, проте, посприяла бурхливому зростанню кількості публікацій, присвячених ГХ.

На початку 1970-х рр. *В.Б. Брагінський* (СРСР) повторює експерименти *Дж. Вебера*, які також закінчились невдачею.

До 1972 р. стало зрозуміло, що *Дж. Вебер* помилився, — йому не вдалось зловити ГХ.

У 1978 р. *Дж. Тейлор* повідомляє про виявлення випромінювання, викликаного подвійною системою пульсара PSR B1913+16.

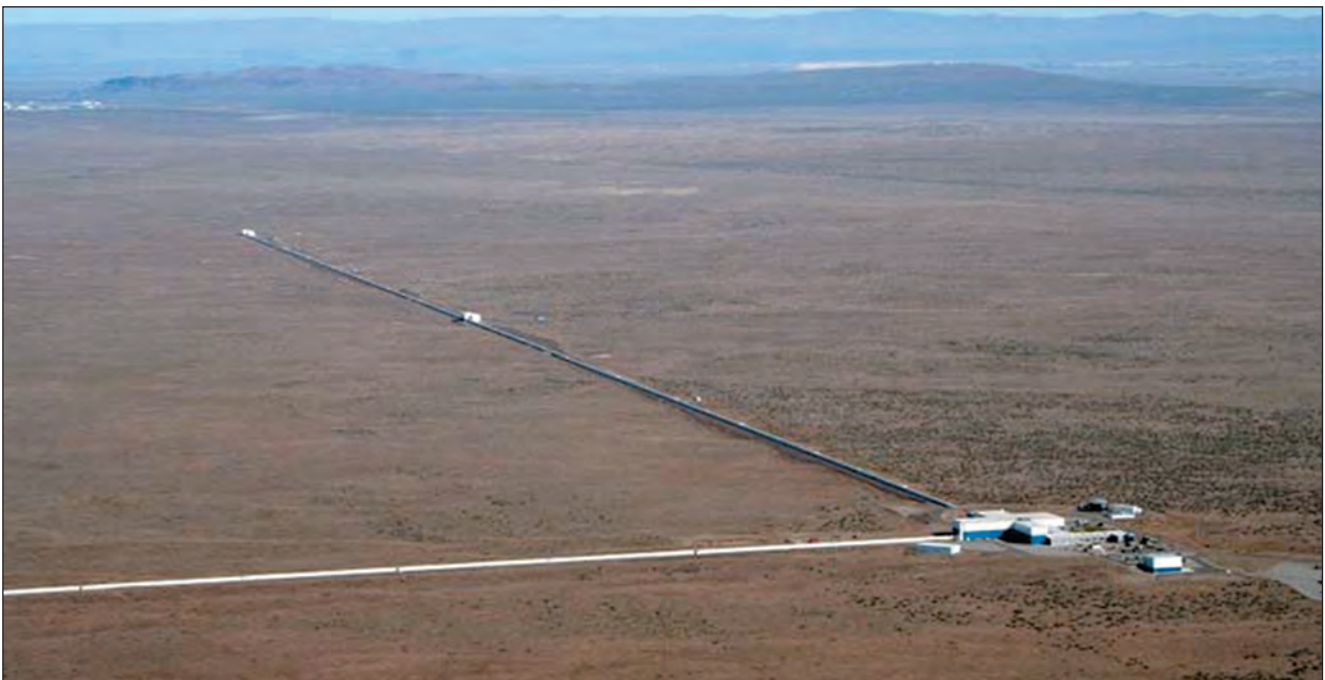


Рис. 2. Одна зі секцій системи LIGO

Чим можна виявити гравітаційні хвилі?

Перш, ніж потрапити в радіоприймач, радіохвиля проходить через антенний пристрій. Тут відбувається перетворення енергії хвилі в енергію електричного сигналу. Для приймання ГХ також потрібна своєрідна антена і приймач.

Гравітаційною антеною може бути будь-яка пара мас (пробних тіл) чи одне видовжене тіло. Гравітаційні приймачі доцільно розносити у просторі на відстань 1—10 тис. км. Таку систему називають *гравітаційним інтерферометром*. Гравітаційним приймачем може служити чутливий пристрій, який реєструє винятково малі відносні зміщення мас чи сили, які їх викликають. Приймання ГХ ґрунтується на тому, що ці хвилі взаємодіють з масивними тілами. Чим більша маса гравітаційної антени, тим сильнішим буде сигнал на вході й виході гравітаційного приймача.

При заданій відстані між двома пробними тілами (розмірі гравітаційної антени) варіації цієї відстані дорівнюють добутку відстані на амплітуду хвилі. Наприклад, при відстані 4 км і амплітуді ГХ у 10^{-21} , амплітуда варіацій становить $4 \cdot 10^{-18}$ м, що в 1000 разів менше від діаметра атомного ядра. І це при багатокілометровій гравітаційній антені. В цьому головна складність виявлення (детектування) ГХ. Друга складність полягає в тому, що амплітуда ГХ зменшується обернено пропорційно відстані від джерела хвиль. Чергові труднощі пов'язані з малою тривалістю процесу, впродовж якого генеруються ГХ. Наприклад, під час вибуху наднової зорі тривалість сплеску дорівнює 0.1—1 мс, а при злитті двох чорних дір — 0.1 с. Зрештою, прийманню ГХ перешкоджають завади — будь-які струси гравітаційної антени. Чого-чого, а струсів на нашій планеті не бракує. І це не тільки віддалені землетруси, від яких неперервно здригається планета, це і завади від наземного і навіть повітряного транспорту, а також від промислових агрегатів і т.п. Окрім зовнішніх завод, важливу роль відіграють внутрішні завади — тепловий шум у гравітаційних антенах. Для зменшення їх впливу антену необхідно охолоджувати до температури в одиниці кельвінів чи ще менше. І це при розмірах гравітаційної антени у 1—3 м і її масі 3—10 т.

Для вимірювання надзвичайно малих змішень пробних мас антени використовують лазерний інтерферометр. У цьому випадку розміром антени є відстань між двома пробними тілами. Вона може досягати тисяч і більше кілометрів. На сьогодні найдосконалішим лазерним інтерферометром є американська система LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Лазерно-інтерферометрична гравітаційно-хвильова обсерваторія*). Система розташована на двох обсерваторіях, віддалені на відстані 3 тис. км одна від одної — у Хенфорді (штат Вашингтон) і Лівінгстоні (штат Луїзіана). В обсерваторії Хенфорд розміщено два інтерферометри, в Лівінгстоні — один. Кожен інтерферометр складається з двох взаємно-перпендикулярних плечей завдовжки 4 км, на кінцях кожного плеча є пробні маси (рис. 2).

Система LIGO працює таким же чином, як й інтерферометр *Майкельсона*. Лазерний промінь розщеплюється в спеціальному пристрої і спрямовується уздовж кожного з плечей. Відбившись від дзеркал, світлові пучки знову зливаються — виникає інтерференційна картина. Під дією ГХ деформується простір, і таким чином змінюється довжина кожного плеча: одне витягується, а друге стискується. За змінами інтерференційної картини роблять висновок про наявність ГХ. Для зниження рівня зовнішніх завод застосовується гідравлічна й електромагнітна стабілізація дзеркал. Чутливість системи — 10^{-22} . Остання модернізація системи LIGO завершилась 11 вересня 2015 р.

Наступною перешкодою для виявлення ГХ є дуже мала частота їх виникнення. За оцінками, в одній галактиці (а їх близько 100 млрд) сплески ГХ відбуваються раз в 20—30 років. Приблизно з такою частотою відбуваються вибухи наднових зір. У всьому Всесвіті протягом одного року очікується злиття від сотень до десятків тисяч подвійних чорних дір, які генерують ГХ.

Інструментальні спостереження за ГХ здійснюються всього близько 45 років. Ось чому виявлення ГХ — рідкісна удача.

Коли відбулося епохальне відкриття?

Довгожданий триумф настав 14 вересня 2015 р. о 9 год 50 хв 45 с за всесвітнім часом. У той момент США в обсерваторії LIGO двома гравітаційними детекторами, розташованими в Хенфорді та Лівінгстоні, вперше було зареєстровано сигнал тривалістю близько 150 мс з поступово зростаючою частотою від 35 до 250 Гц. Відношення сигнал/шум становило 24. Ймовірність неправильного виявлення була менша від 1 за 203 тис. років. Сигнал отримав назву GW150914 (тобто ГХ від 14.09.2015 р.), параметри ГХ наведено в табл. 2. Як показали виконані раніше теоретичні дослідження, сигнал з такими параметрами має генеруватися при злитті двох чорних дір, які обертаються навколо спільного центра мас.

Треба пояснити, чим є чорні діри і чому вони так зветься.

Загальновідомо, що стаціонарні зорі існують упродовж багатьох мільярдів років. Їх незмінність зумовлена точною компенсацією процесу теплового розширення плазмової кулі гравітаційним стисненням. У процесі вигорання палива роль першої сили зменшується, і верховодити починає гравітація. Урешті-решт, охолола (померла) зоря стискається до маленької “кульки” з величезною густиною, яка притягує до себе навіть фотони світла. Наприклад, зоря з радіусом нашого Сонця — 700 тис. км — після стиснення має радіус 3 км. Померла зоря стає невидимою в електромагнітному діапазоні — чорною дірою, яка все поглинає, але нічого не випускає назовні. Якщо дві чорні діри опиняються поруч, вони починають обертатися навколо спільного центра мас. Виникає ідеальне джерело ГХ. Випромінюючи хвилі,

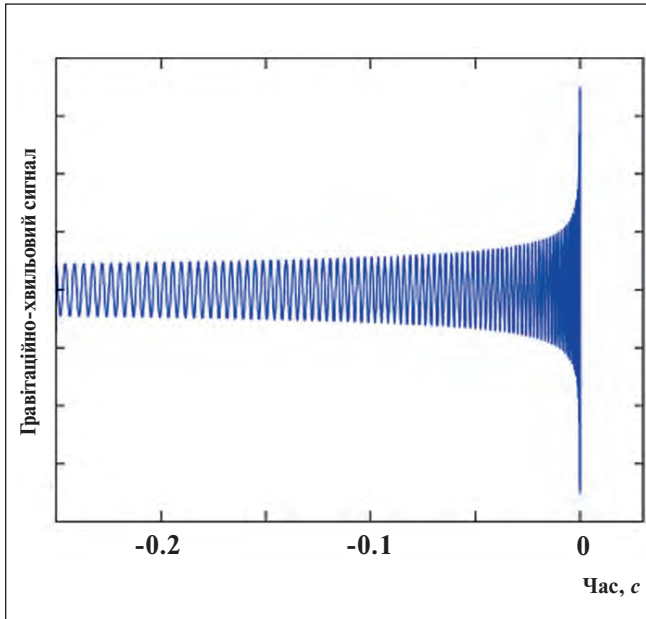


Рис. 3. Теоретично розрахована часова залежність сигналу гравітаційної хвилі під час космічного вальсу подвійних зір

дві чорні діри ще більше зближуються. Чим менша відстань між їхніми центрами, тим більша їхня орбітальна швидкість і кутова швидкість обертання, а значить, тим більша потужність випромінюваних ГХ. Усе дуже швидко закінчується колапсом чорних дір.

Така подія відбулася 1.3 млрд років тому. Її “відгук” і спостерігався 14 вересня 2015 р. Сигнал подолав відстань, яка всього в 10 разів менша від радіуса нашого Всесвіту. За формою сигналу визначено його частотний спектр, обчислено частоту і швидкість зміни частоти біля максимальної амплітуди сигналу (рис. 3 і 4). Використовуючи теоретичні співвідношення і зазначені параметри сигналу, знайшли маси взаємодіючих чорних дір. Вони дорівнюють близько 29 ± 4 і 36 ± 5 мас Сонця. Після злиття загальна маса дорівнює 62 ± 4 мас Сонця. Це означає, що сумарна маса тіл зменшилася на три маси Сонця. Цьому відповідає енергія $5.4 \cdot 10^{47}$ Дж. Вона вивільнилася у вигляді ГХ. В енергію ГХ перетворилося близько 4.8 % енергії чорних дір. Максимальна потужність ГХ

досягла $3.6 \cdot 10^{49}$ Вт. Для порівняння, потужність Сонця дорівнює $4 \cdot 10^{26}$ Вт.

Відстань до джерела визначена за законом Габбла за так званим червоним зміщенням, яке дорівнювало 0.09 ± 0.04 . Величина зміщення пропорційна швидкості руху галактики, де відбулося злиття чорних дір. Згідно з законом Габбла, швидкість руху галактики пропорційна відстані до неї. Вона дорівнювала 410 ± 170 Мпк $\sim (1.2 \pm 0.5) \cdot 10^{22}$ км.

Знаючи відстань до джерела ГХ і його потужність, можна обчислити потік енергії. Він виявився значним: $2\text{—}20$ мВт/м². Завдяки цьому ГХ були впевнено зареєстровані двома віддаленими у просторі детекторами, які утворювали лазерний інтерферометр.

Чотири місяці пішло на перевірку отриманих експериментальних даних, на обробку й обчислення.

21 січня 2016 р. група з 1011 (небачена кількість!) авторів зі 126 наукових підрозділів 18 країн направила статтю “Спостереження гравітаційних хвиль від злиття бінарної чорної діри” в журнал “Physical Review Letters”.

Серед авторів були росіяни, вихідці з України, багато європейців, але найбільше громадян США. Статтю опубліковано 11 лютого 2016 р. Для всіх це було сенсаційним відкриттям. Про нього синхронно (буквально хвилина в хвилину) повідомили в Вашингтоні, Києві та столицях Європи.

Стільки країн упродовж десятиліть шукали загадкові сигнали від гравітаційних хвиль! Передбачення А. Ейнштейна і сумніви сотень фізиків й астрофізиків увінчалися відкриттям. Гравітаційні хвилі таки існують!

Що дало відкриття? Що дадуть нам гравітаційні хвилі?

Відкриття ГХ блискуче підтвердило правильність одного з головних положень загальної теорії відносності. Ці хвилі, відірвавшись від джерела, можуть поширюватися у просторі, змінюючи його кривизну (метрику). Відкриття підтвердило, що ми правильно розуміємо механізм генерації ГХ таким екзотичним об'єктом, як подвійна (бінарна) чорна діра.

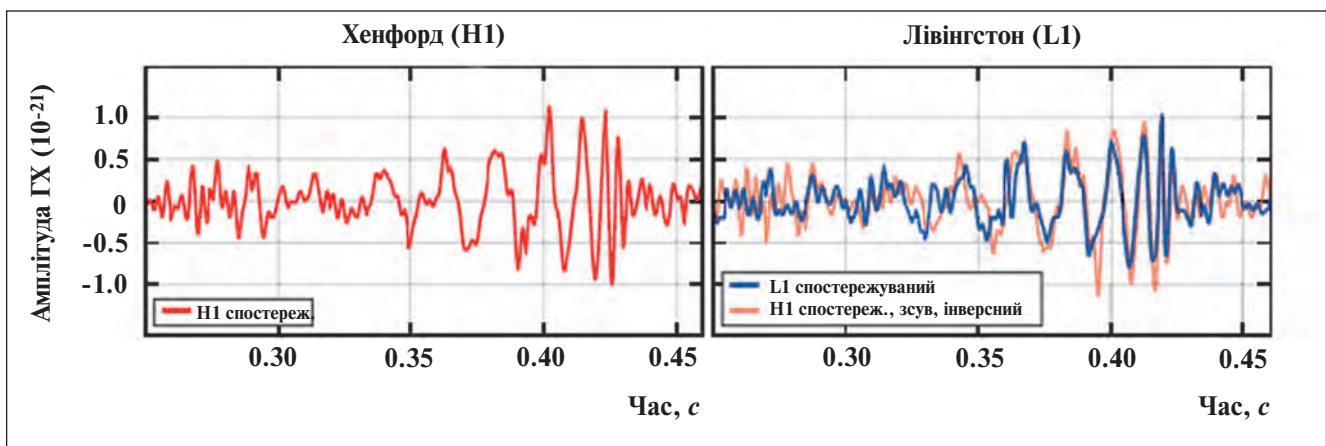


Рис. 4. Часова залежність сигналів гравітаційної хвилі GW150914, зареєстрованих в обсерваторіях Хенфорд (зліва) і Лівінгстон (справа)

Цим підтверджено саме існування таких об'єктів, саме з такими, досить великим масами. Оцінено верхню межу маси гіпотетичного гравітона (виявилося, що вона не перебільшує $2.1 \cdot 10^{-58}$ кг). Наші сучасники зробили відкриття, яке заслуговує на Нобелівську премію.

Що дає нам відкриття ГХ? Ці хвилі — новий інструмент для вивчення Всесвіту і процесів у ньому. Астрономія дійсно стала всехвильовою. Століттями астрономія була оптичною. Проте хвилі видимого діапазону є лише нашим вузьким віконцем у Всесвіт. Поступово до оптичної астрономії приєдналися радіоастрономія, інфрачервона, ультрафіолетова, рентгенівська і гама-астрономія. Тепер прийшла черга і гравітаційно-хвильової астрономії. Усі вони великою мірою доповнюють одна одну, розширюючи наші знання про Всесвіт.

Гравітаційно-хвильова астрономія дозволяє нам заглянути на відстані в 13 млрд світлових років, тобто наблизитися упритул до моменту народження нашого Всесвіту. Відповідно до теорії, Великий вибух, який породив Всесвіт, і його розширення мають супроводжуватися надпотужним випромінюванням ГХ. Так зване реліктове, тобто залишкове, яке існує й донині, випромінювання ГХ несе інформацію про найперші миті життя нашого Всесвіту.

Для реєстрації ГХ, слабших від GW150914, Європейське космічне агентство розглядає проект ELISA космічної обсерваторії з довжиною плечей 5 млн км. При зміні розміру пробного тіла такого ж, як і під дією GW150914 ($4 \cdot 10^{-18}$ м), чутливість системи ELISA буде близько 10^{-28} , тобто в мільйон разів вища, ніж у системи LIGO. Запуск європейської космічної обсерваторії заплановано на середину 2030-х рр. ■

Таблиця 2. Основні параметри гравітаційної хвилі GW150914

Дата	14 вересня 2015 р.
Час всесвітній	09:50:45
Відстань до джерела ГХ	1.3 млрд світлових років
Відносна деформація простору (амплітуда ГХ)	10^{-21}
Тривалість ГХ-сигналу	150 мс
Тривалість піку ГХ-сигналу	15 мс
Діапазон частот	35—250 Гц
Частота максимуму спектра	150 Гц
Діапазон довжин хвиль	900—8600 км
Максимальна швидкість зростання частоти	6—10 кГц/с
Маса бінарної чорної діри (в масах Сонця)	29+36
Маса чорної діри після злиття (в масах Сонця)	62
Енергія ГХ	$5.4 \cdot 10^{47}$ Дж
Середня потужність ГХ	$3.6 \cdot 10^{48}$ Вт
Пікова потужність ГХ	$3.6 \cdot 10^{49}$ Вт
Середній потік енергії ГХ	2 мВт/м ²
Максимальний потік енергії ГХ	20 мВт/м ²
ККД ГХ-випромінювача	4.8 %