

## We've Found Gravitational Waves. Now What?

David Reitze, executive director of the LIGO Laboratory, took the podium at the National Press Building in Washington, DC, this morning, and said the words we've all been waiting on tenterhooks to hear: "We have discovered gravitational waves." And a packed auditorium in Caltech's Cahill building in Pasadena—where people had gathered to watch the live feed—erupted into wild applause.

Similar scenes were likely playing out at MIT, in Livingston, Louisiana, in Hanford, Washington, and in Europe, because LIGO is a \$1 billion international collaboration with hundreds of scientists. And this moment has been 100 years in the making. Einstein predicted the existence of gravitational waves with his general theory of relativity in 1915, and physicists uncovered indirect evidence in the 1970s and 1980s. But direct detection has proven elusive—until now. And the story of gravitational waves and what they're able to tell us is just now beginning.

Here's how it went down. On September 14, 2015, at 5:51 AM EST, the LIGO detectors at Livingston and Hanford both picked up signals within milliseconds of each other. The waveforms of those signals closely matched predictions of the simulations.

It's like an audio fingerprint, akin to the decay signatures that high-energy physicists use to identify subatomic particles produced in collisions at the Large Hadron Collider. And it's exactly what you would expect to find in your data if two black holes, about 30 solar masses each (that's 30 times bigger than our own Sun), spiraled inward toward each other and merged in a massive collision event, sending powerful shock waves ripping across spacetime, some 1.3 billion years ago.

It was so clean, in fact, that Reitze worried it was too good to be true. So did Alan Weinstein, who heads LIGO Caltech. After all, in the early operational phase of LIGO, project leaders had deliberately inserted false signals into the data to test the rigor of the analysis. Even though his colleagues assured him that this new signal was not a so-called "blind injection" exercise, Weinstein couldn't quite believe it. He wondered if it was the work of a disgruntled member of the LIGO team injecting a false signal into the data as

## Ми виявили гравітаційні хвилі. Що тепер?

Девід Райце, виконавчий директор лабораторії LIGO, сьогодні вранці виступив з трибуни в Національній будівлі преси у Вашингтоні, округ Колумбія, і сказав те, що всі ми так прагнули почути: «Ми виявили гравітаційні хвилі». І переповнена людьми аудиторія в будівлі Кейхілу в Каліфорнійському технологічному інституті в Пасадені, де всі зібралися, щоб подивитися пряму трансляцію, вибухнула бурхливими оплесками.

Подібні події розгорталося у Массачусетському Технологічному Інституті; у Лівінгстоні, штат Луїзіана; у Генфорді, штат Вашингтон, та в Європі, оскільки LIGO – це міжнародна організація на мільярд доларів, з якою співпрацюють сотні вчених. До цієї події ми йшли вже сотню років. У 1915 році Ейнштейн передбачив існування гравітаційних хвиль у своїй загальній теорії відносності, а в 1970-х і 1980-х роках фізики виявили непрямі докази цього. Але безпосереднє виявлення не увінчалось успіхом – аж до цього моменту. А історія гравітаційних хвиль, яка багато про що нам зможе розповісти, лише починається.

Ось як все було. 14 вересня 2015 року о 5:51 ранку за східним часом, обидва датчики LIGO – у Лівінгстоні та в Хенфорді, зафіксували сигнали з різницею в декілька мілісекунд один від одного. Частоти цих сигналів майже відповідали тим, що були попередньо змодельовані.

Це наче аудіо-відбиток, подібний на сліди розпаду, які фізики високих енергій використовують для ідентифікації субатомних частинок, що утворюються під час зіткненні у Великому адронному колайдері. І саме це ви б виявили близько 1,3 мільярда років тому, якщо б дві чорні діри, приблизно по 30 сонячних мас кожна (що в 30 разів більше, ніж наше Сонце), закрутились одна в одну і злилися в масштабному зіткненні, посилаючи потужні ударні хвилі, які б виривались у простір-час.

Усе було настільки очевидно, що Рейтце навіть турбувався: це занадто добре, щоб бути правдою. Такої ж думки був Алан Вайнштайн, керівник LIGO Каліфорнійського технологічного інституту. Зрештою, на ранньому етапі експлуатації LIGO керівники проектів навмисно вставляли помилкові сигнали в дані, щоб перевірити точність аналізу. Попри те, що колеги Вайнштайна запевняли його у тому, що цей новий сигнал не є так званою «перевіркою», він не міг у це повірити. Він припускав, що це незадоволений член команди LIGO вставляв

revenge.

Or perhaps it was the work of an evil genius. "We cannot rule out the evil genius hypothesis," he deadpanned during a Caltech press conference. "We're doing our best to rule out the evil genius hypothesis. But I like to think a binary black hole collision is more likely."

From just that one signal alone, physicists could infer the masses of both black holes by studying the frequency (one was 29 solar masses, the other 36 solar masses). After the merger, the newly formed black hole was missing roughly 3 solar masses—emitted in a powerful burst of gravitational waves. Imagine three of our Suns suddenly annihilating and you'll get an idea of just how much energy we're talking about here. Studying the amplitude told them the collision happened some 1.3 billion light years away in the southern hemisphere.

So not only is this the first direct detection of gravitational waves, it's also the first proof that binary black hole systems actually exist. And all this came from data during an engineering run right after the upgraded Advanced LIGO came online. It's still not hunting at full sensitivity yet. When that happens, physicists expect to see many more such events, giving them a new window into how the universe works. In fact, Weinstein said that an additional 12 LIGO-related papers would be posted by the end of today.

That makes LIGO "a new instrument for observing a new form of radiation come from the heavens," said Bill Weber, a physicist at Universita di Trento and member of the LISA Pathfinder collaboration.

"First detection is very important in terms of fundamental physics because of what it says about gravity, but it also opens a window onto what has previously been the dark universe," said Avery Broderick, a physicist at the Perimeter Institute and the University of Waterloo in Canada. "For centuries, astronomers have been looking up at the night sky and thinking about the light side of the universe. Now we're going to get our first look at the dark side. There's every expectation that it will be just as rich and exciting."

Think of the revolutionary potential this way: every time astronomers have looked at our universe in a different wavelength of light—with

помилкові сигнали в дані з наміром помсти.

А може, це була справа рук злого генія. «Ми не можемо відкинути гіпотезу злого генія», – з незворушним виразом обличчя сказав він під час прес-конференції Каліфорнійського технологічного інституту. «Ми робимо все можливе, щоб відкинути цю гіпотезу. Особисто я схильюся до думки, що це було зіткнення бінарних чорних дір.»

З одного лиш цього сигналу фізики зробили висновок про масу обох чорних дір, вивчивши їх частоту (одна - 29 сонячних мас, а друга - 36). Після злиття, новоутвореній чорній дірі не вистачало приблизно трьох сонячних мас – втрачених під потужним сплеском гравітаційних хвиль. Щоб краще зрозуміти, про яку кількість енергії йдеться, уявіть собі, що три наших Сонця раптом вибухнули. Вивчення амплітуди дало фізикам інформацію про те, що зіткнення відбулося у південній кулі приблизно 1,3 млрд світлових років тому.

Таким чином, це не тільки перше безпосереднє виявлення гравітаційних хвиль, але й перший доказ того, що бінарні системи чорних дір справді існують. Усі ці дані були отримані під час пробного запуску оновленої вдосконаленої LIGO відразу після того, як її під'єднали до мережі. Поки що вловити хвилі на високих частотах їй не вдається. А коли це трапиться, фізики очікують побачити ще багато таких подій, що зможуть пролити світло на те, як влаштовано Всесвіт. Фактично, Вайнштайн повідомив, що до кінця дня буде опубліковано ще 12 додаткових документів, пов'язаних з LIGO.

Це робить LIGO «новим інструментом для спостереження за новою формою випромінювання, що надходить з небес», – сказав Білл Вебер, фізик з Університету Тренто і член співпраці LISA Pathfinder.

«Перше виявлення дуже важливо з точки зору фундаментальної фізики, оскільки воно говорить про гравітацію; а ще воно дає можливість побачити, яким темний Всесвіт був раніше, – сказав Ейвері Бродерік, фізик Інституту теоретичної фізики й Університету Ватерлоо в Канаді. – «Протягом століть астрономи дивляться на нічне небо й розмірковують про світлу сторону Всесвіту. А зараз ми вперше збираємось розглянути його темну сторону. Є всі підстави вважати, що вона буде настільки ж невичерпною і захоплюючою.»

Подивіться на потенціал перевероту з такої точки зору: кожен раз, коли астрономи досліджували на наш Всесвіт, використовуючи різні довжини хвиль світла – за допомогою рентгенівських,

x-rays, infrared, radio, or gamma rays—they have uncovered aspects that we would not have otherwise seen. Gravitational waves should be no different, only with something more akin to sound than light. Now, in addition to looking at our universe, we can listen to it as well. As Jorge Cham of PhD Comics so eloquently put it in his illustrated explainer, “Imagine your whole life you had been deaf until one day your hearing was restored.”

The key difference is that while sound requires a medium through which to travel, gravitational waves move the medium—in this case, spacetime itself. “They literally squash and stretch the fabric of spacetime,” Chiara Mingarelli, a gravitational wave astrophysicist at Caltech, told Gizmodo. To our ears, the waves detected by LIGO would sound like a chirp (“woo-OOO”).

Exactly how is this revolution going to happen? Well, LIGO currently has two detectors, acting as “ears” for scientists, with more detectors slated to come online in the future. And while LIGO may have gotten there first in terms of direct detection—frankly, it was always expected to do so—it’s not the only game in town. There’s more than one kind of gravitational wave. In fact, there’s an entire spectrum, much like there are many different kinds of light, of varying wavelengths, in the electromagnetic spectrum. So there are other collaborations tailored to hunt waves at frequencies beyond what LIGO is designed to detect.

Mingarelli works with the NanoGRAV (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) collaboration, part of a larger international consortium that also includes the European Pulsar Timing Array and the Parkes Pulsar Timing Array in Australia. As the name implies, NanoGRAV scientists are hunting very low frequency gravitational waves in the 1 to 10 nanohertz regime; LIGO’s sensitivity is in the kilohertz (audible) portion of the spectrum. That makes for very long wavelengths; in fact, it would take ten years to complete a single cycle.

The collaboration relies on pulsar data collected by the Arecibo Observatory in Puerto Rico and the Green Bank Telescope in West Virginia. Pulsars are basically rapidly rotating neutron stars, formed when stars more massive than the Sun explode and collapse inward. They spin faster and faster as they shrink, just like a heavy

інфрачервоних, радіо або гамма-променів – вони виявляли аспекти, яких ми б не побачили. Гравітаційні хвилі не повинні бути різними, тільки чимось більш схожі на звук, ніж світло. Тепер, у нас є можливість не тільки дивитися на Всесвіт, але й слухати його. Ось як яскраво описав це Хорхе Чам з «PhD Comics» у своїх ілюстраціях: «Уявіть, що все своє життя ви були глухим, і одного дня ваш слух відновився.»

Ключова відмінність полягає в тому, що в той час як звук рухається в середовищі, гравітаційні хвилі переміщують середовище – у цьому випадку – сам простір-час. «Вони буквально розплющують і розтягують матерію простору-часу,» – повідомила для Gizmodo К’яра Мінгареллі, астрофізик з Каліфорнійського технологічного інституту, яка займається вивченням гравітаційних хвиль. На слух ми б сприймали хвилі, виявлені LIGO, як писк.

То як саме відбудеться цей переворот? Що ж, зараз у LIGO 2 детектори, які слугують для вчених в якості вух; у майбутньому цих детекторів буде більше. І хоч, як і очікувалось, LIGO була першою, хто здійснив прямі спостереження магнітних хвиль, вона не єдина у цій справі. Існує більше ніж один тип гравітаційних хвиль. Насправді, їх цілий спектр, так само, як в електромагнітному спектрі є багато різних видів світла з різними довжинами хвиль. Тож існують й інші організації, завдання яких – розпізнавати хвилі на частотах, окрім тих, які розпізнає LIGO.

Мінгареллі співпрацює з NanoGRAV (Північноамериканською наногерцовой обсерваторією гравітаційних хвиль), що є частиною більшого міжнародного консорціуму, до якого також входить European Pulsar Timing Array і Parkes Pulsar Timing Array в Австралії. Як впливає з назви, вчені NanoGRAV ловлять гравітаційні хвилі дуже низьких частот в режимі від 1 до 10 нГц. Чутливість LIGO знаходиться в кілогерцовій частині спектра, тобто її можна сприйняти на слух. Це дає можливість розпізнати дуже довгі хвилі; насправді, для завершення одного циклу знадобилось б десять років.

Організація покладається на дані пульсарів, ці дані отримано завдяки Обсерваторії Аресібо в Пуерто-Ріко та радіотелескопу Грін-Бенк в Західній Вірджинії. Пульсари – це по суті нейтронні зорі, які швидко обертаються та утворюються, коли більші за Сонце зірки вибухають і стягуються до середини. Стискаючись, вони обертаються все швидше й швидше; так само, як вантаж на кінці троса гойдатиметься швидше, якщо цей трос ставатиме коротшим.

weight on the end of a tether will swing faster and faster the shorter the rope becomes.

They also give off powerful blasts of radiation as they rotate, just like the beam of a lighthouse, that are detected as pulses of light back on Earth. And those periodic rotations are remarkably precise—until quite recently as accurate as an atomic clock. This makes them an ideal cosmic detector of gravitational waves. In fact, the first indirect evidence came from studying pulsars in 1974, when Joseph Taylor, Jr. and Russell Hulse found that a pulsar orbiting a neutron star was slowly shrinking over time—an effect one would expect to see if it was converting part of its mass to energy in the form of gravitational waves.

In the case of NanoGRAV, the smoking gun would be a kind of shimmering effect. The pulses should arrive at the same time, but if they're hit by a gravitational wave, they will arrive slightly earlier or later, because spacetime will shrink or stretch as the wave passes through.

Pulsar timing arrays (PTAs) are especially sensitive to the gravitational waves produced by merging supermassive black holes a billion or ten billion times the mass of our Sun, like those believed to lurk at the center of the most massive galaxies. Should two such galaxies merge, so would the black holes at their centers, emitting gravitational waves. "LIGO sees the very end of the merger when the binaries are very close together," said Mingarelli. "With PTAs, we would see them earlier in the spiral phase, when they're just starting to orbit each other."

Then there is the space-based mission known as LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Earth-bound LIGO is great for detecting gravitational waves equivalent to the human audio portion of the spectrum — the kind produced by that newly discovered binary black hole merger. But many interesting sources of these waves are at lower frequencies. So physicists have to go into space to detect them. The primary objective of the current LISA Pathfinder mission (launched in December) is to validate the detector technology. "With LIGO, you can shut down the instrument, crack open the vacuum, and fix things," said MIT's Scott Hughes. "If you screw up in space, you're dead. You've got to get it all right from the get-go." As Gizmodo's Maddie Stone wrote back in December:

Під час обертання вони також випускають потужні спалахи випромінювання, подібно променю маяка, які на Землі виглядають як імпульси світла. І ці періодичні обертання надзвичайно точні – до недавнього часу вони відбувались із точністю атомного годинника. Це робить їх ідеальним космічним детектором гравітаційних хвиль. Фактично, перше непряме свідчення прийшло від вивчення пульсарів у 1974 році, коли Джозеф Тейлор молодший і Рассел Хулс виявили, що пульсар, який обертається навколо нейтронної зорі, повільно стискається з плином часу – ефект, який можна очікувати, якщо він буде перетворювати частину своєї маси на енергію у вигляді гравітаційних хвиль.

У випадку з NanoGRAV, незаперечним доказом може бути ефект мерехтіння. Імпульси повинні надходити в один і той же час, але якщо на них впливає гравітаційна хвиля, вони з'являться трохи раніше або пізніше, тому що простір-час буде стискатись або розтягуватись при проходженні хвилі.

Розрахунки випромінювання пульсарів (PTA) особливо чутливі до гравітаційних хвиль, створених злиттям надмасивних чорних дір, маса яких у мільярд або десять мільярдів разів перевищує масу нашого Сонця, подібно до тих, які, як вважають, ховаються в центрі найбільших галактик. У разі злиття двох таких галактик чорні діри, що знаходяться в їх центрах, випускають гравітаційні хвилі. «LIGO вловлює сам кінець злиття, коли подвійні зорі розташовані дуже близько одна до одної», - сказав Мінгареллі. «З PTA ми побачимо їх ще в спіральній фазі, коли вони тільки починають обертатися одна навколо одної».

Ще одна космічна місія – LISA (космічна антена лазерного інтерферометра). Розташована на Землі, LIGO відмінно підходить для виявлення гравітаційних хвиль, еквівалентних людській звуковій частині спектра – тих, що виникли в результаті цього недавно виявленого подвійного злиття чорних дір. Але багато цікавих джерел цих хвиль знаходяться нижчих частотах. Тож, щоб виявити їх, фізики повинні відправитися в космос. Основним завданням поточної місії LISA Pathfinder (запущеної в грудні) є перевірка технології детектора. «З LIGO ви зможете вимкнути прилад, відкрити вакуум і виправити ситуацію», - сказав Скотт Хьюз з MIT. «Якщо ви допустите помилки в космосі, вам кінець. Ви повинні робити все правильно з самого початку. Як писала у своїй статті Медді Стоун у грудні:

[LISA's] goal is simple: using laser interferometers, the spacecraft will attempt to precisely measure the relative positions of two 1.8 inch gold-platinum cubes in free fall. Housed in separate electrode boxes a mere 15 inches apart, the test objects will be shielded from the solar wind and all other external forces, such that the tiny motions caused by gravitational waves can (hopefully) be detected.

Finally, there are two experiments designed to target the imprints left by primordial gravitational waves in the cosmic microwave background radiation (the afterglow of the Big Bang): BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2) and the Planck satellite mission. BICEP2 famously declared that it had found such evidence in 2014, only to have its hopes deflated when those signals turned out to be due to cosmic dust.

But both collaborations are continuing the hunt, in hopes of shedding light on the early history of our universe—and hopefully providing confirmation of a key prediction of inflationary theory. This theory predicts that shortly after its birth, the universe underwent a rapid growth spurt that should have produced powerful gravitational waves, leaving an imprint in the CMB in the form of a special orientation of the light waves (polarization).

Each of these four gravitational wave regimes will give astronomers four new windows into the universe.

But we know what you're all really thinking—surely now it's time to fire up the warp drives, baby! Does the LIGO discovery mean we should all sign up for Star Fleet next week? "I think the answer to that is unequivocally 'no'," Broderick said. "But the better we understand gravity, the better we can imagine trying to design such a thing. That's what scientists do. We figure out how the universe works, so we can optimize our ability to bend it to our will within that set of rules."

So.... you're saying there's chance. Make it so.

Мета LISA є простою: за допомогою лазерних інтерферометрів космічний апарат спробує точно виміряти відносне положення двох 1,8-дюймових золото-платинових кубів у вільному падінні. Розміщені в окремих ящиках з електродами на відстані всього 15 дюймів, об'єкти будуть захищені від сонячного вітру і всіх інших зовнішніх чинників, так що, сподіваюся, вдасться виявити крихітні рухи, викликані гравітаційними хвилями.

Нарешті, є ще два експерименти, мета яких – націлитись на відбитки, залишені первинними гравітаційними хвилями в космічному мікрохвильовому фоновому випромінюванні (залишки випромінювання Великого вибуху): BICEP2 (Фонове зображення космічної позагалактичної поляризації 2) і місія супутника Планка. BICEP2 заявили, що знайшли такі відбитки в 2014 році, та їх надії не виправдалися, коли виявилось, що ці сигнали були викликані звичайним космічним пилом.

Але обидві організації продовжують пошуки з надією пролити світло на ранню історію нашого Всесвіту й надати підтвердження прогнозу теорії космічної інфляції. Ця теорія передбачає, що незабаром після свого виникнення, Всесвіт піддалася швидкому зростанню, яке повинне було супроводжуватись потужними гравітаційними хвилями, а ті в свою чергу залишили б відбиток у реліктовому випромінюванні у вигляді особливого спрямування світлових хвиль (поляризація).

Кожен з цих чотирьох режимів гравітаційних хвиль надасть астрономам можливість по-різному вивчити Всесвіт.

Але ми знаємо, про що ви насправді думаєте – зараз саме час запустити двигун деформації простору, крихітко! Чи означає відкриття LIGO те, що наступного тижня ми всі повинні приєднатися до Star Fleet (Зоряного флоту)? «Я думаю, що відповідь на це питання однозначно «ні», – сказав Бродерік. «Але чим краще ми розумітимемо гравітацію, тим краще ми зможемо уявити, як змоделювати таку річ. Саме цим займаються науковці. Ми вивчаємо, як працює Всесвіт, бо так ми зможемо краще підлаштувати його під свої бажання в межах цього набору правил».

Отже... Ви стверджуєте, що шанс є? Тоді використовуйте його.