

Елена Понизовкина

## Рябь пространства-времени

Космос преподнес ученым подарок к столетию общей теории относительности Эйнштейна — детектированы гравитационные волны

**В** середине февраля этого года члены международной коллаборации LIGO, объединяющей сотни ученых из семнадцати стран, в том числе из России, объявили о первой прямой регистрации гравитационных волн, испущенных двумя сливающимися черными дырами общей массой более 60 солнц 1,3 млрд лет назад. Это научное событие без преувеличения космического масштаба, и произошло оно в минувшем сентябре в лазерной гравитационно-волновой обсерватории-интерферометре LIGO (США). За подробным комментарием мы обратились к заведующему лабораторией теоретической физики Института электрофизики УрО РАН академику Михаилу Садовскому.

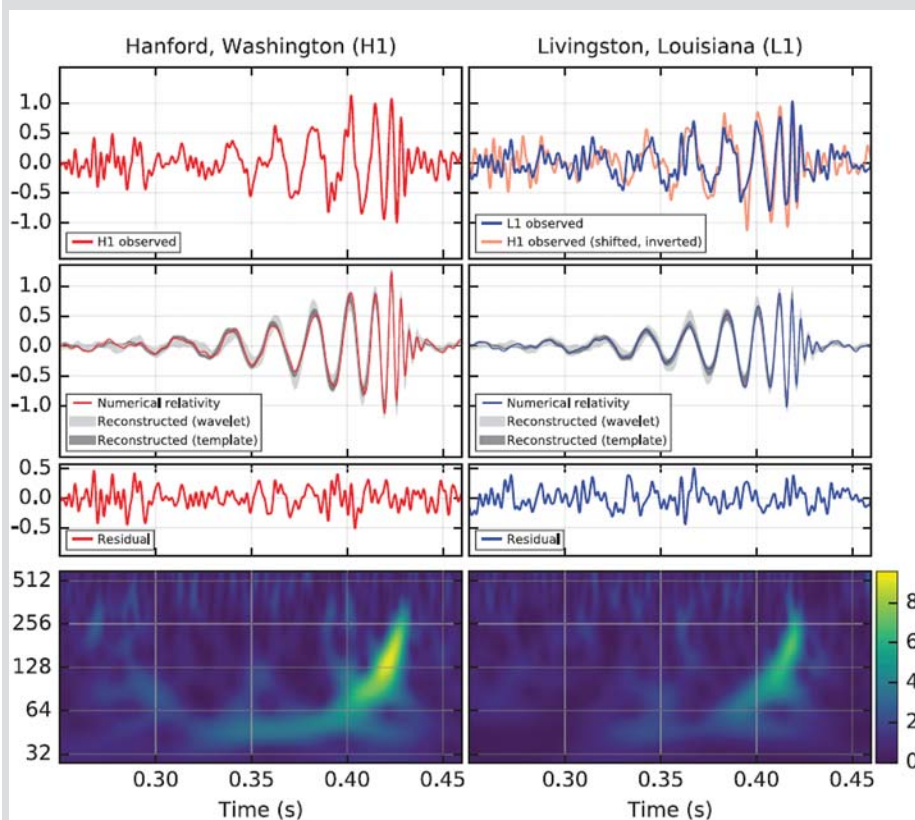
— *Уважаемый Михаил Виссарионович, для начала объясните дилетанту, что такое гравитационная волна?*

— Представьте четыре шарика, подвешенные крест-накрест. Если произойдет гравитационное возмущение, два шарика отклонятся друг от друга на определенное расстояние, а другие два одновременно с этим устремятся навстречу друг другу; в следующей фазе волны их движение будет противоположным. В итоге под действием гравитационной волны все четыре шарика начнут синхронно колебаться. Но это воображаемый эксперимент. В повседневной жизни никто не чувствует и не наблюдает гравитационные волны, они ни на что не оказывают влияния, потому что гравитационные взаимодействия очень слабы по сравнению, например, с электромагнитными. И хотя большинство физиков-теоретиков никогда не сомневались в существовании гравитационных волн, задача их экспериментальной регистрации в земных условиях представлялась очень сложной. Оставалось надеяться на космос — там происходят мощные гравитационные возмущения, и вызванные ими волны могут дойти до Земли.

— *Значит, нынешнее открытие неожиданным назвать нельзя?*

— Существование гравитационных волн было теоретически предсказано Альбертом Эйнштейном ровно 100 лет назад в его статье 1916 года. Это естественно следовало из общей теории относительности, или со-

## Первый зафиксированный гравитационно-волновой сигнал



Гравитационная волна от слияния бинарных черных дыр, зарегистрированная детекторами LIGO в Ханфорде и Ливингстоне

слева — данные с детектора в Ханфорде (H1), справа — в Ливингстоне (L1). Время отсчитывается от 14 сентября 2015, 09:50:45 UTC. Верхний ряд: напряжения  $h$  в детекторах. Сигнал GW150914 сначала прибыл на L1 и через  $6.9 \pm 0.5 - 0.4$  мс на H1; для визуального сравнения данные с H1 показаны на графике L1 в обращенном и сдвинутом по времени виде (чтобы учесть относительную ориентацию детекторов).

Второй ряд: напряжения  $h$  от гравитационно-волнового сигнала, пропущенные через такой же полосный фильтр, 35 — 350 Гц. Сплошная линия — результат численной относительности для системы с параметрами, совместимыми с найденными на базе изучения сигнала GW150914, полученного двумя независимыми кодами с результирующим совпадением 99,9. Серые толстые линии — области 90% доверительной вероятности формы сигнала, восстановленные из данных детекторов двумя различными методами. Темно-серая линия моделирует ожидаемые сигналы от слияния черных дыр, светло-серая не использует астрофизических моделей, а представляет сигнал линейной комбинацией синусоидально-гауссовых взрывов. Реконструкции перекрываются на 94%. Третий ряд: остаточные ошибки после извлечения отфильтрованного предсказания сигнала численной относительности из отфильтрованного сигнала детекторов. Нижний ряд: представление частотной карты напряжений, показывающее возрастание доминирующей частоты сигнала со временем.

временной теории гравитации. Если существуют электромагнитные волны, то должны иметь место и гравитационные возмущения, которые распространяются в виде волн со скоростью света и локально изме-

няют геометрию пространства и времени. Предсказание о существовании гравитационных волн позволило, например, объяснить изменение темпов сближения тесных систем двойных звезд.





Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Общая стоимость проекта — около 620 млн долларов

REUTERS



Михаил Садовский: «Ррямая регистрация гравитационных волн — это по существу рождение нового научного направления, гравитационно-волновой астрономии»

Впервые задачу прямой регистрации гравитационных эффектов попытался решить еще в 1960-годы американский физик Джозеф Вебер. Он разработал первые детекторы — два массивных алюминиевых цилин-

дра, подвешенных на большом расстоянии друг от друга. По мысли Вебера, большая гравитационная волна заставит их колебаться в унисон, и таким образом ее прохождение можно будет зарегистрировать. В 1968 году он объявил о регистрации гравитационных волн на своих детекторах, но результаты его экспериментов были подвергнуты сомнению другими исследователями. К сожалению, до нынешнего триумфа основанного им направления Джозеф Вебер не дожил. Впрочем, вклад ученого в гравитационно-волновую астрономию научным сообществом признан.

— *А наши соотечественники предпринимали попытки зарегистрировать гравитационные волны?*

— В СССР и России пионером гравитационно-волновых исследований стал член-корреспондент РАН Владимир Брагинский. Он скептически относился к опытам Вебера, считая, что такими детекторами ничего зарегистрировать нельзя, но продолжал работать в этом направлении.

Схема, реализованная в нынешнем экс-

перименте, была предложена также отечественными учеными — профессором Михаилом Герценштейном и академиком Владиславом Пустовойтом в статье, опубликованной в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» за 1962 год. Схема эта достаточно проста. Она построена на интерферометре Майкельсона, принцип действия которого заключается в следующем: пучок света из источника направляется к зеркалу, расположенному от него на некотором расстоянии, отражается от зеркала и возвращается обратно, а второй световой сигнал пускается в перпендикулярном направлении, он также отражается от зеркала и возвращается. В точке пересечения световых сигналов на детекторах можно посмотреть картину интерференции. В случае прохождения гравитационной волны зеркала начинают синхронно дрожать, и картина интерференции меняется. Благодаря тому, что оптика — наука очень точная, появляется возможность зафиксировать даже очень слабый гравитационный эффект.



## Что увидели детекторы LIGO

Увидели сигнал, выглядящий именно так, как предсказывалось для слияния пары черных дыр (см. рис. 1). Изображено относительное растяжение интерферометра под действием гравитационной волны. Масштаб по вертикали 10<sup>-21</sup>, что значит растяжение четырехкилометрового плеча интерферометра на 2,5 × 10<sup>-15</sup> см (умеют мерить растяжения до 10–17 см, какой бы фантастикой это ни казалось). На рисунке — растяжения и сжатия двух детекторов (показано разными цветами), находящихся на расстоянии 3000 км. Сначала идет шум, в котором начинают проявляться явные волны, которые идут все чаще, а потом резко заканчиваются. Каждая волна — пол-оборота системы двух черных дыр. Они быстро сближаются, поэтому время между пиками уменьшается. Последняя волна — это уже практически одна черная дыра, хотя и сильно деформированная.

— **Как, глядя на рисунок, самому прикинуть массу слившихся черных дыр и расстояние до них?**

Надо оценить период вращения сливающихся объектов в последний момент. Смотрим на рисунок и видим, что расстояние между последними пиками примерно в десять раз меньше, чем между рисками, то есть где-то 5 миллисекунд. Это полпериода вращения еще сильно деформированной черной дыры. С какой линейной скоростью вращается ее поверхность? Сравним со скоростью света, но меньше, примерно треть (предельная кротовская дыра) — независимо от размера.

Тогда полукруглость вращения будет примерно 500 км, делим на  $\pi$ , получаем радиус 170 км. Радиус черной дыры солнечной массы — 3 км, значит, масса системы — около 60 солнечных. На самом деле — 62. Поразительная точность, особенно если учесть, что время между пиками мы прикидывали на глазок.

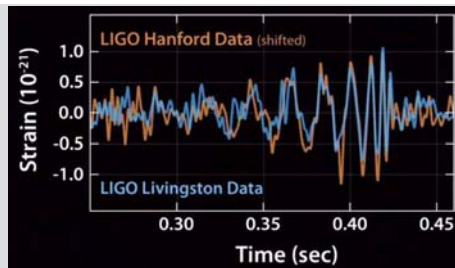
Теперь попробуем оценить расстояние. Это чуть сложнее. Амплитуда гравитационной волны (относительная деформация пространства) обратно пропорциональна расстоянию до источника. В источнике деформация огромна, ну не единица, конечно, но 0,1 — вполне реально (расчеты дают именно такой порядок величины). Мы имеем у себя 10<sup>-21</sup> (см. единицы по вертикальной оси), значит, мы находимся примерно в 10<sup>20</sup> раз дальше от источника, чем его размер — 170 км (см. выше). Получаем 1,7 × 10<sup>7</sup> см × 10<sup>20</sup> = 1,7 × 10<sup>27</sup> см = 0,6 гигапарсека (на самом деле 0,4 гигапарсека). Опять замечательное попадание при том, что есть еще неопределенность в ориентации экваториальной плоскости системы относительно луча зрения.

■ Борис Штерн, «Троицкий вариант» онлайн, 12 февраля 2016 года.

— **Интерферометр, где было совершенно сенсационное открытие, работает на этом принципе?**

— Да. Обсерватория LIGO состоит из двух установок: одна размещена в Хэнфорде, штат Вашингтон, другая — в Ливингстоне, штат Луизиана, на расстоянии около 3 тыс. километров. У каждого интерферометра два «плеча» длиной по 4 км, расположенные перпендикулярно друг другу. Это трубы, внутри которых пускается лазерный луч. Если придет гравитационная волна, то в обоих интерферометрах на детекторе в точке пересечения лучей синхронно должна возникнуть характерная картина интерференции.

Инициаторами проекта LIGO в 1980-е годы стали профессор Калифорнийского технологического института Кип Торн (кстати, один из авторов сценария к космическому боевику «Интерстеллар») и Рональд Дривер, а также профессор Массачусетского технологического института Райнер Вайсс. В списке участников международной коллаборации, насчитывающем более 200 человек, есть наши соотечественники, в том числе уже названный член-корреспондент Владимир Брагинский, профессор Валерий Митрофанов (МГУ), члены-корреспонденты Александр Сергеев и Ефим Хазанов (Инсти-



тут прикладной физики РАН, Нижний Новгород) и другие исследователи.

Работа российских участников проекта частично была поддержана грантами РФФИ. К сожалению, нелепые условия предоставления грантов, принятые в Российском научном фонде, полностью исключают поддержку такого рода коллективных исследований. Так, по правилам фонда, работа, профинансированная РФФИ, не может быть поддержана никакими другими фондами и грантами. Требование это сколь жесткое, столь и неконструктивное. Ведь любой крупный научный проект, тем более международный, получает поддержку десятков различных фондов, и коллаборация LIGO тому пример.

Между тем проект LIGO весьма дорогостоящий. Строительство обсерватории обошлось в 300 млн долларов плюс расходы на эксплуатацию и модернизацию. LIGO был запущен в 2002 году и работал до 2010-го. Однако в тот период гравитационные волны зарегистрировать не удалось, фиксировались лишь различные шумы. Затем интерферометр был остановлен для модернизации. Аналогичный LIGO интерферометр Virgo с трехкилометровыми плечами начал работать в 2007 году в Италии, неподалеку от Пизы. С 2011 года он проходит модерни-

зацию, и во второй половине нынешнего должен быть запущен снова. А усовершенствованный комплекс Advanced LIGO приступил к работе в начале осени 2015 года.

— **Получается, открытие произошло вскоре после запуска?**

— Именно так. 14 сентября на детекторе LIGO был зарегистрирован сигнал, который выглядел «подозрительно» с точки зрения наблюдения гравитационных волн. Изменения интерференционной картины полностью соответствовали расчетам, которые участники коллаборации произвели заранее на случай гравитационного возмущения. Это было именно то, что должно было быть при прохождении гравитационной волны, возникшей при столкновении двух черных дыр — массивных звезд, находящихся на последней стадии жизни, «весом» 29 и 36 масс Солнца. В результате космического катаклизма образовалась черная дыра в 62 солнечных массы, а энергия трех солнечных масс перешла в гравитационное излучение, которое через 1,3 млрд световых лет дошло до нас. Если бы к моменту фиксации интерферометр Virgo уже функционировал, можно было бы определить, откуда пришла гравитационная волна. В этот раз сделать это не удалось, но ученые надеются, что удастся в будущем, когда LIGO и Virgo будут работать параллельно.

— **И, наконец, несколько слов о значении события...**

— Обнаружение таких «тяжелых» черных дыр — само по себе серьезное открытие в астрономии. А прямая регистрация гравитационных волн — это по существу рождение нового научного направления, гравитационно-волновой астрономии. Исследуя гравитационные эффекты, мы, вероятно, сможем заглянуть в самые ранние периоды формирования Вселенной. Ведь из самых ранних стадий эволюции «огненного шара», возникшего в результате Большого взрыва, световые сигналы не проходят, а гравитационные волны, излученные на этом этапе расширения Вселенной, могут до нас дойти. Замечательно и то обстоятельство, что общая теория относительности теперь практически окончательно экспериментально проверена на классическом (не квантовом) уровне и действительно очень точно описывает гравитацию. Так что состоявшееся открытие стало ярким «подарком» к столетнему юбилею этой теории.

О практическом смысле регистрации гравитационных волн пока говорить, конечно, сложно, но не исключено, что в будущем он обнаружится. В начале XX века ведь никто не мог предположить, что, к примеру, современные GPS-навигаторы будут правильно определять ваше местоположение только с учетом эффектов общей теории относительности. А гравитационно-волновая астрономия, по-видимому, уже совсем не за горами. ■