**И рыба, и удочка**  
**5.05.2016 21:08** | [С. Б. Попов](http://www.astronet.ru/db/author/2502)/[ГАИШ, Москва](http://www.sai.msu.su/)   
  
Открытия бывают разные. Бывают совсем случайные, в астрономии они часто встречаются. Бывают случайные, да не совсем, т.к. сделаны в результате тщательного прочесывания местности, как, например, открытие Урана Вильямом Гершелем. Встречаются т.н. серендипические открытия, когда искали одно, а нашли другое. Хотели найти западный путь в Индию и Китай, а нашли Америку. Или, кто-то поехал в экзотические страны искать клад, а нашел новую болезнь и доселе неизвестное племя людоедов. И т.д.

Среди всего этого многообразия особое место занимают запланированные открытия. Они основаны на четком теоретическом предсказании, сделанном на основе важной модели. Поэтому предсказанное ищут в первую очередь для того, чтобы подтвердить теорию. Сюда можно отнести и открытие Нептуна (его не зря называли триумфом ньютоновской механики), и точное измерение изменения положения звезд во время солнечного затмения (важнейший момент в доказательстве Общей Теории Относительности), и кое-что еще.

Из недавних открытий в эту категорию безусловно попадает регистрация бозона Хиггса. Эта частица была последним не обнаруженным элементом Стандартной модели. Именно для поисков бозона проектировали и строили Большой Адронный Коллайдер в ЦЕРНе. Т.е., параметры установки во многом определялись модельными предсказаниями о свойствах частицы, в первую очередь ее массы.

Почему для исследования частиц нужно строить дорогие сложные ускорители? Ведь из космоса к нам постоянно прилетают частицы очень высоких энергий. Сейчас в потоках космических лучей зарегистрированы частицы с энергиями в десятки, и даже сотни, миллионов раз больше, чем на БАКе. Дело в том, что этих частиц мало, и все происходит в неконтролируемых условиях. Первое время, примерно до середины 20 века, космические лучи действительно были важнейшим объектом исследований для физики частиц. Но затем физики научились делать достаточно мощные ускорители, чтобы получать сразу много событий в контролируемых лабораторных условиях, где мы можем удобно разместить детекторы, повторять опыт и варьировать разные параметры эксперимента. Космические лучи по-прежнему содержали в себе более энергичные частицы, но их мало, поэтому получить надежный результат по ним сложно.

Для начала строительства новой дорогой установки часто нужен гарантированный результат. (точнее, почти гарантированный, т.к. наука это все-таки поиск нового, и неожиданности всегда возможны. Но тогда уж надо добиваться того, чтобы не-открытие было ничуть не менее интересным, а может быть даже более сенсационным результатом, чем открытие.) Так что все параметры БАК были рассчитаны так, чтобы или открыть бозон в заранее установленные сроки (если нет аварий), или же, не обнаружив его, получить преинтересную загадку. Похожая ситуация была и с открытием гравитационных волн.

Если в случае бозона Хиггса важно было достичь на ускорителе большой энергии частиц и большой светимости (т.е., большого числа частиц), чтобы за год-два наблюдений точно можно было бы набрать достаточно большую статистику. То в случае детекторов гравитационных волн важно было достичь достаточной чувствительности, чтобы какие-то из потенциальных источников гравитационно-волновых всплесков за год-два наблюдения точно дали достаточное число событий для надежного заявления о регистрации сигнала.

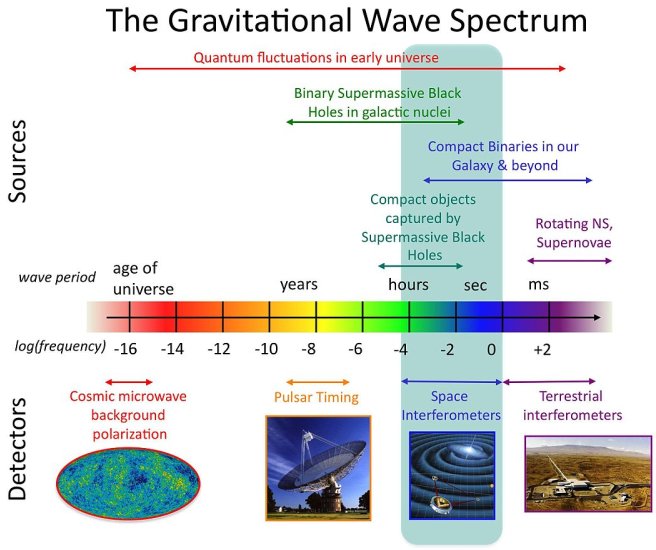
**Новое поколение детекторов**

Гравитационные волны традиционно называют предсказанием Общей Теории Относительности. Это и в самом деле так. Хотя сейчас такие волны есть во всех моделях, альтернативных ОТО или же дополняющих ее. Конечность скорости распространения гравитационного взаимодействия приводит к появлению волн. Такие волны это возмущения пространства-времени, распространяющиеся от источника. Скорость их в ОТО в точности равна скорости света, но в других моделях может немного отличаться в ту или другую сторону.

Для того, чтобы возникли гравволны, необходимо, чтобы источник определенным образом пульсировал или ускоренно двигался (например, не подходят движения с идеальной сферической или цилиндрической симметрией). Таких источников масса. Но часто у них маленькая масса. Недостаточная для того, чтобы породить мощный сигнал. Ведь гравитация самое слабое из четырех фундаментальных взаимодействий, поэтому зарегистрировать гравитационный сигнал очень трудно.

Кроме того, для регистрации надо, чтобы сигнал достаточно быстро менялся во времени, т.е. имел достаточно высокую частоту. Иначе нам не удастся его зарегистрировать, т.к. изменения будут слишком медленными. Значит, объекты должны быть еще и компактными.

Итак, нам нужны массивные компактные объекты, совершающие быстрые движения. Окинув взором доступную часть вселенной, мы немедленно приходим к выводу, что такими источниками могут быть нейтронные звезды или черные дыры. Мы можем увидеть или процесс их образования, или процесс взаимодействия друг с другом. Последние стадии коллапса звездных ядер, приводящие к образованию компактных объектов, а также последние стадии слияния нейтронных звезд и черных дыр имеют длительность порядка нескольких миллисекунд (что соответствует частоте в сотни Герц) - это то, что надо. При этом выделяется много энергии, в том числе (а иногда и в основном!) и в виде гравволн, т.к. массивные компактные тела совершают те или иные быстрые движения. Вот они - наши идеальные источники!



Определившись с источниками, начнем проектировать детектор. Для этого надо понять, что же делает гравитационная волна. Не вдаваясь в детали, можно сказать, что прохождение гравитационной волны вызывает приливную силу. Конечно, обычные лунные или солнечные приливы - это отдельное явление, и гравволны тут ни при чем. Но если мы посмотрим на объект, подвергающийся действию гравволн, то в нем возникают именно приливные силы.

Мы можем взять, например, металлический цилиндр, облепить его датчиками, и изучать его колебания. Это несложно, поэтому такие установки начали делать еще полвека назад (есть они и в России, сейчас в Баксанской подземной лаборатории монтируется усовершенствованный детектор, разработанный командой Валентина Руденко из ГАИШ МГУ). Проблема в том, что и безо всякой гравволны такой прибор будет видеть сигнал. Есть масса шумов, с которыми трудно бороться. Вы можете (и это было сделано!) установить ваш детектор под землей, попытаться изолировать его, охладить до низких температур. Но все равно, вам нужен очень мощный гравитационно-волновой сигнал. А мощные сигналы приходят редко.

Первоначально большой энтузиазм вызывали вспышки сверхновых. Они происходят в галактике вроде нашей не так уже редко - раз в несколько десятков лет. Значит, если вам удастся достичь чувствительности, позволяющей видеть сигнал с расстояния в несколько миллионов световых лет, то вы можете рассчитывать на пару сигналов в год. Не так уж мало. Но оказалось, что первоначальные оценки мощности выделения энергии в виде гравитационных волн во время сверхновой были слишком оптимистичными. Если бы сверхновая вспыхнула в нашей Галактике - то можно было бы надеяться, но ....

Смотрите, мы оказываемся в непростой ситуации. В принципе, можно сделать недорогой детектор и просто долго ждать сигнала. Прибор может сработать завтра, а может через 50 лет. Зато он не дорогой. Или вы можете начать думать над другим - более сложным и дорогим,- устройством, которое будет гарантированно видеть как минимум несколько всплесков в год. Все прямо как у Жванецкого. В итоге решили идти вторым путем.

Если сверхновые вспыхивают в Галактике раз в несколько десятков лет, то слияния нейтронных звезд происходят раз в пару десятков тысяч лет. А черные дыры сливаются друг с другом еще реже. Зато, во-первых, здесь сигнал гораздо-гораздо мощнее. А во-вторых, мы можем его достаточно точно рассчитать. Т.е., неопределенность теоретического предсказания становится очень малой. Но теперь нам надо научиться видеть сигнал с расстояния в несколько сотен миллионов световых лет. Только так мы наберем десятки тысяч галактик, следя за которыми, мы можем надеяться обнаружить несколько сигналов за год.

Детекторы типа болванки с датчиками тут не помогут. И была придумала другая схема. Впервые в приложении к регистрации гравитационных волн ее обсудили Пустовойт и Герценштейн в своей статье 1962 года. Это лазерный интерферометр. Луч лазера бегает между зеркалами в двух плечах интерферометра, а затем лучи из разных плеч складываются. Анализируя результат интерференции лучей из двух плеч, можно измерить относительное изменение длин плеч (т.е. расстояния между зеркалами в разных плечах). Это очень точные измерения, поэтому, если победить шумы, то можно достичь фантастической чувствительности.

В начале 90-х гг. было принято решение о строительстве нескольких детекторов по такой схеме. Первыми в строй должны были войти относительно небольшие установки - это GEO600 в Европе и TAMA300 - в Японии. Числа соответствуют длине плеч в метрах. На этих установках должны были обкатать технологии. Ну и, конечно же, им могло повезти и тогда они совершили бы важнейшее открытие. Но основными игроками должны были стать установки LIGO в США и VIRGO в Европе. Здесь размер прибора уже измеряется километрами, а окончательная плановая чувствительность должна была бы позволить видеть десятки, если не сотни событий в год.



Почему надо несколько приборов? В первую очередь, чтобы проверять друг друга. Вспомним, что, хотя БАК один, но там работает несколько экспериментов. И для регистрации Хиггса было крайне важно, что частицу видели в двух экспериментах. В случае гравволн это еще важнее, т.к. есть много локальных шумов (например, связанных с сейсмикой). И одновременная регистрация на северо-западе США и в Италии была бы прекрасным свидетельством того, что это какой-то внешний сигнал.

Но есть и вторая причина. Дело в том, что гравитационно-волновые детекторы очень плохо определяют направление на источник. Примерно, как мы плохо определяем направление источника звука: Где-то там, слева. И все. А вот если опросить двух-трех свидетелей, слышавших звук выстрела, находясь на значительном расстоянии друг от друга, то можно будет довольно точно определить направление.

Установки долго проектировали и строили. Долго учились бороться с шумами и анализировать данные. Это все очень сложные задачи, поэтому и LIGO, и VIRGO - это большие международные коллаборации с сотнями участников, а отдельные части оборудования изготовлялись в разных странах (в том числе и в России). Кроме того, надо было точнее рассчитать и ожидаемое количество событий, и форму сигнала. Чем точнее мы знаем форму - тем проще нам распознать всплеск. Это знает каждый, кто ночью смотрит телевизор на маленькой громкости, чтобы не разбудить других. Пока герои говорят известные вам слова все хорошо. Но как только они произносят, например, чье-то незнакомое вам имя или название какого-нибудь экзотического места, о котором вы никогда не слышали все пропало. Вы уже не можете разобрать, что же точно они произнесли.

**Установки начинают работу**

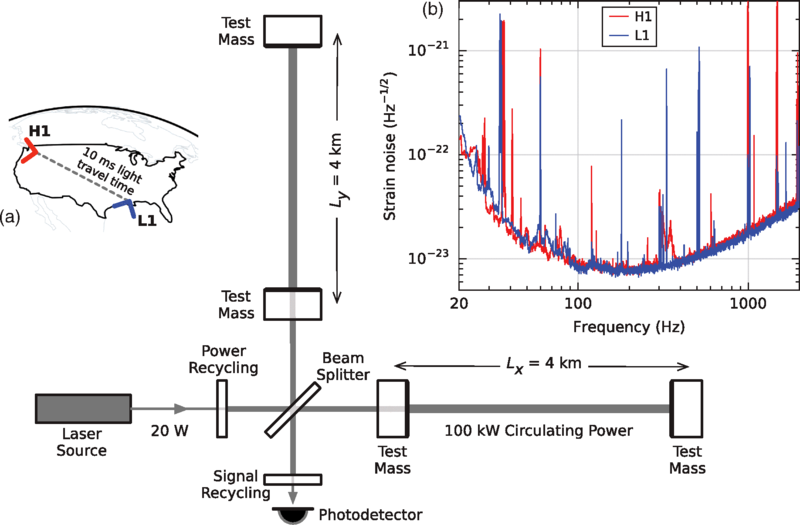
В своем первоначальном виде детекторы LIGO были построены в 2002 г., а VIRGO - в 2003. По плану это был лишь первый этап. Все установки поработали по несколько лет, а в 2010-2011 они были остановлены для апгрейда, чтобы затем выйти на плановую высокую чувствительность.

Первыми заработали детекторы LIGO в сентябре 2015 г. VIRGO должен присоединиться во второй половине 2016 г. Начиная с этого этапа чувствительность позволяет надеяться на регистрацию как минимум нескольких событий в год. Важно оговориться, что здесь речь идет о чистом рабочем времени, к тому же, когда одновременно работает хотя бы две установки. Как бы то ни было, начиная с осени 2015 г. ставки стали очень высоки, и немедленно поползли слухи, что сигнал есть.

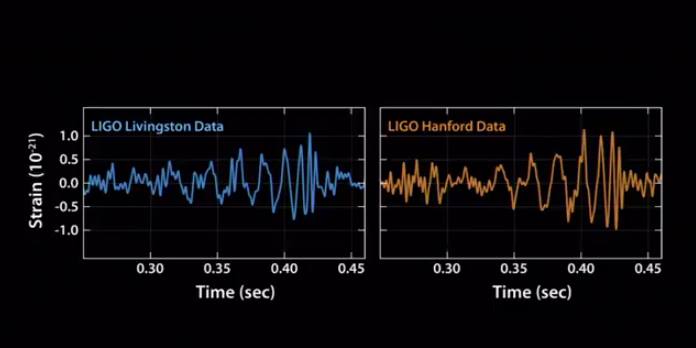
Здесь стоит отвлечься, чтобы еще раз подчеркнуть одну важную вещь: насколько тщательно в LIGO относятся к результатам и их анализу. Мы уже сказали, что в течение долгого времени большая группа ученых работала над разными технологиями, боролась с шумами и пыталась лучше их понять. Тщательно просчитывалась ожидаемая форма сигнала. Разрабатывались разные алгоритмы для выявления в данных гравитационно-волновых всплесков от слияний компактных объектов. Вообще, анализ данных с этих установок очень сложен. Используется несколько разных подходов, которые в конце должны давать схожие результаты, если обнаружен реальный всплеск. И это было проверено!

Несколько лет назад руководителями проекта в поток анализируемых данных был подброшен фальшивый всплеск. Это было сделано, чтобы в реальных условиях проверить, как сработает анализ. И все прошло великолепно. Представьте, каким стрессом было потом узнать, что обнаруженное вами событие - это лишь тестовое испытание вашей работы, а не настоящий результат!

Итак, в сентябре две установки LIGO начали работу, и ожидаемый темп всплесков составлял примерно одно событие в месяц. Астрофизики заранее оценили, что первыми ожидаемыми событиями должны стать слияния черных дыр. Связано это с тем, что черные дыры обычно раз в 10 тяжелее нейтронных звезд. Так что сигнал получается мощнее, и его видно с больших расстояний, что с лихвой компенсирует меньший темп событий в расчете на одну галактику.

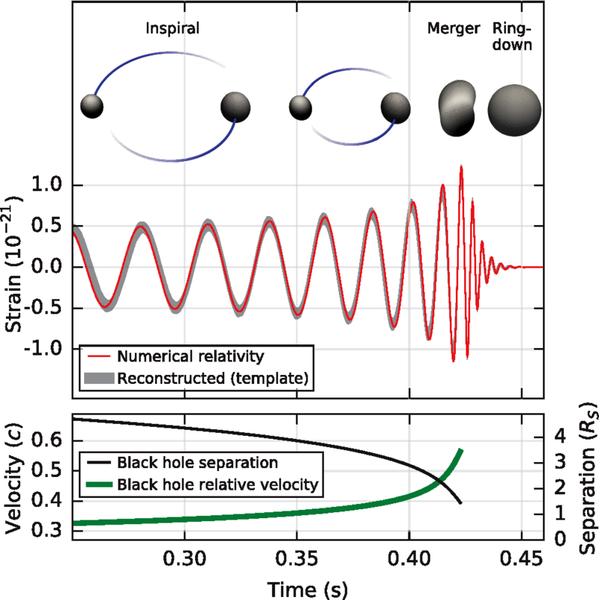


К счастью, долго ждать не пришлось. 14 сентября 2015 г. обе установки зарегистрировали практически идентичные сигналы. Анализ показал, что слияние двух довольно массивных черных дыр: одна имеет массу 25-30 масс Солнца, а другая - 35-40 солнечных масс. Большая масса слившихся тел позволила зарегистрировать событие, произошедшее в довольно далекой галактике: сигнал шел к нам примерно один миллиард триста миллионов лет.



Здесь важно подчеркнуть, что массы черных дыр, мощность сигнала и расстояние до источника сразу же получаются из еще довольно простого анализа сигнала. У черных дыр масса и размер связаны очень простым и хорошо известным образом. По частоте, на которой наблюдался сигнал мы сразу можем сказать, каков размер области выделения энергии. В данном случае размер сразу указывал на то, что образовалась черная дыра с массой более 60 солнечных. Зная массы, мы сразу получаем и полную энергию всплеска. А из известной энергии и величины измеренного сигнала получается расстояние.

Более детальный анализ позволяет уточнить отношение масс черных дыр и понять, как они вращались вокруг своей оси. А также определить и некоторые другие параметры двойной. Кроме того, сигнал с двух установок позволяет примерно определить место на небе, где произошел всплеск. К сожалению, пока тут точность не очень велика, но с вводом в строй обновленной VIRGO точность возрастет. А еще через несколько лет начнет принимать сигналы японский детектор KAGRA. Затем один из детекторов LIGO (изначально их было три, одна из установок была сдвоенной) будет собран в Индии. Начнется эпоха развитой гравитационно-волновой астрономии, когда будут регистрироваться многие десятки событий в год с достаточно точно определенными координатами, чтобы туда сразу можно было направить мощные телескопы.



**Что поймаем на рыбалке**

Выше мы неоднократно сравнивали регистрацию гравволн с открытием бозона Хиггса. Но есть и большая разница: все бозоны одинаковые, а все сливающиеся компактные объекты - разные. Если БАК, можно сказать, выполнил свою основную задачу, обнаружив бозон, то для LIGO и VIRGO все только начинается. Грядет эра гравитационно-волновой астрономии.

Конечно, на данный момент самое важное это подтверждение существования гравитационных волн. Кроме того, уже первый всплеск позволил улучшить ограничения на массу гравитона (в ОТО он имеет нулевую массу), а также сильнее ограничить отличие скорости гравитации от скорости света. Но уже в 2016 году ученые надеются начать получать с помощью LIGO и VIRGO много новых астрофизических данных.

Во-первых, конечно, у нас появился новый канал изучения черных дыр. Если ранее мы могли только наблюдать потоки вещества в окрестностях черных дыр (чаще всего на расстояниях, превышающих несколько шварцшильдовских радиусов), то теперь мы прямо видим как дыра с дырою говорит. Мы видим процесс слияния, и видим, как успокаивается образовавшаяся черная дыра, как колеблется ее горизонт, принимая свою окончательную форму (определяемую вращением). Наверное, вплоть до обнаружения хокинговского испарения черных дыр (а это остается гипотезой!) изучение слияний будет давать лучшую непосредственную информацию об этих объектах.

Во-вторых, наблюдения слияний нейтронных звезд дадут много новой, крайне нужной информации об этих объектах. Впервые мы сможем изучать нейтронные звезды так, как физики изучают частицы: наблюдать за их столкновениями, чтобы понять, как они устроены внутри. Загадка строения недр нейтронных звезд волнует и астрофизиков, и физиков. Наше понимание ядерной физики и поведения вещества при сверхвысокой плотности неполно без разрешения этого вопроса. Вполне вероятно, что именно гравитационно-волновые наблюдения сыграют здесь ключевую роль.

Считается, что именно слияния нейтронных звезд ответственны за короткие космологические гамма-всплески. В редких случаях удастся одновременно наблюдать событие сразу и в гамма-диапазоне, и на гравитационно-волновых детекторах (Редкость связана с тем, что, во-первых, гамма-сигнал сконцентрирован в очень узкий луч, и он не всегда попадает на нас, а во-вторых, от очень далеких событий мы не зарегистрируем гравволны.) Видимо, понадобится несколько лет наблюдений, чтобы удалось это увидеть (хотя, как обычно, может повезти, и это произойдет прямо сегодня). Тогда, кроме всего прочего, удастся очень точно сравнить скорость гравитации со скоростью света.

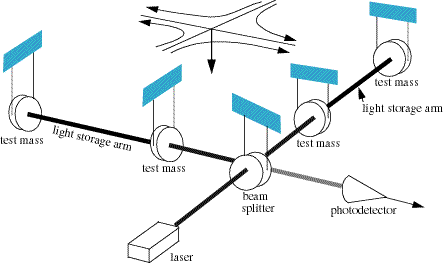
Т.о., лазерные интерферометры вместе будут работать как единый гравитационно-волновой телескоп, приносящий новые знания и астрофизикам, и физикам. Ну а за открытие первых всплесков и их анализ будет вручена заслуженная Нобелевская премия.

**Как устроен детектор LIGO**

Детекторы [LIGO](http://ligo.org/) и VIRGO - это лазерные интерферометры. Луч лазера делится зеркалом и попадает в два перпендикулярных друг другу плеча интерферометра. В каждом из плеч стоит оптический резонатор, запирающий свет, заставляя его несколько сот раз пробежать туда и обратно. Кроме того, специальные зеркала не дают свету попасть обратно в лазерную установку. В конце концов лучи света из каждого плеча интерферируют друг с другом и попадают на фотодетектор.

Прибор настроен таким образом, чтобы в результате интерференции получить ноль (точнее, почти ноль, нам нам совсем тонкие детали сейчас не важны). Это соответствует тому, что максимум волны из одного плеча точно совпадает с минимумом из другого. Теперь, если длина плеч меняется, то максимумы и минимумы перестают совпадать и появляется ненулевой сигнал.

Тут надо сделать отступление. Нередко задается такой вопрос: если гравитационная волна растягивает (или сжимает) плечи интерферометра, то ведь она должна также поступать и со световыми волнами в них. Как же тогда удается измерить удлинение или сокращение, если линейки также меняются? На этот хороший вопрос существует строгий ответ. Но он довольно сложный. Желающие могут освоить соответствующий кусок теории и проследить за шагами детального расчета (например, это можно сделать в Архиве е-принтов [arXiv.org](http://arxiv.org/) в статье Кристиана Корды (Christian Corda) с номером [1103.4783](http://arxiv.org/abs/1103.4783)). Но мы попробуем дать более простые ответы, пусть и не полностью все описывающие.



Короткий ответ состоит в том, что гравволны по-разному влияют на свет и плечи интерферометра, потому что свет - это безмассовые частицы. Все-таки свет всегда движется со скоростью света. А прибор работает, на самом деле, не как линейка, а как часы. Если у нас максимумы и минимумы летят со скоростью света, а длина плеч меняется (одно сжимается, а другое растягивается), то ясно, что одновременность прихода максимумов и минимумов нарушится появится сигнал.

Можно рассмотреть ситуацию чуть более детально, но слегка упростив схему работы прибора. Пусть пришла гравитационная волна, растягивающая одно из плеч. Легко понять, что за один пролет света по этому плечу от зеркала и обратно длина волны возрастет совсем на чуть-чуть: настолько, насколько расстояние между зеркалами возросло за это время. Т.е., эффект не накапливается (об этом также можно почитать в Архиве в статье Валерио Фараони [gr-qc/0702079](http://arxiv.org/abs/gr-qc/0702079)). В следующий момент в резонатор попадет новая порция света от лазера (с еще не растянувшейся волной), и снова за один (или несколько) пролетов длина световой волны возрастет незначительно, поскольку время пролета намного-намного меньше времени прохождения гравитационной волны, которая все время меняет длину плеч интерферометра.

Наконец, можно представить себе другую упрощенную ситуацию, когда волна имеет форму ступеньки. Тогда она сразу меняет световую волну внутри резонатора, и в момент прихода ступеньки сигнала в самом деле нет, но потом максимумам в одном (растянувшемся) плече интерферометра понадобиться больше времени, чтобы со скоростью света добежать до детектора, и минимумам в другом (сжавшемся) плече - меньше. Так что разница во времени (!) прихода все равно появится. Кроме того, будет постоянно подбрасываться новый свет из лазера, который не испытал влияние волны (с этим вариантом объяснения можно познакомиться в статье Питера Саулсона в [American Journal of Physics](http://dx.doi.org/10.1119/1.18578)).

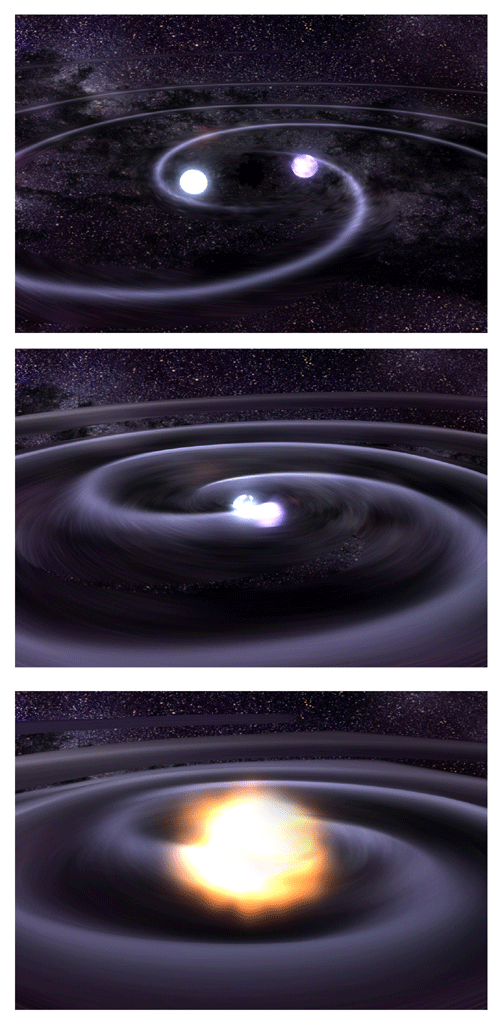
Итак, появился сигнал. Что же измеряет прибор? Измеряется ток на фотодетекторе(описание всей установки можно найти в[1411.4547](http://arxiv.org/abs/1411.4547)). Ведь теперь на нем появляется изменяющийся световой сигнал, поскольку интерференция больше не может приводить к к компенсации лучей из двух плечей интерферометра. В результате удается очень точно измерить параметры гравитационной волны, которая на протяжении десятков миллисекунд пыталась сдвинуть зеркала. Сдвиг ничтожно маленький - гораздо меньше размера протона. Но важно, что измеряется не прямо эта крошечная длина, а хорошо определяемые параметры тока в фотодетекторе.

Установки пытаются изолировать от всех шумов, но они остаются. К счастью, шумы достаточно изучены. Это и внешние воздействия (например, сейсмические), и шум внутри установки (зеркала и их подвесы имеют конечную температуру, сигнал лазера флуктуирует из-за квантовой природы света и т.д.). В ближайшем будущем чувствительность LIGO удастся поднять еще в несколько раз, во многом благодаря тому, что удастся лучше бороться с внутренними шумами.

Обсерватория LIGO считается в работающем состоянии, только если оба детектора принимают сигналы. Это позволяет побороть многие внешние шумы, т.к. внешнее влияния на два детектора, расположенных в тысячах километров друг от друга, различно. А дальше надо искать сигнал в данных детектора. Это было бы крайне сложно, если бы ученые не знали его форму. Поэтому были рассчитаны сотни тысяч модельных сигналов для слияний нейтронных звезд и черных дыр. И эти искусственные сигналы сравнивают с тем, что дают детекторы.

**Двойные звезды и темп всплесков**

Несколько десятилетий назад было окончательно осознано, что слияния двойных компактных объектов (нейтронных звезд и черных дыр) - это лучшие источники гравитационных волн с точки зрения перспектив их регистрации. Поэтому началось более активное изучение эволюции тесных двойных систем.



Гравитационные волны играют большую роль в эволюции двойных. Даже если мы имеем дело с обычными звездами, то на некоторой стадии эволюции их взаимодействие будет определяться гравитационными волнами. Эффект здесь очень простой. Любая пара объектов, вращающихся вокруг общего центра масс, является источником гравитационных волн. Чем массивнее объекты, и чем ближе они расположены друг от друга тем мощнее излучение. Излучение уносит энергию и момент вращения. В результате тела сближаются. Значит, мощность излучения только возрастает. Так образуются очень тесные пары звезд.

Эффект проще наблюдать для компактных объектов, особенно, если мы можем очень точно измерять параметры их движения. Природа сама помогает нам, создавая радиопульсары. Особое место занимают радиопульсары в паре с другими нейтронными звездами. Измеряя время прихода импульсов от них, мы можем точно измерить и уменьшение орбитального периода, и другие эффекты, в том числе предсказываемые ОТО.

Первый такой пульсар был открыт в 1974 году Расселом Халсом и Джозефом Тейлором. Это открытие позволило с фантастической точностью проверить ряд предсказание ОТО и косвенно подтвердило существование гравитационных волн. А Халс и Тейлор получили Нобелевскую премию по физике.

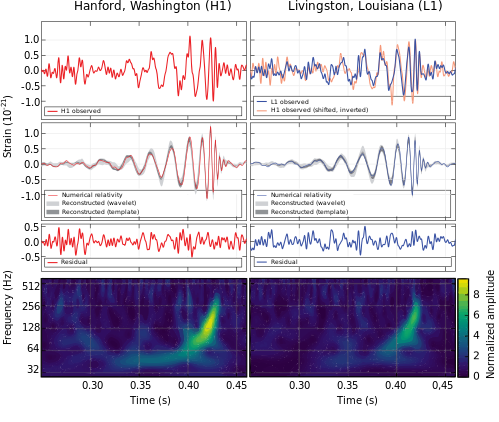
Сейчас известно несколько систем из двух нейтронных звезд. Их исследование позволяет оценить, как часто они сливаются. Т.е., оценить ожидаемый темп гравитационно-волновых всплесков. Но есть три но. Во-первых, систем просто мало, а потому анализ не очень точный. Во-вторых, не все нейтронные звезды могут проходить через стадию радиопульсара, а потому надо анализировать весь ансамбль нейтронных звезд. Наконец, у нас нет наблюдательных данных по двойным системам из двух черных дыр или нейтронной звезды и черной дыры. Поэтому необходимо теоретическое моделирование.

В конце 80-х и в 90-е гг. несколько групп астрофизиков во всем мире активно занялись моделированием двойных систем с целью определить темп слияния компактных объектов. В нашей стране лидирующее место занимали группа Александра Тутукова и Льва Юнгельсона в ИНАСАН, а также группа Владимира Липунова, Константина Постнова и Михаила Прохорова в ГАИШ МГУ.

Расчеты эволюции двойных систем показали, что темп слияний нейтронных звезд в расчете на одну галактику типа нашей составляет примерно раз в 20 000 лет. Значит, чтобы видеть одно событие в год - надо охватить объем, содержащий 20 000 галактик. Черные дыры сливаются еще реже, но зато их видно с большего расстояния, т.к. они тяжелее. Кстати, расчеты предсказывали, что в начале вероятнее увидеть слияние именно черных дыр, что и произошло.

**Первый всплеск**

После обновления установки были включены в сентябре 2015 года. В настоящее время представлены данные за сентябрь-октябрь. Тогда набралось около 16 дней чистого времени, когда в штатном режиме работали оба детектора. За это время было зарегистрировано два сигнала. Один из них более слабый, а потому менее надежный. Зато второй достаточно мощный. Тщательный анализ показал, что для того, чтобы такой сигнал возник в детекторах случайно, необходимо ждать более 200 000 лет. Значит, событие с большой вероятностью связано с реальным гравитационно-волновым всплеском. Его наименование GW150914, т.е. он был зарегистрирован 14 сентября 2015 года. Именно эта дата вошла в историю.



Частота сигнала и ее изменение сразу позволяют оценить массы сливающихся объектов. Это, в свою очередь, позволяет оценить мощность сигнала. А, значит, мы немедленно получаем и расстояние до объекта. Далее детальный анализ позволяет все уточнять и уточнять эти параметры, но качественно ситуация такова. LIGO зарегистрировала сигнал от слияния двух черных дыр с массами примерно 25-35 и 30-40 масс Солнца. Всплеск произошел на расстоянии около 400 Мпк (что соответствует красному смещению около 0.1, а излучение шло в нам примерно один миллиард триста миллионов лет).

В гравитационное излучение (по формуле E=mc2) перешло почти 3 массы Солнца. Это соответствует светимости 1023 (единица и 23 нуля) светимостей Солнца. Примерно столько же, сколько за это время (не забываем, что всплеск короткий сотые доли секунды) излучают все звезды в видимой части вселенной.

К сожалению, поскольку детекторов всего два, и расположены они не слишком далеко друг от друга, не удается достаточно точно определить, откуда пришел сигнал (с вводом в строй VIRGO, а затем и еще одной установки LIGO в Индии - точность сильно возрастет). Тем не менее, были проведены наблюдения во всех диапазонах, покрывающие ту область на небе, откуда мог прийти сигнал. Кроме того, были проанализиованы данные нейтринных телескопов. Увы, но ничего не увидели. Впрочем, в случае слияния черных дыр именно это и ожидалось. Лишь команда спутника Fermi заявила о том, что они заметили очень слабый гамма-всплеск, примерно совпадающий по времени с GW150914, но это может быть и случайным совпадением.

Уже первый всплеск дал интересные результаты. Слившаяся пара черных дыр это самые массивные объекты такого типа среди всех известных. Астрофизики теперь обсуждают, как получать такие пары, и сколько их может быть во вселенной.

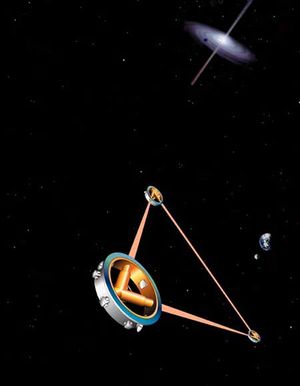
Хотя эти наблюдения и не могут считаться окончательным доказательством существования черных дыр, однако сделан большой шаг в этом направлении. Слияние произошло именно так, как должны были бы сливаться черные дыры ОТО. Новые гипотезы не нужны. Я бы сказал, что стоит прекратить задаваться вопросом существуют ли черные дыры?, а перейти к вопросу как черные дыры устроены?. Вполне вероятно, что в ближайшие годы гравитационно-волновые наблюдения окончательно отбросят существующие альтернативные модели описания таких компактных объектов.

Важно, что первое наблюдения гравитационных волн не только подтверждает предсказание ОТО, но и открывает эру гравитационно-волновой астрономии. И нас ждет еще много интересного.

**eLISA и другие планы на будущее**

Мы вошли в эпоху гравитационно-волновой астрономии. Сейчас работают два детектора LIGO. Во второй половине 2016 г. должен заработать после обновления детектор VIRGO (на окончательную чувствительность прибор выйдет в 2018 г.). Затем в строй войдет японский подземный детектор KAGRA. Ожидается, что это может произойти уже в 2018 году. В Индии будет собран один из детекторов LIGO (в начале их было три). Здесь вопрос о сроках упирается в финансирование, можно надеяться, что успехи работающих детекторов подстегнут индийское правительство, и в 2023 г. детектор заработает. Наконец, в более отдаленном будущем будет создана гравитационно-волновая установка третьего поколения. Ею станет Телескоп Эйнштейна, который сейчас разрабатывают европейские ученые.

Все эти установки предназначены для регистрации волн на частоте человеческого голоса, т.е. для поиска слияний нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах. Но есть и другой хороший источник гравволн - сверхмассивные черные дыры.



Нейтронные звезды и черные дыры звездных масс имеют размеры десятки километров. В процессе слияния они испускают гравитационные волны с длиной порядка сотен километров, что соответствует частоте в сотни герц. Сверхмассивные черные дыры с массами от нескольких миллионов до нескольких миллиардов масс Солнца имею размеры, сопоставимые с размерами орбит планет в Солнечной системе. Такие черные дыры находятся в центрах галактик. При слиянии галактик (а мы видим такие события!) черные дыры могут образовать пару, которая со временем сольется. Это приведет к излучению гравволн с длинной в миллионы и миллиарды километров. Как же их ловить?

Одна идея сразу приходит в голову: построить аналог LIGO, но с расстоянием между зеркалами в десятки миллионов километров. Строить придется в космосе. Такой проект есть - изначально он назывался LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Проект дорогой и сложный. Изначально его хотели вместе строить NASA и ESA. Но потом начался кризис, а у NASA вдобавок возникли проблемы с новым космическим телескопом (JWST). В итоге Европейское агентство осталось в одиночестве. В начале проект решили упростить, потом вообще не одобрили. Но наконец одобрили упрощенную версию, и ее запуск намечен на начало 30-х гг.

Но пока есть другая возможность обнаружить гравволны от сверхмассивных черных дыр. На нее впервые указал в 70-е гг. Михаил Сажин в ГАИШ МГУ. Если мы наблюдаем какой-то радиопульсар (лучше миллисекундный это более точные часы), то мы можем иногда наблюдать сбои пульсара, связанные с тем, что мы казались в гравволне. Конечно, сбой мог быть вызван и чем-то другим. Но, если мы будет наблюдать за десятком пульсаров в разных областях неба, находящимися на разных расстояниях от нас, то одновременный сбой у всех этих пульсаров уже трудно будет объяснить чем-то кроме гравволны, прошедшей мимо нас.

Сейчас работает три международных проекта по поиску таких событий. В 2016 году они также начали публиковать совместный анализ данных. Есть серьезные основания полагать, что благодаря наблюдениям десятков миллисекундных радиопульсаров в ближайшие несколько лет будут, пусть и слегка косвенным образом, зарегистрированы гравитационные волны от слияния сверхмассивных черных дыр.

*Статья представляет собой авторский расширенный вариант материала, опубликованного в журнале*[*"Популярная механика"*](http://www.popmech.ru/magazine/2016/163-issue/)*N5 2016 г.*