

Гравитационные волны (продолжение)

*Взмахните рукой — и по всей Вселенной побегут гравитационные волны.
С. Попов, М. Прохоров*

Общая теория относительности (ОТО) — это не просто набор формул, это принципиальный взгляд на суть гравитации. Если в обычной физике пространство служит лишь фоном,местилищем для физических явлений, то в ОТО оно само становится явлением, динамической величиной, которая меняется в согласии с законами ОТО. Вот эти искажения пространства-времени относительно ровного фона — или, на языке геометрии, искажения метрики пространства-времени — и ощущаются как гравитация. Говоря кратко, ОТО вскрывает геометрическое происхождение гравитации.

У ОТО есть важнейшее предсказание: гравитационные волны. Это искажения пространства-времени, которые способны «оторваться от источника» и, самоподдерживаясь, улететь прочь. Альберт Эйнштейн окончательно сформулировал ОТО в 1915 году и почти сразу понял, что полученные им уравнения допускают существование таких волн.

Как и для всякой честной теории, такое четкое предсказание ОТО должно быть проверено экспериментально.

Излучать гравитационные волны могут любые движущиеся тела: и планеты, и брошенный вверх камень, и взмах руки. Проблема, однако, в том, что гравитационное взаимодействие столь слабое, что никакие экспериментальные установки не способны заметить излучение гравитационных волн от обычных «излучателей».

Чтобы «погнать» мощную волну, нужно очень сильно исказить пространство-время. Идеальный вариант — две черные дыры, вращающиеся друг вокруг друга в тесном танце, на расстоянии порядка их гравитационного радиуса. Искращения метрики будут столь сильными, что заметная часть энергии этой пары будет излучаться в гравитационные волны. Теряя энергию, пара будет сближаться, кружась всё быстрее, искажая метрику всё сильнее и порождая еще более сильные гравитационные волны, — пока, наконец, не произойдет кардинальная перестройка всего гравитационного поля этой пары и две черных дыры не сольются в одну.

Такое слияние черных дыр — взрыв грандиозной мощности, но только уходит вся эта излученная энергия не в свет, не в частицы, а в колебания пространства.

Излученная энергия составит заметную часть от исходной массы черных дыр, и выплеснется это излучение за доли секунды. Аналогичные колебания будут порождать и слияния нейтронных звезд. Чуть более слабый гравитационно-волновой выброс энергии сопровождает и другие процессы, например коллапс ядра сверхновой.

Гравитационно-волновой всплеск от слияния двух компактных объектов имеет очень конкретный, хорошо вычисляемый профиль, показанный на рис. 1.

Период колебаний задается орбитальным движением двух объектов друг вокруг друга. Гравитационные волны уносят энергию; как следствие, объекты сближаются и крутятся быстрее — и это видно как по убыстрению колебаний, так и по усилению амплитуды. В какой-то момент происходит слияние, выбрасывается последняя сильная волна, а затем следует высокочастотный «послезвон» (ringdown) — дрожание образовавшейся черной дыры, которая «сбрасывает» с себя все несферические искажения (эта стадия на картинке не показана). Знание этого характерного профиля помогает физикам искать слабый сигнал от такого слияния в сильно зашумленных данных детекторов.

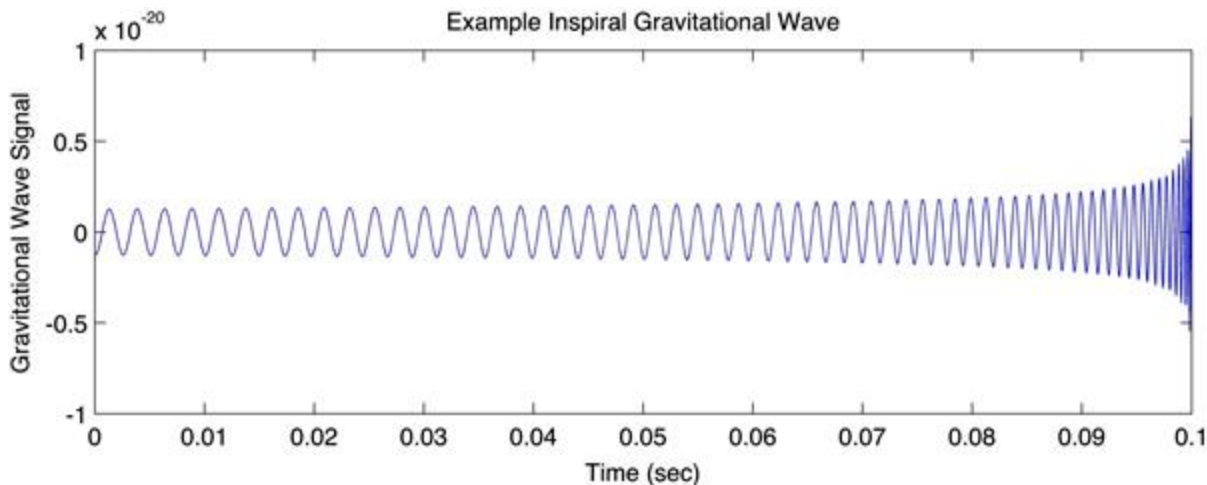


Рис. 1. Гравитационно-волновой всплеск от слияния двух черных дыр. Изображение с сайта ligo.org

Колебания метрики пространства-времени — гравитационно-волновое эхо грандиозного взрыва — разлетятся по Вселенной во все стороны от источника. Их амплитуда ослабевает с расстоянием, по аналогии с тем, как падает яркость точечного источника при удалении от него. Когда всплеск из далекой галактики долетит до Земли, колебания метрики будут порядка 10^{-22} или даже меньше. Иными словами, расстояние между физически не связанными друг с другом предметами будет периодически увеличиваться и уменьшаться на такую относительную величину.

Современная реализация этой идеи на основе интерферометра Майкельсона выглядит следующим образом (рис. 2). В двух длинных, длиной в несколько километров, перпендикулярных друг другу вакуумных камерах подвешиваются зеркала. На входе в установку лазерный луч расщепляется, идет по обеим камерам, отражается от зеркал, возвращается обратно и вновь соединяется в полупрозрачном зеркале. Добротность оптической системы исключительно высока, поэтому лазерный луч не просто проходит один раз туда-обратно, а задерживается в этом оптическом резонаторе надолго. В «спокойном» состоянии длины подобраны так, чтобы два луча после воссоединения гасили друг друга в направлении датчика, и тогда фотодетектор оказывается в полной тени. Но стоит лишь зеркалам под действием гравитационных волн сместиться на микроскопическое расстояние, как компенсация двух лучей станет неполной и

фотодетектор уловит свет. И чем сильнее смещение, тем более яркий свет увидит фотодатчик.

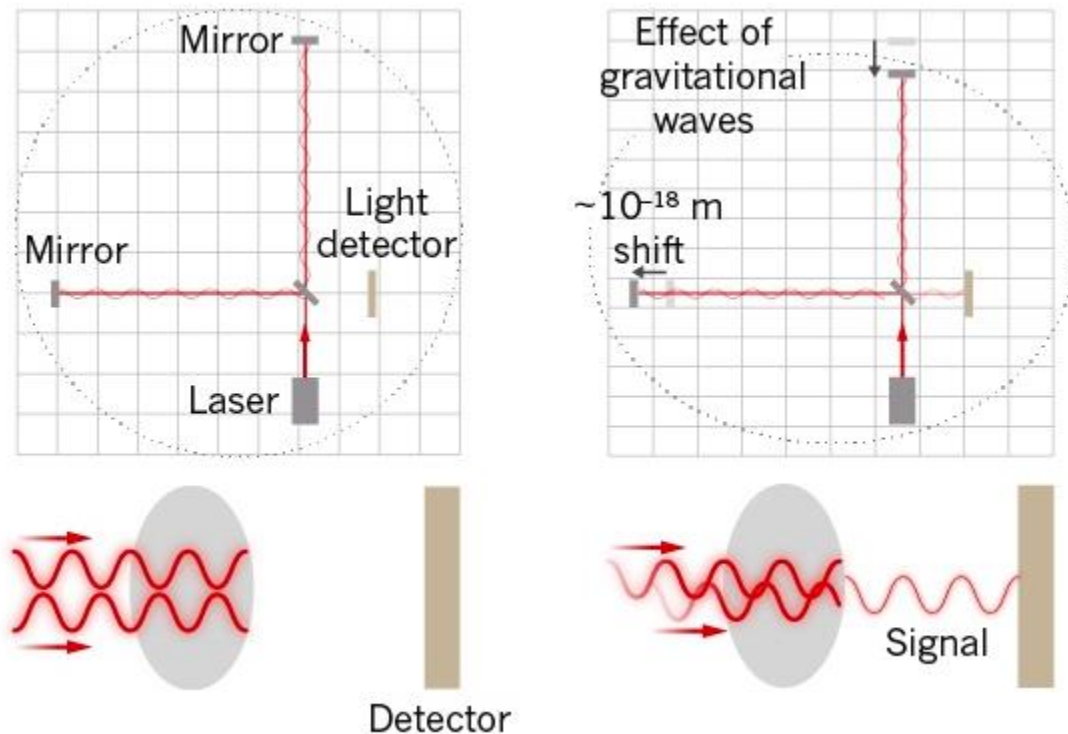


Рис.2. Принцип интерферометрического детектирования гравитационных волн. Гравитационная волна искажает длину двух плечей в противофазе, из-за чего точная компенсация света нарушается и фотодетектор регистрирует периодический сигнал. Изображение из статьи D. Castelvechi & A. Witze, 2016. Einstein's gravitational waves found at last

Слова «микроскопическое смещение» даже близко не передают всей тонкости эффекта. Смещение зеркал на длину волны света, то есть микрон, заметить проще простого даже без каких-либо ухищрений. Но при длине плеча 4 км это отвечает колебаниям пространства-времени с амплитудой 10^{-10} . Заметить смещение зеркал на диаметр атома тоже не представляет проблем — достаточно запустить лазерный луч, который пробежит туда-сюда тысячи раз и получит нужный набег фазы. Но и это дает от силы 10^{-14} . А нам нужно спуститься по шкале смещений еще в миллионы раз, то есть научиться регистрировать сдвиг зеркала даже не на один атом, а на тысячные доли атомного ядра! На пути к этой поистине поразительной технологии физикам пришлось преодолевать множество трудностей. Некоторые из них чисто механические: требуется повесить массивные зеркала на подвесе, который висит на другом подвесе, тот на третьем подвесе и так далее — и всё для того, чтобы максимально избавиться от посторонней вибрации.

На рис. 3 показан главный результат: профиль сигнала, зарегистрированного обоими детекторами. Видно, что на фоне шумов сначала слабо проступает, а потом нарастает по амплитуде и по частоте колебание нужной формы. Сравнение с результатами численного моделирования позволило выяснить, слияние каких объектов мы наблюдали: это были черные дыры с массами примерно 36 и 29 солнечных масс, которые слились в одну черную дыру массой 62 солнечных массы (погрешность всех этих чисел, отвечающая 90-процентному доверительному интервалу, составляет 4 солнечных массы). Авторы мимоходом замечают, что получившаяся черная дыра — самая тяжелая из когда-либо наблюдавшихся черных дыр звездных масс. Разница между суммарной массой двух исходных объектов и конечной черной дырой составляет $3 \pm 0,5$ солнечных масс. Этот гравитационный дефект масс примерно за 20 миллисекунд полностью перешел в энергию излученных гравитационных волн. Расчеты показали, что пиковая гравитационно-волновая мощность достигала $3,6 \cdot 10^{56}$ эрг/с, или, в пересчете на массу, примерно 200 солнечных масс в секунду. Статистическая значимость обнаруженного сигнала составляет $5,1\sigma$. Иными словами, если предположить, что это статистические флуктуации наложились друг на друга и чисто случайно выдали подобный всплеск, такого события пришлось бы ждать 200 тысяч лет. Это позволяет с уверенностью заявить, что обнаруженный сигнал не является флуктуацией.

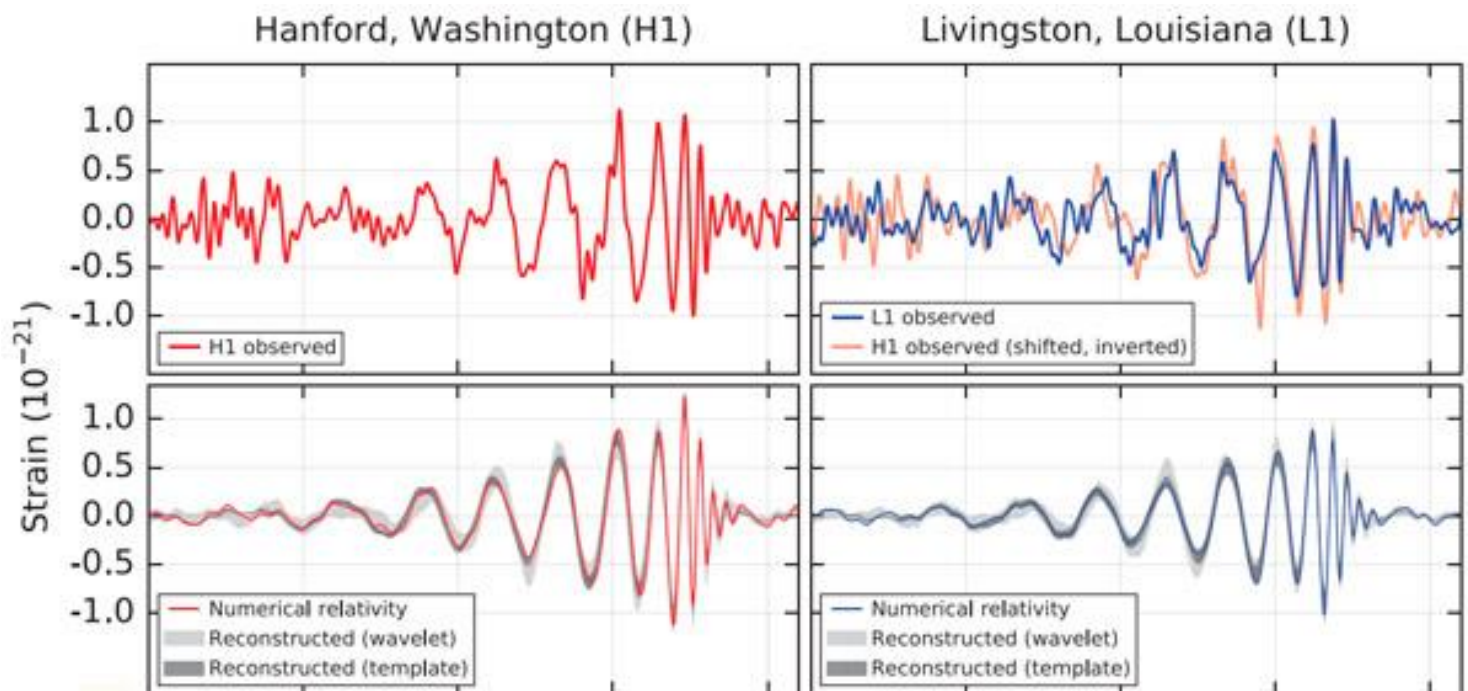
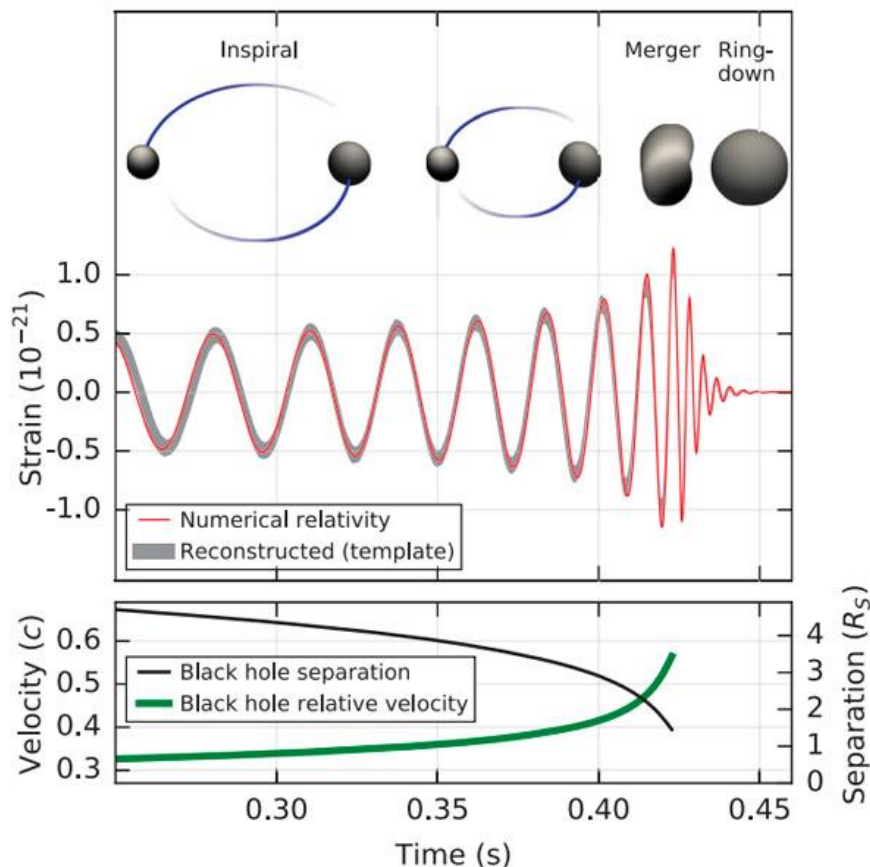


Рис. 3.

На рис. 4 приведена интерпретация зарегистрированного сигнала: профиль гравитационно-волнового излучения и соответствующие ему стадии слияния двух черных дыр;



Открытие гравитационных волн стало уже третьим за последние годы случаем, когда физики наконец-то пробились через все препятствия и добрались до неизведанных ранее тонкостей устройства нашего мира.

- В 2012 году был **открыт хиггсовский бозон** — **частица**, предсказанная почти за полвека от этого.
- В 2013 году нейтринный **детектор IceCube доказал реальность астрофизических нейтрино** и начал «разглядывать вселенную» совершенно новым, недоступным ранее способом — через нейтрино высоких энергий.
- И вот сейчас природа поддалась человеку еще раз: **открылось гравитационно-волновое «окно»** для наблюдений вселенной и, одновременно с этим, стали доступны для прямого изучения эффекты сильной гравитации.

И во всех трех случаях сам по себе факт открытия стал не завершением, а, наоборот, началом нового направления исследований, стал новым инструментом прощупывания нашего мира, началом Новой физики

Информацию подготовила Е.А.

Источник информации:

Статья И. Иванова, http://elementy.ru/novosti_nauki/432691/Gravitatsionnye_volny_otkryty