

# Гравитационные волны и их поиск

# Гравитационные волны

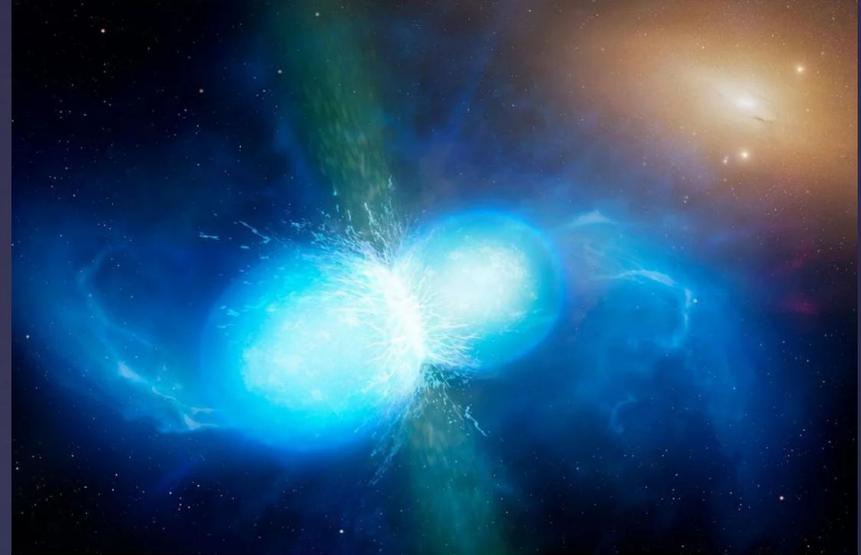


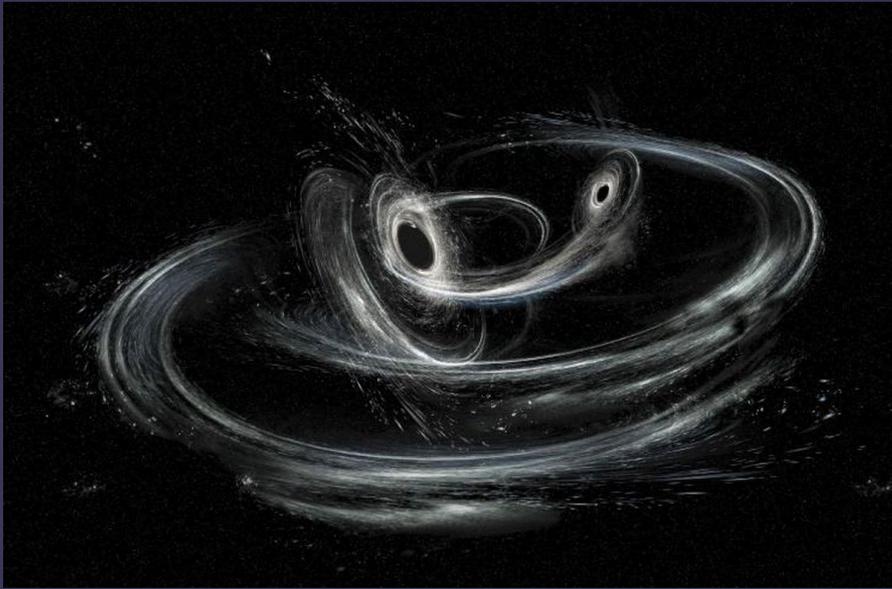
Гравитационные волны — это распространяющиеся в пространстве-времени колебания геометрической структуры (метрики) пространства-времени, которые движутся со скоростью света. Их существование было предсказано общей теорией относительности Эйнштейна сто лет тому назад.

# Источники гравитационных волн

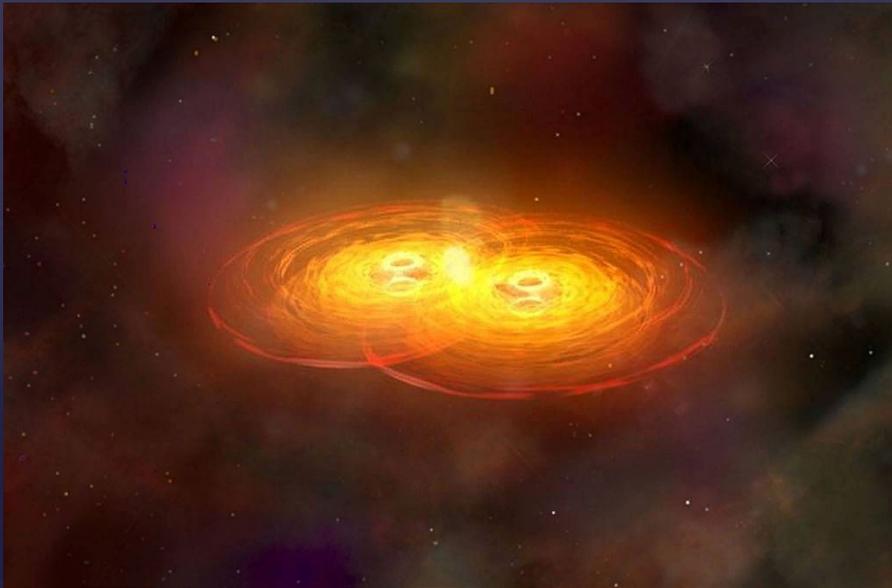
Главные астрофизические источники гравитационных волн — это сливающиеся двойные нейтронные звезды или черные дыры, то есть два массивных объекта, которые вращаются по орбите вокруг общего центра масс.

Излучение гравитационных волн очень слабое для обычных двойных систем — например, для системы Земля — Солнце оно не играет никакой роли. А когда объекты очень массивные, например две нейтронные звезды с массами 1,5 массы Солнца, и когда они находятся на очень тесной орбите, эффекты сближения объектов становятся заметными.





Источниками могут также быть двойные черные дыры. Они могут образоваться из очень массивных звезд, когда в результате гравитационного коллапса ядра звезды в конце ее эволюции образуется не нейтронная звезда, а уже черная дыра. Такие двойные черные дыры тоже могут оказаться на тесной орбите, за счет излучения гравитационных волн приближаться друг к другу и в конце концов слиться.



# Открытие гравитационных волн

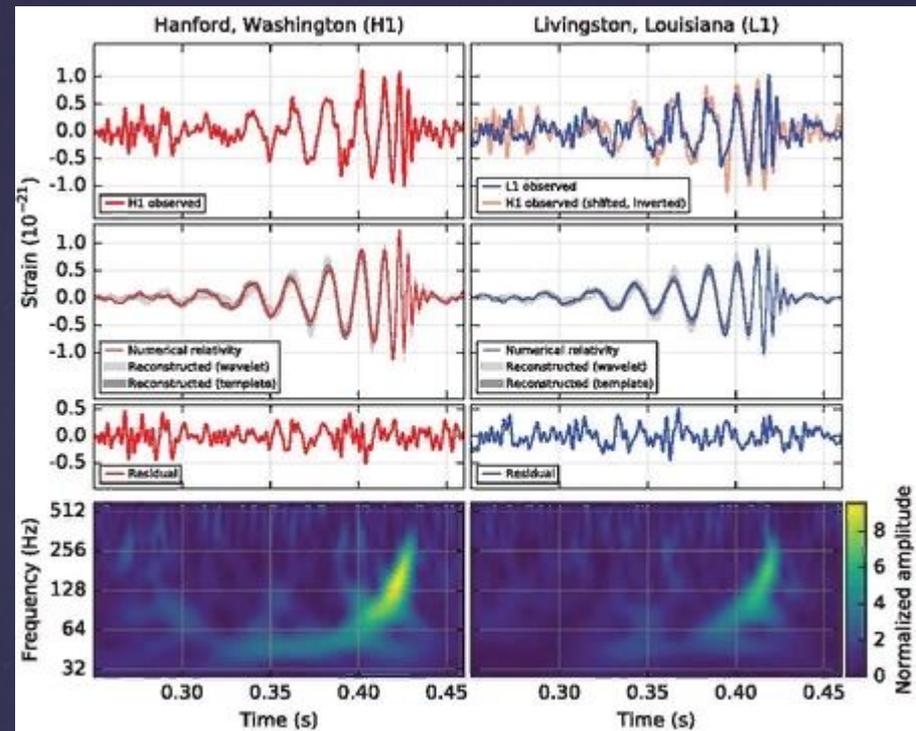
Открытие гравитационных волн было выполнено путем их прямого детектирования 14 сентября 2015 года коллаборациями лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) и франко-итальянскому детектору гравитационных волн (VIRGO); об открытии было объявлено 11 февраля 2016 года.

За экспериментальное обнаружение гравитационных волн в 2017 году была присуждена Нобелевская премия по физике.



# Регистрация гравитационных волн

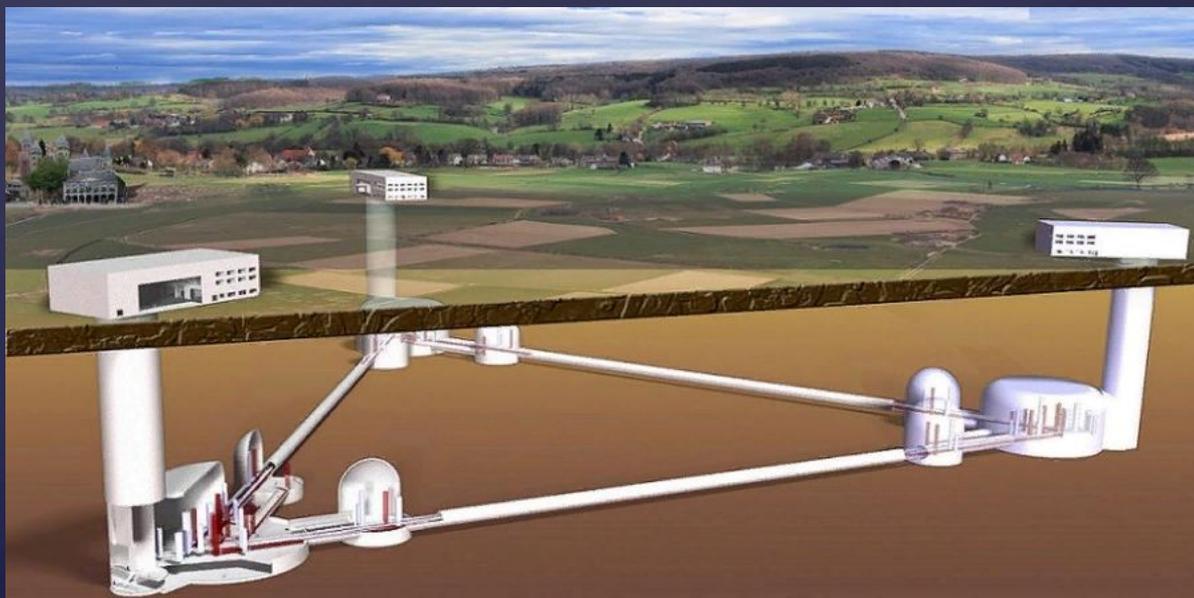
Регистрация гравитационных волн происходит довольно простым (идеологически) способом. Гравитационная волна, взаимодействующая со свободно движущимися пробными массами, заставляет эти массы с периодом гравитационной волны слегка двигаться относительно друг друга. Но эти движения ничтожны, поскольку амплитуда гравитационных волн очень мала. Она выражается в безразмерном отношении растяжений и сжатий пробных масс относительно друг друга и ожидается порядка  $10^{-22}$ – $10^{-21}$ . Но с помощью лазерных многокилометровых интерферометров типа aLIGO такие смещения можно измерить.



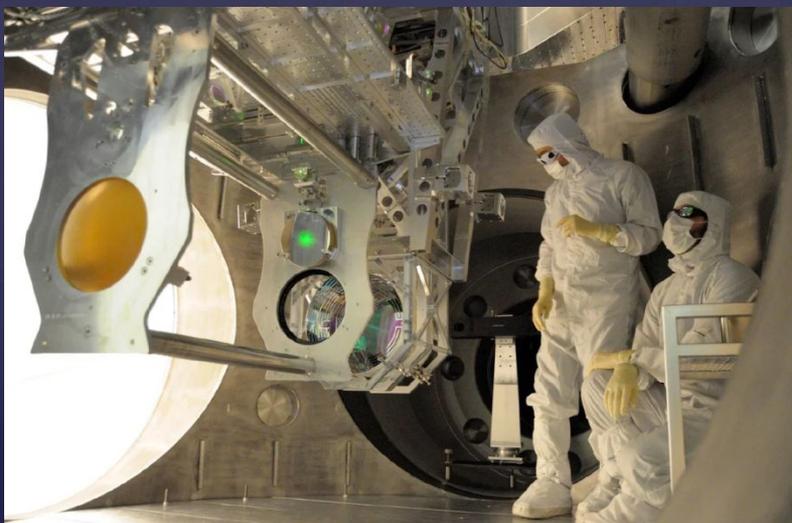
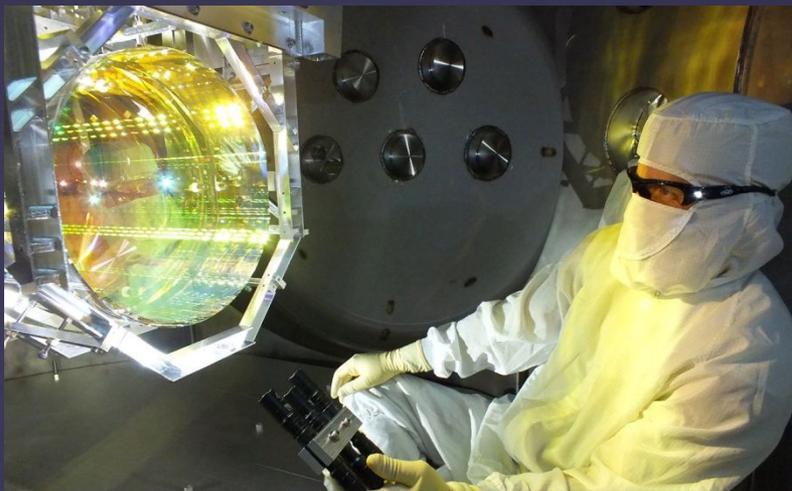
Первый зафиксированный гравитационно-волновой сигнал

# Детектор aLIGO

Это два лазерных интерферометра с плечами примерно по 4,5 км. Это интерферометры типа интерферометра Майкельсона. Мощный лазер посылает луч, который разделяется в двух взаимно перпендикулярных направлениях (плечах интерферометра). В конце плеч подвешены зеркала, специальным образом изолированные от различных шумов. Эти зеркала играют роль пробных масс. Когда проходит гравитационная волна, эти зеркала чуть-чуть начинают колебаться в определенной фазе. Свет отражается от этих зеркал, потом опять собирается на разделителе и интерферирует на детекторе. Когда зеркала начинают двигаться, интерференционная картина нарушается. По изменениям этой интерференционной картины можно судить о движении зеркал — пробных масс. В этом состоит основная идея этого детектора.



Для этого нужны специальные очень стабильные лазеры, так как должна быть очень стабильная частота света. Трубы, в которых распространяется свет, глубоко вакуумированы, чтобы не было рассеяния на молекулах воздуха и пылинках. Сами массы представляют собой 30-килограммовые сапфировые зеркала со специальным покрытием, обеспечивающим очень высокий коэффициент отражения. Они подвешены на специальных кварцевых нитях. Осуществляется очень сложная система регистрации разных малых флуктуаций. Вокруг этого образовалась огромная увлекательная экспериментальная наука, как это все можно измерить. Эффект очень слаб, и, чтобы его найти, вам нужно учесть огромное количество шумов, которые мешают регистрации таких малых флуктуаций. Потому что даже на расстоянии 4 км при амплитуде волны  $10^{-21}$  у вас относительное изменение расстояний между зеркалами всего лишь  $10^{-21}$ .  $10^{-21}$  умножаем на 4 км — получаем  $4 \cdot 10^{-16}$  см, что в тысячу раз меньше, чем размер протона!



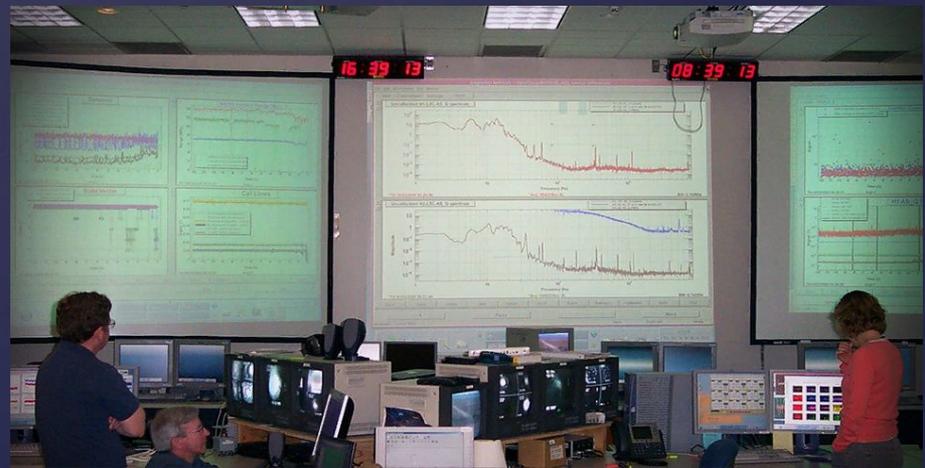
Обсерватории LIGO и VIRGO работали на более низком уровне чувствительности в течение нескольких лет с начала 2000-х годов. Потом они были остановлены на модернизацию, чувствительность была улучшена в несколько раз. Планируется и дальнейшее улучшение чувствительности. Так что на полную проектную мощность эти детекторы выйдут где-то к 2018–2019 годам. А только к 2015 были зафиксированы первые изменения с начала 2000-х годов.

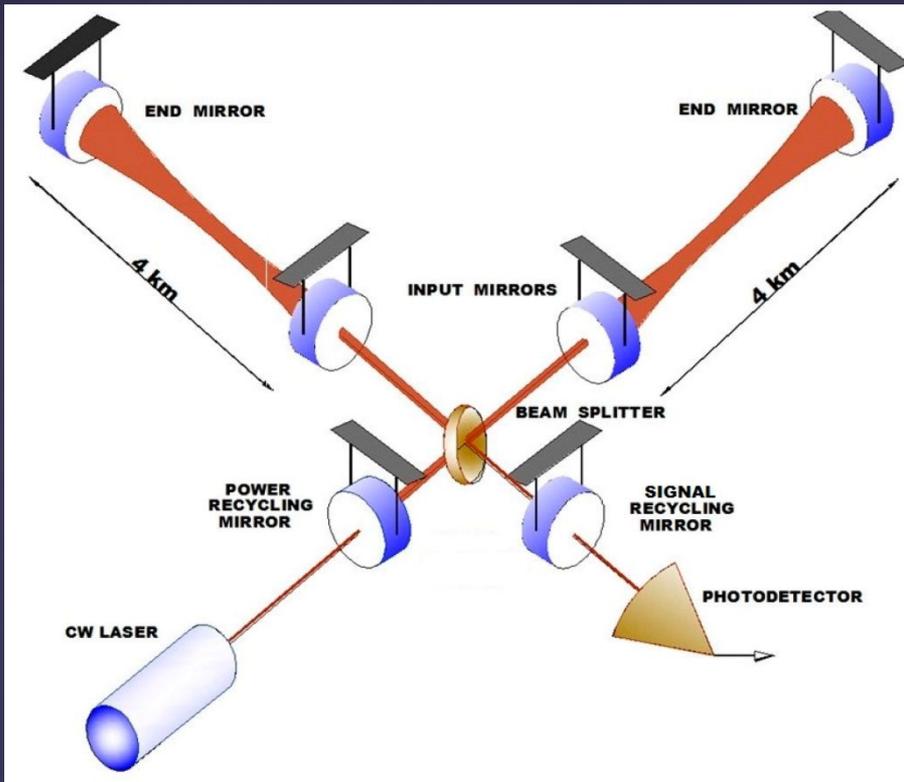


# Обработка данных с детекторов

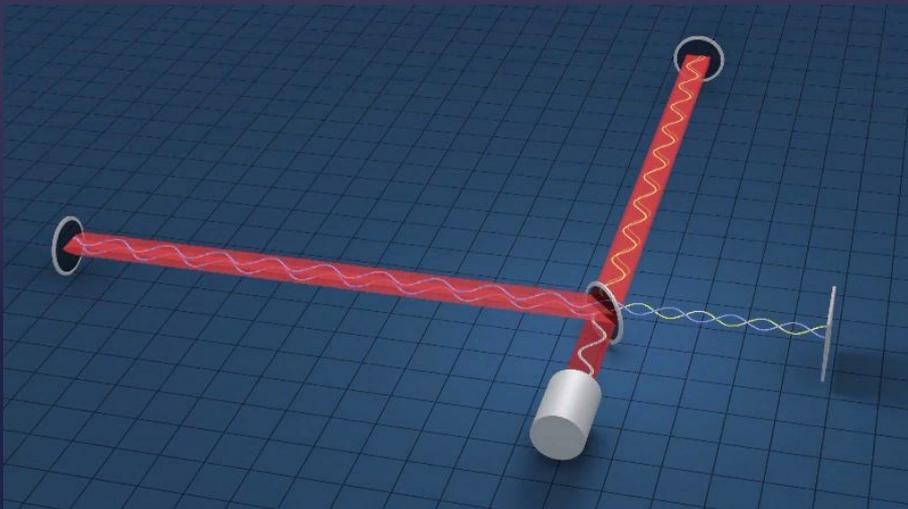
Это очень сложная процедура. Потому что различные шумы оказываются очень большими, и нужно найти сигнал, который в тысячи раз меньше, чем шум. Есть специальные методики, которые пришли из радиофизики, из техники обнаружения объектов радаром на фоне помех.

Гравитационно-волновой сигнал обладает очень характерными особенностями. На научном языке у него характерный спектр Фурье, то есть специфический частотный состав. Если спектр сигнала заранее известен, его можно легче обнаружить на фоне шума. Сама техника обработки сигнала заключается в том, что все время осуществляется поиск сигнала в шуме, то есть пробуются, какой из возможных сигналов лучше или хуже подходит к тому, что наблюдается.





Зеркала интерферометра все время как-то подрагивают, вы видите, что интерференционная картина на детекторе постоянно меняется. Но из-за чего она меняется, вы не знаете. Чтобы доказать, что она меняется из-за гравитационно-волнового сигнала, нужно подобрать такую форму реалистического сигнала, чтобы она описала наблюдаемые флуктуации наилучшим образом. Как только окажется, что такой сигнал подошел, можно говорить, что он виден интерферометром. Таким образом, все время происходит коррелирование реального отклика детектора с модельным сигналом.

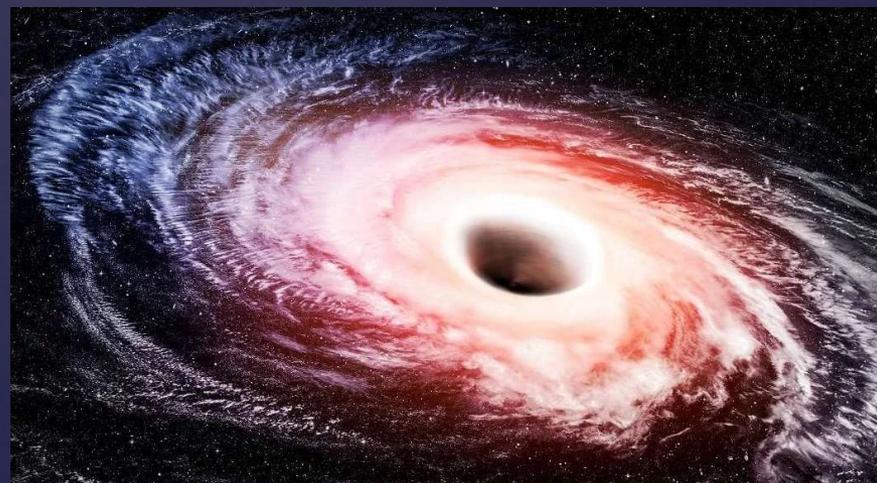


# Экспериментальное открытие гравитационных волн

11 февраля 2016 года в ходе пресс-конференции научной коллаборации LIGO в Вашингтоне было объявлено об экспериментальном открытии гравитационных волн. Источниками этих волн оказались черные дыры очень больших масс.

Если раньше это все изучали с помощью электромагнитного излучения или нейтрино, то теперь еще и подключаются гравитационные волны, которые нигде не поглощаются, ни с чем не взаимодействуют. Они свободно распространяются и несут эту информацию о сверхсильных гравитационных полях.

Внутренняя структура черных дыр может быть очень нетривиальна. Это совершенно новый фронт науки, до сих пор он был сугубо теоретическим.





Спасибо за внимание!