

GW170817: НАБЛЮДЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ СОКРАЩЕНИЯ ОРБИТЫ ДВОЙНОЙ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

17 августа в 12:41:04 UTC сеть гравитационно-волновых детекторов LIGO-Virgo зарегистрировала гравитационно-волновой сигнал от столкновения двух компактных объектов, называемых “нейтронными звездами” - остатков от взрывов сверхновых. Эта регистрация произошла три дня спустя первого совместного наблюдения слияния двух черных дыр детекторами LIGO и Virgo ([краткое описание на английском](#)).

ВВЕДЕНИЕ

Астрономы ожидали наблюдения гравитационных волн от слияния двух [нейтронных звезд](#), так как эти звезды достаточно распространены во Вселенной, а двойные нейтронные звезды уже были обнаружены ранее с использованием радио телескопов. Наиболее известным примером является [двойной пульсар Тейлора-Халса](#), открытый в 1974 году. На протяжении 40 лет астрономы наблюдали за тем, как две звезды медленно сближаются по спирали. Примерно через 300 миллионов лет они столкнутся, производя сигнал, подобный тому, что LIGO только что наблюдал для GW170817.

Сеть детекторов работала во втором цикле научных наблюдений (названном O2) - два детектора LIGO были запущены 30 ноября 2016, а Virgo присоединился к ним 1 августа 2017. Наличие нескольких детекторов позволяет астрономам определить, из какой области на небе приходит сигнал. Чем больше детекторов, тем точнее можно обозначить эту область. Для данного события область имеет вытянутую форму (называемую “эллипсом погрешности”), примерно 2 градуса в ширину и 15 градусов в длину, покрывающую 28 квадратных градусов. Визуально это приблизительно площадь и форма, закрываемая на небе бананом на расстоянии вытянутой руки. Эта область на небе находится в созвездии [Гидры](#), с центром в районе звезды Пси Гидры (видимой невооруженным взглядом).

ДРУГИЕ НАБЛЮДЕНИЯ: АСТРОНОМИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

Всего спустя 1.7 секунды после наблюдения гравитационной волны, [космический телескоп Ферми](#) зарегистрировал гамма-всплеск GRB170817A. Сигналы такой величины, как GW170817 или GRB170817A часто называются триггерами - с них начинается другая астрономическая деятельность. В данном случае после появления триггеров была запущена автоматическая рассылка для сообщества астрономов, и они начали наблюдения и увидели угасающий свет от события, расположенного вблизи [галактики NGC 4993](#). Больше деталей о наблюдении события с использованием нескольких переносчиков взаимодействия - в электромагнитном и гравитационно-волновом диапазоне, можно найти в научном изложении статьи о совместном детектировании [по ссылке](#) (английская версия).

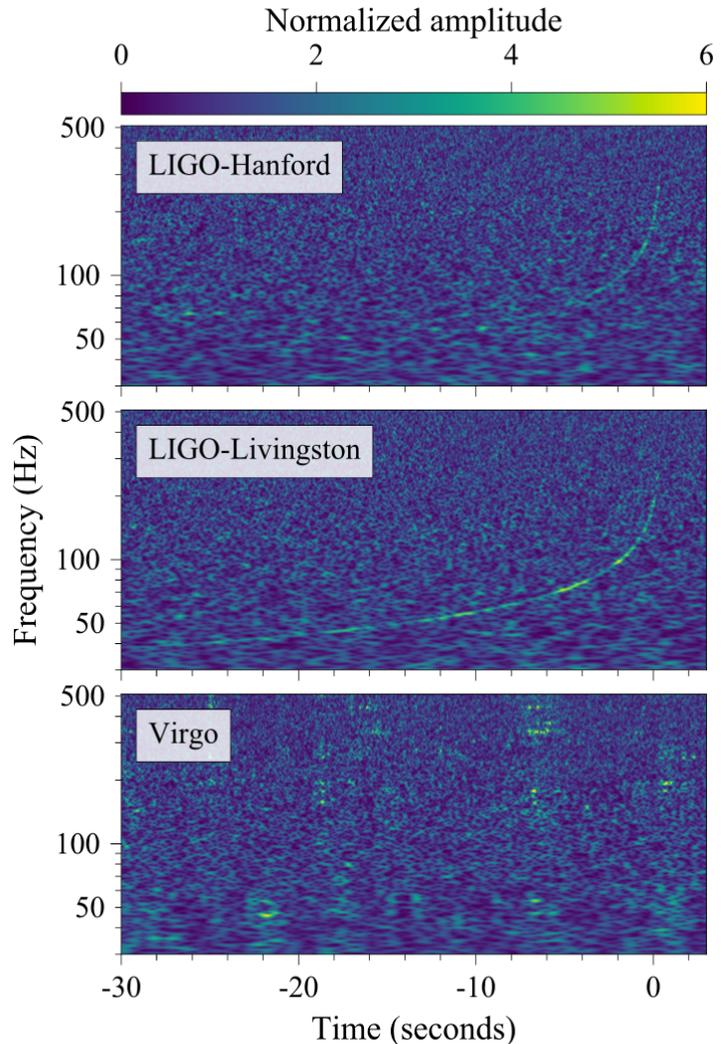


Рис. 1: Здесь изображены спектрограммы сигнала GW170817 в каждом из детекторов LIGO и Virgo. По горизонтали отложено время, частота - по вертикали. Сигнал от двойной нейтронной звезды в виде чирпа начинается на низких частотах в левом углу и быстро набирает кривизну справа. Глитч в спектрограмме LIGO-Livingston был подавлен и не виден на изображении.

ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ СИГНАЛ

Детектор может наблюдать гравитационные волны от двойной нейтронной звезды на протяжении нескольких минут. В GW170817 за 100 секунд до столкновения нейтронные звезды были на расстоянии примерно 400 километров друг от друга, проходя полный круг по орбите примерно 12 раз в секунду. При каждом новом обороте звезды излучали гравитационные волны, теряя энергию и сближаясь. Чем меньше становилась орбита, тем быстрее двигались звезды, а амплитуда и частота гравитационных волн увеличивалась. Медленное уменьшение орбиты называется падением по спирали (inspiral), а увеличение частоты – **чирпом** (chirp). Процесс ускорялся, пока звезды не слились, образуя один остаточный объект.

Чтобы наглядно представить сигнал, ГВ астрономы показывают данные с детектора в виде **спектрограммы**. Это цветное изображение, где по горизонтальной оси отложено время, вертикальная ось показывает частоту колебаний, измеренных детектором (снизу низкие частоты, высокие частоты - сверху), а цвет - величину сигналов относительно фонового шума (чем ярче, тем сильнее). *Спектрограмма чирпа от двойной нейтронной звезды выглядит как тонкая линия, изначально прямая на низких частотах, а с течением времени загибающаяся вверх все сильнее и сильнее вплоть до финального пика непосредственно перед слиянием звезд.*

Этот сигнал ясно виден на спектрограммах с обоих детекторов LIGO, но не с детектора Virgo. Этот факт важен для локализации источника сигнала на небе. Для каждого детектора есть область на небе, сигналы из которой в данный момент ему не видны. Поскольку сигнал был хорошо виден на двух детекторах LIGO, но не на Virgo, из этого следует, что сигнал пришел из одной из таких областей, что очень помогает в локализации.

ОЧИСТКА ОТ ГЛИТЧЕЙ

Автоматическое программное обеспечение на LIGO изначально не увидело сигнал в данных детектора в Ливингстоне, хотя для человека наличие сигнала очевидно. Проблема была во всплеске шума, похожим на треск статики в аудио колонках, во время фаз спирального падения и чирпа. Этот всплеск шума ученые называют глитчем, и он должен быть убран из данных перед тем, как сигнал может быть использован для дальнейшего анализа. Процедура избавления от глитча должна быть аккуратной, чтобы убрать шум, но не сам сигнал. Такая процедура называется подавлением шума.

Глитчи все время случаются в гравитационно-волновых детекторах: такие как в данных GW170817 - раз в несколько часов. Для заинтересованных в подробностях о глитчах в детекторе работает общественный проект GravitySpy (www.gravityspy.org), где люди разных стран просматривают спектрограммы данных LIGO и помогают находить и классифицировать глитчи. Эта информация используется учеными LIGO, чтобы лучше понимать, как ведут себя детекторы, и улучшать анализ данных в будущем.

СВОЙСТВА ИСТОЧНИКА

Каждый источник генерирует разные гравитационные волны в зависимости от астрофизических свойств системы. Важными свойствами являются масса каждого объекта, скорость его вращения вокруг своей оси,

насколько просто сжать или деформировать его, размер орбиты, наклон орбиты по отношению к направлению наблюдения и т.д. Комбинация всех этих свойств изменяет форму, амплитуду, и изменение гравитационно-волнового сигнала во времени. ГВ астрономы измеряют изменения в сигнале насколько могут точно, а затем работают в обратном направлении, чтобы понять свойства астрофизического источника.

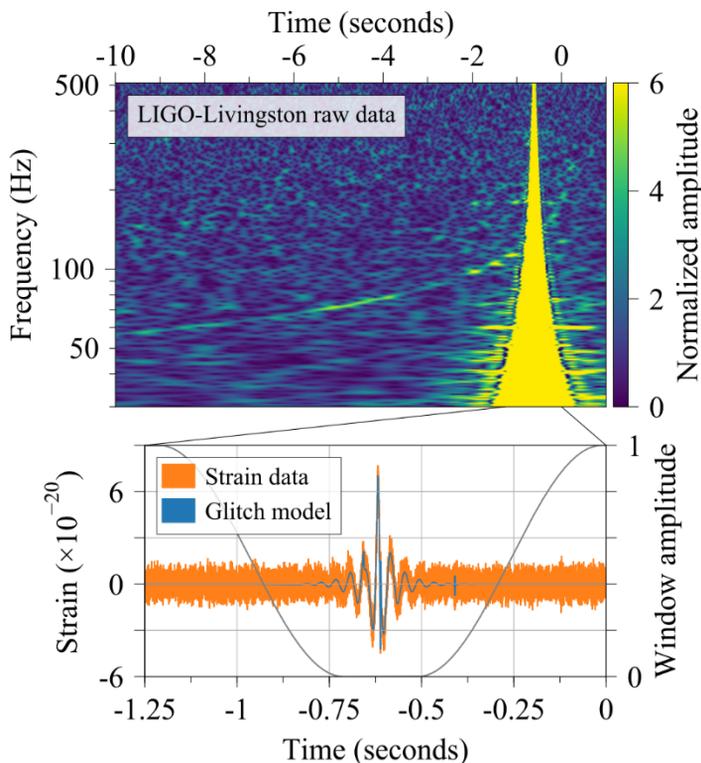


Рис. 2: Верхняя панель показывает глитч в данных LIGO-Livingston, и также явно демонстрирует наличие чирпа. Нижняя панель показывает безразмерную амплитуду колебаний, "strain" (величина, которой мы описываем величину сигнала в LIGO и Virgo) в момент глитча. Это короткий (длится всего около 1/4 секунды), но очень сильный сигнал. Подавление уменьшает глитч до уровня оранжевой кривой, которая показывает уровень фонового шума, всегда присутствующего в детекторах LIGO.

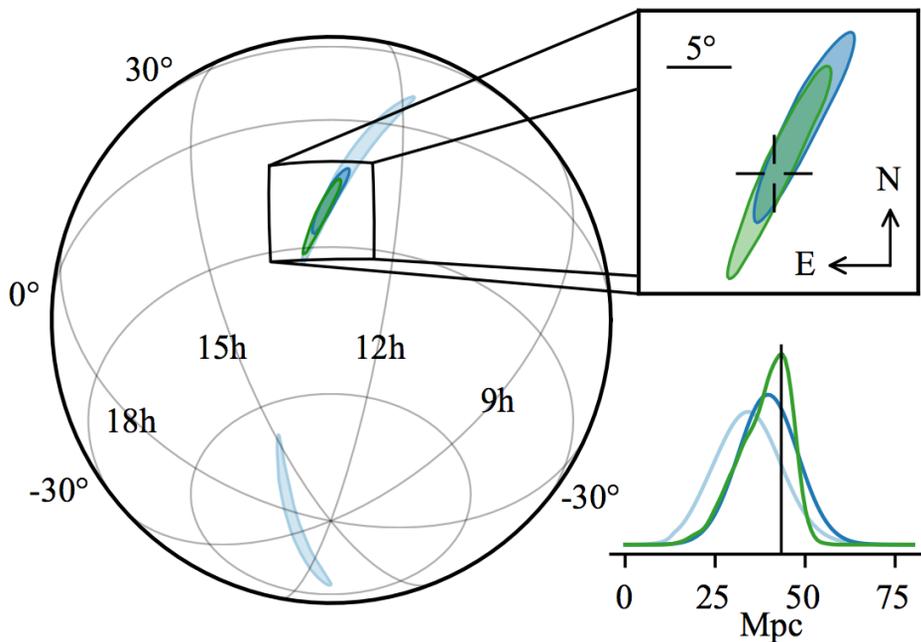


Рис. 3: Сферическая карта неба, показывающая положение GW170817, определенное LIGO и Virgo. Два овала (синий и зеленый) показывают локализацию на основе двух разных программ анализа данных LIGO. Кресты отмечают положение галактики NGC4993 в созвездии Гидры. Нижнее изображение показывает нашу оценку расстояния на основе гравитационно-волновых данных.

Этот процесс не идеален, так как сигналы не могут быть измерены точно. Как следствие, свойства двойной нейтронной звезды мы представляем как диапазон, все значения внутри которого одинаково хорошо описывают источник (ученые обычно называют этот диапазон погрешностями, а в анализе LIGO-Virgo - апостериорным диапазоном, "the posterior").

Анализ гравитационной волны дает значение для масс каждой звезды из пары между 0.86 и 2.26 солнечной массы. Разные массы влияют на сигнал так же, как разные скорости вращения вокруг своей оси, которые мы не могли измерить точно для этого события. Если предположить, что звезды вращаются медленно, то данные столь же хорошо могут быть объяснены массами между 1.17 и 1.6 солнечной. В любом случае, эти массы соответствуют массам всех известных нейтронных звезд, и это является одной из причин, по которым мы думаем, что система состояла из нейтронных звезд.

Другим параметром, который может хорошо измеряться гравитационными волнами является расстояние до источника (в терминах астрономов, [фотометрическое расстояние](#)). Фотометрическое расстояние, полученное из сигнала, оказалось равно 40 мегапарсек (около 130 миллионов световых лет), что согласуется с расстоянием до галактики NGC 4993. Обладая знанием об измеренном расстоянии и оптическим наблюдением галактики, мы можем впервые произвести совместное измерение постоянной Хаббла (больше подробностей можно найти в [английском описании](#)).

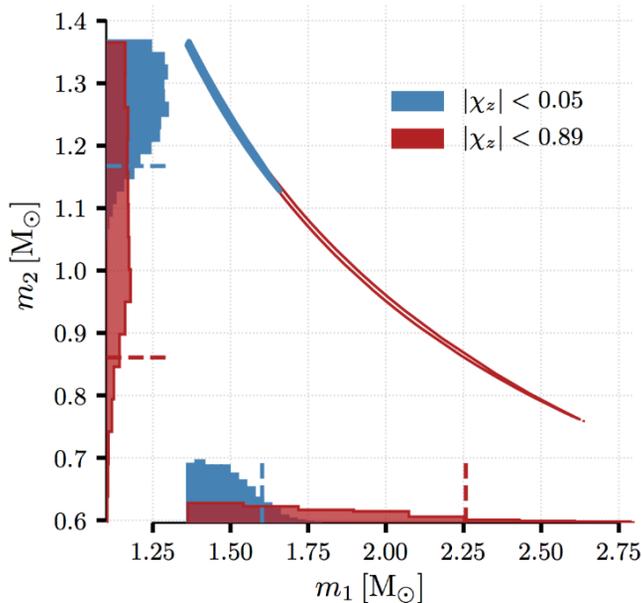


Рис. 4: На изображении показаны наилучшие оценки на массы двух компонентов двойной звезды. Все массы внутри диагональной области подходят под модель. Для каждой точки внутри этой области можно провести горизонталь налево и вертикаль вниз, получив массы, соответствующие конкретному решению для гравитационно-волновых данных. Цвета отображают случаи низкой (синий) и высокой (красный) скорости вращения вокруг своей оси.

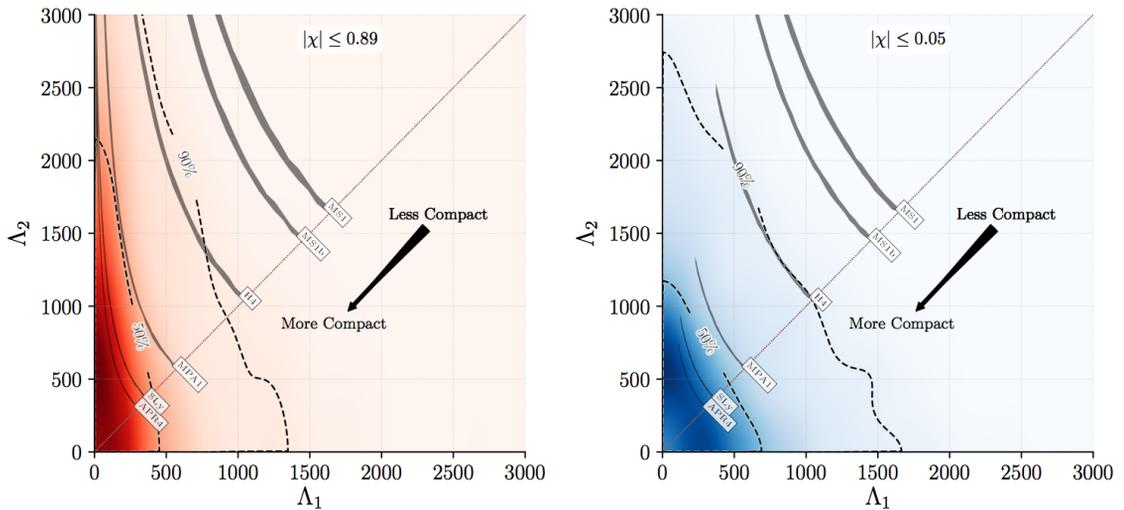


Рис. 5: Эти изображения демонстрируют, насколько звезды могут быть приливно деформированы. Каждая ось соответствует одной из двух звезд и насколько там может быть деформирована. GW170817 находится где-то на этом графике. Пунктиром обозначены 90% и 50% вероятности того, что система находится ниже и левее от пунктира. Случай высокой скорости вращения вокруг оси показан слева, а низкой - справа.

Нейтронные звезды состоят из сверхплотного вещества и ведут себя иначе, чем обычные объекты на Земле. Поэтому астрофизические наблюдения - это лаборатория для изучения сверхплотного вещества. Физики описывают такое вещество отношением, называемым уравнением состояния, которое связывает давление и плотность (похоже на известный закон идеального газа $PV=nRT$). Существует много разных возможных уравнений состояния, и астрономы хотели бы узнать, какое из них наилучшим образом описывает нейтронные звезды. Для нейтронных звезд масса и уравнение состояния определяют размер звезды и изменение её гравитационного потенциала при сжатии звезды гравитацией от её парной звезды (что называется приливной деформацией). Это сжатие в свою очередь может влиять на гравитационно-волновой сигнал. Анализ GW170817 дает интересные ограничения на размер приливной деформации, но не может однозначно указать на уравнение состояния.

ЧЕМ ЕЩЕ ЭТО МОГЛО БЫТЬ?

Как и со всеми важными открытиями в астрономии, из этого наблюдения мы узнали множество вещей, но много вопросов остались без ответа. Два основных вопроса о GW170817 касаются природы самих объектов. Из наблюдений электромагнитного сигнала мы можем заключить, что как минимум один из объектов в паре был нейтронной звездой, но это не значит, что ею были оба. Хотя оба компонента пары имеют массы схожие с массами известных нам нейтронных звезд, один из них мог быть черной дырой. Астрономы никогда не видели черной дыры с массой близкой к нейтронной звезде, но нет и свидетельств, что такого быть не может, так что GW170817 мог быть нейтронной звездой в паре с черной дырой. Тем не менее, поскольку массы близки к нейтронным звездам, мы предпочитаем интерпретировать оба объекта как нейтронные звезды.

Другой важный вопрос в том, чем стал объект GW170817 после слияния. Существует две возможности: или он стал самой массивной из известных нам нейтронной звездой, или самой легкой из известных нам черной дырой. Обе версии захватывающие и заманчивы, но качества наших данных не хватает чтобы выделить одну. Все, что мы знаем об объекте - чем бы он ни был, он имеет массу около 2.74 солнечной.



Наши страницы в сети

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



Вы можете прочитать полную публикацию, принятую в **Physical Review Letters**, [здесь](#).

Словарь

- **Черная дыра:** Область пространства-времени, возникающая в присутствии чрезвычайно компактной массы, со столь сильной гравитацией, что ничто, даже свет, не может выйти из этой области.
- **Форма гравитационно-волнового сигнала:** Кривая, описывающая как возмущение, вызванное гравитационной волной, меняется со временем.
- **Шум:** Флуктуации в гравитационно-волновом сигнале, вызванные различными эффектами от оборудования и окружающей среды. Чувствительность гравитационно-волнового детектора ограничена шумом.
- **Цикл наблюдений:** Период наблюдений, во время которого гравитационно-волновые детекторы собирают данные.
- **Нейтронная звезда:** Сверхплотный объект, оставшийся после коллапса массивной звезды.
- **Гамма-лучи:** Электромагнитное излучение с наивысшей энергией в электромагнитном спектре.
- **Безразмерная амплитуда колебаний, strain:** Относительное изменение в расстоянии между двумя точками, вызванное искривлением пространства-времени проходящей гравитационной волной