

GW230529: НАБЛЮДЕНИЕ СЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ С НЕИЗВЕСТНЫМ КОМПАКТНЫМ ОБЪЕКТОМ

Первая регистрация [гравитационных волн](#) (ГВ) в 2015г., [GW150914](#), ознаменовала начало новой эры в астрономии. С тех пор была обнаружено множество новых ГВ событий, исходящих от разных источников. Все они были **слияниями двойных систем компактных объектов**, состоящих из нейтронных звезд (НЗ) и/или черных дыр (ЧД). В новой публикации, мы сообщаем о [наблюдении GW230529](#), слиянии двойной системы компактных объектов, зарегистрированном 29 мая 2023 г. во время первой части четвертого наблюдательного запуска детекторов LIGO-Virgo-KAGRA. Один из составляющих GW230529 - объект неизвестной природы и массы, большей, чем ожидаемая максимально возможная масса НЗ, и меньшей, чем ожидаемая минимально возможная масса ЧД.

КАК МЫ ОБНАРУЖИЛИ ЭТО СОБЫТИЕ?

Мы проанализировали данные с каждого работающего на тот момент детектора, используя метод **фильтрации совпадений**. Этот метод заключается в сравнении данных с детектора с теоретически вычисленными сигналами, чтобы найти тот сигнал, который лучше всего подходит под данные, в случае, если реальный сигнал присутствует в данных. Это позволяет оценить зависимость силы сигнала (или соотношения сигнал-шум) от времени. Если сигнал действительно присутствует в данных, отношение сигнал-шум будет высоким, и низким в противном случае. Этот метод доказал свою эффективность в обнаружении слабых ГВ сигналов в данных детекторов, но не абсолютно надежен — различные источники шума способны возникнуть в наших измерениях и даже имитировать ГВ сигналы.

ПОЧЕМУ МЫ СЧИТАЕМ, ЧТО GW230529 — РЕАЛЬНОЕ СОБЫТИЕ?

В основном, мы ищем сигналы, которые совпадают в различных детекторах и по времени, и по параметрам источника. Однако мы ищем не только такие события. Мы усовершенствовали наши аналитические методы таким образом, что теперь одного детектора достаточно для того, чтобы утвердительно заявить о наблюдении реального сигнала. Именно это и позволило нам зарегистрировать исключительное событие GW230529, для которого были доступны только данные обсерватории [LIGO-Livingston](#). Три независимых **поисковых канала** (поисковых алгоритма) отчитались о регистрации GW230529. Все они используют фильтрацию совпадений, однако спроектированы по-разному. Также в рамках этих каналов поиска были разработаны мощные инструменты, чтобы отличить астрофизические сигналы от шума. Развитость этих поисковых каналов позволяет нам с уверенностью сравнить их результаты.

Таким образом, это крайне маловероятно, что шум детектора замаскировался под сигнал, такой как GW230529. Событие было зарегистрировано во время анализа данных детекторов в режиме реального времени, и регистрация была проверена в конце наблюдательного периода. Событие имело **вероятность ложной тревоги** менее, чем один раз в тысячу лет. Это значит, что мы ожидаем увидеть ложный сигнал подобной формы реже, чем раз в тысячу лет в случае отсутствия настоящего сигнала слияния компактных объектов. На [Рисунке 2](#) мы показываем, как это событие выделяется из остальных кандидатов.

ЧЕМ ИНТЕРЕСНО ЭТО СОБЫТИЕ?

На протяжении многих лет предполагалось существование диапазона масс между $3 M_{\odot}$ и $5 M_{\odot}$ (M_{\odot} здесь означает **солнечную массу**), в котором находится лишь малое количество компактных объектов. Этот диапазон называется **нижним разрывом масс**. Однако недавние наблюдения в [электромагнитном спектре](#) и ГВ указали на существование кандидатов двойных систем в разрыве масс. Например, оценка массы вторичного (менее массивного) объекта двойной системы [GW190814](#) с высокой вероятностью находится в диапазоне между $2.50 M_{\odot}$ и $2.67 M_{\odot}$, то есть выше чем самая тяжелая НЗ на момент регистрации GW230529, и ниже ожидаемой минимальной массы ЧД.

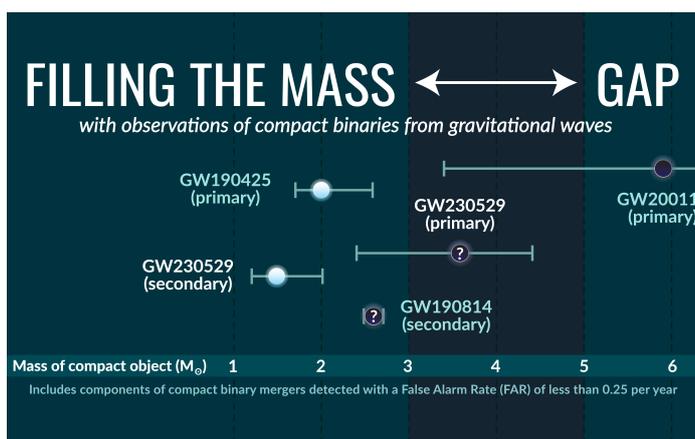


Рисунок 1: На иллюстрации изображена выборка компонент гравитационно-волновых событий, которые находятся в диапазоне между 3 и 5 солнечными массами, в так называемом “нижнем разрыве масс.” Светлые голубые кружки означают нейтронные звезды, чёрные кружки означают чёрные дыры, а чёрные кружки с вопросительным знаком означают, что объект, скорее всего, является черной дырой, но также может быть и нейтронной звездой. Масса первичного компонента GW230529 находится в разрыве масс. (Изображение предоставлено S. Galavade, Observatoire de la Côte d’Azur.)

Наши вебсайты:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu



Масса первичного объекта оценивается в примерно $3.6 M_{\odot}$, что делает GW230529 первым кандидатом на двойную систему с массой первичного объекта в разрыве масс, как показано на **Рисунке 3**. Учитывая текущее понимание распределения числа НЗ и ЧД с разными массами, первичная масса согласуется с вероятностью 99% с ЧД с массой менее $5 M_{\odot}$. Мы также оценили вероятность, что первичный объект — НЗ, учитывая текущие данные из теории ядерной физики и экспериментов, а также распределения астрофизических источников. Эта вероятность НЗ в качестве первичного объекта оказалась малой, но отличной от нуля, и при некоторых предположениях, может достигать нескольких процентов. Таким образом, мы не можем с уверенностью исключить такой сценарий. С другой стороны, вторичный компонент GW230529, масса которого с вероятностью 90% находится между $1.2 M_{\odot}$ и $2.0 M_{\odot}$, почти однозначно является НЗ.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ ИЗ ЭТОГО СОБЫТИЯ?

Слияния НЗЧД — редкие события. Таким образом, каждая дополнительная регистрация невероятно важна для изучения частоты слияний, а также для характеристики распределения ЧД и НЗ, одной из целей ГВ астрономии. Эта задача включает в себя вывод формы распределения их масс, нахождение минимальной и максимальной массы НЗ и ЧД, и изучение распространённости вращающихся компактных объектов различных масс.

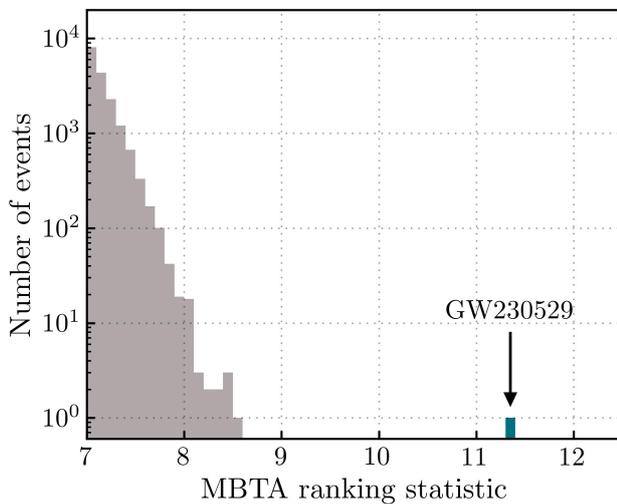


Рисунок 2: Распределение статистики ранжирования одного из поисковых конвейеров (MBTA) для всех событий-кандидатов в LIGO Livingston в течение первых двух недель четвертого наблюдательного запуска (O4a). Горизонтальная ось показывает значение статистики ранжирования, позволяющая отсортировать триггеры в поисковом конвейере по их рангу, а также включает в себя различные тесты для отделения событий от шума. Значение статистики ранжирования получено из соотношения сигнал-шум — чем оно выше, тем мощнее событие и тем лучше согласуется с астрофизическим сигналом. Серым обозначены события, весомость которых была недостаточна для их классификации как имеющих астрофизическое происхождение. Бирюзовый пик справа и есть GW230529. Видно, что статистика ранжирования GW230529 значительно выше, чем у всех остальных событий. Также не было обнаружено событий со статистикой ранжирования выше 8.5, кроме самого GW230529 со статистикой ранжирования равной 11.4.

Используя только событие GW230529, вычисленная частота слияний для похожих событий оказалась равна примерно 39 событиям в год в объёме примерно 3.5×10^{28} кубических световых лет. Анализ, включая [другие события НЗЧД](#), зарегистрированные в течение третьего наблюдательного запуска (O3), показал, что частота слияний примерно равна 61 событию в год в объёме около 3.5×10^{28} кубических световых лет.

Еще один анализ, включающий дополнительные, менее значимые события, показывает частоту слияния на уровне примерно 95 событий в год в объёме 3.5×10^{28} кубических световых лет. Из этих анализов видно, что полученная частота слияний двойных систем, таких как GW230529, сравнима с таковой во время наблюдательного запуска O3, у которых первичный компонент — это однозначно ЧД. Этот факт еще раз подтверждает гипотезу, что первичным объектом системы GW230529 была ЧД.

ГРАФИКИ ИЗ ПУБЛИКАЦИИ

Более подробная информация о графиках и о том, как они были созданы, читайте в свободно доступном [препринте](#).

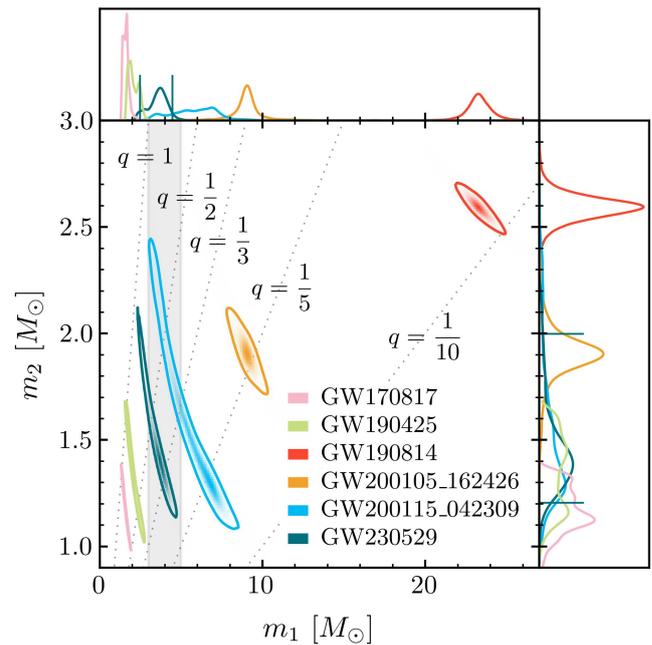


Рисунок 3: Распределение вероятности масс составляющих нескольких двойных систем. Наиболее вероятные значения масс обозначены пиками в распределениях вероятности. Верхний график показывает спроецированное распределение масс первичного объекта, тогда как график справа показывает спроецированное распределение масс вторичного объекта. Пунктирные линии обозначают соотношения масс $q = m_2 / m_1$. GW170817 (розовый) и GW190425 (зеленый) были в согласии системами двойных НЗ (ДНЗ). GW200105_162426 (оранжевый) и GW200115_042309 (голубой) были в согласии с системами НЗЧД. Масса вторичного объекта GW190814 (красный) могла быть ЧД или НЗ. Разрыв масс между 3 и $5 M_{\odot}$ показан вертикальной серой полосой. Видно, что GW230529 (бирюзовый) находится прямо между двумя системами ДНЗ и двумя НЗЧД.

Распределения вероятности для частоты слияний НЗЧД показаны на **Рисунке 4**.

Из-за того, что первичный объект имеет массу, лежащую в разрыве масс, GW230529 является главным кандидатом для уточнения **модели встречаемости**. Было рассмотрено три модели встречаемости для изучения влияния на их результаты регистрации GW230529. Первые две модели включают в себя все типы двойных систем компактных объектов (ДНЗ, ДЧД, НЗЧД), тогда как третья модель рассматривает только НЗЧД. Включение GW230529 в первые две модели значительно не поменяло результат, а это значит, что GW230529 не было исключением для этих моделей. Третья модель, однако, показала значительные изменения, как показано на **Рисунке 5**. На нём видно, что в этом случае распространённость ЧД малой массы увеличилась, а минимальная масса ЧД подвинулась к более низким значениям. При включении GW230529 в анализ, минимальная масса ЧД становится $3.36 M_{\odot}$, тогда как предыдущее значение было в районе $6.04 M_{\odot}$ для этой модели.

Процесс формирования GW230529 неясен. Современное понимание **сверхновых с коллапсом ядра** в массивных звездах не согласуется со сценариями формирования первичного компонента в двойной системе из-за их малой массы. Более правдоподобный сценарий - формирование через **обратное падение вещества (fallback)**, когда ЧД образуется после взрыва сверхновой вследствие аккреции ядром остаточной материи. Недавние результаты численных моделей показали свидетельство того, что формирование ЧД с массами $3 - 6 M_{\odot}$ возможно с помощью данного механизма. Симуляции коллапса ядра гелиевых звезд предсказывают низкие массы ЧД вплоть до максимальной массы НЗ, хотя эта область значений масс ниже $5 M_{\odot}$ менее заполнена. До сих пор, модели коллапса ядра имеют большие погрешности, что затрудняет вычисление точных пределов масс компактных объектов. Таким образом, GW230529 здесь выступает в роли ценного ресурса для ограничения этих моделей.

Есть и другой возможный сценарий формирования первичного компонента — слияние НЗ в двойной системе ДНЗ. В этом случае, мы можем предположить, что вторичный компонент является частью бывшей тройной или четверной системы, или что он был захвачен первичным объектом во время его эволюции внутри молодого звездного скопления или активного ядра галактики. Мы также не можем исключить и незвёздное происхождение, такое как **первичная ЧД**.

Дальнейшее изучение систем с массами составляющих в разрыве масс, таких как GW230529, позволит нам уточнить наше понимание распространённости НЗ и ЧД. В свою очередь, это позволит нам лучше понять механизмы их формирования, а также внутреннюю структуру НЗ.

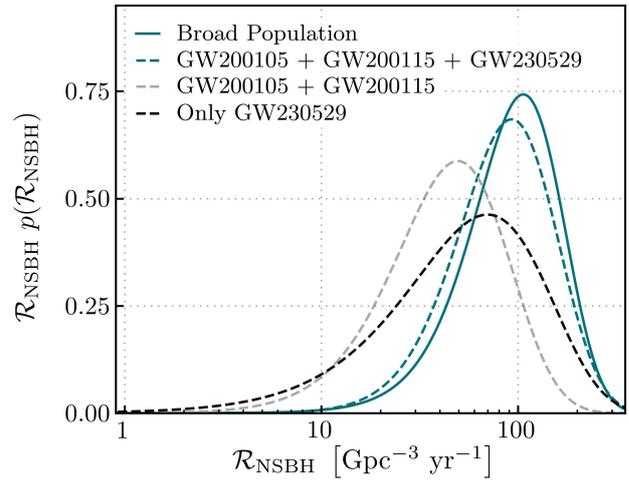


Рисунок 4: Распределения вероятностей частоты слияний систем НЗЧД. Эти распределения имеют пики на наиболее вероятных значениях частоты слияний, показанного на оси абсцисс. Пунктирные линии получены с использованием моделей встречаемости, указанными в легенде. Сплошная линия, обозначенная как “broad population”, получена с использованием модели встречаемости, которая включает в себя дополнительные, менее значимые события, также отмеченные на легенде. Видно, что пиковые значения для различных распределений относительно близки друг к другу, и в целом пересекаются. В частности, пиковое значение, полученное с использованием только лишь GW230529, сравнимо с пиковым значением, найденным при включении в рассмотрение остальных событий НЗЧД.

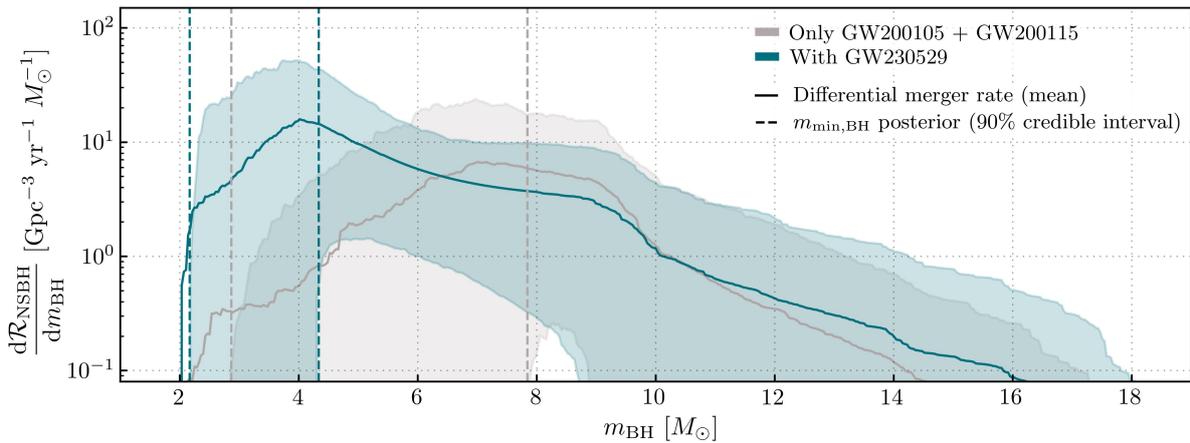


Рисунок 5: Частота слияний двойных систем НЗЧД (ось ординат) в зависимости от массы ЧД в системе (ось абсцисс). Сплошные кривые отображают частоту слияний для двух разных моделей, заштрихованные области отображают погрешность соответствующих моделей. Пунктирные вертикальные линии показывают ожидаемый диапазон минимальной массы ЧД с вероятностью 90%. Серым обозначен вариант без включения GW230529 в модели встречаемости масс, тогда как синим — с включением GW230529. Видно, что включение GW230529 увеличивает встречаемость двойных систем с маломассивной ЧД, тогда как сдвигает минимально массу ЧД в сторону более низких значений.

УЗНАТЬ БОЛЬШЕ:

Наши вебсайты: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu,
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Бесплатный препринт полной статьи читайте [здесь](#).

ТЕРМИНЫ

Слияние компактных объектов: система, состоящая из двух черных дыр, двух нейтронных звезд, или одной черной дыры и одной нейтронной звезды, орбита которых сокращается вплоть до последующего слияния объектов. Этот процесс излучает ГВ с постоянно увеличивающейся частотой и амплитудой, по мере сближения и ускорения двух объектов. Конечный объект после слияния может оказаться НЗ или ЧД, в зависимости от начальной системы. Объекты, составляющие систему, называются её компонентами, и наиболее массивный объект называется первичным компонентом.

Чёрная дыра: компактный объект, который настолько плотен, что необходимая скорость для того, чтобы выбраться из него, выше скорости света. Именно поэтому ЧД выглядит чёрной областью, так как даже свет не способен добраться из неё к нам.

Нейтронная звезда: чрезвычайно плотный компактный объект, состоящий почти полностью из нейтронов, с малой примесью протонов и электронов, поскольку атомы уже не способны совладать с таким сильным давлением. Они образуются в результате процесса коллапса ядер сверхновых, и их максимальная масса оценена примерно в $3 M_{\odot}$.

Первичная черная дыра: гипотетический тип ЧД, который может формироваться в ранней вселенной вскоре после Большого Взрыва. Согласно предсказаниям, их масса варьируется в диапазоне от $10^{-18} M_{\odot}$ до $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo и KAGRA: расположенные в США, Италии и Японии, эти инструменты позволяют нам обнаруживать ГВ. Основное устройство детекторов LIGO, Virgo и KAGRA состоит из двух плечей длиной в километры, образующих L-образную фигуру, и на концах которых закреплены зеркала, между которыми бежит лазерный луч. Мы используем лазер для измерения относительных изменений длины плечей под действием проходящих сквозь Землю ГВ. Расстояние между зеркалами в каждом из плеч постоянно отслеживается и составляет данные, в которых мы ищем ГВ сигналы.

Фильтрация совпадениями: используемый нами метод регистрации событий слияния компактных двойных систем. Этот метод заключается в сравнении и поиске корреляций данных наших детекторов с теоретически предсказанными ГВ сигналами, которые зависят от свойств двойной системы. Когда настоящая ГВ проходит сквозь Землю, мы способны найти теоретический сигнал, хорошо совпадающий с данными с детектора.

Нижний разрыв масс (mass gap): диапазон масс, где ожидается отсутствие или лишь малое количество компактных объектов. Этот диапазон простирается примерно от $3 M_{\odot}$, максимальной массы НЗ, до $5 M_{\odot}$, минимальной массы ЧД.

Солнечная масса, M_{\odot} : масса Солнца, используется в качестве стандартной единицы измерения в астрономии, и примерно равна 2×10^{30} кг.

Световой год: единица измерения расстояния. 1 световой год - это расстояние, которое пробегает свет за один год в вакууме, примерно равен 9.5×10^{12} км.

Модель встречаемости: теоретическая модель, предсказывающая количество компактных объектов определенного типа как функцию любой комбинации параметров двойной системы.

Сверхновая с коллапсом ядра: Внутри звезды давление газа постоянно компенсирует гравитационное притяжение, созданное её ядром. Под конец жизни звезды, давление падает и она больше не способна сопротивляться гравитационному притяжению. Происходит чрезвычайно быстрое гравитационное схлопывание внутрь к ядру, которое может иметь несколько последствий. Резкое схлопывание может создать очень высокое давление внутри звезды, заставляя её взорваться в виде сверхновой (отсюда и название — сверхновая с коллапсом ядра). Такая сверхновая может оставить после себя НЗ или ЧД в случае обратного падения вещества. Если же звезда была изначально слишком массивной, она схлопнется напрямую в ЧД, пропустив стадию сверхновой.

Обратное падение вещества (fallback): в сценарии сверхновой с коллапсом ядра, при котором формируется НЗ, остаточная материя может упасть обратно на неё. Такая аккреция вещества способна увеличить массу НЗ выше максимальной массы и привести к формированию ЧД.

Поисковый канал: компьютерные программы, состоящие из цепочки нескольких процессов. Каждый из них настраивает данные для анализа, фильтрует их, а затем вычисляет определённые параметры, чтобы забраковать как можно больше шумовых событий, и оценить значимость каждого потенциально астрофизического события. Некоторые поисковые каналы выполняются в режиме реального времени, другие — в режиме оффлайн, а некоторые и в том, и другом. Более подробную информацию можно найти в пользовательской инструкции по публичным оповещениям IGWN.

Оффлайновый поиск: анализ данных прошедшего периода наблюдений обычно проходит во время перерывов в работе детекторов или когда они обслуживаются или модернизируются. Такой анализ дополняет анализ в режиме реального времени, который проводится прямо во время наблюдательных периодов.

Вероятность ложной тревоги: эта величина используется для количественной оценки вероятности, что событие является шумом. Она вычисляется с помощью симуляций шумовых событий и следя за силой их сигнала для расчёта распределения ожидаемой частоты их возникновения как функцию силы сигнала. Более конкретно, если событие имеет вероятность ложной тревоги, равную 1 в день, то мы ожидаем шум нашего детектора создать такое событие только раз в сутки. Таким образом, мы назначим малую значимость этому событию как астрофизическому.