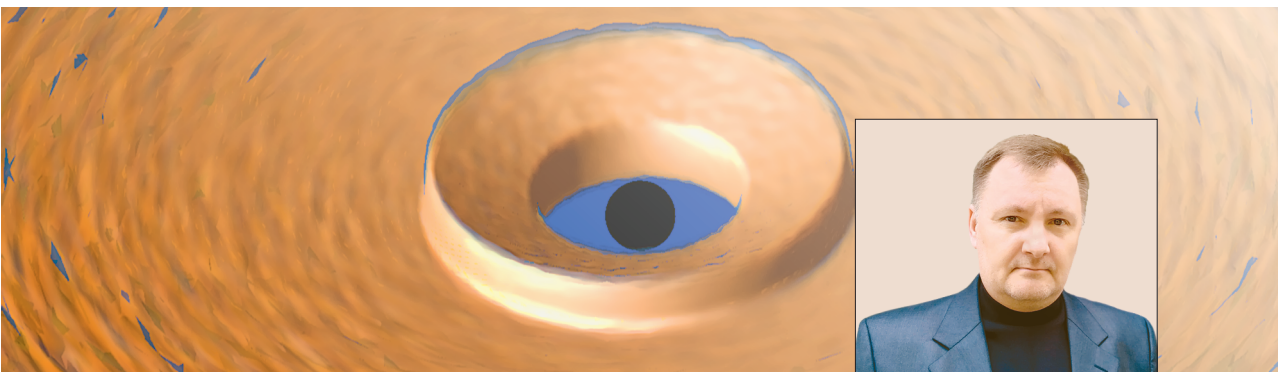


ВОЗМОЖНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ СЛИВАЮЩИХСЯ ЧЕРНЫХ ДЫР



А.Г. ЖИЛКИН,

доктор физико-математических наук

Д.В. БИСИКАЛО,

член-корреспондент РАН

Е.П. КУРБАТОВ,

кандидат физико-математических наук

Институт астрономии РАН

DOI: 10.7868/50044394819060021

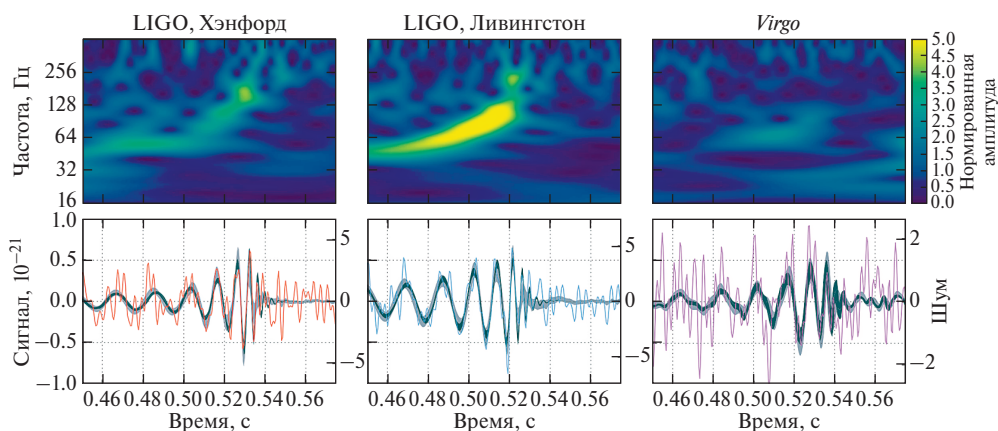
К настоящему времени на детекторах LIGO и Virgo зарегистрировано несколько гравитационно-волновых всплесков, обусловленных слиянием двойных черных дыр. Принято считать, что черные дыры окружены аккреционными дисками (ЗиВ, 2016, № 6), поэтому такие события должны сопровождаться возмущением дисков и, возможно, увеличением электромагнитного излучения от этих объектов. Как показали численные исследования, проведенные в Институте астрономии РАН, рост светимости обеспечивается нагревом вещества ударной волной, возникающей в аккреционном диске вследствие потери массы центрального объекта в результате излучения гравитационных волн. Причем поярчение системы настолько велико, что может быть зарегистрировано современными рентгеновскими обсерваториями. Это открывает путь для действительно многоволнового исследования процессов слияния черных дыр или многоканальной астрономии (multi-messenger astronomy).



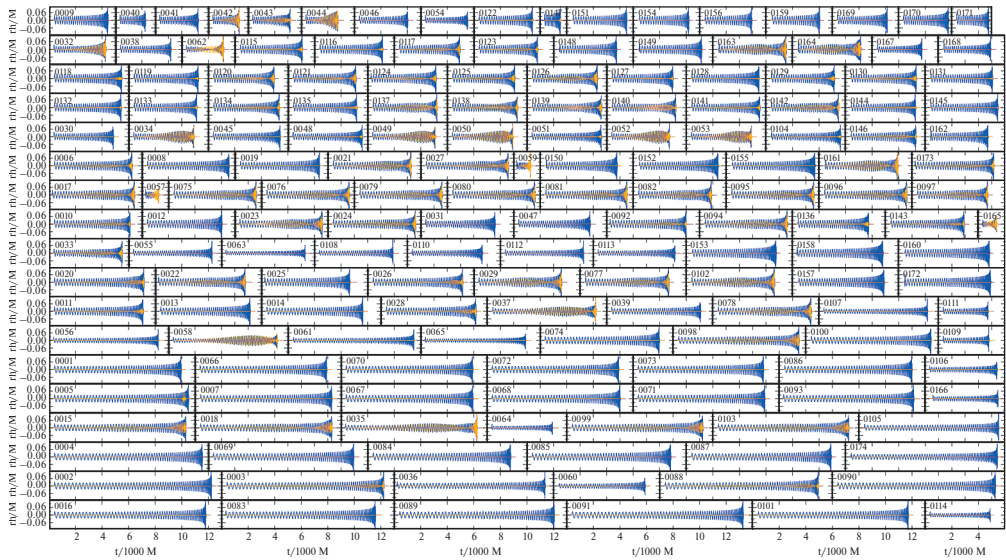
ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Почти пять лет назад (в 2015 г.) произошло уникальное, хоть и давно ожидаемое, событие – были экспериментально обнаружены гравитационные волны. С одной стороны, это открытие в очередной раз подтвердило справедливость Общей теории относительности. Ведь существование этих волн было предсказано А. Эйнштейном еще в 1916 г. С другой стороны, для наблюдательной астрономии появился еще один важнейший “канал” или “окно” для исследования Вселенной. Можно сказать, что это уже третий канал. Первый канал связан с детектированием электромагнитного излучения от космических объектов во всем диапазоне спектра – от радиоизлучения и вплоть до гамма-квантов. Второй канал определяется приходящими к нам из космического пространства различного рода частицами. К ним, в частности, относятся космические лучи и нейтрино.

В Общей теории относительности гравитационное поле возникает в результате искривления пространства-времени. Источником кривизны являются материальные частицы или тела, а также некоторые виды полей негравитационного происхождения, например, электромагнитное. Гравитационные волны представляют собой возмущения метрики пространства-времени, распространяющиеся на фоне невозмущенной метрики со скоростью света. Как правило, в качестве невозмущенного фона рассматривают метрику плоского (не искривленного) пространства-времени. Гравитационные волны (как, впрочем, и электромагнитные) обладают двумя степенями поляризации. Плоский невозмущенный фон можно связать с метрикой пространства-времени в том месте, где расположен наблюдатель, находящийся достаточно далеко от источника гравитационного излучения. С точки зрения такого наблюдателя гравитационное поле можно рассматривать в рамках приближенной, но более простой



Гравитационно-волновой сигнал от слияния двух черных дыр, зарегистрированный 14 августа 2017 г. на трех детекторах LIGO H1 (слева), LIGO L1 (в центре) и Virgo (справа). Вверху показаны результаты частотного анализа полученных сигналов. Внизу приведены исходные данные наблюдений, сглаженные сигналы, а также оптимальным образом подобранные теоретические кривые. Из статьи Abbot et al., 2017



Каталог теоретических расчетов гравитационно-волновых сигналов от сливающихся черных дыр. Для каждого варианта цветом показаны две волновые формы, соответствующие двум типам поляризации в направлении, параллельном начальной плоскости орбиты двойной системы. Время показано в десятых долях секунды для двойной системы с полной массой в $20 M_{\odot}$. Из статьи Mroue et al., 2013

модели – линеаризованной теории гравитации. В этой теории гравитационное поле обладает энергией и импульсом (как, например, электромагнитное поле), но в ней не соблюдается принцип эквивалентности, который лежит в основе Общей теории относительности.

Ускоренное движение любого массивного тела вызывает возмущение метрики пространства-времени. При определенных условиях (например, в случае периодического движения) эти возмущения для удаленных наблюдателей будут проявляться в виде гравитационных волн. В частности, Земля, двигаясь по орбите вокруг Солнца, излучает гравитационные волны. Конечно, интенсивность этого гравитационного излучения пренебрежимо мала. Однако она возрастает с увеличением массы гравитирующих тел и с уменьшением расстояния между ними. Поэтому

в короткопериодических тесных двойных звездах, особенно в тех из них, которые содержат релятивистские компоненты (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры), этот эффект может оказывать существенное влияние на эволюцию их орбит. Эти выводы подтверждаются прямыми наблюдениями изменений периодов ряда пульсаров, например, пульсара PSR1913 + 16.

Одними из наиболее мощных источников гравитационного излучения являются двойные черные дыры. Такие объекты могут, например, формироваться в результате эволюции тесной двойной системы, изначально состоящей из массивных звезд. В центральных частях некоторых галактик могут находиться двойные сверхмассивные черные дыры. Примером такой галактики является лацерида OJ 287 массой компонентов $18 \times 10^9 M_{\odot}$ и $10^8 M_{\odot}$ (ЗиВ, 2016, № 4; 2018, № 1). В центре

нашей Галактики, по-видимому, находится сверхмассивная черная дыра массой около 4×10^6 масс Солнца. В 2016 г. группа японских астрономов обнаружила вблизи центра Галактики еще один объект, предположительно являющийся черной дырой массой порядка 10^5 масс Солнца и расположенный на расстоянии примерно 61 пк от сверхмассивной черной дыры. Поэтому не исключено, что даже в нашей Галактике центральная черная дыра является двойной.

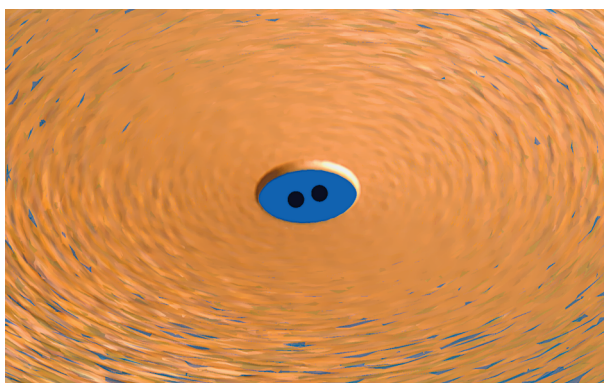
Излучение гравитационных волн двойной черной дырой приводит к потере углового момента (это происходит с точки зрения удаленного наблюдателя) и, как следствие, к их медленному, но неуклонному сближению. В конце концов, этот процесс приводит к слиянию черных дыр, в результате чего их горизонты событий объединяются и из двух черных дыр формируется одна. В рамках Общей теории относительности нет точного аналитического решения для описания этого процесса. Имеются лишь приближенные или численные решения. Однако, с точки зрения удаленного наблюдателя, фиксирующего гравитационное излучение, все выглядит так, как будто двойная черная дыра теряет массу-энергию. В результате, как показывают расчеты, масса продукта слияния двух черных дыр уменьшается на несколько процентов по сравнению с исходной полной массой.

Конечная стадия слияния черных дыр происходит очень быстро – за доли секунды. Гравитационный сигнал выглядит как синусоидальные колебания со все увеличивающейся частотой и амплитудой, которые в определенный момент резко затухают и

обрываются. По характеру этих колебаний с помощью теоретических моделей можно вычислить исходные массы каждой черной дыры и массу продукта их слияния. С 2015 г. на детекторах LIGO и *Virgo* было обнаружено несколько гравитационно-волновых событий, сопровождающих слияние двойных черных дыр (ЗиВ, 1999, № 3; 2010, № 3). Все эти объекты находились далеко за пределами нашей Галактики на расстояниях от нескольких сотен до нескольких тысяч мегапарсек от нас. Полученные данные соответствуют частоте слияний порядка 100 событий в год, происходящих в объеме в один гигапарсек, что намного реже, чем предсказывают популяционные модели.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ

В теоретических исследованиях одиночных черных дыр часто делается предположение о том, что эти объекты окружены аккреционными дисками, в которых вещество движется по почти кеплеровским орбитам. Процессы вязкого трения между соседними слоями диска приводят к тому, что внутренние слои (кольца) отдают часть своего углового момента внешним слоям (кольцам). В результате вещество диска постепенно продвигается поближе



Двойная черная дыра
с аккреционным диском

к черной дыре, а угловой момент диска, наоборот, переносится к его периферии. Как только частицы диска достигают расстояния в три гравитационных радиуса (гравитационный радиус $r_g = 2GM/c^2$, где G – гравитационная постоянная, c – скорость света, M – масса черной дыры), они свободно падают внутрь черной дыры, поскольку внутри этой зоны, согласно Общей теории относительности, устойчивых круговых орбит уже не существует.

Если черная дыра входит в состав тесной двойной системы, то аккреционный диск вокруг нее может сформироваться в процессе обмена массой. Таких систем сейчас известно уже достаточно много. У одиночной черной дыры, не входящей в состав какой-либо двойной или кратной системы, аккреционный диск может возникнуть, например, при ее пролете сквозь плотное молекулярное облако и дальнейшем гравитационном захвате его вещества. В галактиках подобное явление по космическим меркам должно происходить достаточно часто. Другими источниками вещества аккреционного диска может быть плазма ветра от соседних астрофизических объектов или остатки разрушенной приливным воздействием звезды. Наверное, можно придумать и иные механизмы, приводящие к формированию аккреционных дисков вокруг черных дыр.

Сценарий формирования тесной пары черных дыр звездной массы из исходной тесной двойной системы, состоящей из звезд-гигантов, не оставляет возможности для существования общего для них аккреционного диска. Если он даже и формируется на некоторых стадиях эволюции из вещества

общей оболочки тесной двойной системы, то в дальнейшем он все равно будет неминуемо разрушен сильными звездными ветрами и вспышками сверхновых. Однако, если время жизни двойной черной дыры (то есть время до их слияния) достаточно велико, то некоторые из вышеперечисленных механизмов для одиночных черных дыр подходят и для случая двойных черных дыр. В частности, общий аккреционный диск может сформироваться при пролете системы сквозь молекулярное облако, из ветра от третьей звезды в иерархической системе, а также из остатков вещества близкой звезды, разрушенной приливными силами. Недавно был предложен сценарий, согласно которому двойная черная дыра появляется вследствие вращательной неустойчивости, развивающейся в процессе коллапса ядра очень массивной (масса больше $100 M_{\odot}$) звезды. При этом общий аккреционный диск может формироваться из вещества оболочки исходной звезды.

Двойные сверхмассивные черные дыры могут возникать в процессе слияния дисковых галактик, если формирующаяся при этом новая галактика сохраняет достаточно большой угловой момент для поддержания своей дисковой морфологии. В упоминавшейся выше лацертиде OJ 287 наблюдательных проявлений общего аккреционного диска вокруг двойной сверхмассивной черной дыры пока не обнаружено. Полученные данные указывают лишь на то, что более массивная черная дыра в этой паре имеет собственный аккреционный диск. Однако общий диск может сформироваться из окружающего газо-звездного вещества галактики

Сценарий формирования тесной пары черных дыр звездной массы из исходной тесной двойной системы, состоящей из звезд-гигантов, не оставляет возможности для существования общего для них аккреционного диска.

в процессе аккреции на центральную двойную сверхмассивную черную дыру. При этом во внутренних частях диска звезды будут разрушаться приливными силами.

В центральной части нашей Галактики имеется газовый аккреционный диск радиусом примерно 600 пк и массой около $2 \times 10^7 M_{\odot}$. В центре аккреционного диска находится сверхмассивная черная дыра. Орбита второго массивного компонента, вращающегося вокруг сверхмассивной черной дыры, оказывается расположенной глубоко внутри центрального аккреционного диска. Следовательно, если этот второй объект также является черной дырой, то получается, что в центре нашей Галактики двойная черная дыра окружена общим аккреционным диском. Правда, расстояние между этими черными дырами достаточно велико и поэтому их слияние, к нашему счастью, произойдет еще очень нескоро – примерно через 10^{27} лет.

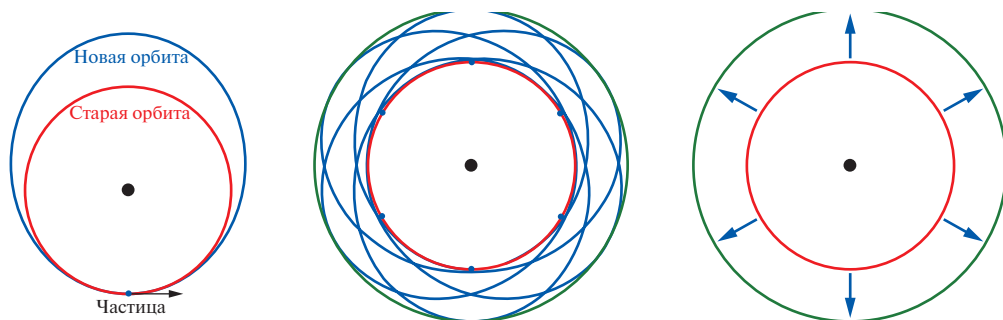
Внутренний радиус аккреционного диска вокруг двойной черной дыры примерно в два раза превышает расстояние между центрами черных дыр. Процесс стремительного слияния черных дыр начинается, когда расстояние между ними составляет три гравитационных радиуса, вычисленного по их суммарной массе (гравитационный радиус аккретора). До этого момента сближение черных дыр происходит медленно и поэтому, благодаря действию вязких сил, диск успевает подстраиваться к изменяющемуся межкомпонентному расстоянию. Следовательно, можно считать, что непосредственно перед слиянием черных дыр внутренний радиус диска примерно в 6 раз превосходит гравитационный радиус аккретора. Это позволяет при описании свойств такого аккреционного диска пренебрегать релятивистскими эффектами и использовать теорию, развитую Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым

еще в 1973 г. (ЗиВ, 2014, № 3). В рамках этой модели можно, в частности, оценить светимость исходного (до слияния черных дыр) диска. При этом оказывается, что светимость в мягком и среднем рентгеновском диапазонах составляет примерно 10^{39} эрг/с.

АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ И ПОТЕРЯ МАССЫ

В ряде теоретических работ было показано, что слияние двойной черной дыры и последующее гравитационно-волновое излучение может приводить к нескольким эффектам для аккреционного диска. Во-первых, потеря массы центральным объектом приводит к нарушению кеплеровского равновесия в диске и последующему возбуждению волн плотности большой амплитуды. Во-вторых, в зависимости от отношения масс сливающихся объектов и ориентации их собственных угловых моментов, гравитационно-волновое излучение может быть асимметричным. В результате вещество диска испытывает импульс отдачи, который может привести к возникновению сильных возмущений. В-третьих, изменения метрики пространства-времени в гравитационных волнах может непосредственно вызывать в диске дополнительные механические напряжения, которые будут постепенно диссипировать на вязкой шкале времени и нагревать вещество. Все эти явления приводят к электромагнитному отклику аккреционного диска.

В данной статье мы рассмотрим действие первого механизма, поскольку для его анализа все необходимые данные могут быть определены непосредственно из наблюдений. Представить себе, что происходит с аккреционным диском после потери массы центрального объекта в результате слияния



Возмущение орбитального движения частиц, вызванное потерей массы центрального объекта. Левая диаграмма демонстрирует изменение характера движения отдельной частицы. В центре показано формирование множества пересекающихся эллиптических орбит, соответствующих различным частицам. Правая диаграмма поясняет процесс эффективного расплывания круговой орбиты в кольцо конечной ширины

двойной черной дыры, можно на основе следующих простых соображений.

Допустим, что все частицы до момента слияния черных дыр находились на круговых орбитах. Рассмотрим некоторую частицу, радиус орбиты которой равен r_0 . Ее полная энергия (сумма кинетической и потенциальной энергий) равна $E_0 = -(1/2) GM_0/r_0$, где M_0 – начальная масса аккретора. После слияния масса центрального объекта стала равной $M_1 = (1 - \xi)M_0$, где ξ – доля массы, унесенная гравитационными волнами. Поскольку после потери массы аккретора скорость частицы не изменилась, то она уже не может далее продолжать двигаться по круговой орбите. Характер ее движения должен измениться, ведь после этого события скорость частицы оказывается больше, чем нужно для сохранения кругового движения. Нетрудно посчитать, что новая полная энергия частицы увеличится и станет равной $E_1 = -(1/2 - \xi)GM_0/r_0$. Отсюда видно, что в случае $\xi < 1/2$ (теряется меньше половины массы) частица будет двигаться по эллипсу, в случае $\xi = 1/2$ (теряется ровно половина массы) новой траекторией будет парабола, а в случае $\xi > 1/2$ (теряется больше половины массы) частица

полетит по гиперболе. В зарегистрированных гравитационно-волновых событиях величина ξ составляла от 0,03 до 0,06. Следовательно, должен реализоваться первый случай.

В начальный момент времени, который соответствует моменту слияния и потери массы, частица окажется в периастре своей новой эллиптической орбиты. Эксцентриситет эллипса $e = \xi/(1 - \xi)$. Например, в случае $\xi = 0,05$ получаем $e = 0,053$. Иначе говоря, орбита лишь слегка отклонится от круговой. Расстояние между апоастром и периастром эллипса составляет величину $\Delta r = \xi/(1/2 - \xi)r_0$, которая для случая $\xi = 0,05$ равна $0,11r_0$.

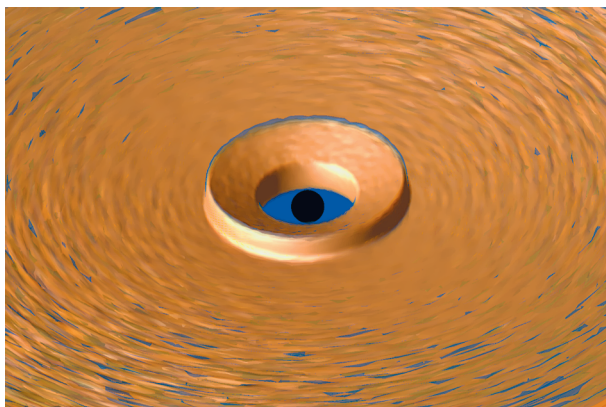
Однако в аккреционном диске на начальной круговой орбите находилась не одна частица, а большое множество частиц. В результате потери массы центрального объекта все эти частицы изменят характер своего движения и перейдут на новые эллиптические орбиты. Первоначальное цельное кольцо из частиц, движущихся по одной и той же круговой орбите, превратится в большое количество пересекающихся друг с другом эллипсов, каждый из которых соответствует новой орбите одной из частиц. Можно сказать, что

первоначальное бесконечно тонкое кольцо расплывется в кольцо конечной ширины Δr . Ширина этого кольца прямо пропорциональна радиусу начальной круговой орбиты r_0 . Поэтому внешние кольца будут расплываться сильнее, по сравнению с внутренними.

Но аккреционный диск состоит не из пыли, а из газа. В нем присутствуют эффекты газового давления. Поэтому расширившиеся внутренние кольца начнут толкать соседние наружные кольца. В результате в аккреционном диске возникнет нелинейное возмущение, которое будет распространяться с некоторой скоростью в радиальном направлении из внутренних его частей к периферии. Отсюда можно сделать вывод о том, что вследствие слияния черных дыр и последующей потери массы центрального объекта в аккреционный диск как бы будет “впрыснута” некоторая дополнительная энергия. Часть этой энергии будет потрачена на разгон вещества, другая часть перейдет в тепло, а какая-то часть уйдет в виде электромагнитного излучения. Для описания этого сложного процесса одной только гравитационной механики уже явно недостаточно. Для этого необходимо использовать более детальную гидродинамическую модель.

ПОТЕРЯ МАССЫ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Более строгий анализ этой задачи, проведенный в рамках гравитационной гидродинамики, показал, что стремительный рост возмущений в аккреционном диске из-за потери массы центрального объекта приводит к формированию ударной волны или даже серии (цугу) распространяющихся друг за другом



Формирование ударной волны в аккреционном диске в результате слияния черных дыр и потери массы

ударных волн. Строго говоря, диск возмущается сразу во всех его точках, поскольку в момент слияния черных дыр и потери массы на любом расстоянии до аккретора в диске моментально нарушается баланс между гравитационной и центробежной силами. Однако наибольшие возмущения возникают в самых центральных его частях. Поскольку скорость распространения возмущений во внутренних частях больше, чем в наружных, внутренние возмущения догоняют наружные и усиливаются. В конце концов, амплитуда этих взаимодействующих между собой отдельных возмущений может возрасти настолько, что они вследствие нелинейных эффектов превратятся в ударную волну.

При определенном характере распределения плотности и температуры в начальном невозмущенном аккреционном диске ударная волна оказывается автомодельной. Это означает, что ее пространственный профиль в определенном смысле воспроизводит самого себя с течением времени. Иначе говоря, два пространственных профиля ударной волны (зависимости плотности, температуры и других величин от расстояния до центрального объекта), соответствующие

двум различным моментам времени, могут быть переведены друг в друга некоторым преобразованием подобия, то есть преобразованиями растяжения и сжатия как координаты, так и самих функций. В частности, расстояние, пройденное фронтом ударной волны за время t , описывается степенным законом $t^{2/3}$, а ее скорость затухает со временем как $t^{-1/3}$.

Автомодельное решение описывает только один специальный случай начального распределения величин в диске, который весьма близок к тому, что дает стандартная модель аккреционного диска, но не совпадает с ней точно. Поэтому для исследования отклика диска на потерю массы центрального объекта нами была разработана соответствующая численная модель. Эта модель с учетом всех необходимых эффектов получилась довольно сложной и громоздкой. Достаточно сказать, что технический отчет с описанием нашей численной модели содержит более 250 формул, многие из которых занимают несколько строк. Схема для вычисления пространственного распределения гидродинамических величин в диске в текущий момент времени построена таким образом, что в ней строго выполняются не только разностные аналоги законов сохранения массы, импульса и энергии, но и дополнительные соотношения, описывающие баланс по определенным видам энергии. Кроме того, в схеме точно выполняется закон сохранения углового момента. Это обстоятельство представляется важным, поскольку потеря массы сопровождается весьма бурными процессами, а плотность, температура и другие величины в диске изменяются с расстоянием до центрального объекта на много порядков.

Наша первая численная модель была относительно простой. В ней, в частности, не учитывалось давление излучения и предполагалось, что диск все время находится в вертикальном равновесии. При достаточно больших температурах,

которые, например, могут возникать за фронтом ударной волны, пренебрегать давлением излучения нельзя. Теплоемкость “смеси” газа и равновесного излучения больше, чем теплоемкость самого газа. Поэтому при учете давления излучения скачок температуры за ударной волной немного снижается.

К почти такому же эффекту приводит и учет вертикального уширения диска. В начальном состоянии аккреционный диск находился в вертикальном гидростатическом равновесии, когда на любой высоте над его плоскостью симметрии вертикальная компонента гравитационной силы уравнивается вертикальной компонентой силы давления. Ударная волна, распространяющаяся по диску, нагревает вещество и, следовательно, разрушает это условие вертикального гидростатического равновесия. В вертикальном направлении возникает движение вещества, приводящее к некоторому “разбуханию” диска. Поскольку масса перераспределяется в большем объеме, то плотность вещества в плоскости симметрии диска немного уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к адиабатическому охлаждению вещества, что вызывает обратный процесс – диск начинает снова поджиматься к плоскости симметрии. Таким образом, прохождение ударной волны по диску сопровождается вертикальными движениями колебательного характера, которые, впрочем, со временем постепенно затухают.

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

Ударная волна, возникающая в аккреционном диске в результате слияния черных дыр и потери массы центрального объекта, приводит к нагреву вещества. Расчеты показали, что за фронтом

ударной волны температура может возрастать в несколько раз в зависимости от параметров модели. Это приводит к резкому увеличению яркости диска, что можно расценивать, как электромагнитный отклик системы на эффект слияния двойной черной дыры.

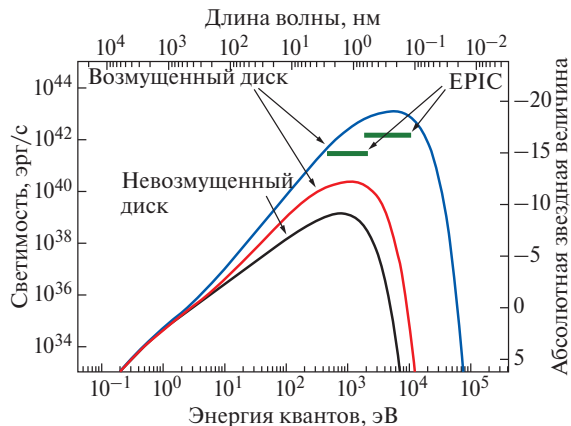
Спектр электромагнитного излучения в области энергий около десятка килоэлектрон-вольт определяется, в основном, тормозным излучением электронов и комптоновским рассеянием. Последний механизм способен существенно исказить планковский спектр, который характеризует равновесное излучение абсолютно черного тела. Комптоновское рассеяние приводит к перераспределению энергии фотонов в сторону больших энергий. Иными словами, этот эффект понижает интенсивность на длинах волн вблизи планковского максимума и вызывает появление “хвоста” в коротковолновой области. Однако, такая комптонизация спектра является эффективной только в оптически прозрачной среде. В случае же наших дисков можно показать, что среда является оптически толстой, как в центральных частях, так и на периферии. Искажение спектра в оптически тонком слое вблизи поверхности диска также оказывается несущественным, поскольку отношение геометрической толщины этого слоя к общей

толщине диска пренебрежимо мало на всех длинах волн. Таким образом, для расчета светимости можно полагать, что излучение с поверхности диска имеет всюду планковский спектр.

Профили температуры, полученные с помощью численного моделирования, позволяют построить теоретические кривые блеска, показывающие зависимость светимости аккреционного диска от времени. Очевидно, что основной вклад в поярчание вносят самые внутренние части диска, где температура и плотность достигают наибольших значений. В среднем рентгеновском диапазоне (энергия квантов до 10 кэВ) светимость невозмущенного диска в случае критического режима аккреции в нашей модели достигает 10^{39} эрг/с. Эта величина сопоставима со светимостью рентгеновских пульсаров и даже так называемых ультра-ярких рентгеновских источников (ЗиВ, 2014, № 5; 2017, № 1). Если же аккреция является докритической, то светимость, конечно, существенно падает с уменьшением темпа аккреции.

Наши расчеты основывались на гидродинамической модели без учета процесса переноса излучения. Это приближение заведомо несправедливо на больших временах, поскольку радиативное (за счет излучения) охлаждение должно приводить к остыванию

Спектры электромагнитного излучения для двух моделей аккреционного диска с субкритическим режимом аккреции. На вертикальных шкалах указаны светимость (слева) и абсолютная болометрическая звездная величина (справа). Серым цветом показан спектр невозмущенного диска. Горизонтальными отрезками отмечены нижние пределы чувствительности детекторов EPIC космической обсерватории “XMM-Newton” (NASA-ESA)



диска после прохождения ударной волны и постепенному установлению нового равновесного состояния, при котором темп высвечивания энергии равен скорости вязкого нагрева. Оценки показывают, что с учетом реалистичных параметров аккреционного диска кривая блеска должна спадать за время порядка нескольких минут. Этот интервал времени соответствует продолжительности вспышки, которая сопровождает процесс слияния двойной черной дыры.

Примерно через полсекунды после момента слияния черных дыр нагрев вещества ударной волной приводит к резкому возрастанию светимости. В различных моделях, соответствующим различным вариантам диска, светимость возрастает на 1–4 порядка. Максимум потока излучения лежит в рентгеновском диапазоне. Если поток скорректировать на расстояние до источника гравитационных волн GW170814 в 540 Мпк, то интенсивность излучения от диска оказывается на пределе чувствительности инструмента EPIC космической обсерватории “ХММ-Newton” (ЗиВ, 2011, № 2).

В гамма-диапазоне поток электромагнитного излучения на много порядков превышает поток от невозмущенного аккреционного диска и сравним с потоком от мягких гамма-источников. В экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (10–100 эВ) поярчение диска может превышать порядок величины. В дальнем ультрафиолете светимость возрастает не более, чем в два раза. На больших длинах волн светимость диска практически не изменяется.

Нужно понимать, что, если бы данный объект оказался ближе к нам, то интенсивность соответствующих наблюдаемых электромагнитных проявлений увеличилась бы во много раз. Кроме того, приведенные выше оценки светимости являются весьма приближенными, поскольку расстояние до объ-

екта определено неточно. Минимальная и максимальная оценки расстояния до источника GW170814 различаются в два раза (ЗиВ, 2018, № 3). При этом изменению расстояния в два раза соответствует изменение видимой яркости в четыре раза или изменение блеска на полторы видимой звездной величины.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Мы рассмотрели определенный сценарий слияния двух черных дыр, когда они окружены общим аккреционным диском. В результате излучения гравитационных волн масса центрального объекта уменьшается и аккреционный диск испытывает возмущение. Основным следствием этого возмущения является формирование ударной волны, распространяющейся от центра к периферии диска. Ударная волна нагревает вещество, что приводит к резкому росту потока электромагнитного излучения от диска. В рамках численной модели оказывается возможным рассчитать кривую блеска, спектр излучения, а также оценить продолжительность вспышки в предположении, что при снижении светимости до исходного значения вспышка заканчивается. Все эти электромагнитные проявления определяются характером источника гравитационного излучения.

Совместное детектирование гравитационного сигнала и сопутствующего ему электромагнитного излучения позволяет получить гораздо большее количество полезной информации об источнике. Ведь в этом случае мы исследуем астрофизический объект одновременно с помощью двух принципиально различных физических каналов – гравитационного и электромагнитного! Это не просто мультиспектральный метод исследования,

Таблица 1

Параметры сливающихся двойных черных дыр, по данным гравитационно-волновых наблюдений. Указаны: название объекта, массы компонент, относительное изменение массы, расстояние до объекта.

Объект	M_1, M_{\odot}	M_2, M_{\odot}	$DM / (M_1 + M_2), \%$	$D, \text{Мпк}$
GW150914	36	29	3,3–5,2	410
GW151226	14,2	7,5	2,9–5,5	440
GW170104	31,2	19,4	2,3–5,7	880
GW170608	12	7	2,8–5,1	340
GW170814	30,5	25,3	4,0–5,8	540

когда объект одновременно наблюдается в различных диапазонах спектра. Это уже, можно сказать, “мультиканальный” или “мультиоконный” подход. Используя подобные комплексные методы исследования, мы можем достичь гораздо более глубокого понимания природы таких астрофизических объектов. Очевидно, что исследования такого типа имеют большие и далеко идущие перспективы.

Гравитационно-волновое излучение может быть связано не только со слиянием черных дыр, но и со слиянием нейтронных звезд, а также пар “черная дыра–нейтронная звезда”. Если компонентом двойной системы является нейтронная звезда, то можно ожидать, что слиянию будет сопутствовать всплеск электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, начиная от радио- и вплоть до гамма-диапазона. Такие вспышки могут продолжаться от секунды и менее (вспышки гамма-излучения), до дней, месяцев и даже лет (радиоизлучение от субрелятивистских истечений).

С учетом этих обстоятельств гравитационно-волновые наблюдения обсерваторий LIGO и *Virgo* сопровождаются электромагнитными наблюдениями многих других обсерваторий. Это делается как в режиме непрерывного обзора неба, так и по так называемым “алертам” – сигналам, которые рассылаются между обсерваториями автоматически и обрабатываются ими в режиме реального времени.

В сентябре 2015 г. обсерваторией LIGO был обнаружен гравитационно-волновой сигнал, которому было присвоено обозначение GW150914 (ЗиВ, 2016, № 4; 2018, № 4). Этот сигнал интерпретировали как событие слияния двойной черной дыры. Вместе с тем прибором GBM (Gamma-ray Burst Monitor), установленным на космической гамма-обсерватории “Ферми” (Fermi; ЗиВ, 2015, № 3), была детектирована короткая гамма-вспышка. При этом расположение источника гамма-излучения примерно соответствовало направлению на источник гравитационных волн. Следует заметить, однако, что амплитуда вспышки была довольно мала, а сам электромагнитный сигнал в существенной степени был зашумлен. При этом различные методы обработки такого слабого сигнала приводили к противоречивым выводам о том, имеется ли физическая связь между источником гравитационных волн и источником гамма-излучения. В результате дискуссии, развернувшейся в научной литературе, ученые пришли к компромиссному мнению, что в данном случае совпадение сигналов было случайным. Следующая серия наблюдений, планируемая на инструментах LIGO и *Virgo*, а также на космической гамма-обсерватории “Ферми”, возможно, позволит достичь большего уровня чувствительности при совместном детектировании гравитационно-волновых событий.