

Первичные черные дыры



Александр Долгов,
профессор Новосибирского
университета и заведующий
лабораторией космологии и
физики частиц;
главный научный сотрудник
лаборатории теоретической
физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института
ядерных исследований

Кто вы, черные дыры?

Первое предсказание о возможном существовании черных дыр (ЧД) было сделано еще в 1784 г. английским сельским священником Джоном Митчелом (кстати, это не единственное его достижение в физике). Он заметил, что могут быть небесные тела столь массивные, что вторая космическая скорость для них будет выше скорости света. Митчел назвал их темными звездами (dark stars). По его мнению, такие объекты не излучают и не отражают свет, и потому такое единичное небесное тело будет не наблюдаемо. Однако двойная система, состоящая из темной и обычной звезд, позволит зарегистрировать темную звезду по наблюдению обычной звезды, вращающейся вокруг «пустого» места. Сегодня это один из многих известных способов обнаружения черных дыр.

К аналогичному выводу спустя 13 лет пришел французский астроном и математик Пьер Симон Лаплас, и скорее всего независимо от Дж. Митчела.

Пессимистическое утверждение о невозможности наблюдения одиноких черных дыр, к счастью, оказалось неверным. По известному механизму британского физика-теоретика Стивена Хокинга очень легкие черные дыры светятся за счет испарения, хотя этого никто пока не видел. Нормальные ЧД околосолнечной массы наблюдают по рентгеновскому излучению окружающего газа. Излучение самых мощных источников электромагнитного излучения во Вселенной (квазаров) создает сверхмассивные ЧД.

Общая теория относительности и ЧД

После создания общей теории относительности (ОТО) (Эйнштейн, 1915 г.) были найдены точные решения уравнений гравитации, описывающие все возможные типы черных дыр. Для внешнего наблюдателя их можно охарактеризовать так называемыми волосами, то есть полями, которые могут быть измерены вне черной дыры. Имеются всего лишь 3 типа волос:

- **гравитационные** – создаваемые массой черной дыры, M . На асимптотически больших расстояниях гравитационное поле стремится к Ньютонскому пределу;
- **вращательные**, образуемые вращением ЧД, то есть ее угловым моментом или спином, J . В ОТО гравитационное поле, создаваемое вращающимся телом, отличается от поля не вращающегося;
- **электрические**, создаваемые электрическим зарядом черной дыры, Q . На больших расстояниях оно стремится к кулоновскому. Заметим, что при сколь угодно малой, но отличной от нуля массе фотона, $m_\gamma \neq 0$, электрическое поле отсутствует, даже если $Q \neq 0$. Нет непрерывного перехода к нулевой массе фотона. Обнаружение электрически заряженной ЧД приведет к утверждению, что масса фотона точно равна нулю.

Известно 4 точных решения уравнений ОТО, описывающих все возможные типы черных дыр:

- Шварцшильд (1916), черная дыра с $Q=J=0$;
- Райснер, Нордстром (1916, 1918), $Q \neq 0$;
- Керр (1963), $J \neq 0$;
- Керр – Ньюман (1965), $J \neq 0$, $Q \neq 0$.

Для тех, кто знаком с понятием метрики пространства-времени, приведем вид метрики Шварцшильда для незаряженной, не вращающейся черной дыры в вакууме:

$$ds^2 = (1 - r_g/r) dt^2 - (1 - r_g/r)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (1)$$

где $r_g = 2M/m_{Pl}^2$ называется гравитационным радиусом, или радиусом Шварцшильда,

m_{Pl} – масса Планка, $m_{Pl} = 2,176 \times 10^{-5} \text{ г} = 1,22 \times 10^{19} \text{ GeV}$. Для Солнца: $r_g^\odot \approx 3 \text{ км}$, а для Земли $r_g^\oplus \approx 1 \text{ см}$. Чтобы сделать из Земли черную дыру, ее надо сжать до сантиметра, а Солнце – до 3 км.

Здесь и в дальнейшем мы используем так называемую естественную систему единиц $c = \hbar = k = 1$, где

c – скорость света, k – постоянная Больцмана и $\hbar$ – приведенная постоянная Планка.

В этих единицах гравитационная постоянная равна:

$$G_N = 1/m_{Pl}^2.$$

Соответственно, ньютоновская гравитационная сила между двумя телами с массами m_1 и m_2 равна: $F_N = G_N m_1 m_2 / r^2$ в нерелятивистском пределе. На этом выражении основан ряд безграмотных теоретических работ об антигравитации античастиц. Надо помнить, что гравитирует не масса, а так называемый сохраняющийся тензор энергии-импульса. Эта величина включает некоторую комбинацию энергии и импульса частицы. Например, фотон, частица с нулевой массой, отклоняется в гравитационном поле. Можно, правда, несколько упрощенно, naивно считать, что для фотона гравитационными зарядами являются и энергия, и импульс. Похожая ситуация имеет место для релятивистских частиц, то есть для частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света.

Отметим необычное свойство Шварцшильдовского пространства-времени. С точки зрения удаленного наблюдателя, космический корабль никогда не пересечет гравитационный радиус даже за бесконечное время. А с позиции его пассажиров они упадут внутрь черной дыры за конечное время. В нашей Вселенной погаснут звезды, а пассажиры этого корабля благополучно пересекнут границу черной дыры, если она достаточно большая и их не разорвут приливные силы.

Типы черных дыр по механизму образования

Астрофизические черные дыры возникают в результате схлопывания (коллапса) звезды, израсходовавшей свое ядерное топливо. Пока звезда активно горит, давление горячего газа не дает ей сделать это, а когда горючее исчезнет, она остынет, и гравитационное притяжение между частицами вещества в звезде будет уменьшать ее радиус. Если масса звезды достаточно велика, то гравитация «победит» давление внутри охладевшего светила, и возникнет компактная нейтронная звезда, удерживаемая от дальнейшего коллапса взаимным отталкиванием нейтронной жидкости вырожденных фермионов. Фермионы, как известно, терпеть не могут друг друга, то есть обязательно должны быть в разных квантовых состояниях. Это напоминает громадное атомное ядро с массой примерно несколько менее 3 масс Солнца; последняя равна $M_\odot \approx 2 \times 10^{33} \text{ г}$.

Либо, если масса звезды выше 3 масс Солнца, гравитация побеждает все и всех, и первоначальная звезда превращается в черную дыру. Поэтому ожидаемые массы возникающих при этом процессе черных дыр должны начинаться с 3 масс Солнца и выше. Наблюдаемые же в нашей Галактике до настоящего времени ЧД имеют массы в районе 10 масс Солнца. Этот результат несколько неожиданный, но у него есть астрофизическое объяснение.

Что совершенно исключено, так это существование астрофизических черных дыр с массами порядка 100 масс Солнца. Тем не менее, к удивлению астрофизиков, на интерферометрах LIGO/Virgo/Kagra были зарегистрированы гравитационные волны от слияния ЧД с массами около $100M_{\odot}$. Чтобы создать столь массивную черную дыру, масса звезды-прародителя должна быть тоже порядка 100 масс Солнца и иметь очень низкое содержание металлов, те есть любых элементов тяжелее гелия. Звезды такого типа могли бы быть в молодых галактиках, находящихся в процессе активного звездообразования, однако наблюдаемое их количество слишком мало. Более того, большая потеря вещества в процессе коллапса значительно уменьшает массу черной дыры, порожденной в таком процессе. С другой стороны, первичные ЧД, о которых мы скажем ниже, со столь высокими массами, в отличие от астрофизических, вполне могут существовать в необходимом количестве.

Аккреционные черные дыры возникают в результате падения (аккреции) вещества под воздействием гравитационного притяжения от повышенной плотности вещества в центрах галактик. Астрономические наблюдения показывают, что там повсеместно имеются сверхмассивные черные дыры (SMBH) с массой от нескольких миллионов, как в нашем Млечном Пути, до почти сотни миллиардов масс Солнца в других галактиках.

Однако, как показывают расчеты, общепринятый механизм аккреции, так называемой Эддингтоновской аккреции, недостаточно быстрый, чтобы успеть собрать столь большое количество массы за время жизни Вселенной, 14 млрд лет. Требуемый для этого период примерно в 10 раз дольше. Кроме того, обнаружены черные дыры без или с очень маленькими галактиками, где аккреционный механизм явно не может обеспечить рост массы ЧД до наблюдаемой величины в силу недостаточного количества окружающего вещества.

Положение с объяснением механизма возникновения сверхмассивных черных дыр существенно усложнилось после открытий, сделанных на орби-

тальных телескопах «Хаббл» и «Джеймс Вебб», которые обнаружили такие тяжеленные черные дыры во Вселенной с возрастом лишь в миллиард или даже полмиллиарда лет.

Первичные ЧД появились в очень ранней Вселенной еще в дозвездную эпоху. Идея их возникновения была впервые выдвинута белорусским физиком Я.Б. Зельдовичем и российским астрофизиком И.Д. Новиковым [1].

Согласно предположению авторов, плотность материи в ранней Вселенной ρ не является строго постоянной, но может меняться от точки к точке. Изменение плотности $\delta\rho$, как правило, очень маленькое, $\delta\rho/\rho < 1$. Однако с какой-то, пусть и крохотной, вероятностью относительный контраст плотности вещества в ранней Вселенной в масштабе, равном космологическому горизонту, то есть возрасту Вселенной в этот момент, мог бы стать порядка $\delta\rho/\rho \approx 1$, и тогда, как легко проверить, эта часть Вселенной оказалась бы внутри своего гравитационного радиуса. Этот маленький объем прекратил бы расширяться вместе с остальной Вселенной и стал бы первичной черной дырой.

Механизм Зельдовича и Новикова, описывающий рождение первичных черных дыр, получил дальнейшее развитие в работах Хокинга, Хокинга и Карра [2, 3]. По непонятной причине многие классические астрофизики, особенно астрономы-наблюдатели, с подозрением относятся к существованию первичных ЧД, считая их недоказанной экзотикой, хотя большое количество наблюдений указывает, что они все-таки есть в природе, и в заметном количестве.

Как наблюдают черные дыры

Есть несколько способов обнаружения таких объектов: оценка массы в центре галактики по движению объектов вокруг предполагаемой ЧД (например, в центре нашей галактики):

- *гравитационное линзирование отдаленных звезд. В частности, были проведены длительные наблюдения в небольшой галактике-спутнике нашей галактики – Магеллановом Облаке. Обнаружено, что яркость некоторых звезд на короткое время возрастает в несколько раз. По ряду признаков удастся исключить собственное изменение их светимости. Единственным непротиворечивым объяснением является то, что на пути света от этой звезды к нам находится тяжелый невидимый объект, который фокусирует свет своим гравитационным полем, как, например, стеклян-*

ная линза фокусирует солнечный свет, так что в точке фокуса может загореться бумага;

- электромагнитное излучение (рентгеновские лучи) от притягиваемого вещества, которое разогревается до миллионов градусов. Именно таким образом объясняется излучение квазаров (QSO) – объектов небольшого размера, излучающих в 1 тыс. раз больше, чем Галактика. Единственный известный механизм для этого – аккреция на SMBH в центре QSO. Все эти методы позволяют определить лишь массу внутри небольшого объема. Согласно теории, там должна быть ЧД. Но есть еще скептики, точнее были, которые в это не верили;
- регистрация гравитационных волн от сливающейся пары черных дыр прямо говорит, что сливаются именно они. Измерения позволяют определить массы обеих начальных, а также конечной ЧД и их спины. Эти измерения являются первой проверкой ОТО для сильных полей и наблюдаемым доказательством существования метрики Шварцшильда.

Еще несколько слов об излучении квазаров. Самые мощные точечные источники излучения во Вселенной, квазары, каждый из которых светит, как тысячи галактик, генерируются сверхмассивными черными дырами. Светимость квазара 10^{46} – 10^{47} эрг/с, то есть 10^{13} (10 трлн) Солнц, или как 100 или даже 1 тыс. галактик, а размер квазаров меньше Солнечной системы, только 10^9 – 10^{10} км, то есть лишь в 100 раз больше орбиты Земли. Аккреция на черную дыру – единственный известный способ объяснить излучение квазаров. Скорости частиц вещества вокруг них близки к скорости света. При их взаимных столкновениях летят «искры из глаз». Квазары сияют, пока не съедят все вокруг, и остаются сверхмассивной, но уже не столь сияющей ЧД, почти в пустыне, как, например, черная дыра в центре нашей Галактики.

Классификация черных дыр по массе

В зависимости от величины массы наблюдаемые черные дыры условно делятся на 3 широких класса:

- сверхмассивные ЧД $M=(10^6-10^{10})M_{\odot}$;
- ЧД промежуточной массы (IMBH): $M=(10^2-10^5)M_{\odot}$;
- ЧД солнечной массы с массами от доли массы Солнца до $M\sim 100M_{\odot}$.

Как уже отмечалось, происхождение большинства этих черных дыр сталкивается с серьезными проблемами в каноническом подходе, за исключением, возможно, ЧД солнечной массы, которые могли бы быть астрофизическими. Впрочем, черные дыры, зарегистрированные на интерферометрах LIGO/Virgo/Kagra по наблюдениям гравитационных волн, генерируемых при слиянии двойных систем ЧД, скорее всего, являются именно первичными.

Весьма неожиданно наблюдение за последнее время значительного количества ЧД промежуточной массы, происхождение которых было бы загадочным, не будь они первичными.

Первичные черные дыры и инфляция

Гипотеза о космологической инфляции – важнейшая составляющая канонической космологии. В соответствии с ней на самой ранней стадии расширение Вселенной было экспоненциально быстрым, что, грубо говоря, позволило создать нашу громадную, пригодную для жизни Вселенную из микроскопически малой области хаотического пространства-времени. Отметим пионерные работы по инфляции [4, 5]. Очень важную роль в развитии инфляционных моделей сыграли несколько более поздние работы [6, 7]. Можно определенно сказать, что инфляция – экспериментальный факт, так как предсказываемый ею спектр возмущений плотности вещества, то есть величины флуктуаций плотности в зависимости от длины волны, замечательно согласуется с наблюдениями.

Впервые инфляционный механизм для рождения первичных ЧД был использован в [8] и далее [9, 10].

В настоящее время практически все механизмы рождения тяжелых первичных черных дыр в той или иной степени опираются на предположение об инфляционном расширении очень ранней Вселенной.

В рамках предлагаемого нами механизма [11] предсказывается очень простой спектр масс первичных ЧД, то есть их количество с определенным значением массы. Приведем эту формулу для более продвинутых в математике читателей, это так называемый лог-нормальный спектр:

$$\mu^2 \exp[-\gamma \ln^2(M/M_0)]. \quad (2)$$

Величина M_0 предсказывается теоретически. Она равна массе вещества внутри космологического горизонта во время фазового перехода от свободных кварков к протонам и нейтронам в соответствии с квантовой хромодинамикой. Согласно теоретическим оценкам, она составляет около 10 масс Солнца или несколько выше, если фазовый переход происходит при значительном химическом потенциале барионов, как в нашей модели.

Результат о лог-нормальной форме спектра и величине M_0 прекрасно подтверждается наблюдениями.

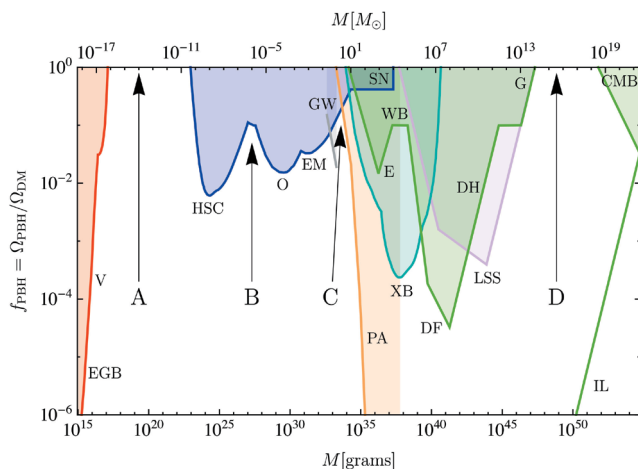


Рис. 1. Ограничения на космологическую плотность черных дыр по отношению к наблюдаемой плотности темной материи

Ограничения на $f(M)$ для монохроматической массовой функции: от испарений (красный), линзирования (синий), гравитационных волн (ГВ) (серый), динамических эффектов (зеленый), аккреции (светло-голубой), искажения МДБ (оранжевый) и крупномасштабная структура (фиолетовый). Пределы испарения из внегалактического гамма-фона (EGB), поток позитронов Вояджера (V) и аннигиляционного излучения из галактического центра (ГЦ). Пределы линзирования от микролинзирования сверхновых (SN) и звезд в M31 с помощью Субару (HSC), Магеллановых Облаков с помощью EROS и MACHO (EM) и галактической выпуклости с помощью OGLE (O). Динамические ограничения от широких двойных звезд (ШБ), звездных скоплений в Эридане II (E), динамическое трение гало (DF), приливные искажения галактик (G), нагрев звезд в галактическом диске (DH) и диполь CMB (CMB). Ограничения крупномасштабной структуры (LSS). Пределы аккреции от рентгеновских бианов (XB) и планковские измерения искажений CMB (PA). Пределы невероятности (IL) соответствуют одному РВН на определенную среду (галактика, скопление, Вселенная). Есть четыре массовых окна (A, B, C, D), в которых РВН могут иметь заметную плотность

Первичные черные дыры и темная материя

Большая совокупность астрономических данных говорит о том, что значительную часть вещества во Вселенной составляет темная материя. Если наше обычное протон-нейтронное вещество дает примерно 5% в полную плотность космологической материи, то темная составляет ~25%. Остальные 75% вносит так называемая темная энергия, таинственная субстанция, которая создает ускоренное космологическое расширение.

Конкретный тип темной материи в настоящее время неизвестен.

Возможные варианты делятся на 2 больших класса.

А) Слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPS). Ими могут быть различные типы элементарных частиц различных масс: от 10^{-22} эВ (аксионо-подобные частицы) вплоть до 10^{13} ГэВ, возникающие при модификации классической ОТО.

Б) Массивные компактные астрофизические объекты (MACHOs), включающие, в частности, первичные черные дыры (ПЧД), которым и посвящен настоящий обзор.

В большинстве своем физики, занимающиеся темной материей, склоняются к WIMPS, а ПЧД воспринимаются как умеренная ересь. Существует и эклектическая возможность, что обе формы темной материи – WIMPS и MACHO – существуют в природе и вносят сравнимый вклад в космологическую плотность. Но не будем в соответствии с бритвой Оккама «умножать сущности» и примем, что единственной формой темной материи являются первичные черные дыры. Будем называть ее «черная темная материя».

Впервые предположение о ней было сделано Стивеном Хокингом в 1971 г. [2, 12], который также заметил, что космологическая плотность первичных черных дыр могла быть сравнима с плотностью темной материи, и предположил, что спектр масс ПЧД является плоским в логарифмическом интервале

$$dN = N_0 (dM/M)$$

с максимальной массой $M_{max} \leq 10^{22} \text{ г}$.

В более поздних работах нашей группы [8, 11] была предложена конкретная модель рождения первичных черных дыр, предсказывающая, как отмечалось выше, лог-нормальный спектр масс ПЧД, пре-

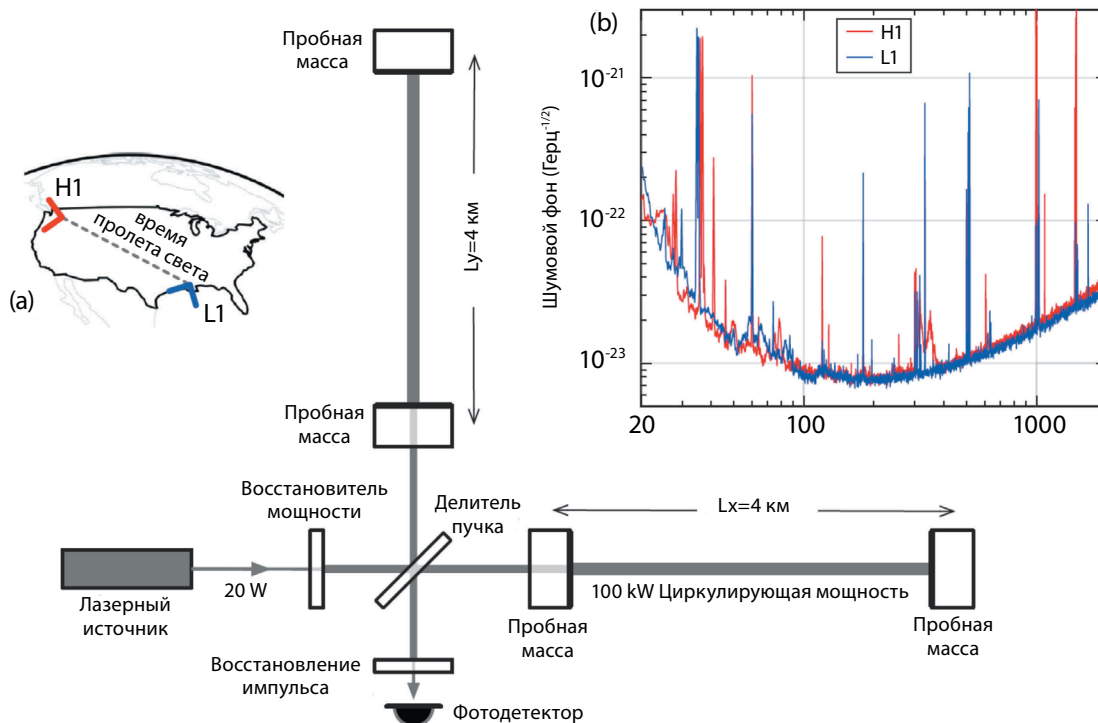


Рис. 2. Парный интерферометр LIGO

красно согласующийся с наблюдениями без подгонки численных значений существенных параметров. Заметим, что в модели DS и DKK может рождаться заметное количество ПЧД с массами порядка $10^6 M_{\odot}$ и даже выше, что позволяет решить проблему высокой плотности черных дыр, квазаров, галактик в молодой Вселенной, обнаруженной телескопами «Хаббл» и «Джеймс Вебб».

Наблюдательные ограничения на космологическую плотность ПЧД и на их возможный вклад в долю темной материи суммированы в [13, 14] (рис. 1).

Согласно замечанию авторов, результаты получены для монохроматического спектра масс ПЧД и являются модельно зависимыми. Посему к ним надо относиться с осторожностью.

Гравитационные волны от слияния пары ПЧД

Гравитационная волна (ГВ) – бегущее со скоростью света изменение геометрии пространства, ведущее, в частности, к изменению расстояний между любыми объектами. Как отмечено в работе [15], это свойство позволяет детектировать ГВ на лазерных интерферометрах. В отсутствие гравитационной волны два плеча интерферометра настроены так, что лазерные волны, бегущие по разным

плечам, точно сокращаются в точке встречи. Однако приходящая ГВ по-разному меняет длину плеч, и суммарный сигнал лазера в точке интерференции становится отличным от нуля. Детальный анализ этого процесса с учетом возможных шумов был проведен [16]. Их работы легли в основу создания интерферометра LIGO, где впервые были зарегистрированы гравитационные волны, возникающие при слиянии черных дыр в двойных системах.

Как видно из рис. 2, LIGO состоит из 2 приборов, разнесенных на расстояние примерно в 3 тыс. км в США, в штатах Вашингтон и Луизиана. Кроме того, измерения одновременно проводились на интерферометре Virgo, находящемся в Италии вблизи Пизы. Впоследствии к ним присоединился японский прибор Kagra.

Первое зарегистрированное LIGO событие имеет следующие характеристики, согласно публикации [17]: массы сливающихся черных дыр – $M_1=36^{+5}_{-4} M_{\odot}$, $M_2=29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, масса черной дыры, возникшей в результате слияния, – $M_{fin}=62^{+4}_{-4} M_{\odot}$. Полная энергия испущенной гравитационной волны $(3,0 \pm 0,5) M_{\odot}$ и пиковая светимость гравитационной волны $3,0^{+0,5}_{-0,4} \times 10^{56}$ ерг/сек, что эквивалентно $200 M_{\odot}/\text{сек}$. Эта величина превышает светимость всей наблюдаемой Вселенной.

К настоящему времени зарегистрировано около 100 событий ГВ.

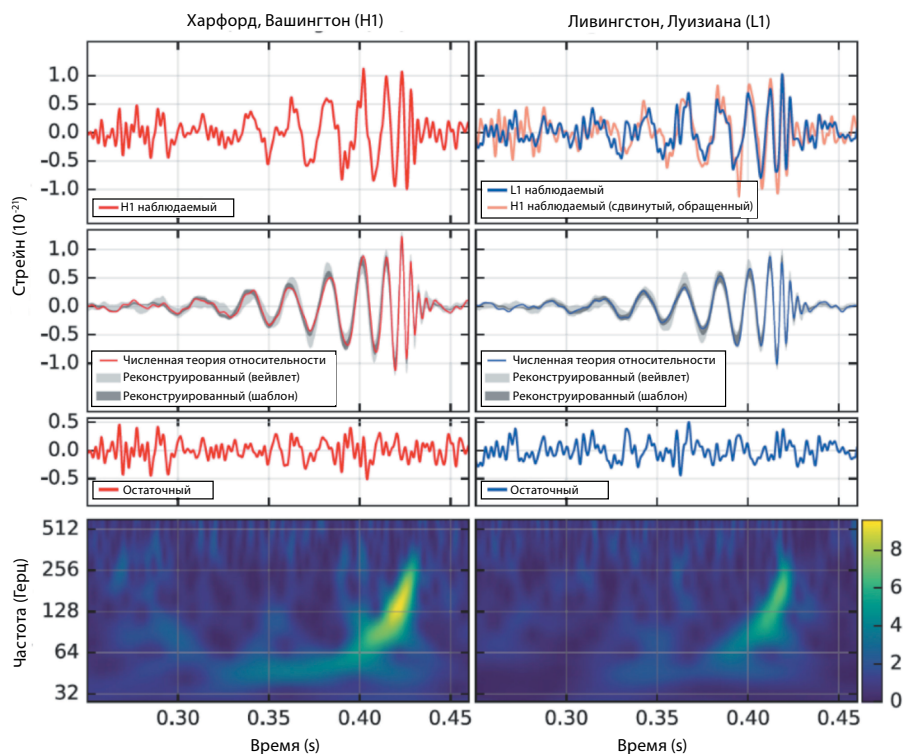


Рис. 3. Форма наблюдаемого сигнала и теоретическая подгонка

ГВ от двойных систем ПЧД, теоретический анализ

Свойства зарегистрированных гравитационных волн убедительно свидетельствуют в пользу того, что их источниками являются именно первичные черные дыры, как проанализировано, в частности, в работе [18] и в ряде других публикаций.

Астрофизическое происхождение значительного количества ЧД с массами в десятки масс Солнца вызывает обоснованные сомнения, тогда как первичные черные дыры с такими массами можно легко создать с нужной плотностью, согласно ДС модели.

Образование двойных систем астрофизических ЧД весьма маловероятно. Их плотность в галактике недостаточно велика для захвата их друг другом и создания связанных двойных систем в нужном количестве.

В галактике имеется большое число двойных звезд, но при коллапсе звезды в черную дыру последняя получает большой импульс отдачи, который разорвет двойную систему. Для ПЧД такого препятствия нет, так как они преимущественно рождаются с нулевой скоростью по отношению к общему расширению Вселенной, и их скорость разлета по отношению друг к другу убывает со временем.

Почти все черные дыры, составляющие двойные системы, зарегистрированные LIGO/Virgo/Kagra, имеют очень малый угловой момент, тогда как ЧД, возникшая при коллапсе звезды, должна быстро крутиться просто в силу сохранения углового момента. С другой же стороны, ПЧД имеют низкие угловые моменты, так как вращательные возмущения в ранней Вселенной пренебрежимо малы (рис. 3).

Распределение по чирп-массам сливающихся черных дыр

В работе [19] было проанализировано распределение по так называемым чирп-массам двойных систем черных дыр (от английского *chirp* – чирикание, визг). Как известно, связанная система из двух вращающихся массивных тел испускает гравитационное излучение. В начальном квазистационарном режиме, когда тела движутся по медленно сжимающейся спирали, радиус орбиты примерно постоянен, и частота испускаемых гравитационных волн вдвое больше частоты вращения. Светимость гравитационного излучения в этот период равна:

$$L = \frac{32}{5} m_{Pl}^2 \left(\frac{M_c \omega_{orb}}{m_{Pl}^2} \right)^{10/3}, \quad (3)$$

где M_1 и M_2 – массы двух вращающихся тел, а M_c – это чирп-масса, которая связана с M_1 и M_2 соотношением:

$$M_c = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}},$$

а частота вращения в спиральном режиме равна

$$\omega_{orb}^2 = \frac{M_1 + M_2}{m_{Pl}^2 R^3}. \quad (4)$$

В цитируемой выше работе на основе имеющихся результатов, приведенных в O1-O3 LIGO/Virgo, проанализированы распределения опубликованных данных по чирп-массам, для которых было проведено сравнение с теоретическими расчетами, основанными на предположении, что черные дыры являются первичными с лог-нормальным спектром масс. Наилучшие значения параметров на основе сравнения теоретической модели с наблюдениями составляют $M_0=17M_\odot$ и $\gamma=0,9$. Эти значения хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями (2), как показано на *рис. 3*, где приведено интегральное распределение $F_{PBH}(<M)$ с параметрами $M_0 \approx 17M_\odot$ и $\gamma \sim 1$ для двух лучших тестов Колмогорова – Смирнова. На *рис. 4* EDF означает «эмпирическая функция распределения».

С другой стороны, астрофизическая модель плохо описывает имеющиеся данные (*рис. 5*).

Таким образом, первичные черные дыры с лог-нормальным спектром масс хорошо согласуются с имеющимися наблюдениями, тогда как астрофизические модели выглядят неудовлетворительно.

Наблюдения телескопов «Хаббл» и «Джеймс Вебб» и кризис в космологии

В течение последних нескольких лет в результате наблюдений ранней Вселенной орбитальными телескопами «Хаббл», и несколько позже «Джеймс Вебб» появились серьезные указания на кризис в канонической космологической модели, а именно в Λ CDM-космологии, в соответствии с которой космологическая эволюция определяется холодной тем-

ной материей (CDM) и вакуумо-подобной темной энергией (Λ – член).

Обычно ранние эпохи в космологической эволюции характеризуются так называемым красным смещением z . Величина $(z+1)$ показывает, насколько краснеет за счет космологического расширения частота светового импульса, испущенного в более раннюю эпоху жизни Вселенной. Это практически эффект Доплера, когда частота света или звука от удаляющегося источника становится ниже. Зная z , можно пересчитать возраст Вселенной в момент испускания сигнала. Нам известны частоты стандартных источников, например атомные спектры, которые позволяют узнать, с какого красного смещения к нам пришел электромагнитный импульс.

Было обнаружено, что очень молодая Вселенная при красных смещениях $z \sim 10$, то есть в возрасте порядка 500 млн лет, весьма плотно заселена развитыми галактиками, квазарами, сверхмассивными черными дырами, которые не всегда оказываются квазарами. Такие космические объекты просто не могли бы возникнуть за столь короткое время, согласно теоретическим расчетам, основанным на общепринятой теории.

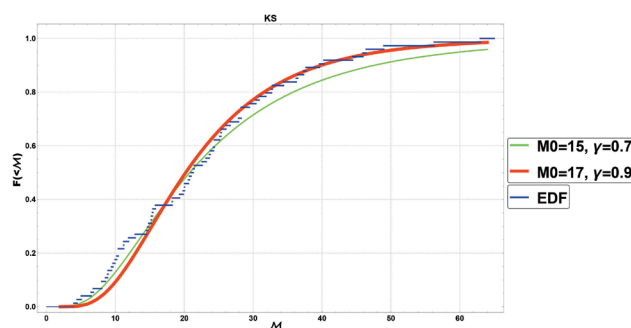


Рис. 4. Интегральное распределение по чирп-массам данных LIGO/Virgo/Kagra

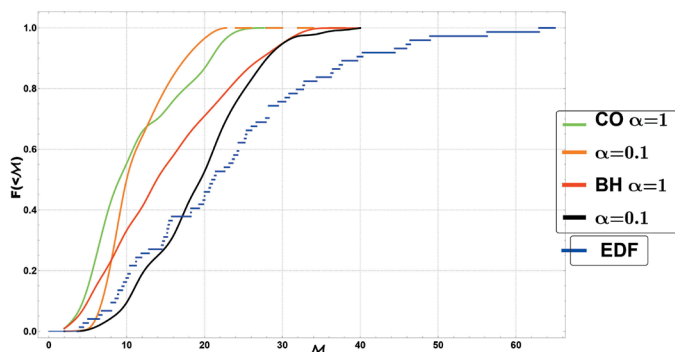


Рис. 5. Кумулятивное распределение $F(<M)$ для нескольких астрофизических моделей слияния двойных систем черных дыр

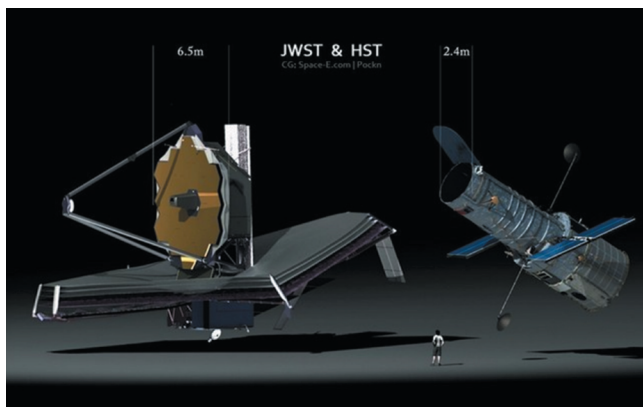


Рис. 6. Космические телескопы «Хаббл» и «Джеймс Вебб»

Однако задолго до возникновения этих проблем их решение было предложено [8, 11] на основании гипотезы об инвертированной модели образования галактик: вначале образуется массивная первичная черная дыра, которая служит зародышем образования галактик, а не наоборот. Проникновение столь далеко в глубины Вселенной оказалось возможным благодаря замечательным, запущенным за пределы земной атмосферы орбитальным телескопам «Хаббл» (HST) и «Джеймс Вебб» (JWST). Их основные характеристики:

«Хаббл»: расстояние от Земли 570 км, диаметр зеркала 2,4 м; рабочие частоты оптические, например, голубой свет с длиной волны 450 нм, ультрафиолет, а также инфракрасное излучение с длинами волн 0,8–2,5 мкм;

«Джеймс Вебб»: расстояние от Земли $1,5 \times 10^6$ км; диаметр зеркала 6,5 м; работает на инфракрасном излучении с длинами волн 0,6–28,5 мкм.

Надо упомянуть еще наземную систему из 66 телескопов ALMA, расположенных в пустыне Атакама в Чили, которая также позволяет заглянуть в глубины Вселенной.

На рис. 6 приведены изображения обоих орбитальных телескопов. На рис. 7 показаны данные о наблюдении одной и той же галактики, обнаруженной этими телескопами. Согласие между двумя различными инструментами подтверждает надежность подходов. При наблюдениях на JWST в работе [21] обнаружена группа из 6 объектов, которые, возможно, являются хорошо развитыми галактиками уже при $7,4 \leq z \leq 9,1$, то есть при возрасте Вселенной 500–700 млн лет. Согласно результатам, массы галактик, по-видимому, достигают $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (рис. 8.) Авторы заключают, что «наука не позволяет создать такие «взрослые» галактики за столь короткое время» и делают вывод, что эти объекты, возможно,

являются черными дырами никогда ранее не виданных типов, что может потребовать пересмотра нашего обычного понимания черных дыр. Здесь трудно удержаться от вывода, что эти ЧД являются первичными, почему-то находящимися под запретом в астрофизическом сообществе.

Черные дыры как зародыши образования структуры

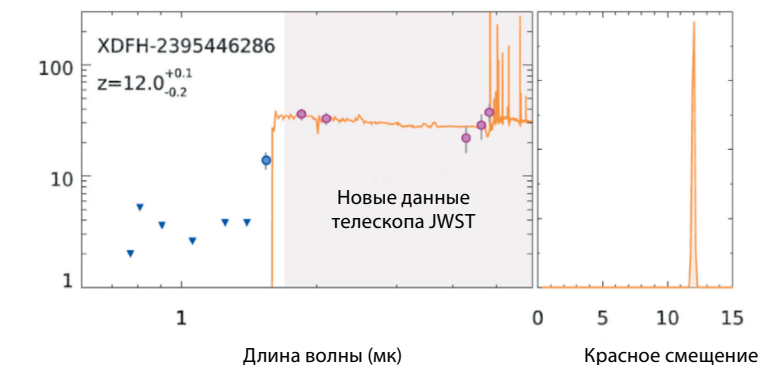
Все трудности в космологии, однако, исчезнут, если принять точку зрения, выраженную в работах [22, 23].

Обычно предполагается, что сверхмассивные черные дыры, наблюдаемые в центре всех больших галактик, образуются за счет аккреции вещества на избыток плотности в галактическом центре, однако необходимое для этого время оказывается больше возраста Вселенной, равного 15 млрд лет, не говоря уже о в 10 раз более молодой Вселенной, наблюдаемой в телескопах HST и JWST.

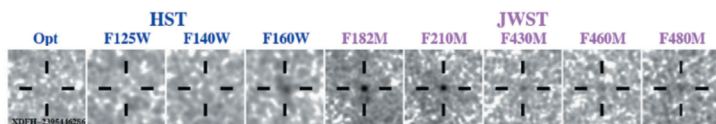
В публикациях [22, 23] была высказана идея об инвертированной схеме образования галактик, когда ранее образуется первичная черная дыра и она служит зародышем формирования галактики. Под давлением наблюдений телескопов «Хаббл» и «Джеймс Вебб» идея о зародышах была переоткрыта в ряде недавних работ, но в них в качестве зародышей постулируется что угодно, но не ПЧД. При этом необходимо предположение об интенсивности аккреции на теоретическом пределе или даже выше него. Недавняя публикация нанесла серьезный удар по этим попыткам объяснить раннее образование космической структуры, не опираясь на первичные черные дыры. Именно в работе [22] была измерена интенсивность аккреции в ранней Вселенной, и она оказалась в 50 раз ниже необходимого значения, что ставит под сомнение предполагаемую в других публикациях идею быстрого образования структуры без участия ПЧД.

Антиматерия в Млечном Пути

Известно, что для каждой частицы существует античастица. Так, например, античастицей электрона является позитрон, протона – антипротон. Есть античастица и для нейтрона, хотя ее электрический заряд равен нулю. Но есть и так называемые истинно нейтральные частицы, для которых



Совместное наблюдение объекта XDFH-2395446286 и измерение его красного смещения $z=12$ HST и JWST. Это самая удаленная галактика, обнаруженная HST за 30 лет наблюдения



Еще два примера галактик с $z=10,62$ и $z=12,3$, обнаруженных JWST за пару месяцев наблюдений

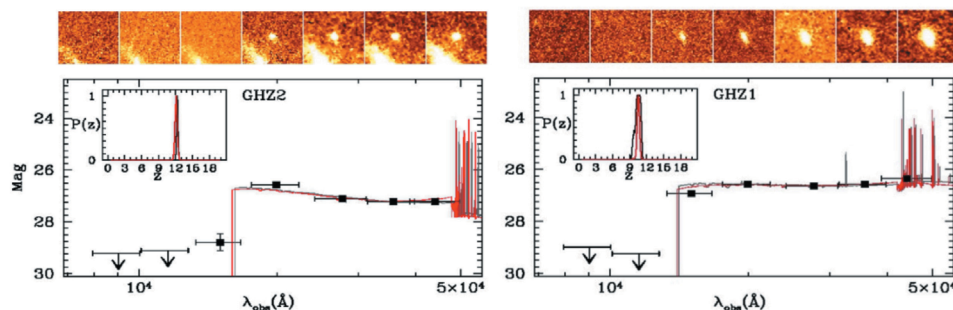


Рис. 7. Общая галактика телескопов «Хаббл» и «Джеймс Вебб»

частица и античастица тождественны, например квант света – фотон.

Естественно, возникает вопрос: могут ли существовать антимирры, состоящие целиком из античастиц? Или хотя бы примесь антиматерии в нашей Галактике? Ранее считалось, что это абсолютно невозможно, кроме небольшого количества космических лучей, состоящих из античастиц, рожденных в столкновениях обычных частиц, как это происходит на ускорителях. Сейчас выяснилось, что антиматерия в нашем Млечном Пути есть, и в заметном количестве.

Отцом антиматерии справедливо считают британского физика Пола Дирака, который в своей нобелевской лекции «Теория электронов и позитронов» 12 декабря 1933 г. сказал: «Вполне возможно, что... эти звезды состоят в основном из позитронов и отрицательных протонов. На самом деле звезд каждого типа может быть по половине. Оба вида звезд будут иметь совершенно одинаковые спектры, и нет никакого способа различить их нынешними астрономическими методами».

Однако в настоящее время найдены способы, как отличить звезды от антис звезд с помощью наблюдений с Земли.

Интересно отметить, что Дирак был вторым человеком, который заговорил об антиматерии.

В 1898 г. британский физик Артур Шустер предположил, что у электричества может быть другой знак, и это будет антиматерия [23]. Он считал, что могут существовать целые солнечные системы, состоящие из антиматерии, неотличимые от нашей. Дикая, по его собственным словам, догадка – материя и антиматерия способны аннигилировать, выделяя огромную энергию, оказалась гениально верной. Он также полагал, что вещество и антивещество гравитационно отталкиваются, так как последнее имеет отрицательную массу.

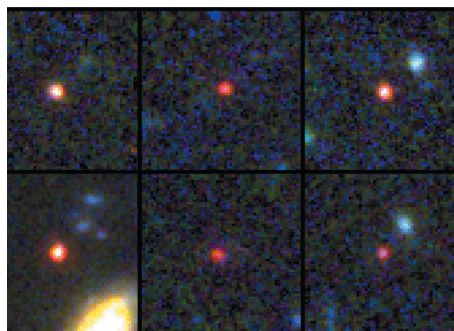


Рис. 8. Шестью юных галактик-переростков, обнаруженных во Вселенной с возрастом моложе 700 млн лет

Два таких объекта при тесном контакте должны иметь исчезающую массу? Последнее предположение оказалось ошибочным.

Побочным результатом модели создания первичных черных дыр, предложенной в работах [22, 23], было предсказание заметного количества антиматерии в нашей галактике. Эта идея была встречена с большим скептицизмом. Однако сейчас положение изменилось.

Впервые поиском антивещества в Галактике занималась группа ученых Ленинградского Физико-технического института, что отражено в публикациях [24, 25]. Я.Б. Зельдович весьма отрицательно относился к изысканиям, несмотря на тесные дружеские отношения между ними. Столь же критически были восприняты работы [8, 11]. Однако в последние годы в нашей галактике было обнаружено значительное количество позитронов, по наблюдению интенсивной аннигиляционной линии 0,511 МэВ. Кроме того, на космической станции AMS зарегистрирован неожиданно высокий поток антиядер: антидейтерия, антигелия-3 и антигелия-4, количество которых слишком велико, чтобы его можно было объяснить их вторичным рождением в космических лучах. И наконец, в работе [26] были обнаружены указания на открытие 14 антизвезд, которые излучают высокоэнергичные гамма-кванты, типичные для тех, что возникают при аннигиляции протонов и антипротонов.

Это открытие естественно вписывается в механизм работ [8, 11].

Совокупность астрономических данных убедительно свидетельствует, что гипотеза об обильном заселении первичными черными дырами как современной, так и ранней Вселенной, в 10 раз более молодой, прекрасно согласуется со всеми наблюдениями.

Сильным аргументом в ее пользу является замечательное соответствие распределения наблюдаемых источников гравитационных волн с предсказанным теорией лог-нормальным спектром масс первичных черных дыр. Другое, еще более яркое предсказание теории – наличие антиматерии в нашей галактике, в Млечном Пути. Наблюдение галактических позитронов, антиядер и особенно антизвезд, которое казалось совершенно диким не столь уж давно, теперь, похоже, входит в стандартный набор данных о галактике. Будем надеяться, что новые открытия приведут к новым подтверждениям теории. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков. The Hypothesis of Cores Retarded During Expansion and the Hot Cosmological Model // *Астрономический журнал*, 1966. № 43. С. 758; *Soviet Astronomy*, 1967. № 10(4). P. 602, 603.
2. S. Hawking. Gravitationally collapsed objects of very low mass // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1971, №152. P. 75.
3. B.J. Carr, S.W. Hawking. Black holes in the early Universe // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1974. №168. P. 399.
4. A.A. Starobinsky. *Phys. Lett.* 91B, 1980. P. 99.
5. D. Kazanas. *Astrophys. J.* 241, 1980. L59.
6. H. Guth. The Inflationary Universe: A Possible Solution To The Horizon And Flatness Problems // *Phys. Rev.* 1981. D. 23. P. 347.
7. A.D. Linde. A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution Of The Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy And Primordial Monopole Problems // *Phys. Lett.* 1982. B. 108. P. 389.
8. A. Dolgov, J. Silk. Baryon isocurvature fluctuations at small scale and baryonic dark matter // *PRD.* 1993. Vol. 47. P. 4244.
9. B.J. Carr, J.H. Hilbert, J.E. Lidsey. Black hole relics and inflation: Limits on blue perturbation spectra // *Phys. Rev.* 1994. D. 50. P. 4853, astro-ph/9405027.
10. P. Ivanov, P. Naselsky, I. Novikov. Inflation and primordial black holes as dark matter // *Phys. Rev.* 1994. D. 50. P. 7173.
11. A. Dolgov, M. Kawasaki, N. Kevlishvili. Inhomogeneous baryogenesis, cosmic antimatter, and dark matter // *Nucl. Phys.* 2009. B. 807. P. 229.
12. G.F. Chapline. Cosmological effects of primordial black holes // *Nature.* 1975. P. 253, 251.
13. B. Carr, F. Kuhnel. Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments // *arXiv:2006.02838*, June 2020.
14. Primordial black holes as dark matter candidates // *SciPost Phys. Lect. Notes* 48. 2022, e-Print: 2110.02821, astro-ph.CO.
15. М.Е. Герценштейн, В.И. Пустовойт. О детектировании низкочастотных гравитационных волн // *ЖЭТФ.* 1963. №14. P. 433.
16. V.B. Braginsky, V.N. Rudenko. Gravitational Waves and the Detection of Gravitational Radiation // *Phys. Rept.* 1978. №46. P. 165–200.
17. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration // *Phys. Rev. Lett.* 2016. 116, 24. 241103, e-Print: 1606.04855 [gr-qc].
18. S. Blinnikov [et al.]. Solving puzzles of GW150914 by primordial black holes // *JCAP.* 2016. №1611. P. 036.
19. A.D. Dolgov [et al.]. On mass distribution of coalescing black holes // *JCAP.* 2020. №12. P. 017, e-Print: 2005.00892.
20. Moritz Haslbauer [et al.]. Has JWST already falsified dark-matter-driven galaxy formation? // *arXiv:2210.14915*.
21. I. Labb'e [et al.]. A population of red candidate massive galaxies 600 Myr after the Big Bang // *Nature.* 616, P. 266, arXiv:2207.12446.
22. I. Juod'zbalis [et al.]. A dormant, overmassive black hole in the early Universe // *arXiv:2403.03872*.
23. А. Шустер. Потенциальная материя. Праздничный сон // *Nature.* 1898. №58. P. 367.
24. B.P. Konstantinov [et al.]. Search for galactic antimatter in the universe and in the Galaxy // *Cosmic Research*, 1968. №4. P. 66.
25. B.P. Konstantinov [et al.]. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR // *Physical series*, 33, 1969. №11. P.1820.
26. S. Dupourqu'e, L. Tibaldo, P. von Ballmoos. Constraints on the antistar fraction in the Solar System neighborhood from the 10-year Fermi Large Area Telescope gamma-ray source catalog // *Phys. Rev.* 2021. D. 103. №8. P. 083016. 2103.10073 [astro-ph.HE].

Работа была выполнена при поддержке РФГ Гранта 23-42-00066