ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА
2025. Т. 56, вып. 3. С. 1018–1030

ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ И АНТИМАТЕРИЯ

А. Д. Долгов

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведен обзор данных наблюдений космических телескопов Хаббла, Джеймса Уэбба и установки ALMA. Утверждается, что обнаруженное противоречие наблюдательных данных с канонической ΛCDM-космологией снимается, если формирование структуры Вселенной инициируется зародышами в форме первичных черных дыр. В пользу предполагаемого сценария говорят согласие с наблюдениями предсказанного логнормального спектра масс первичных черных дыр и обнаружение значительного количества антивещества в нашей Галактике.

A review of observational data from the Hubble and James Webb space telescopes, and ALMA array is presented. It is argued that the discovered contradiction between the observational data and canonical ΛCDM cosmology is removed if the formation of the Universe structure is seeded by primordial black holes. The proposed scenario is supported by the agreement with observations of the predicted log-normal mass spectrum of primordial black holes and the discovery of a significant amount of antimatter in our Galaxy.

PACS: 95.35.+d; 04.70.Bw

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких лет в результате наблюдений космических телескопов Хаббла (Hubble Space Telescope (HST)) и несколько позже Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope (JWST)) появились указания на кризис в стандартной космологической модели, ΛCDM-космологии, в соответствии с которой космологическая эволюция определяется холодной темной материей (CDM) и вакуумоподобной темной энергией (Λ-член).

Обнаружено, что очень молодая Вселенная при красных смещениях $z \sim 10$, т. е. в возрасте около 500 млн лет, весьма плотно заселена развитыми галактиками, сверхмассивными черными дырами, квазарами, которые согласно Стандартной модели не могли возникнуть за столь короткое время.

Однако задолго до возникновения этих проблем их решение было предложено в нашей работе с Силком (DS): «Барионные изотермические флуктуации на малых шкалах и барионная темная материя» [1] и в ра-

боте в соавторстве с Кавасаки и Кевлишвили (DKK): «Неоднородный бариогенезис, космическая антиматерия и темная материя» [2], а именно на основании гипотезы об инвертированной модели образования галактик, согласно которой вначале образуется массивная первичная черная дыра (ПЧД, или PBH), которая служит зародышем образования галактик, но не наоборот. В последнее время идея о зародышах переоткрыта в ряде работ, обсуждаемых в разд. 3.

Впоследствии механизм образования ПЧД, предложенный DS и DKK, получил сильную «экспериментальную» поддержку. Во-первых, вычисленный DS и DKK логнормальный спектр масс первичных черных дыр

$$\frac{dN}{dM} = \mu^2 \exp\left[-\gamma \ln^2\left(\frac{M}{M_0}\right)\right] \tag{B.1}$$

хорошо описывает измеренное распределение зарегистрированных событий по «чирп»-массам в наблюдениях гравитационных волн на интерферометрах LIGO/Virgo/KAGRA (см. разд. 4 с теоретически предсказанным значением $M_0 \sim 10M_\odot$ [3], где $M_0 \approx 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца).

Другим важным аргументом в пользу предлагаемой модели является наблюдение предсказанной нами антиматерии в Млечном Пути: позитронов, антиядер и даже антизвезд (разд. 5).

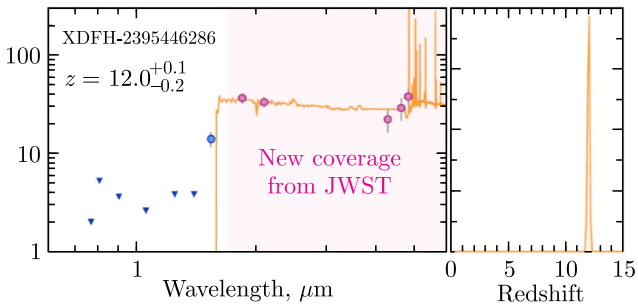
1. ДАННЫЕ О РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

1.1. Наблюдения телескопов Хаббла и Джеймса Уэбба. Приведем кратко основную информацию о телескопах Хаббла и Уэбба. Телескоп Хаббла: расстояние до Земли 570 км; диаметр зеркала 2,4 м; диапазон длин волн, при которых возможно наблюдение: оптическое, например, в голубом свете (450 нм) и в ультрафиолете, а также в инфракрасном диапазоне 0,8–2,5 мкм. Телескоп Уэбба: расстояние до Земли 570 км, расстояние до Земли $1{,}5 \cdot 10^6$ км, диаметр зеркала 6,5 м, рабочие длины волн 0,6–28,5 мкм.

«Хаббл» видит Вселенную вплоть до красных смещений, $z = 6{-}7$. Но случайно, благодаря гравитационной линзе, «Хаббл» обнаружил галактику при $z \approx 12$. Это открытие было подтверждено «Уэббом». Данные обоих телескопов прекрасно согласуются (рис. 1).

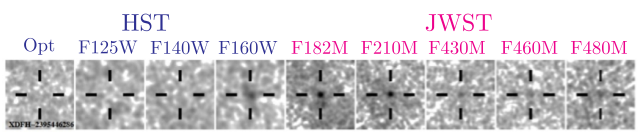
Уже первые наблюдения «Уэбба» показали, что Вселенная при красных смещениях порядка 10–15, т. е. будучи моложе 500 млн лет, неожиданно плотно заселена космическими объектами: галактиками, квазарами, свехмассивными черными дырами (рис. 2). Плотность этих объектов примерно на два порядка превышает теоретические оценки в канонической ΛCDM-космологии.

Очень интересное наблюдение сделано в работе [4]. Авторы обнаружили шесть галактик, существование таких столь зрелых галактик, по собственным словам авторов, противоречит науке. Галактики были идентифицированы в первых наблюдениях телескопа Джеймса Уэбба

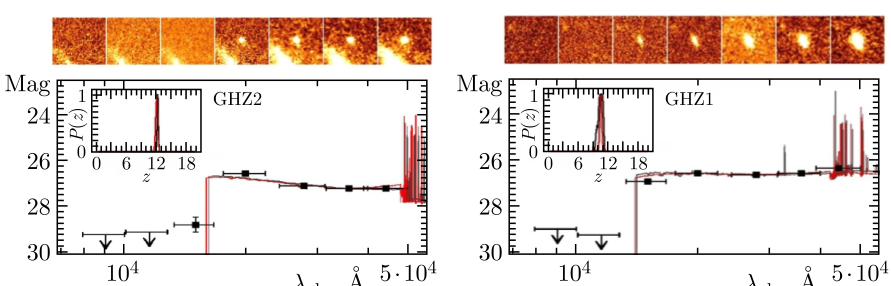


Bouwens R. J. et al. Evolution of the UV LF from $Z \sim 15$ to $z \sim 8$ Using New JWST NIRCam Medium-Band Observations over the HUDF/XDF. arXiv:2211.02607

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



Castellano M. et al. Early Results from GLASS-JWST.III: Galaxy Candidates at $z \sim 9$–15. arXiv:2207.09436



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

Рис. 1. Общая галактика при $z \approx 12$ по наблюдениям как «Хаббла», так и «Уэбба»

Haslbauer M. et al. Has JWST Already Falsified Dark-Matter-Driven Galaxy Formation? arXiv:2210.14915

Сравнение величины наиболее массивных галактик, получаемых в моделях образования и роста галактик на основе ΛCDM (цветные точки) с наблюдениями JWST (черные точки с ошибками) в зависимости от красного смещения наблюдаемых галактик

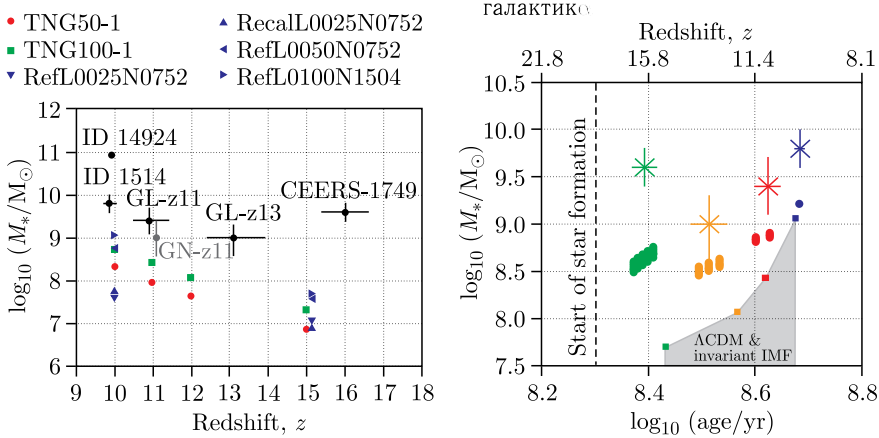
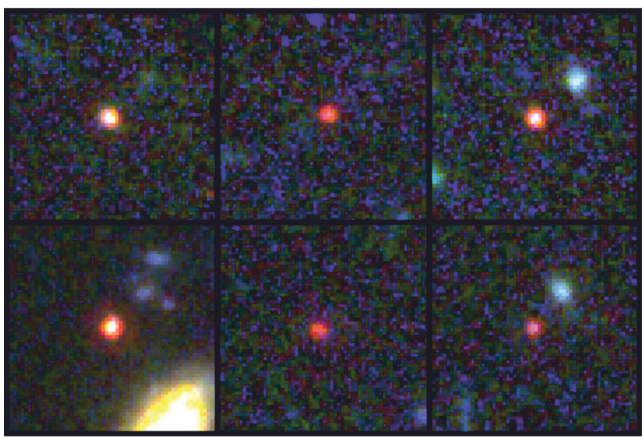


Рис. 2. Данные телескопа Уэбба в сравнении с канонической ΛCDM-космологией. Расхождение в 100 раз



The Six Candidate Galaxies Identified in the JWST data (NASA, ESA, CSA, Labbe I. Swinburne University of Technology)

Рис. 3. Шесть «невозможных» галактик

по программе Cosmic Evolution Early Release Science (CEERS) program. Сделаны фотографии этих галактик (рис. 3). Возраст их примерно 500–700 млн лет от «сотворения» мира. Их массы превышают 10^{10} масс Солнца, а одна из галактик имеет массу $\sim 10^{11} M_{\odot}$. Красное смещение находится в интервале $7{,}4 \lesssim z \lesssim 9{,}1$. Авторы выдвигают гипотезу: «А не могут ли эти объекты быть сверхмассивными черными дырами, никогда ранее не наблюдавшимися. Это привело бы к ревизии нашего обычного понимания черных дыр». Этот вывод прекрасно ложится на наше предсказание о существовании сверхмассивных ПЧД.

1.2. Наблюдения на системе телескопов ALMA. При наблюдении посредством системы телескопов ALMA (Atacama Large Millimeter Array — большая система миллиметровых телескопов в пустыне Атакама в Чили) экстремально массивной галактики массой $M_* = 1{,}7 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ в эпоху реионизации было обнаружено [5], что в ее центре находится сверхмассивная черная дыра массой $\sim 1{,}6 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Возникновение столь тяжелой черной дыры за счет обычного механизма аккреции на центр и за очень короткое время не представляется возможным, однако ПЧД могла бы быть зародышем этого «чудовища».

1.3. Химия ранней Вселенной. В ранних наблюдениях JWST до февраля 2023 г. регистрировался лишь непрерывный спектр микроволнового излучения в микрометровом диапазоне, что приводило к обоснованным сомнениям в определении красного смещения. Но теперь многочисленные измерения спектров различных элементов замечательно подтверждают более раннее определение красных смещений. Помимо этого в молодой Вселенной было обнаружено большое количество металлов, т. е. элементов тяжелее гелия, что также оказалось большим сюрпризом. Как известно, при первичном нуклеосинтезе остается лишь первичный водород и синтезируется ^{4}He. Также возникает ничтожная доля дейтерия и гелия-3 на уровне нескольких единиц (на 10^{-5}) по отношению к водороду. Более тяжелые элементы, как полагают, синтезируются в звездах. Наблюдение заметного количества металлов говорит о том, что во Вселенной при красном смещении порядка десяти было активное звездообразование и взрывы сверхновых, которые привели к высокому содержанию металлов в межзвездном газе.

Так, в работе [6] было обнаружено чрезвычайно высокое содержание азота в галактике GN-z11 при $z = 10{,}60$.

Еще один пример обнаружения высоких обилий металлов приведен в работе [7] при наблюдении звездного кластера в галактике GN-z11. Были идентифицированы спектральные линии излучения многочисленных атомов кислорода, углерода, азота и гелия. Данные указывают, что отношение N/O в 4 раза больше наблюдаемого на Солнце, а отношение C/O составляет примерно 30 солнечного.

Авторы отмечают, что высокое содержание азота не может быть объяснено обогащением от звезд III поколения.

Напомним, что при этом Вселенной было лишь 440 млн лет от роду после Большого взрыва. Согласно каноническим взглядам для создания такой «развитой» химии требуется значительно больше времени.

Другой пример раннего возникновения металлов во Вселенной приведен в наблюдениях на системе телескопов ALMA [8]. Согласно опубликованным данным, в галактике GHZ2/GLASS-z12, идентифицированной на телескопе Уэбба, обнаружена спектральная линия, отвечающая ионизированному кислороду. Сдвиг этой линии из-за расширения Вселенной позволяет определить возраст этой галактики равным 367 млн лет. По заключению авторов работы, это наблюдение вопит о нашей неспособности понять, как формируются самые ранние галактики во Вселенной.

В работе [9] измерены космические обилия металлов в более позднее время, чем рекордно ранняя эпоха телескопа Уэбба, а именно при красном смещении $z = 4$, но анализ проводился все же на телескопе Уэбба. Было обнаружено удивительно высокое содержание углерода, кислорода и азота, сравнимое с солнечным. Однако Солнце унаследовало большую часть своих металлов от предыдущих поколений звезд, у которых было в распоряжении 8 млрд лет, чтобы их сотворить. Объяснения столь высокого содержания металлов в рамках общепринятой теории не найдено.

Высокое содержание тяжелых элементов может быть объяснено первичным нуклеосинтезом при высоком отношении плотностей барионов к фотонам в соответствии с работами [1, 2].

2. ЧЕРНАЯ ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Первое предположение о том, что первичные черные дыры могут быть космологической черной материей, было сделано Хокингом в 1971 г. [10] и позже повторено в работе [11]. Предполагался плоский спектр масс ПЧД в логарифмическом интервале $dN = N_0(dM/M)$ с максимальной массой $M_{\max} \lesssim 10^{22}$ г.

В следующей работе [1] 1993 г., благодаря пионерской идее о привлечении инфляции к рождению ПЧД, могли быть созданы массы порядка $10^6 M_\odot$ и даже выше.

Обзор ограничений на космологическую плотность ПЧД приведен в работах [12, 13] и представлен на рис. 4. Отметим, цитируя авторов обзора, что ограничения получены для монохроматического спектра масс ПЧД, модельно зависимы и имеют ряд проблем. На рис. 4 использованы следующие обозначения. Ограничения на $f(M)$ для монохроматической массовой функции от хокингского испарения (красный), линзирования (синий), гравитационных волн (ГВ) (серый), динамических эффектов (зеленый), аккреции (светло-голубой), искажения МДБ (оранжевый) и крупномасштабной структуры (фиолетовый). Пределы на основе данных о хокингском испарении из внегалактического гамма-фона (EGB), потока позитронов, измеренных «Вояджером» (V), и аннигиляционного излучения из галактического центра (ГЦ). Пределы, полученные лин-

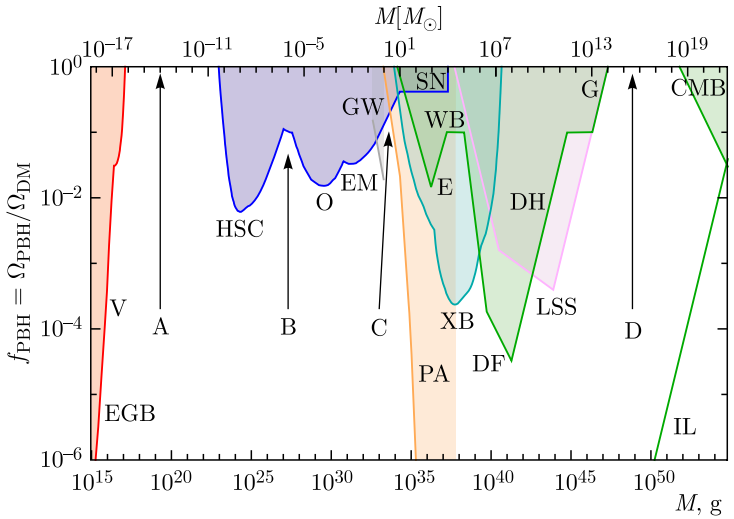


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Ограничения на вклад ПЧД в плотность темной материи

зированием от микролинзирования сверхновых (CH) и звезд в M31 с помощью Субару (HSC), Магеллановых Облаков с помощью EROS и MACHO (EM) и галактического «балджа» с помощью OGLE (O). Динамические ограничения от широких двойных звезд (ШБ), звездных скоплений в Эридане II (E), динамическое трение гало (DF), приливные возмущения галактик (G), нагрев звезд в галактическом диске (DH) и величина дипольной асимметрии КМФ (CMB). Ограничения крупномасштабной структуры (LSS). Пределы от аккреции на рентгеновские двойные системы (XB) и измерений Планка искажений микроволнового фона (PA). Пределы (IL) соответствуют одной PBH на соответствующую систему (галактику, скопление, Вселенную). Есть четыре массовых окна (A–D), в которых PBH могут иметь заметную плотность. В недавнем обзоре [14] приведены по существу те же ограничения, что и в более ранних работах [12, 13]. Поразительно сильные ограничения приведены в статье [15]. На основании анализа гравитационного микролинзирования в Галактике авторы заключают, что компактные объекты массой от $1{,}8 \cdot 10^{-4} M_\odot$ до $6{,}3 M_\odot$ вносят вклад не более 1 % в плотность темной материи, а в интервале от $1{,}3 \cdot 10^{-5} M_\odot$ до $860 M_\odot$ не более 10 %. Ограничения получены для дельта-образного спектра масс компактных объектов, в то время как он широкий, логнормальный с центральной массой $17 M_\odot$. Это сразу снижает верхний предел примерно в 3 раза. А возможная кластеризация ПЧД [16] абсолютно исключает результаты работы [15].

3. КОСМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

3.1. Зародыши в ранней Вселенной. Идея о том, что зародышами образования структуры являются сверхмассивные черные дыры [1, 2], была недавно переоткрыта в ряде работ [17, 18] под давлением наблюдений телескопа Уэбба, хотя проблема существует не только в очень молодой, но и в современной Вселенной. Она позволяет объяснить существование сверхмассивных черных дыр во всех доступных наблюдениям больших и некоторых маленьких галактиках.

Согласно работе [17] наблюдаемые в телескопе Уэбба ранние галактики могли бы появиться, если бы их возникновение было ускорено черными дырами с громадными массами ($\gtrsim 10^9 M_\odot$). Напротив, в работах [18] постулировалось, что зародышами наблюдаемых галактик и сверхмассивных черных дыр могли бы быть либо легкие черные дыры с массами $10-100 M_\odot$, либо тяжелые с массами $10^4-10^5 M_\odot$. Согласно гипотезе авторов легкие черные дыры могли быть остатками первых звезд, а тяжелые могли возникнуть в результате прямого коллапса газовых облаков. Кажется очевидным, что идея о зародышах в форме ПЧД намного привлекательнее и проще.

3.2. Зародыши в современной Вселенной. В нашей работе [19] был предложен механизм формирования шаровых скоплений и карликовых галактик за счет зародышей в форме черных дыр промежуточной массы от нескольких тысяч до сотен тысяч масс Солнца. Впоследствии такие черные дыры были там обнаружены в полном соответствии с нашими предсказаниями. В частности, в паре двух сливающихся карликовых галактик видны две черные дыры промежуточной массы [20].

В карликовой галактике SDSS J090613.77+561015.2 обнаружена черная дыра массой $M_{\rm BH} = 3{,}6^{+5,9}_{-2,3} \cdot 10^5 M_\odot$ [21], которая, очевидно, не могла возникнуть за счет аккреции, но вполне могла быть зародышем формирования этой галактики.

4. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ СЛИЯНИЯ ЧД

Открытие гравитационных волн (ГВ) на интерферометре LIGO и дальнейшее изучение их свойств на LIGO/Virgo/Kagra приводит к выводу, что источниками зарегистрированных ГВ являются ПЧД (см., например, [22]). Серьезную проблему составляет механизм возникновения астрофизических черных дыр с массами в десятки масс Солнца в необходимом количестве. Особенно загадочным выглядит обнаружение ЧД массой около $100 M_\odot$. Как полагают, астрофизические черные дыры с такой массой просто не должны существовать. Дело в том, что для астрофизического создания подобных черных дыр масса звезды-предка должна быть достаточно велика: $M > 100 M_\odot$. Она должна содержать низкое количество металлов, чтобы избежать

большой потери массы в процессе эволюции. Такие звезды могли бы находиться в молодых галактиках в процессе звездообразования, но их количество ничтожно мало. А вот ПЧД с такой массой вполне могут быть с необходимой плотностью. Важным аргументом в пользу первичного происхождения источников ГВ является их распределение по «чирп»-массам, вычисленное в работе [23], в предположении логнормального распределения черных дыр по массам (B.1) (рис. 5).

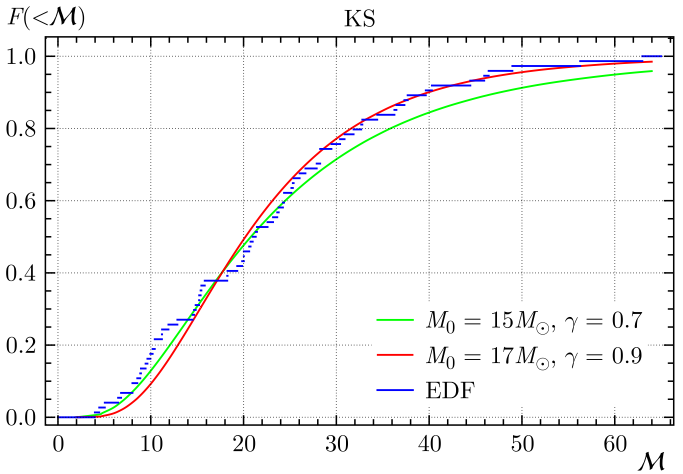


Рис. 5. Распределение по «чирп»-массам для данных O1-O3 LIGO/Virgo. Приведены наилучшие значения параметров логнормального распределения

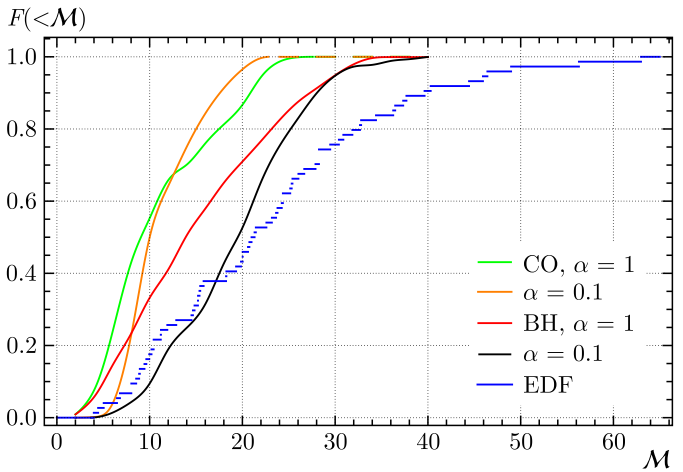


Рис. 6. Распределение по «чирп»-массам для астрофизических ЧД

Наилучшее значение параметра M_0 хорошо согласуется с теоретическим предсказанием нашей работы [23]. M_0 должна быть близка к массе внутри космологического горизонта при фазовом переходе в КХД, которая $\sim 10M_\odot$ при нулевом химическом потенциале первичной плазмы. При химическом потенциале порядка единицы, что имеет место в нашем случае, M_0 будет ближе к $20M_\odot$. Полученные параметры $M_0 = 17M_\odot$ и $\gamma = 0{,}9$ хорошо описывают наблюдения и попадают в теоретически ожидаемый интервал.

С другой стороны, распределения, основанные на гипотезе о двойных системах черных дыр, возникших в результате звездной эволюции, требуют дополнительной подгонки для описания распределения (рис. 6).

5. АНТИМАТЕРИЯ В МЛЕЧНОМ ПУТИ

Побочным продуктом модели рождения ПЧД [1, 2] является предсказание о существовании антиматерии в Галактике, подтверждаемое недавними наблюдениями значительной популяции позитронов, антиядер и, возможно, антизвезд. Наблюдательные пределы на количество антиматерии в Галактике были рассмотрены в работах десятилетней давности [24–26] и оставляют довольно значительное пространство для галактического антивещества.

Поиск антиматерии в Галактике был инициирован Б. П. Константиновым с сотрудниками [27, 28] более полувека назад и не увенчался успехом. Как отмечал в своей статье Я. Б. Зельдович [29], несмотря на то, что первоначальная идея Б. П. Константинова о существовании большой доли метеоров из антивещества была неверна, интерес к проблеме антивещества и энтузиазм Б. П. Константинова привели к созданию в ленинградском Физтехе самой сильной в Советском Союзе группы экспериментальной астрофизики высоких энергий под руководством Е. П. Мазеца. Спустя 50 лет после опубликования статьи Зельдовича можно убедиться в точности его формулировок, поскольку группа, которую создал Мазец, и в настоящее время получает новые важные данные по наблюдениям из космоса гамма-всплесков, в частности, с российско-американского прибора Konus-Wind, успешно работающего на орбите уже 30 лет.

Пионерские работы по антиматерии во Вселенной принадлежат Ф. Стеккеру [30, 31]. Состояние дел по космологической (не галактической) антиматерии на 2002 г. было суммарно отражено в лекциях [32, 33]. Возможное существование антизвезд было впервые упомянуто А. Шустером [34] и П. Дираком [35]. По утверждению Дирака, невозможно отличить звезду от антизвезды по наблюдениям с Земли. Однако это не вполне верно, даже если речь идет об отдаленной галактике, которая может состоять целиком из антивещества [36]. В нашей же Галактике антизвезда выдает себя по гамма-излучению от аннигиляции межзвездного газа на ее поверхности [37].

В работе [38] предложен альтернативный способ идентификации антизвезд по регистрации рентгеновского излучения от протон-антипротонных атомов, образующихся вблизи звезды.

Наличие позитронов в Галактике обнаружено по интенсивной линии 0,511 МэВ, которая идет от e^+e^--аннигиляции в покое (см., например, обзор [39]).

Антиядра в космических лучах зарегистрированы на AMS [40, 41] в количестве, заметно превышающем их поток от вторичного рождения в космических лучах. Не исключено, что поток антиядер заметно выше, так как антиядра малых энергий могли ускользнуть от регистрации на АМС.

Если предположить, что антиядра возникают от аналога первичного нуклеосинтеза в пузырях антиматерии, то количество антидейтерия должно быть ничтожно мало по сравнению с антигелием. Однако их количество сравнимо по величине. Возможным решением проблемы мог быть тот факт, что в нашем случае нуклеосинтез идет в пузырях с сильно повышенной плотностью материи и поэтому с медленно падающей температурой. В таких условиях нуклеосинтез мог бы остановиться до обильного создания (анти)гелия при практически равном количестве $\overline{\mathrm{D}}$ и $\overline{\mathrm{He}}$.

Альтернативный вариант решения проблемы высокого отношения $\overline{\mathrm{D}}/\overline{\mathrm{He}}$ предложен в работе [42], где показано, что источником антиядер могли бы быть взрывы антисверхновых.

Благодарности. Автор благодарен А. Ф. Захарову за полезные замечания.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-42-00066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dolgov A., Silk J.* Baryon Isocurvature Fluctuations at Small Scale and Baryonic Dark Matter // Phys. Rev. D. 1993. V. 47. P. 4244.
2. *Dolgov A., Kawasaki M., Kevlishvili N.* Inhomogeneous Baryogenesis, Cosmic Antimatter, and Dark Matter // Nucl. Phys. B. 2009. V. P807. P. 229.
3. *Dolgov A., Postnov K.* Why the Mean Mass of Primordial Black Hole Distribution Is Close to $10M_\odot$ // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2020. V. 07. P. 063.
4. *Labbé I., van Dokkum P., Nelson E. et al.* A Population of Red Candidate Massive Galaxies 600 Myr after the Big Bang // Nature. 2022. V. 616. P. 7956; arXiv:2207.12446.
5. *Endsley R. et al.* ALMA Confirmation of an Obscured Hyperluminous Radio-Loud AGN at $z = 6.853$ Associated with a Dusty Starburst in the 1.5 deg^2 COSMOS Field // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 250. P. 4609.
6. *Bunker A. J., Saxena A., Cameron A. J. et al.* JADES NIRSpec Spectroscopy of GN-z11: Lyman-α Emission and Possible Enhanced Nitrogen Abundance

in a $z = 10.60$ Luminous Galaxy // Astron. Astrophys. 2023. V. 677. P. A88; 2302.07256.

7. *Cameron A. J., Katz H., Rey M. P., Saxena A.* Nitrogen Enhancements 440 Myr after the Big Bang: Supersolar N/O, a Tidal Disruption Event, or a Dense Stellar Cluster in GN-z11? // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 523, No. 3. P. 3516–3525; 2302.10142 [astro-ph.GA].
8. *Bakh T., Zavala J. A., Mitsuhashi I. et al.* Deep ALMA Redshift Search of a $z \sim 12$ GLASS-JWST Galaxy Candidate // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 519, No. 4. P. 5076; arXiv:2208.13642.
9. *Peng B., Vishwas A., Stacey G. et al.* Discovery of a Dusty, Chemically Mature Companion to $z \sim 4$ Starburst Galaxy in JWST Early Release Science Data // Astrophys. J. Lett. 2023. V. 944, No. 2. P. L36.
10. *Hawking S.* Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 1971. V. 152. P. 75.
11. *Chapline G. F.* Cosmological Effects of Primordial Black Holes // Nature. 1975. V. 253. P. 251.
12. *Carr B., Kuhnel F.* Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments. arXiv:2006.02838.
13. *Carr B., Kuhnel F.* Primordial Black Holes as Dark Matter Candidates // SciPost Phys. Lect. Notes. 2022. V. 48. P. 1; 2110.02821.
14. *Carr B. J., Green A. M.* The History of Primordial Black Holes. arXiv:2406.05736.
15. *Mroz P., Udalski A., Szymanski M. K. et al.* No Massive Black Holes in the Milky Way Halo // Nature. 2024. V. 632. P. 749.
16. *Eroshenko Y., Stasenko V.* Gravitational Waves from the Merger of Two Primordial Black Hole Clusters // Symmetry. 2023. V. 15. P. 637; arXiv:2302.05167 [astro-ph.CO].
17. *Liu B., Bromm V.* Accelerating Early Galaxy Formation with Primordial Black Holes // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 937, No. 2. P. L30; 2208.13178 [astro-ph.CO].
18. *Bogdan A., Goulding A., Natarajan P. et al.* Evidence for Heavy-Seed Origin of Early Supermassive Black Holes from a $z \approx 10$ X-Ray Quasar // Nature Astron. 2024. V. 8, No. 1. P. 126–133; 2305.15458 [astro-ph.GA].
19. *Dolgov A., Postnov K.* Globular Cluster Seeding by Primordial Black Hole Population // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2017. V. 04. P. 036; 1702.07621 [astro-ph.CO].
20. *Mićić M., Holmes O. J., Wells B. N. et al.* Two Candidates for Dual AGN in Dwarf–Dwarf Galaxy Mergers // Astrophys. J. 2023. V. 944, No. 2. P. 160; 2211.04609.
21. *Yang J., Paragi Z., Frey S., Gurvits L. I. et al.* Intermediate-Mass Black Holes: Finding of Episodic, Large-Scale, and Powerful Jet Activity in a Dwarf Galaxy // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 520, No. 4. P. 5964–5973; 2302.06214.
22. *Blinnkov S., Dolgov A., Porayko N., Postnov K.* Solving Puzzles of GW150914 by Primordial Black Holes // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2016. V. 1611. P. 036.
23. *Dolgov A. D., Kuranov A. G., Mitichkin N. A., Porey S., Postnov K. A., Sazhina O. S., Simkine I. V.* On Mass Distribution of Coalescing Black Holes // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2020. V. 12. P. 017; 2005.00892.

24. *Bambi C., Dolgov A. D.* Antimatter in the Milky Way // Nucl. Phys. B. 2007. V. 784. P. 132; 0702350.
25. *Dolgov A. D., Blinnikov S. I.* Stars and Black Holes from the Very Early Universe // Phys. Rev. D. 2014. V. 89, No. 2. P. 021301; 1309.3395.
26. *Blinnikov S. I., Dolgov A. D., Postnov K. A.* Antimatter and Antistars in the Universe and in the Galaxy // Phys. Rev. D. 2015. V. 92. P. 023516; 1409.5736.
27. *Konstantinov B. P., Bredov M. M., Belyaevskij A. I. et al.* // Cosmic Res. 1968. V. 4. P. 66.
28. *Константинов Б. П., Бредов М. М., Гелленский С. В. и др.* // Бюл. АН СССР. Физ. сер. 1969. Т. 33, № 11. С. 1820.
29. *Зельдович Я. Б.* Памяти друга // Проблемы современной физики: Сб. памяти акад. Б. П. Константинова. Л.: Наука, 1974. С. 7.
30. *Stecker F. W., Morgan D. L., Jr., Bredekamp J.* Possible Evidence for the Existence of Antimatter on a Cosmological Scale in the Universe // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 1469.
31. *Stecker F. W.* Grand Unification and Possible Matter–Antimatter Domain Structure in the the Universe // Tenth Texas Symp. on Relat. Astrophys. 1981. P. 69.
32. *Stecker F. W.* The Matter–Antimatter Asymmetry of the Universe (keynote address for XIV Rencontres de Blois). arXiv:hep-ph/0207323.
33. *Dolgov A. D.* Cosmological Matter–Antimatter Asymmetry and Antimatter in the Universe. Keynote Lecture at the 14th Rencontres de Blois on Matter–Antimatter Asymmetry. arXiv: hep-ph/0211260.
34. *Schuster A.* Potential Matter. Holiday Dream // Nature. 1898. V. 58. P. 367.
35. *Dirac P. A. M.* Theory of Electrons and Positrons. Nobel Lecture. Dec. 12, 1933.
36. *Dolgov A. D., Novikov V. A., Vysotsky M. I.* How to See an Antistar // JETP Lett. 2013. V. 98. P. 519; 1309.2746.
37. *Dupourqué S., Tibaldo L., von Ballmoos P.* Constraints on the Antistar Fraction in the Solar System Neighborhood from the 10-Year Fermi Large Area Telescope Gamma-Ray Source Catalog // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 083016.
38. *Bondar A. E., Blinnikov S. I., Bykov A. M., Dolgov A. D., Postnov K. A.* X-Ray Signature of Antistars in the Galaxy // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2022. V. 03. P. 009; 2109.12699.
39. *Weidenspointner G. et al.* The Sky Distribution of Positronium Annihilation Continuum Emission Measured with SPI/INTEGRAL // Astron. Astrophys. 2006. V. 450. P. 1013; astro-ph/0601673.
40. *Choutko A. (AMS-02 Collab.).* AMS Days at La Palma, La Palma, Canary Islands, Spain, 2018.
41. *Ting S.* Latest Results from the AMS Experiment on the International Space Station // Colloquium at CERN, May 24, 2018; https://cds.cern.ch/record/2320166.
42. *Bykov A. M., Postnov K. A., Bondar A. E., Blinnikov S. I., Dolgov A. D.* Antistars as Possible Sources of Antihelium Cosmic Rays // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2023. V. 08. P. 027; 2304.04623.