

Ранние образования астрофизических объектов

(по работам А.Д. Долгова)

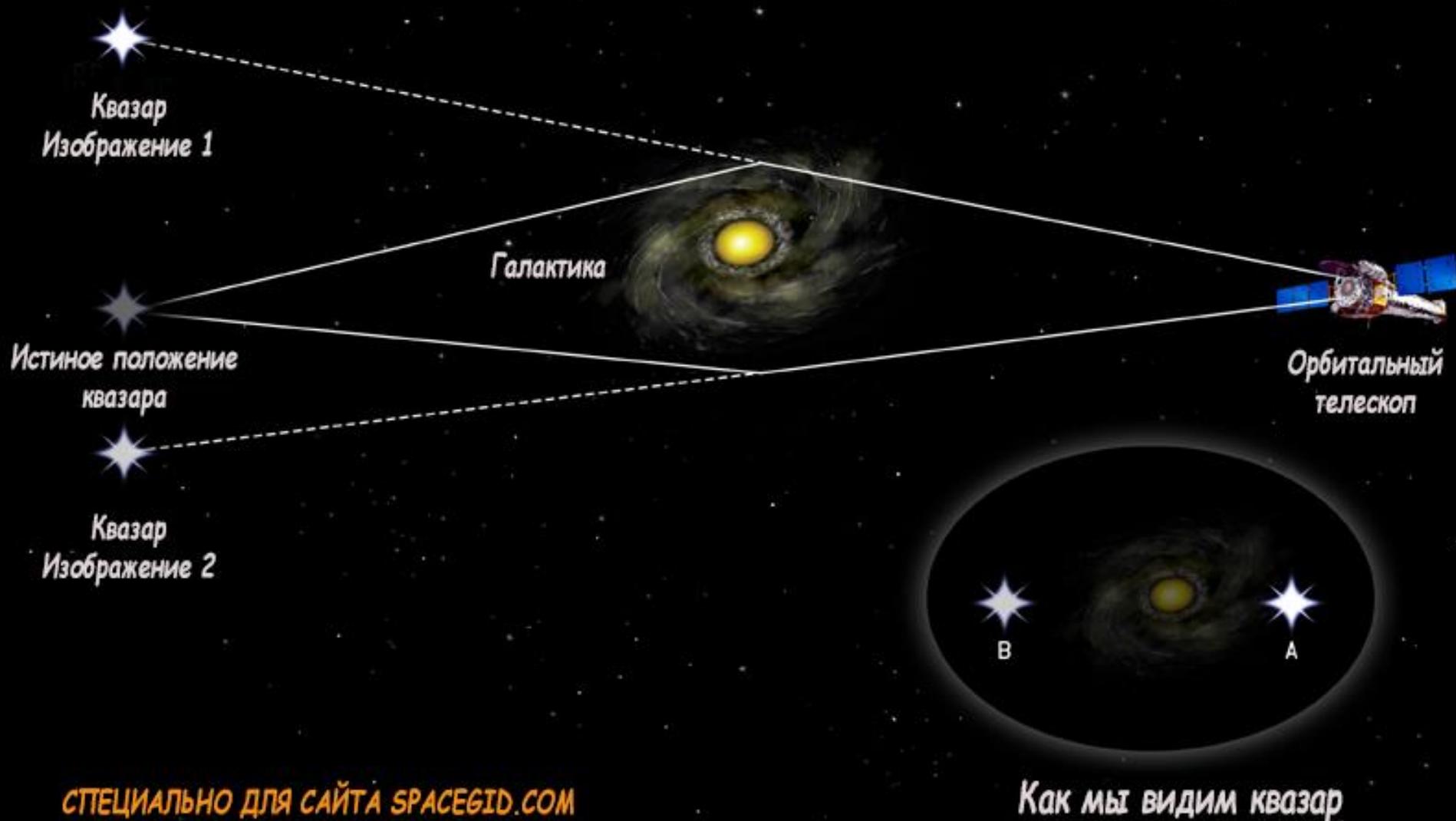
Большой взрыв

Время	Эпоха	Событие	Время от сегодняшнего момента, млрд лет
0	Сингулярность	Большой взрыв ^[1] .	
0 — 10^{-43} с	Планковская эпоха	Рождение частиц ^[1] .	13,7
10^{-43} - 10^{-35} с	Эпоха Великого объединения	Отделение гравитации от объединённого электрослабого и сильного взаимодействия. Возможное рождение монополей . Разрушение Великого объединения.	13,7
10^{-35} - 10^{-32} с	Инфляционная эпоха	Вселенная экспоненциально увеличивает свой радиус на много порядков. Структура первичной квантовой флуктуации , раздуваясь, даёт начало крупномасштабной структуре Вселенной ^[5] . Вторичный нагрев.	13,7

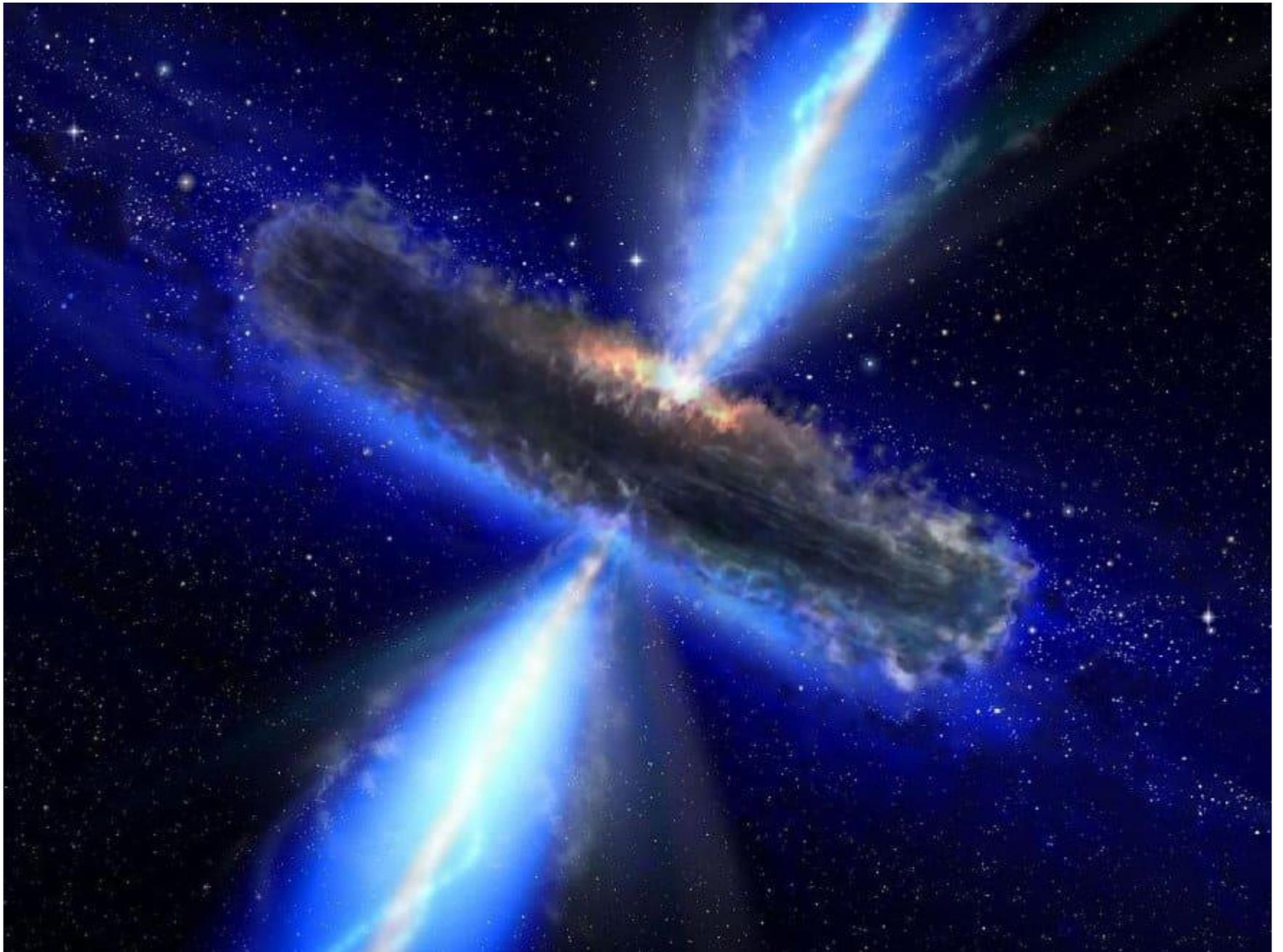
$10^{-32} — 10^{-12} \text{ с}$	Электрослабая эпоха	<p>Вселенная заполнена кварк-глюонной плазмой, лептонами, фотонами, W- и Z-бозонами, бозонами Хиггса. Нарушение суперсимметрии.</p>	13,7
$10^{-12} — 10^{-6} \text{ с}$	Кварковая эпоха	<p>Электрослабая симметрия нарушена, все четыре фундаментальных взаимодействия существуют отдельно. Кварки ещё не объединены в адроны. Вселенная заполнена кварк-глюонной плазмой, лептонами и фотонами.</p>	13,7
$10^{-6} — 100 \text{ с}$	Адронная эпоха	<p>Адронизация. Аннигиляция барион-антибарионных пар. Благодаря CP-нарушению остаётся малый избыток барионов над антибарионами (около $1:10^9$).</p>	13,7
100 секунд — 3 минуты	Лептонная эпоха	<p>Аннигиляция лептон-антилептонных пар. Распад части нейтронов. Вещество становится прозрачным для нейтрино.</p>	13,7

3 минуты — 380 000 лет	Протонная эпоха	Нуклеосинтез гелия, дейтерия, следов лития-7 (20 минут). Вещество начинает доминировать над излучением (70 000 лет), что приводит к изменению режима расширения Вселенной. В конце эпохи (380 000 лет) происходит рекомбинация водорода и Вселенная становится прозрачной для фотонов теплового излучения.	13,7
380 000—550 млн лет ^[6]	Тёмные века	Вселенная заполнена водородом и гелием, реликтовым излучением, излучением атомарного водорода на волне 21 см. Звёзды , квазары и другие яркие источники отсутствуют.	13,15 ^[6]
550 млн ^[6] — 800 млн лет ^[7]	Реионизация	Образуются первые звёзды (звёзды популяции III), квазары , галактики ^[1] , скопления и сверхскопления галактик. Реионизация водорода светом звёзд и квазаров.	12,7
800 млн лет - 8,9 млрд лет	Эра вещества	Образование межзвёздного облака, давшего начало Солнечной системе .	4,8
8,9 млрд лет — 9,1 млрд лет		Образование Земли и других планет нашей Солнечной системы, затвердевание пород.	

СХЕМА ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ

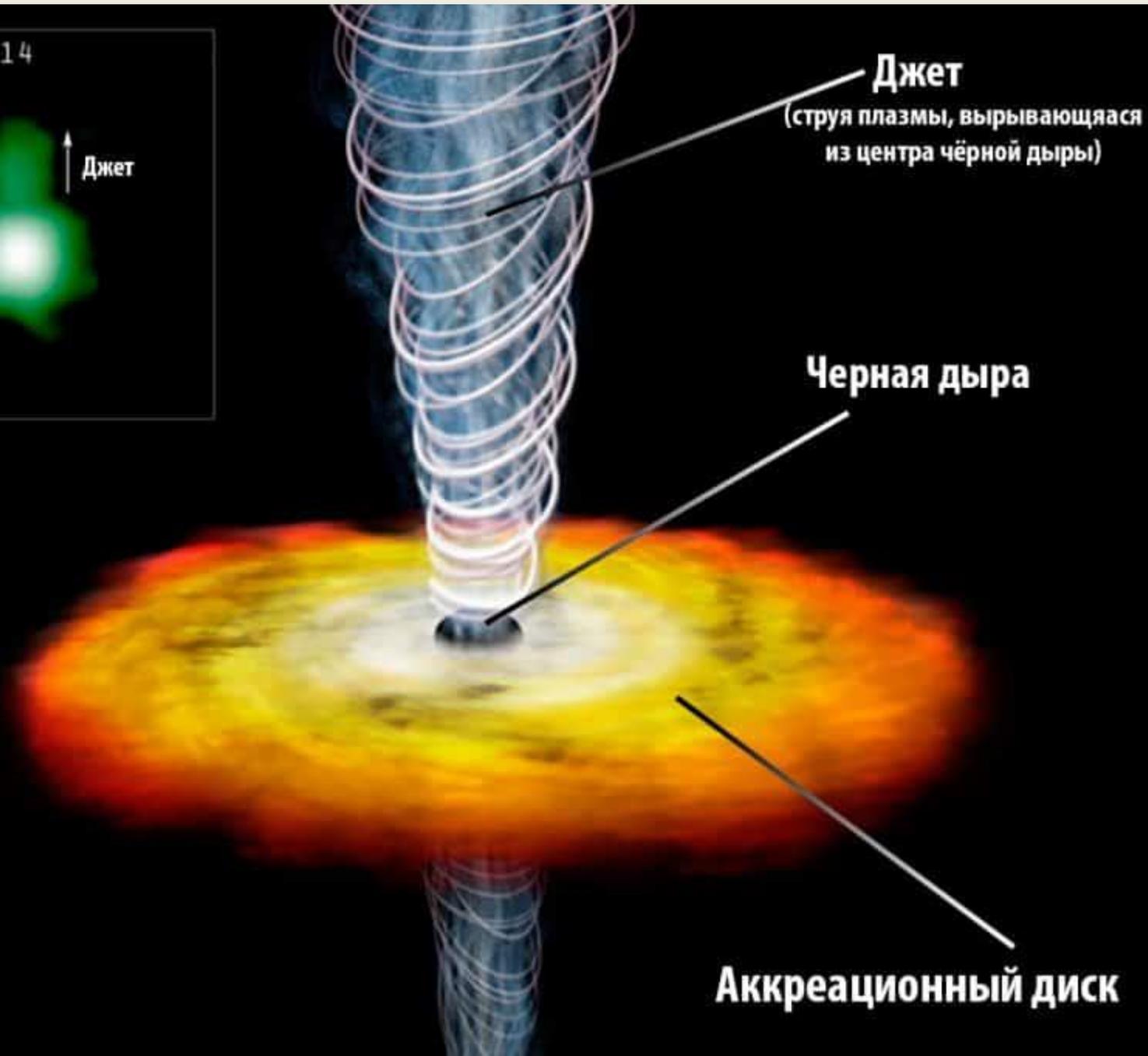


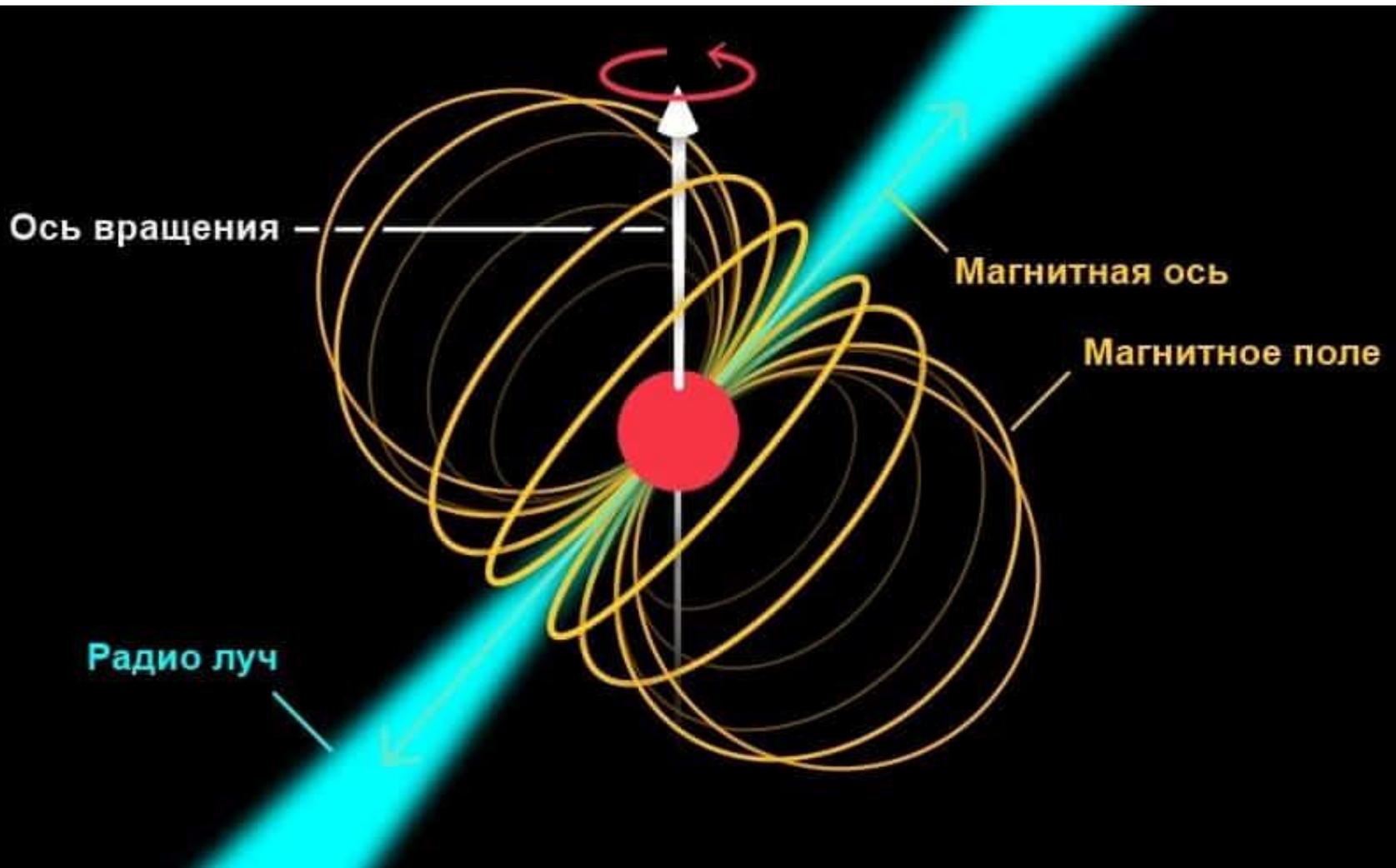
СПЕЦИАЛЬНО ДЛЯ САЙТА SPACEGID.COM

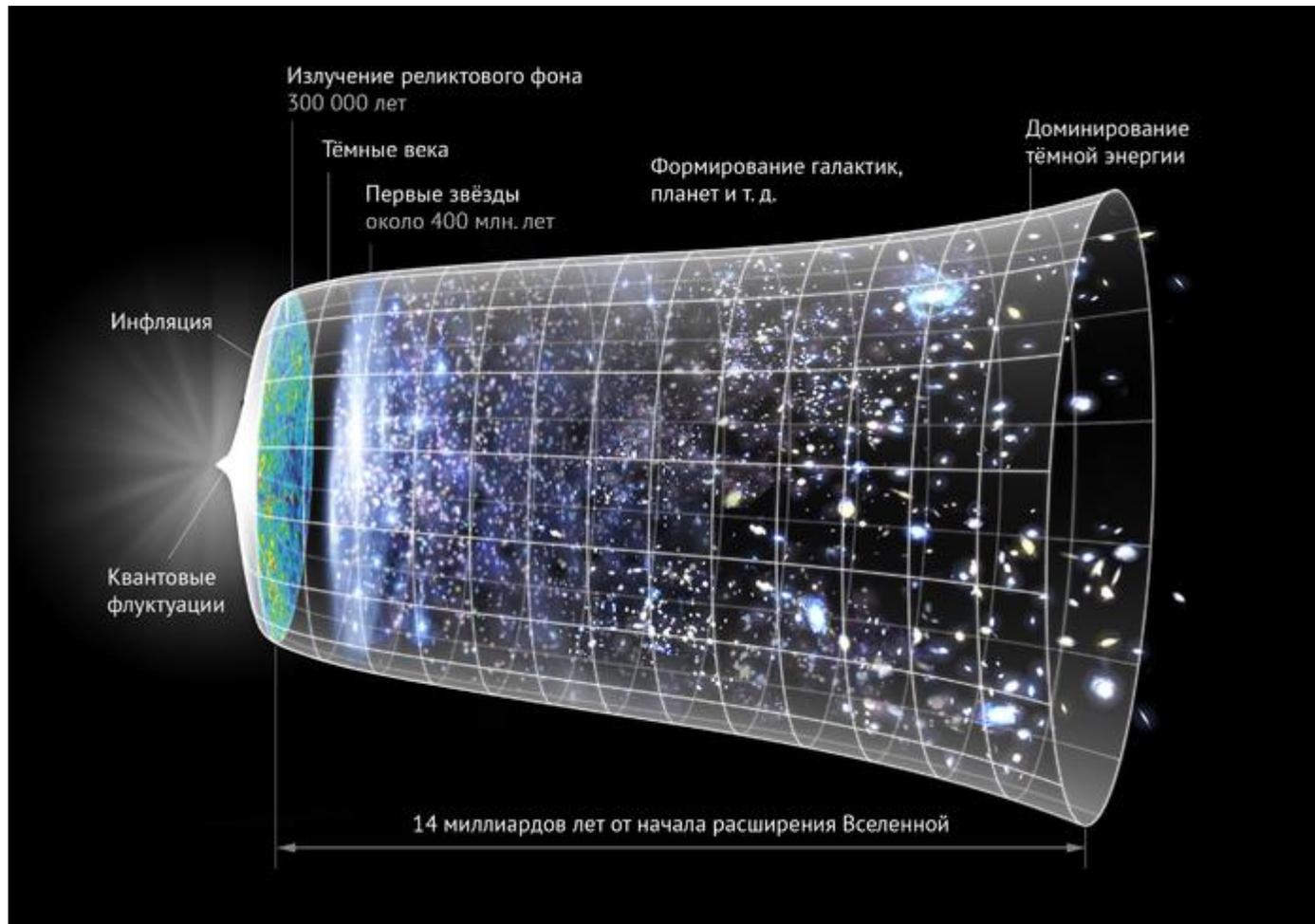


Строение квазара

GB1508+5714







Возраст Вселенной в зависимости от красного смещения

Известно, что возраст Вселенной как функция красного смещения z выражается через фундаментальные космологические параметры:

$$t(z) = \frac{1}{H} \int_0^{z+1} \frac{dx}{\sqrt{(1 - \Omega_{tot} +) \left(\frac{\Omega_m}{x}\right) + x^2 \Omega_v}}$$

где H — современное значение параметра Хаббла, Ω — безразмерные плотности массы/энергии различных форм материи, нормированные на критическую плотность энергии

$$\rho_c = 3H^2 m_{Pl} / (8\pi).$$

Значения всех величин берутся в настоящее время. Согласно совокупным астрономическим

данным полная плотность энергии близка к критической, $\Omega=1$. Плотность массы нерелятивистской материи $\Omega_m = 0,317$ (последняя величина включает в себя плотности обычной барионной и тёмной материи пока неизвестной формы). Оставшуюся величину $\Omega_v = 0,683$ вносит загадочная тёмная энергия, вызывающая современное ускоренное космологическое расширение. Индекс v здесь означает "вакуумо-подобная". Точности приведённых значений находятся на уровне нескольких процентов.

Параметр Хаббла весьма точно измерен детектором космического аппарата "Планк" на основе анализа спектра угловых флуктуации космического микроволнового фона:

$H = 67,3$ км (с Мпк)⁻¹. Однако в последнее время появились аккуратные измерения

H традиционными астрономическими методами, которые приводят к его существенно большему значению, вплоть до $H = 74$ км (с Мпк)⁻¹. В зависимости от величины H возраст Вселенной будет довольно заметно варьироваться .

Таблица. Возраст Вселенной в зависимости от красного смещения z при двух значениях параметра Хаббла H

z	τ , млрд лет	
	$H = 67,3 \text{ км (с Мпк)}^{-1}$	$H = 74,0 \text{ км (с Мпк)}^{-1}$
0	13,8	12,5
3,0	5,0	4,5
6,0	0,93	0,84
8,0	0,64	0,58
10	0,47	0,43

Гравитационный радиус пропорционален массе тела M и равен

$$r_g = 2GM/c^2$$

где G — гравитационная постоянная, c — скорость света в вакууме.

Это выражение можно переписать как

$$r_g \approx 1,48 \cdot 10^{-27} \cdot (M / 1 \text{ кг}) \text{ м.}$$

Гравитационный радиус обычных астрофизических объектов ничтожно мал по сравнению с их действительным размером: так, для Земли $r_g \approx 0,887 \text{ см}$, для Солнца $r_g \approx 2,95 \text{ км}$.

Яркие галактики в ранней Вселенной

Благодаря гравитационному линзированию удалось открыть несколько очень далёких (и ранних) галактик, которым "посчастливилось" оказаться на луче зрения от нас на гравитационную линзу. Такие линзы работают как естественные телескопы.

Среди обнаруженных есть галактика с $z \sim 9,6$, которая возникла, когда Вселенной было менее **500 млн лет**. Соответствующая работа так и называется "A highly magnified candidate for a young galaxy seen when the Universe was 500 Myrs old". **Несколько позднее была открыта галактика при $z \sim 11$, т.е. образовавшаяся тогда, когда возраст Вселенной был меньше 410 млн лет или даже 380 млн лет при большем значении параметра Хаббла.**

Недавно была открыта галактика GN-z11 с несколько более высоким красным смещением, $z = 11,1$. Несмотря на свою молодость, GN-z11 имеет (имела) необычайно высокую светимость. Как отмечается в работе, излучение этой галактики в ультрафиолетовом диапазоне примерно в три раза выше, чем излучение галактик с красными смещениями $z = 6 \div 8$. Также отмечается, что к настоящему времени обнаружено около 800 галактик при $z = 7 \div 8$.

В недавней публикации сообщается об открытии галактики с рекордно большим на настоящее время красным смещением: $z = 13,2_{-1,6}^{+1,9}$, что отвечает возрасту Вселенной менее **300 млн лет**, даже при меньшем значении постоянной Хаббла. Кроме того, сообщается об обнаружении значительного количества галактик с красными смещениями более семи.

Таким образом, можно заключить, что Вселенная была очень плотно заселена при $z > 6$, хотя мы видим лишь наиболее яркие галактики, составляющие небольшую долю от общего количества. В стандартной модели не ожидалось столь раннего интенсивного рождения галактик.

Квazarы и сверхмассивные чёрные дыры при $z > 6$

Другим, гораздо более поразительным, примером рано образовавшихся астрофизических объектов являются наблюдаемые при больших z квазары. В настоящее время известно около 40 квазаров с $z > 6$, каждый из которых содержит чёрную дыру с массой порядка **1 млрд M_{\odot}** . **Существование таких ЧД, возникших, в то время, когда Вселенная была заметно моложе 1 млрд лет, находится в сильнейшем противоречии со стандартными моделями их образования и роста.** Об открытии шести (или, возможно, девяти) новых квазаров при больших z было сообщено недавно.

Максимальное красное смещение среди обнаруженных квазаров **$z = 7,085$** , т.е. такой квазар возник ранее, чем Вселенная достигла возраста в **770 млн лет**. **Светимость этого квазара $L = 6,3 \times 10^{13} L_{\odot}$, а его масса $M = 2 \times 10^9 M_{\odot}$.** Столь быстрое образование сверхмассивной чёрной дыры выглядит по меньшей мере проблематичным в рамках канонической теории.

В 2015 г. было открыто ещё более массивное "чудовище" при красном смещении $z = 6,3$ с невероятно огромной массой ~ 12 млрд M_{\odot} . Его светимость в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах в несколько раз превосходит светимости обнаруженных ранее квазаров при $z > 6$. **Как отмечалось, серьёзнейшие проблемы возникают уже с попытками объяснения образования более лёгких и не таких мощных квазаров. Однако существование этого монстра многократно усиливает противоречие со стандартной теорией.**

Пыль, сверхновые и гамма-всплески

Вселенная при $z > 6$ оказалась сильно запылённой, что также является довольно неожиданным. Для образования пыли требуется длительная последовательность различных процессов. Сначала должны взорваться сверхновые, чтобы выбросить в межзвёздное пространство тяжёлые элементы, так называемые металлы (любые химические элементы с массовым числом больше, чем у гелия, в астрономии называются металлами). Далее при охлаждении атомы металлов связываются в молекулы. И лишь потом молекулы образуют макроскопические частицы вещества — пылинки.

Пыль наблюдается в нескольких ранних галактиках, например в галактиках HFLS3 при красном смещении $z = 6,34$ и A1689-ZD1 при $z = 7,55$. Обнаруженная методом гравитационного линзирования галактика A1689-zD1 является самой ранней из известных галактик, в которых замечено межзвёздное вещество. Возраст Вселенной, отвечающий этому красному смещению, всего лишь **500 млн лет**. На основе этих и других наблюдений составлен каталог "запылённых" галактик при больших красных смещениях и сделан вывод, что **количество этих источников пыли примерно на порядок выше, чем предсказывается канонической моделью эволюции галактик.**

Как отмечалось, исходным источником пыли в межзвёздной среде являются взрывы звёзд. **Однако, согласно работе [49], даже при предположении максимального вклада сверхновых в создание пыли наблюдаемое количество пыли в галактике A1689-zD1 требует необычайно мощного роста исходных зёрен-пылинок.** В свою очередь для этого необходимо, чтобы в данной галактике плотность как горячего, так и холодного газа там, где идёт рост зародышей пыли, была бы сравнимой с плотностью газа в галактиках с центральными квазарами. Хотя это и не исключено, но верхние ограничения на непрерывный спектр излучения пыли от галактик при $6,5 < z < 7,5$ показывают, что такие условия не выполняются для большинства галактик. Интересно, не указывает ли последнее обстоятельство на то, что и в галактике A1689-zD1 имеется центральный квазар, который по каким-то причинам не виден?

В работе [50] изучался, помимо сверхновых, другой возможный источник пыли, а именно звёзды на асимптотической ветви гигантов (Asymptotic Giant Branch — AGB). **Результат также оказался пессимистическим: такие звёзды недостаточно многочисленны и слабо эффективны для создания наблюдаемого количества пыли при $z = 4 \div 7,5$.** Вывод исследования состоит в том, что сверхновые могли бы обеспечить необходимое количество пыли, но лишь в том случае, если бы их эффективность была близка к теоретически максимальной величине. Наиболее правдоподобная возможность в этом случае состоит в быстром росте зародышей пыли в межзвёздной среде. Отметим, забегая вперёд, что рассматриваемый ниже механизм рождения тяжёлых чёрных дыр тоже ведёт к нестандартному первичному нуклеосинтезу, обогащающему первичную плазму металлами. Возможно, это позволит решить проблему запылённости ранней Вселенной. **Заметим также, что, помимо первичных чёрных дыр, механизм, предложенный Долговым, может привести к значительному количеству плотных звездоподобных объектов — зародышей будущих сверхновых при $z \sim 10$ и даже ранее.** Кроме того, не исключено, что количество сверхновых в ранней Вселенной значительно выше, чем ожидалось. Аргументом в пользу этого являются данные о значительном количестве металлов вокруг ранних квазаров. В соответствии со стандартной космологией при первичном нуклеосинтезе производятся только лёгкие элементы, вплоть до ${}^4\text{He}$, и ничтожные количества Li, Be, B, в то время как более тяжёлые элементы производятся в звёздах и рассеиваются в межзвёздном пространстве при взрывах звёзд. В соответствии с этой картиной ранее сотворения квазаров или одновременно с ним должно идти интенсивное звездообразование. Далее требуется, чтобы многие из звёзд превратились в сверхновые и обогатили межзвёздное пространство металлами, в дальнейшем образовавшими молекулы и пыль. **(Как известно, все мы — пыль от взрыва недалёкой от Солнца сверхновой, но в гораздо более позднюю эпоху.) Другая возможность обогатить межзвёздную среду металлами — это нестандартный нуклеосинтез с большой исходной плотностью барионов.**

Наблюдения гамма-всплесков также указывают на неожиданно огромное количество сверхновых при больших красных смещениях. Наибольшее красное смещение, при котором был зарегистрирован гамма-всплеск, равно **9,4**. Кроме того, имеется ещё несколько гамма-всплесков при меньших, но всё равно больших z . Необходимая для объяснения наблюдений скорость рождения звёзд не вписывается в рамки канонической теории. Тем не менее, хотя теория и не позволяет, гамма-всплески и вообще сверхновые при больших красных смещениях видны, а значит, скорость рождения звёзд заметно выше ожидаемой. **Эти звёзды должны быть сотворены одновременно с квазарами или даже раньше. Тогда они дадут множество сверхновых, которые в свою очередь обогатят межзвёздное пространство необходимым количеством наблюдаемых металлов.**

Старые звёзды в Млечном Пути

В последнее время намного повысилась точность определения возраста звёзд методами ядерной хронологии. Благодаря этому возраст нескольких звёзд в Галактике был определён гораздо более аккуратно и оказался заметно выше, чем полагалось ранее. Ниже мы приведём несколько наиболее впечатляющих результатов. Используя старые ядерные хронометры, урановый и ториевый, и сравнивая обилия соответствующих элементов между собой, а также с обилиями ряда других стабильных элементов, удалось **оценить возраст звезды BD+170 3248 (бедной металлами звезды гало): $t = (13,8 \pm 4)$ млрд лет.** (Для сравнения, возраст внутреннего гало Галактики **$(11,4 \pm 0,7)$ млрд лет.**) Ошибки в измерении возраста всё ещё велики, но расхождение центральных значений вызывает тревогу или же большой интерес. Похожий результат дало измерение возраста звезды HE 1523-0901 в гало Галактики, который оказался равен **13,2 млрд лет.** В этих измерениях впервые был использован целый ряд ядерных хронометров, таких как отношения U/Th, U/Ir, Th/Eu и Th/Os. Погрешность в определении возраста, по-видимому, составляет около 2 млрд лет.

Наиболее поразительным представляется результат, согласно которому возраст HD 140283 (субгиганта с дефицитом металлов, обладающего большой скоростью) составляет **$(14,46 \pm 0,31)$ млрд лет.** Центральное значение возраста превосходит возраст Вселенной на два стандартных отклонения, если $H = 67,3$ км (с Мпк)⁻¹ и возраст Вселенной $t = 13,8$ млрд лет, и более чем на девять стандартных отклонений, если $H = 74$ км (с Мпк)⁻¹ и $t = 12,5$ млрд лет. Большая скорость этого субгиганта, возможно, указывает на его раннее, догалактическое, происхождение.

Разумеется, звезда не может быть старше Вселенной, и возможным объяснением указанного противоречия мог бы быть необычный начальный химический состав этой, а также других старых звёзд. Обычно считается, что химический состав первых звёзд ~ **25 % ^4He и 75 % H** , в соответствии с тем, что говорят первичный нуклеосинтез и данные наблюдений об обилиях лёгких элементов. Однако в сценарии, который мы опишем ниже, в относительно небольшой части пространства первичный нуклеосинтез может привести к рождению вполне заметного количества ядер намного тяжелее гелия. Кроме того, ранние сверхновые, обогатившие межзвёздную среду металлами, тоже могли изменить химический состав более поздних звёзд таким образом, чтобы они заметно скорее пришли к их теперешнему состоянию. Разумеется, эта гипотеза требует численного расчёта звёздного нуклеосинтеза при нестандартном начальном химическом составе.

Отметим в заключение, что кроме всех этих старых звёзд в Млечном Пути была открыта планета возрастом **10,6±1.5 млрд лет**. (Для сравнения, возраст Земли всего лишь 4,54 млрд лет.) Рождению такой вдвое дольше, чем Земля, прожившей "**старушки**" должны предшествовать взрыв сверхновой и образование молекул и пыли, что тоже требует немалого времени.

Сверхмассивные чёрные дыры в наши дни

Астрономические наблюдения убедительно говорят о том, что в центре каждой крупной галактики находится сверхмассивная чёрная дыра. **В гигантских эллиптических и компактных линзовидных галактиках массы центральных ЧД могут быть более 1 млрд M_{\odot} .** В спиральных галактиках, таких как Млечный Путь, массы чёрных дыр заметно меньше, всего лишь порядка нескольких миллионов солнечных масс.

Считается, что чёрные дыры в центрах галактик возникли в результате аккреции на какой-то массивный зародыш. Но оценки роста масс ЧД в этом процессе показывают, что **эффективность аккреции недостаточно высока, чтобы создать такие гиганты.** Эта проблема напоминает проблему образования сверхмассивных чёрных дыр в ранней Вселенной, но здесь она не столь ярко выражена, так как доступное время значительно больше. Тем не менее имеются яркие примеры, которые никак не вписываются в механизм аккреции.

Как правило, масса центральной ЧД составляет около 0,1 % массы балджа, но в **некоторых галактиках, например в NGC 1277, масса ЧД фантастически велика $\sim 1,7 \times 10^{10} M_{\odot}$, или 60 % массы балджа.** Происхождение такой ЧД совершенно непонятно.

Имеется ряд аналогичных примеров. Несмотря на то что сверхмассивные чёрные дыры хорошо коррелируют с массой галактики, в которой они находятся, появляется всё больше указаний на наличие немалого числа нарушителей этого закона. Примерами таковых являются галактики **Henize2-10**, **NGC 4889**, и **NGC 1277**, в которых **массы сверхтяжёлых чёрных дыр по крайней мере на порядок выше**, чем можно было бы ожидать на основании данных о величине массы их галактики-хозяйки.

Открытие сверхкомпактной карликовой галактики [66] тоже не согласуется со стандартной моделью. Эта галактика возрастом 10 млрд лет обогащена металлами. Возможно, в её центре находится массивная чёрная дыра. Динамическая масса галактики $2 \times 10^8 M_{\odot}$, а её радиус всего лишь 24 пк, так что её плотность чрезвычайно высока. По данным космического рентгеновского телескопа "Чандра" (Chandra) в центре галактики находится переменный рентгеновский источник со светимостью $L_x \sim 10^{38}$ эрг s^{-1} . Это может быть активное галактическое ядро, связанное с массивной ЧД, или двойная рентгеновская система с малой массой (a low-mass X-ray binary). Результаты анализа оптического спектра свидетельствуют о том, что система весьма старая, возрастом порядка 10 млрд лет или более. Содержание металлов в ней близко к солнечному, однако с повышенным количеством [Mg/Fe] и сильно увеличенным [N/Fe]. **Это указывает на возможное самообогащение лёгких элементов. Такое самообогащение могло бы возникнуть в тесных звёздных системах. С другой стороны, оно могло быть результатом нестандартного первичного нуклеосинтеза при очень высоком барионно-фотонном отношении.**

Обнаружена ещё одна чёрная дыра-переросток в галактике с умеренной массой. Масса ЧД в активном галактическом ядре была оценена как $M = (3,5 \pm 0,8) \times 10^8 M_{\odot}$ при светимости за счёт аккреции $L_{\text{AGN}} = (5,3 \pm 0,4) \times 10^{45} \text{ эрг с}^{-1} \sim 10^{12} L_{\odot}$, что составляет 12 % эддингтоновской светимости. Всё это намного больше, чем можно было бы ожидать от галактики столь скромного размера. Результаты противоречат общепринятой картине, согласно которой эта галактика должна была недавно трансформироваться из дисковой звездо-образующей галактики в пассивно эволюционирующую галактику раннего типа.

Наиболее впечатляющим примером сверхмассивной чёрной дыры, возникшей ниоткуда, является обнаруженная чёрная дыра, находящаяся в практически пустом пространстве.

Недавно появилось сообщение о существовании большой галактики, в которой доминирует тёмная материя. Оценка полной массы галактики приводит к величине $\sim 10^{12} M_{\odot}$ при весьма низкой светимости. Отношение массы к светимости позволяет сделать вывод о том, что **доля невидимой (тёмной) материи в этой галактике может быть весьма велика, примерно 98 %**. Происхождение такой тёмной галактики не очень понятно. Представляется интересным выяснить, не находится ли в её центре сверхмассивная чёрная дыра, однако не питающая квазар из-за отсутствия обычной барионной материи. Или эта материя уже давно была "съедена" квазаром?

Описанные выше наблюдения ставят под сомнение стандартный сценарий образования сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик за счёт аккреции на центральную часть галактики. Гораздо более убедительной выглядит обратная картина, согласно которой раньше возникает сверхмассивная чёрная дыра, впоследствии служащая центром конденсации вещества, образующего галактику. Было бы интересно, если бы удалось показать, что тип галактики (спиральная или эллиптическая) определяется исходной массой ЧД.

Неожиданным аргументом в пользу первичного происхождения сверхмассивных чёрных дыр стало обнаружение "квартета" квазаров при красном смещении $z \sim 2$, т.е. не во вполне современной Вселенной, но и не столь ранней, как при $z = 5 \div 10$.

Согласно утверждению предположительно все галактики когда-то проходили квазарную фазу, при которой их светимость обеспечивалась аккрецией на сверхмассивную чёрную дыру. Однако, в силу того что квазары — редкие объекты, разнесённые на космологические расстояния, вероятность обнаружить квазарный квадруполь равна всего лишь $\sim 10^{-7}$. Это в свою очередь требует, чтобы доминирующая часть массивных структур в далёкой Вселенной получила огромное количество холодного газа с плотностью около 1 см^{-3} , что находится в сильном противоречии с результатами космологических симуляций.

Согласно общепринятым воззрениям сверхмассивные чёрные дыры, находящиеся в центрах галактик, образуются вследствие аккреции, но появляющиеся новые данные явно противоречат этой классической картине.

Недавно был опубликован интересный результат о наблюдении сверхтяжёлой чёрной дыры на расстоянии, отвечающем красному смещению $z = 0,3504$, т.е. на расстоянии примерно в 1 Гпк, массой около 180 млн M_{\odot} или, как написано в статье, $\log M_{\text{вн}} = (8,21 \pm 0,02)M_{\odot}$. Эта чёрная дыра смещена от ядра галактики на расстояние $1,260 \pm 0,05$ кпк и движется прочь со скоростью 175 ± 25 км с⁻¹. Авторы выдвигают гипотезу о том, что обнаруженная убегающая ЧД образовалась в результате слияния двух более лёгких чёрных дыр в галактическом центре. Этот процесс мог бы обеспечить значительный импульс отдачи, что в свою очередь привело бы к наблюдаемому выбрасыванию суммарной чёрной дыры. Намного более естественным представляется другой вариант, а именно: первичная сверхмассивная чёрная дыра, которая не обзавелась собственной галактикой (как мы видели выше, такие чёрные дыры есть), в процессе своих космических блужданий просто проходит, как медведь-шатун в астрономическом масштабе, через чужую галактику, имеющую собственную ЧД в центре.

Чёрные дыры с массами порядка солнечной

Распределение чёрных дыр, наблюдаемых в Млечном Пути, по массам имеет весьма странный вид с точки зрения стандартной теории. Согласно работе [72] массы ЧД неожиданно высоки и сосредоточены в довольно узком интервале, $(7,8 \pm 1,2)M_{\odot}$. Этот результат согласуется с другими наблюдениями [73], в которых пик распределения также находится при $M \sim 8M_{\odot}$, тогда как чёрные дыры с массой ниже $5M_{\odot}$ практически отсутствуют и наблюдается резкое убывание их количества при $10M_{\odot}$.

Такое поведение необъяснимо, если чёрные дыры образуются в результате звёздного коллапса, как обычно предполагается.

Проблема МАЧО

Похожая и, возможно, также связанная с чёрными дырами проблема — это проблема природы МАЧО (MACHO — Massive Astrophysical Compact Halo Objects) — невидимых или очень слабо светящихся объектов с массой порядка половины солнечной, открытых коллаборациями MACHO и EROS (Experience pour la Recherche d'Objets Sombres) с помощью гравитационного микролинзирования. МАЧО обнаружены в галактическом гало, в направлении на центр Галактики и недавно в галактике Андромеда (M31). Плотность этих объектов значительно превышает ожидаемую в случае, если бы они были звёздами малой светимости. Однако она недостаточно высока для того, чтобы объяснить всю массу тёмной материи, находящейся в гало.

Не вызывает сомнения то, что МАЧО существуют. Их плотность сравнима с плотностью тёмной материи в гало Галактики, но их природа не ясна. В принципе МАЧО могут являться коричневыми карликами, мёртвыми звёздами или первичными чёрными дырами. Однако коричневые карлики и мёртвые звёзды в таком количестве не могут возникнуть в результате нормальной звёздной эволюции, тогда как первичные чёрные дыры или компактные звездоподобные объекты, пришедшие к нам из ранней Вселенной, вполне могут существовать.

Чёрные дыры промежуточной массы в современной Вселенной

В современной Вселенной обнаруживаются так называемые чёрные дыры промежуточной массы в несколько десятков, сотен и тысяч масс Солнца. Их рождение в канонической астрофизике также вызывает множество серьёзных вопросов.

Например, необычные свойства недавно открытой сверхновой iPTF13bvn в близкой галактике NGC5806 могут быть объяснены предположением, что компаньоном предка этой сверхновой была тяжёлая чёрная дыра, которая могла бы возникнуть в результате коллапса звезды с массой свыше $70 M_{\odot}$. В качестве альтернативы, тяжёлые первичные чёрные дыры, механизм рождения которых предложен Долговым, являются прекрасными кандидатами на роль таких компаньонов. В последнее время появились указания на то, что в центре шаровых скоплений находятся чёрные дыры с промежуточными массами, т.е. с массами в несколько тысяч масс Солнца. Все эти данные хорошо укладываются в обратную картину формирования галактик, состоящую в том, **что чёрные дыры не образуются в результате коллапса вещества в центре галактик, а, наоборот, служат зародышами формирования разнообразных скоплений звёзд.** Малые чёрные дыры, массой $(10^3 — 10^4) M_{\odot}$, натягивают на себя маленькие "галактички".

Проблемы с источниками гравитационных волн, открытыми LIGO

11 февраля 2016 г. обсерватория гравитационных волн LIGO объявила об открытии гравитационных волн, излучённых в процессе слияния двух тяжёлых чёрных дыр (GW 150914). Массы исходных чёрных дыр 36 и $29 M_{\odot}$. Масса образовавшейся в результате слияния чёрной дыры $62 M_{\odot}$. Собственный угловой момент "суммарной" чёрной дыры (спин) близок к максимальному: $s = 0,67$, тогда как спины исходных чёрных дыр малы, совместимы с нулем.

4 января 2017 г. LIGO зарегистрировала событие GW 170104 с очень похожими свойствами. Массы сливающихся чёрных дыр $31 M_{\odot}$ и $19,4 M_{\odot}$. Масса конечной чёрной дыры $M = 48,7 M_{\odot}$, а излучённая энергия $\Delta E = 2,0 M_{\odot}$. Спины сталкивающихся чёрных дыр совместимы с нулём, тогда как спин образовавшейся ЧД довольно велик, $s = 0,64$.

Форма сигналов, зарегистрированных в событиях GW150914 и GW 170104, находится в замечательном согласии с предсказанием общей теории относительности (ОТО) о излучении гравитационных волн при слиянии двух шварцшильдовских чёрных дыр, так что эти результаты представляют собой не только первые непосредственные регистрации гравитационных волн, но и первую проверку ОТО для сильных полей, когда метрика сильно отличается от плоской, как это имеет место в поле Шварцшильда вблизи горизонта. Доказательство справедливости ОТО для сильных полей привело, однако, к возникновению новых проблем, связанных с неожиданными свойствами сталкивающихся чёрных дыр, особенно ярко проявившимися в первом событии, GW 150914. Речь пойдёт о следующих трёх проблемах стандартной теории.

- 1. Каково происхождение столь тяжёлых чёрных дыр (с массами $\sim 30 M_{\odot}$)?**
- 2. Как объяснить низкие спины сливающихся чёрных дыр?**
- 3. Как могла возникнуть двойная система чёрных дыр из предположительно двойной звёздной системы?**

Каноническая теория возникновения чёрных дыр наталкивается на значительные трудности в попытке объяснения этих наблюдений.

Проблема происхождения тяжёлых чёрных дыр. Обычно предполагается, что чёрные дыры рождаются в процессе звёздного коллапса, хотя полной последовательной теории до сих пор не существует. Для того чтобы возникла чёрная дыра с массой, скажем, в $30 M_{\odot}$, звезда-предок должна иметь очень большую массу, $M > 100 M_{\odot}$, и низкое содержание металлов во избежание потери слишком большой доли массы в процессе эволюции. Столь тяжёлые звёзды могут присутствовать в молодых галактиках, где идёт активное звездообразование, но такие галактики пока не обнаружены в достаточно большом количестве.

Низкие значения спинов сливающихся чёрных дыр в первом (GW 150914) и третьем (GW 170104) событиях LIGO. Малые спины сливающихся чёрных дыр сильно ограничивают возможные астрофизические механизмы рождения таких ЧД в процессе звёздного коллапса.

Наконец, последняя по порядку, но не по значимости проблема образования гравитационно-связанной двойной системы ЧД.

Системы двойных звёзд довольно часто наблюдаются в галактиках. Считается, что они образуются из общего гравитационно-связанного облака межзвёздного газа. Если чёрная дыра возникает при звёздном коллапсе, как обычно предполагается, то ничтожная несферичность коллапса приведёт к очень большому импульсу отдачи и, соответственно, к большой скорости чёрной дыры и разрушению двойной системы. **Косвенным указанием на такой процесс являются наблюдаемые высокие скорости пульсаров в Галактике, достигающие 1000 км/с, тогда как средние скорости звёзд составляют всего лишь 200-300 км/с.** Прямое образование чёрных дыр из звёзд третьего поколения с последующим формированием двойной системы из пары ($\sim (30 + 30)M_{\odot}$) рассматривалось в литературе, и было показано, что оно весьма маловероятно.

Все эти проблемы просто и экономно решаются, если наблюдаемые источники гравитационных волн являются первичными чёрными дырами, созданными посредством механизма, предложенного Долговым с соавторами. Такой механизм позволяет легко сотворить достаточное количество чёрных дыр с массами в несколько десятков масс Солнца. Эти чёрные дыры рождаются с нулевой скоростью в сопутствующей системе. Поэтому вероятность их взаимного захвата не подавлена большой относительной скоростью, особенно после того, как ЧД потеряют её, например, вследствие динамического трения в плотной первичной плазме. **Спин таких ЧД близок к нулю, так как в ранней Вселенной отсутствуют вращательные возмущения.**

Раннее рождение тяжёлых и сверхтяжёлых чёрных дыр и компактных звездоподобных объектов

Используемый в настоящем обзоре механизм возникновения массивных чёрных дыр и компактных звездоподобных объектов в ранней Вселенной был предложен в работе Долгова с соавторами. Основная идея этого механизма состоит в небольшой модификации механизма бариогенезиса Аффлекса и Дайна (БАД) Это уникальный механизм, который естественным образом приводит к очень большой величине барионной асимметрии, вплоть до $\beta_{AD} = n_B/n_\gamma \sim 1$, тогда как наблюдаемая величина асимметрии на много порядков меньше, $\beta_{obs} = n_B/n_\gamma = 6 \times 10^{-10}$. Здесь n_B , n_γ — соответственно плотности числа барионов и фотонов микроволнового фона. Обычно усилия теоретиков направлены на то, чтобы максимально увеличить эффективность механизма генерации избытка вещества над антивеществом, а в рамках БАД приходится эту эффективность подавлять.

Существенным ингредиентом БАД является гипотеза о существовании комплексного скалярного поля χ с ненулевым барионным числом. Предполагается также, что масса этого поля m_χ мала по сравнению с параметром Хаббла на существенном этапе эволюции. Кроме того, считается, что потенциал поля χ имеет так называемые плоские направления, вдоль которых энергия поля не изменяется. Все эти условия, так же как и несохранение барионного числа, естественно реализуются в суперсимметричных моделях, однако суперсимметрия в полном объёме совсем необязательна.

Суперсимметрия (SUSY) предсказывает существование скалярных бозонов с ненулевым барионным числом $B \neq 0$. Такие бозоны могут конденсироваться вдоль плоских направлений кватерничного (4-ой степени) потенциала, что является общим свойством потенциала в таких моделях:

$$U_\chi(\chi) = \lambda |\chi|^4 (1 - \cos 4\theta)$$

Может быть также массовый член, $m^2 \chi^2 + m^{*2} \chi^{*2}$, который имеет другой набор плоских направлений:

$$U_m(\chi) = m^2 |\chi|^2 [1 - \cos(2\theta + 2\alpha)],$$

где $\chi = |\chi| \exp(i\theta)$ и $m = |m| \exp(i\alpha)$. Если $\alpha \neq 0$, C и CP нарушаются.

В grand унифицированных (GUT) SUSY моделях барионное число поля χ естественно не сохраняется. Это выражается неинвариантностью $U(\chi)$ относительно фазового вращения $\chi \rightarrow \chi \exp(i\theta)$.

Барионный заряд χ определяется следующим выражением:

$$B_\chi = \dot{\theta} |\chi|^2$$

И является аналогом механического углового момента в двумерной комплексной плоскости $[\text{Re}\chi, \text{Im}\chi]$. Распады χ передают барионный заряд, аккумулированный в ротационном движении χ в барионный заряд кварков в B -сохраняющем процессе. Однородное поле $\chi = \chi(t)$ в метрике Фридмана удовлетворяет уравнению

$$\ddot{\chi} + 3H \dot{\chi} + \frac{dU}{d\chi^*} = 0$$

где U — потенциал поля χ , $H = \dot{a}/a$ — параметр Хаббла, здесь a — космологический масштабный фактор. Уравнение (4) формально совпадает с ньютоновским уравнением движения точечной частицы в двумерном пространстве $(\text{Re}\chi, \text{Im}\chi)$ под действием силы $F = -U'$ в среде с жидким трением $\sim \dot{\chi}$. Если потенциал U симметричен относительно вращений, то сохраняется угловой момент, который в данном описании совпадает с плотностью барионного числа n_B . Эта аналогия позволяет представить эволюцию $\chi(t)$ и барионного числа при известной форме потенциала.

На стадии космологической инфляции, когда масштабный фактор возрастает почти экспоненциально, $a(t) \sim \exp(Ht)$, а наклон потенциала мал по сравнению с темпом расширения мира, т.е, квантовые флуктуации χ оказываются сильнее, чем классическая сила, возвращающая χ в положение механического равновесия, среднее значение квадрата поля возрастает со временем, $\chi^2 = H^2 t / (2n)^2$. Это означает, что поле χ со значительной вероятностью будет иметь большую амплитуду вдоль долины, где потенциал лишь слабо увеличивается (либо совсем не изменяется, если масса χ остаётся равной нулю).

Когда инфляция закончится и параметр Хаббла начнёт убывать со временем как $H \sim 1/t$, эффект квантовых флуктуации уменьшится и поле χ вернётся в минимум потенциала, подчиняясь уравнению движения. Если, скатываясь вниз, χ по какой-либо причине приобретёт ненулевой угловой момент, то, говоря иными словами, барионное число χ станет отличным от нуля. В дальнейшем при распадах χ это накопленное барионное число приведёт к асимметрии между количеством кварков и антикварков, причём величина асимметрии может быть весьма значительной.

Причиной возникновения ненулевого n_B могут быть квантовые флуктуации поперёк долины либо различие в направлениях квартичной, $\sim \chi^4$, и квадратичной, $\sim \chi^2$, долин. При большой амплитуде движение χ управляется квартичной долиной и является направленным вниз вдоль неё. При уменьшении $|\chi|$ квадратичный потенциал становится доминирующим и поле χ переходит в эту долину. Если направления долин различны, то при переходе из одной долины в другую возникает поперечное движение χ , т.е. величина θ становится отличной от нуля и, соответственно, возникает ненулевая плотность барионного числа.

В этом заключается суть классического механизма БАД. Для его реализации суперсимметрия в полном объёме не обязательна. Необходимо лишь наличие скалярного поля относительно малой массы, $m_\chi < H$, с ненулевым и несохраняющимся барионным числом. Накопленное барионное число поля χ переходит в барионное число кварков при распадах χ , в которых барионное число может и сохраняться.

Модификация БАД состоит во введении дополнительного взаимодействия χ с полем инфлатона Φ в виде

где g — безразмерная константа связи, Φ_1 — значение поля инфлатона, достигавшееся во время инфляции. Единственное требуемое условие — это выбор значения Φ_1 , после достижения которого инфляция ещё длилась достаточно долго, чтобы могли сформироваться объекты астрофизически значимого размера с высокой барионной плотностью

Наличие введенного взаимодействия коренным образом меняет эволюцию $\chi(t)$. Когда значение Φ находилось далеко от Φ_1 , эффективная масса χ была велика и поле удерживалось вблизи минимума потенциала при $\chi = 0$. Однако при $\Phi \sim \Phi_1$ калитка к большим значениям χ была открыта и поле могло убежать довольно далеко от нуля. После того как Φ пройдет через Φ_1 и разность $|\Phi - \Phi_1|$ превзойдет величину H , поле χ будет вынуждено вернуться обратно к нулю, но, возвращаясь обратно, оно приобретет значительный угловой момент, а значит, и барионное число в соответствии с описанной выше картиной.

Если калитка к "плоскому направлению" открывается на довольно малое время, то вероятность прорваться к большим значениям χ окажется невелика и объекты с большой плотностью барионов будут занимать незначительную часть объема Вселенной, тогда как остальная, занимающая намного больший объем, часть Вселенной, будет иметь обычную величину барионной асимметрии $\beta \sim 6 \times 10^{-10}$, созданную малым полем χ , которое не успело просочиться на большие значения. Когда инфлатон Φ пройдет значение Φ_1 , эффективная масса поля χ снова станет велика и поле постепенно вернется к нулевому значению в минимуме потенциала, по пути создав огромную величину барионной асимметрии.

Вначале в результате этого процесса возникнут лишь неоднородности в химическом составе первичного вещества (*isocurvature fluctuations*), так как кварки в очень ранней Вселенной являются безмассовыми. Однако после фазового перехода квантовой хромодинамики (КХД) от свободных кварков к фазе невылетания (конфайнмента), в которой кварки образуют массивные нуклоны, неоднородности в распределении барионного числа переходят в неоднородности плотности энергии/массы.

В результате при температуре 100-200 МэВ во Вселенной возрастом более 10^{-5} — 10^{-4} с возникают либо компактные звездоподобные объекты, либо первичные чёрные дыры. Выбор между ними определяется соотношением между массой объекта и джинсовской массой. Такие объекты уместно назвать *пузырями с большой плотностью барионов (ПБПБ) (High Baryon Bubbles — HBB)*. Распределение ПБПБ по массам можно рассчитать с помощью диффузионного уравнения Старобинского, обобщённого для случая комплексного поля χ . Форма распределения практически не зависит от модели. Она определяется тем, что рождение пузырей происходит на стадии инфляции, и является логнормальной:

$$\frac{dN}{dM} = \mu^2 \exp\left(-\gamma \ln^2 \frac{M}{M_0}\right)$$

При дальнейшем распаде χ -мезона на кварки с сохранением B генерируется большая барионная асимметрия, но лишь в объектах небольшого, примерно звёздного, размера. Интересно, что в этой модели можно ожидать естественного, хотя и не обязательного, появления сравнимого с числом барионных объектов числа компактных объектов из антиматерии, которые могут вполне обильно заселять нашу Галактику и её гало. Количество антибарионов может быть сравнимым с количеством наблюдаемых барионов в обычной форме и даже превосходить его, но не противоречить, тем не менее, существующим ограничениям, так как антиматерия будет находиться в виде компактных звездоподобных объектов, не говоря уже о чёрных дырах. Максимальная масса ПБПБ к моменту окончания инфляции при $t = t_{\text{end}}$ достигнет величины

$$M_{\text{inf}}^{\text{max}} = \frac{m_{PI}^2}{2H} \exp[3H(t_{\text{end}} - t_{\text{in}})]$$

Рассмотренный в этом разделе механизм естественным образом объясняет лавину удивительных результатов наблюдений последних лет, описанных выше, и предсказывает (при подгонке параметров) достаточное количество двойных систем тяжёлых чёрных дыр - источников наблюдаемых гравитационных волн. При таком широком спектре масс, заметно отличающемся от предполагаемого ранее, вся тёмная материя (или, по крайней мере, её значительная часть) могла бы состоять из тяжёлых первичных чёрных дыр, как предполагалось в давних работах. В последнее время в связи с открытием LIGO эта гипотеза приобрела новую популярность

В приближении мгновенного разогрева, когда Вселенная быстро достигла температуры T_h , плотность энергии выразится через T_h как

$$\rho = \frac{\pi^2}{30} g T_h^4$$

где $g \sim 100$ — число релятивистских степеней свободы в первичной плазме. Учитывая все факторы, получим следующую оценку максимальной массы чёрной дыры, образовавшейся впоследствии при фазовом переходе в КХД:

$$M_{\text{inf}}^{\text{max}} = \left(\frac{90}{32\pi^3 g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{m_{\text{Pl}}^2}{T_h^2} \exp[3H(t_{\text{end}} - t_{\text{in}})]$$

Отсюда следует, что для создания ПЧД с массой $> 10^4 M_\odot$ необходимо выполнение условия $H(t_{\text{end}} - t_{\text{in}}) < 36$ при предположении, что все остальные множители в правой части равенства порядка единицы. Напомним для сравнения, что минимальная длительность инфляции для создания нашей Вселенной около $H\Delta t_{\text{inf}} \sim 70$.

Современное состояние проблемы роста затравочных (родительских) чёрных дыр в центрах галактик описано в предположении дельта-образности функции распределения по массам в начальный момент с центральной массой $M > 10^4 - 10^5 M_\odot$. В работе предполагается, что эти чёрные дыры были рождены в гало тёмной материи при $z > 15$ и быстро росли за счёт аккреции газа. Если бы масса гало была меньше, чем $\sim 10^{12} M_\odot$, то роста чёрной дыры практически не происходило бы, тогда как в более массивном гало масса ЧД росла бы очень быстро. Окончательное значение массы чёрной дыры определялось саморегулирующимся соотношением между массой гало тёмной материи и массой центральной чёрной дыры. В этом процессе масса сверхмассивной ЧД могла вырасти до величины $10^8 M_\odot$, по достижении которой масса ЧД возрастала линейно, пропорционально массе окружающего гало.

- 1) массы зародышей чёрных дыр, не превышающие $< 10^5 M_0$, почти не эволюционируют, т.е. в интервале малых масс наблюдаемых ПЧД их спектр имеет исходную первичную форму;
- 2) чёрные дыры с изначальными массами в диапазоне $10^5 — 10^8 M_0$ быстро растут вплоть до значений масс $\sim 10^8 M_0$ и, возможно, даже больших;
- 3) массы чёрных дыр-зародышей галактик, превышающие $10^8 M_0$ при $z \sim 0$, растут пропорционально массе гало чёрной материи;
- 4) быстрый рост сверхмассивных ПЧД завершается при $z \sim 5$, после чего их массовая функция (для $M > 10^6$) линейно возрастает до современных значений.

Спасибо за внимание