

## К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В.А. РУБАКОВА

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Галактики в первый миллиард лет расширения Вселенной

О.К. Сильченко

Расширение Вселенной началось 13,8 млрд лет назад. Примерно через сотню миллионов лет после этого события газовая компонента материи Вселенной "созрела" до того, чтобы начать образовывать звёзды. Именно в ту эпоху следует искать начало возникновения во Вселенной популяции галактик — больших гравитационно связанных звёздных систем. Современные наблюдательные средства — наземные интерферометры и космические телескопы — позволяют напрямую исследовать свойства галактик на самых ранних стадиях эволюции, в первый миллиард лет после начала расширения Вселенной: их формы, размеры, массы, темпы звездообразования и активность их ядер. В данном кратком обзоре представлены последние результаты таких исследований.

**Ключевые слова:** эволюция галактик, ранняя Вселенная, астрономические наблюдения

PACS numbers: 98.62.Ai, 98.80.Bp, 98.80.Es

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2024.11.039810>

## Содержание

1. Введение (191).
  2. Ly-break галактики на  $z > 10$  (193).
  3. Как объяснить наблюдения галактик на  $z > 10$ , чтобы снять противоречие с  $\Lambda$ CDM-моделью? (195).
  4. Массивные галактики со вспышками звездообразования на  $z = 4-5$  (196).
  5. Сверхмассивные чёрные дыры и их хозяйские молодые галактики: что возникло раньше? (198).
- Список литературы (200).

## 1. Введение

Галактики — крупнейшие гравитационно связанные конгломераты звёзд и диффузной барионной материи, газа и пыли, — являются основным, массовым видимым населением Вселенной. Современные галактики демонстрируют разную морфологию (форму), разную кинематику (вращение) и разные массы звёздного компонента — от самых скромных, в сотни масс Солнца (ультракарликовые спутники Млечного Пути), до сотен миллиардов масс Солнца (центральные сфероидальные галактики в скоплениях). На рисунке 1 представлена схема классификации морфологических типов галактик, идея которой

была опубликована Эдвином Хабблом в окончательном виде в 1936 г. в его книге [1]. На самом грубом уровне галактики делятся на сфероидальные, с однородными структурой и звёздным населением, и на дисковые, обладающие большими звёздными дисками с неоднородной структурой. Радиальное протяжение дисков значительно больше их толщины, в первом приближении можно считать их тонкими и круглыми звёздными системами, кинетическая энергия которых сосредоточена в упорядоченном круговом вращении. Однако структурно дисковые галактики, как правило, двукомпонентны: в их центрах часто наблюдаются сфероидальные подсистемы, называемые балджами, и отнесение галактик к "ранним" или "поздним", уточнение их положения на схеме Хаббла в большой степени определяется вкладом балджа в полную светимость (массу) галактики.

Мы пользуемся схемой Хаббла для классификации галактик до сих пор; и более того, изображения, полученные хаббловским космическим телескопом (HST) с высоким пространственным разрешением для глубоких полей, показали, что примерно такую же морфологию, как вокруг нас, имеют большинство галактик Вселенной до красного смещения  $z \approx 1$ , т.е. в последние 8–9 млрд лет [2]. Но как именно развились такие формы галактик? Каково их происхождение? И с чего начинались галактики? На эти вопросы астрономы сейчас ищут ответы, причём источником наших знаний в данной области являются как космологические модели, предписывающие жёсткий временной масштаб появления галактик во Вселенной и фиксирующие их начальные формы и последующую эволюцию, так и прямые наблюдения галактик на разных стадиях их эволюции.

Предложение прямых наблюдений эволюции галактик на протяжении нескольких (многих) миллиардов лет только на первый взгляд кажется экзотическим. На

О.К. Сильченко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,  
Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация  
E-mail: sil@sai.msu.ru, olga@sai.msu.ru

Статья поступила 12 сентября 2024 г.,  
после доработки 31 октября 2024 г.

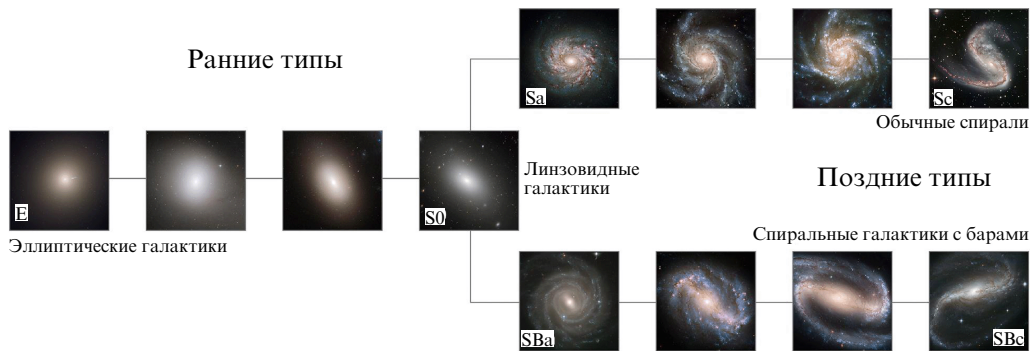


Рис. 1. Классификация морфологических типов галактик по Хаббл.

самом деле сама природа предоставляет нам практически исчерпывающие возможности последовательного изучения галактик в процессе их эволюции. Из-за конечности скорости света чем дальше от нас исследуемая галактика, тем дольше к нам шёл излучённый ею свет; соответственно, наблюдая её сейчас нашими локальными средствами, мы на самом деле видим её такой, какой она была миллиарды лет назад. Космологические модели, описывающие неравномерное расширение Вселенной, позволяют связать видимое красное смещение галактики с расстоянием до неё. Таким образом, измерив красное смещение галактики, мы одновременно оцениваем, сколько времени до нас шёл свет от неё. На красном смещении  $z = 0,5$  мы наблюдаем галактики такими, какими они были 5 млрд лет назад, на красном смещении  $z = 1$  — такими, какими они были 8 млрд лет назад... На красном смещении  $z = 5$  мы видим галактики всего через 1 млрд лет после Большого взрыва, а отсюда уже недалеко и до наблюдений самого события возникновения первых галактик.

Именно для наблюдений самых первых галактик был, в частности, спроектирован James Webb Space Telescope (JWST) [3], запущенный 25 декабря 2021 г. и давший первые научные результаты к концу 2022 г. JWST по сравнению с хаббловским космическим телескопом (HST) имеет два важнейших преимущества, которые позволяют надеяться на успешные наблюдения именно самых далёких, и самых первых, галактик. Во-первых, зеркало JWST почти в три раза больше зеркала HST; при наблюдениях из космоса, когда земная атмосфера своим дрожанием не размывает изображения наблюдаемых объектов, это позволяет не только собирать больше света, но и получать "картинки" с пространственным разрешением в три раза лучше при наблюдениях в одном и том же спектральном диапазоне. А значит, JWST способен увидеть слабые компактные объекты, которые в данных HST размываются на большее число пикселей приёмника и поэтому становятся плохо различимы над фоном неба. И второе достоинство JWST — его диапазон чувствительности сдвинут по отношению к диапазону HST в инфракрасную сторону спектра. Самые далёкие галактики имеют и самые большие красные смещения; это означает, что максимум в спектральном распределении энергии, в предположении нормального звёздного населения, у них сдвигается из оптической области спектра в ближнюю инфракрасную. Длинноволновым пределом наблюдений HST является фильтр  $H$  (1,6 мкм). У JWST два основных прибора: NIRCam своими семью фильтрами покрывает диапазон от 1 до 4,5 мкм, MIRI же

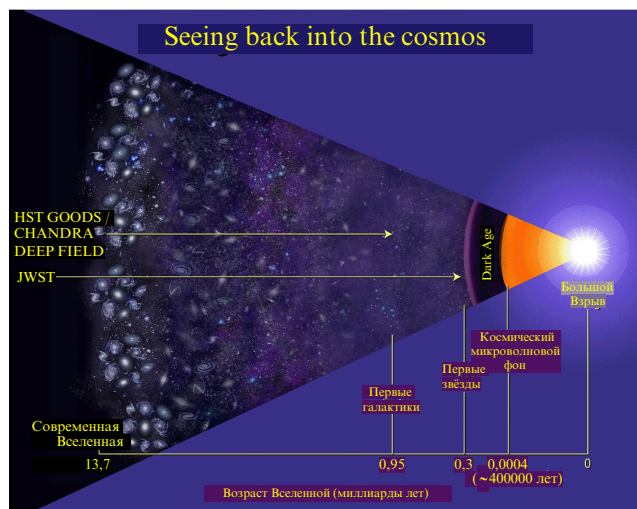


Рис. 2. Представления о временных масштабах эволюции Вселенной накануне старта проекта космического телескопа JWST. Credit: NASA/ESA и Ann Feild (STScI).

может наблюдать в диапазоне от 5 до 28 мкм. Оба инструмента имеют также и спектральную моду наблюдений. В результате первые же глубокие экспозиции NIRCam предъявили научному миру галактики на красных смещениях до, предположительно, 17.

А что же теоретики ожидали увидеть на таких красных смещениях? На рисунке 2 представлена картинка, нарисованная в 2003 г., на заре проектирования JWST, для иллюстрации ожиданий от этого телескопа в деле изучения ранней Вселенной. Вообще говоря, на красном смещении  $z = 20$  не ожидалось увидеть галактик вовсе — теоретики думали, что там, всего через 200 млн лет после Большого взрыва, рождаются только самые первые одиночные звёзды. Появление галактик ожидалось примерно к  $z = 10$ . Современный данной картинке блестящий обзор Бромма и Ларсона [4], посвящённый формированию первых звёзд, объясняет сложную схему "игры" между температурой реликтового фона, вириальной температурой газа, состоящего из водорода и гелия без примеси более тяжёлых элементов (газ первичного химического состава — продукт первичного нуклеосинтеза в первые 20 минут после Большого взрыва), внутри гравитационно связанных, "сколлапсировавших", гало тёмной материи, и тепловых условий, необходимых для начала звездообразования. Именно такие тёмные гало, массой каждое по миллиону солнечных масс, способны стать местом рождения первых звёзд так называемого

"населения III"; и формироваться звёзды "населения III" должны изначально по одной–пяти звёзд на каждое гало. Это ещё не галактики — звездообразование внутри таких мини-гало прекращается очень быстро из-за обратного впрыска в газ энергии от молодых звёзд и сверхновых, в которые они быстро эволюционируют к концу своего короткого, в 2 млн лет, жизненного пути. А более населённые звёздные системы уже ожидаются только тогда, когда во Вселенной "соберутся" тёмные гало массой  $10^8$  масс Солнца [5]. Вся эволюция распределения материи во Вселенной в рамках современной космологической модели подчиняется строгой иерархии масс и размеров: "стартовать" приходится с почти равномерного распределения материи во Вселенной, а далее сначала возникают маленькие флуктуации плотности, потом они растут, потом сливаются во всё более крупные, и таким образом типичная масса сформировавшегося тёмного гало строго привязана к эпохе, когда оно сформировалось, т.е. к красному смещению. В обзоре [6] можно посмотреть, как, сопоставляя характерную массу тёмного гало и соответствующую ему вириальную температуру с температурой реликтового фона, падающей по мере расширения Вселенной, можно определить красное смещение, на котором возможно начало формирования звёзд. При массе гало  $10^6$  масс Солнца и остывании на молекулах  $H_2$  (первичный газ) — это  $z = 16-24$ , при массе гало  $10^8$  масс Солнца и остывании газа, уже обогащённого тяжёлыми элементами, более традиционными механизмами —  $z = 8-12$ . Вот на таких оценках и были основаны ожидания от открытия первых "светящихся" объектов, звёзд и галактик, телескопом JWST. Что же оказалось на самом деле в первых данных указанного космического телескопа?

## 2. Ly-break галактики на $z > 10$

Но сначала несколько слов о том, каков самый эффективный, простой и массовый способ открытия галактик на больших красных смещениях и как он ограничивает априори свойства этих галактик. То есть — какие далёкие галактики мы открыть можем, а какие не можем, даже если они и существуют.

Метод Ly-break был предложен для поиска далёких галактик Чарльзом Стейделем в 1990-х гг. [7]. Сначала речь шла о массовом обнаружении галактик на красном смещении  $z \sim 3$ . В основе метода лежала простая физическая модель. Если мы хотим обнаружить совсем молодую галактику, только недавно начавшую образовывать звёзды, у такой галактики должно быть ещё много газа. Звездообразование, скорее всего, началось в центре галактики, где плотность газа выше, а нейтральный газ, не захваченный звездообразованием, должен концентрироваться на периферии. Тогда свет от центрального скопления молодых массивных голубых звёзд должен обязательно проходить через плотную "шубу" из нейтрального водорода, который будет поглощать все фотоны спектрального континуума с длиной волны короче  $912 \text{ \AA}$  (в системе длин волн галактики) — это и есть лаймановский скачок, Ly-break. Если мы наблюдаем такую галактику на красном смещении  $z = 3$ , лаймановский скачок  $912 \text{ \AA}$  съедет в красную сторону, его длина волны увеличится в  $(1+z)$  раз, т.е. для галактики на  $z = 3$  она станет равна  $3648 \text{ \AA}$ . Это — ультрафиолет, наблюдаемый с Земли; например, в известной фотометрической сис-

теме Джонсона данная длина волны попадает в фильтр *U*. И вот Чарльз Стейдель отобрал в наземных глубоких фотометрических обзорах галактики, которые **не видны** в фильтре *U*, но зато яркие в соседнем голубом фильтре *B*; и последующие спектральные наблюдения подтвердили, что эти галактики действительно находятся на  $z = 3$  [7]. А дальше распространить такую методику на поиск ещё более далёких галактик оказалось очень просто: те, что **не видны** в фильтре *B*, находятся на  $z = 4$ , те, что **не видны** в фильтре *V*, находятся на  $z = 5$ , и так далее. Простая арифметика показывает, что для того чтобы обнаружить галактику на  $z = 10$ , нужно искать объект, невидимый на длине волны 1 мкм и яркий, например, в фильтре *H* (1,6 мкм). Это было доступно и Хаббловскому космическому телескопу: его рекордно далёкая галактика — GN-z11 — находится на красном смещении  $z \approx 11$  [8]. А возможности JWST позволяют ему искать — и успешно находить — и более далёкие молодые галактики. Только всегда надо помнить о том, что сам метод поиска, метод Ly-break, ограничивает возможные характеристики таких галактик: это галактики, в которых звездообразование началось недавно, и идёт оно, скорее всего, умеренными темпами, порядка немногих десятков масс Солнца в год или нескольких единиц масс Солнца в год.

Чтобы использовать преимущества большей проникающей силы и лучшего пространственного разрешения изображений, получаемых JWST, первые глубокие обзоры с камерой NIRCам были нацелены на площадки неба, которые ранее уже подробно исследовались как Хаббловским космическим телескопом и крупными наземными оптическими телескопами, так и космическими телескопами в широком диапазоне длин волн, от рентгена до субмиллиметров. Таких площадок всего было выбрано 13. Самый первый детальный отчёт поступил по площадке CEERS (Cosmic Evolution Early Release Science) размером 31,7 кв. минут, известной ранее как часть проекта CANDELS/EGS. С особым азартом в этих данных, включавших изображения в семи фильтрах прибора NIRCам, покрывавших диапазон от 1 мкм до 4,5 мкм, искали Ly-break галактики на красных смещениях  $z > 10$ ; таких сначала было объявлено 26 в диапазоне  $9 < z < 16$  [9], а позднее выборка увеличилась до 88 галактик в диапазоне  $8,5 < z < 14,5$  [10]. Точнее, "обрывы" (breaks), обнаруженные в многоволновых фотометрических данных JWST для кандидатов  $8,5 < z < 14,5$ , — это обрывы с голубой стороны от эмиссии Ly $\alpha$ , потому что на таких красных смещениях межгалактическая среда ещё нейтральна, и водород межзвёздной среды, не связанный непосредственно с галактикой, поглощает свет в линиях Ly $\alpha$  на всех промежуточных красных смещениях  $z < z_{\text{gal}}$ . В первом релизе [9] чемпионом по дальности была галактика на  $z = 16,6$ , но позднее для неё было выбрано другое красное смещение,  $z = 4,9$  [11], потому что сама по себе техника break'ов не даёт стопроцентной уверенности, что мы видим именно лаймановский скачок — это может быть и бальмеровский скачок или нестандартно широкие эмиссионные линии, попадающие сразу в несколько фильтров, как у данного конкретного кандидата [11]. Стопроцентную уверенность в красном смещении дают только спектральные наблюдения, когда в спектре обнаруживаются эмиссионные линии, отождествлённые с конкретными атомами и ионами. Так, для ряда галактик из выборки CEERS оценённые ранее фотометри-

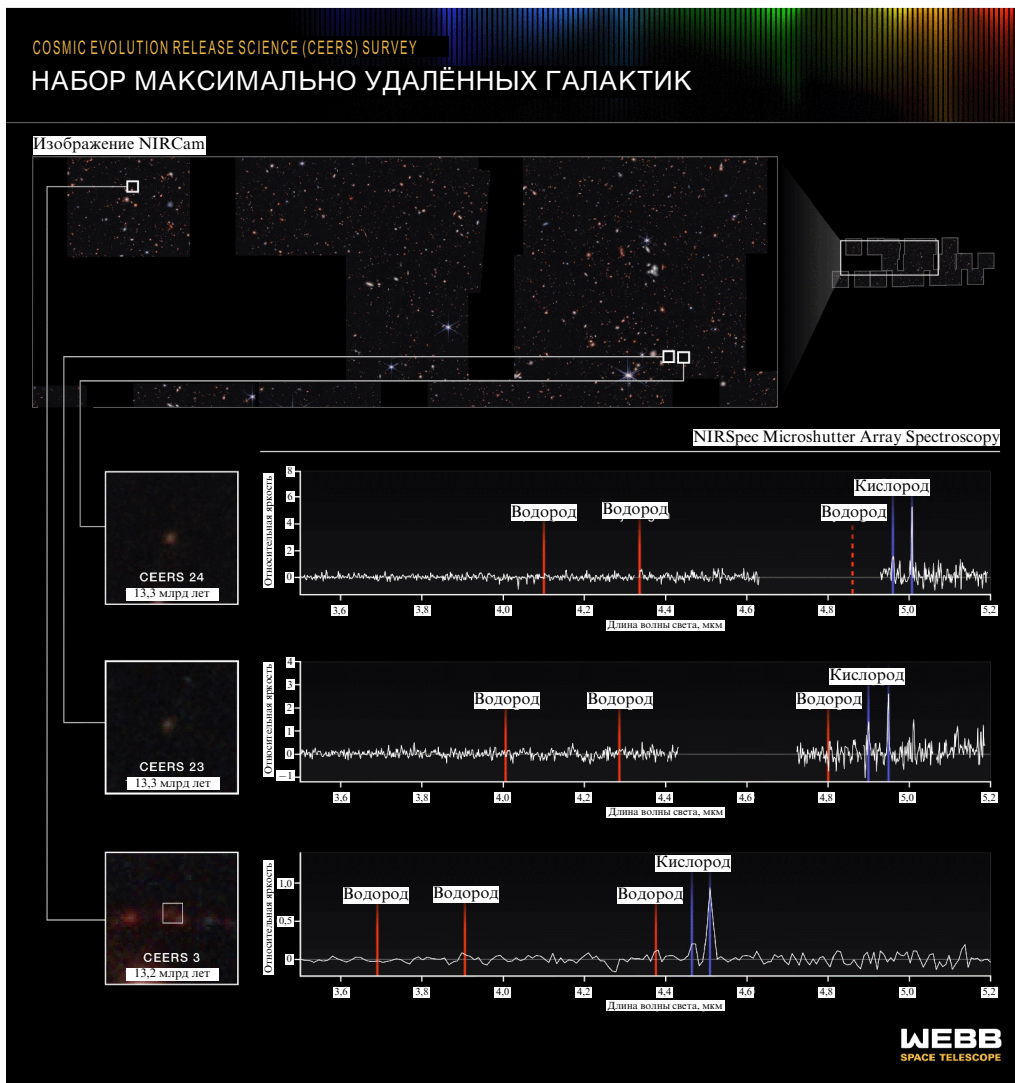


Рис. 3. Примеры спектров с эмиссионными линиями далёких галактик, полученных спектрографом NIRSpec космического телескопа JWST. Credit: NASA, ESA, CSA, L. Hustak (STScI), S. Finkelstein (UT Austin), S. Fujimoto (UT Austin), P. Arrabal Haro (NSF’s NOIRLab).

ческие красные смещения  $z \approx 9$  были спектрально подтверждены, когда в их спектрах были обнаружены и измерены эмиссионные линии  $[OIII]\lambda 4959, \lambda 5007$ , сдвинутые красным смещением на длину волны 4 мкм [12] (рис. 3). Для ещё одного кандидата на  $z = 16,4$ , CEERS-93316 [13], разобраться с красным смещением помогли дополнительные фотометрические наблюдения на длине волны 1 мм, осуществлённые в рамках субмиллиметрового обзора SCUBA-2: измеренный поток в далёком инфракрасном диапазоне заставляет отождествить этот объект как сильно запылённую галактику с интенсивным звездообразованием на  $z \approx 5$  [14] (см. далее подробнее про галактики такого типа — так называемые субмиллиметровые галактики, на порядок более массивные, чем Ly-break галактики).

Таким образом, на сегодняшний день считается, что заявленные изначально галактики на  $z = 16-17$  не подтверждены. Зато в выборке [10] есть три объекта с фотометрическими красными смещениями  $z \approx 14$  и около 30 — на  $z = 10-12$ , из них некоторые подтверждены и спектрально. Это — уже статистика. На основе данного материала уже построены функции ультрафиолетовой светимости галактик на  $z \approx 11$  и рассчитаны интеграль-

ные объёмные космические плотности ультрафиолетового излучения галактик, которые легко пересчитываются в космические плотности темпов звездообразования. В [9, 10] сформулированы некоторые результаты, связанные с эволюцией галактик вплоть до  $z = 12$ , и эти результаты решительно расходятся с предсказаниями самых изысканных современных численных моделей космологической эволюции Вселенной. В частности, ярких в ультрафиолете галактик на  $z > 10$  более чем на порядок больше, чем предсказывали космологические расчёты Illustris-TNG или SIMBA. Если попытаться сопоставить абсолютную звёздную величину из наблюдений и массу тёмного гало из моделей (метод abundance matching) [9], то массе тёмного гало в  $4 \times 10^{10}$  масс Солнца соответствует в наблюдениях [9] галактика в два раза ярче, чем ожидалось на  $z = 11$  согласно предсказанной методом экстраполяции (данных на меньших красных смещениях) связи светимость–масса тёмного гало. Удивительно также, что эволюция объёмной плотности ярких в ультрафиолете галактик на красных смещениях  $z > 8$  выходит на плато вплоть до  $z \approx 12$ , тогда как между  $z = 4$  и  $z = 8$  объёмная плотность падала — в согласии с космической историей звездообразования, которая показывает пло-



ский максимум между  $z = 2$  и  $z = 4$  и падает на более высоких красных смещениях [15].

Второй обзор, полная фотометрия для объектов которого появилась в печати уже в 2024 году, — JADES (JWST Advanced Deep Extragalactic Survey): на площадке размером 125 кв. мин было обнаружено уже 717 галактик с  $z_{\text{phot}} > 8$ , из них 31 галактика — на  $z_{\text{phot}} > 12$  [16]. Этот обзор покрывает два поля, исследованных ранее как с HST, так и с большими оптическими телескопами: GOODS-N и GOODS-S. Для многих объектов выборки JADES существует высокоточная фотометрия в оптической области спектра по измерениям телескопа HST, что позволяет уточнить фотометрические красные смещения и построить более полное распределение энергии в спектре. Поскольку и статистика объектов здесь уже более солидная, чем в обзоре CEERS, удалось протянуть эволюционные последовательности до  $z \sim 14$ . Наконец вроде бы удалось "почувствовать" падение объёмной космической плотности ультрафиолетовой светимости между  $z = 12$  и  $z = 14$  — в 2,5 раза [17]. Можно ли надеяться, что JWST добрался до начала эпохи появления галактик на  $z \sim 15$ , до тех самых карликовых галактик внутри тёмных гало массой  $10^8$  солнечных масс, которые обещали космологи? Но у одной из самых далёких обнаруженных галактик, JADES-183348 на  $z = 14,4$ , удалось довольно точно, до фактора лучше 2, измерить звёздную массу: она оказалась равна  $10^9$  солнечных масс [17]. Это на пару порядков больше, чем ожидается для самых первых галактик на основе модельных рассуждений [5, 6].

### 3. Как объяснить наблюдения галактик на $z > 10$ , чтобы снять противоречие с $\Lambda$ CDM-моделью?

Итак, совершенной неожиданностью стало обнаружение на  $z > 10$  галактик со звёздной массой порядка  $10^9 - 5 \times 10^9$  масс Солнца [18] — даже и на порядок менее массивные галактики на  $z > 10$  в рамках стандартной космологии не ожидалась [6]. Чтобы остаться в рамках классической иерархии и в согласии с расчётами темпов сборки тёмных гало в процессе эволюции Вселенной, нам необходимо предположить, что, по крайней мере для самых ярких и массивных галактик, связь между звёздной массой галактики и массой тёмного гало, внутри которого она сформировалась, не такая, как в более поздней Вселенной. Вообще говоря, одинаковое пространственное сгущение галактик со звёздной массой  $10^9 M_{\odot}$  и  $10^{10} M_{\odot}$  на  $z > 10$  [18] как бы намекает, что галактики с такими разными звёздными массами "проживают" внутри тёмных гало *одинаковой массы*; а значит, темпы звездообразования (SFR, star formation rate) в этих галактиках не привязаны к темпам аккреции тёмной материи на их гало, что глубоко отлично от ранее сформулированных идей и теоретических подходов к построению моделей эволюции галактик, предлагавшихся на основе наблюдений объектов при  $z < 8$  (см., например, [19]).

Что говорят нам наблюдения про режим звездообразования в галактиках, наблюдаемых уже после того, как прошёл первый миллиард лет расширения Вселенной? Вплоть до  $z \sim 5$  подавляющее большинство галактик принадлежат так называемой "главной последовательности". Это масштабное соотношение, характеризующее

тесную связь между текущими темпами звездообразования и текущей же звёздной массой галактики, было обнаружено для ближней Вселенной в обзоре SDSS [20], а потом подтверждено и для более ранних эпох [21] в других обзорах. Если разделить звёздную массу какой-то галактики на её текущие темпы звездообразования, то оказывается, что на любом красном смещении время, требуемое для построения её звёздной массы в предположении сравнимых темпов звездообразования, порядка возраста Вселенной на данном красном смещении. За пределами главной последовательности, вне полосы разброса точек, определяемой точностью измерения темпов звездообразования, оказываются всего 2–3% всех массивных галактик [21, 22]. Следовательно, подавляющее большинство галактик на протяжении всей своей жизни формируют звёзды в плавном режиме, с историей звездообразования экспоненциального типа, с характерным временем спадания около 7 млрд лет [21], а сильные вспышки звездообразования, неизбежные, например, для большого мерджинга, когда темпы звездообразования на шкале  $< 10^8$  лет могут возрастать в 5 и более раз, крайне редки. Именно после этого наблюдательного открытия и стали привязывать через физические модели темпы звездообразования к темпам внешней аккреции газа, а далее через космологические модели — и к темпам аккреции тёмной материи на родительское гало галактики. Похоже, что на  $z > 9-10$  такая стройная физика становится уже неприменимой к описанию реального построения звёздного компонента галактик.

Каковы же альтернативы? Вот короткий перечень идей, предлагавшихся для объяснения наблюдаемого избытка ярких (а возможно, и слишком массивных) галактик на  $z = 9-12$ , который после суммирования наблюдений нескольких глубоких полей JWST (CEERS, JADES, PRIMER, UNCOVER, COSMOS-Web и др. [18, 23, 24]) стал выглядеть статистически убедительным. Предлагалось полностью убрать пыль из таких галактик, чтобы создать качественную разницу в поглощении света молодых звёзд между совсем молодыми галактиками и теми, что наблюдаются через полмиллиарда лет после Большого взрыва [25]. Но этому должна соответствовать очень быстрая химическая эволюция именно в интервале красных смещений  $z = 8-12$  — а между тем, признаков присутствия населения III в обнаруженных молодых галактиках и очень малой металличности их газа и звёзд в измеренных спектрах не наблюдается. Предлагалось также изменить начальную функцию масс звёзд — качественно в сторону теоретических ожиданий для населения III, но не так кардинально: просто уменьшить наклон, чтобы добавить массивных звёзд. Тогда переход от ультрафиолетовой светимости, даваемой массивными звёздами, к полной звёздной массе тоже будет более "пологим", оценки звёздной массы галактик уменьшатся. Но эти так называемые "top-heavy" начальные функции масс звёзд приведут к очень мощному "обратному эффекту" от звездообразования (feedback) — прогреву газа звёздным ветром массивных звёзд и остановкой последующего звездообразования, которое нам бы наоборот нужно усилить по сравнению с модельными ожиданиями; так что это тоже плохой рецепт [26]. Однако если для молодых галактик нужно уменьшить feedback, можно ещё обратить внимание на внешний ультрафиолетовый фон, который во Вселенной на меньших красных смещениях тоже прогревает газ в галактиках, уменьшая

эффективность звездообразования. Если убрать этот внешний ультрафиолет, то эффективность звездообразования (доля массы холодного газа, которая превратится в звёзды за единичное событие звездообразования) на  $z = 10-12$  существенно возрастёт, и уровень космической истории звездообразования (SFH, star formation history) на таких красных смещениях будет превышать ожидания от экстраполяции SFH, рассчитанной для эффективности превращения газа в звёзды всего в несколько процентов [27]. Физическое обоснование для пренебрежения внешним ультрафиолетовым фоном на указанных красных смещениях есть: если именно в данную эпоху, на  $z \sim 10$ , началась ре-ионизация межгалактической среды, то на  $z < 10$  межгалактическая среда была прозрачна для убегающего из звездообразующих галактик ультрафиолета, а на  $z > 10$  — непрозрачна, тогда она ещё была полностью нейтральна. Следовательно, можно ожидать, что межгалактический нейтральный водород на  $z > 10$  должен поглощать весь ультрафиолет с длиной волны меньше лаймановского предела. Так что это хорошая, годная идея, как аргументируется в [27].

Но самая привлекательная, пожалуй, идея (хотя и с неясным физическим обоснованием) — это идея смены режима звездообразования с плавного на вспышечный в интервале красных смещений 5–9, между полумиллиардом и одним миллиардом лет после Большого взрыва. Когда набралась статистика определений звёздных масс ( $M_*$ ) и темпов звездообразования (SFR) для солидных выборок галактик на красных смещениях до 4–5, стало вырисовываться отличие распределения таких ранних галактик на диаграмме SFR vs  $M_*$  от того, что наблюдается на  $z = 0$  или даже на  $z = 2$ . В статье [28] исследовалась большая, около 2000 объектов, выборка галактик из обзора Spitzer Matching Survey of the UltraVISTA ultra-deep Stripes (SMUVS) с эмиссионными линиями H $\alpha$ , в интервале  $z = 3,9-4,9$ . Их распределение на диаграмме SFR vs  $M_*$  оказалось отчётливо бимодальным: кроме главной последовательности, где у массивных галактик,  $2 \times 10^9 - 4 \times 10^{10} M_\odot$ , время построения их звёздной массы — около 1 млрд лет, существует ещё параллельная главной последовательности полоса концентрации объектов, проходящая на порядок выше по темпам звездообразования. Эта параллельная последовательность содержит галактики, достигшие в момент вспышки звездообразования. В статье [28] доля галактик на  $z = 3,9-4,9$ , достигших в момент вспышки звездообразования, зависит от звёздной массы галактики, и на средней массе Ly-break галактик,  $10^{10} M_\odot$ , она составляет около 10 %. В последующем исследовании [29] выборка была расширена за счёт привлечения дополнительной площадки и увеличения диапазона красных смещений и исследуемых звёздных масс, с понижением порогового значения последних до  $10^6 M_\odot$ ; теперь исследуемая выборка галактик на  $z = 4-5$  увеличилась до более чем 4000 объектов. Бимодальность распределения галактик на диаграмме SFR vs  $M_*$  полностью подтвердилась. Для уже ранее рассматривавшегося диапазона звёздных масс,  $3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10} M_\odot$ , теперь определена доля галактик во вспышечном режиме звездообразования как 30 %; впрочем, на больших красных смещениях,  $z = 5-6,5$ , в данном диапазоне звёздных масс доля галактик во вспышечном режиме падает до 12 % (по представленным данным). Но сама по себе уверенная бимодальность распределения наблюдаемых галактик на диаграмме SFR vs

$M_*$ , с наличием параллельной последовательности галактик со вспышками звездообразования, — это удивительный и впечатляющий результат, который совершенно не предсказывался космологическими моделями, например, Illustris TNG [29].

С появлением первых релизов глубоких обзоров JWST стало возможно продлить такого рода исследования до больших красных смещений. В работе [30] анализируется фотометрия объектов из обзора площадки JADES: 3197 галактик в интервале  $6 < z < 7$ , 1883 галактики в интервале  $7 < z < 9$  и 521 галактика в интервале  $9 < z < 12$ . Наличие измерений в 23 фотометрических полосах позволяет восстанавливать недавнюю, за последние  $10^8$  лет, историю звездообразования, и по её наклону, положительному или отрицательному, классифицировать галактику как находящуюся во вспышке звездообразования или принадлежащую главной последовательности, что и было проделано в [30]. Бимодальность режимов звездообразования снова обнаружена. Если рассматривать самую массивную часть выборки,  $\log M_* > 8,8$ , то в интервале  $6 < z < 7$  около 87 % галактик находится на главной последовательности, на больших красных смещениях доли галактик на главной последовательности и во вспышечном режиме уже сравнимы, и на  $z > 9$  сразу 90 % массивных галактик демонстрируют вспышечный режим звездообразования. Наличие эволюция режима звездообразования на качественном уровне: в первые полмиллиарда лет расширения Вселенной звездообразование в галактиках, даже в самых массивных, шло в режиме сильных вспышек, с временным масштабом в немногие десятки миллионов лет, и физическая природа такого режима звездообразования пока не "схвачена" в стандартной космологической модели.

Но зато, если реально было именно так, то это объясняет аномально яркие в ультрафиолете ранние галактики и неожиданно большую космическую плотность темпов звездообразования на  $z = 10-12$ : мы видим только галактики в момент вспышки звездообразования и не видим таких же галактик *между* вспышками звездообразования.

#### 4. Массивные галактики со вспышками звездообразования на $z = 4-5$

Однако Ly-break галактики являются не единственным населением галактик на больших красных смещениях. Наиболее массивные галактики на красных смещениях от 2 до 5 — субмиллиметровые галактики (SMG) [31, 32]. Такие галактики "ищутся" совсем по-другому, чем Ly-break объекты, и, соответственно, имеют другие характерные свойства. Это массивные галактики, с типичной звёздной массой около  $10^{11} M_\odot$  и с темпами звездообразования от сотни до тысячи или даже до трёх тысяч масс Солнца в год [33]. Это уже не галактики главной последовательности, а галактики со вспышками звездообразования, сдвинутые на диаграмме SFR vs  $M_*$  вверх минимум в четыре раза по темпам звездообразования. Такое экстремальное звездообразование всегда, как на больших красных смещениях, так и в локальной Вселенной, погружено в плотный пылевой кокон; наружу выходит только чернотельный спектр пыли, нагретой массивными звёздами молодых звёздных скоплений внутри кокона. На  $z = 0$  максимум распределения энер-

гии в спектре таких галактик приходится на длину волны 100 мкм; соответственно, на  $z > 3$  данный максимум сдвигается на длины волн 400 мкм и более. Открыты субмиллиметровые галактики были в 1990-е гг. на телескопе Джеймса Клерка Максвелла (JCMT) на Гавайях в результате проекта SCUBA — первого обзора неба в двух окнах прозрачности земной атмосферы, на 450 и на 850 мкм [34]. Была открыта целая выборка объектов, ярких на субмиллиметровых длинах волн; и действительно, когда разобрались с их красными смещениями, это оказались массивные галактики с интенсивной вспышкой звездообразования на  $z = 2-5$  [35]. Таким образом, уже через миллиард лет после Большого взрыва во Вселенной существует целая популяция массивных галактик, с  $M_* > 10^{10} M_\odot$ , которые к тому же продолжают формировать звёзды с темпом сотни масс Солнца в год — соответственно, за второй миллиард лет расширения Вселенной они эту звёздную массу должны как минимум удвоить.

Сейчас обнаружение и исследование субмиллиметровых галактик (SMG) поставлено "на поток". Кроме проекта SCUBA-2 на JCMT [36], над составлением списка кандидатов в SMG поработали коротковолновые тарелки в пустыне Атакама в Чили (LABOCA, проект ALESS) [37] и специализированный субмиллиметровый телескоп в Антарктиде, South Pole Telescope (SPT) [38], — там тоже очень сухая атмосфера, хорошо пропускающая субмиллиметровое излучение. Эти одиночные тарелки составляют списки кандидатов в SMG, поскольку у одиночных субмиллиметровых тарелок пространственное разрешение хуже  $10''$ . А вот отождествлением и детальным исследованием галактик из полученных списков занимается интерферометр Atacama Large Millimeter Array (ALMA) — многоволновой прибор, расположенный в той же сухой высокогорной пустыне Атакама, поэтому с его помощью можно строить карты как в континууме на субмиллиметрах (горячая пыль), так и в линиях CO, [OIII] $\lambda 88$  мкм, [CII] $\lambda 158$  мкм (молекулярный и холодный и тёплый атомарный газ), и всё это с разрешением лучше секунды. Наземный интерферометр в пустыне Атакама в пространственном разрешении получаемых изображений далёких галактик соперничает с хаббловским космическим телескопом, а иногда и с JWST [39]!

Недавно по результатам наблюдений на ALMA появились совсем неожиданные результаты относительно динамического статуса галактических дисков самых далёких SMG и DSFG (Dusty Star-Forming Galaxies) на  $z = 4-5$  [40–43]. При сравнении изображений в континууме (нагретая пыль) и в эмиссионной линии атомарного ([CII] $\lambda 158$  мкм) газа оказалось, что распределение холодного нейтрального газа в галактиках — намного более протяжённое, чем размер запылённой центральной области с интенсивным звездообразованием. То есть мы имеем дело с мощной вспышкой звездообразования в центре "спокойного" газового диска радиусом несколько килопарсек — это рождение балджа в дисковой галактике, а не рождение эллиптической галактики. И более того, оказалось, что газовые диски таких галактик — холодные не только по температуре, они динамически холодные — тонкие, до 300 пк, с низкой дисперсией скоростей! Они оказались менее турбулентными, чем газовые диски галактик на  $z = 2$ . Наблюдения далёких слабых галактик на ALMA с разрешением  $0,1''-0,2''$  (соответствует линейному масштабу  $0,7-1,4$  кпк на красных

смещениях  $4-5$ ) являются очень трудоёмкими и требуют больших экспозиций; тем не менее сейчас накопилось уже 14 объектов с такими динамическими характеристиками. Измерение лучевых скоростей холодного нейтрального газа в линии [CII] по всему диску галактики позволило восстановить картину их вращения; оно оказалось регулярным, круговым (без возмущений или следов мерджинга). Ну и типичные отношения скорости вращения к дисперсии скоростей газовых облаков у массивных галактик,  $\geq 10^{10} M_\odot$ , на  $z = 4-5$  оказались от 7 до 15, совсем как у гигантских спиральных галактик локальной Вселенной.

Почему такого никто не ожидал? Более ранние исследования вращения дисков у массивных галактик на  $z = 2-3$  демонстрировали у них наличие толстых, толщиной более килопарсека, газовых дисков, с дисперсией скоростей газовых облаков до  $70-80$  км с $^{-1}$  [44]. Когда это было обнаружено, решили, что это — демонстрация природы турбулентных скоростей газовых облаков, связанной с локальной гравитационной неустойчивостью. А тогда — дисперсия скоростей просто зависит от количества газа и пропорциональна произведению скорости вращения галактики на долю газа в барионной массе галактики [44]. На  $z = 2-3$  дисперсия скоростей газа выше, чем на  $z = 0$ , просто потому, что на  $z = 0$  доля газа в барионной массе спиральных галактик не превышает 10%, а на  $z = 2-3$  она составляет уже 40%. Но тогда ожидалось, что с красным смещением типичная дисперсия скоростей в газовых дисках будет монотонно расти, потому что в совсем молодых галактиках газ уже должен доминировать в барионной массе галактики. Немонотонная эволюция характерной дисперсии скоростей газовых облаков в крупномасштабных дисках массивных галактик — совершенно неожиданный и пока необъяснимый наблюдательный феномен. По крайней мере, космологические симуляции, в которые заложена именно гравитационная неустойчивость как триггер звездообразования и источник выделения энергии, связанной с данным процессом, до сих пор обещали именно монотонную эволюцию как дисперсии скоростей газовых облаков, так и отношения скорости вращения к дисперсии скоростей. Например, Illustris-TNG50 [45] обещал монотонное падение  $v/\sigma$  от 10 на  $z = 0$  до максимум 3 на  $z = 4$ . Однако можно заметить качественное подобие эволюции космической плотности темпов звездообразования и дисперсии скоростей газовых облаков. Это может быть намёк на то, что природа турбулентности газовых дисков — не гравитационная неустойчивость, а обратный эффект — поставка кинетической энергии в межзвёздную среду молодыми массивными звёздами через их звёздный ветер и взрывы сверхновых. И действительно, примерные модельные расчёты такого эффекта, связывающие дисперсию скоростей газовых облаков с обратным эффектом от звездообразования, показывают, что галактики со вспышками звездообразования на  $z = 4-5$  укладываются именно в рамки данной модели [41, 46].

После неудачи Illustris-TNG50 [45] объяснить наблюдаемые холодные диски галактик на  $z = 4-5$ , было ещё несколько подходов космологов к указанной проблеме. Авторитетная команда во главе с Авишаем Декелем [47] попыталась поискать аналог таких объектов в физических космологических моделях zoom-in, используя моделирование тёмной материи с высоким разрешением,

55 пк, и газодинамический код RAMSES. Их усилия привели к находке всего одной такой модельной галактики. Ей удавалось сохранять тонкий газовый диск на  $z \approx 4$  в течение пяти оборотов из-за длительного, в несколько сотен миллионов лет, эпизода ламинарной компланарной аккреции холодного газа из космологического филамента, после чего диск данной модельной галактики был разрушен мерджингом и сменой питающего филамента. Вывод из такого подхода теоретиков к объяснению нового наблюдаемого класса галактик получился следующий: холодные газовые диски ранних галактик — это транзитная фаза, таких галактик должно быть очень мало. В совсем свежей расчётной статье [48] уже предьявляются космологические численные модели SERRA с адаптивным разрешением, достигающим 30 пк в самых плотных местах; и статистика модельных галактик в интервале масс  $10,0 < \log M_* < 10,3$  уже достигает 142 объектов в интервале красных смещений  $4 < z < 9$ . Правда, в данной модельной выборке темпы звездообразования не превышают  $128 M_\odot$  в год — это в лучшем случае главная последовательность на таких красных смещениях, никак не вспышка звездообразования. Зато необходимая динамическая холодность именно для индикатора случайных движений нейтральных газовых облаков в виде линии [CII] $\lambda 158$  мкм наблюдается в данном коллективе модельных галактик *в среднем*: модельный уровень  $V/\sigma_{\text{[CII]}} = 8,5 \pm 2,2$ , и в интервале красных смещений  $4 < z < 9$  не зависит от  $z$ . Авторы на этот раз заявляют, что динамическая холодность их модельных галактик не является транзитной, потому что прослеживается в течение 10 оборотов; однако в абсолютных временных единицах это всё же всего 200 млн лет.

Окончательно ситуация запутывается, когда в [49] рассматриваются наблюдения уже выборки из 22 галактик в интервале красных смещений  $4,2 < z < 7,6$ , и тоже по данным измерений линии [CII] $\lambda 158$  мкм с интерферометром ALMA. Правда, эта коллекция архивных наблюдательных данных — очень разнородная по качеству: пространственное разрешение варьируется от  $0,2''$  до  $1,5''$ . В данной выборке специально оставлены только галактики главной последовательности — SMG отсюда целенаправленно выкинули. Если мы ограничимся только интервалом  $5 < z < 7$ , где всё-таки пространственное разрешение в линейной мере не хуже 1 кпк, то наблюдаемый интервал  $V/\sigma_{\text{[CII]}} = 1-8$ , т.е. присутствуют и горячие, и холодные диски. Авторы [49] считают, что их результаты разошлись с результатами [40–43] из-за разницы в типичных темпах звездообразования — главная последовательность против вспышечного режима. Однако, вообще говоря, такое объяснение контринтуитивно: получается, что хотя обратный эффект от молодых звёзд разгоняет турбулентность, всё же в галактиках с мощными вспышками звездообразования наблюдается дисперсия газовых облаков в дисках ниже, чем в галактиках с умеренным звездообразованием.

## 5. Сверхмассивные чёрные дыры и их хозяйские молодые галактики: что возникло раньше?

В ближней Вселенной в центре почти каждой галактики проживает сверхмассивная чёрная дыра, масса которой примерно 0,2 % – 0,8 % от массы сфероидальной компоненты галактики (балджа) [50] — если сфероидальная

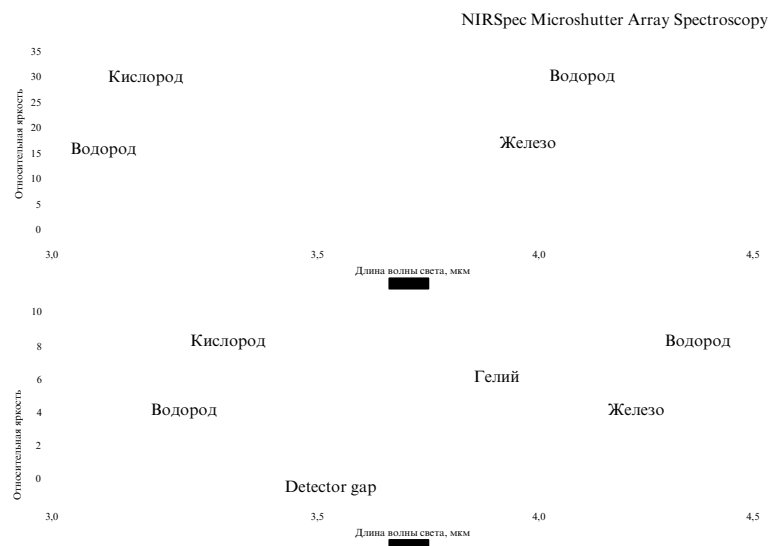
компонента в галактике доминирует. В галактиках же позднего типа, где балджи выделяются с трудом, центральные чёрные дыры, однако, тоже встречаются; они особенно хорошо заметны, когда проявляют себя как активные ядра, излучающие в рентгеновском диапазоне и в широких оптических эмиссионных линиях. Правда, для этих галактик, где в структуре доминируют звёздные диски, при попытке построить связь между звёздной компонентой и массой центральной чёрной дыры оказывается, что масса чёрной дыры намного меньше, чем в галактиках раннего типа такой же звёздной массы: 0,01 % – 0,025 % [51, 52]. Существование тесной связи между звёздной массой галактики и массой центральной чёрной дыры как бы намекает на то, что и галактика, и центральная чёрная дыра растут в ходе эволюции синхронно, и, вероятно, в результате одних и тех же событий в жизни галактики. Космологи поначалу, в 2000-е гг., очень приветствовали такую синхронность. Обсуждались разнообразные иерархические сценарии эволюции. Например, слияния галактик сравнимой массы ведут к одновременному удвоению и массы звёздного сфероида, и массы центральной чёрной дыры. А если рассматривать эволюцию дисковой галактики как полностью определяемую постоянной внешней аккрецией — одновременно и газа, и тёмной материи, — то можно связать увеличение звёздной массы галактики через звездообразование во внешних областях, питаемое аккрецией газа, с увеличением массы центральной чёрной дыры путём аккреции газа уже на центр галактики. Такие сценарии отлично встраивались в полную  $\Lambda$ CDM-модель эволюции Вселенной в ходе иерархического сгущивания материи. Но, как водится, совершенствование и достижения наблюдений значительно портят красоту простых и гармоничных моделей.

В последние годы — буквально в последние 5–7 лет — астрономам-наблюдателям удалось открыть и исследовать очень далёкие квазары. Чемпионом по дальности сейчас является квазар на красном смещении  $z = 8,68$  [53]. А всего на красных смещениях больше  $z = 6$  сейчас открыто свыше 200 квазаров [54]. Это уже солидная статистика! И оказалось, что уже такие ранние квазары, проживавшие во Вселенной, возраст которой был меньше 1 млрд лет, имели массу центральной чёрной дыры около 1 млрд солнечных масс. Правда, самый далёкий квазар на  $z = 8,68$  имеет скромную массу центральной чёрной дыры в  $10^7 M_\odot$  [53]. Но уже на  $z = 7,642$  есть квазар с массой центральной чёрной дыры 1,6 млрд солнечных масс [55]. Конечно, когда мы наблюдаем такие далёкие объекты, мы в первую очередь выбираем самые яркие из них ("эффект селекции"). Но верхний-то предел масс мы всегда видим! В ближней Вселенной он составляет несколько млрд масс Солнца (например, в M87 центральная чёрная дыра имеет массу 6,5 млрд масс Солнца [56]); но и в далёкой Вселенной — примерно такую же [57]!

В наблюдательных достижениях космического телескопа JWST есть не только далёкие квазары — в ещё более далёких галактиках обнаруживаются активные ядра, хоть и с меньшей светимостью, чем у квазаров, но тоже с весьма массивными центральными чёрными дырами. Обнаруживают их и измеряют массы центральных чёрных дыр по широким эмиссионным линиям Бальмеровской серии, сдвинутым космологическим красным смещением в диапазон JWST/NIRspec (рис. 4). А вот максимальная звёздная масса галактики на больших



COSMIC EVOLUTION RELEASE SCIENCE (CEERS) SURVEY  
**ДВЕ МАКСИМАЛЬНО УДАЛЁННЫЕ АКТИВНЫЕ  
 СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ**  
 Изображение NIRCam



**Рис. 4.** Примеры спектров активных ядер галактик, полученных спектрографом NIRSpec космического телескопа JWST. Credit: NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI), S. Finkelstein (UT Austin), R. Larson (UT Austin), P. Arrabal Haro (NSF's NOIRLab).

красных смещениях вроде бы меньше, чем в локальной Вселенной, — в согласии с иерархическим принципом. Соответственно, отношение массы центральной чёрной дыры к звёздной массе галактики в первый миллиард лет расширения Вселенной **наблюдается** существенно большим, чем сейчас: в активном ядре галактики из обзора JWST/UNCOVER обнаружена чёрная дыра массой  $\log M_{\text{ВН}} = 8,17$  при карликовой звёздной массе галактики  $\log M_* < 8,7$  [58], а чемпионом по отношению массы центральной чёрной дыры к звёздной массе галактики — почти единица! — является объект JADES GN 1146115,  $z = 6,67$ ,  $\log M_{\text{ВН}} = 8,61$  [59]. В среднем же для дюжины галактик с активными ядрами в интервале  $z = 4-7$  отношение массы центральной чёрной дыры к звёздной массе галактики колеблется от 1% до 10% [60], т.е. в десятки раз превышает соответствующее отношение, измеренное тоже по широким балмеровским линиям, для галактик с активными ядрами на  $z = 0$  [52]. С другой стороны, и отношение *динамической* массы всей галактики к массе центральной чёрной дыры (измеряется с интерферометром ALMA по скорости вращения газового диска галактики) для 27 далёких квазаров тоже в несколько раз ниже, чем в локальной Вселенной, — от 20 до 200 вместо 500 [61]! То есть наблюдения говорят о том, что сначала вырастает центральная чёрная дыра, а уже

потом — галактика вокруг неё. И предлагавшиеся ранее механизмы для роста центральной чёрной дыры не работают для такого быстрого набора её массы — нужно набрать миллиард солнечных масс за полмиллиарда лет.

Как только обнаружилось данное обстоятельство, теоретики активно взялись за его проработку; и практически сразу же было предложено несколько сценариев, как можно быстро, за полмиллиарда лет, вырастить одиночную чёрную дыру массой в миллиард солнечных масс [62]. В первую очередь, для этого на красном смещении не меньше 20–40 уже должны существовать "затравки" — чёрные дыры меньших масс. Насколько меньших? Сейчас различают сценарии для трёх классов "затравок": лёгких, средних и массивных [63–65].

Лёгкие затравки, в сотни–тысячу масс Солнца каждая, могут быть просто постэволюционными остатками массивных звёзд населения III — гипотетических звёзд первого поколения, сформировавшихся из газа с нулевой металличностью. Средние затравки могут формироваться как результаты динамической эволюции плотных звёздных скоплений из этих массивных звёзд первого поколения: при сверхплотной "упаковке" звёзд в центрах карликовых протогалактик они будут часто сталкиваться и в конце концов просто сольются в одну чёрную дыру, практически не успев выйти из протозвёздной фазы



47. Kretschmer M, Dekel A, Teyssier R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 510 3266(2022)
48. Kohandel M et al. *Astron. Astrophys.* 685A72 (2024)
49. Parlanti E et al. *Astron. Astrophys.* 673A153 (2023)
50. Kormendy J, Ho L C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 51 511 (2013)
51. Graham A W, Sahu N *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 518 2177 (2023)
52. Reines A E, Volonteri M *Astrophys. J.* 813 82 (2015)
53. Larson R L et al. *Astrophys. J. Lett.* 953 L29 (2023)
54. Fan X, Baadatos E, Simcoe R A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 61 373 (2023)
55. Wang F et al. *Astrophys. J. Lett.* 907 L1 (2021)
56. The Event Horizon Telescope Collab., Akiyama K et al. *Astrophys. J. Lett.* 875 L6 (2019)
57. Stone M A et al. *Astrophys. J.* 964 90 (2024)
58. Kokorev V et al. *Astrophys. J. Lett.* 957 L7 (2023)
59. Juodžbalis I et al. *Nature* 636 594 (2024); arXiv: 2403.03872
60. Pacucci F et al. *Astrophys. J. Lett.* 957 L3 (2023)
61. Decarli R et al. *Astrophys. J.* 854 97 (2018)
62. Haemmerle L et al. *Space Sci. Rev.* 216 48 (2020)
63. Inayoshi K, Visbal E, Haiman Z *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 58 27 (2020)
64. Valiante R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 457 3356 (2016)
65. Sassano F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 506 613 (2021)
66. Dolgov A D, arXiv: 2401.06882
67. Volonteri M, Silk J, Dubus G *Astrophys. J.* 804 148 (2015)
68. Lupi A et al. *Astron. Astrophys.* 686 A256 (2024)
69. Maiolino R et al. *Nature* 627 59 (2024)

## Galaxies in the first billion years of the Universe's expansion

O.K. Sil'chenko

Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute,  
Universitetskii prosp. 13, 119234 Moscow, Russian Federation  
E-mail: sil@sai.msu.ru, olga@sai.msu.ru

The Universe started its expansion 13.8 billion years ago. A hundred million years later, the gas component of the Universe's matter 'matured' to the point of forming stars. This epoch should be inspected to search for the beginning of the emergence of galaxy populations in the Universe's large gravitationally bound star systems. Modern astronomical observation tools: ground-based interferometers and spaceborne telescopes allow the properties of galaxies to be studied directly at the earliest stages of their evolution, i.e., in the first billion years of the Universe's expansion, including their shapes, sizes, masses, star formation rates, and nuclear activity. This brief review presents the latest results of such studies.

Keywords: evolution of galaxies, early Universe, astronomical observations

PACS numbers: 98.62.Ai, 98.80.Bp, 98.80.Es

Bibliography: 69 references

Received: 2 September 2024, revised: 31 October 2024

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* 195(2) 191–201 (2025)

*Physics Uspekhi* 68(2) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.11.039810>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.11.039810>