

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ И СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ФОРМИРОВАНИИ ГАЛАКТИК

Б. В. Лажинцев*

Представлен предполагаемый сценарий образования в центральных областях гравитационных неоднородностей (ГН) в ранней Вселенной сверхмассивных черных дыр (СМЧД) и формирования вокруг них галактик различных морфологических типов. СМЧД образуются в процессе гравитационно-термического коллапса преимущественно темной материи (ТМ) с участием барионной материи (БМ) в качестве компонента, обеспечивающего диссипацию и вязкость. Быстрое увеличение массы СМЧД может определяться аккрецией ТМ, гравитационно связанной с БМ, рассеивающей угловой момент. Вокруг образовавшихся СМЧД с высоким темпом формируются сферические звездные образования (СФЗО), в которых на начальном этапе интенсивно развивается процесс рождения массивных звезд популяции III, ускоренный участием ТМ, возможно, с последующим ее захватом. Далее СФЗО трансформируется в балдж спиральной или линзовидной галактики, либо, увеличиваясь в размерах, вырастает в эллиптическую галактику или, возможно, остается шаровым скоплением. Формирование в ГН галактик различного морфологического типа определяется долей БМ, оставшейся в объеме гало протогалактики на момент возникновения его вращения, которая не опустилась в центральные области ГН с уже сформировавшимся СФЗО. Неправильные галактики могли возникнуть из-за гравитационного взаимодействия, по крайней мере, двух сливающихся ГН, которое разрушило центральные квазисферические области ГН, создав в них относительно крупные хаотизированные гравитационно-связанные объемные структуры ТМ и БМ, в которых развился процесс звездообразования.

Ключевые слова: сверхмассивные черные дыры, темная материя, звездообразование, структура галактик.

*Электронный адрес: lbvsarov@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Современные телескопы способны наблюдать звездные объекты, возникшие через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва. Из наблюдений следует, что на этот период уже существовали сформировавшиеся галактики. В центральной области большинства обнаруженных галактик находится квазар, представляющий из себя сверхмассивную чёрную дыру (СМЧД) с массой, некоторых из них, до миллиарда солнечных. СМЧД, поглощая окружающее вещество и увеличивая свою массу, формирует аккреционный диск, который является источником исключительно мощного излучения, иногда в десятки и сотни раз превышающего суммарную мощность всех звёзд галактики. Исследования по обнаружению квазаров показали, что в далеком прошлом число возникающих квазаров и их активность были более высокими. Пик эпохи активности квазаров был примерно через 3,5 миллиарда лет после Большого взрыва. Считается, что для возникновения квазаров такой массы, первых звёзд и формирования галактик прошло слишком мало времени после Большого взрыва.

Общепринятая теория возникновения СМЧД в настоящее время отсутствует. В последнее время особенно часто в механизме образования СМЧД рассматривается роль темной материи (ТМ), включающей в свой состав самовзаимодействующую темную материю (СВТМ) (self-interacting dark matter) (Поллак и др., 2015; Фэн и др., 2021; Мешвелиани и др., 2023). Обсуждаемой является и концепция связи между формированием галактик и возникновением СМЧД в их центре, например, в работе Сильченко (2025). Соответствующий действительности механизм возникновения СМЧД позволит не только разработать теорию их образования, но и создать сценарий формирования галактик в ранней Вселенной.

В настоящее время теория формирования галактик базируется на, так называемой, “иерархической концепции”, основные особенности которой изложены, например, в книге Сильченко (2017). В этой концепции в центральной области гало темной материи сначала формируются поздние типы – чисто дисковые галактики типа Sc–Sd и Irr, потом они сливаются и превращаются в балджи. Далее балджи наращивают на себя новые диски и становятся спиральными галактиками раннего типа Sa–Sb. Если слияния первоначальных дисков происходят в поздние эпохи, то, из-за общекосмического истощения газа, остаются только балджи, образующие эллиптические галактики.

Однако существует целый комплекс данных, относящихся к наблюдаемой эволюции галактик, которые никак не укладываются в иерархическую концепцию (Сильченко, 2017, 2025). Автор не считает себя в праве последовательно и подробно оценивать состоятельность общепринятой иерархической концепции.

Целью настоящей работы является формулировка на качественном уровне сценария формирования галактик, в каждом из этапов которого участвует ТМ в ее “классическом” понимании – обладает массой и исчезающе малым сечением рассеяния по отношению к ТМ и барионной материи (БМ), взаимодействует с ТМ и БМ только гравитационно. Предлагаемый сценарий формирования галактик носит практически единообразный характер и начинается с рождения массивной ЧД в центральной области гравитационной неоднородности (ГН) - гало протогалактики. Затем вокруг ЧД возникает сферическое звездное образование (СФЗО), которое в последствии трансформируется в балджи галактик различного морфологического типа. Морфологический тип галактики определяется долей БМ, которая осталась в объеме гало протогалактики и не опустилась в центральную область ГН, с уже сформировавшимся СФЗО, на момент возникновения вращения гало протогалактики. В сценарии реализуется максимально интенсивный темп звездообразования на начальном этапе формирования СФЗО.

На разных этапах предложенного сценария в космологических процессах участвует ТМ, реализуя свои “созидательные” свойства. При создании теоретических моделей, предложенных в сценарии последовательных космологических процессов, в случае если эти модели подтвердят возможность и необходимость участия в них ТМ, появляется реальность обоснования назначения и природы ТМ. Чем больше указанных процессов будет выявлено, тем более обоснованы будут космологические характеристики ТМ.

СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

Известно несколько сценариев быстрого формирования СМЧД в течение первых нескольких сотен миллионов лет существования Вселенной, основанных на постепенном увеличении массы начальной чёрной дыры (НЧД)

В работе Богдан и др. (2024) сообщается об обнаружении СМЧД, питающей рентгеновский квазар в галактике UHZ1 с красным смещением $z \approx 10.3$. Масса СМЧД этого квазара составляет $\sim 10^7 - 10^8 M_{\odot}$. В расчётах, выполненных в этой работе, смоделирован процесс увеличения массы НЧД, при красном смещении $z \approx 25$ и заканчивая конечной предполагаемой массой СМЧД в UHZ1 при $z = 10.3$. Для НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \sim 10 - 10^2 M_{\odot}$ необходима непрерывная аккреция газа со скоростью, более чем в два раза превышающей предел Эддингтона, в течение 300 миллионов лет, что признается маловероятным. НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$ может достигнуть конечной массы СМЧД в UHZ1 за счет аккреции газа только со скоростью на пределе Эддингтона. Аналогичные расчеты, проведенные в этой работе для трех ранее обнаруженных квазаров с красным смещением $z \approx 7.5$, показывают возможность достижения зарегистрированной массы этих квазаров в

диапазоне $\sim (0.8 - 1.6)10^9 M_{\odot}$ за счет аккреции вещества на НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$ при красном смещении $z \approx 25$.

Тем не менее и этот сценарий “тяжелых” НЧД, по мнению авторов работы, требует реализации особых физических условий. Остается открытым механизм формирования “тяжелых” НЧД с $M_{\text{НЧД}} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$ при $z \approx 25$.

В работе Долгова (2018) рассматривается механизм возникновения первичных черных дыр (ПЧД) различной массы, в том числе и тяжелых, в очень ранней Вселенной на поздней стадии инфляции и последующий сценарий формирования с их участием звездных образований, таких как различные типы галактик, звездных скоплений, а также двойных систем тяжелых ПЧД. Как указывается в этой работе, “при таком широком спектре масс” ПЧД, в предлагаемом механизме возникновения, “вся ТМ (или, по крайней мере, ее значительная часть) могла бы состоять из тяжелых ПЧД”.

В цитируемой работе высказывается сомнение в правильности стандартного сценария образования СМЧД в центрах галактик вследствие аккреции на центральную область галактики. “Гораздо более убедительно выглядит обратная картина, согласно которой раньше возникает СМЧД, впоследствии служащая центром конденсации вещества, образующего галактику”. “Малые ЧД, массой $(10^3 - 10^4) M_{\odot}$, натягивают на себя маленькие “галактички”. Черные дыры побольше собирают вокруг себя карликовые галактики, а СМЧД являются центром “конденсации” громадных галактик. В спиральных галактиках ЧД не очень велики, их масса не более нескольких миллионов масс Солнца, а в эллиптических и линзовидных галактиках массы ЧД составляют несколько миллиардов масс Солнца.”

Формирование ПЧД на поздней стадии инфляции, которые могли бы стать, в том числе, и НЧД для формирования СМЧД в центрах галактик, не является общепринятой моделью развития Вселенной. Возникшая ПЧД должна непрерывно подвергаться механизму аккреции в совершенно различных и изменяющихся внешних условиях, что должно сопровождаться увеличением массы ПЧД и ее светимости. Неясен сам механизм образования вокруг светящейся ПЧД громадного по массе “центра “конденсации” для последующего формирования, например, эллиптической галактики, дисковой галактики или шарового звездного скопления.

В работе Фридлендер и др. (2023) рассмотрена гипотеза образования “тяжелых” НЧД с $M_{\text{НЧД}} \approx 10^5 M_{\odot}$ вокруг красного смещения $z \approx 17$ в процессе прямого коллапса облака газа, не содержащего пыли и металлов. За счет фотодиссоциации молекулярного водорода большим потоком ультрафиолетовых фотонов подавляется молекулярное охлаждение газового облака, что позволяет облаку атомарного газа избежать фрагментации при сжатии и, в дальнейшем, в результате прямого коллапса облака образовать ЧД. В работе рассчитывается необходимый

для этого поток ультрафиолетового излучения, который возникает в результате аннигиляции или распада ТМ с массой ниже кэВ в гало газового облака. Далее проводится сравнение расчетных спектральных характеристик потока излучения с необходимыми, которые определяются по результатам выполненных гидродинамических расчетов.

Авторы этой работы признают, что в работе используются универсальные профили гало ТМ, подобные профилю НФУ (профиль Наварро-Френка-Уайта) (Наварро и др., 1997), а также полностью вириализованное состояние, что в целом характерно для зрелых гало. Физические свойства ранних гало (несферическая морфология, неоднородности барионной и темной материи), а также динамические факторы – турбулентность, неравномерная аккреция газа и угловой момент, характеризующие реальные газовые облака, – не учитываются в упрощенной модели. Однако они могут играть определяющую роль в возможности прямого коллапса газа с формированием массивной НЧД. Тем не менее авторы считают, что результаты работы являются убедительным доказательством справедливости предложенного сценария формирования НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \approx 10^5 M_{\odot}$ вокруг красного смещения $z \approx 17$.

Наиболее сильным допущением предлагаемой модели является возможность аннигиляции или распада ТМ с испусканием большого потока фотонов с необходимым спектром, что не является общепринятым и доказанным свойством ТМ.

В работах Поллак и др. (2015), Фэн и др. (2021) рассмотрена гипотеза образования НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \geq 10^5 M_{\odot}$ в результате гравитационно-термического коллапса (gravothermal collapse) ТМ с определенной долей СВТМ, находящейся в гало ТМ протогалактики.

В работе Поллак и др. (2015) рассматривается влияние на гравитационно-термический коллапс небольшой доли ТМ, так называемой “uCBTM” (ultra-strongly CBTM), с концентрацией $f \ll 1$, которая обладает большим независимым от скорости поперечным сечением упругого самовзаимодействия на единицу массы $\sigma \gg 1 \text{ см}^2/\text{г}$. В рассмотренной модели присутствие “uCBTM” приводит к образованию ЧД с массой около 2% от общей массы “uCBTM” в гало в очень ранние времена. Для примера в работе приведены результаты расчета образования квазара ULAS J1120+0641 с массой $M_{\text{СМЧД}} \approx 2 \times 10^9 M_{\odot}$ к $z = 7.086$. Согласно расчетам, при величине произведения $\sigma f = 2.5 \text{ см}^2/\text{г}$ при $\sigma = 2.23 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{г}$ и $f = 1.12 \times 10^{-5}$, для увеличения его массы на четыре порядка за счет барионной аккреции ограниченной пределом Эддингтона, НЧД с массой $M_{\text{НЧД}} \approx 2 \times 10^5 M_{\odot}$ должна сформироваться за время 64.5 млн. лет между $z = 15$ (временем образования гало ТМ) и $z = 12.9$. В расчетах образования этого же квазара полностью за счет “uCBTM” без барионной аккреции к $z = 7.086$ за время 479 млн. лет, начиная с $z = 15$, использовалась величина $\sigma f = 0.336 \text{ см}^2/\text{г}$ при $\sigma = 2.99 \text{ см}^2/\text{г}$ и $f = 0.112$.

В работе Фэн и др. (2021) исследуется роль БМ в гало протогалактики при гравитационно-термическом коллапсе СВТМ. Показано, что присутствие БМ в гало, даже со

статичным во времени профилем массы, может значительно ускорить коллапс СВТМ в гало. Время коллапса сокращается, примерно, в 100 раз по сравнению с вариантом, когда в расчетах используется только СВТМ, хотя масса вещества, захваченная в центральной коллапсирующей области в этом случае, примерно в 20 раз больше, чем в варианте с учетом БМ. Для примера в работе приведены результаты расчета образования квазара J1205-0000 с массой $M_{\text{СМЧД}} = 2.2 \times 10^9 M_{\odot}$ с уровнем аккреции 0.16 от предела Эддингтона к $z = 6.7$. В расчетах квазар с массой $M_{\text{СМЧД}} \approx 1.9 \times 10^9 M_{\odot}$ полностью формируется за счет СВТМ в присутствии БМ в гало протогалактики между $z = 8$ и $z = 7$ за время коллапса 124 млн. лет при поперечном сечении саморассеяния на единицу массы $\sigma = 1.2 \text{ см}^2/\text{г}$. Время образования указанного квазара в гало только из СВТМ по расчетам авторов (Фэн и др., 2021) должно составлять 15 млрд. лет.

Авторы работ Поллак и др. (2015), Фэн и др. (2021) считают, что предлагаемый механизм гравитационно-термического коллапса с участием СВТМ является новым механизмом образования НЧД, потенциально открывающий множество возможностей. В этом сценарии СВТМ обладает вязкостью, которая рассеивает остаток углового момента гало ТМ. Авторы используют в этих работах универсальные профили НФУ вириализованного гало ТМ (Navarro и др., 1996), характерные для зрелых гало. Однако авторы работы Поллак и др. (2015) не упоминают роль БМ в чрезвычайном ускорении коллапса и СВТМ. Расчеты времени коллапса в этой работе, выполненные без учета БМ, близки к результатам расчета в работе Фэн и др. (2021), где подчеркивается, что именно учет БМ позволяет развиваться коллапсу СВТМ за необходимый промежуток времени.

Предлагаемый сценарий образования тяжелых НЧД с участием СВТМ использует сильное допущение о существовании самовзаимодействующего компонента темной материи с различной величиной сечения рассеяния, которое на сегодняшний день не является общепринятым.

В работе Мешвелиани и др. (2023) представлены результаты исследования возможности гравитационно-термического коллапса субгало из СВТМ как источника возникновения ЧД средней массы в спутниках Млечного Пути. Используется модель “vdСВТМ” (velocity-dependent СВТМ), в которой поперечное сечение саморассеяния зависит от скорости и, следовательно, от массы гало ТМ, что позволяет прогнозировать временные рамки и масштабы масс при формировании ЧД средней массы. Рассматриваются гало СВТМ в вириальном равновесии с изначальной структурой, которая аппроксимируется профилем НФУ (Наварро и др., 1996) (Наварро и др., 1997).

В предлагаемом сценарии образования НЧД средней массы авторы еще более расширяют допущение о существовании СВТМ, вводя зависимость поперечного сечения саморассеяния от скорости частиц ТМ.

В работе Латиф и др. (2022) представлены результаты компьютерного моделирования редких слияний плотных холодных аккреционных потоков при $z = 35$, которые создают сильную сверхзвуковую турбулентность в гало, которая препятствует образованию каких-либо структур в гало. Далее за счет слияний и аккреции масса гало увеличивается и в нем образуются два плотных сгустка вещества, которые впоследствии при слияниях и аккреции набирают массу и коллапсируют, образуя два холодных красных гипергиганта еще до того, как в гало образуются какие-либо звезды. В периоды, когда аккреция практически отсутствует, звезды могут сжиматься, становясь более горячими и голубыми, и, в конечном итоге, обе достигают температур $100000-120000^\circ\text{K}$. Обе сверхмассивные звезды коллапсируют без взрыва при массах $31316 M_\odot$ и $39765 M_\odot$, образуя НЧД. Поскольку обе звезды на последних этапах своей жизни создают сильный ионизирующий ультрафиолетовый поток, который может снизить скорость аккреции, поэтому эти массы следует принимать за верхние пределы.

Авторы работы считают, что вероятность реализации предлагаемого механизма образования НЧД, даже в 10% случаев от количества подходящих гало, позволяет объяснить количество реально обнаруженных квазаров при $z > 6$. Тем не менее авторы оценивают верхний предел массы НЧД по предлагаемому механизму в $M_{\text{НЧД}} \leq 0.5 \times 10^5 M_\odot$ из-за падения темпов аккреции еще на стадии голубых гипергигантов. В результате эффективное увеличение массы ЧД за счет непрерывной аккреции со скоростью близкой к пределу Эддингтона в такой ситуации становится проблематичным. В таком случае становится затруднительным объяснить возможность формирования квазаров с массой $M_{\text{СМЧД}} \geq 10^9 M_\odot$ к $z \sim 7.5$.

Предложенный сценарий является многостадийным и вероятность его устойчивой реализации не является очевидной.

Все вышерассмотренные сценарии формирования массивных НЧД кардинально отличаются один от другого и не имеют статуса общепринятых. Даже сами авторы признают, что их реализация связана с достаточно исключительными условиями, которые должны возникать, при рассмотренных механизмах, на всех этапах формирования НЧД.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СМЧД

Рассмотрим гипотезу о возможности формирования СМЧД преимущественно из ТМ на достаточно ранних этапах возникновения Вселенной. В частности, по работам Поллак и

др. (2015), Фэн и др. (2021), Мешвелиани и др. (2023) можно наблюдать развитие этой гипотезы, которая опирается на допущение существования СВТМ с различной концентрацией и поперечным сечением упругого саморассеяния на единицу массы, которое, возможно, зависит и от скорости частиц СВТМ. Формирование СМЧД в результате гравитационно-термический коллапса рассматривается в вириализованных гало ТМ, которые аппроксимируются профилем НФУ. В работе Фэн и др. (2021) сделана попытка учесть присутствие БМ с неизменным профилем плотности в процессе формирования СМЧД.

В конце эпохи первичной рекомбинации в объемных ГН определенного размера, включающих в свой состав компоненты ТМ и БМ, гравитационная плотность вещества могла быть несколько выше, чем в среднем по пространству. В быстро расширяющейся Вселенной, скорее всего, распределение скоростей холодных частиц вещества в ГН были близки к изотропному, а угловой момент ГН был близок к нулю относительно любой точки неоднородности. В ранней Вселенной отсутствовали вращательные возмущения (Кригель, 2016; Долгов, 2018).

Согласно работе Дорошкевича и др. (2012), формирование гало протогалактики может развиваться по приведенному ниже сценарию. С уменьшением красного смещения z контраст плотности слабонеоднородного начального пространственного распределения ТМ и БМ возрастает. В областях повышенной плотности темп расширения замедляется, и в какой-то момент разбегание вещества ГН останавливается и может переходить в коллапс. Средняя плотность ТМ во Вселенной более чем в 5 раз превышает плотность БМ, поэтому именно холодная бесстолкновительная ТМ управляла процессом формирования ГН и их дальнейшей эволюцией. Поскольку ТМ является холодной и слабовзаимодействующей, то градиенты давления в ней малы, и они не могут служить препятствием развитию гравитационной неустойчивости. В ходе сжатия ГН в компоненте ТМ, при участии и БМ, развиваются процессы бесстолкновительной бурной гравитационной релаксации и образуется гравитационно-связанный объект ТМ, так называемое гало. При формировании гало недостаточно рассматривать процесс падения на его центральную область только диффузного вещества. Как следует из расчетных космологических моделей с высоким разрешением, формирование гало сопровождается образованием систем маломассивных субгало с высокой плотностью ТМ и их последовательным слиянием во все более крупные субгало в главном гало протогалактики. Этот процесс иерархического скупивания обеспечивает перенос массы внутрь главного гало, в котором относительно маломассивные субгало из-за приливного взаимодействия и динамического трения с окружающим веществом сливаются. Оба процесса – падение диффузного вещества и последовательное слияние спутников-субгало – играют сопоставимые роли в формировании гало ТМ.

Развитие вышеизложенного сценария может происходить следующим образом. В ходе иерархического скучивания и падения диффузного вещества в центральной области формирующегося гало ТМ растет общая масса и плотность ТМ и БМ, а в последней растет давление и его градиент, что начинает противодействовать сжатию БМ. Тем не менее основная часть ТМ с частью БМ продолжает сжиматься, оставляя значительную массу БМ вне центральной области ГН. В процессе сжатия отношение средней плотности ТМ к БМ увеличивается. В результате модуль гравитационного потенциала в центральной области ГН может в несколько раз превышать потенциал сжимающейся области БМ, в которой отсутствует заметный по массе компонент ТМ. Захваченная БМ, являющаяся диссипативной средой, за счет гравитационной связи с ТМ обеспечивает процесс диссипации и вязкость, что значительно ускоряет процесс сжатия. Необходимость учета БМ при формировании центральной области ГН отмечалась, например, в работах Гуревич, Зыбин (1995), Дорошкевич и др. (2012). При дальнейшем сжатии ГН в ее центральной области, зависящей от размера и массы этой ГН, ТМ и захваченная БМ испытывают гравитационно-термический коллапс с образованием массивной НЧД. В тоже время, плотность БМ в областях, находящихся в относительной близости к НЧД, увеличивается, а ее распределение, скорее всего, становится фрагментированным. Гравитационно-термический коллапс в центральной области ГН – гало протогалактики с образованием массивной НЧД развивается еще до окончания процесса вириализации гало ТМ.

В цитируемых работах Поллак и др. (2015), Фэн и др. (2021), Мешвелиани и др. (2023) рассматривается аналогичная ситуация. В центральной области ГН в ТМ, включающей в свой состав какую-то часть ТМ, называемую СВТМ, которая взаимодействует сама с собой с определенным сечением, а с остальной ТМ лишь гравитационно, в процессе сжатия и последующего гравитационно-термического коллапса формируется массивная НЧД. Аналогом СВТМ является БМ, состоящая в основном из водорода и гелия, которая так же взаимодействует сама с собой с соответствующими сечениями взаимодействия, обеспечивая функции СВТМ в концепции формирования СМЧД, и при этом взаимодействует с ТМ также лишь гравитационно. Таким образом во всей концепции формирования СМЧД, рассматриваемой в приведенных и аналогичных работах, можно сопоставить СВТМ с БМ с соответствующими сечениями взаимодействия. По сути дела, в работе Фэн и др. (2021) это и показано. Именно присутствие БМ и сократило расчетное время формирования СМЧД из СВТМ с 15 млрд. лет, примерно, в сто раз, хотя при проведении расчетов БМ не участвовала в коллапсе и ее распределение осталось неизменным.

В ранних работах, например, Наварро и др. (1996), Мур и др. (1998), Джентиле и др. (2007) для вириализованных гало ТМ возникала известная проблема образования

касноподобных профилей плотности в центральных областях гало ТМ. Прямые наблюдения по обнаружению присутствия ТМ в галактиках не показывают никаких сингулярностей в распределении ТМ вблизи центра галактик. Численные модели распределения ТМ неплохо совпадают с наблюдаемыми на масштабах гало скоплений галактик, но в тоже время отличаются от профилей плотности ТМ в центральных областях гало галактик.

Например, в обзоре Засов и др. (2017) приводятся известные механизмы быстрого исчезновения каспа в центральных областях гало ТМ. Первый из них подразумевает отток ТМ вследствие интенсивного процесса звездообразования, при котором горячий газ, покидающий центральную область протогалактики, увлекает за собой и ТМ. Во втором случае решение проблемы ищется в определенных, не общепринятых, свойствах ТМ. Предлагаются модели с теплой ТМ или с наличием гипотетических частиц в качестве частиц ТМ. В работе Дорошкевич и др. (2012) предлагается учитывать случайные процессы слияний субгало различного масштаба “подогревающие” частицы ТМ в центральных областях коллапсирующих гало, что приводит к подавлению касноподобных профилей плотности.

В предлагаемом сценарии формирования СМЧД преимущественно из ТМ, как и в работах, например, Поллак и др. (2015), Фэн и др. (2021), Мешвелиани и др. (2023), проблема каспа разрешается естественным образом. Развивающаяся сингулярность из ТМ в гало еще несформировавшихся галактик коллапсирует в НЧД. В процессе коллапса достаточно большая доля массы ТМ в центральной области гало будет собрана НЧД. При аккреции БМ на ЧД, она проявляется в виде растущего по массе квазара в ядре протогалактики. Вероятно, что в этом случае быстрое увеличение массы СМЧД не всегда сопровождается аккрецией БМ на пределе Эддингтона или много выше, а, скорее всего, масса СМЧД может увеличиваться и за счет аккреции большой массы ТМ, гравитационно связанной с БМ, которая и при аккреции обеспечивает диссипацию и вязкость. В результате плотность ТМ в центральной области гало и далее уменьшается.

В ранней Вселенной из-за малых вращательных возмущений в гало протогалактики образовавшаяся СМЧД могла обладать незначительным начальным угловым моментом. В результате возникает близкая к сферически-симметричной аккреция на СМЧД значительных объемов холодной ТМ и части БМ, обладающих высокой плотностью в центральной области ГН, что приводит к стремительному увеличению массы СМЧД. Падение БМ может быть остановлено давлением излучения, вызванного именно аккрецией захваченной БМ по механизму обратной связи. Падение ТМ может существенным образом уменьшить ее плотность в области вокруг СМЧД. Тем не менее холодные ТМ и БМ могут и дальше поступать в центральную область ГН и снова вызвать интенсивную аккрецию на СМЧД. Рассмотренный механизм, с большой вероятностью, может реализоваться в эллиптических

галактиках, особенно гигантских, в которых фиксируются СМЧД массой в десятки миллиардов масс Солнца. Можно предположить, что излучение квазара на стадии аккреции БМ совместно с большой долей ТМ может отличаться по своим характеристикам от излучения при аккреции только БМ.

Возможность развития предлагаемого сценария формирования НЧД, в том числе и сверхмассивной, определяется несколькими допущениями. В их число не входят процессы или явления, которые выходят за рамки общепринятых.

СМЧД И ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК

Появление в центральной области ГН массивного излучающего квазара изменяет, либо значительно корректирует механизмы дальнейшего формирования галактик, основанные на иерархической концепции, например, изложенные в книге Сильченко (2017). Далее формирование галактики может происходить по следующему сценарию. В центральной области ГН с одиночным квазаром, обладающим малым начальным угловым моментом, формируется близкая к сферической область поглощения излучения, вызванного аккрецией БМ на квазар. В окружающей квазар области с высокой плотностью неоднородно распределенной и нагретой БМ, что обусловлено формированием СМЧД, излучение квазара интенсивно поглощается, первоначально в относительно тонком слое, вызывая процесс ионизации газового компонента БМ и его дополнительный нагрев. Неоднородности плотности газа еще более увеличиваются и возникает турбулентность. В этих неоднородностях с высокой плотностью как БМ, так и ТМ, при значительных градиентах гравитационного потенциала вокруг квазара, могут эффективно формироваться массивные звезды популяции III.

Одновременно с этим продолжается процесс падения ТМ и БМ на центральную область ГН – гало протогалактики. Возникновение квазара и массивных звезд должно существенным образом изменять процесс иерархического сгущивания субгало ТМ при формировании гало протогалактики. Гравитационные неоднородности плотности вещества, возникшие при формировании СМЧД и движении массивных звезд популяции III, разрушают крупную квазисферическую структуру ТМ в отдельных субгало вокруг центральной области ГН. Потоки интенсивного излучения квазара и массивных звезд, а также корональные выбросы и звездный ветер, взаимодействуют с БМ и также разрушают структуру субгало. В гравитационном потенциале ГН происходит падение на ее центральную область квазисферических оболочек, содержащих хаотизированные гравитационно-связанные структуры как БМ, так и ТМ, образовавшиеся при разрушениях субгало. В этом процессе ТМ

частично подвергается бесстолкновительной бурной гравитационной релаксации, в ходе которой происходит нагрев определенной доли частиц ТМ в центральной области ГН (Дорошкевич и др., 2012).

При столкновениях хаотизированных структур БМ возникают ударные волны и происходит нагрев газа. Одновременно с этим, в процессе поглощения потока интенсивного излучения квазара и родившихся звезд происходит дополнительный нагрев газа и формируется волна его ионизации, распространяющаяся по объему ГН.

В квазисферических оболочках вокруг центральной области ГН возникают многочисленные неоднородности плотности БМ и ТМ, в которых развивается режим интенсивного звездообразования, в том числе, и рождения звезд популяции III. В результате процесс сгущивания хаотизированных и частично релаксировавших структур ТМ и БМ захватывает все новые и новые области ГН, развиваясь по ее радиусу, что существенно ускоряет формирование гало протогалактики. Как следствие, во внутренних областях формирующегося гало, захваченных этим процессом, отсутствуют неразрушенные структурированные образования ТМ и БМ.

Тем не менее отдельные субгало, находящиеся на различных расстояниях от внешней границы гало протогалактики, но гравитационно связанные как с гало, так и, иногда, между собой, могут сохранить свою структуру. В некоторых субгало, возможно слившихся, она может быть нарушена, но сохранится общая масса ТМ и БМ. В результате в указанных субгало на периферии главного гало протогалактики могут сформироваться различные галактические спутники. Однако из-за разрушений субгало в предлагаемом сценарии может сформироваться меньшее количество галактических спутников – карликовых галактик и шаровых скоплений, чем это следует из иерархической концепции.

Для предложенного сценария формирования галактики необходимо рассмотреть возможность рождения звезд популяции III с более сильным участием ТМ. Гравитационный потенциал ТМ может эффективно противодействовать увеличивающемуся давлению в БМ при зарождении звезды, что будет обеспечивать процесс интенсивного формирования массивных звезд популяции III, в веществе которых существенную долю может составлять гравитационно-захваченная ТМ. Этот механизм реализуется при относительно небольших скоростях частиц ТМ, меньших скорости убегания на последних этапах формирования звезды. Например, в работе Наварро и др. (2008) для вириализованного гало ТМ массой $\sim 10^{12} M_{\odot}$ показано, что в его центральной области максимальная круговая скорость и дисперсия скорости частиц ТМ составляют около 25 км/с и 120 км/с, соответственно. На начальных этапах процесса вириализации гало в его центральной области скорость частиц ТМ может быть и меньше.

Пока плотность БМ и ТМ в неоднородностях определенного размера позволяет эффективно формироваться звездам популяции III, их распределение должно быть сдвинуто в сторону звезд с массой в сотни раз больше солнечной. Такие звезды могут коллапсировать в ЧД, масса которых существенно превышает солнечную. Количество сформировавшихся звезд популяции III как одиночных, так и парных (тройных) в центральных областях ГН могло быть достаточно высоким. В ранней Вселенной звезды популяции III формировались в неоднородностях плотности вещества, которые не обладали значительным вращением, что приводило после коллапса звезды к образованию ЧД с малым угловым моментом. Кроме этого, при падении хаотизированных структур БМ на центральную область ГН за счет динамического трения о холодную ТМ они должны терять часть момента импульса (Сильченко, 2017; Орлов, Райков, 2014). Предложенный сценарий может объяснить регистрируемое гравитационно-волновыми обсерваториями большое количество слияний ЧД массой в десятки солнечных, обладающих малым угловым моментом.

В рассматриваемом сценарии уже на начальной стадии формирования СФЗО частицы ТМ нагреваются в различных процессах и покидают область звездообразования. Как было отмечено выше, при релаксации в ходе сгущивания хаотизированных структур ТМ из-за разрушения субгало, определенная доля частиц ТМ нагревается и, возможно, уходит из СФЗО. В работе Понтцен, Говернато (2014) рассматривается процесс удаления ТМ из центральной области карликовых галактик в результате множественных коротких локальных вспышек звездообразования. В каждой вспышке газ, нагретый излучением, звездным ветром и корональными выбросами молодых звезд, вытесняется из центра галактики со скоростью, превышающей локальную круговую скорость. Гравитационный потенциал в центральной области уменьшается и частицы ТМ уходят на траектории с большим расстоянием от центра. После охлаждения на периферии гало этот газ опускается в центральную область и создает повторную вспышку звездообразования. Указанный механизм дает возможность накапливать эффект удаления ТМ из центра карликовой галактики по мере его повторения в ходе нескольких выбросов газа.

При взрывах сверхновых сгустки вещества распространяются со скоростью в несколько раз превышающую локальную круговую скорость для формирующегося СФЗО. В гравитационном потенциале движущихся сгустков частицы ТМ ускоряются и уходят из области звездообразования в гало протогалактики.

Кроме этого, частицы ТМ в результате нескольких последовательных рассеяний в гравитационных потенциалах движущихся звезд СФЗО, могут увеличивать свою скорость за счет их энергии до скорости ухода из гравитационного потенциала СФЗО в данной точке вблизи его границы. Максимальный модуль вектора приращения скорости частиц ТМ может

быть равен первой космической скорости для рассеивающей звезды (по механизму гравитационного маневра), а при прохождении частиц ТМ с прицельной дальностью меньше радиуса рассеивающей звезды – второй космической скорости. Необходимо отметить, что обе скорости на некоторых массивных звездах могут быть выше скорости ухода из СФЗО. Этот механизм достаточно эффективен, так как ускорение или замедление частиц ТМ осуществляется только гравитационно на любой траектории и на всех звездах СФЗО, в том числе и при проходе через звезду. Особенно эффективно механизм рассеяния реализуется на двойных черных дырах. Частицы ТМ с малой скоростью гравитационно связываются звездами, а движущиеся с большой скоростью уходят из СФЗО.

Например, в эллиптических галактиках по данным, представленным в обзоре Засов и др. (2017), массовая доля ТМ, оцененная разными методами в пределах одного эффективного радиуса, где содержится (по определению) половина интегральной светимости эллиптической галактики, составляет от нескольких до 30%.

Время жизни массивных звезд популяции III не превышает нескольких миллионов лет. После гибели звезд космическая среда обогащена металлами для формирования последующих поколений звезд. Необходимо заметить, что при значительной доле массы гравитационно-захваченной ТМ в звезде популяции III, модуль ее гравитационного потенциала увеличится, а время существования, скорее всего, уменьшится. Может измениться состав и количество химических элементов, выброшенных после гибели звезды в космическую среду. При уменьшении времени жизни звезд популяции III и определяющем участии их излучения в процессе реионизации, вероятность обнаружения звезд популяции III оптическими телескопами очень мала.

В этом сценарии формирования СФЗО, из центральной области ГН по ее радиусу, реализуется максимально высокий темп звездообразования в протогалактике. В областях вблизи границы формирующегося СФЗО, в хаотизированных неоднородностях плотности материи рождаются отдельные звезды или их не структурированные скопления, чей возраст практически совпадает с возрастом звезд в центральной области ГН. Тем не менее после первичной вспышки звездообразования, из-за общего нагрева БМ, фактора сферичности и ухода нагретой БМ вместе с ТМ на периферию гало, темп звездообразования снижается. В область звездообразования могут опуститься остывшие на периферии гало газ и пыль, что приведет к интенсификации процесса звездообразования в СФЗО и новому оттоку БМ и ТМ на периферию галактического гало.

Интенсивное звездообразование приводит к накоплению в объеме СФЗО большого количества пыли после гибели как звезд популяции III, так и других сверхновых, которая излучением и звездным ветром выталкивается в направлении внешней движущейся границы

СФЗО. При уменьшении интенсивности звездообразования и, соответственно, снижении скорости движения границы СФЗО, вокруг него образуется плотная пылевая оболочка, которая может выпускать наружу только чернотельный спектр пыли, нагретой излучением звезд СФЗО, что замедляет процессы ионизации и нагрева газа в протогалактике с внешней стороны пылевой оболочки, а также уменьшает звездообразование.

В таком сценарии рождения звезд вокруг СМЧД как в центральной области гало протогалактики, так и в субгало, сохранивших свою структуру на периферии главного гало протогалактики, достаточно быстро могут сформироваться СФЗО, радиальный размер которых определяется радиальным распределением плотности БМ, а также массой гало протогалактики или субгало. В ГН с малым угловым моментом, сохраняющимся на достаточно большом временном интервале, основная масса БМ в ГН опускается в направлении ее центра образуя достаточно сферическую структуру. В результате СФЗО быстро вырастают в эллиптические галактики, которые в этом сценарии собирают значительную массу БМ в звездах, формируя более молодые звезды в своих внешних областях. Свободный газ, разогретый в процессе интенсивного звездообразования до вириальной температуры, и оставшаяся несвязанной подогретая во внутренних областях галактики ТМ концентрируются вблизи внешней границы гало. В субгало на периферии гало протогалактики могут сформироваться эллиптические или сфероидальные карликовые галактики, а также сферические звездные скопления.

СФЗО в виде шаровых скоплений могли сформироваться вокруг ЧД средней массы в центральных областях субгало. Интересным является вопрос о связи размера и массы субгало с возможностью образования в его центральной области ЧД в результате прямого коллапса ТМ и части БМ. Для небольшого шарового скопления более логичным может являться механизм возникновения в его центральной области одной или нескольких ЧД в результате коллапса в ЧД достаточно больших звезд популяции III, которые могут содержать в своем составе и ТМ. Излучение таких звезд могло являться спусковым механизмом формирования СФЗО. Шаровые скопления имеют достаточно правильную сфероидальную форму, что, скорее всего, определяется более правильной сфероидальной формой распределения ТМ и БМ в субгало, находящихся на периферии гало протогалактики. Небольшой размер такой ГН позволяет ей быстрее приходить в вириализованное состояние без возникновения значительного углового момента и иметь малый градиент гравитационного потенциала, вызванный внешними источниками, по всей области ГН. В предлагаемом сценарии формирования СФЗО шаровых скоплений, в процессе интенсивного, практически одновременного звездообразования, из-за их относительно малой массы и размера они могут

полностью потерять компоненты БМ и ТМ, которые, попадая в гало галактики распределяются по его объему.

В ГН шарового скопления с незначительным вращением образовавшаяся ЧД в его центре будет обладать малым начальным угловым моментом. В результате в центральной области ГН небольшого размера с высокой плотностью ТМ и БМ может возникнуть сферически-симметричная аккреция и большая доля массы ТМ и БМ будет захвачена ЧД скопления, что приведет к быстрому увеличению массы СМЧД. Из оставшейся в субгало БМ может сформироваться темное шаровое скопление.

Предложенный сценарий формирования шарового скопления можно рассматривать и применительно к карликовым галактикам – эллиптическим или сфероидальным, сформировавшимся в субгало, размер и масса которых являются промежуточными между гало шарового скопления и гало родительской протогалактики.

Возникшие на периферии гало протогалактики в различных субгало звездные образования (шаровые скопления и карликовые галактики) приобретают вращение вокруг СФЗО с центральной СМЧД протогалактики. Их орбиты являются эллипсоидальными с большим эксцентриситетом, что говорит о формировании таких звездных образований во внешних областях гало протогалактики. Орбиты такой формы позволяют до минимума свести время воздействия на звездное образование градиентов гравитационного потенциала структурных элементов галактики, а также его торможение газовым компонентом и ТМ, имеющими в центральных областях галактики максимальную плотность. Это обеспечивает длительное существование таких галактических спутников. Звездные образования, возникшие в гравитационно-связанных субгало на периферии, могут вначале двигаться компактно по близкими траекториями, но из-за различного воздействия на них вышеперечисленных факторов со временем расстояние между ними может значительно увеличиться.

Балджи будущих дисковых галактик могли сформироваться так же по сценарию образования СФЗО. Гравитационное взаимодействие между двумя или несколькими ГН может вызвать (усилить) вращение БМ и ТМ вокруг СФЗО – балджей дисковых галактик, которые могут находиться на различных стадиях формирования. Большая масса балджа протогалактики по сравнению с массой СМЧД позволяет ГН эффективно гравитационно взаимодействовать, создавая вращающиеся звездные структуры, сохраняющие СФЗО. В результате формируются различные типы линзовидных и спиральных галактик.

Гибель звезд популяции III и других сверхновых в СФЗО дисковой галактики довольно быстро приводит к образованию значительного количества космической пыли, которая выдувается из СФЗО на его внешнюю сферическую границу. При возникновении вращения

эта пыль опускается в плоскость формирующегося диска, образуя кольцеобразную область с высокой плотностью пыли, характерную для спиральных и, особенно, линзовидных галактик.

Дисковая структура линзовидной галактики могла сформироваться на достаточно позднем этапе, когда основная масса БМ в гало, опускаясь к центру ГН, образовала близкую к сферической структуру, в центральной области которой сформировалось СФЗО – балдж линзовидной протогалактики. Из-за гравитационного взаимодействия возникло вращение указанной структуры из оставшейся БМ и ТМ в ГН вокруг СФЗО линзовидной протогалактики. Барионная материя, распределенная достаточно однородно в сферической структуре вокруг СФЗО линзовидной протогалактики, вращаясь, начала опускаться в плоскость формирующегося дискового компонента, увеличивая в нем плотность вещества. В результате начался процесс звездообразования с возникновением достаточно толстого диска линзовидной галактики, который имеет выраженную аксиально-симметричную структуру. Его звездное население по возрасту и характеристикам также однородно и близко к населению балджа.

Балдж спиральной галактики мог начать свое формирование в ГН, уже обладающей некоторым угловым моментом. В этом случае, возникшая в её центральной области СМЧД могла обладать вращением, так же, как и сформировавшееся СФЗО — дискообразный балдж. Вращение ГН могло появиться уже после формирования СМЧД и достаточно выраженного СФЗО – классического балджа. Раннее возникновение вращения в спиральной протогалактике могло не позволить большей части БМ и ТМ опуститься в центральную область ГН, оставив их в объеме гало протогалактики с достаточно неоднородным распределением плотности различного масштаба. Скорость вращения возникшей СМЧД в центральной области неоднородности в процессе аккреции увеличивается, что приводит к формированию джетов, которые эффективно выдувают БМ и гравитационно связанную с ней ТМ из области гало вокруг оси вращения протогалактики. В дальнейшем при образовании дефицита газа в центральной области балджа, излучение квазара ослабевает так же, как и его джеты. Массы центральных СМЧД спиральных галактик не достигают, как правило, очень больших величин. Барионная материя, неравномерно распределенная в гало протогалактики, постепенно опускается в плоскость диска, формируя в нем различные по структуре области звездообразования, характерные для спиральных галактик. Часть БМ может быть захвачена балджем, что может создать новые области звездообразования и в балдже спиральной галактики.

Таким образом, в структурированных галактиках ранней Вселенной наблюдается общая структура – ярковыраженное СФЗО с СМЧД в его центральной области и дискообразное образование вокруг него, выраженное в разной степени, вплоть до его полного

отсутствия. Звездное население СФЗО в большинстве галактик является старым с возрастом более 10 млрд. лет, что может говорить о схожем сценарии начала формирования основных типов галактик в ранней Вселенной. Различие морфологических типов сформировавшихся галактик, в основном, обусловлено долей БМ, оставшейся в объеме гало протогалактики на момент возникновения вращения, которая не опустилась в центральную область ГН с уже сформировавшимся СФЗО.

Неправильные (не структурированные) галактики могли возникнуть из-за гравитационного взаимодействия, по крайней мере, двух сливающихся ГН, которое разрушило центральные квазисферические области ГН, создав в них относительно крупные хаотизированные гравитационно-связанные объемные структуры ТМ и БМ, которые в целом могут обладать и некоторым вращением. В указанных структурах начинается процесс формирования нескольких НЧД различной массы, или (и) больших звезд популяции III, которые запускают процесс звездообразования в хаотизированных объемных структурах. Гравитационное взаимодействие этих структур формирует неправильную галактику. Такой же механизм может быть применен к формированию галактических спутников – карликовых неправильных галактик в сливающихся субгало на периферии гало протогалактики.

В дальнейшей эволюции, первоначально сформировавшихся галактик, свою роль начинают играть джеты квазара, гравитационное взаимодействие между структурами галактики, волны плотности вещества галактики, приток холодного межгалактического газа и отток горячего газа галактики, гравитационное взаимодействие галактик, вплоть до возникновения полностью слившихся галактик и т.д. Так, например, при слиянии эллиптических или дисковых галактик может образоваться более массивная эллиптическая галактика. Неравномерный приток во времени и в пространстве внутригалактического и межгалактического газа в плоскость диска линзовидной галактики может возродить звездообразование и сформировать впоследствии спиральную галактику (Катков др., 2014; Сильченко, 2017) или активизировать звездообразование в любом из типов галактик. Вышеперечисленные причины могут создать бесконечное разнообразие галактик с их индивидуальными особенностями.

Предложенный сценарий формирования различных морфологических типов галактик в ранней Вселенной, по мнению автора, может объяснить высокую скорость возникновения галактик и их наблюдаемые особенности. Тем не менее можно на качественном уровне попытаться сравнить предложенный сценарий с некоторыми наблюдаемыми особенностями галактических структур ранней Вселенной.

СЦЕНАРИЙ И НЕКОТОРЫЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В недавней работе Сильченко (2025) представлены последние результаты исследований свойств галактик на самых ранних стадиях их эволюции, в том числе и ЧД в их центральной области. В работе подчеркивается ряд несоответствий между результатами наблюдений и теоретическими построениями на основе численных моделей космологической эволюции Вселенной. Так, при исследовании Ly-break галактик обнаружено, что ярких в ультрафиолете галактик на $z > 10$ более чем на порядок больше, чем предсказанных в модельных расчетах и даже обнаружена галактика на $z = 14.4$ с массой на два порядка больше расчетной. Для снятия противоречия с Λ CDM-моделью в работе предлагается обратить внимание на вспышечный режим звездообразования для галактик различной массы, который регистрируется на $z = 4 - 5$ и более высоких красных смещениях. На $z > 9$ вспышечный режим звездообразования обнаружен в больших выборках наблюдательных данных для 90% исследованных массивных галактик. Физическая причина этого режима пока не объяснена в стандартной космологической модели.

В предлагаемом сценарии ускоренного формирования гало протогалактики и СФЗО в его центре, реализуется максимально высокий темп звездообразования. Таким образом, можно предположить, что Ly-break галактики на больших красных смещениях являются формирующимися СФЗО – балджами всех морфологических типов галактик, которые проходят начальный этап формирования СФЗО в центральных областях гало протогалактик.

Другим типом массивных галактик на $z = 4 - 5$, результаты исследования которых представлены в цитируемой работе, являются субмиллиметровые галактики (SMG) и пылевые звездообразующие галактики (DSFG) с типичной звездной массой $\sim 10^{11} M_{\odot}$. Из наблюдений следует, что указанные галактики являются дисковыми и находятся на стадии формирования балджа во вспышечном режиме звездообразования, который окружен пылевым непрозрачным коконом и “спокойным” газовым диском с радиусом в несколько килопарсек. Газовые диски этих галактик – холодные не только по температуре, но и динамически холодные, а также тонкие, до 300 пк, с низкой дисперсией скоростей. Они менее турбулентные, чем газовые диски галактик на $z = 2$. В рамках стандартной космологической модели появление таких дисков не находит объяснений.

В предлагаемом сценарии, при формировании СФЗО – балджей дисковых галактик во вспышечном режиме звездообразования, излучение родившихся звезд и квазара, а также его джеты, выдувают большое количество космической пыли, возникшее после гибели звезд популяции III и других сверхновых, из СФЗО в направлении его внешней сферической

границы. При снижении интенсивности звездообразования, в том числе по причине возникновения вращения, на внешней границе СФЗО образуется пылевой кокон излучающий лишь тепловой спектр при его нагреве звездами формирующегося балджа дисковой галактики. При возникновении вращения холодный газ (не нагретый излучением звезд СФЗО либо остывающий), распределенный по объему гало, перестает уходить непосредственно в СФЗО, что стабилизирует его границу, а постепенно опускаются в плоскость диска, формируя холодный газовый диск. В дальнейшем пыль кокona также опускается в плоскость диска и оголяет балдж галактики. Как следствие, энергия молодых массивных звезд сформировавшегося балджа, через их излучение и звездный ветер, а также взрывы сверхновых, начинает поступать в диск, разогревая и турбулизируя его на меньших красных смещениях.

В цитируемой работе обращается внимание на результаты исследования отношения массы ЧД в центре галактики к ее звездной массе в интервале $z = 4 - 7$. Указанное отношение, в среднем, в десятки раз превышает наблюдаемое в локальной Вселенной на $z = 0$. Рассматриваются механизмы формирования “затравок” ЧД различной массы и возможность аккреции БМ на ЧД в сверхэддингтоновском режиме.

В работе Мецкуа (2018) приведены результаты обширного исследования активных ядер карликовых галактик, подтверждающее наличие в них ЧД промежуточных масс $M_{\text{ЧД}} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$. В работе Паскале (2024) сообщается, что в ядре карликовой сфероидальной галактики Leo I находится массивная ЧД с массой более $10^5 M_{\odot}$, которая сравнима с массой галактики.

В предлагаемом сценарии формирование центральных ЧД в результате коллапса ТМ и БМ в СМЧД (ЧД промежуточной массы) в различных типах галактик, в том числе и карликовых, увязывается с процессом последующего формирования галактики вокруг возникшей СМЧД. Такой механизм заранее предполагает большую величину указанного отношения на начальных этапах формирования галактики. Кроме того, предлагается рассмотреть возможность быстрого увеличения массы СМЧД в результате аккреции ТМ совместно с БМ, что позволяет иметь ЧД относительно большой массы в галактиках бедных БМ.

Предлагаемый механизм формирования галактик, по мнению автора, находит свое качественное подтверждение в морфологическом типе галактик в составе регулярных и иррегулярных галактических скоплений. В регулярных скоплениях правильной сферической формы, например в регулярном скоплении Волос Вероники, преобладают эллиптические и линзовидные галактики с чётко выраженной центральной частью. В центрах таких скоплений расположены гигантские эллиптические галактики. В иррегулярных скоплениях без

определённой формы, например в иррегулярном скоплении Девы, преобладают спиральные галактики. В регулярных скоплениях снижены и уравновешены градиенты гравитационного потенциала, поэтому вращение в галактиках, в основном, выражено достаточно слабо. В иррегулярных скоплениях градиенты гравитационного потенциала в областях расположения галактик не сбалансированы и вызывают существенное вращение галактик. В результате согласно предложенному сценарию, в регулярных скоплениях преимущественно должны формироваться эллиптические и линзовидные галактики, а в иррегулярных – спиральные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается сценарий образования в центральных областях ГН – гало протогалактик СМЧД, вокруг которых формируются СФЗО – балджи протогалактик на самых ранних этапах возникновения Вселенной. СМЧД формируется в процессе гравитационно-термического коллапса преимущественно ТМ с участием БМ, обеспечивающей диссипацию и вязкость. В дальнейшем увеличение массы СМЧД не всегда сопровождается аккрецией БМ на пределе Эддингтона или много выше, а, скорее всего, масса СМЧД быстро увеличивается за счет аккреции большой массы ТМ, гравитационно связанной с БМ, которая при аккреции обеспечивает вязкость.

Возникновение квазара и массивных звезд в центральной области ГН существенным образом изменяет дальнейший процесс иерархического сгущивания субгало ТМ с формированием гало протогалактики. Гравитационные неоднородности плотности вещества, возникшие при рождении СМЧД и массивных звезд, а также вызванные ими потоки интенсивного излучения и звездный ветер из центральной области ГН, взаимодействуют как с БМ, так и гравитационно связанной с ней ТМ. Это взаимодействие разрушает крупную квазисферическую структуру ТМ и БМ в различных субгало вокруг центральной области ГН. На центральную область ГН происходит последовательное падение квазисферических слоев, содержащих хаотизированные структуры как ТМ, так и БМ, которые частично подверглись бесстолкновительной бурной гравитационной релаксации. В дальнейшем процесс сгущивания хаотизированных, частично релаксировавшихся структур ТМ захватывает все новые и новые области ГН, развиваясь по ее радиусу, что существенно ускоряет формирование гало протогалактики.

Звездное население СФЗО формируется в окружающих квазар областях с высокой плотностью БМ и ТМ – в возникших в процессе сгущивания сгустках вещества. В указанных областях интенсивно развивается процесс формирования массивных звезд популяции III, ускоренный участием в этом ТМ, возможно с последующим ее захватом. Излучение

возникших массивных звезд и потоки вещества с их поверхности формируют на большем расстоянии от СМЧД новую область звездообразования и так далее. В результате реализуется максимально высокий темп звездообразования в центральной области гало протогалактики. Аналогичные процессы, но меньшего масштаба, могут развиваться в отдельных субгало, находящихся на внешней границе гало. После гибели звезд популяции III среда обогатилась металлами, необходимыми для формирования последующих поколений звёзд, и стала практически прозрачной из-за реионизации водорода. ТМ и гравитационно связанная с ней БМ нагреваются в различных процессах и уходят из области звездообразования во внешние области гало, что снижает темп звездообразования.

В ГН, обладающих малым угловым моментом, СФЗО достаточно быстро вырастают в эллиптические галактики, шаровые скопления или эллиптические карликовые галактики, расходуя в этом процессе значительную массу БМ. В ранней Вселенной из-за малых вращательных возмущений в гало эллиптической протогалактики образовавшаяся СМЧД будет иметь незначительный начальный угловой момент. Как следствие, может возникнуть близкая к сферически-симметричной аккреция на СМЧД большой массы холодной ТМ и части БМ, обладающих высокой плотностью в центральной области ГН. В результате масса СМЧД стремительно увеличивается. Падение БМ останавливается давлением излучения вызванного аккрецией захваченной БМ по механизму обратной связи.

Сценарий формирования дисковых галактик связан с возникновением вращения ГН с достаточно большой долей БМ, оставшейся в объеме гало протогалактики на момент его возникновения, которая не опустилась в центральную область ГН с уже сформировавшимся СФЗО. В дальнейшем эта БМ, распределенная в гало протогалактики с различной степенью однородности, опускается в плоскость диска, формируя характерные радиальные звездные структуры дисков линзовидных и спиральных галактик, а, частично попадая в балдж галактики, вызывает в нем рождение новых звезд.

При достаточно однородном сферически симметричном распределении оставшейся БМ вокруг СФЗО, на момент возникновения вращения, формируется относительно толстый диск линзовидной галактики, не обладающий ярко выраженной структурой. Раннее возникновение вращения в спиральной протогалактике ограничило приток большей части БМ и ТМ, неоднородно распределенной в гало протогалактики, в центральную область ГН. Оставшаяся в гало протогалактики, БМ с началом вращения постепенно опускается в плоскость диска спиральной галактики, формируя характерные по структуре области звездообразования в его плоскости.

Большое количество космической пыли в плоскости диска спиральной и, особенно, линзовидной галактики связано с гибелью звезд популяции III и других массивных звезд,

остатки которых выдуваются из СФЗО на его внешнюю границу. Образуется пылевой кокон с различной степенью прозрачности для излучения звезд, пыль которого с возникновением вращения опускается в плоскость диска.

Наблюдаемое отсутствие каспоподобных образований ТМ и ее относительно небольшая плотность в центральных областях сформировавшихся галактик объясняется несколькими причинами. Значительная масса ТМ находится в связанном состоянии в СМЧД и ЧД, рожденных звездами популяции III. Рассматриваются несколько механизмов ухода частиц ТМ из СФЗО. В том числе, при бесстолкновительной бурной гравитационной релаксации в ходе столкновений хаотизированных структур ТМ и БМ происходит нагрев определенной доли частиц ТМ и, возможно, их уход из СФЗО. Кроме этого, частицы ТМ в результате рассеяний в гравитационных потенциалах движущихся звезд СФЗО, а также ЧД, в том числе и двойных, увеличивают свою скорость за счет энергии их движения до скорости ухода из гравитационного потенциала СФЗО.

Таким образом, указанные особенности распределения ТМ в центральных областях галактик связаны с “созидательными” свойствами ТМ, а именно – с рождением СМЧД, звезд популяции III, остальных звезд и галактики в целом.

Предлагаемые в настоящей работе сценарии формирования СМЧД и затем, с их участием, различных морфологических типов галактик в ранней Вселенной – при подкреплении указанных сценариев необходимым объемом аналитических и численных исследований – могут существенно приблизить понимание природы, свойств и назначения ТМ в развитии Вселенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдан и др. (A. Bogdan, A.D. Goulding, P. Natarajan, O.E. Kovacs, G.R. Tremblay, U. Chadayammuri, M. Volonteri, R.P. Kraft, et al.), *Nature Astronomy* 8, 126 (2024).
2. Гуревич А.В., Зыбин К.П., *Успехи физ. наук* 165, 723 (1995).
3. Джентиле и др. (G. Gentile, C. Tonini, P. Salucci), *Astron.Astrophys.* 467, 925 (2007).
4. Долгов А.Д., *Успехи физ. наук* 188, 121 (2018).
5. Дорошкевич А.Г., Лукаш В.Н., Михеева Е.В., *Успехи физ. наук* 182, 3 (2012).
6. Засов А.В., Сабурова А.С., Хоперсков А.В. Хоперсков С.А., *Успехи физ. наук* 187, 3 (2017).
7. Катков И.Ю., Сильченко О.К. Афанасьев В.Л., *Астрофизический бюллетень* 69,129 (2014).
8. Кригель А.М., *Астрофизика* 59, 575 (2016).
9. Латиф и др. (M.A. Latif, D.J. Whalen, S. Khochfar, N.P. Herrington, T.E. Woods), *Nature* 607, 48 (2022).

10. Мецкуа и др. (M. Mezcu, F. Civano, S. Marchesi, H. Suh, G. Fabbiano, M. Volonteri), MNRAS 478, 2576 (2018).
11. Мешвелиани и др. (T. Meshveliani, J. Zavala, M.R. Lovell), Phys. Rev. D 107, 083010 (2023).
12. Мур и др. (B. Moore, F. Governato, T. Quinn, J. Stadel, G. Lake), Astrophys. J. 499, 5 (1998).
13. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D.M. White), Astrophys. J. 462, 563 (1996).
14. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D.M. White), Astrophys. J. 490, 493 (1997).
15. Наварро и др. (J.F. Navarro, A. Ludlow, V. Springel, J. Wang, M. Vogelsberger, S.D.M. White, A. Jenkins, C.S. Frenk, et al.), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 402, 21 (2010).
16. Орлов В.В., Райков А.А., Астрофизический бюллетень 69, 399 (2014).
17. Паскале и др. (R. Pascale, C. Nipoti, F. Calura, A. Della Croce), A&A, 684, L19 (2024).
18. Поллак и др. (J. Pollack, D.N. Spergel, P.J. Steinhardt), Astrophys. J. 804, 131 (2015).
19. Понтцен Э., Говернато Ф. (A. Pontzen; F. Governato), Nature 506, 171 (2014).
20. Сильченко О.К., Происхождение и эволюция галактик (Фрязино: Век 2, 2017).
21. Сильченко О.К., Успехи физ. наук 195, 188 (2025).
22. Фридлендер и др. (A. Friedlander, S. Schon, A. C. Vincent), JCAP06 2023, 033 (2023).
23. Фэн и др. (W.-X. Feng, H.-B. Yu, Y.-M. Zhong), Astrophys. Lett. 914, 26 (2021).