

38. Yu Y W, Wang X Y, Dai Z G *Astrophys. J.* **692** 1662 (2009)
39. Narayan R, Kumar P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **394** L117 (2009)
40. Zou Y-C, Piran T, Sari R *Astrophys. J. Lett.* **692** L92 (2009)
41. Fan Y-Z, Zhang B, Wei D-M *Phys. Rev. D* **79** 021301(R) (2009)
42. Derishev E V, Kocharovskiy V V, Kocharovskiy VI V *Astrophys. J.* **521** 640 (1999)
43. Pruet J, Woosley S E, Hoffman R D *Astrophys. J.* **586** 1254 (2003)
44. Jakobsson P et al. *New Astron.* **9** 435 (2004)
45. Bersier D et al. *Astrophys. J. Lett.* **584** L43 (2003)
46. Masada Y et al. *Astrophys. J.* **663** 437 (2007)
47. Woosley S E *Astrophys. J.* **405** 273 (1993)
48. Zhang W, Woosley S E, Heger A *Astrophys. J.* **608** 365 (2004)
49. Beskin G et al. *Bull. Special Astrophys. Observatory* **60–61** 217 (2007)

PACS numbers: **95.35**, +d, 98.62.Hr, **98.65**.–r
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004i.0434

Диски галактик и их эволюция

А.В. Засов, О.К. Сильченко

Рассматриваются ключевые проблемы, связанные с измерением масс звёздных дисков и тёмных гало в галактиках, а также с объяснением наблюдаемых свойств дисков, сформировавшихся в массивных тёмных гало.

Вращающиеся звёздно-газовые диски — это основные структурные элементы большинства наблюдаемых галактик. В них сосредоточено основное количество барионного вещества: звёзд и разреженной межзвёздной среды (в последней преобладает холодный газ). Диски обладают большим моментом импульса и вращаются так, что локальное значение угловой скорости уменьшается вдоль радиуса. При этом максимальная скорость вращения диска зависит от общей массы (светимости) галактики и обычно составляет $100–300 \text{ км с}^{-1}$, что соответствует периоду обращения в $200–300$ млн лет.

Диски галактик — неоднородные образования. Они содержат звёзды с различной массой и возрастом, причём самые молодые звёзды сосредоточены вблизи экваториальной плоскости диска: там, на дне потенциальной ямы, образуемой его гравитационным полем, скапливается межзвёздный газ. Но диски в целом — это старые образования, спектр их излучения указывает на доминирование звёзд с очень большим возрастом, превышающим 8 млрд лет. При этом наиболее старые звёзды образуют так называемый толстый диск, который в два-три раза толще основного, тонкого, звёздного диска, но масса толстого диска относительно невелика. Фактически формирование дисков в большинстве галактик ещё не завершено, поскольку в них (преимущественно в спиральных ветвях) и в настоящее время происходит образование звёзд из газа, но наблюдаемые темпы роста массы звёздного населения, за редкими исключениями, являются очень низкими, составляя $1–5$ масс Солнца в год на всю галактику типа нашей.

Происхождение галактик и механизм формирования дисков до сих пор остаются не очень понятными и активно обсуждаются в литературе. Сама форма дисков

однозначно указывает на то, что они образовались в результате эволюции диссипативной среды (газа), которая теряла энергию на излучение при сохранении момента импульса, а возраст дисков говорит о том, что они существовали уже в эпоху ранней молодости современных галактик и были охвачены в то далёкое время интенсивным процессом формирования звёздного населения. Дисковые галактики, часто содержащие обширные области звездообразования, издавна похожие на совокупность отдельных ярких пятен, действительно присутствуют в большом количестве среди галактик с красным смещением $z > 1$ — мы наблюдаем их в эпоху молодости.

В современных теориях образования галактик важную роль играет то обстоятельство, что формирование их звёзд происходило в гравитационном поле тёмной материи, или так называемой скрытой массы, которая в настоящее время должна образовывать массивное тёмное гало галактик, простирающееся далеко за пределы их видимой части. Как показали численные эксперименты, роль тёмного гало является определяющей не только в формировании диска из первоначально разреженного газа, но и в его последующей эволюции. Однако разделить массу наблюдаемой галактики на составляющие, принадлежащие газу, звёздам и тёмной материи, оказалось непростой задачей. Решить её для конкретных галактик удаётся благодаря совершенствованию методов измерения кинематических характеристик диска, с одной стороны, и моделей эволюции спектров излучения звёздных систем, с другой.

Научный бум, породивший целую лавину работ по скрытой массе внутри галактик, начался с появлением наблюдательных данных о скоростях вращения V галактических дисков на достаточно большом расстоянии R от центра, т.е. с получением достаточно длинных кривых вращения $V(R)$. В оптическом диапазоне для этого обычно используются либо классические дифракционные спектрографы с длинной щелью, либо сканирующие интерферометры Фабри–Перо в высоких порядках интерференции. Последние не имеют щели, и с их помощью можно оценивать доплеровский сдвиг спектральных линий сразу во многих тысячах точек по диску галактики, восстанавливая посредством довольно сложной математической обработки данных двумерное поле лучевых скоростей и получая из него кривую вращения. В России такие наблюдения проводятся на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН. Радионаблюдения в эмиссионных линиях атомарного водорода или молекул уступают оптическим по угловому разрешению, в то время как оптические наблюдения могут давать оценки скоростей как газа, так и звёзд, причём с высоким разрешением. Тем не менее в галактиках, богатых газом, радиокривые вращения прослеживаются значительно дальше оптических, иногда далеко за пределами видимых границ галактики, поскольку газовые диски часто бывают больше звёздных. Оказалось, что скорости вращения на больших расстояниях от центра галактики, как правило, не убывают, а выходят на почти плоский участок — плато — или даже возрастают с увеличением R .

Часто считают, что выход кривой вращения на плато является если не доказательством, то, по крайней мере, решающим аргументом в пользу существования в галактиках тёмного гало с массой, сопоставимой с массой видимого вещества или превосходящей её. На самом деле, это не совсем так, поскольку форма кривой

А.В. Засов, О.К. Сильченко. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
E-mail: zasov@sai.msu.ru

вращения, какая бы она ни была, сама по себе ещё не говорит о наличии скрытой массы. Кривая вращения с любой формой — возрастающая или убывающая — может быть объяснена наличием только одного диска, и она может отражать лишь особенность распределения массы в нём. Проиллюстрируем это на простых примерах.

Если бы плотность диска вдоль радиуса сохранялась постоянной или уменьшалась очень медленно, то скорость вращения диска должна была бы безудержно возрастать с увеличением R , даже при отсутствии гало. Конечно, в дисках реальных галактик постоянство поверхностной плотности заведомо не выполняется, их поверхностная плотность довольно быстро убывает с удалением от центра. Но и это не создаёт особой проблемы с объяснением плато на кривой вращения. Классический пример — так называемый диск Местеля. Это тонкий осесимметричный диск, поверхностная плотность $\Sigma(R)$ которого уменьшается от центра к периферии как $1/R$. Теоретически можно показать, что круговая скорость, которая в общем случае определяется радиальным градиентом гравитационного потенциала,

$$V^2(R) = R \frac{\partial \Phi(R)}{\partial R},$$

в случае диска Местеля не меняется с изменением R и кривая вращения галактики представляет собой горизонтальную прямую — от нуля до бесконечности — без притяжения к рассмотрению какого-либо тёмного гало! Масса такого диска в пределах любого заданного радиуса R будет определяться выражением $M(R) = V^2 R/G$, т.е. так же, как и в случае сферически симметричного распределения плотности. Иными словами, по кривой вращения диск Местеля нельзя отличить от сферически симметричной галактики.

Что в таком случае действительно можно рассматривать как прямое указание на наличие невидимой массы в дисковых галактиках, и в частности массивного тёмного гало? В первую очередь, это расхождение между измеренной кривой вращения галактического диска (имеются в виду как форма, так и абсолютные значения скоростей) и ожидаемой кривой, полученной в предположении, что галактика состоит только из "светлого" вещества, т.е. из непосредственно наблюдаемых компонентов. Поскольку основная масса диска заключена в звёздах, распределение яркости звёздного диска отражает распределение в нём массы, особенно если яркость измеряется в ближней инфракрасной области спектра, где преобладает излучение старых звёзд.

Яркость, а следовательно и поверхностная плотность, в широком интервале расстояний от центра убывает с увеличением R по экспоненциальному закону $I(R) \sim \exp(-R/R_0)$ (R_0 — радиальная шкала яркости), т.е. быстрее, чем $1/R$. Этому закону соответствует кривая вращения, проходящая через максимум при $R \approx 2R_0$ и затем медленно спадающая. Однако на кривых вращения галактик ожидаемый максимум практически никогда не наблюдается. Если подходить более строго и принять определённое отношение массы к светимости M/L для звёздного населения диска (это отношение можно оценить по наблюдаемым показателям цвета, используя модель звёздного населения), то легко перейти от распределения яркости к количественному распределению плотности диска (не обязательно имеющему экспоненциальный вид) и рассчитать ожидаемую скорость вращения галактики, обусловленную её

барионными составляющими. При этом, как правило, оказывается, что расчётная кривая проходит ниже наблюдаемой (по крайней мере, во внешних областях диска). Отсюда делается вывод о большом вкладе тёмной массы в общую массу галактики. Этот вклад наиболее существен в галактиках с низкой поверхностной яркостью диска: в пределах наблюдаемых границ тёмная масса у них может в несколько раз превосходить массу барионного вещества.

Есть несколько других аргументов, подтверждающих вывод о большой массе тёмного гало галактик. Два самых главных из них вытекают из наблюдений, хотя и имеют статистический характер.

Первый аргумент заключается в том, что интегральные массы галактик, измеренные другим способом — по относительным скоростям движения спутников, а также массы систем галактик оказываются значительно больше, чем масса их видимого вещества. Так, по данным Караченцева и Макарова [1, 2], среднее отношение суммарной массы галактик, образующих пару, к их суммарной светимости в инфракрасном K -диапазоне (2,2 мкм), определённое более чем по 500 парам, оказывается очень высоким: около 11 солнечных единиц, а для групп — более чем вдвое выше. Для сравнения, модели чисто звёздного населения дают значения M/L_K , не превышающие 1,5 [3]. Учёт массы газа и внутреннего поглощения лишь незначительно увеличивает это отношение. Следовательно, в области, превосходящей галактику по размерам и охватывающей целиком пару или группу галактик, масса тёмного вещества многократно превышает суммарную массу непосредственно наблюдаемой материи.

Второй аргумент связан с требованием устойчивости диска к гравитационным возмущениям. Диск обычно описывается как массивная сильно сплюснутая бесстолкновительная звёздная система, в которой могут распространяться колебания и развиваться неустойчивости на различных масштабах. Последние неизбежно приводят к динамическому разогреву диска до такого состояния, при котором он выходит на пороговый (маргинальный) уровень устойчивости к малым возмущениям. Диск тем устойчивее, чем больше радиальная дисперсия скоростей звёзд, составляющих его основную массу, а также чем быстрее он вращается и чем меньше его поверхностная плотность. Критическое (максимальное) значение поверхностной плотности, при котором сохраняется устойчивость, определяется как аналитически (при целом ряде упрощений), так и с помощью численных моделей. В первом приближении критическое значение поверхностной плотности пропорционально произведению радиальной дисперсии скоростей звёзд на угловую скорость диска на заданном радиусе. Поэтому, получив из наблюдений кривую вращения галактики и значения дисперсии скоростей старых звёзд диска, можно оценить максимально допустимую поверхностную плотность диска и соответствующее ему отношение M/L , а тогда исходя из полной светимости диска легко найти верхний предел его массы.

Для отдельно взятой галактики точность оценки невелика — обычно в пределах коэффициента 2, но по совокупности данных для различных галактик можно сделать некоторые обобщающие выводы. А именно подтверждено, что в пределах оптических границ галактики на долю гало приходится масса, как правило, сопоставимая с массой диска, а часто и превышающая её [4], что хорошо согласуется с результатами, основан-

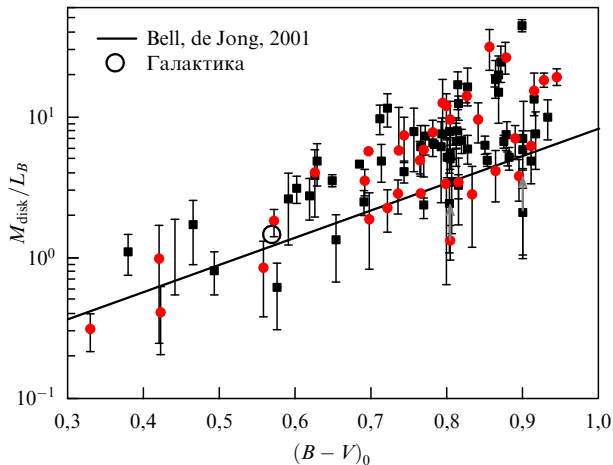


Рис. 1. Верхний предел отношения массы к светимости в голубой области спектра M/L_B (в солнечных единицах) для дисков галактик с различным показателем цвета, определённый в предположении маргинальной устойчивости диска (Засов, Хоперсков, Сабурова [7]). Кружки — галактики в двойных системах, квадраты — одиночные галактики или члены групп, полый кружок относится к нашей Галактике. Значения M/L_B для галактик с активным звездообразованием ($(B - V)_0 < 0,7$) близки к ожидаемым из фотометрической модели эволюции звёздных систем (прямая линия согласно [3]), что говорит об отсутствии сильного динамического нагрева их дисков.

ными на анализе кривых вращения. К тому же выводу приводят и фотометрические оценки толщины звёздных дисков, наблюдаемых "с ребра" [5, 6]. Удивительно другое: поскольку диски галактик подвержены гравитационным воздействиям — как со стороны соседних галактик, так и со стороны массивных элементов тёмного гало (о них немного ниже), то, казалось бы, гравитационные возмущения должны динамически нагреть диск выше предела, который устанавливается требованием устойчивости. Тогда отношения M/L , вычисленные в предположении маргинально устойчивых дисков (рис. 1), окажутся завышенными и превзойдут значения, найденные по показателю цвета из фотометрических моделей эволюции звёздных дисков галактик (прямая на рис. 1). Оказалось, что такие перегретые системы действительно существуют, но к ним относится только часть галактик, преимущественно с высоким показателем цвета (исправленным за наклон диска к лучу зрения): $(B - V)_0 > 0,7$. Такой показатель цвета соответствует проэволюционировавшим дискам, в которых основной вклад в светимость даёт старое звёздное население. В указанных галактиках звездообразование является очень слабым или вообще отсутствует; многие из них относятся к типу линзовидных систем, почти не содержащих холодного межзвёздного газа. Часто значительная "перегретость" диска наблюдается в галактиках, входящих в состав пар (кружки на рис. 1), очевидно, по той причине, что они с большей вероятностью испытывают сильное гравитационное воздействие со стороны своего компаньона. Но среди галактик с "перегретыми" дисками есть и такие, которые не имеют близких компаньонов, — возрастание дисперсии скоростей звёзд в этом случае может быть связано с полным поглощением спутников, сейчас уже не наблюдаемых как отдельные галактики. Но самым важным является то, что многие линзовидные и большинство спиральных галактик не испытали значительной динамической эволюции за несколько миллиардов лет своего существования и их

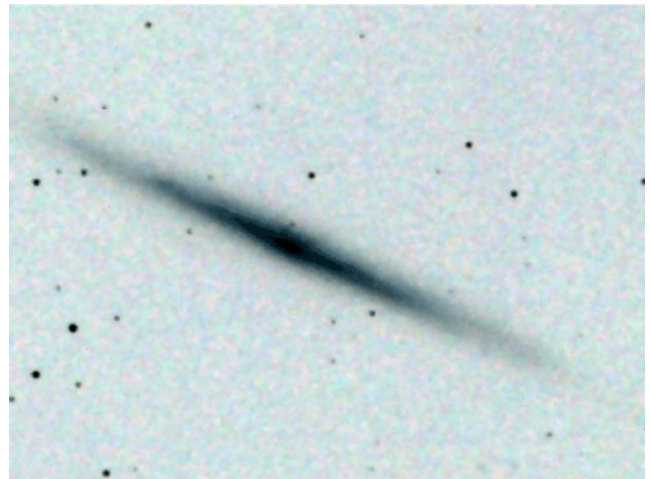


Рис. 2. NGC 5907 — пример галактики с тонким диском, наблюдаемой "с ребра" (2MASS (Two Micron All-Sky Survey) — обзор всего неба на длине волны 2 мкм, ближняя инфракрасная область).

диски сохраняются динамически слабо "нагретыми" — в состоянии, близком к маргинально устойчивому. О том же говорит и существование галактик с удивительно тонкими звёздными дисками, которые, следовательно, обладают низкой вертикальной дисперсией скоростей звёзд по отношению к скорости их вращения и которые нередко встречаются среди галактик, наблюдаемых нами "с ребра" (рис. 2).

Ещё один аргумент в пользу существования тёмных гало и вообще тёмной материи во Вселенной имеет, скорее, теоретический характер: в рамках существующей теории расширяющейся Вселенной невозможно рассчитать физическую картину формирования галактик, если не предположить, что основная масса вещества в природе — это тёмная небарионная масса. Собственная гравитация барионного вещества, на долю которого приходится около четырёх процентов критической плотности Вселенной, оказывается явно недостаточной для того, чтобы объяснить, как за короткое время ничтожно малые первоначальные флуктуации плотности в расширяющемся веществе успели вырасти и сформировать наблюдаемые ныне галактики и их системы.

В рамках так называемой стандартной космологической модели галактики возникают в результате иерархического сгущивания многочисленных единиц тёмной материи (субгало), в гравитационном поле которых концентрируется первичный газ, из которого после его охлаждения формируется звёздная галактика. Далее начинается длинный эволюционный путь галактики: за несколько миллиардов лет может существенно измениться структура галактики, содержание и химический состав газа и звёзд, темп звездообразования. С теоретической точки зрения здесь остаётся очень много неясного: до сих пор не совсем понятно, какую роль в этих изменениях играют такие процессы, как взаимодействие галактик между собой и с межгалактической средой, слияние сталкивающихся галактик, активность галактических ядер, выброс газа из галактик и аккреция газа на галактические диски, способная долгое время поддерживать текущий уровень звездообразования. Во всех перечисленных случаях относительная масса тёмного вещества в галактиках имеет либо заметное, либо действительно ключевое значение.

Численное моделирование процессов формирования галактик из тёмного и барионного вещества позволило, по крайней мере на качественном уровне, найти объяснение наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной и распределения галактик по массам. Значительно хуже объясняется зависимость масса–размер галактик [8] или концентрация массы в центральном килопарсеке, которая значительно ниже предсказываемой на основе численных моделей (так называемая проблема центрального кэспа). Но одной из самых актуальных и сегодня проблем иерархической концепции построения галактик является наличие в ближней Вселенной большого количества *чисто* дисковых галактик (см., например, статистику обзора АРМ (Automated Plate Measuring), нацеленного на морфологическую классификацию галактик по их изображениям [9]), т.е. галактик без значительного звёздного сфероиды в центре, с крупномасштабными тонкими звёздными дисками. У многих спиральных галактик, в том числе у нашей Галактики, эти тонкие звёздные диски являются ещё и *старыми*: возраст самых старых рассеянных скоплений нашего тонкого диска приближается к 8–9 млрд лет [10], а это означает, что начиная с момента, в который красное смещение составило $z = 1$, нашу Галактику никто всерьёз не "потревожил".

Об отсутствии сильной динамической нагретости дисков многих галактик говорит и упомянутая выше близость дисперсии скоростей звёзд дисков многих галактик к минимальному значению, требующемуся для гравитационной устойчивости, а также малая дисперсия скоростей звёзд диска нашей Галактики (см., например, [11]). Это прямо противоречит предсказаниям иерархической концепции о процессе непрерывных слияний галактик в ходе эволюции Вселенной. Дело в том, что когда в результате слияния мелких гало возникает гало с массой в 10^{12} масс Солнца (как у нашей Галактики), слившиеся фрагменты ещё долго сохраняют свою идентичность внутри большого гало. Например, недавние расчёты в рамках проекта GALAH (Galactic Halo) [12] — численное моделирование небольшого объёма, размером примерно 400 кпк, с высоким пространственным разрешением — показали, что внутри нашего тёмного гало можно выделить до ста тысяч "субгало" с непрерывным спектром масс. Сгустки тёмной материи движутся внутри большого гало по вытянутым траекториям, неизбежно проходя через барионный диск Галактики. Эта "бомбардировка" нагревает звёздный диск, и он постепенно утолщается из-за увеличения вертикальной дисперсии скоростей звёзд. Более того, сгустки тёмной материи, внутри которых возникли звёзды (карликовые спутники нашей Галактики), при столкновениях и вследствие динамического трения теряют энергию и в конце концов падают на диск, сливаясь с ним. Согласно результатам недавних расчётов [13], за последние 8 млрд лет (с момента, при котором $z = 1$) типичная модельная галактика, похожая на нашу, должна испытать около шести "малых" слияний, одно из которых — со спутником массой, составляющей 10 % от массы Галактики, в результате чего толщина её диска увеличилась бы в несколько раз. Иными словами, тонкие звёздные диски не выживают на временных масштабах в несколько миллиардов лет, если они погружены в такие гало тёмной материи, которые предсказывает теория, — тем не менее большинство галактик в ближней Вселенной имеет именно тонкие диски. Это противоречие между теорией и наблюдениями пока не разрешено.

Ключевой особенностью эволюции дисков галактик является постоянная аккреция газа извне — "подпитка" топливом для звездообразования. Необходимость аккреции газа извне, причём с темпом, примерно соответствующим темпу звездообразования, следует из многих наблюдательных фактов. В частности, сценарий химической эволюции диска нашей Галактики невозможно построить без рассмотрения значительной аккреции газа извне (см., например, [14]). Звездообразование в диске Галактики в последние 9–10 млрд лет идёт примерно с постоянной (если осреднять на масштабах в 1–2 млрд лет) скоростью, что косвенным образом указывает на непрерывную аккрецию газа. Поскольку звёзды в процессе своей эволюции синтезируют тяжёлые элементы (все элементы тяжелее бериллия), звёзды последних поколений должны быть намного богаче металлами, чем звёзды возрастом 8–10 млрд лет. Однако значимой антикорреляции металличности с возрастом у звёзд диска нашей Галактики не наблюдается [15]. Более того, существует так называемая проблема G-карликов: звёзды спектрального класса G, с массой равной одной солнечной или немного меньшей, среди которых имеются звёзды всех возрастов, в диске нашей Галактики обладают практически одной и той же, в пределах ошибок измерений, металличностью [16]. Создаётся впечатление, что химическая эволюция в диске нашей Галактики последние 8–10 млрд лет "не шла", хотя ядерные реакции в звёздах, несомненно, происходили. Эта проблема решается введением аккреции извне, т.е. предположением о падении на диск газа с минимальным (а лучше нулевым) содержанием тяжёлых элементов: такой низкометаллический газ "разбавляет" газ, обогащённый синтезированными тяжёлыми элементами, и поддерживает среднюю металличность межзвёздной среды примерно на постоянном уровне.

В дисках спиральных галактик, включая нашу собственную, существует заметный "градиент металличности" — среднее обилие тяжёлых элементов как в звёздах, так и в газе, выше в центре диска и ниже на периферии. На качественном уровне это понятно: в центральной части галактик звездообразование уже привело к почти полному исчерпанию газа, т.е. было очень эффективным, а на периферии ещё остаётся довольно много неизрасходованного газа, т.е. звездообразование шло еле-еле. Однако, чтобы получить в моделях градиент металличности наблюдаемого наклона, нужно не просто "доставлять" на диск газ извне, но и "ронять" его быстрее в центре диска и медленнее на периферии. Естественно, тогда и звездообразование будет происходить эффективнее в центре диска и вяло на периферии. Киаппини с соавторами [17] построили модель химической эволюции диска нашей Галактики с переменной по радиусу аккрецией газа и получили, что характерное время аккреции, за которое существенно (в e раз) увеличится локальная плотность диска, линейно возрастает вдоль радиуса: в центре оно меньше 2 млрд лет, вблизи Солнца составляет 8 млрд лет, а на далёкой периферии значительно превышает хаббловское время, т.е. там диск ещё только начинает формироваться. Соответствующим образом изменяются и характерные времена крупномасштабного звездообразования. Такая концепция получила название "inside–out", т.е. построение (диска) галактики "изнутри–наружу". С момента своей формулировки эта концепция неоднократно подтверждалась новыми наблюдательными фактами.

Одно из самых наглядных подтверждений было получено с помощью космического ультрафиолетового телескопа GALEX (Galaxy Evolution Explorer), который с хорошей чувствительностью и приличным пространственным разрешением закартографировал большую выборку близких галактик в далёком ($\lambda_{\text{eff}} = 1516 \text{ \AA}$) и близком ($\lambda_{\text{eff}} = 2267 \text{ \AA}$) ультрафиолетовых диапазонах спектра [18]. И оказалось, что многие дисковые галактики в ультрафиолетовых лучах имеют гораздо большие размеры, чем в видимом диапазоне спектра [19]. Что это означает? Главные "поставщики ультрафиолета" в галактиках — это молодые массивные звёзды: они имеют высокие температуры, существенно превышающие 10000 К, так что основное энерговыделение приходится на ультрафиолетовый диапазон. После завершения обзора галактик, проведённого телескопом GALEX, оказалось, что во внешних областях дисков галактик, там, где практически нет старого звёздного населения и ничего не видно в оптическом диапазоне спектра, идёт звездообразование. То есть, действительно, диски строятся, точнее надстраиваются, во внешних частях у нас на глазах.

Недавно была сделана интересная работа с целью проверки этого сценария [20]. Эволюция ультрафиолетовых (т.е. звездообразующих) дисков наблюдалась непосредственным сравнением размеров галактик на различных красных смещениях. Как это делается? Вследствие конечности скорости света, чем более далёкую галактику мы наблюдаем, тем к более ранней её эпохе относятся эти наблюдения. Если мы наблюдаем галактику на красном смещении $z = 0,5$, мы видим её 5 млрд лет назад, а для галактики при $z = 1$ время запаздывания света составляет уже 8 млрд лет. Это означает, что с современными средствами наблюдений на крупных телескопах мы непосредственно просматриваем две трети времени жизни Вселенной и можем видеть эволюцию галактик в течение большей части их жизни. При этом вследствие красного смещения собственное ультрафиолетовое излучение далёкой галактики может оказаться в оптическом диапазоне спектра. Авторы [20] проследили изменение характерной формы профиля распределения поверхностной яркости дисков с z , подстраивая длину волны наблюдений к красному смещению так, чтобы в системе покоя галактики каждый раз измерения относились к одной и той же (ультрафиолетовой) области спектра. Точкой отсчёта эволюции были данные обзора галактик, проведённого телескопом GALEX на $z \approx 0$. Оказалось, что, действительно, эволюция наблюдается: на больших красных смещениях ультрафиолетовые диски были более компактными. Раньше звездообразование шло в центрах дисков, а сейчас сместилось на периферию? Ведь именно такую эволюцию предсказывает сценарий построения дисков "inside-out".

Однако оказалось, что не всё так просто: когда сравнили не только масштабы, но и абсолютный уровень ультрафиолетовой поверхностной яркости, выяснилось, что периферия дисков выглядит практически одинаково на $z = 1$ и $z = 0$. Профили на $z = 1$ более компактны или иными словами, имеют более крутой наклон из-за того, что звездообразование в центральных областях на $z = 1$ происходило более интенсивно, чем на $z = 0$, в то время как эволюции темпов звездообразования на периферии дисков не наблюдается. То есть диски не "росли" в течение последних 8 млрд лет — они просто завершали звездообразование в центре и продолжали его на периферии. Сценарий "inside-out" явно нуждается в корректировке.

Проблемой теории формирования дисков галактик является также то, что хотя в существовании аккреции газа на галактические диски трудно сомневаться, до сих пор не удаётся обнаружить в наблюдениях реальные резервуары газа для этой аккреции. Кроме того, важно, чтобы внешний газ имел ещё и низкое содержание тяжёлых элементов. Одно время считали, что при коллапсе тёмного гало первичный газ, связанный гравитационно с этой тёмной материей, нагревается в ходе вириализации и в виде горячего рентгеновского гало долгое время сохраняется вокруг дисковой галактики. Постепенно остывая, горячее рентгеновское гало могло бы обеспечить долгую стационарную аккрецию первичного газа по всему протяжению галактического диска. Такие горячие газовые гало наблюдаются у скоплений галактик, но до сих пор не обнаружены ни у одной близкой спиральной галактики (за возможным исключением областей массивных балджей галактик раннего типа). Более того, детальные газодинамические модели показали, что даже если такие гало и существуют, действия известных механизмов тепловой неустойчивости горячего вириализованного, т.е. пришедшего в равновесное состояние, газа недостаточно для того, чтобы обеспечить должное количество холодных газовых облаков вблизи дисков и стационарную эффективную аккрецию в течение миллиардов лет — то, что необходимо для построения крупномасштабного звёздного диска [21].

Долгое время на роль источников внешнего газа "назначали" высокоскоростные облака нейтрального водорода, которые действительно наблюдаются вне диска нашей Галактики. Однако, во-первых, их мало для обеспечения аккреции в нужных масштабах (в лучшем случае они дают 0,1–0,2 массы Солнца в год, т.е. на порядок меньше, чем требуется для поддержания современного звездообразования), а во-вторых, когда "на просвет" оценили содержание в них тяжёлых элементов по абсорбционным линиям источников дальнего фона, на которые случайно проектируются облака, оказалось, что химический состав газа высокоскоростных облаков близок к солнечному — это не первичный газ. Сейчас считается, что высокоскоростные облака нейтрального водорода большей частью представляют собой газ, выброшенный из диска Галактики так называемыми галактическими фонтанами — истечением газа из областей активного звездообразования, в которых его нагревают как звёздный ветер массивных звёзд, так и вспышки сверхновых. Впоследствии этот газ остывает и образует облака. Однако, во-первых, это не "добавка" к диску, это собственно изначально часть диска, а во-вторых, химический состав не первичный, а напротив, обогащённый продуктами нуклеосинтеза.

Важные изменения происходят в последние годы в теории формирования галактик. Сейчас горячие вириализованные газовые гало молодых галактик как источники вещества для формирования звёздных дисков уже становятся "немодными": теоретики сомневаются, что вириализация газа происходит в большей части коллапсирующих гало. Формирование дисков и балджей галактик совсем не обязательно должно происходить только посредством слияния более мелких подсистем. Всё более важную роль в формировании галактик отводят холодным филаментарным газовым потокам, направленным на внутреннюю область гало [22]. Это тоже аккреция, но аккреция "потоковая", через газовые струи, которая не может захватить весь диск, а, скорее, будет подпитывать

его периферию. Эти струи проходят, не останавливаясь, сквозь горячее газовое гало и падают на диск. Согласно современным моделям [23], холодные потоки должны доминировать в маломассивных (относительно тёмной массы скоплений и групп галактик) гало на всех красных смещениях, начиная с $z = 5-6$. Это означает, что эффективной аккреции газа извне непосредственно на *центр* диска не было ни на каком этапе эволюции галактики. Таким образом, сценарий построения галактических дисков "inside-out" в его классической формулировке конфликтует сейчас не только с наблюдениями, но и с космологической теорией. Явно наступает время для его кардинального пересмотра.

Наши исследования дисков галактик частично поддержаны грантами РФФИ 07-02-00792 и 07-02-00229.

Список литературы

1. Makarov D, Karachentsev I *Proc. Int. Astron. Union* **3** 370 (2008); arXiv:0801.0043
2. Караченцев И Д, Макаров Д И *Астрофиз. бюлл.* **63** 320 (2008) [Karachentsev I D, Makarov D I *Astrophys. Bull.* **63** 299 (2008)]; arXiv:0812.0689
3. Bell E F, de Jong R S *Astrophys. J.* **550** 212 (2001)
4. Засов А В, Хоперсков А В, Тюрина Н В *Письма в Астрон. журн.* **30** 653 (2004) [Zasov A V, Khoperskov A V, Tyurina N V *Astron. Lett.* **30** 593 (2004)]
5. Засов А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **28** 599 (2002) [Zasov A V et al. *Astron. Lett.* **28** 527 (2002)]
6. Bizyaev D, Mitronova S *Astrophys. J.* **702** 1567 (2009)
7. Засов А В, Хоперсков А В, Сабурова А С, готовится к печати
8. Dutton A A et al. *Astrophys. J.* **654** 27 (2007)
9. Naim A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **274** 1107 (1995)
10. Paunzen E, Netopil M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371** 1641 (2006)
11. Wyse R F G *Proc. Int. Astron. Union* **4** 179 (2009); arXiv:0809.4516
12. Zemp M *Mod. Phys. Lett. A* **24** 2291 (2009)
13. Kazantzidis S et al. *Astrophys. J.* **700** 1896 (2009)
14. Tosi M, astro-ph/0308463
15. Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R *Astron. Astrophys.* **377** 911 (2001)
16. Jørgensen B R *Astron. Astrophys.* **363** 947 (2000)
17. Chiappini C, Matteucci F, Gratton R *Astrophys. J.* **477** 765 (1997)
18. Gil de Paz A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 185 (2007)
19. Thilker D A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 538 (2007)
20. Azzollini R, Beckman J E, Trujillo I *Astron. Astrophys.* **501** 119 (2009)
21. Binney J, Nipoti C, Fraternali F *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397** 1804 (2009)
22. Dekel A, Birnboim Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **368** 2 (2006)
23. Dekel A et al. *Nature* **457** 451 (2009)

PACS numbers: **95.35.+d, 95.36.+x, 98.80.Cq**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004j.0439

Тёмные компоненты Вселенной

В.В. Бурдюжа

1. Тёмная энергия

Новой космологической парадигмой является мультиверс — вечно растущий фрактал, состоящий из большого числа частей (вселенных) с различными константами связи, массами частиц и другими константами природы. Наша Вселенная, возраст которой около

14 млрд лет, — одна из них. За этот период Вселенная прошла тернистый путь: инфляция, разогрев (reheating), эра излучения, эра вещества и вот теперь вакуум-доминированная эра. Вселенная расширяется с ускорением начиная с момента, когда красное смещение достигло значения $z \sim 0,7$ (при больших z расширение происходило с замедлением)¹. Не менее любопытен состав нашей Вселенной: барионный компонент составляет всего 4% от полной плотности Ω_{tot} , тёмная материя (Ω_{DM}) — 23% полной плотности, тёмная энергия (Ω_{DE}) — около 73% полной плотности:

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{\text{b}} + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\text{DE}} = 0,04 + 0,23 + 0,73,$$

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{cr}}}, \quad \rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N},$$

где H_0 — постоянная Хаббла, G_N — гравитационная постоянная.

К сожалению, мы до сих пор точно не знаем физической природы этих компонент, и поэтому они для нас — тёмные, хотя существует более десяти моделей для каждой из них. С очень большой вероятностью можно предполагать, что тёмная энергия — это вакуум. В этом случае космологическая константа, Λ -член, вакуумная энергия и тёмная энергия — понятия эквивалентные. Но в любом случае лучше обратиться к истокам, т.е. к уравнениям Эйнштейна

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G_N T_{\mu\nu}, \quad G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}. \quad (1)$$

Эйнштейн ввёл Λ -член как свойство пространства. Если поставить Λ -член в правую часть уравнений, то он уже будет представлять собой вид энергии, который и был назван тёмной энергией:

$$G_{\mu\nu} = -8\pi G_N T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}. \quad (2)$$

Современное значение плотности тёмной энергии (DE)

$$\rho_{\text{DE}} = \rho_{\Lambda} \sim 10^{-47} \text{ ГэВ}^4 \approx 0,7 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3},$$

если $H_0 = 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. (3)

В планковскую эпоху плотность этого вида энергии имела значение

$$\rho_{\Lambda} \sim 2 \times 10^{76} \text{ ГэВ}^4 (\approx 0,5 \times 10^{94} \text{ г см}^{-3})$$

при $M_{\text{Pl}} = 1,2 \times 10^{19} \text{ ГэВ}$, (4)

которое на 123 порядка превышает плотность наблюдаемой тёмной энергии. Эта необъяснимая разница в 123 порядка породила кризис физики, хотя, конечно, было сделано много предложений по его преодолению (см. обзоры [1–5])².

Здесь уместно напомнить определение вакуума и его свойства. В классической физике вакуум — мир без частиц и этот мир — плоский, в квантовой физике — это вакуумные конденсаты, возникающие в процессе релятивистских фазовых переходов, в геометрической физике вакуум — это состояние, в котором геометрия простран-

В.В. Бурдюжа. Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ
E-mail: burdyuzh@asc.rssi.ru

¹ Сейчас красное смещение $z = 0$, в момент рождения Вселенной $z = \infty$.

² Свежий взгляд на проблему космологической константы дан в недавнем обзоре [5].