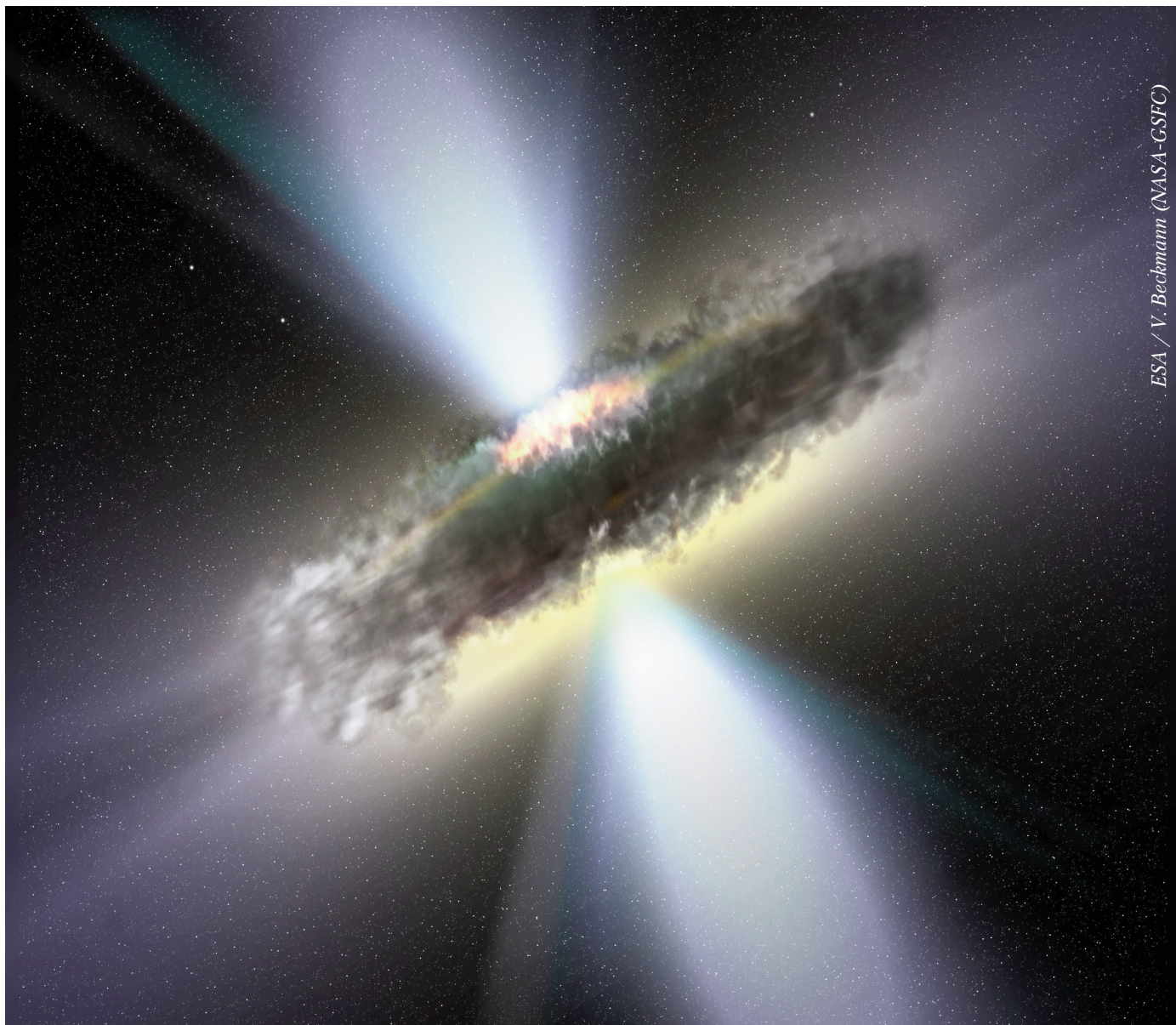




ESA / V. Beckmann (NASA-GSFC)

Новые формы материи во Вселенной

Анатолий Черепашук
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

Генеральной Ассамблеей ООН 2009 год объявлен Международным годом астрономии. Тем самым признается выдающееся значение астрономии в жизни человечества. Четыреста лет тому назад Галилей впервые навел свой телескоп на небо и увидел пятна на Солнце, горы на Луне, спутники Юпитера, положив начало наблюдательной астрономии. Проведение астрономических наблюдений привело к революционному прорыву в понимании окружающего нас мира. Замечательно то, что и сейчас мы являемся свидетелями новой революции в астрономии, связанной с применением новых средств наземных и космических наблюдений. Земная атмосфера непрозрачна для подавляющего большинства видов излучений, идущих из Космоса. До середины прошлого столетия астрономы наблюдали небо в основном лишь в узком оптическом «окне» прозрачности земной атмосферы, в котором длина волны принимаемого электромагнитного излучения меняется всего примерно в 2 раза. Запуск первого советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. положил начало эре космических исследований. Вынос астрономических телескопов за пределы земной атмосферы привел к чрезвычайно сильному расширению исследуемого диапазона электромагнитного излучения. Сейчас астрономы изучают небо не только в оптическом, но и в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом, инфракрасном и радиодиапазонах спектра. При этом диапазон длин волн принимаемых космических излучений меняется не в 2 раза, а в 10^{16} раз!

Это привело к тому, что надежность результатов интерпретации современных астрономи-

ческих наблюдений сравнялась с надежностью результатов лабораторных физических экспериментов. И это несмотря на то, что астрономические объекты удалены от нас на громадные расстояния в тысячи, миллионы и миллиарды световых лет.

Астрономические исследования последних трех десятилетий привели к радикальному пересмотру наших представлений об окружающем мире (рис. 1). Выяснилось, что известная нам форма материи — атомы и молекулы (так называемая барионная форма) — это всего лишь около 4% от полного количества материи Вселенной. Остальные 96% — это, в основном, так сказать, темный сектор, состоящий из двух пока загадочных форм материи: *темной материи* (примерно 26%) и *темной энергии* (примерно 70%). Еще одна новая форма материи — это черные дыры, которые в нашей Галактике по массе суммарно составляют около 0,1% от массы барионного вещества, т.е. примерно 10⁸ масс Солнца. Кроме того, в последние годы астрономы все увереннее говорят о возможности существования во Вселенной так называемых «кротовых нор». Это еще одна возможная новая форма материи. Она пока не открыта, но уже предложены методы наблюдений, позволяющие, в принципе, отличить «кротовую нору» от черной дыры.

Необычность новых форм материи поражает воображение (подчеркнем, что эти формы мы называем новыми, поскольку они открыты сравнительно недавно).

Темная материя ничего не излучает и не поглощает, является гравитационно-сгущающейся (т.е. состоит из отдельных темных тел или частиц неизвестной природы) и концен-

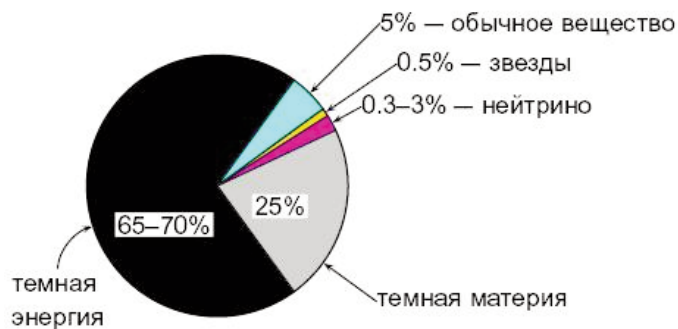


Рис. 1. Состав «энергетической смеси» Вселенной.

трируется к большим массам барионного вещества, проявляя себя лишь своим гравитационным притяжением.

Темная энергия гравитационно не сжимается (по-видимому, это поле неизвестной природы), ничего не излучает и не поглощает, равномерно заполняет пространство и проявляется в виде гравитационного отталкивания. По мере накопления наблюдательных данных имеет место удивительная сходимость параметров темной энергии к характеристикам поля, введенного А. Эйнштейном с помощью Λ -члена в уравнения Общей теории относительности (ОТО).

Черные дыры образуются при катастрофическом сжатии (коллапсе) массивных объектов (мы не рассматриваем здесь возможность образования черных мини-дыр при столкновении элементарных частиц очень высоких энергий на современных ускорителях, например, Большом адронном коллайдере). Это идеально симметричные объекты, которые характеризуются всего лишь тремя параметрами: массой, угловым моментом вращения и электрическим зарядом. В центре черной дыры

расположена сингулярность (область с формально бесконечной плотностью), куда сколлапсировало падающее вещество (в сопутствующей системе отсчета) и где царят пока неизвестные нам законы квантовой гравитации. Эта сингулярность окружена горизонтом событий — световой поверхностью в пространстве-времени, на которой ход времени с точки зрения далекого наблюдателя останавливается. Следует подчеркнуть, что поскольку центральная квантовая сингулярность расположена в будущем по отношению к горизонту событий, незнание законов квантовой гравитации не мешает исследователям описывать в рамках ОТО свойства горизонта событий, эргосферы и подавляющей части внутренней черной дыры.

Хотя постепенное накопление наблюдательных данных для многих сотен кандидатов в черные дыры дает все больше и больше свидетельств в пользу реальности существования

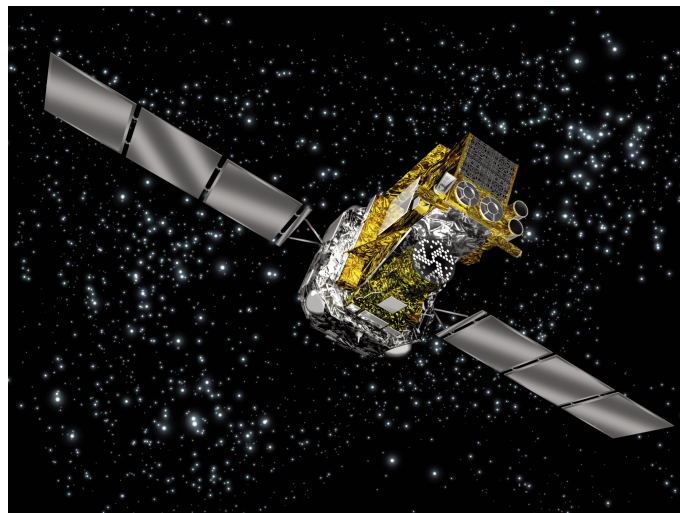


Рис. 2. Международная орбитальная гамма-обсерватория «Интеграл». © ESA

черных дыр во Вселенной, имеются теории гравитации, отличные от ОТО, в которых отвергается существование черных дыр. Например, как следует из работ А.А. Логунова и Л.П. Грищука, если добавить в уравнения ОТО члены, соответствующие ненулевой массе покоя гравитона (кванта гравитационного поля), то горизонт событий у массивного коллапсирующего объекта не образуется и черная дыра при этом не формируется. Этот вывод радикально отличается от предсказания ОТО, что делает проблему поиска и исследования черных дыр особенно интригующей и интересной.

«Кротовые норы» также образуются при коллапсе массивных объектов, но помимо барионного вещества в процессе коллапса должна присутствовать так называемая экзотическая материя, обладающая отрицательным давлением. Впервые о возможности образования туннелей в пространстве-времени (которые в дальнейшем получили название кротовых нор) писали Эйнштейн и Розен в 1935 г. В последние годы в нашей стране теорией «кротовых нор» активно занимаются Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, А.А. Шацкий. В отличие от черной дыры, «кротовая нора» не имеет сингулярности и не обладает горизонтом событий. Поэтому в принципе, в «кротовую нору» можно как входить, так и выходить из нее. С «кротовыми норами» связаны надежды ученых на создание машины времени.

Таким образом, современная астрономия ставит серьезные задачи перед фундаментальной наукой. Благодаря астрономии человечество в последние годы осознало огромную меру незнания окружающего нас мира. Это

является чрезвычайно сильным стимулом для развития науки и, в частности, астрономии. Развитые страны тратят миллиарды долларов на создание новых уникальных наземных и космических телескопов и обсерваторий.

Свойства описанных выше новых форм материи столь экзотичны, что в их существование верится с трудом. И все же новейшие наблюдательные данные, полученные в различных диапазонах электромагнитного излучения, позволяют судить о реальности существования темной материи, темной энергии и черных дыр во Вселенной. Опишем кратко эти наблюдательные данные.

Темная материя

Существует по крайней мере десяток независимых свидетельств существования темной материи во Вселенной. Перечислим некоторые из них.



Рис. 3. Скопление галактик. Галактики в нем движутся с очень большими скоростями, порядка 1000 км/с, что свидетельствует о наличии темной материи. © NASA, ESA, M.J. Jee & H. Ford et al. (Johns Hopkins U.)



Рис. 4. Космический телескоп им. Хаббла с диаметром зеркала 2,4 м. © NASA

Движения галактик в скоплениях

В 1932 г. немецкий астроном Ф. Цвикки обратил внимание на то, что галактики в богатом скоплении в созвездии Волосы Вероники, содержащем тысячи звездных систем, подобных нашей Галактике, движутся с очень большими скоростями — порядка 1000 км/с. Чтобы удержать столь быстро движущиеся галактики в объеме скопления, требуется тяготение, которое неспособны создать одни только видимые массы светящихся галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и, как подсчитал Цвикки, здесь необходимы дополнительные, невидимые массы, которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы скопления. Вывод Цвикки об аномально больших скоростях движения галактик в скоплениях в настоящее время подтвержден исследованиями большого числа скоплений галактик. Так что наличие темной материи следует из наблюдений многочисленных скоплений галактик.

Наряду с гипотезой о темной материи для объяснения аномально больших скоростей

движения галактик в скоплениях предпринимались также попытки модификации закона тяготения Ньютона на больших расстояниях. Такие же попытки использовались и для объяснения аномально больших скоростей вращения периферийных частей галактик (см. ниже). До сих пор в солидных научных журналах появляются статьи, в которых предлагаются варианты так называемой *модифицированной ньютоновской динамики* (МОНД). Однако все варианты МОНД страдают общим недостатком: в применении к разным скоплениям и галактикам приходится вводить разные модификации закона тяготения Ньютона, что делает МОНД непривлекательной.

Вращение спиральных галактик

Если бы темной материи не было, основная масса галактики была бы сосредоточена в ее центральных частях, и скорость вращения периферийных частей галактики должна убывать с расстоянием от галактического центра обратно пропорционально корню квадратному

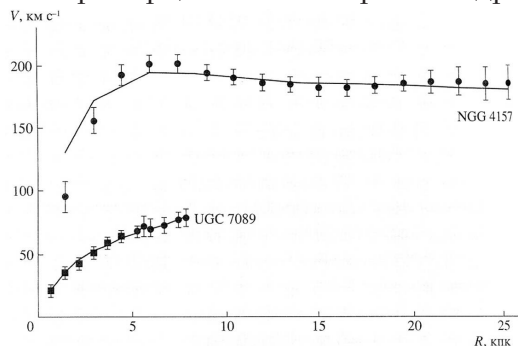


Рис. 5. Распределение линейной скорости вращения галактик по радиусу. На периферии скорость вращения становится почти постоянной и равна большой величине, порядка нескольких сотен км/с. Это свидетельствует о наличии темной материи.

из расстояния. Ничего подобного в галактиках не наблюдается. Зависимость скорости вращения спиральных галактик от расстояния до их центров известна к настоящему времени для многих десятков изолированных галактик. Эта зависимость уверенно прослеживается вплоть до расстояний, в 3-10 раз превышающих видимый радиус звездной системы (по движению облаков нейтрального водорода). В области вне видимого диска галактики — там, где доминирует темная материя галактического гало, — кривая вращения становится как правило плоской, так что скорость вращения не зависит от расстояния и составляет весьма большую величину — сотни км/с (рис. 5). Во всех случаях столь высокие скорости вращения периферийных частей галактик определенно указывают на присутствие темной материи и внутри звездной системы, и вне ее. Причем масса темной материи в гало галактики в 3-10 раз превышает массу видимой звездной системы.

Рентгеновский газ в скоплениях галактик

Богатые скопления галактик наблюдаются в рентгеновском диапазоне спектра с помощью орбитальных обсерваторий. Эти наблюдения позволили открыть горячий ионизованный газ в объеме скоплений. Этот разреженный газ и служит источником рентгеновского излучения (он формируется при истечении звездных ветров массивных звезд, при вспышках сверхновых и т. п.). Температура горячего газа близка к ста миллионам градусов, и этой температуре соответствуют средние скорости движения протонов — частиц плазмы, которые составляют, как и скорости галактик, тысячи км/с. Без темной материи этот горячий газ



Рис. 6. Рентгеновское изображение скопления галактик, в центре которого находится горячий газ с температурой 100 миллионов градусов. Это свидетельствует о наличии темной материи. © Рентген: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng et al; оптическое: NASA/STScI

улетучился бы из скопления в бесконечность. Тем самым рентгеновские наблюдения дают независимый довод в пользу наличия темной материи в скоплениях галактик: горячий газ в скоплениях не разлетается в окружающее пространство, потому что погружен в глубокую потенциальную яму, создаваемую в основном мощным тяготением темной материи, суммарная масса которой примерно в 10 раз превышает массу звездных компонентов всех галактик скопления.

Эффект гравитационной линзы

Скопления галактик демонстрируют эйнштейновский эффект отклонения луча света в поле тяготения. Источником света в данном случае служит далекая галактика или квазар. Из-за искривления лучей света от далекого квазара в



Рис. 7. Эффект гравитационной линзы. Из-за искривления лучей света далекой галактики в гравитационном поле более близкого скопления галактик наблюдаются «духи» галактики, что свидетельствует о наличии темной материи. © W.N. Colley, E. Turner (Princeton University) J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

гравитационном поле более близкого скопления галактик наблюдаются многочисленные изображения («духи») далекой галактики или квазара (эффект сильного гравитационного линзирования). Кроме того, изображения самих далеких галактик, проецирующихся на периферию скопления, могут слегка искажаться из-за эффекта линзирования в гравитационном поле переднего скопления (эффект слабого гравитационного линзирования). В обоих случаях эти эффекты позволяют оценить полную массу скопления галактик. Она оказывается на порядок больше массы всех видимых галактик скопления. Это служит

независимым указанием на наличие темной материи в скоплениях.

Движения галактик в Местной группе

Наша Галактика вместе с туманностью Андромеды и несколькими десятками других (более мелких) галактик образует систему, называемую Местной группой (см. лекцию Д.З. Вибе). Две основные галактики группы сближаются одна с другой, причем расстояние между ними и их относительная скорость сближения могут иметь наблюдаемые значения лишь в том случае, если в объеме Местной группы имеется темная тяготеющая материя, масса которой примерно в 5-10 раз больше суммарной массы всех видимых галактик.

Кроме перечисленных фактов, имеется еще ряд независимых наблюдательных свидетельств существования темной материи, например, движения спутников нашей Галактики, тройные системы галактик, результаты моделирования крупномасштабной структуры Вселенной и т. п. Во всех этих случаях для объяснения наблюдаемых эффектов с необходимостью приходится привлекать гипотезу о существовании темной материи во Вселенной.

Замечательно то, что все перечисленные независимые результаты находятся в полном количественном согласии друг с другом. Это выглядит так, как если бы десять различных линий пересекались в одной точке! Вот какова прочность эмпирической базы для обоснования гипотезы существования темной материи.

Для объяснения природы темной материи привлекаются, в основном, две гипотезы: это либо тела, связанные с барионной материей (планеты, астероиды, холодные белые кар-

лики, нейтронные звезды, звездные черные дыры и т. п.), либо пока не открытые слабо-взаимодействующие элементарные частицы, подобные нейтрино, но много более массивные (с массой примерно в 1000 раз больше массы протона). Ученые надеются, что предстоящие эксперименты по столкновению частиц на недавно введенном в строй Большом адронном коллайдере (Швейцария) позволят открыть такие элементарные частицы.

Темная энергия

Имеется по крайней мере пять независимых свидетельств существования темной энергии, которая доминирует в общем энергетическом балансе Вселенной (составляя около 70%). Перечислим важнейшие из них.



Рис. 8. На окраине галактики NGC 4526 вспыхнула сверхновая звезда 1994D типа Ia. По наблюдениям вспышек таких сверхновых открыто ускоренное расширение нашей Вселенной. © NASA, ESA, The Hubble Key Project Team, and The High-Z Supernova Search Team



Рис. 9. Орбитальная Международная космическая станция (МКС). © NASA

Ускорение космологического расширения

В 1998-1999 гг. две международные группы наблюдателей, одной из которых руководили Б. Смит и А. Райсс, а другой — С. Перлмуттер, установили, что наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением, так что скорости удаления галактик возрастают со временем. Это открытие было сделано с помощью изучения вспышек далеких сверхновых звезд типа Ia, которые, как показал профессор Ю.П. Псковский (ГАИШ), могут служить «стандартными свечами». Из-за исключительно большой светимости сверхновых в максимуме блеска их можно наблюдать на очень больших расстояниях, в тысячи мегапарсек от нас. Именно на столь больших расстояниях и проявляется эффект ускоренного расширения Вселенной.

Обычное вещество не способно ускорять галактики, а лишь тормозит их разлет, так как

взаимное тяготение стремится сблизить галактики. Поэтому открытый астрономами факт ускоренного расширения Вселенной указывает, что наряду с обычным веществом, создающим тяготение, во Вселенной присутствует неизвестная нам ранее ни по астрономическим наблюдениям, ни по физическим экспериментам особая космическая энергия, создающая не тяготение, а антитяготение — всеобщее отталкивание тел Природы. При этом в космологическом масштабе в нашу эпоху антитяготение оказывается сильнее тяготения. Эта новая необычная форма материи получила название темной энергии.

Вначале феномен ускоренного расширения Вселенной был открыт по наблюдениям нескольких десятков далеких сверхновых звезд. В настоящее время этот удивительный космологический феномен подтвержден данными наблюдений многих сотен далеких сверхновых звезд. Планируются специальные космические эксперименты для детального изучения ускоренного расширения Вселенной

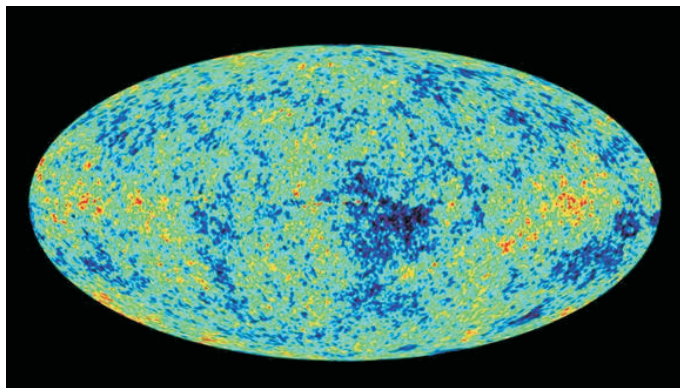


Рис. 10. Распределение флуктуаций интенсивности реликтового излучения по небу. © NASA / WMAP Science Team

и уточнения уравнения состояния новой формы материи — темной энергии.

Анизотропия реликтового излучения

Реликтовое излучение с температурой около трех градусов Кельвина осталось от Большого Взрыва, приведшего к формированию наблюдаемой Вселенной. Точные измерения слабой ($\Delta T/T \sim 10^{-5}$) анизотропии реликтового фона, детальное изучение углового распределения его пятнистой структуры указывают, что пространство Большого Взрыва является или строго плоским, или практически плоским. Но согласно фридмановской теории геометрия пространства однозначно связана с соотношением между полной плотностью всех видов материи во Вселенной и так называемой критической плотностью, которая определяется темпом расширения мира и выражается через постоянную Хаббла H (связь между скоростью V относительного удаления галактик и расстоянием r между ними описывается законом Хаббла $V = Hr$). В случае плоского пространства полная плотность всех видов материи во Вселенной равна критической. Зная постоянную Хаббла (которая известна сейчас с точностью около 10%), можно оценить современную плотность мира, т.е. суммарную космическую плотность всех видов материи во Вселенной. Так как плотности темной материи, барионов, нейтрино и излучения известны из других независимых данных, можно оценить плотность темной энергии, вклад которой оказывается равным 70%. Эта оценка прекрасно согласуется с оценкой плотности темной энергии, следующей из анализа ускоренного расширения Вселенной.

Формирование и эволюция крупномасштабных структур

Компьютерное моделирование процессов формирования и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной и, прежде всего, скоплений галактик, дает наилучшие результаты, если в нем учитывается не только темная материя, но и темная энергия, причем требуемая относительная плотность темной энергии должна иметь как раз ее наблюдаемое значение около 70%.

Возраст Вселенной

Задолго до открытия темной энергии ученых тревожила одна трудная проблема: в космологических моделях, которые в 1960-1980 гг. считались стандартными, время, протекшее от начала космологического расширения, оказывалось весьма малым — меньше возраста самых старых звезд шаровых звездных скоплений. Уже тогда советские астрофизики И.С. Шкловский, Н.С. Кардашев и Я.Б. Зельдович высказывали предположение, что эту проблему можно было бы решить с помощью введения всемирного космологического отталкивания, которое описывается эйнштейновским Λ -членом в уравнениях общей теории относительности. В моделях с отличным от нуля Λ -членом возраст мира получается достаточно большим, и проблема существования старых шаровых скоплений снимается. Так что сам по себе большой возраст самых старых наблюдаемых объектов Вселенной является указанием на существование темной энергии и антитяготения.

Местный Хаббловский поток

В работах А.Д. Чернина дана оценка локальной плотности темной энергии в скоплениях

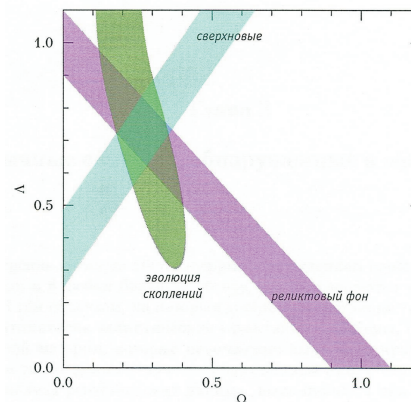


Рис. 11. Зависимости между плотностью темной энергии и плотностью всех остальных видов материи во Вселенной, полученные по наблюдательным данным разных типов. Все три зависимости пересекаются в одной области.

галактик, которая практически совпадает с глобальной плотностью темной энергии, оцененной из исследований ускоренного расширения Вселенной. Тот факт, что оценки локальной плотности темной энергии, выполненные независимо для трех различных скоплений галактик, хорошо согласуются друг с другом, свидетельствует о надежности этой методики.

Как мы видим, в случае темной энергии имеет место «пересечение» в одной точке, по крайней мере, пяти различных и не зависящих друг от друга линий аргументации. О природе темной энергии мы можем сказать еще меньше, чем о природе темной материи. Известно лишь, что темная энергия — это поле или совокупность полей, обладающее отрицательным давлением, что и приводит, в конечном счете, к гравитационному отталкиванию. Связь между давлением p и плотностью энергии ϵ в случае

темной энергии дается выражением $p = -W\epsilon$, где W — некоторый коэффициент, близкий к единице и известный в настоящее время с точностью до нескольких процентов. Если $|W| = 1$, то темная энергия обладает свойствами вакуума, плотность энергии которого одинакова во всех системах отсчета. Поэтому относительно вакуума невозможно различить состояния покоя и движения. Свойства этого вакуума в уравнениях ОТО описываются Эйнштейновским Λ -членом. Если $|W| < 1$, темную энергию называют квинтэссенцией, а если $|W| > 1$, то темная энергия называется фантомной энергией. Свойства этих видов энергии, особенно фантомной энергии, удивительны. Однако с повышением точности определения коэффициента W , он становится все ближе и ближе к единице, что свидетельствует в пользу того, что, скорее всего, темная энергия — это особый вид вакуума. Хотя окончательно судить об этом еще рано, и дело — за дальнейшими наземными и космическими наблюдениями.

Черные дыры

Под черной дырой понимается область пространства-времени, для которой вторая космическая скорость равна скорости света в вакууме (300000 км/с). Парадоксальные свойства черных дыр настолько необычны, что эти объекты с полным основанием можно отнести к новому, особому виду материи. Действительно, свойства внутренних частей черной дыры (расположенных под горизонтом событий) не зависят от типа и характеристик вещества, из которого черная дыра образовалась. Как уже отмечалось, черная дыра однозначно характеризуется всего тремя параметрами: массой,

угловым моментом вращения и электрическим зарядом. Поэтому состояние материи внутри черной дыры нельзя называть ни твердым, ни жидким, ни газообразным, ни плазменным. Это особое, сколлапсированное состояние материи с квантовой сингулярностью, которое реализуется при плотности, превышающей некоторую критическую величину.

Например, чтобы образовать черную дыру из земного шара, нужно с помощью некоторого воображаемого сверхмощного сферического прессы сжать Землю до размеров 9 мм. При этом плотность составит чудовищную величину $2 \cdot 10^{27}$ г/см³, что на 13 порядков выше плотности атомного ядра. При достижении такой плотности, согласно предсказанию ОТО, материя сама, без помощи прессы, будет сжиматься до сингулярного состояния (в сопутствующей системе отсчета), что приведет к образованию черной дыры с радиусом горизонта событий,

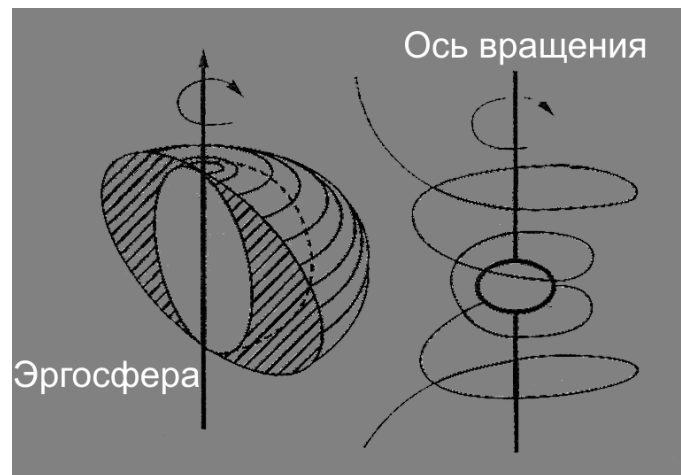


Рис. 12. Структура вращающейся черной дыры. Горизонт событий помещен внутри эргосферы, в которой имеется вихревое гравитационное поле. Луч света, проходящий через эргосферу, завихряется.

равным 9 мм. Заметим, что размер черной дыры характеризуется так называемым гравитационным радиусом $r_g = 2GM/c^2$, где M — масса тела, G — постоянная тяготения, c — скорость света. Для невращающейся черной дыры гравитационный радиус совпадает с радиусом горизонта событий. Следует отметить, что для очень массивных черных дыр величина критической плотности может иметь не столь экстремально большое значение. Например, для сверхмассивной черной дыры с массой 10 млрд. солнечных масс в ядре галактики радиус горизонта событий равен 200 а.е. (что в 5 раз больше радиуса Солнечной системы), а величина соответствующей критической плотности весьма мала: примерно $0,2 \cdot 10^{-3}$ г/см³, что в несколько раз меньше плотности воздуха у поверхности Земли.

Из наблюдений следует (после учета эффектов наблюдательной селекции), что полное число черных дыр звездной массы в нашей Галактике составляет около 10 миллионов. Поскольку средняя масса звездной черной дыры составляет примерно 10 солнечных масс, полная масса, представленная черными дырами в Галактике составляет примерно 10^8 масс Солнца или 0,1% от полной массы барионного вещества Галактики (заключенного в звездах, газе и пыли). Одна десятая процента — немалая величина, что дает основания считать черные дыры в Галактике действительно особой, новой формой материи.

Черные дыры звездной массы

Массы звездных черных дыр измеряются по движению оптических звезд в рентгеновских двойных системах. Рентгеновская двойная система состоит из оптической звезды — до-

нора вещества — и релятивистского объекта, аккрецирующего вещество соседней звезды. Возможность наблюдений аккрецирующих черных дыр по рентгеновскому «ореолу» вокруг них была предсказана в 1964 г. Я.Б. Зельдовичем и Е.Е. Салпитером. Теория дисковой аккреции вещества в двойной системе на черную дыру была развита в 1972-73 гг. в работах Н.И. Шакуры, Р.А. Сюняева, Дж. Прингла, М. Риса, И.Д. Новикова и К. Торна.

Рентгеновские наблюдения со спутников и оптические наблюдения с поверхности Земли прекрасно дополняют друг друга. Рентгеновские наблюдения свидетельствуют о наличии в двойной системе очень компактного объекта, причем по быстрой переменности интенсивности рентгеновского излучения можно оценить характерные размеры этого объекта. Оптические наблюдения (спектральные и фотометрические) позволяют изучать движение оптической звезды в гравитационном поле компактного объекта и, с использованием методов небесной механики, измерять массу компактного объекта. Согласно теории эволюции звезд с учетом эффектов ОТО, если масса ядра звезды, вещество которого переработано в термоядерных реакциях, больше трех солнечных масс, на поздних стадиях эволюции ядра происходит его коллапс с образованием черной дыры. Для звездных ядер меньших масс в конце эволюции образуется нейтронная звезда или белый карлик. Если измеренная масса компактного объекта в рентгеновской двойной системе оказывается более трех солнечных масс, а его оцененный размер близок к радиусу горизонта событий (который определяется массой объекта), то мы с полным осно-

ванием можем считать изучаемый компактный объект кандидатом в черные дыры.

В настоящее время измерены массы 23 кандидатов в звездные черные дыры, которые лежат в пределах 4-20 солнечных масс. Замечательно, что ни с одним из этих массивных компактных объектов не связаны феномены рентгеновского пульсара или рентгеновского барстера 1-го типа, характерные для аккрецирующих нейтронных звезд. Таким образом, по мере накопления сведений о массах релятивистских объектов, постепенно выкристаллизовывается очень красивый результат: аккрецирующие черные дыры и нейтронные звезды различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с предсказанием ОТО! Это сильно укрепляет нашу уверенность в реальном существовании черных дыр звездной массы.

Сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик

Массы сверхмассивных черных дыр (заключенные в диапазоне 10^6 - 10^{10} солнечных масс) измеряются по движению «пробных тел» (звезд, газовых облаков, газовых дисков) в их гравитационном поле. Радиусы сверхмассивных черных дыр можно непосредственно измерять с помощью наземных и космических интерферометров. Например, в центре нашей Галактики расположена черная дыра массой $4 \cdot 10^6$ солнечных. Эта масса надежно измерена по движениям соседних звезд. Радиус горизонта событий, соответствующий этой массе, составляет 17 солнечных радиусов. На расстоянии 8 килопарсек (расстояние от Солнца до центра Галактики) эта величина смотрится под

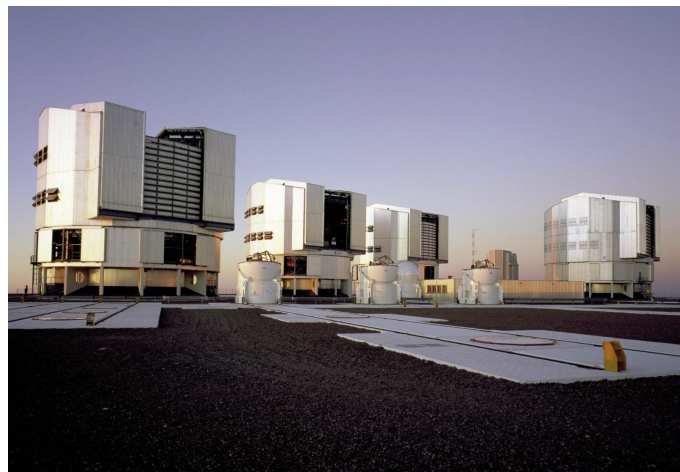


Рис. 13. Система из четырех восьмиметровых наземных оптических телескопов VLT. © ESO

углом 10^{-5} угловой секунды. Если же учесть искривление лучей света от ближайших окрестностей горизонта событий (внутренние части аккреционного диска), то видимый угловой размер внутренней области аккреционного диска возрастает примерно в 3 раза.

Недавно группа американских ученых выполнила измерения окрестностей горизонта событий сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики с угловым разрешением 10^{-5} секунды, из которых следует, что радиус компактного объекта массой $4 \cdot 10^6$ солнечных масс практически совпадает с радиусом горизонта событий! Использовалась техника радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинной базой на длине волны 1,3 мм. Сейчас авторы этой работы планируют уменьшить рабочую длину волны вдвое и значительно увеличить чувствительность аппаратуры, что позволит детально изучить пространственную структуру излучающих облас-

тей самых внутренних частей аккреционного диска и исследовать ее переменность. Можно надеяться, что в этих наблюдениях будут получены решающие доказательства того, что компактный объект в центре нашей Галактики является реальной черной дырой.

Другой метод оценки радиусов сверхмассивных черных дыр — изучение быстрой переменности рентгеновского излучения ядер галактик. Недавно в ядре активной галактики REJ1034+396 обнаружена квазипериодическая переменность интенсивности рентгеновского излучения с характерным квазипериодом около одного часа. Отсюда можно заключить, что радиус области аккреционного диска, где формируются эти квазипериодические (но не строго периодические!) рентгеновские осцилляции, всего в 3 раза превышает радиус горизонта событий сверхмассивной черной дыры массой 10^7 солнечных масс.

Все эти данные сильно укрепляют нашу уверенность в реальном существовании сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик.

К настоящему времени измерены массы многих сотен сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Появилась новая область астрофизики — демография черных дыр. Обнаружена надежная статистическая связь между массой сверхмассивной черной дыры и массой балджа галактики (балдж — это сферическое сгущение старых маломассивных звезд вблизи ядра галактики). Наблюдается также четкая корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и дисперсией скоростей звезд в балдже галактики. Выявляется некоторая корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и массой галактического гало, состояще-

го из темной материи. Все эти зависимости накладывают ограничения на механизмы образования и роста сверхмассивных черных дыр.

Открытие ряда квазаров с красными смещениями $z \sim 6$ показывает, что сверхмассивные черные дыры (с массой порядка 10^8 солнечных масс) успели сформироваться за время менее миллиарда лет, а недавнее открытие очень массивной черной дыры с массой $2,3 \cdot 10^{10}$ солнечных масс в квазаре с красным смещением $z \sim 3.9$ показывает, что черная дыра с массой более 20 миллиардов солнечных масс успела сформироваться за время порядка миллиарда лет. В этой связи, ученые обсуждают вопрос о том, что первично во Вселенной — образование сверхмассивной черной дыры в ядре галактики или образование самой галактики.

Таким образом, черные дыры, как особая, новая форма материи, уже завоевали «права гражданства» среди классических объектов Вселенной — звезд, галактик, галактических скоплений и т. п. На повестке дня — окончательное доказательство того, что многочисленные массивные и компактные объекты, свойства которых очень похожи на свойства черных дыр, предсказываемых ОТО, являются реальными черными дырами. Для этого планируются специальные наземные и космические эксперименты с очень высоким угловым разрешением, порядка 10^{-6} секунды дуги и выше, чтобы наблюдать процессы вблизи горизонтов событий сверхмассивных черных дыр.

Кротовые норы

Кротовая нора, как и черная дыра, является очень компактным объектом, с радиусом «горловины», близкой к радиусу горизонта собы-

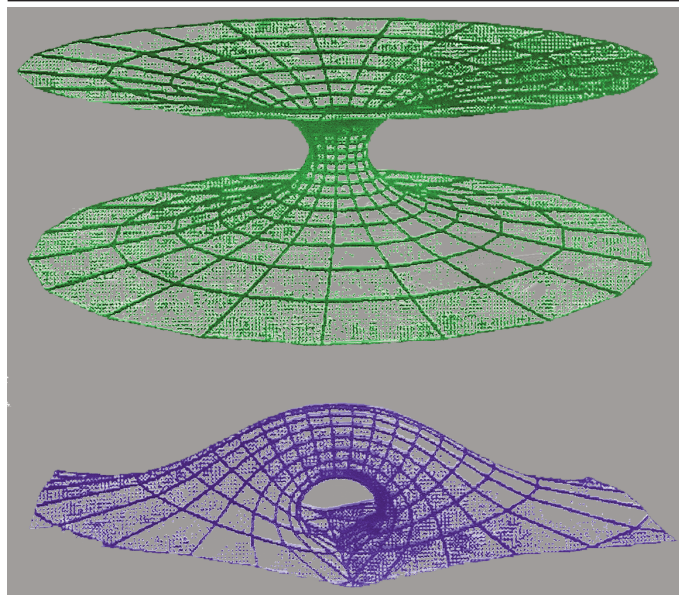


Рис. 14. Двумерное изображение кротовой норы, соединяющей две вселенные (вверху) и две области одной вселенной (внизу).

тий черной дыры той же массы. Однако в отличие от черной дыры она не имеет горизонта событий и не обладает сингулярностью в центре. Поэтому в пространстве-времени кротовой норы можно перемещаться в прямом и в обратном направлении. Как уже отмечалось, для образования кротовой норы необходимо присутствие экзотической материи с отрицательным давлением. В работах Н.С. Кардашева, И.Д. Новикова и А.А. Шацкого рассматриваются теоретические проблемы, связанные с формированием кротовых нор и проблемы устойчивости этих в высшей степени экзотических объектов при прохождении через них разных видов материи.

Поиск кротовых нор во Вселенной — актуальная задача современной астрофизики. Наблюдаемые свойства черных дыр и крото-

вых нор очень похожи, поэтому различить их непросто. И тем не менее, астрономы придумали ряд методов, позволяющих отличить кротовую нору от черной дыры. Прежде всего, из-за различия метрики пространства-времени вблизи черной дыры и кротовой норы лучи далекой звезды фона по-разному искривляются в гравитационном поле этих объектов. Это позволяет отличить кротовую нору от черной дыры по эффектам гравитационного микролинзирования (в случае черных дыр и кротовых нор звездной массы). Н.С. Кардашев приводит около десятка наблюдаемых различий черных дыр и кротовых нор. Важнейшая особенность кротовой норы — наличие у нее монополюсного магнитного поля. Сложение этого поля с дипольным магнитным полем аккреционного диска приводит к появлению одностороннего коллимированного выброса релятивистской плазмы — джета. Такие односторонние джеты, по-видимому, наблюдаются у некоторых квазаров, например, у знаменитого квазара 3C273.

Еще одна возможность отличить кротовую нору от черной дыры появляется при наличии очень высокого углового разрешения интерферометра. Поскольку кротовая нора не обладает горизонтом событий, в этом случае можно наблюдать наличие сверхтонкой структуры в изображении кротовой норы на размерах, меньших радиуса «горловины» кротовой норы. У черной дыры сверхтонкая структура изображения на масштабах, меньших радиуса горизонта событий, должна отсутствовать. Астрономы активно занимаются поиском кротовых нор, который, в связи с предстоящим вводом в строй новых наземных и космиче-

ских телескопов и интерферометров, не кажется безнадежным.

Заключение

Галилей наблюдал небо в телескоп с объективом в несколько сантиметров диаметром и совершил революционный прорыв в представлении об окружающем мире. Современные астрономы имеют в своем распоряжении неизмеримо более мощные и разнообразные средства наблюдений, которые позволяют им открывать принципиально новые, ранее неизвестные формы материи.

Современные астрономические наблюдения ведутся в очень широком диапазоне электромагнитных волн — от радиоволн до гамма-излучения. Используются наземные, баллонные и орбитальные инструменты, оснащенные лучшими светоприемниками и другой первоклассной, в том числе, компьютерной аппаратурой. Космологические исследования ведутся на крупнейших инструментах — это телескоп БТА с зеркалом диаметром 6 м в САО РАН (еще не так давно самый большой в мире), дюжина 8-10-метровых оптических телескопов, установленных в Чили, на Гавайских островах, в Испании, Южной Африке, Космический телескоп им. Хаббла, радиотелескоп РАТАН-600, а также космические лаборатории «Спитцер» (ИК-излучение), ROSAT, «Чандра», «Интеграл», «ХММ-Ньютон» (рентгеновские лучи), COBE, «Реликт»,

WMAP (микроволновое радиоизлучение). На стадии подготовки — новые масштабные проекты, такие как «Радиоастрон», «Спектр-УФ», «Миллиметрон», «Спектр-Рентген-Гамма», SNAP, JEDM. Последние два проекта специально нацелены на изучение темной энергии по регистрации сверхновых звезд на больших расстояниях. В проекте — создание оптического телескопа-гиганта с диаметром зеркала 42 м, а также коротковолнового радиотелескопа-интерферометра ALMA и т. п. Уже осуществлен запуск космических аппаратов «Гершель» и «Планк».

Можно быть уверенными, что введение в строй этой уникальной аппаратуры приведет к новым революционным открытиям в такой увлекательнейшей области исследований, как астрономия.

Литература

1. Новиков И.Д., Шаров А.С. Человек, открывший взрыв Вселенной. М., 1989.
2. Вейнберг С. Первые три минуты. М., 1982.
3. Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. М., 2002.
4. Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003.
5. Черепашук А.М., Чернин А.Д. Горизонты Вселенной. Новосибирск, 2005.
6. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. М., 1984.