

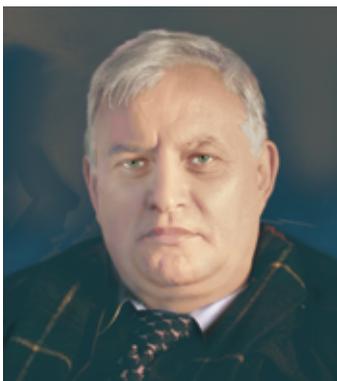


Темная энергия и космология

М.В. САЖИН,
доктор физико-математических наук

О.С. САЖИНА,
кандидат физико-математических наук,
ГАИШ МГУ

На протяжении прошлого века молодая наука космология сумела претерпеть огромное количество изменений. Наше видение глобальной структуры пространства-времени несколько раз было кардинально пересмотрено. В 2011 г. лауреатами Нобелевской премии по физике стали американцы Сол Перлмуттер, Адам Рис и австралиец Брайан Шмидт (Земля и Вселенная, 2012, № 1, с. 19–20). Ученые получили премию за открытие ускоренного



расширения Вселенной. О том, чем может быть вызвано расширение (“темная энергия”), а также о

динамике развития нашей Вселенной из прошлого в далекое будущее мы поговорим в этой статье.

СВЕРХНОВЫЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА Ia

С. Перлмуттер возглавлял группу астрономов в США, начавшую наблюдения сверхновых звезд еще в 1988 г. Б. Шмидт руководил группой, приступившей к

исследованиям этих объектов в конце 1994 г., одному из членов которой, А. Рису, принадлежит ключевая роль в сделанном открытии. Они изучали сверхновые звезды и накапливали данные, полученные с помощью новейших крупных на-

земных телескопов, космических обсерваторий, мощных компьютеров и сверхчувствительных ПЗС-матриц.

В конце прошлого века обе группы опубликовали результаты наблюдений, согласно которым Вселенная начала рас-





ширяться ускоренно, когда прошло 7 млрд. лет с момента Большого взрыва. Напомним, что возраст современной Вселенной составляет около 14 млрд. лет. Таким образом, ученые выявили поразительный факт. Ранняя Вселенная, возраст которой был меньше 7 млрд. лет, расширялась замедленно, но, начиная с этой критической эпохи, замедление сменилось ускорением.

Поскольку скорость света конечна, то в космологии мы наблюдаем объекты в более раннюю эпоху, а именно отстоящую от нас на временной интервал, равный расстоянию до объекта, деленному на скорость света. Поэтому галактики, находящиеся от нас на расстоянии больше 7 млрд. св. лет ($z = 0,6$), подвержены глобальному движению с замедлением (движению по инерции). Свет от галактик, находящихся ближе к нам, был испущен позже, чем 7 млрд. лет от Большого взрыва, поэтому эти галактики разлетаются от нас с ускорением.

Это открытие вызвало настоящую сенсацию, несмотря на то что к концу XX в. уже разработали теоретическую модель такого процесса. Однако для обеспечения наблюдаемого ускоренного расширения Вселенной необходимы специальные механизмы. Это может быть либо новая фундаментальная постоянная (лямбда-член),

либо принципиально новый вид материи, заполняющей всю Вселенную. Сразу отметим, что природа ускоренного расширения до сих пор является загадочной, хотя его существование подтверждено несколькими независимыми группами с помощью различных методов и не подвергается сомнению.

Рассмотрим подробнее, что представляют собой звезды SN Ia и почему их свойства оказались столь ценными для космологии.

Сверхновые звезды известны давно (Земля и Вселенная, 1981, №№ 4, 5; 2008, № 2). Одно из первых дошедших до нас свидетельств – описание звезды-гостыи в китайских хрониках. Она вспыхнула в нашей Галактике в 1054 г. и была видна днем в течение одного месяца. Впоследствии звезда стала угасать, но еще в течение двух лет ее можно было наблюдать невооруженным глазом. Сейчас на месте звезды-гостыи находится Крабовидная туманность – остаток Сверхновой 1054 г., в центре которой расположен миллисекундный пульсар (Земля и Вселенная, 1982, № 3).

Сверхновые звезды делятся на несколько типов. Звезды типа Ia (SN Ia) – ярчайшие объекты (“маяки Вселенной”) – замечательны тем, что их кривые блеска носят универсальный характер, поэтому можно считать,

что у них одинаковые свойства. В последнее десятилетие XX в. ученые выявили удивительные особенности сверхновых звезд. Во-первых, звезды SN Ia хорошо видны даже с космологических расстояний, сравнимых с наблюдаемым размером нашей Вселенной, при больших значениях красного смещения. Во-вторых, что особенно важно, они вспыхивают достаточно часто, позволяя “расставить” в космосе “верстовые столбы” – пространственные ориентиры во Вселенной. Светимость этих звезд в максимуме своего блеска почти постоянна, что является бесценным свойством для космологии.

Общепринятая теоретическая модель звезд SN Ia – термоядерный взрыв белого карлика с массой около $1,3 M_{\odot}$, примерно равной пределу Чандрасекара. По мере приближения массы белого карлика к своей допустимой верхней границе вещество в нем теряет гидростатическую устойчивость. Происходит это из-за нейтронизации вещества, но такая устойчивость приводит к термоядерному взрыву, а не к коллапсу. Энергия, выделившаяся при взрыве белого карлика, вполне достаточна, чтобы объяснить энергию SN Ia. Масса вещества, сброшенного в виде оболочек, составляет примерно M_{\odot} , а его скорость в расширяющейся оболочке достигает нескольких





Крабоподобная туманность – остаток Сверхновой 1054 г. и ее рентгеновское изображение (стр. 35). В центре туманности расположен пульсар. Снимки сделаны в 2008 г. и 2011 г. КТХ и космической обсерваторией “Чандра”. Фото NASA.

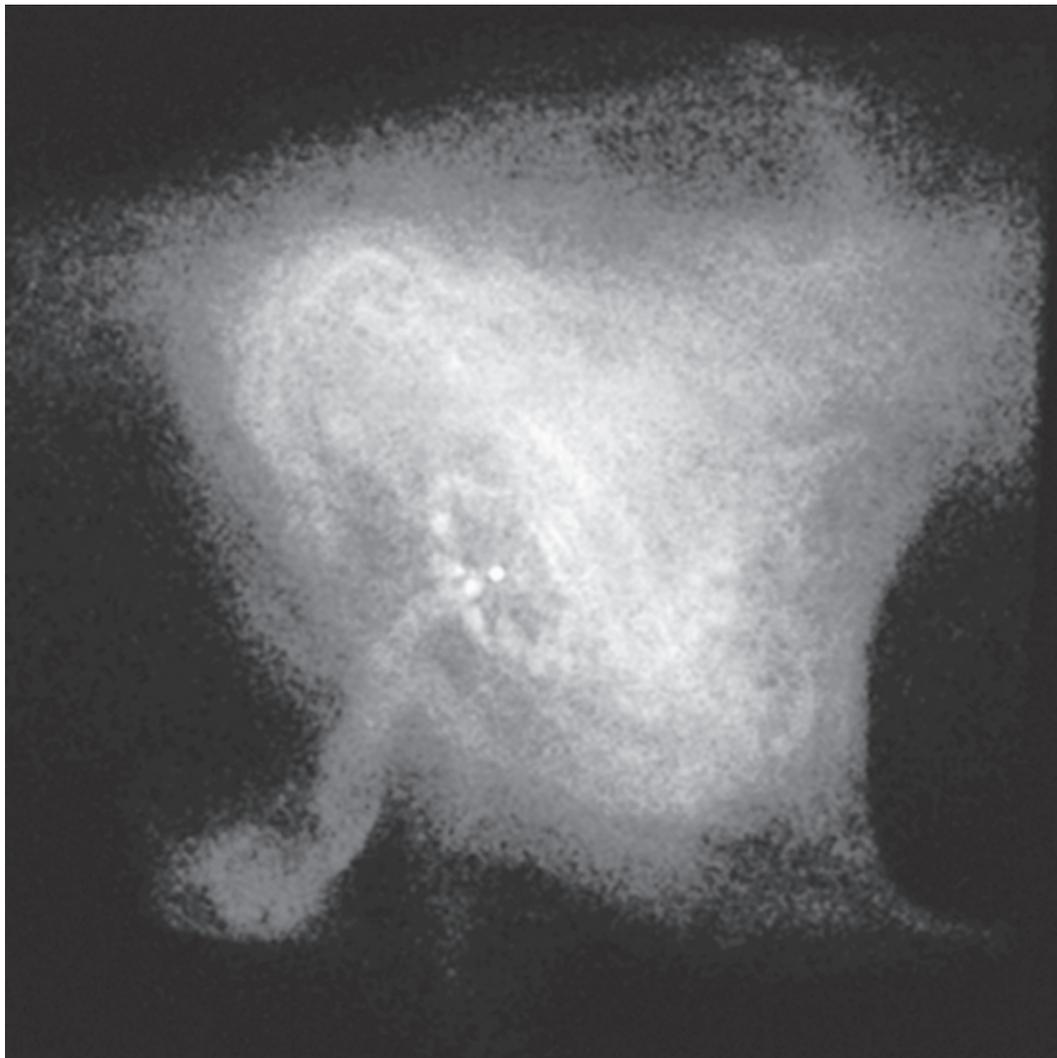
десятков тысяч километров в секунду.

Быстрое и адиабатическое расширение оболочки ведет к ее охлаждению, после чего начинается реакция радиоактивного распада никеля ^{56}Ni , образовавшегося в результате

термоядерных реакций. Процесс распада этого элемента и определяет форму кривой блеска SN Ia. Светимость в максимуме блеска определяется только массой выброшенного никеля. При выбросе половины солнечной массы светимость

соответствует абсолютной звездной величине $-19,2^m$. Наблюдения также показали, что вариация светимости в максимуме блеска зависит от скорости спада звездной величины после максимума. Этот эффект был открыт замечательным





советским и российским астрономом Ю.П. Псковским и сейчас носит название “эффект Псковского – Филлипса”. С его помощью можно точнее определить светимость в максимуме блеска. Сейчас светимость звезд SN Ia измеряется с точностью до одной десятой звездной величины.

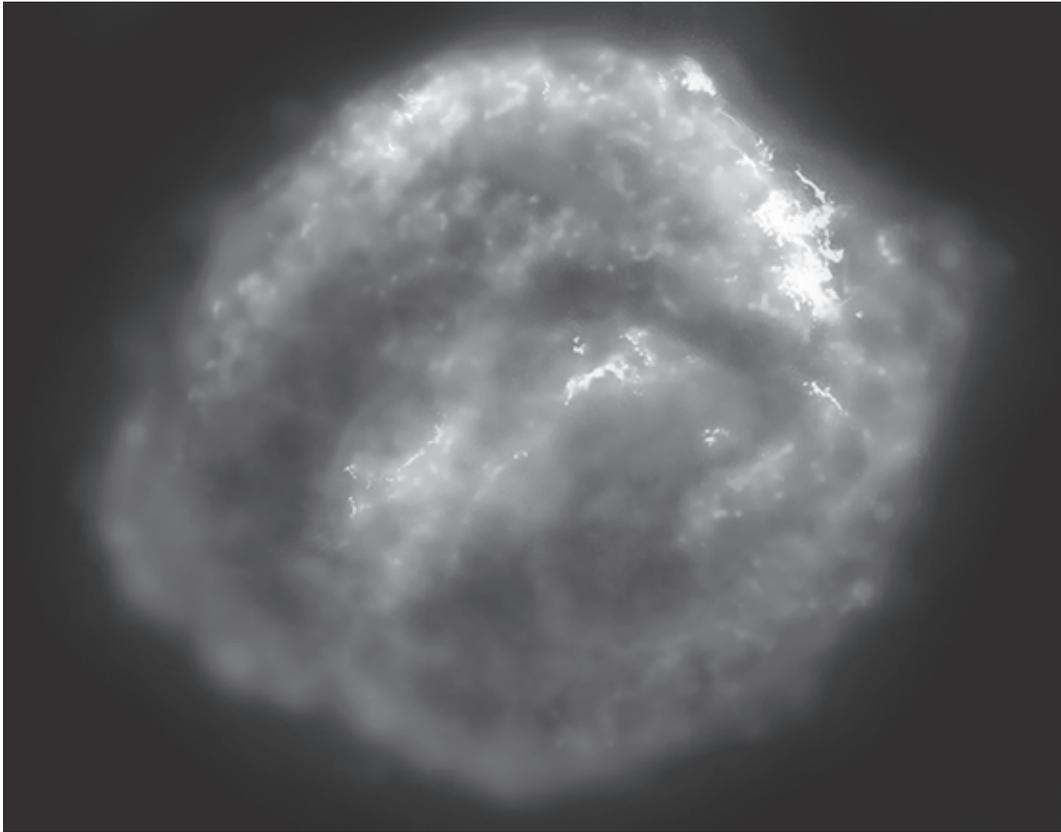
2*

Эти два свойства – яркость звезды, сравнимая в максимуме блеска с яркостью всей галактики, а также прецизионное измерение светимости звезды в максимуме – позволяют астрономам использовать SN Ia как “стандартную свечу” в космологии (Земля и Вселенная, 2010, № 4, с. 93, 110–111). Такое свойство космических объектов

дает возможность измерять расстояние до них. Действительно, представим себе лампу накаливания, светимость которой хорошо известна наблюдателю. Поместим эту лампу на некоторое расстояние от наблюдателя, а ему дадим небольшой телескоп с фотоумножителем, чтобы измерять поток света от лампы. Поток прямо про-

35





порционален светимости (с известным значением) и обратно пропорционален квадрату расстояния до источника света. Знание светимости и возможность измерять поток позволяет вычислить расстояние до источника света. В астрофизике это называется “болометрическим расстоянием”. С помощью эффекта Псковского – Филлипса измеряют расстояние до сверхновых звезд, а по смещению спектральных линий определяют скорость движения звезды и материнской галактики, которой принадлежит звезда.

Таким образом, космологи получили в свои руки замечательный спо-

соб измерять кинетические свойства расширяющейся Вселенной.

ДИАГРАММА ХАББЛА

Обратимся теперь к результатам, полученным астрофизиками при наблюдении сверхновых SN Ia. На их основе построены диаграммы Хаббла для таких звезд. На диаграмме отложены скорость удаления внегалактического объекта (в нашем случае – сверхновой звезды, принадлежащей другой галактике) и расстояние до этого объекта. В 1929 г. Э. Хаббл показал, что положения галактик на такой диа-

Остаток Сверхновой SN 1604 в Змееносце (расстояние 20 тыс. св. лет). Вспышку этой сверхновой типа SN Ia изучал И. Кеплер, поэтому она носит его имя. Синтезированное изображение составлено в 2004 г. из снимков, полученных космическими обсерваториями “Чандра”, KТХ и “Спитцер”. Фото NASA.

грамме образуют прямую линию с некоторым наклоном, проходящую через начало системы координат диаграммы. Наклон этой линии определяет параметр Хаббла, а положение галактик указывает, что мы живем в расширяющейся

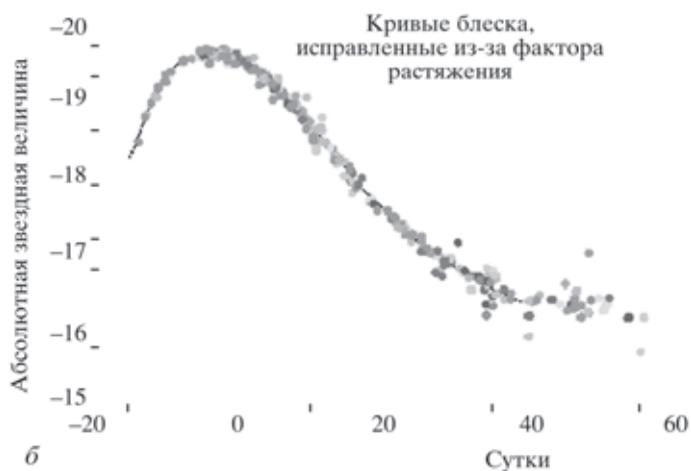
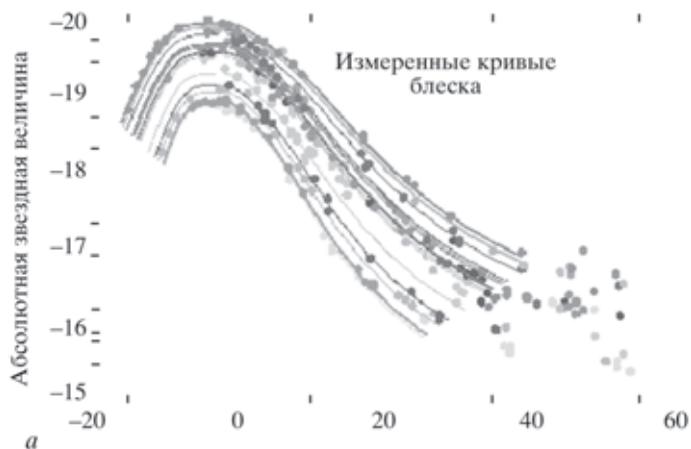




Графики кривых блеска, измеренные в фильтре “В” у нескольких сверхновых звезд типа SN Ia: а) результаты непосредственных измерений, б) исправленные из-за фактора растяжения, согласно эффекту Псковского – Филлипса. У всех кривых практически одинаковые профили (разница в абсолютной звездной величине составляет доли). Кружки разного цвета обозначают измерения разных сверхновых звезд.

Вселенной. Соотношение между скоростью и расстоянием называется законом Хаббла (Земля и Вселенная, 2009, № 5, с. 25).

К середине XX в. космологи поняли, что для далеких внегалактических объектов, удаленных на более чем 4 Гпк (примерно 13 млрд. св. лет), зависимость расстояние – скорость не будет линейной (Земля и Вселенная, 2007, № 3). Такие отклонения предсказывались всеми теоретическими моделями нашей Вселенной, а форма кривой определялась видом материи, заполняющей нашу Вселенную. Однако эффекты эволюции галактик, а также другие систематические эффекты не позволяли построить диаграммы Хаббла, достаточно точные, чтобы определить отклонение от прямой линии. Такая возможность появилась, когда были опублико-



ваны данные наблюдений звезд типа SN Ia. В 1998 г. коллектив под руководством С. Перлмуттера опубликовал работу с диаграммой Хаббла, в которой отражены данные наблюдений, охватывающих область вплоть до $z = 1$ (около 7 млрд св. лет). При больших значениях красного смещения появилось значимое отклонение от прямой зависимости на диаграмме Хаббла. Это соответствовало тому, что наша Вселенная заполнена обыч-

ным веществом на 27%, а остальное – неизвестный вид материи, названный темной энергией (Земля и Вселенная, 2006, № 1; 2009, № 5).

В том же году свои результаты исследований опубликовала другая группа, в ее составе – А. Рис и Б. Шмидт. Данные двух групп совпали. Таким образом, была открыта темная энергия. Дальнейшие работы подтвердили эти результаты, а диаграмма Хаббла для сверхновых звезд



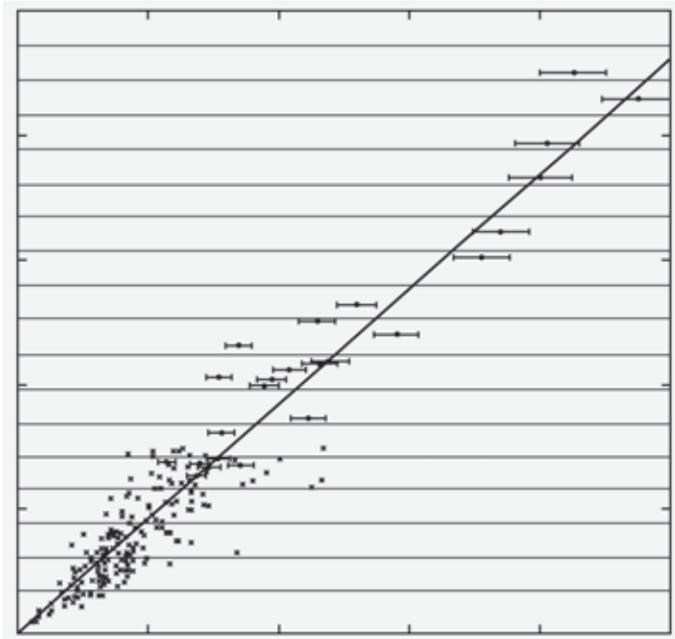


Диаграмма Хаббла для галактик. Черточками указано положение достаточно близких к нам галактик, расстояние до них не превышает 100 Мпк. Распределение галактик (с точностью до ошибок измерения, указанных горизонтальными отрезками) близко к линейному. Тангенс угла наклона представленной на рисунке линии соответствует постоянной Хаббла. Крестиками отмечены галактики, ошибки измерения которых малы.

была построена с исчерпывающей полнотой, измерены составляющие нашей Вселенной. Для подтверждения этого открытия астрофизики использовали и другие методы, связанные с из-

мерением характеристик анизотропии реликтового излучения и скопления галактик. Здесь стоит отметить, что когда космологи пишут “вклад обычной материи”, они имеют в виду не только

окружающее нас вещество, но и темную материю. При нанесении на диаграмму Хаббла “скорость – расстояние” данных по сверхновым типа Ia обнаружилось отклонение от прямой линии. Эти отклонения предсказывались теоретическими моделями нашей Вселенной, а их величина определялась видом материи, заполняющей нашу Вселенную.

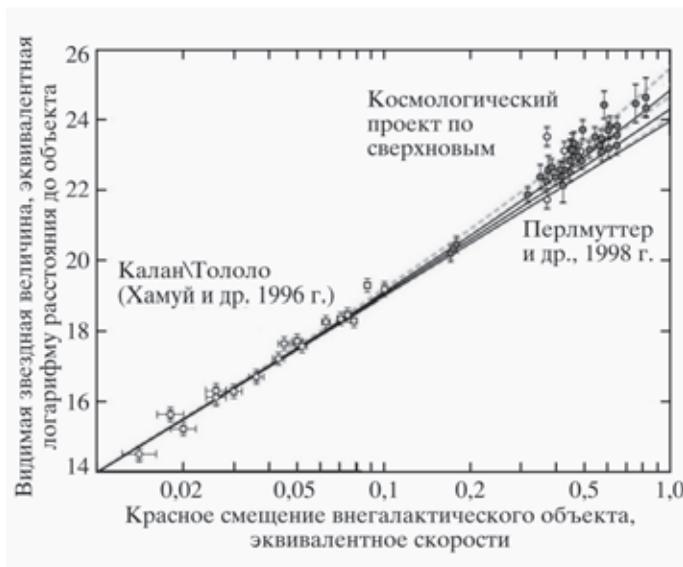


Диаграмма Хаббла, построенная по данным исследований сверхновых звезд типа SN Ia. По сравнению с диаграммой Хаббла для галактик она является “перевернутой”. Красное смещение измеряется скоростью сверхновой звезды, деленной на скорость света. Видимая звездная величина пропорциональна логарифму расстояния до сверхновой звезды.

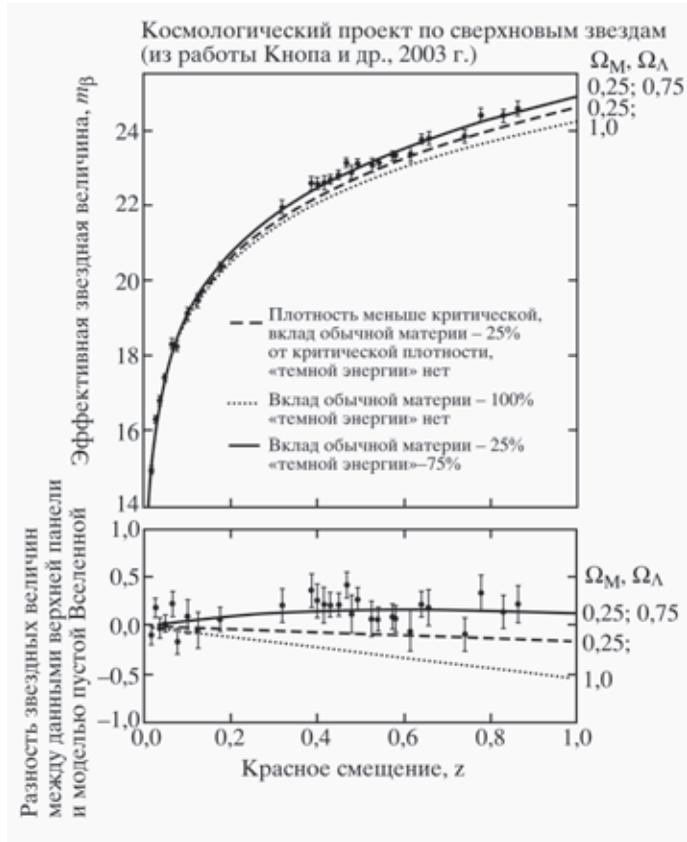




Диаграмма Хаббла для сверхновых звезд, построенная на основе результатов пятилетних исследований. Точность измерений выросла, что позволяет с уверенностью судить о наличии темной энергии, которая выявлена в нелинейной зависимости красного смещения от звездной величины (эквивалентно скорости удаления объектов от расстояния до них). Профиль кривой зависит от соотношения между плотностью материи (барионной и темного вещества) и темной энергии.

ЧТО ТАКОЕ ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Вещество, из которого состоят все космические тела, космологи называют “барионным веществом”. Его составляющая в полной плотности нашей Вселенной всего 4%, к темной материи относятся 23% (оставшиеся 73% приходится на темную энергию; Земля и Вселенная, 2010, № 1). Так ее называют потому, что она не видна в телескопы, но этот тип вещества похож на обычное вещество. Темная материя состоит из элементарных частиц неизвестного типа, стабильных на промежутках времени, сравнимых с возрастом нашей Вселенной, но не взаимодействующих (или чрезвычайно слабо взаимодействующих) с фотонами. Такие частицы не поглощают и не излучают фотоны, поэтому их



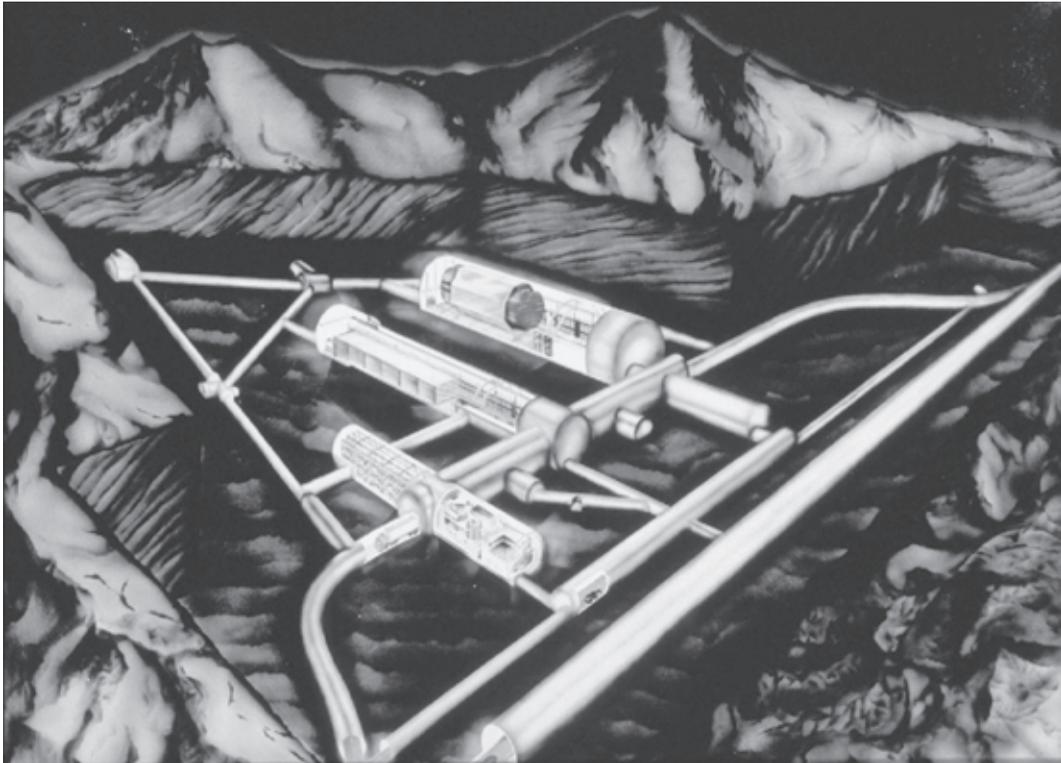
не видно в телескопы. Проявления темной материи наблюдаются во многих процессах и открыты различными способами: в результате измерения скоростей галактик в скоплениях галактик, по наличию в них горячего газа, а также по проявлениям эффектов слабого внегалактического гравитационного линзирования и микролинзирования в нашей Галактике.

В настоящее время делаются попытки зарегистрировать частицы темной материи физическими методами (Земля и Вселенная, 2005, № 1, с. 89). Созданы детек-

торы, чувствительные к темной материи различных видов. Так, итальянские физики в подземной лаборатории Гран-Сассо ищут вимпы (один из гипотетических видов темной материи; аббревиатура, образованная из первых букв слов weakly interacting massive particles – слабо взаимодействующие массивные частицы) в эксперименте DAMA/LIBRA. Хотя объявлено, что ученые смогли детектировать частицы темной материи, пока это не подтверждено.

Астрофизики точно установили факт расширения Вселенной в промежутке красных смеще-





ний $0 < z < 1$ и измерили его количественно. Основные характеристики любого движения (в частности, расширения) – это скорость и ускорение. Скорость расширения характеризуется параметром Хаббла, ускорение – “параметром замедления” (q). Это название возникло исторически и связано с тем, что наполнение Вселенной обычной материей приводит всегда к замедленному расширению, по аналогии с полетом ракеты с Земли. Пока работают двигатели, ракета удаляется от стартовой площадки с ускорением. Наступает момент, когда топливо кончается, тогда ра-

40

кета начинает двигаться по инерции. Движение по инерции происходило бы равномерно, если бы отсутствовало гравитационное поле Земли. Оно действует на ракету, притягивает ракету, из-за этого движение ракеты замедляется, удаление ракеты от Земли происходит замедленно.

Ранняя Вселенная была заполнена темной энергией, предсказываемой теоретиками гипотетическим веществом, послужившим движущей силой для ее экспоненциального ускоренного расширения (стадия инфляции; Земля и Вселенная, 2009, № 2). Когда эта стадия закончилась, то есть механизм ускорения

Устройство подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия). Приборы эксперимента DAMA/LIBRA располагаются вблизи средней и правой камер. Приборы измеряют поток частиц темной материи.

“выключился”, наше пространство-время стало расширяться по инерции. Считалось, что в этом процессе доминирующую роль играло собственное гравитационное поле родившейся обычной материи. Будучи полем притяжения, оно должно было обеспечивать замедленное расширение Вселенной. Наблюдения показали, что это не так. Вселенная сравнительно





недавно (начиная с красного смещения $z \approx 0,6$) стала расширяться ускоренно.

При расширении все тела меняют свою плотность, в том числе и Вселенная. Правда, разные составляющие материи меняют свою плотность по различным законам. Не меняет плотность при расширении или сжатии только вакуум. Поэтому иногда такой вид материи называется “фальшивым вакуумом” или “тяжелым вакуумом”. Темную энергию именуют в зависимости от того, как ее плотность ведет себя при расширении. Если при расширении ее плотность уменьшается, такой вид темной энергии называют “квинтэссенция”. Если плотность остается постоянной, проявляется новая фундаментальная физическая константа. Если темная энергия обладает плотностью, возрастающей при расширении (есть и такая модель темной энергии), то она называется “фантомной”.

В ранней Вселенной плотность обычной материи значительно превосходила плотность темной энергии. Поэтому влияние темной энергии на эволюцию Вселенной было ничтожно. Время шло, плотность обычной материи уменьшалась быстрее, чем плотность темной энергии. Ближе к современному моменту времени (что фактически соответствует времени существования Вселен-

ной, около 13 млрд лет) плотность темной энергии стала больше, чем плотность обычной материи. Наступила стадия доминирования темной энергии, она стала определять характеристики расширения: скорость и ускорение. Таким образом, в нашей Вселенной наступила новая стадия – ускоренного расширения при доминировании темной энергии, которая продолжается до сих пор.

Предпринимались попытки обнаружить темную энергию по ее воздействию на движение сверхновых SN Ia, по ее возможному влиянию на крупномасштабную структуру пространства-времени, а также по анизотропии реликтового излучения. В последнем случае подтверждение открытия темной энергии пришло из наблюдательных данных в радиодиапазоне. Реликтовое излучение родилось в ранней Вселенной в тот момент, когда вещество Вселенной разделилось на собственно материю (протоны, нейтроны, электроны) и излучение (фотоны). Это разделение произошло, когда остыла плазма, которую представляла собой очень ранняя Вселенная. Вещество начало связываться в атомы, а реликтовые фотоны стали распространяться свободно. Это излучение приходит к нам со всех сторон, с так называемой поверхности последнего рассея-

ния, расстояние до которой соответствует почти 14 Гпк, то есть размеру видимой части современной Вселенной. Мы живем внутри этого источника излучения.

Интересно обратить внимание на своеобразный косвенный путь поиска темной энергии. Дело в том, что в ранней Вселенной гравитационные силы притяжения обычной материи доминировали, а вклад темной энергии был очень мал, меньше одной сотой доли процента. Со временем, когда плотность обычного вещества падала с расширением пространства-времени, влияние темной энергии становилось все больше, поскольку ее плотность падает медленнее (в некоторых моделях темной энергии ее плотность постоянна или даже растет). После открытия темной энергии в ближней, современной нам Вселенной, где она уже доминировала, астрофизики вернулись к изучению загадок ранней Вселенной и с удивлением обнаружили, что почти все пробелы в знаниях об анизотропии реликтового излучения заполнены, а несоответствия исчезли.

Помимо анизотропии, гипотеза существования темной энергии нашла независимое подтверждение и в анализе данных, полученных при изучении крупномасштабной структуры Вселенной и скоплений галактик. Как оказалось,



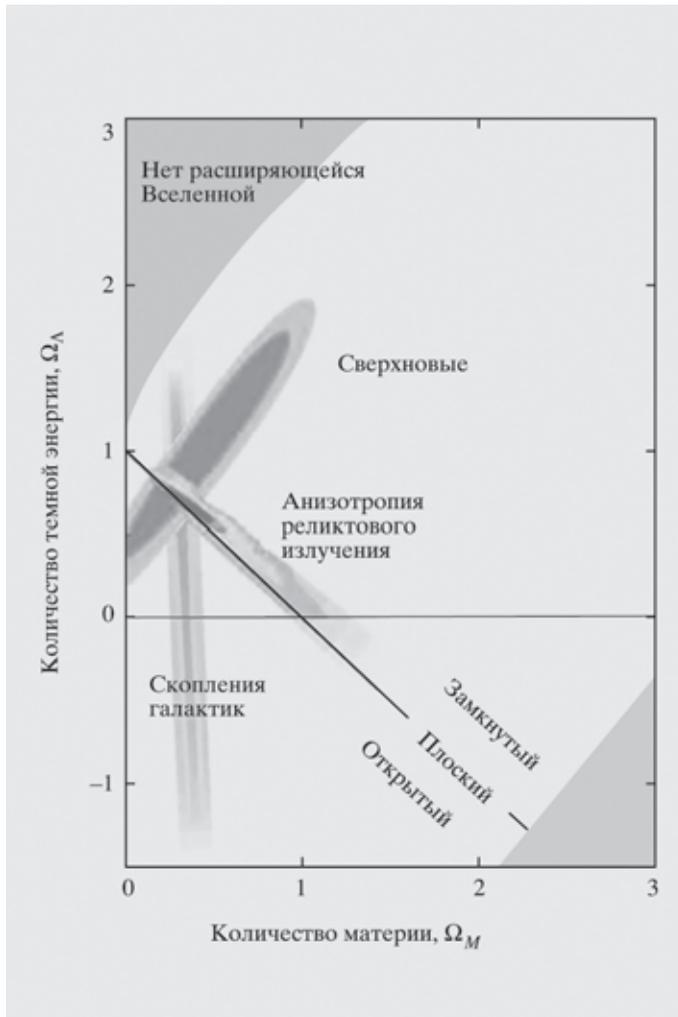


Диаграмма показывает измеренные соотношения количества материи (барионной и темного вещества) Ω_M и темной энергии Ω_Λ . Эллипсом обозначена область измерений (с ошибками), сделанных на основе данных по сверхновым звездам SN Ia, область вдоль наклонной прямой – измерения по анизотропии реликтового излучения, вертикальной полосой – данные исследований скоплений галактик. Видно, что пересечение трех допустимых областей указывает на значения $\Omega_\Lambda = 0,73$ и $\Omega_M = 0,27$, то есть вклад темной энергии в общую плотность составляет 73%, темной и барионной материи – 27%.

Еще одно подтверждение существования темной энергии пришло из внегалактической астрономии. Доктор физико-математических наук А.Д. Чернин (ГАИШ МГУ) вместе со своими коллегами изучал распределение скоростей ближайших к нам галактик и скоростей галактического вещества. Обнаружены дополнительные силы глобального масштаба, которыми могут быть гравитационные силы, вызванные темной энергией.

ПРИРОДА ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

Наши познания о темной энергии ограничиваются несколькими наблюдательными фактами. Известно, что темная энергия, в отличие от обычного вещества (барионов и темной ма-

теоретические модели с привлечением темной энергии гораздо лучше соответствуют наблюдательным данным, отражают истинное распределение галактик во Вселенной и их эволюцию. Конечно, это косвенное подтверждение, но очень важное. Существенно продвинулся в решении этой проблемы доктор физико-математических наук А.А. Вихлинин (ИКИ РАН), руководящий группой по

изучению эволюции скоплений галактик в рентгеновском диапазоне. С помощью рентгеновской космической обсерватории “Чандра” наблюдались динамические процессы горячего газа в массивных скоплениях галактик, что позволило обнаружить замедленные эволюции скоплений с течением времени. Чем ближе скопление к нам, тем медленнее идет в нем эволюция. В этом повинна темная энергия.





терии), равномерно распределена в пространстве. Если у этого типа материи и есть контраст плотности (как следует из теоретических моделей), то он должен быть очень мал, не выше нескольких сотых долей процента. Второй факт, который заставляет считать этот вид материи особым, заключается в том, что темная энергия обладает свойством антигравитации, принципиально отличающим ее от любого другого вида материи. Что же может представлять собой темная энергия?

Разработано несколько моделей темной энергии, и они различаются одним важным параметром – параметром уравнения состояния, который есть отношение давления к плотности энергии покоя. Для всех обычных веществ этот параметр практически не отличается от нуля, но для темной энергии он близок к -1 . Если параметр состояния больше этой величины, то такую темную энергию называют квинтэссенцией, при точном равенстве мы имеем Вселенную с лямбда-членом. Если же параметр меньше -1 , то реализуется фантомная темная энергия.

Плотность квинтэссенции при расширении падает медленнее, чем плотность обычного газа. В случае лямбда-члена плотность темной энергии при расширении остается постоянной, а для

фантомной энергии ее плотность при расширении растет. Темная энергия характеризуется не только плотностью, но и отрицательным давлением. Отрицательное давление существует не только в космологии. Оно существует и в обычной жизни. Каждый из читателей хоть раз в жизни плавал на лодке. Когда загребашь веслом воду, сзади лопасти весла образуются маленькие пузырьки, возникающие из-за того, что в воде образуются полости с отрицательным давлением. Причем темная энергия обладает свойством идеальной жидкости. Отрицательное давление – это положительное натяжение, оно вынуждает сближаться. Натяжения присутствуют, например, в атомах. Так, можно сблизить два атома водорода и образовать атом гелия. Причем в атоме гелия действуют ядерные силы, удерживающие положительно заряженные частицы (протоны) от разлета и вызывающие натяжения. Натяжения дают вклад в массу атома гелия. Этот вклад отрицательный! Масса атома гелия меньше, чем масса двух разделенных протонов. Дефект массы возникает из-за действия сил натяжения.

Обсуждение возможной природы темной энергии начнем с модели Вселенной с лямбда-членом, так как она была первой космологической моде-

лью. Ее разрабатывал еще А. Эйнштейн, введя в уравнения Общей теории относительности эту новую фундаментальную постоянную: размерность лямбда-члена обратно пропорциональна квадрату расстояния. Эйнштейн ввел эту константу, чтобы построить модель стационарной Вселенной. Позже, после работ 1922–1924 гг. российского ученого А.А. Фридмана и открытия расширения Вселенной, Эйнштейн принял теорию расширяющейся Вселенной и отверг модель с лямбда-членом. Тем не менее астрофизики позже возвращались к этой модели и рассматривали ее следствия. 40 лет назад советские астрофизики И.С. Шкловский и Н.С. Кардашëв привлекли модель с лямбда-членом для объяснения распределения квазаров по красным смещениям. Следует отметить, что для объяснения наблюдаемого распределения квазаров требовался лямбда-член, практически совпадающий по величине с тем лямбда-членом, который измерили космологи в наше время.

Модели квинтэссенции и фантомной энергии могут быть реализованы в физической модели сверхлегких скалярных полей. Для квинтэссенции получаемое поле достаточно “респектабельное” (в смысле нарушения условий энергодоминантности, о которых речь пойдет





ниже) и не приводит к неприятностям, то есть к нарушениям основополагающих и привычных нам физических законов, при анализе методами физики элементарных частиц. Другая ситуация возникает при наличии фантомной энергии: нарушается условие энергодоминантности, согласно которому скорость потока энергии вещества всегда меньше скорости света. Плотность энергии покоя вещества в случае фантомной энергии оказывается меньше абсолютного значения его давления.

Коротко напомним, что представляют собой энергетические условия. Любое “классическое” вещество имеет неотрицательную плотность энергии – это так называемое “слабое энергетическое условие”. Плотность энергии покоя вещества, а также ее сумма с давлением должны быть неотрицательными. Для “классического” вещества не может быть гравитационных сил отталкивания – это “сильное энергетическое условие” (оно нарушается, когда тензор энергии-импульса вещества становится очень большим по абсолютной величине и отрицательным). Плотность энергии покоя вещества, его давление, а также их сумма должны быть неотрицательными. Темная энергия характеризуется отрицательным давлением, что нарушает сильное энергетическое

условие, хотя может и не нарушать слабое энергетическое условие.

Таким образом, слабое и сильное энергетические условия будут выполняться только при условиях, что плотность энергии покоя вещества неотрицательна и не существует отрицательного давления (то есть натяжения), сравнимого по величине или большего этой плотности. Фантомная темная энергия нарушает оба эти условия.

Феномен темной энергии позволяет иначе взглянуть на эволюцию Вселенной и прогнозировать ее будущее.

“ЧЕРНАЯ ДЫРА НАОБОРОТ”

Наличие темной энергии окажет сильное влияние на будущее Вселенной. Предлагается несколько возможных сценариев развития событий на космологических промежутках времени. Если темная энергия все-таки реализуется в виде космологической постоянной (лямбда-члена), то в далеком будущем может образоваться фиксированный горизонт событий. Он представляет собой воображаемую сферу, в центре которой расположен наблюдатель. Вне этой сферы ни материя, ни излучение никогда не смогут достичь наблюдателя. Подчеркнем, что в таком сценарии материя и излучение оказались бы заперты вне горизонта событий, а не внутри

него, как это происходит с черными дырами (Земля и Вселенная, 2005, 4; 2010, № 1). В этом смысле такая модель представляет собой как бы “черную дыру наоборот”, поскольку ничто не может уйти под горизонт, то есть попасть в наблюдаемую нами область пространства-времени, в то время как в “классической” черной дыре ничто не может выйти из-под горизонта. В данном случае “классическая” черная дыра как бы охватывает нас со всех сторон, эти области навсегда останутся для нас недоступными.

Галактики будут разлетаться от нас все дальше и дальше, Вселенная будет все более пустой. Первым шагом к таким переменам станут возможные изменения в местной группе галактик, в которую входят Млечный Путь, Туманность Андромеды и несколько карликовых галактик-спутников. Все они, по мнению космологов, постепенно сольются в единое гигантское шарообразное скопление звезд. Более удаленные галактики, гравитационно не связанные с этой группой, будут продолжать удаляться. Наблюдаемая область пространства растет за счет распространения лучей света из наиболее удаленных уголков Вселенной. Однако общий объем ускоренно расширяющейся Вселенной растет быстрее, и поэтому





эти далекие галактики постепенно полностью пропадут из доступного нам поля зрения. Такой процесс может занять более 100 млрд лет.

В таком отдаленном будущем ближний космос изменится незначительно, хотя наиболее яркие звезды выгорят, израсходовав свою внутреннюю энергию, а удаленные галактики совсем исчезнут из поля зрения. Реликтовое излучение – ценнейший свидетель эпохи Большого взрыва – к этому времени рассеется, постепенно переходя из микроволнового диапазона в радиоволновой. Многократное звездообразование сильно исказит первоначальный состав химических элементов межзвездной среды. Однако если темная энергия обусловлена не просто космологической постоянной, за счет которой плотность темной энергии не падает с расширением, Вселенную будущего могут ожидать и другие варианты развития. В случае фантомной энергии ее плотность будет расти с расширением, и Вселенная достигнет бесконечных размеров. Горизонт событий не будет, но расстояния между галактиками станут бесконечно большими. Если темная энергия окажется квинтэссенцией, то Вселенная никогда не станет бесконечно большой за конечный промежуток времени. Горизонт событий также не образует-

ся, удаленные галактики останутся в доступной нам области видимости.

Кроме того, состав темной энергии может зависеть и от времени: в разные периоды доминирует энергия какого-то одного типа, переходящего в другой. Таким образом, формирование горизонта событий нашей Вселенной в далеком будущем очень чувствительно к балансу двух противоположных характеристик: полной массы Вселенной, определяющей ее геометрию, и состава темной энергии, задающей темп ее расширения.

ВРЕМЯ – ВПЕРЕД?

Наше представление о связи пространства и времени сильно менялось. От абсолютизма теории Ньютона, где пространство и время не зависели друг от друга и были вечной и неизменной ареной для протекания всевозможных физических процессов, мы шагнули к теории относительности, которая установила невозможность существования пространства без материи и времени и смогла предоставить точнейшие количественные описания их взаимодействия. Теперь же перед учеными раскрываются теории суперструн, петлевой гравитации и другие абстрактные модели, призванные объединить теорию гравитации с квантовым подходом. Эти теории красивы с ма-

тематической точки зрения, но пока еще очень далеки от проверки наблюдательными или экспериментальными методами, хотя потенциально очень притягательны для исследователей.

Открытие темной энергии – принципиально нового типа “вещества” во Вселенной – не может не повлечь за собой ее исследование в контексте влияния и на пространство, и на время в самых глобальных масштабах. Взяв на вооружение новейшие теории, ученые следуют общей парадигме современной физики, согласно которой и пространство, и время, и вещество во всех его проявлениях (барионное, темная материя и энергия) взаимосвязаны между собой. Темная энергия должна не только активно влиять на будущее нашей Вселенной, наряду с барионным и темным веществом, задавая ее глобальную динамику и геометрию, но, может быть, способна привести даже к переосмыслению некоторых фундаментальных физических понятий, одним из которых является “время”.

По мере развития науки время теряло свою универсальность. Оно перестало быть абсолютным, перестало быть симметричным, приведя ученых к проблеме “стрелы времени”, своего рода термодинамической характеристики Вселенной. Надо сказать, что привлечение различных раз-





делов физики к исследованию одной проблемы тоже является характерной особенностью современной науки. Так, космология впитала в себя не только астрофизику, но и физику элементарных частиц, и термодинамику, и другие разделы физики, находясь на стыке этих дисциплин и эффективно пользуясь их аппаратом.

При рассуждениях о физической природе времени высказывается даже такая радикальная концепция, согласно которой времени как фундаментального понятия вообще не существует и то, что мы воспринимаем как время, есть просто отражение связи между разными частями Вселенной. Время может терять даже свои основополагающие свойства – непрерывность и длительность. Другими словами, время может быть всего лишь неким производным свойством базовых составляющих нашего мира, одной из которых является темная энергия.

Разгадка природы времени может заключаться в концепции Мультимира, базирующейся на многомерной теории суперструн. Можно предположить, что наша Вселенная родилась как некая флуктуация повышенной плотности из пустого пространства, заполненного темной энергией. Наряду с нашей Вселенной возможно существование и многих других миров, со

своими наборами фундаментальных параметров и определяемым ими временем.

Как известно, все, что мы когда-либо сможем узнать об окружающем мире, ограничивается только нашей Вселенной, поскольку никакие сигналы не способны прийти к нам из причинно несвязанных с нами областей Мультимира. Тем не менее знание состава темной энергии позволит нам хотя бы теоретически представить себе, что же происходит в недоступных нам мирах. Кроме того, темная энергия поможет ответить на вопросы и о будущем нашей собственной Вселенной, в частности решить вопрос о “стреле времени”, объяснить энтропийные свойства нашей Вселенной, объяснить, почему время ведет себя так, а не иначе. Ведь в зависимости от свойств темной энергии время может даже течь в обратную сторону, как это происходит в некоторых “дочерних” вселенных Мультимира. Пока эти рассуждения представляют, конечно, больше теоретический интерес, но могут быть использованы для построения долгожданной единой теории.

На протяжении прошлого века такая молодая наука, как космология, претерпела множество изменений. Наше видение глобальной структуры пространства-времени несколько

раз было кардинально пересмотрено. От теории Ньютона с его абсолютизацией и независимостью пространства и времени ученые пришли к пониманию Вселенной как динамического, расширяющегося “объекта”. Концепция бесконечной, однородной и неподвижной Вселенной сменилась теорией Большого взрыва, а представление движения по инерции уступило место механизмам инфляции, источником которой является темная энергия.

В космологии, как и в любой другой науке, самое важное – это получить подтверждение теории наблюдениями и экспериментами. Важнейший успех в изучении темной энергии – именно наблюдательные подтверждения ее существования. Астрономы, в отличие от физиков-экспериментаторов, вынуждены проводить свои “опыты” на больших расстояниях, в подавляющем большинстве случаев не имея возможности повлиять на объекты своего опыта. Более того, большинство опытов неповторяемы.

Особо отметим наше везение: для своего возникновения и развития космология “выбрала” самый удачный момент в истории развития Вселенной. Так, наша Вселенная, наполненная галактиками и межзвездным веществом, еще не опустошенная ускоренным расширением





ем, доступна исследованию астрономическими приборами. Сверхновые служат “маяками” на данном этапе эволюции Вселенной, давая нам четкую связь расстояний и звездных величин со стандартным энерговыделением. Диаграмма Хаббла, отражающая зависимость скорости этих источников от расстояния до них, характеризует динамику нашей Вселенной, выявляя отклонения от равномерного расширения. Совместно с изучением анизотропии

микроволнового реликтового излучения и крупномасштабной структуры пространства-времени удастся сделать неопровержимое заключение о существовании темной энергии. Реликтовое излучение – единственный свидетель ранних стадий жизни Вселенной – еще не успело рассеяться и ослабнуть от своего долгого путешествия настолько, чтобы стать недоступным приборам. В не таком уж и далеком по меркам Вселенной будущем это излучение

станет невозможно зарегистрировать.

Мы живем в золотой век космологии, и надо активно пользоваться его возможностями для изучения структуры и динамики Вселенной – ранней, современной и даже мира далекого будущего. У космологии остается еще много задач. Существование темной энергии сомнению не подлежит, и в целом ясна ее роль в развитии нашей Вселенной, но вопрос о природе этой энергии все еще остается открытым.

Информация

Необычная туманность

Планетарную туманность “Ожерелье” PN G054.2-03.4, находящуюся в созвездии Стрелы в 15 тыс. св. лет от нас, обнаружили в 2010 г. с помощью 2,54-м телескопа на Канарских островах. 2 июля 2011 г. КТХ получил ее изображение (см. стр. 2 обложки, внизу). Это светящийся остаток размером 8,8 св. лет ($8,3 \times 10^{13}$ км) от обычной солнцеподобной звезды. Туманность имеет форму вытянутого эллипса,

усеянного яркими плотными газопылевыми узлами, напоминающими алмазы в ожерелье. Скопления газа светятся под действием ультрафиолетовых лучей от звезд. Появление подобных структур объясняется ударными волнами, возникающими при столкновении разлетающегося горячего вещества от звезды с более холодным газом, выброшенным ранее. В центре “Ожерелья” расположена тесная двойная звездная система с периодом обращения вокруг общего центра масс менее суток. Общая масса выброшенного газа составила примерно $0,06 M_{\odot}$.

Туманность “Ожерелье” образовалась около 5 тыс.

лет назад и продолжает расширяться со скоростью 56 км/с. История ее рождения весьма любопытна. Примерно 10 тыс. лет назад одна из звезд двойной системы состарилась настолько, что ее раздувшаяся оболочка поглотила компаньона. Меньшая звезда продолжала вращаться по орбите уже внутри красного гиганта, увеличивая тем самым период вращения большей звезды вокруг собственной оси. Под влиянием центробежных сил часть газовой оболочки красного гиганта была выброшена и сформировала вытянутое кольцо.

Пресс-релиз NASA,
11 августа 2011 г.

