

УДК 539.391+514.764.2

ТЕМНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Жовтан А.В.¹, Леляков А.П.¹, Петраш А.Н.², Роцупкин С.Н.¹

¹*Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Украина*

²*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,*

Севастополь, Украина

E-mail: alex_ph@fastmail.fm, rsn@tnu.crimea.ua, lelyakov@tnu.crimea.ua

Недавние наблюдательные исследования далеких вспышек сверхновых звезд указывают на присутствие во Вселенной космического вакуума, плотность энергии которого превышает плотность всех других форм космической энергии вместе взятых. Вакуум создает поле антигравитации, которое вызывает ускоренное космологическое расширение. Это ускорение и было обнаружено в наблюдениях. Открытие космического вакуума влечет за собой коренной пересмотр устоявшихся представлений о современном состоянии вселенной.

Ключевые слова: темная материя, космология

ВВЕДЕНИЕ

После полуторагодичных наблюдений и анализа полученных данных с космического зонда **WMAP** была опубликована новая карта Вселенной, представляющая выдающееся достижение космологии. Она ответила на ряд до сих пор спорных вопросов, жизненно важных для понимания истории и структуры видимой части Вселенной. Даже краткое перечисление этих результатов позволяет понять, какой огромный шаг сделала теперь наука о Вселенной.

Окончательно выяснено, что возраст Вселенной $13,7 \pm 0,2$ миллиарда лет. Эта цифра помогает точно определить и одну из важнейших констант, так называемую постоянную Хаббла, которая показывает скорость расширения нашей Вселенной (а заодно позволяет определить расстояния в ней), – она составляет $72 \pm 8 \text{ км/с} \cdot \text{Mpc}$. Окончательно установлено, что пространство Вселенной геометрически плоское. Доказано также, что масса Вселенной состоит на 4 процента из массы обычного вещества, на 26 процентов – из так называемого темного вещества, природа которого до сих пор не известна (ясно лишь, что это необычное вещество, так как оно неспособно излучать свет) и на остальные 70 процентов – из так называемой темной энергии тоже неизвестной природы под действием которой Вселенная ускоренно расширяется. Наконец, доказано, что Вселенная родилась в результате Большого Взрыва, за которым почти немедленно последовала инфляция (период чудовищно быстрого расширения), в результате которого Вселенная в основном и достигла нынешних огромных размеров, а спустя примерно 200 миллионов лет после окончания инфляции во Вселенной появился первый свет то ли от гигантских звезд, то ли от черных дыр.

1. НЕСТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ЭЙНШТЕЙНА

Первая попытка описания происхождения и эволюции Вселенной была предпринята Эйнштейном на основе сформулированной общей теории относительности (ОТО). Уравнения Эйнштейна выводятся из принципа наименьшего действия для гравитационного поля и материи и в простейшем случае имеют следующий вид [1,2]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \left(\frac{8\pi G}{c^4} \right) T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

где $g_{\mu\nu}$ - метрический тензор, $R_{\mu\nu} = g^{\alpha\beta} R_{\alpha\mu\beta\nu}$ - тензор Риччи, $R_{\alpha\mu\beta\nu}$ - тензор кривизны, R - скалярная кривизна, G - гравитационная постоянная, а $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса:

$$T_{\mu\nu} = (\varepsilon + p)u_\mu u_\nu - p g_{\mu\nu}, \quad (2)$$

ε - плотность энергии, p - давление, u_μ - 4- скорость.

Однако собственно уравнения ОТО, как и любые уравнения движения, не определяют полностью эволюцию объекта в пространстве-времени: необходимо задать начальные условия, а также уравнение, связывающее плотность энергии ε и давление p , т.е. уравнение состояния. Основное предположение классической космологии – допущение, что эволюция Метагалактики определяется гравитационными силами. Впервые эта идея была реализована Эйнштейном в 1917г., который исходил из традиционных в то время представлений о неизменности мира.

Разумеется, начальные условия происхождения Вселенной никто не знал и поэтому они были сформулированы из соображений простоты и называются теперь основными космологическими постулатами: Вселенная на протяжении всех этапов своей эволюции являлась и является объектом однородным и изотропным.

Основные космологические постулаты являются очень сильными требованиями и практически определяют эволюцию Вселенной. Однако гораздо важнее тот факт, что сформулированные из соображений простоты, тем не менее, сравнительно хорошо согласуются с наблюдениями. Довольно грубое доказательство изотропии Вселенной производится путем подсчета числа галактик и их скоплений в одинаковых телесных углах, но в разных направлениях. Более точную оценку изотропии Вселенной дают измерения интенсивности реликтового излучения в зависимости от направления – с точностью $\approx 10^{-4}$ угловое распределение реликтового излучения можно считать изотропным (см. рис.1).

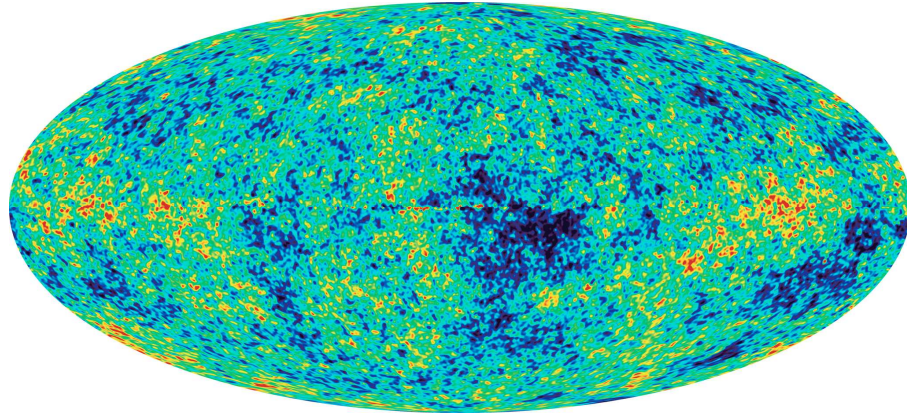


Рис.1. Пространственная структура реликтового излучения, заполняющего Вселенную. Детальный анализ анизотропии его энергетического спектра, то есть различий в энергии излучения по направлениям (показаны цветом), поможет узнать больше о природе тёмной энергии. Данные WMAP.

WMAP и анизотропия микроволнового излучения

Черные точки - экспериментальные данные
Красная линия - предсказания инфляционной теории

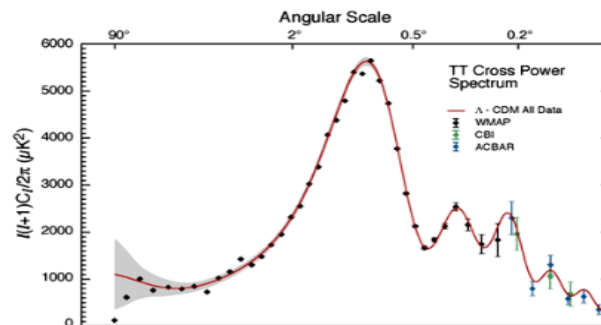


Рис.2. Экспериментальные и теоретические данные по анизотропии реликтового излучения (данные спутника WMAP)

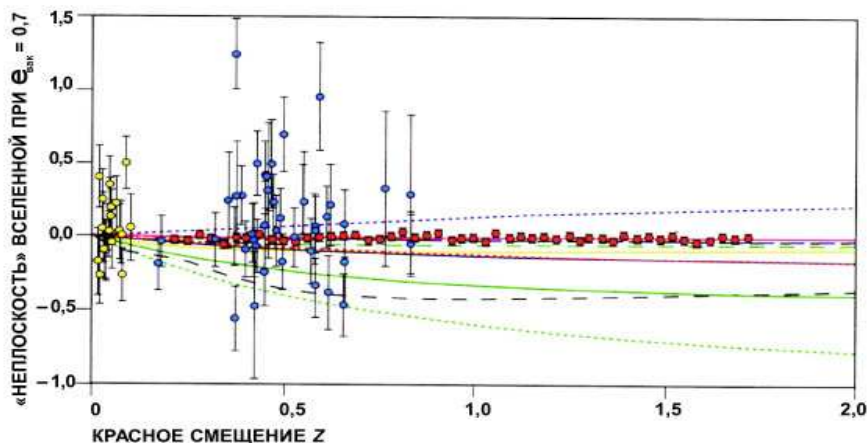


Рис.3. Уже полученные результаты (с вертикальными отрезками, отвечающими экспериментальным ошибкам) и ожидаемые (красные точки) от будущих наблюдений за сверхновыми с большими значениями красного смещения (или величины z).

С такой же точностью можно считать изотропным и пространство Вселенной. Постулат об однородности Вселенной выполняется только на больших расстояниях. Практически все основные модели Вселенной базируются на основных космологических постулатах, однако физические предпосылки в различных моделях существенно отличаются друг от друга. В своей первой работе по космологии, с которой и началась современная наука о вселенной, Эйнштейн исходил из многовековых традиционных представлений классической науки о вечности и неизменности Вселенной. Однако его попытки получить статическое решение уравнений ОТО при основных космологических постулатах окончились неудачей, что вообще-то неудивительно, так как гравитация характеризуется силой только одного знака – притяжением и статическое решение для системы гравитирующих тел невозможно. И оно было снято Эйнштейном. Поскольку уравнения ОТО не имели стационарного решения, то чтобы нейтрализовать, уравновесить всемирное тяготение и обеспечить неподвижность распределенного во Вселенной вещества, Эйнштейну фактически пришлось допустить существование всемирного анти-тяготения. Для описания анти-тяготения Эйнштейн модифицировал ОТО введя в уравнения ОТО константу Λ , которая по сути была эквивалентна силам отталкивания, уравновешивающим гравитационное притяжение, т.е. уравнение (1) модифицировалось следующим образом:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \left(\frac{8\pi G}{c^4} \right) T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}. \quad (3)$$

В процессе этой модификации выражение для действия для гравитационного поля и материи сохраняло свою форму, к нему лишь добавился постоянный член $\Lambda g_{\mu\nu}$, который называют космологическим членом, а саму величину Λ - космологической константой. Однако введение космологического члена

эквивалентно приписыванию пространству-времени принципиально неустранимой кривизны, не связанной ни с материей, ни с гравитационными волнами и влияющий на эволюцию нашей Вселенной. Тем не менее, малое значение этой константы $\Lambda \approx 10^{-56} \text{ м}^{-2}$ обусловило безнадежность ее обнаружения в лабораторных условиях и вместе с тем реализовало руководящую идею Эйнштейна – статичность Вселенной. Для полноты следует отметить, что стационарная модель обладала еще одним недостатком – пространство в рамках такой модели было неустойчивым: если бы в какой либо момент силы притяжения превысили бы силы отталкивания (например, из за флуктуации плотности, что является вполне допустимым явлением для такой большой системы как Вселенная), то пространство Вселенной начало бы практически неограниченно сжиматься.

В 1922г. А.А. Фридман решил уравнения ОТО, несколько модифицировав второй космологический постулат: Вселенная выглядит одинаково вне зависимости от того, в каком направлении мы ее наблюдаем при наблюдении в масштабе, большом по сравнению с расстоянием между галактиками, т.е. изотропна, и изотропия сохраняется вне зависимости от т положения точки наблюдения. Такие предположения привели к удивительному по тем временам результату: Вселенная должна изменять свои размеры со временем, т.е. быть нестационарной. Динамику развития в (1) можно описать по аналогии с моделью идеальной жидкости с плотностью энергии $\varepsilon(t)$ и давлением $p(t)$, усредненными по всем галактикам и их скоплениям при условии изотропии и однородности трехмерного пространства. Тогда тензор энергии-импульса – имеет вид [3]:

$$T_{\mu\nu} = \text{diag}(\varepsilon, -p, -p, -p), \quad (4)$$

и (1) переходит в уравнение Эйнштейна-Фридмана-Леметра

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\varepsilon, \quad (5)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a^2} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = -\frac{8\pi G}{3}(3p + \varepsilon), \quad (6)$$

или

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}a(\varepsilon + 3p), \quad (7)$$

$$(\dot{a})^2 = \frac{8\pi G}{3}a^2\varepsilon - k, \quad (8)$$

где a - масштабный фактор, причем значение $k < 0$ соответствуют закрытой Вселенной, значение $k = 0$ - плоской, $k > 0$ - открытой, а метрику для однородной и изотропной Вселенной (метрику Фридмана-Робертсона-Уокера) можно записать в следующем виде:

$$dS^2 = dt^2 - a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2(\theta)d\varphi^2) \right). \quad (9)$$

Если выражение $(3p + \varepsilon)$ в уравнении (6) положительное, что следует из теорий, в которых рассматривается Вселенная, заполненная веществом и (или) излучением, то расширение Вселенной со временем будет замедляться, так как $\ddot{a} < 0$. Следовательно, в модели первого типа ($k < 0$) Вселенная расширяется достаточно медленно, расширение постепенно замедляется вследствие искривления пространства и в конце концов сменяется сжатием. Эта модель ограничена в пространстве, хотя пространство в ней безгранично, так как замыкается с самой собой, будучи искривленным. В моделях второго типа ($k > 0$) расширение происходит быстро, но все равно несколько замедляется со временем, а степень искривленности пространства меньше, поэтому в конце концов Вселенная начинает расширяться с постоянной скоростью. В моделях третьего типа скорость расширения Вселенной достаточна только для того, чтобы избежать дальнейшего сжатия ($k = 0$), в этом случае скорость расширения постоянно уменьшается, но никогда не становится нулевой.

Разложение масштабного фактора в ряд Тейлора в окрестности его сегодняшнего значения

$$\frac{a(t)}{a(t_0)} = 1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2}q_0H_0^2(t - t_0)^2 + \dots, \quad (10)$$

где

$$H_0 = \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)}, \quad (11)$$

$$q_0 = \frac{\ddot{a}}{H_0^2} = \frac{\ddot{a}}{\dot{a}(t_0)^2}at_0, \quad (12)$$

позволяет ввести две величины, определяющие в дальнейшем поведение масштабного фактора: параметра разбегания H_0 и параметр замедления q_0 соответственно.

Таким образом, тип модели для нашей Вселенной определяется суммарной плотностью всех видов материи. Для иллюстрации этой зависимости вводится понятие критической плотности [4]

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad (13)$$

в этом случае уравнение (8) можно записать следующим образом:

$$\frac{\rho}{\rho_c} = 1 + \frac{k}{H^2 a^2}, \quad (14)$$

что напрямую отражает связь между кривизной пространства, определяемой величиной k и отличием полной плотности Вселенной от ее критического значения. Если плотность Вселенной больше критической плотности, то реализуется замкнутая модель, если меньше, то открытая, если плотность Вселенной равна критической плотности, то вселенная плоская.

Таким образом, фридмановская теория предсказывает, что космологическое

расширение в однородном и изотропном мире должна в первом приближении происходить по линейному закону: в каждый данный момент истории мира скорость удаления объекта, находящегося на расстоянии R от нас, пропорциональна этому расстоянию:

$$V = H_0 R, \quad (15)$$

где H_0 - коэффициент, который не зависит ни от расстояния до объекта, ни от направления на него на небе. Эта линейная зависимость относительной скорости от относительного расстояния есть прямое следствие однородности и изотропии Вселенной; таким увидит космологическое расширение любой наблюдатель, где бы в пространстве он ни находился.

После открытия Хабблом красного смещения в спектрах удаленных галактик стало ясно, что Вселенная расширяется. Одним из вопросов, возникших в этой связи, был следующий: как долго будет продолжаться расширение и чем оно закончится?

Расчетное значение критической средней плотности Вселенной примерно 10^{-29} г/см^3 , что соответствует в среднем пяти нуклонам на кубический метр [5,6,7]. Значение концентрации нуклонов, усредненное по всему объему Вселенной, десятки и сотни раз измеряли, тщательно подсчитывая разными методами количество звезд и газопылевых облаков. Результаты таких измерений несколько различаются, но качественный вывод неизменен: значение плотности Вселенной едва дотягивает до нескольких процентов от критической. Поэтому вплоть до 70-х годов двадцатого столетия общепринятым был прогноз о вечном расширении нашего мира, которое неизбежно должно привести к так называемой тепловой смерти. Однако постепенно стало ясно, что истинная масса Вселенной намного больше видимой массы, заключенной в звездах и газопылевых облаках и, скорее всего, близка к критической, и возможно, в точности равна ей.

2. СВИДЕТЕЛЬСТВА СУЩЕСТВОВАНИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Первое указание на то, что с подсчетом массы Вселенной что-то не так, появилось в середине 30-х годов двадцатого века. Швейцарский астроном Цвикки измерил скорости, с которыми галактики скопления Волосы Вероники движутся вокруг общего центра. Результат получился обескураживающим: скорости галактик оказались гораздо больше, чем логично было ожидать, исходя из наблюдаемой суммарной массы скопления. Это означало, что истинная масса скопления Волосы Вероники гораздо больше видимой. Но основное количество материи, присутствующей в этой области Вселенной, остается по каким-то причинам невидимой и недоступной для прямых наблюдений, проявляя себя только гравитационно, то есть как масса.

О наличии скрытой массы в скоплениях галактик свидетельствуют также эксперименты по так называемому гравитационному линзированию. Объяснение этого явления следует из ОТО. В соответствии с ней, любая масса деформирует пространство и подобно линзе искажает прямолинейный ход лучей света.

Искажение, которое вызывает скопление галактик, столь велико, что его легко заметить. В частности, по искажению изображения галактики, которая лежит за скоплением, можно рассчитать распределение вещества в скоплении – линзе и измерить тем самым его полную массу. И оказалось, что она всегда во много раз больше, нежели вклад видимого вещества скопления. В соответствии с законами Кеплера, при движении от центра галактики к ее периферии скорость вращения галактических объектов должна убывать обратно пропорционально квадратному корню из расстояния до центра. Измерения же показали, что для многих галактик эта скорость остается почти постоянной на весьма значительном удалении от центра (см. рис.4).

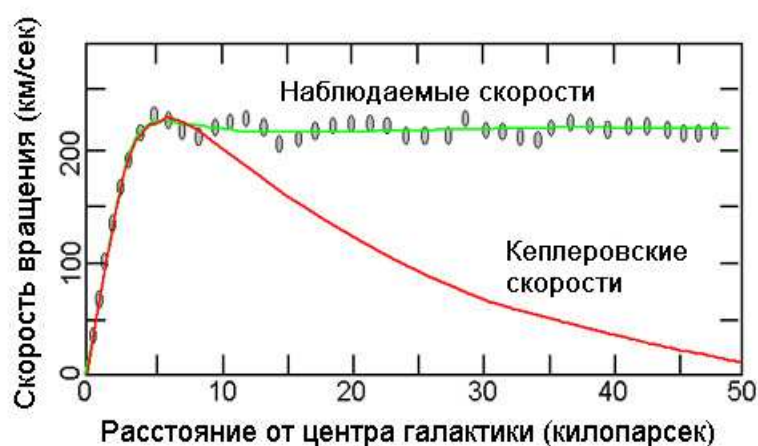


Рис.4. Рассчитанная и измеренная скорость вращения звезд в зависимости от расстояния до центра галактики

Эти результаты можно истолковать только одним способом: плотность вещества в таких галактиках не убывает при движении от центра, а остается почти неизменной. Поскольку плотность видимого вещества быстро падает к периферии галактики, недостающую плотность должно обеспечивать нечто, чего мы по каким то причинам увидеть не можем. Для количественного объяснения наблюдаемых зависимостей скорости вращения от расстояния до центра галактик требуется, чтобы этого невидимого «чего-то» было примерно в 10 раз больше, чем обычного видимого вещества. Это «нечто» получило название «темная материя» и до сих пор остается самой интригующей загадкой в астрофизике.

Еще одно важное свидетельство присутствия темной материи в нашем мире приходит из расчетов, моделирующих процесс формирования галактик, который начался примерно $3 \cdot 10^5$ лет после Большого Взрыва. Эти расчеты показывают, что силы гравитационного притяжения, которые действовали между разлетающимися осколками возникающей при взрыве материи, не могли скомпенсировать кинетической энергии разлета. Вещество просто не должно было собраться в галактики, которые мы тем не менее наблюдаем в современную эпоху. Однако если предположить, что частицы обычного вещества в ранней Вселенной были

перемешаны с частицами невидимой темной материи, то формирование галактик, а затем скоплений из галактик становится возможным. При этом, как показывают вычисления, сначала в галактики скучивалось огромное количество частиц темной материи и только потом, за счет сил тяготения, на них собирались элементы обычного вещества, общая масса которого составляла лишь несколько процентов от полной массы Вселенной. Получается, что знакомый и, казалось бы, изученный до деталей видимый мир, который мы совсем недавно считали почти понятным, – только небольшая добавка к чему-то, из чего в действительности состоит Вселенная.

Что же мы знаем сегодня о темной материи? Почти ничего. Доподлинно известно, что темная материя существует в нескольких формах. После того как в результате многолетних наблюдений в экспериментах было установлено, что у нейтрино масса есть, стало ясно, что от 0,3% до 3% скрытой массы заключается в давно знакомых нам нейтрино – пусть масса их чрезвычайно мала, но количество их во Вселенной примерно 10^9 раз превышает количество нуклонов: в каждом кубическом сантиметре содержится в среднем 300 нейтрино. Небольшая часть 4-5% темной материи – это обычное вещество, которое не испускает или почти не испускает собственного излучения и поэтому невидимо. Существование нескольких классов таких объектов можно считать экспериментально подтвержденным. Сложнейшие эксперименты, основанные все на том же гравитационном линзировании, привели к открытию так называемых массивных компактных объектов расположенных на периферии галактических дисков. Природа массивных компактных объектов ясна не до конца. Скорее всего, это либо коричневые карлики, либо планетоподобные объекты, не связанные со звездами. Еще один представитель барионной темной материи – недавно обнаруженный в галактических скоплениях методами рентгеновской астрономии горячий газ, который не светится в видимом диапазоне.

В качестве главных кандидатов на небарионную темную материю выступают так называемые слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMP). Особенность WIMP состоит в том, что они почти никак не проявляют себя во взаимодействии с обычным веществом. Именно поэтому они и есть самая настоящая невидимая темная материя, и именно поэтому их чрезвычайно сложно обнаружить. Масса WIMP должна быть как минимум в десятки раз больше массы протона. Поиски WIMP ведутся во многих экспериментах в течении последних 20-30 лет, но, несмотря на все усилия, они до сих пор обнаружены не были.

3. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ СВЕРХНОВЫЕ

До недавнего времени космология покоилась на двух фундаментальных наблюдательных открытиях: в 1929г. Хаббл открыл космологическое расширение, а в 1965г. Пензиас и Вилсон обнаружили реликтовое излучение. Новое не менее значительное событие произошло в 1998-99гг., когда две группы астрономов обнаружили, что значение космологической константы Λ отлично от нулевого, т.е. подтвердили существование космического антитяготения. Открытие сделано на

основании изучения вспышек сверхновых звезд.

Явление вспышки сверхновой звезды – один из самых ярких феноменов в астрономии. В максимуме блеска одна сверхновая звезда излучает столько световой энергии, сколько идет от целой галактики, подобной нашей Галактике, или даже больше. Вспышка продолжается от нескольких недель до нескольких месяцев, и за это время сверх новая излучает столько энергии, сколько Солнце способно излучить за всю свою жизнь. Различают сверхновые двух основных типов. Сверхновые первого типа возникают в результате коллапса и взрывного ядерного горения аккрецирующего белого карлика в двойной звездной системе. Сверхновые второго типа – результат коллапса одиночной массивной звезды на конечной стадии ее эволюции. Среди сверхновых первого типа самые яркие – это сверхновые подтипа Ia. Было замечено, что имеется корреляция между скоростью падения блеска при этих вспышках и пиковой собственной светимостью в максимуме блеска. Отсюда возникает возможность оценки этой максимальной светимости в наблюдениях, причем эта максимальная светимость почти строго одинакова при всех таких вспышках, что и делает сверхновые типа Ia удобными для наблюдений стандартными свечами.

Видимая яркость какого-либо источника света характеризуется энергией, поступающей от него в единицу времени на единицу площади. Излучаемая источником энергия распределяется по сфере площадью $4\pi R^2$, где R - расстояние до источника. Далее нужно учитывать еще, что каждый фотон при распространении от источника до приемника краснеет, т.е. уменьшает свою энергию в $(1+z)$ раз, где z - красное смещение, соответствующее расстоянию R . Кроме того, еще и темп прихода фотонов к приемнику убывает в отношении $(1+z)$ из-за увеличения промежутков времени в расширяющемся мире. В результате всего этого имеем следующую зависимость для принимаемого потока энергии на единицу времени в расчете на единицу площади:

$$f = \frac{L}{4\pi R^2 (1+z)^2}, \quad (16)$$

здесь L - собственная светимость источника, т.е. вся испускаемая им энергия за единицу времени, если измерить ее в непосредственной близости к источнику.

Известный закон обратных квадратов получается в пренебрежении величиной красного смещения z по сравнению с единицей, что действительно возможно на малых, не космологических расстояниях. В том же приближении можно воспользоваться законом Хаббла, $V = HR$, чтобы найти связь между красным смещением и расстоянием. Так как красное смещение есть $z = V/c$, то $R = cz/H$, и тогда

$$f \approx \frac{L}{4\pi (cz/H)^2}, \quad z \ll 1. \quad (17)$$

В самом общем случае, когда величина красного смещения не мала, связь между расстоянием и красным смещением имеет более сложный вид. Можно

показать, что если доминирует нерелятивистское вещество, то

$$R = \frac{2c}{H} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}} \right), \quad (18)$$

а в случае доминирования вакуума

$$R = \frac{c}{H} z. \quad (19)$$

Сравнивая оба эти случая, видим, что для одного и того же красного смещения z расстояния больше, когда доминирует вакуум:

$$z > 2 \left(1 - (1+z)^{-1/2} \right). \quad (20)$$

Но тогда во Вселенной, в которой доминирует вакуум, сверхновые звезды должны казаться более тусклыми, чем во Вселенной, где нет вакуума. Вот по этому эффекту дополнительного потускнения космический вакуум и обнаружил себя в астрономических наблюдениях.

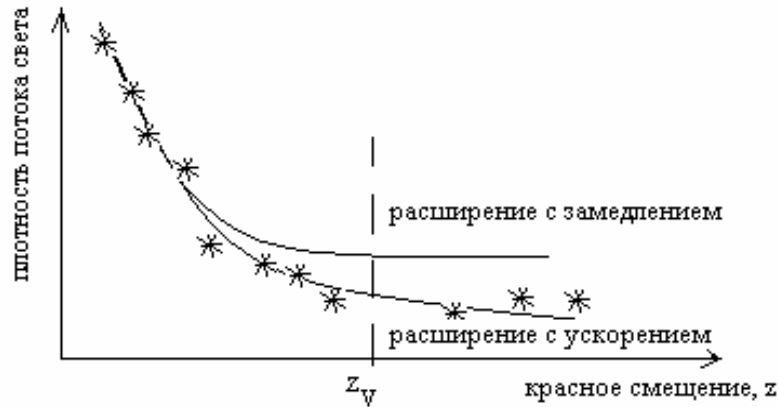


Рис.5. Наблюдательные данные (схематично) зависимости плотности потока света от величины красного смещения

Имеющиеся к настоящему времени данные о десятках сверхновых звезд на космологических расстояниях близко следует теоретическим соотношениям (18)-(20). От не слишком далеких сверхновых, свет от которых идет к нам не более 5-6 млрд. лет, распространение света происходит в условиях преобладания вакуума. Для таких источников красное смещение меньше, чем величина $z_V \approx 0,7$, отвечающая эпохе перехода от преобладания вещества к преобладанию вакуума. В этом случае действует соотношение (19), так что принимаемая плотность потока энергии есть

$$f = \frac{L}{4\pi(1+z)^2} \left(\frac{H}{cz} \right)^2. \quad (21)$$

Свет от более далеких сверх новых, у которых красное смещение больше чем z_V , распространяется сначала в условиях преобладания вещества, и на этом отрезке пути света действует соотношение (18). Затем ему на смену приходит соотношение (19), справедливое для $z < z_V$. В целом картина наблюдательных данных выглядит так, как показано (схематически) на рис. 5.

Чем больше наблюдательных данных появляется на этой диаграмме, тем яснее прорисовывается на ней не только эффект дополнительного потускнения, но и существование двух эпох в истории Вселенной – эпохи вещества и эпохи вакуума.

4. ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Представление о темной энергии возникло в 1998 году и связано с наблюдениями за сверхновыми Ia [8]. Было обнаружено, что самые далекие сверх новые светят не так ярко, как это ожидалось, исходя из того, что Вселенная заполнена материей, гравитирующей по закону Ньютона. Это означало, что они расположены от нас дальше, чем должны были бы находиться, если бы Вселенная расширялась в поле обычных гравитационных сил. Таким образом можно утверждать, что во Вселенной должна быть еще какая-то дополнительная энергия, способная на космологических расстояниях противостоять гравитационному притяжению материи. Она и есть то, что стали понимать под словами темная энергия.

Откуда же все-таки берется эта темная энергия? Вразумительного ответа на этот вопрос пока нет, но обычно его пытаются найти, комбинируя уравнения ОТО с уравнениями состояния вещества. В релятивистской среде плотность энергии и давление связаны соотношением

$$\varepsilon = 3p, \quad (22)$$

а в вакууме

$$\varepsilon + p = 0. \quad (23)$$

Последнее прямо вытекает из того, что по самому своему смыслу вакуум должен быть релятивистски инвариантным, то есть выглядеть одинаково во всех системах координат, а уравнение (23) – единственное, которое удовлетворяет этому требованию. Теперь обратимся к уравнениям ОТО. В них давление само «гравитирует» и знак полного гравитационного взаимодействия определяется знаком суммы $\varepsilon + 3p$. Если он положителен, то имеет место притяжение. А в вакууме $\varepsilon + p = 0$ и все зависит от знака давления. Если $p < 0$, то вакуум принесет антигравитационную составляющую. Будучи равномерно размазанной по всему пространству она с ростом расстояния станет все сильнее подавлять притяжение и в конечном итоге приведет к выталкиванию материи. По существу, именно это соображение положено в основу инфляционной модели, утверждающей, что в очень ранней Вселенной абсолютно доминировала огромная положительная энергия вакуума, который по этой причине стремительно раздувался, а вещество появилось лишь позднее. Формально такой режим можно

смоделировать математически, введя в уравнения ОТО положительную космологическую константу. В этом случае уравнения ОТО включали бы в себя не только гравитационную, но и антигравитационную, что могло бы пролить свет если не на физический смысл, то хотя бы на определенную математическую интерпретацию темной энергии. Однако здесь мы сталкиваемся с проблемой. Дело в том, что величина космологической константы, необходимая для объяснения наблюдаемых размеров Вселенной с помощью инфляционной модели, настолько велика, что сейчас темная энергия должна была бы превышать энергию связанную с обычной материей, примерно в 10^{122} раз. Действительно, мы знаем по Лэмбовскому сдвигу и эффекту Казимира в квантовой электродинамике, что вакуумные флуктуации - это реальный эффект. Если мы рассчитываем значение Λ , оно будет попросту иметь ультрафиолетовую расходимость. Наиболее естественное ультрафиолетовое обрезание в ОТО есть Планковская масса $\approx 10^{19}$ ГэВ, и тогда

$$\Lambda \approx (10^{19} \tilde{A} \hat{A})^4 = 10^{112} (\hat{A})^4. \quad (24)$$

Наблюдаемое значение Λ , однако, всего лишь

$$\Lambda \approx 10^{-10} (\hat{A})^4. \quad (25)$$

Не менее привлекательна и другая точка зрения, связывающая темную энергию с новым сверхслабым и сверхлегким полем - квинтэссенцией. Привлекательность этой точки зрения связана, в частности, с тем, что объяснить ненулевое, но чрезвычайно малое по сравнению с масштабами энергией известных взаимодействий значение энергии вакуума чрезвычайно трудно. Гораздо проще представить себе, что энергия вакуума на какой-то стадии эволюции Вселенной релаксировала практически до нуля. В такой картине вполне естественным является представление о том, что темная энергия это не энергия вакуума, а энергия некоторого нового поля. Нельзя исключить возможность того, что ускоренное расширение Вселенной обусловлено модификацией теории гравитации на сверхбольших расстояниях и космологических временах. Одна из возможностей здесь связана с представлением о дополнительных пространственных измерениях бесконечного размера. Другой, более реалистичной с точки зрения теоретической реализации, возможностью является расширение ОТО до скалярно-тензорной теории гравитации.

ВЫВОДЫ

Открытие темной материи и темной энергии существенным образом сказалось на нашем понимании микро и макро мира. Впервые за все время развития науки появилась стандартная модель, которая удовлетворяет всей совокупности наблюдательных данных. Она прекрасно описывает как эволюцию Вселенной в целом, так и образование ее структуры. Несмотря на влияние темной энергии, генерация структуры все еще происходит в современной Вселенной и будет продолжаться еще несколько миллиардов лет. В то же время признание факта существования темной энергии качественно изменило ситуацию в физике, указав

на совершенно недостаточный уровень наших знаний о микромире. Таким образом, выяснение природы темной материи и темной энергии является центральной проблемой современного естествознания.

Список литературы

1. Linde A. Quantum Theory, Cosmological and Complexity. // Cambridge Univ, Press, 2004.
2. Чернин А.Д. Темная энергия и всемирное антитяготение // УФН -Т. 178. - С. 276-300 - 2008.
3. Рубаков В.А. Иерархии фундаментальных констант (к пунктам 16, 17 и 27 из списка В.Л. Гинзбурга) // УФН - Т. 177. - С. 407-415. - 2007.
4. Барышев Ю.В. Пространственное распределение галактик и тесты релятивистской космологии: Дис. Д-ра ф.-мат. наук спб., 2003
5. Пиблс Ф. Дж. Э. Структура Вселенной в больших масштабах. М., Мир, 1983
6. Тараканов П.А. Фрактальные структуры и неравновесные системы в астрофизике // Физика космоса: Тр. 33-й международной студ. науч. конф., 3-7 февр. 2003г. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2003
7. Sylos Labini F., Montuori M., Pietronero L. Scale-invariance of galaxy distribution // Phys. Rep. 1998, v. 293., p. 61-101.
8. Sylos Labini F., Gabrielli A., Pietronero L. Statistical Physics for Cosmic Structures, Springer – Verlag, 2003

Жовтан О.В., Леяков О.П., Петраш О.М., Рошчупкин С.М. Темний Всесвіт // Учені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. - 2008. - Серія «Фізика». - Т. 21 (60). - № 1. - С. 96-109.

Нещодавні спостереження далеких спалахів зверхнових зірок указують на присутність у Всесвіті космічного вакууму, щільність енергії якого перевищує щільність всіх інших форм космічної енергії разом узятих. Вакуум створює поле антигравітації, що викликає прискорене космологічне розширення. Це прискорення і було виявлено в спостереженнях. Відкриття космічного вакууму спричиняє корінний перегляд устояних представлень про сучасний стан Всесвіту.

Ключові слова: темна матерія, космологія

Zhovtan A.V., Lelyakov A.P., Petrash A.N., Roshchupkin S.N. The Dark Universe// Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. – 2008. – Series «Fizika». – V. 21 (60). - № 1. – P. 96-109.

Recent observational studies of distant supernovae have suggested the existence of cosmic vacuum whose energy density exceeds the total density of all the other energy components in the Universe. The vacuum produces the field of anti-gravity that cause the cosmological expansion to accelerate. It is this accelerated expansion that has been discovered in the observations. The discovery of cosmic vacuum changes radically our current understanding of the present state of the Universe.

Keywords: The dark matter, dark energy, cosmology.

Поступила в редакцію 15.09.2008 г.