Министерство образования Республики Беларусь

### Учреждение образования

«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»

Физический факультет

Кафедра теоретической физики и астрономии

**ВСЕЛЕННАЯ**

Курсовая работа по теоретической физике и астрономии

Специальность: Физика и информатика

Брест 2010

# СОДЕРЖАНИЕ:

Введение

1. Разбегание галактик

1.1 Симметрии Вселенной

1.2 Предположение Эйнштейна

1.3 Теория Фридмана

1.4 Динамика расширения

1.5 Закон Хаббла

1.6 Горячее начало

1.7 Реликтовое излучение

2. Всемирное антитяготение

2.1 Гипотеза Эйнштейна

2.2 Ускоренное расширение

# ВВЕДЕНИЕ

Черные дыры и космология — две новые и, несомненно, самые удивительные области исследований, которые породила эйнштейновская общая теория относительности.

Вселенная, рассматриваемая как единое целое, — физическая система со своими особыми свойствами, которые не сводятся к сумме свойств населяющих ее астрономических тел. Эти свойства проявляются в явлениях самых больших пространственно-временных масштабов. Главное из этих свойств - всеобщее разбегание галактик.

Вселенная — самый крупный по масштабу объект науки. Он существует в единственном экземпляре. Из этих обстоятельств следует ряд особенностей космологии как науки. Действительно, Вселенную можно только наблюдать, экспериментировать с нею невозможно. Никаких других вселенных нам не дано, и сравнивать нашу Вселенную не с чем. Этим космология отличается, например, от физики элементарных частиц, которая изучает объекты, имеющиеся в природе в большом количестве и допускающие разнообразное экспериментирование.

Еще одной особенностью науки о Вселенной является близкое родство с философскими идеями и исканиями, с попытками осмыслить место человека в мире.

И, тем не менее, космология — это все же настоящая естественнонаучная дисциплина, в которой главное — конкретные факты, а любые теоретические выводы могут считаться правильными только тогда, когда они проверены и подтверждены прямыми астрономическими наблюдениями.

Основу современной космологии составляет теория, созданная Александром Александровичем Фридманом в 1922-24 гг. Эта теория полностью подтверждена всей совокупностью имеющихся сейчас наблюдательных данных о Вселенной как целом. Ее глубина, богатство физического содержания раскрываются все полнее с каждым новым наблюдательным открытием в космологии.

Главное у Фридмана — теория космологического расширения. Фридман смог предсказать этот грандиозный космический феномен и дать ему полное математическое описание.

В последние годы явление космологического расширения часто называют Большим Взрывом. В ходу также и менее общее понимание этого термина: под ним иногда подразумевают самые первые, начальные стадии космологического расширения. А иной раз — и сам физический механизм (до сих пор не разгаданный), благодаря которому это расширение началось.

Современная космология берет начало в первые десятилетия XX века. Это была особая эпоха в истории науки. Тогда были созданы теория относительности и квантовая механика, составляющие фундамент всей физики.

За истекшие с тех пор десятилетия космология прошла путь от первых теоретических поисков, которые почти всем казались поначалу совершенно абстрактными и произвольными, если не фантастическими, к грандиозным наблюдательным открытиям, к формированию новой богатой содержанием и хорошо обоснованной картины мира.

История космологии складывается, если говорить совсем кратко, из трех крупнейших событий. Это открытия, которые и определили лицо науки о Вселенной к началу XXI века.

Первое из трех важнейших открытий сделано Эдвином Хабблом в 1929г. он обнаружил разбегание галактик, которое теперь понимают как всеобщее расширение Вселенной. Второе событие — регистрация реликтового излучения, равномерно заполняющего все пространство мира. Это открытие было сделано в 1965 г. Арио Пензиасом и Робертом Вилсоном (Нобелевская премия 1976 г). Наконец, третье и самое свежее событие – открытие космического вакуума двумя группами астрономов в 1998-99 гг.

Замечательно, что все три крупнейшие наблюдательные открытия были заранее предсказаны теоретиками. Расширение Вселенной было предсказано Фридманом в 1922 г. Реликтовое излучение тоже было предсказано — по заслугам Георгия Антоновича Гамова (1940-50-е годы). Существование же космического вакуума предвидел Эйнштейн (1917 г.).

# 1 **РАЗБЕГАНИЕ ГАЛАКТИК**

## **1.1 Симметрии Вселенной**

Давняя, уходящая к истокам классической науки традиция приписывала Вселенной в целом не только однородность, но также вечность и неизменность, как важнейшие, неотъемлемые ее свойства. Это был необычайно прочный элемент общего миропонимания, выработанного мыслителями многих поколений. Такой взгляд на мир питался идеями несотворимости Вселенной. Веками считалось, что научный подход требует признания ее тождественности себе самой во все времена.

Но откуда объективно могло быть известно, что космос статичен? Какие факты реального мира указывали на это?

На эту мысль наводило, несомненно, созерцание звездного неба, по видимости, вечного и неизменного. Это впечатление, как мы сейчас понимаем, обманчиво, оно лишь вводит в заблуждение, если распространять его на общее устройство Вселенной. Астрономам давно уже было известно, что очертания созвездий постепенно меняются со временем. Но чтобы эти изменения стали заметны и очевидны, требуются века и тысячелетия. По сути, представление о неизменности мира было гипотезой, как и представление о его пространственной однородности. Скорее, это было следствием глубокой убежденности в максимальном совершенстве и простоте устройства космоса, его идеальной симметрии.

Действительно, однородность пространства означает равноправность и одинаковость всех мест в мире, или всех его точек, если говорить математически. Это симметрия относительно перемещений, или сдвигов в пространстве от одной точки к любой другой: мир везде один и тот же, куда ни взгляни.

А неизменность мира во времени означает равноправность и одинаковость всех эпох, всех моментов в истории мира. Это симметрия относительно сдвигов по времени от одного момента к любому другому: мир всегда один и тот же, когда на него ни посмотри.

Как мы уже говорили, однородность мира — то теперь уже надежно установленный астрономический факт. Распределение галактик, скоплений и сверхскоплений в пространстве Вселенной равномерно в среднем по большим масштабам (300 миллионов световых лет и больше).

Что же касается симметрии во времени, она не подтвердилась в наблюдениях мира галактик. Напротив, наблюдения Хаббла показали, что распределение галактик в пространстве отнюдь не статично, галактики находятся в состоянии движения, они удаляются друг от друга.

## 1.2 **Предположение Эйнштейна**

О разбегании галактик стало известно к концу 20-х годов XX века. Но первая космологическая теория Эйнштейна была создана за десять лет до этого, и ее автор твердо держался вековой космологической традиции, традиции неизменности Вселенной. Ссылаясь на доступные тогда астрономические сведения, Эйнштейн в действительности ни на минуту не сомневался в своей априорной установке. Данные же, о которых он упоминал в работе 1917 г, на деле не имели прямого отношения к космологической проблеме.

И все же теоретик остро ощущал необходимость реальных астрономических фактов, на которые он мог бы опереться. «Самое важное из всего, что нам известно из опыта о распределении материи, заключается в том, что скорости звезд очень малы по сравнению со скоростью света», — пишет Эйнштейн, и на первых нескольких страницах своей статьи он еще пять раз упоминает об одном и том же — о равномерности пространственного распределения «неподвижных звезд», о малости скоростей звезд по сравнению со скоростью света, о «незначительности скоростей звезд» и т.д. Но дело, как впоследствии выяснилось, вовсе не в звездах.

Работа Эйнштейна 1917 года была первой попыткой применить общую теорию относительности к космологии. Но эту теорию нужно было сначала создать. Как Ньютон изобрел механику вместе с теорией тяготения для описания динамики Солнечной системы, так Эйнштейн изобрел общую теорию относительности для описания всей Вселенной (и не только для этого). Теория Эйнштейна — прямое продолжение, развитие и обобщение теории Ньютона. В общей теории относительности ньютоновская механика и теория тяготения содержатся в качестве частного или предельного случая — это случай малых скоростей движения и слабых полей тяготения. В общем случае в теории Эйнштейна таких ограничений нет и именно поэтому она пригодна для описания всего мира как целого.

К немалому удивлению ее автора, общая теория относительности воспротивилась попытке вывести из нее вечность и неизменность мира. Теория не позволяла Вселенной быть статической. Все, о чем мы читаем в замечательной статье Эйнштейна, говорит о том, что он был немало удивлен и озадачен этим обстоятельством. Ситуация, однако, требовала решения. Возникала альтернатива: либо изменить взгляды и исходную установку, либо что-то радикально изменить в структуре новорожденной теории.

Эйнштейн избрал второй путь.

В только что (1915 г.) созданную общую теорию относительности ее автор внес нечто совершенно новое – космологическую константу Λ. Так в уравнениях теории появилась новая постоянная величина, о которой до того ничего не было известно ни в фундаментальной физике, ни тем более в астрономии.

Стоит заметить, что в исходном своем виде уравнения содержали только одну константу — эйнштейновскую гравитационную постоянную, κ = 8πG/c4 ,которая гтредставляет собой комбинацию постоянной тяготения Ньютона G и «скорости света в вакууме» с.

Здесь сразу же нужно сказать, что понимается в физике под словом вакуум, когда говорят о «скорости света в вакууме».

В этом случае вакуум это пустота в полном изначальном смысле этого слова. Точнее, это пустота как ее трактует специальная теория относительности. Это не только отсутствие какой-либо среды или частиц, но еще и отсутствие сильных полей тяготения. В лишенном частиц и полей пространстве свет распространяется с постоянной скоростью и эта скорость есть универсальная постоянная с = 3·1010 см/сек.

Но вакуум Эйнштейна, о котором мы будем далее подробно говорить, — совсем не пустота, у него есть энергия, у него даже есть давление. Свет распространяется в таком не пустом вакууме совсем не обязательно со скоростью с.

Возвращаясь к работе Эйнштейна, подчеркнем весьма высокий, с теоретической точки зрения, статус космологической постоянной Λ — она появляется в модифицированной теории наравне с постоянной κ. Других постоянных в уравнениях общей теории относительности нет. И эти две константы выступают как универсальные фундаментальные постоянные природы.

Дополненные космологической постоянной, уравнения обшей теории относительности (или уравнения гравитационного поля, как их называет Эйнштейн) уже допускают статическое устройство Вселенной. Теперь возможность неизменного мира может быть теоретически доказана.

Мир Эйнштейна, данный в его первой космологической работе, — это вечная Вселенная в покое и без развития. Ее трехмерное пространство неэвклидово и подобно сфере. Такое трехмерное пространство называется гиперсферой. Эйнштейн считая, что это пространство должно иметь конечный объем и быть замкнутым в себе.

Двумерный аналог такого замкнутого, но безграничного пространства — сферическая поверхность, рассматриваемая целиком: ее площадь конечна, а сама она не имеет двумерных границ. Сфере и гиперсфере приписывается положительная кривизна.

В пространстве эйнштейновской Вселенной, как и на сфере, все точки равноправны и ни одна из них не является ни центральной, ни граничной. Такая Вселенная идеально симметрична во времени и пространстве.

Это была первая космологическая модель в новейшей науке о Вселенной. Первая, но далеко еще не окончательная.

Было найдено точное решение уравнений обшей теории относительности для космологической проблемы. Решение определенно доказывало возможность статического мира.

Открытие космологического расширения в наблюдениях Хаббла (1929 г.) принесло Эйнштейну, судя по всему, немалое разочарование. Оказалось, что дорогая ему идея статичности мира неверна. Статичность в мире звезд иллюзорна. А в мире галактик никакой статичности нет — галактики удаляются друг от друга и притом с немалыми скоростями. Модель вечной Вселенной приходится при таких обстоятельствах оставить.

Но опровергнуть или доказать существование космологической постоянной можно было только опытным путем.

И эксперимент, астрономические наблюдения вынесли окончательное решение в пользу Эйнштейна, в пользу гипотезы космологической постоянной.

Более того, не только космологическая константа, но сама исходная идея статической Вселенной неожиданно обрела в наши дни новый вид и новую жизнь и притом благодаря тем же астрономическим наблюдениям. Но поразительней всего, пожалуй, то, что традиционная идея статичности мира находится в замечательном согласии с феноменом космологического расширения.

## 1.3 **Теория Фридмана**

О космологическом расширении первым сказал Фридман. В 1922 г., через пять лет после первой космологической работы Эйнштейна и за семь лет до открытия Хаббла, Фридман обратятся к модифицированным уравнениям общей теории относительности и доказал, что они богаче, чем об этом можно было судить по космологической модели Эйнштейна. Они допускают не только статический мир, но и мир, способный расширяться как целое или сжиматься.

Фридман предложил два типа Вселенной: 1) стационарный тип - кривизна пространства не меняется с течением времени и 2) переменный тип — кривизна пространства меняется с течением времени. Иллюстрацией первого типа Вселенной может служить шар, радиус которого не меняется с течением времени; двумерная поверхность этого шара будет как раз двумерным пространством постоянной кривизны. Наоборот, второй тип Вселенной может быть изображен меняющимся все время шаром, то раздувающимся, то уменьшающимся, то есть уменьшающим свой радиус и как бы сжимающимся.

Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев. Для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира... постоянно возрастает с течением времени. Возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто), затем снова из точки доводит радиус свой до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т.д.

Во второй работе Фридман делает следующий шаг в развитии своей теории — он вводит в космологию новое трехмерное искривленное пространство, которое имеет иную, чем гиперсфера, геометрию — геометрию Лобачевского. Кривизне такого пространства принято приписывать знак «минус». Двумерным аналогом для него является гиперболоид или седловидная поверхность.

Спустя 8 лет, в 1932 г., Эйнштейн и де Ситтер, развивая фридмановскую космологию, дополнили ее рассмотрением расширяющегося мира с плоским, эвклидовым трехмерным пространством. Этими тремя вариантами и исчерпывается полный набор теоретических возможностей для пространственно-однородного мира.

Общая теория относительности допускает как статический мир, так и мир эволюционирующий, и во втором случае имеется три варианта пространственной геометрии, включая вариант плоского пространства.

Вот что об этом можно сказать сейчас. Статическая модель Эйнштейна не проходит в ее буквальном виде — мир галактик не статичен. Наблюдательные данные остаются на этот счет в значительной степени неопределенными.

Можно лишь ориентировочно полагать исходя из всей совокупности современных данных о плотности всех видов вещества во Вселенной, наблюдаемых движениях галактик, возрасте наиболее старых звезд и атомных ядер, что, скорее всего, пространство мира либо строго плоское как у Эйнштейна и де Ситтера, либо близкое к плоскому.

Во всех трех случаях пространственной геометрии космологическое расширение мира начинается с состояния, когда, по словам Фридмана, «пространство было точкой». Это означает, что начальная плотность вещества была неограниченно большой, бесконечной в начальный момент. Столь необычное, исключительное состояние мира называют космологической сингулярностью. Как далеко от нас в прошлом лежал этот момент сингулярности, момент начала расширения? Фридман предупреждает, что ввиду неопределенности конкретных знаний о Вселенной любые цифры могут иметь лишь ориентировочный, иллюстративный характер.

В расширяющемся мире существует простое приближенное соотношение между плотностью вещества в мире ρ и временем t, протекшим с начала космологического расширения:

Gρt2 ~ 1

Здесь G — ньютоновская постоянная тяготения.

Легко проверить, что стоящее в этом уравнении выражение, Включающее три величины, является единственно возможной комбинацией, которая могла бы равняться единице. Это вытекает просто из соображений размерности: только эта их комбинация является безразмерной, то есть одинаковой при любом выборе единиц измерения.

Чтобы получить оценку возраста мира, Фридман взял это соотношение и воспользовался еще астрономическими данными о плотности вещества в нашей Галактике. При этом он считал (вполне справедливо), что средняя плотность Галактики — это лишь верхний предел для средней плотности Вселенной, и реальная плотность вещества в мире должна быть заметно меньше той, что известна для Галактики.

Если взять в качестве ρ среднюю плотность звездного вещества Галактики, ~ 10-24 г/см3 , то из этого соотношения получиться t ~ 3·1015сек. Но Фридман взял для плотности мира величину в десять тысяч раз меньшую, и тогда это соотношение дает десять миллиардов лет.

В теории Фридмана с конечным возрастом мира связано одно важное следствие. За конечное время свет проходит конечное расстояние. Но это означает, что существует принципиальный предел дальности наблюдений: нельзя увидеть того, что лежит дальше расстояния, которое свет способен пройти за десять миллиардов лет жизни Вселенной. По порядку величины, это предельное расстояние составляет десять миллиардов световых лет. Все, что дальше, что за этим горизонтом, принципиально не наблюдаемо.

Дальность действия современных телескопов имеет тот же порядок величины. Самые далекие доступные наблюдению объекты (гигантские галактики и квазары) лежат на расстояниях как раз около десяти миллиардов лет, почти что у самого горизонта мира. Так что практически весь мир, принципиально доступный наблюдениям, реально и наблюдается — почти вплоть до его горизонта. Наблюдаемую часть мира иногда называют Метагалактикой («мета» значит «после», «за»).

## 1.4 **Динамика расширения**

Следуя разъяснениям Фридмана, представим себе шар конечных размеров, и пусть плотность вещества в нем будет однородной. Такой шар служит у Фридмана для иллюстрации динамики космологического расширения. И забудем временно об эйнштейновской космологической постоянной.

Допустим, что вещество шара — это газ каких-то частиц, все равно каких. Но требуется, чтобы давление этого газа было пренебрежимо мало. В пренебрежении давлением единственной силой, действующей на частицы газа, будет их взаимное притяжение. Притяжение стремится сблизить частицы, и это соответствовало бы сжатию шара. Но представим себе, что шар расширяется. Это возможно, если в какой-то начальный момент времени всем частицам шара приданы скорости, направленные от центра шара наружу.

Проследим, например, за движением какой-либо частицы на поверхности шара. Из-за приданной ей начальной скорости эта частица будет удаляться от центра шара. Но сила притяжения, создаваемая всеми остальными частицами, направлена против этого движения, она стремится это движение остановить и обратить расширение в сжатие. Значит, движение рассматриваемой частицы будет замедляться, скорость ее удаления от центра будет со временем убывать. То есть, тяготение частиц шара тормозит его расширение.

Судьба расширения определяется, таким образом, противоборством тяготения и начального разгона частиц. Если тяготение велико, то оно остановит расширение шара и заставит шар сжиматься. Если же скорости так велики, что тяготению не удастся с ними справиться, расширение шара никогда не остановится и будет происходить вечно. Именно такие две динамические возможности и существуют в теории Фридмана применительно к расширению Вселенной.

Хотя мы рассуждали об этом на примере шара конечных размеров и к тому же руководствовались ньютоновскими представлениями о тяготении, соображения эти находятся в полном качественном согласии с теорией расширения, вытекающей из эйнштейновской общей теории относительности. Конечно, это не случайное совпадение. Так и должно быть, поскольку между обеими теориями существует глубокая и естественная связь: ньютоновская динамика — это частный случай эйнштейновской обшей теории относительности.

Простая связь между плотностью и временем Gρt2 ~ 1, о которой уже говорилось выше, относится к случаю плоского трехмерного пространства. Это самый простой вариант не только по геометрии, но и по динамике.

В этом случае легко найти зависимость расстояний в мире от возраста Вселенной. Действительно, плотность — это масса, приходящаяся на единицу объема. Объем шара радиуса R есть 4πR3/3. Так как масса шара не меняется со временем, зависимость плотности от радиуса: ρ ~ 1/R3. Тогда приведенное выше соотношение между плотностью и временем дает: R ~ t2/3.

Этот закон роста нужно сравнить с воображаемым случаем ннерциального разлета, когда никакой гравитации вообще нет, й скорости движения тел не меняются со временем. Инерциальный разлет — это случай, когда при постоянных скоростях расстояния возрастают просто пропорционально времени: R~ t. Как мы видим, в реальном случае, когда тяготение существенно, расширение происходит медленнее, чем по инерции. Это и означает, что оно замедляется со временем.

Замечательно, что при малых временах, считая от начала расширения, этот закон монотонного расширения справедлив не только в плоском, но и в искривленном пространстве.

А практически этот закон приближенно — и с весьма приличной точностью — верен все первые шесть-восемь, а то и девять миллиардов лет жизни Вселенной.

Фридман выяснил, что в простейшем случае, когда космологическая постоянная равна нулю, динамика и геометрия мира связаны друг с другом. Оказывается, что неограниченное расширение возможно в случае трехмерного пространства нулевой (как у Эвклида) и отрицательной (как у Лобачевского) кривизны. А обращение расширения сжатием имеет место в пространстве положительной кривизны, в гиперсфере. Если же космологическая постоянная отлична от нуля, то возникает возможность неограниченного расширения для всех трех вариантов геометрии.

Теория Фридмана предполагает, что Вселенная однородна по распределению вещества в ней, и это действительно так. Крупномасштабное распределение галактик однородно в масштабах 300 миллионов световых лет и более. В этих космологических масштабах — от размера ячейки однородности и далее к самым большим расстояниям — и применима теория Фридмана.

Она описывает Вселенную как целое, и свойства Вселенной как целого проявляются лишь в самых крупных, но вполне доступных наблюдениям, масштабах.

Свойства пространства и времени определяются распределением и движением вещества, заполняющего пространство. Из этой базовой идеи общей теории относительности вытекает, что пространство, в котором вещество расширяется, и само должно расширяться. Найденный Фридманом закон расширения вещества — это также и закон расширения самого пространства мира. Космологическое расширение определяется и управляется веществом через посредство собственного тяготения вещества. Иногда не вполне точно говорят, что все без исключения расстояния в мире увеличиваются из-за космологического расширения. Это не так. Ничто на Земле не меняет своих размеров, и она сама не расширяется по «космологической причине». Не меняют из-за этого своих размеров ни планеты, ни звезды, ни галактики. На небольших расстояниях галактики могут и сближаться друг с другом. Например, ближайшая соседка нашей Галактики, сравнимая с ней по размерам и массе, — галактика Андромеды, не удаляется от нас, а приближается. Расстояние до центра этой галактики от центра нашей Галактики составляет два миллиона световых лет, и сближаются эти галактики со скоростью сто километров в секунду. Через пять-шесть миллиардов лет им предстоит столкнуться друг с другом.

В теории Фридмана космологическое расширение происходит изотропно, то есть одинаково по всем направлениям. Изотропия — это тоже свойство симметрии. Независимость от направлений или от углов означает симметрию относительно вращений в пространстве. Этим свойством космологическое расширение обладает в тех же самых крупных масштабах, где оно, собственно, и происходит.

## 1.5 **Закон Хаббла**

Из фридмановской теории вытекает, что космологическое расширение должно происходить по линейному закону: в каждый данный момент истории мира скорость удаления объекта, находящегося на расстоянии R от нас, прямо пропорциональна этому расстоянию: V = HR, где Н — постоянный коэффициент, который не зависит ни от расстояния до объекта, ни от направления на него на небе. Линейный закон скорости есть прямое следствие однородности и изотропии в мире галактик. Расширение с таким законом скорости увидит любой наблюдатель, где бы во Вселенной он ни находился и в каком бы направлении он ни смотрел. Линейный закон космологического расширения был открыт Хабблом в его наблюдениях 1927-1929 гг. Сам этот закон и постоянная Н по справедливости носят с тех пор его имя.

Хаббл уже знал — из своих собственных исследований, — что Вселенная — это мир галактик. В его распоряжении был телескоп Обсерватории Маунт Вилсон, крупнейший в мире по тем временам; его зеркало имело диаметр 2,5 метра. Направив его на Туманность Андромеды, Хаббл смог разглядеть в ней отдельные звезды. И притом звезды определенного типа — переменные звезды, называемые цефеидами. Эти звезды изменяют свой блеск регулярным образом, почти строго периодически. Они замечательны тем, что период изменения их блеска определенным образом связан со светимостью. Это обстоятельство было установлено сначала по близким цефеидам нашей Галактики.

Собственная светимость — это энергия, излучаемая звездой во все стороны в единицу времени. А блеск (в астрономии) измеряется энергией, приходящей на единицу поверхности Земли в единицу времени. С помощью «стандартного» соотношения между периодом изменения блеска и светимостью можно определить светимость звезды по легко измеряемому периоду изменения ее блеска. Но по закону обратных квадратов блеск пропорционален светимости и обратно пропорционален квадрату расстояния до звезды. Так что, зная и блеск, и светимость, можно определить расстояние.

Таким путем, с помощью наблюдения цефеид Андромеды, Хаббл обнаружил, что эта «туманность» находиться вне нашей Галактики и довольно далеко от нее. Это не облако газа, а тоже огромная и совсем отдельная галактика.

Затем, используя ярчайшие звезды, Хаббл смог определить расстояния до двух десятков других «туманностей», которые ранее наблюдал Слайфер. Оказалось, что они тоже представляют собой галактики, хотя и не всегда такие крупные, как наша Галактика и Андромеда. Он воспользовался данными Слайфера и Хьюмасона о скоростях движения этих галактик и на основе этих данных и собственных оценок расстояний построил диаграмму зависимости скорости V от расстояния R.

Регулярное же разбегание галактик по икону Хаббла обнаруживается, начиная с расстояний, которые приблизительно в два-три раза больше, чем расстояние до Андромеды (около двух миллионом световых лет).

Измерения скоростей и закон Хаббла основаны на измерениях красного смешения в спектрах галактик. Переход от спектров к скоростям предполагает объяснение красного смешения эффектом Доплера. Суть его в том, что длина волны регистрируемого излучения изменяется при относительном движении источника и приемника. В частности, длина волны растет (а свет «краснеет»), когда расстояние между источником и приемником возрастает со временем.

## 1.6 **Горячее начало**

Какой же была Вселенная 10-15 млрд. лет назад, в начале своей эволюции? Что было в самой «точке», о которой говорит Фридман, как о начальном состоянии мира? Ничего достоверного на этот счет пока неизвестно. И трудности в изучении этого состояния практически непреодолимы: в сингулярности или около нее Вселенной управляла совсем другая физика, отнюдь не сводящаяся к тому, что мы сейчас знаем о ее законах. Но если отступить от этого первого момента хотя бы на минуте состояние Вселенной и дальнейший ход ее эволюции допускают уже полное и детальное исследован не на основе твердо установленных физических законов.

О первых минутах космологического расширения сейчас известно действительно немало. Прежде всего, надежно установлено, что вещество Вселенной было тогда очень горячим. При возрасте мира в 200 секунд температура вещества составляла миллиард градусов, по порядку величины. Никаких планет, звезд, галактик при такой температуре не могло существовать. Не было атомов — вещество было полностью ионизованным, электроны были оторваны от ядер атомов быстрыми хаотическими тепловыми движениями. Более того, при этой температуре не могли существовать даже сложные ядра.

Только самые простые ядра, ядра атома водорода — протоны — имелись в горячей космической смеси. Вместе с протонами в этой среде находились электроны и притом ровно в том же количестве, что и протоны, так что среда была электрически нейтральной. В ней были также нейтроны и нейтрино. Эта среда содержала также фотоны — кванты электромагнитного излучения. Они представляли собой газ, находившийся в термодинамическом равновесии с веществом и имевший ту же температуру.

Такая картина ранней Вселенной была в 1940-50 годы описана Г. А. Гамовым, тогда профессором Университета Джорджа Вашингтона, а некогда студентом профессора Фридмана в Ленинградском университете. Гамов писал, что идею горячего начального состояния мира он заимствовал у своего учителя. Применительно к этой теории горячего начала мира и возник первоначально термин «Большой Взрыв». По Гамову, вначале был вселенский взрыв, который произошел одновременно и повсюду в мире, заполнив пространство горячим излучением и веществом, из которого через миллиарды лет образовались все астрономические тела и все, что на них..

Исходным мотивом этих исследований было стремление объяснить происхождение химических элементов, их относительную распространенность во Вселенной. Известно, что Солнце состоит в основном из водорода и гелия в пропорции приблизительно 3:1 по массе. Все другие, более тяжелые элементы присутствуют в виде примеси, на которую приходится около двух процентов по массе. Тот же состав имеет подавляющее большинство других звезд и межзвездный газ, заполняющий пространство между ними.

Было предположено, что все элементы были «сварены» сразу во всей Вселенной на первых этапах космологического расширения. Универсальность химического состава при этом автоматически обеспечивается. Что же касается физических условий, то в ранней Вселенной ее вещество несомненно было плотным, как в недрах звезд, а то и еще плотнее. Высокая плотность среды — непременное условие эффективного протекания ядерных реакций синтеза элементов. Для этих реакций необходима также и высокая температура. Потому-то Гамов и выдвигает предположение о том, что вещество ранней Вселенной было не только плотным, но и очень горячим.

Ранняя Вселенная была, по идее Гамова, тем естественным ядерным реактором, в котором при известной (довольно умеренной) плотности и гигантской температуре произошел синтез всех химических элементов природы.

Теория совершенствовалась со временем благодаря консультациям и критическим замечаниям, которые высказывали по ходу дела в ее адрес Э. Ферми, С. Хаяши, Ф. Хойл, У. Фаулер, М. Бербидж, Дж. Бербидж. В дальнейшем процесс космологического нуклеосинтеза заново изучали в более строгой постановке, ставшей возможной благодаря уточнению данных ядерной физики, Зельдович и его сотрудник Якубов в 1964-1965 гг. Вместе с тем шло уточнение наблюдательных астрономических данных о химическом составе вещества Вселенной.

В итоге большой многолетней коллективной работы специалистов разных стран, инициированной Гамовым, стало очевидным, что космическая распространенность двух главных элементов — водорода и гелия — действительно может быть объяснена ядерными реакциями в горячем веществе ранней Вселенной.

Процесс образования гелия из протонов и нейтронов протекает так. При температуре в миллиард градусов Кельвина протон и нейтрон могут, столкнувшись при своих быстрых тепловых движениях, слиться и образовать ядро дейтерия. Это уже составное ядро, но все же еще ядро водорода, ядро тяжелого водорода.

Следующее звено в цепочке ядерных превращений таково. Два только что образовавшихся ядра дейтерия сталкиваются друг с другом и образуют ядро трития, выбрасывая при этом один свободный протон. Тритий — это тоже водород, но самый тяжелый, в его ядре три частицы: один протон и два нейтрона. После этого ядро трития может столкнуться с другим ядром дейтерия. Слияние их ведет к образованию нового химического элемента — гелия. В ядре гелия, возникающем таким путем, содержится два протона и два нейтрона; это гелий-4, самый распространенный в природе изотоп гелия.

В той же реакции освобождается один нейтрон из тех трех, что были в исходных ядрах трития и дейтерия.

На этом цепочка ядерных превращений не обрывается. Входе столкновений и слияний частиц и легких ядер образуется гелий-3, легкий изотоп гелия. Но этих ядер образуется много меньше, чем ядер гелия-4. Образуются и ядра лития, третьего элемента таблицы Менделеева, но их возникает и еще меньше, чем ядер гелия-3.

Процесс ядерных превращений останавливается из-за падения температуры среды в ходе космологического расширения. При более низких температурах столкновения частиц уже не приводят к их слияниям, и дальше самых легких ядер процесс синтеза элементов в горячей ранней Вселенной не заходит. Основной продукт этого процесса — гелий-4, на который с тех пор приходится около четверти массы звезд и межзвездного газа.

Что же касается всех более тяжелых элементов — кислорода, углерода, кремния и т. д. — они должны, по-видимому, синтезироваться иным, не космологическим путем, например, при вспышках сверхновых звезд.

## 1.7 **Реликтовое излучение**

Но имеется и еще один «продукт» ранней горячей Вселенной — это газ фотонов, квантов электромагнитного излучения. При температурах в миллиард градусов газ фотонов имелся во Вселенной вместе с горячим веществом — этого требуют законы термодинамики. Средняя энергия одного фотона при таких обстоятельствах близка к средней энергии теплового движения других частиц, образующих горячую космическую плазму. Число же фотонов много больше числа протонов — приблизительно в десять миллиардов раз.

Но это означает, что полная энергия фотонов во столько же раз больше полной тепловой энергии частиц плазмы. Даже если учесть не только тепловую энергию плазмы, но и энергию покоя ее частиц, все равно фотоны будут доминировать по энергии над плазмой.

Фотоны и космическая плазма охлаждались в ходе общего космологического расширения. При этом преобладание фотонов над протонами и нейтронами по энергии продолжало существовать в первые сто тысяч лет жизни Вселенной. После этого доминировали по энергии уже частицы. Но фотоны никуда не исчезли. Охлаждаясь и дальше, они продолжали существовать во Вселенной.

Те самые фотоны, которые имелись в эпоху ядерных реакций в ранней Вселенной, сохранились и до наших дней. Такое предсказание явным образом вытекало из теории Гамова. Ему удалось даже примерно указать, какой должна быть температура излучения в современную эпоху. По расчетам Гамова и его учеников и сотрудников Ральфа Альфера и Роберта Хермана получалось, что в нашу эпоху температура фотонов должна быть весьма близкой к абсолютному нулю, всего в пределах от 1 до 10 градусов Кельвина. Эти холодные фотоны должны равномерно заполнять все пространство и создавать тем самым общий космический фон электромагнитного излучения.

В 1965 г. фотоны, образующие космическое фоновое излучение, были обнаружены радиоастрономами А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Температура излучения оказалась близкой к трем градусам Кельвина. Так теория горячей Вселенной получила прямое наблюдательное подтверждение. А измеренные три градуса очень хорошо согласуются с теоретическим предсказанием — температура попадает точно в расчетный интервал.

Между прочим, в одной из своих многочисленных научно-популярных статей Гамов написал (в 1950 г.), что температура фонового излучения должна быть около трех градусов — это середина (логарифмическая) расчетного интервала температур. Гамов угадал — так и оказалось.

Удивительный космический феномен — остаточное излучение ранней горячей Вселенной — получил, по предложению Шкловского, название реликтового излучения. В англоязычной литературе чаще говорят «космическое микроволновое фоновое излучение».

Открытие реликтового излучения было подтверждением не только обшей концепции эволюции мира, созданной Фридманом. Динамика и геометрия мира, описываемые теорией Фридмана, вместе с термодинамикой и ядерной физикой космической среды, разработанными Гамовым, составляют главное содержание современной науки о Вселенной.

Изучение реликтового излучения показало, что оно заполняет пространство равномерно, и эта равномерность почти идеальна. Из-за своей почти идеально однородной плотности, реликтовое излучение приходит к нам равномерно из всех направлений, т. е. оно изотропно. Степень изотропии исключительно высока: относительные отклонения от нее не превышают сотых долей процента. Это рекордно высокая точность для космологии. Ее стоит сравнить с точностью, с которой измерена равномерность распределения галактик, однородность плотности светящегося вещества Вселенной; точность по галактикам составляет примерно тридцать процентов.

Так что однородность и изотропия реликтового излучения — это самое весомое наблюдательное подтверждение высокой пространственной симметрии модели Фридмана.

Вскоре после, его открытия, а особенно в самые последние годы, реликтовое излучение превратилось, можно сказать, из объекта исследования в инструмент исследования мира. Из наблюдений этого излучения удалось определить движение Земли относительно этого фона. Это стало возможно опять-таки благодаря эффекту Доплера. Если радиоантенна, или радиометр, как предпочитают сейчас говорить радиоастрономы, движется относительно реликтового фона, то встречные реликтовые фотоны будут иметь чуть меньшую длину волны, чем в случае, когда радиометр покоится относительно фона. Точно так же догоняющие радиометр фотоны будут иметь несколько большую длину волны. Измеряя эти два сдвига или любой из них, можно определить скорость радиометра относительно реликтового фона.

Так что для движущегося наблюдателя реликтовое излучение уже не выглядит строго изотропным. При этом возникает сдвиг длин волн в направлении вперед—назад, который называют дипольной анизотропией излучения.

Дипольная анизотропия реликтового фона была реально обнаружена с помощью радиометров, вынесенных за пределы земной атмосферы (чтобы она не мешала наблюдениям) на высотных самолетах и аэростатах. Оказалось, что в направлении на созвездие Льва имеется сдвиг в сторону более коротких волн, а в противоположном направлении — в сторону длинных. Разница составляла приблизительно две десятых процента, и, пересчитав ее на скорость по эффекту Доплера, наблюдатели нашли, что скорость Земли относительно реликтового фона составляет приблизительно триста километров в секунду. Это одна тысячная скорости света, т. е. одна десятая процента от нее; так и должно быть, ибо относительный сдвиг длины волны равен — в каждом из обоих направлений — отношению скорости движения к скорости света.. Земля движется в направлении на созвездие Льва со скоростью приблизительно в 300 км/сек относительно реликтового фона.

Этот фон служит идеально устроенной и очень удобной системой отсчета для измерения движений различных тел в космологии.

# 2 **ВСЕМИРНОЕ АНТИТЯГОТЕНИЕ**

## **2.1 Гипотеза Эйнштейна**

С конца 1920-х годов гипотеза эйнштейновской космологической постоянной сошла, казалось, со сцены. Действительно, раз мир не статичен и расширяется, в ней уже просто нет нужды. Так считал Эйнштейн, так думали и другие теоретики.

И, тем не менее, интерес к гипотезе Эйнштейна не пропадал совсем. Десятилетие за десятилетием, начиная с работ В. де Ситгера и Ж. Леметра, складывалось понимание того, что же, в сущности, стоит за этой новой константой природы.

Постепенно стало ясно, что в своей первой космологической работе Эйнштейн предложил гипотезу о том, что наряду с обычным веществом, все частицы которого — протоны, электроны, нейтроны и т. д. — испытывают взаимное притяжение, в мире существует и совсем необычная среда, создающая не притяжение, а антипритяжение, отталкивание. Эта неизвестная до того — ни в теории, ни в эксперименте — среда действует на обычное вещество Вселенной и способна уменьшить или даже вовсе компенсировать взаимное притяжение его частиц, а то и пересилить его.

Антигравитируюшая среда представлена в модифицированных уравнениях всего одной константой - эйнштейновской космологической постоянной Λ. Величина космологической постоянной не выводится из какой-либо фундаментальной теории, а подлежит наблюдательному определению. В модели Эйнштейна ее значение должно быть таким, чтобы обеспечить точную компенсацию тяготения антитяготением.

Если такая компенсация имеет место, то сумма сил, приложенных к каждой частице космического вещества, оказывается равной нулю, и потому все частицы в мире могут находиться в покое. Если все частицы покоятся, Вселенная как целое, тоже лишена движения — она неподвижна и статична, она не меняется со временем. Именно это состояние баланса сил и описывается, по сути, космологией Эйнштейна.

Так из, казалось бы, вынужденного предположения о новой постоянной природы родилась грандиозная гипотеза всемирного антитяготения.

Ни в первой своей космологической работе, ни позднее Эйнштейн не говорит об ангитяготении, вакууме, темной энергии и т. п. Но дело не в словах и названиях. Он вообще воздерживается от какой-либо физической интерпретации космологической постоянной. У него не говорится и о компенсации тяготения космического вещества за счет физического эффекта, описываемого этой постоянной.

Сейчас считается, что космологическая постоянная представляет собой количественную характеристику космического вакуума. Такая точка зрения была впервые высказана Э. Б. Глинером в 1965 г. Космический вакуум — это такое состояние космической среды, которое обладает постоянной во времени и всюду одинаковой в пространстве плотностью — и притом в любой системе отсчета. По этим свойствам вакуум принципиально отличается от всех других, обычных форм космической среды, плотность которых неоднородна в пространстве, падает со временем в ходе космологического расширения и может быть разной в разных системах отсчета.

Если оставить в стороне представление о статичности Вселенной, то гипотеза Эйнштейна была в действительности предположением о существовании в мире космического вакуума. И это предположение, наконец, подтвердилось в астрономических наблюдениях.

В 1998—99 гг. две группы астрономов открыли всемирное антитяготение и космический вакуум. В работе участвовало большое число астрономов), одной группой руководили Брайан Смидт и Адам Ранее, другой — Сол Перлмуттер.

Главный смысл новейших открытий в космологии таков. В наблюдаемой Вселенной доминирует вакуум, который математически описывается эйнштейновской космологической постоянной. По плотности энергии он превосходит все «обычные» формы космического вещества вместе взятые. Вакуум создает космическое антитяготение, антигравитацию, которая управляет динамикой космологического расширения в современную эпоху.

Открытие сделано на основании изучения далеких вспышек сверхновых звезд. Из-за их исключительной яркости, сверхновые можно наблюдать на очень больших, по-настоящему космологических, расстояниях. Опуская другие детали, скажем, что использовались данные о сверхновых определенного типа (1а), которые принято считать «стандартными свечами»; их собственная светимость в максимуме блеска действительно лежит в довольно узких пределах.

Сверхновые служат для определения таких больших космологических расстояний, на которых цефеиды и другие «обычные» звезды уже не видны даже в самые крупные современные телескопы. Самые далекие сверхновые наблюдают с помощью космического телескопа, носящего имя Хаббла.

Первая группа наблюдателей, сообщившая о своих результатах в 1998 г., располагала данными о всего нескольких сверхновых нужного типа на нужных расстояниях; но уже и этого было достаточно, чтобы заметить космологический эффект в законе убывания видимого блеска с расстоянием.

В наблюдениях сверхновых непосредственно измеряются две величины: блеск звезды (т. е. энергия, приходящая от нее на Землю в единицу времени на единицу площади) и красное смещение.

Красное смешение в спектре возникает из-за общего космологического расширения. Галактика, в которой находится звезда, удаляется от нас по закону Хаббла. Поэтому все длины волн света от нее смещены. Мерой смещения служит величина:

Z = (λ – λ0 ) / λ0 ,

где λ.— длина волны регистрируемого света, λ0 — длина волны испускаемого света. Величина Z называется красным смещением.

Z=0,7

Красное смещение

Блеск

замедление

ускорение

Рисунок 2.1 – Сверхновые звезды и ускорение Вселенной: зависимость блеска звезды от красного смешения. Наблюдательные точки ложатся на верхнюю из двух теоретических кривых. Это означает, что космологическое расширение происходит с ускорением. Блеск измеряется в логарифмической шкале и возрастает на вертикальной оси сверху вниз.

Измерив блеск сверхновой и ее красное смещение, астрономы ставят соответствующую точку на графике блеск-красное смещение.

На этом графике показаны две линии, которые отображают теоретическую зависимость блеска от красного смещения. При малых Z обе линии сливаются в одну.

В этом случае связь между измеряемыми величинами очень простая — она соответствует обычному закону обратных квадратов: блеск F убывает с расстоянием R по закону:

F ~ R-2.

Так как в соответствии с эффектом Доплера Z = V/c, а по закону Хаббла V = HR, то можно получить связь между расстоянием и красным смещением для малых Z:

R = cz/H.

В результате блеск убывает с красным смещением по закону обратных квадратов (справедливо для малых Z): F ~ Z-2.

Эта зависимость и изображена совпадающими начальными участками обеих теоретических кривых на рис. 2.1. Но при не малых красных смещениях связь между расстоянием и красным смещением становится сложнее. В эту связь оказывается вовлеченной не только скорость разбегания V, но и ускорение, с которым это разбегание происходит. Теоретическая кривая для ускоряющегося расширения проходит выше, чем для замедляющегося.

А это означает, что по виду зависимости блеска от красного смещения можно определить ускоряется космологическое расширение или замедляется. Для этого нужно наблюдать побольше сверхновых на таких больших расстояниях, где две теоретические кривые различны, и смотреть, как наблюдательные точки лягут на график.

Наблюдения сверхновых звезд определенно указывают на то, что точки ложатся на верхнюю кривую. А это означает, что Вселенная расширяется с ускорением. Ускорение же может создать только космический вакуум с его антигравитацией: антигравитация стремится удалить тела друг от друга и тем самым подгоняет разлет галактик и скоплений.

По этому ускорению космологического расширения и удалось распознать космический вакуум и даже весьма точно измерить плотность его энергии. Оказалось, что плотность энергии вакуума составляет 5·10-30 г/см3, если выразить ее в единицах плотности массы. Как известно, масса и энергия связаны между собой знаменитой формулой Е= mс2. Чтобы пересчитать плотность массы на плотность энергии, нужно умножить ее на с2.

В тех же единицах г/см3 средняя плотность светящегося вещества звезд составляет — 2·10-31 г/см3, а средняя плотность темной материи — 2·10-30 г/см3. На вакуум приходится, таким образом, 67% всей энергии мира, на темное вещество - приблизительно 30%, на барионы (обычное вещество) — около 3%, а на излучение — еще раз в сто меньше.

Итак, космический вакуум — самая плотная среда во Вселенной. Плотность вакуума больше и каждой из трех других плотностей в отдельности, и их суммы. Вакуума оказалось явно больше, чем требуется для компенсации тяготения в модели Эйнштейна. При этом плотность вакуума идеально одинакова во всем мире. Он присутствует всюду и везде имеет строго одну и ту же плотность. Плотности же светящегося и темного вещества одинаковы лишь в среднем по очень большим объемам с размерами в 300 миллионов световых лет и более.

«Измерительной установкой» для обнаружения вакуума и определения его плотности послужила, можно сказать, сама Вселенная с ее галактиками и звездами. А системой отсчета, в которой эти измерения были сделаны, было общее распределение галактик, в которых наблюдались сверхновые звезды нужного типа.

Численное значение плотности вакуума всегда и везде одно и то же. Измерив это значение в системе отсчета, сопутствующей расширяющемуся веществу, как это реально и сделано с помощью наблюдений сверхновых, мы знаем, что оно в точности такое и при любых других способах измерений в какой угодно системе отсчета.

Для космического вакуума, после того как он был открыт, стали придумывать новые названия. Одно из них — темная энергия — получает сейчас распространение. Вакуум действительно является темным в том смысле, что он не излучает света. Это название, кажется, больше нравится пишущим о науке журналистам, чем самим «практикующим» космологам: звучит таинственно. Но в астрономии уже есть темное вещество, а вакуум — это нечто совсем иное, чем темное вещество, хотя тоже чрезвычайно загадочное.

Почему же вакуум создает не тяготение, а антитяготение? Вакуум явился в космологию с эйнштейновской космологической постоянной Λ, и его плотность выражается через значение этой постоянной:

ρv = Λc2 /(8πG).

Какова бы ни была его физическая природа, вакуум Эйнштейна обладает не только определенной плотностью, но и давлением. Так он с самого начала задан космологической постоянной. Если плотность вакуума положительна, то его давление отрицательно.

Отрицательное давление — не вполне обычное явление в физике. При «нормальных условиях» давление в «нормальной» жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости и в твердых телах отрицательное давление тоже может возникать.

Это требует особых, специальных условий, но само по себе не является чем-то особенно экзотическим. Однако в случае вакуума ситуация исключительная. Связь между давлением и плотностью, т. е. уравнение состояния этой «среды», имеет вид:

ρv = -с2ρv

Ничего подобного нет ни в одной другой среде. Это абсолютно и исключительно свойство одного вакуума и только его.

Это уравнение состояния совместимо с определением вакуума как формы энергии с всюду и всегда постоянной плотностью, независимо от системы отсчета. Из этого уравнения состояния и вытекает антитяготение вакуума.

Согласно общей теории относительности, тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением в комбинации:

ρ + 3p/c2

Эта формула из фридмановской космологии однородной и изотропной Вселенной. Вакуум вызывает антигравитацию именно потому, что его эффективная гравитирующая энергия,

ρ0 = ρv + 3pv/c2 = -2pv ,

отрицательна при положительной плотности.

По наблюдательным данным о сверхновых плотность вакуума превышает суммарную плотность всех остальных видов космической энергии. Но это означает, что в наблюдаемой Вселенной антитяготение сильнее тяготения. При таком условии космологическое расширение обязано происходить с ускорением. Это ускорение и было замечено и реально измерено по наблюдениям сверхновых звезд в далеких галактиках.

Посмотрим еще раз на рис. 2.1, который отображает зависимость блеска сверхновых от красного смещения, и обратим внимание на одну наблюдательную точку в самом верху графика — она явно сползает вниз с верхней кривой.

Это далеко не случайное обстоятельство. Дело в том, что красное смещение служит не только мерой расстояния, но и мерой времени: чем больше z, тем больше расстояние, но, значит, тем дольше шелк нам свет от звезды. Мы видим звезду или галактику такой, какой она была в момент испускания света.

При красном смешении z = 0,7 мы видим звезды, галактики и всю Вселенную какими они были 6—8 миллиардов лет назад. Но, как мы теперь знаем, приблизительно в эту эпоху замедляющееся расширение превратилось в ускоряющееся. Красным смещениям, превышающим 0,7, отвечает ранняя эпоха, когда расширение замедлялось. Поэтому можно предсказать, что на больших z наблюдательные точки будут ложиться не на верхнюю, а на нижнюю кривую.

## 2.2 **Ускоренное расширение**

R(t)

сила антитяготения, создаваемая вакуумом

скорость частицы

сила тяготения вещества

Рисунок 2.2 – Расширяющийся шар на фоне антигравитирующего вакуума.

В отличие от всемирного тяготения, всемирное антитяготение стремится не сблизить тела, а, напротив, удалить их друг от друга. Но и наблюдаемые скорости разбегания галактик тоже

приводят к их удалению друг от друга.

Это означает, что сила антитяготения направлена вдоль скорости, и потому она помогает галактикам разбегаться, все время увеличивая их скорость.

Раз наблюдаемое расширение происходит с ускорением, оно будет продолжаться неограниченно долго — ничто уже не способно этому помешать. Действительно, средняя плотность вещества и излучения будет при расширении только убывать. Но это означает, что тяготение никогда уже не будет преобладать во Вселенной. Динамическое доминирование вакуума будет только усиливаться, а разбегание галактик будет происходить все быстрее и быстрее. Очень важно, что это заключение относится ко всем трем вариантам геометрии трехмерного пространства. Трехмерное пространство может иметь положительную, нулевую или отрицательную кривизну, а расширение все равно будет продолжаться вечно.

Так вакуум с его антитяготением меняет прежнее предсказание теории о судьбе мира. В космологических моделях с нулевой энергией вакуума был возможен вариант смены расширения сжатием: при положительной кривизне пространства. Теперь такое предсказание уже отпадает. Только неограниченное расширение — таково новое предсказание теории, ставшее возможным с открытием космического вакуума.

При полном и подавляющем преобладании вакуума расстояния между галактиками и их системами возрастают со временем экспоненциально:

R(t) ~ exp(ct/A).

Здесь константа А размерности длины определяется плотностью вакуума:

A = (kρv )-1/2 ~ 1028 см.

Эта зависимость расстояний от времени содержится в теории Фридмана в качестве предельного случая, когда все в мире определяет вакуум, а влиянием невакуумных компонент космической среды можно полностью пренебречь. Закон экспоненциального расширения показан графически на рис. 2.3.

эпоха вещества

эпоха вакуума

время, t

tv

сейчас

Рисунок 2.3 – Изменение расстояний в реальном мире.

По свойству экспоненциальной функции, в таком экспоненциально расширяющемся мире скорость взаимного разбе-гания тел пропорциональна расстоянию между ними.

Но тогда в законе Хаббла V = HR, постоянная Н будет независимой не только от направлений и расстояний в пространстве, но также и от времени:

Н = с/А.

Космологической длине А отвечает время А/с ~ 10 млрд. лет. Близость по порядку величины к современному возрасту мира — не случайное совпадение.

Обратимся теперь не к будущему, а к прошлому Вселенной. Вакуум доминировал в мире не всегда. Его плотность не меняется со временем, тогда как плотность темного вещества падает при расширении мира и, значит, растет назад — в прошлое. Плотность вещества меняется обратно пропорционально квадрату возраста мира. Все это означает, что антитяготение вакуума было несущественно в достаточно отдаленном прошлом.

В ранней Вселенной безраздельно господствовало всемирное тяготение невакуумных компонент космической среды. А эпоха антитяготения наступила только при возрасте мира в 6-8 миллиардов лет: в этот момент плотность темного вещества упала до значения плотности вакуума (см. рис. 2.4).

вакуум

плотность

время, t

tv

эпоха вещества

эпоха вакуума

вещество

Рисунок 2.4 – Вещество и вакуум в расширяющемся мире.

Но тогда точные измерения космологического расширения по сверхновым должны прямо на это указать, — если только удастся найти сверхновые, находящиеся от нас на расстоянии в 6—8 и более миллиардов световых лет. Такие примеры очень далеких сверхновых в самое последнее время найдены, и они определенно подтверждают; что в далеком прошлом расширение действительно происходило не с ускорением, а с замедлением — по закону R ~ t2/3 . Это закон замедляющегося расширения — оно тормозится тяготением и потому происходит медленнее, чем по инерции.

Скорость расширения в этом случае V ~ R/t , при этом постоянная Хаббла H ~ 1/t .

В реальном мире этот закон расширения справедлив с очень хорошей точностью для всех трех типов пространственной геометрии, если возраст мира не превышает 6—8 миллиардов лет.

Это эпоха доминирования темного вещества. А вскоре после того, как плотность темного вещества становится меньше плотности вакуума, справедлив экспоненциальный закон расширения.

Так что практически вся история расширения Вселенной может быть описана с помощью этих двух соотношений: сначала степенной закон расширения, а потом экспоненциальный.

В эпоху, когда плотности темного вещества и вакуума сравниваются по величине, приближенно справедливы обе выписанные выше формулы для постоянной Хаббла. Значит, в эту эпоху c/A ~ 1/t. Тогда A/c ~ t ~ 10 млрд. лет.

Если записать последнее равенство с несколько большей точностью, то из него и получится указанный выше характерный возраст 6—8 миллиардов лет, как граница между стадией преобладания тяготения и следующей за ней стадией преобладания антитяготения.

Остается добавить для полноты картины, что в самые первые несколько сотен тысяч лет (тогда по плотности доминировало излучение) расширение происходит по закону:

R ~ t1/2 .

Это, естественно, замедляющееся расширение, более медленное, чем инерциальный разлет.

Итак, можно сказать, что первую половину своей жизни Вселенная замедлялась, а во вторую ускорялась. В будущем ее ждет дальнейшее ускоренное расширение, которое никогда не окончится.