

## 6. МЕГАМИР ОБЪЕКТОВ ВСЕЛЕННОЙ

### *Основное содержание главы*

Мегамир космических масштабов в качестве целостного объекта рассматривает космология – учение о мироздании. В одном из разделов этого учения – космогонии – развивается теория происхождения и эволюции небесных тел, их систем и Вселенной в целом. Основным экспериментальным методом в этой области естествознания является специально организованное наблюдение. Смена античной геоцентрической модели устройства Вселенной на гелиоцентрическую систему Коперника знаменовала становление классической парадигмы Вселенной. Современное естествознание рассматривает происхождение мегамира на основе процессов, происходящих на уровне микромира. Экстремально коперниковской точкой зрения является представление о мультиверсуме (множестве вселенных).

### 6.1. Историческая смена концепций Вселенной

Геоцентрическая модель мироустройства, представленная в трудах Платона, Аристотеля и Птолемея, лежала в основе в религиозной картины мира вплоть до эпохи Возрождения.

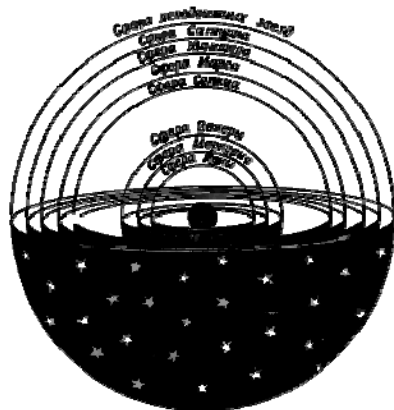


Рис. 66. Сферы Аристотеля

По мнению Аристотеля, в центре мира находится Земля, имеющая сферическую форму, поскольку эта форма является самой совершенной. Земля окружена водой, воздухом и, наконец, огнем. Затем идут сферы небесных светил: ближайшая сфера Луны и наиболее удаленная сфера неподвижных звезд (рис. 66). Сферы вращаются вокруг Земли вместе с помещенными на них светилами, которые описывают при этом вокруг Земли круглые орбиты – совершенные кривые. Область небесных светил

заполнена эфиром и движение небесных светил осуществляется этим перводвигателем. В противоположность Земле, где все меняется, в небе все неизменно и совершенно. Космос не рожден и неуничтожим, он вечен. В этом Аристотель расходится со своим учителем Платоном, у которого Универсум – Вселенная создается творцом Демиургом. Демиург разделит сферы движения планет в пропорциональных отношениях, как

1/2/3/4/8/9/27. В этом выражается отношение радиусов орбит планет: Луны (1), Солнца (2), Венеры (3), Меркурия (4), Марса (8), Юпитера (9), Сатурна (27). Последняя сфера – сфера неподвижных звезд, которая занимает особое место среди остальных сфер [1].

Считалось, что законы перспективы указывают на то, что если бы Земля перемещалась внутри сферы неподвижных звезд, то созвездия, к которым она приближается, казались бы крупней, в то время как на противоположной стороне неба все созвездия выглядели бы уменьшенными. Отсутствие таких наблюдений объяснялось расположением Земли в центре мира (в действительности это объясняется тем, что расстояния от Земли до звезд очень велики). Для Аристотеля положение о том, что центр Земли совпадает с центром мира, очень важно, поскольку именно это являлось базой для его теории естественного и насильственного движения (см. п. 4.1).

В более поздней модели Птолемея небесные светила располагались на правильных сферах, так что ось вращения предыдущей сферы наклонно закреплялась на последующей. Кроме того, вводились эпициклы – дополнительные круговые движения планет. Сложение вращений, происходящих в разных плоскостях, давало качественно верную картину небесных движений. В частности, оно объясняло попятные движения планет.

В эпоху Возрождения Николо Коперник обосновал гелиоцентрическую систему на целом ряде соображений в пользу движения Земли. В том числе он приводил и такой аргумент: «Гораздо более удивительным было бы, если бы в двадцать четыре часа поворачивалась такая громада мира, а не наименьшая его часть, которой является Земля» [1].

Основываясь на системе Коперника, Иоганн Кеплер установил первые научные законы в астрономии. Он обнаружил, что планеты движутся по эллипсам и что отношение квадратов периодов обращения равно отношению кубов средних радиусов орбит планет. В своем труде «Музыка сфер» он писал, что отношения периодов вращений планет подобны звукоряду гаммы. Гармоническое отношение (или золотое сечение) выполняется и для человека: фигура считается гармоничной, если отношение роста человека к расстоянию от поверхности ступни до талии равно 1,618. Таким образом, в духе своего времени Кеплер показал, что Всевышний обустроил мир в его единстве и по законам гармонии и красоты.

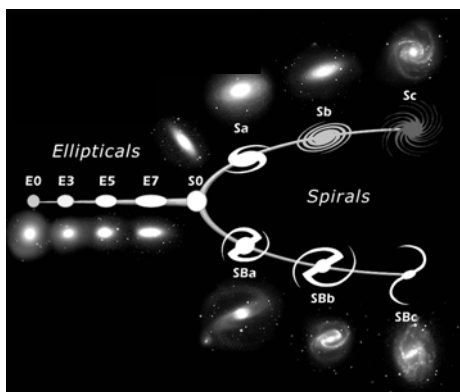
Объяснение взаимодействия планет в Солнечной системе было дано И. Ньютоном, сформулировавшим закон всемирного тяготения, отражающего единство всего материального мира. Ньютону Вселенная

представлялась машиной огромного масштаба, однажды запущенной Творцом и неизменной в своем вращательном движении и объеме.

Классическая парадигма мироустройства была основана на данных астрономических наблюдений в том диапазоне электромагнитных излучений (ЭМИ), который воспринимает зрение человека, округленно от 0,4 мкм до 0,8 мкм. Если учесть то, что спектр ЭМИ необычайно широк, от гамма-лучей с длиной волны порядка  $10^{-17}$  м до радиоволнового излучения с длиной волны, достигающей 1 км, то становятся очевидными ограниченность наблюдений в диапазоне видимого света и неполнота информации классической астрономии об окружающем мире.

Вплоть до 20-х годов прошлого столетия Вселенная отождествлялась с одной единственной Галактикой, в которой находится наша Солнечная система. Размеры Галактики оценивали в 100 000 световых лет (далее в тексте – св. л.). В рамках классической концепции объектами Вселенной являлись звезды, туманности, планеты, кометы, астероиды и более мелкие метеоры и метеориты. Физическая природа всех объектов, кроме туманностей, была более или менее ясной. Для исследования же подробностей строения туманностей не было технических возможностей, которые появились лишь после ввода в строй телескопов с оптически совершенными зеркалами более чем метрового размера.

В частности, в 1924 г. в США на высокогорной обсерватории «Маунт Вилсон» был сооружен телескоп с диаметром главного зеркала



2,5 м. Наблюдения, выполненные с помощью нового оборудования, позволили Эдвину Хаббл установить, что туманность в созвездии Андромеды имеет спиральную структуру и является галактикой, содержащей в своем составе сотни миллиардов звезд.

Постепенно выяснилось, что галактики имеют разнообразные формы – от шаровых, эллиптических, спиральных до спиральных с поперечной полосой. Первая классификация форм галактик дана Э. Хабблом (рис. 67).

Открытие других галактик имело революционное значение не только для астрономии, но и для всего естествознания в целом. Наша Галактика оказалась одной из множества других. И хотя мы лишены возможности взглянуть на нее со стороны, наличие Млечного Пути среди созвездий позволило определить ориентацию срединной плоскости нашей Галактики, а данные наблюдений с помощью радиотелескопов

позволили признать, что по форме она отвечает спиральной конфигурации с пересечением (с баром).

Так Вселенная стала Метагалактикой, то есть более общей категорией. Сам горизонт человеческого восприятия окружающего мира скачком раздвинулся на новые гигантские космические расстояния. Достаточно сказать, что до туманности Андромеды свет распространяется в течение 2 млн 300 тыс. лет! Имя Эдвина Хаббла по праву должно стоять в ряду таких великих имен, как Галилео Галлилей, Николо Коперник и Джордано Бруно.

Необходимость смены парадигмы мироздания стала очевидной. Резонанс в общественном сознании был сравним с тем влиянием, которое оказало установление планетарной модели строения атома Э. Резерфордом.

*И страшным, страшным креном  
К другим каким-нибудь  
Неведомым вселенным  
Повернут Млечный путь...*

Такими словами выразил свои впечатления от открытия Хаббла русский поэт Борис Пастернак. Обратим внимание – здесь еще понятие «вселенная» используется как синоним понятия «галактика».

Вместе с тем стало ясно, что одних только оптических наблюдений будет недостаточно для исследования Вселенной как Метагалактики. По мере открытия высокоэнергетических космических излучений, начинают проводить эксперименты по их регистрации на высотных аэростатах, на поверхности Земли, в толще гор и под водой. Были открыты линии радиоизлучения водорода на длине волны 21 см, оксида углерода – на длине волны 2,64 мм, гидроксила – на длине волны 18 см. Поэтому начинают строить радиотелескопы в виде гигантских радиоантенн.

После запуска первых искусственных спутников Земли, показавших возможность вывода научной аппаратуры в околоземный космос, начинается время запусков на орбиту телескопов, работающих в различных диапазонах длин волн. Первый запущенный рентгеновский телескоп носил символическое название «Ухуру» («Разведчик» на языке племени ирокезов). Небо в рентгеновских лучах оказалось совсем не похожим на привычную картину созвездий, хотя целый ряд источников оказался видим «во всех лучах», включая гамма-лучи.

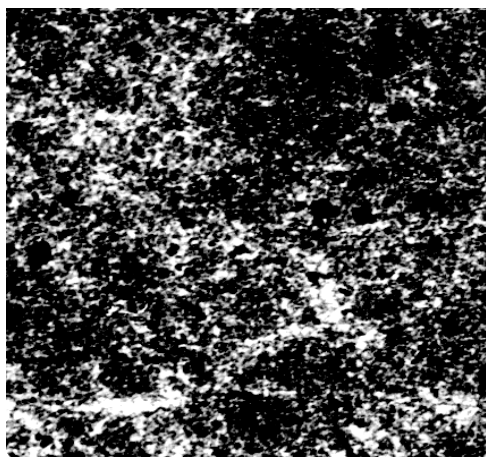
Сравнительно недавно во Вселенной были обнаружены рентгеновские пульсары и барстеры, квазизвездные объекты – квазары. Вспышки сверхновых звезд теперь регистрируют сначала с помощью нейтринных

детекторов и в рентгеновских лучах, затем, с опозданием до нескольких суток, наблюдается вспышка светового излучения. В настоящее время разрабатываются проекты спутниковых лазерных интерференционных гравитационных обсерваторий. Таким образом, современная астрономия становится всеволновой, а горизонт Вселенной отодвигается все дальше.

По каким причинам последнее обстоятельство очень важно для естествознания, мы рассмотрим ниже. Сейчас же отметим, что галактики не располагаются во Вселенной хаотически, а образуют локальные группы, или скопления.

Наша Галактика входит в Местную группу, членами которой являются также М31 (Андромеда), М33 (Треугольник), галактики Большого Магелланового Облака и ряд других (всего около 25). Члены Местной группы разбросаны по пространству в пределах до 3 млн св. л. Центр масс группы расположен на одной трети расстояния от нашей галактики (ее название Млечный Путь) до галактики М31. Самые массивные галактики имеют относительно маломассивные галактики-спутники. Например, Большое Магелланово Облако является спутником нашей Галактики и совершает один оборот вокруг Млечного Пути за 2,5 млн лет.

С развитием компьютерной техники стала возможной обработка больших массивов информации о расположении галактик и их скоплениях. В 1977 г. были опубликованы первые результаты компьютерного анализа положения более чем 1000 галактик в достаточно узком клине неба в



*Рис. 68. Расположение скоплений галактик*

направлении созвездия Волосы Вероники. На экране компьютера получилась картина распределения, (рис. 68), которую позднее назвали ячеистой.

В начале 80-х гг. XX в. окончательно сложилась новая идея о том, что скопления галактик, в свою очередь, образуют ленты огромной пространственной сети. Средний размер ячейки (не содержащей звезд) такой трехмерной сети составляет примерно 330 млн св. л. (один световой год равен  $9,5 \cdot 10^{15}$  м). Ячейки представляют собой «пузыри» пустого пространства, а Вселенная на самом

грандиозном масштабном уровне напоминает «губку».

*Открылась бездна, звезд полна.  
Звездам числа нет, бездне – дна.*

Так писал о ночном небе российский ученый-энциклопедист М.В. Ломоносов. Фактически в этой строфе выражена классическая парадигма устройства мегамира. В ее рамках роль основных структурных единиц отведена звездам.

В современном естествознании основной единицей (или, скорее, строительным блоком) выступают галактики, несущие в себе от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  звезд типа нашего Солнца. К концу XX в. наши представления о Вселенной стали более структурированными и более полными, чем в начале.

## 6.2. Движение и столкновение галактик

Разнообразие форм галактик можно рассматривать как проявление действия принципа минимального разнообразия. Оно свидетельствует о вариативности условий формирования и эволюции конкретных строительных блоков Вселенной.

### *Строение нашей Галактики*

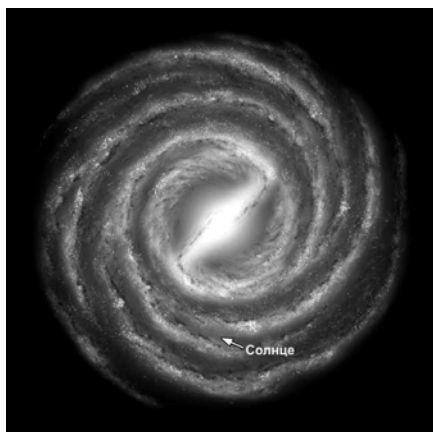


Рис. 69. Модель нашей галактики

Наша Галактика (Млечный Путь) представляет собой спиральный диск с четырьмя закрученными рукавами, с центральным шаровидным утолщением и пересечением (рис. 69). Толщина диска около 500 св. л., радиус рукавов равен примерно 50 000 св. л. Центральное утолщение Млечного Пути имеет диаметр около 20 000 св. л., толщину в 3000 св. л. и окружено роем (иногда используют термин *гало*) из примерно 200 шаровых звездных скоплений.

Черная полоса, которую мы видим ночью вдоль Млечного Пути (и на фотографиях некоторых других галактик), свидетельствует, что межзвездное пространство в Галактике (название нашей галактики принято писать с большой буквы) заполнено гигантскими газопылевыми облаками, поглощающими видимое излучение, но прозрачными для радиоволн и инфракрасного излучения. Именно на основании данных радиоастрономии и спутниковых наблюдений в инфракрасном диапазоне была установлена четырехрукавная структура Галактики и то, что Солнце располагается на расстоянии 25 000 св. л. от центральной части. Один оборот вокруг центра Галактики Солнце совершает примерно за 200 млн лет; за время своего существования оно совершило

примерно 25 оборотов вокруг центра Млечного Пути. Можно образно сказать, что Солнцу 25 галактических лет!

Скорость вращения отдельных звезд определяют по смещению спектральных линий (по оптическому эффекту Доплера). Для нашей Галактики величина массы составляет примерно 100 млрд солнечных масс. По порядку величины это соответствует массе видимых звезд и газопылевых облаков. В то же время измерения скоростей движения звезд, расположенных на периферии Млечного Пути, и шаровых скоплений в галактическом гало показало, что они движутся вокруг центра с такими скоростями, которые не соответствуют оценке полной массы *видимого* вещества Галактики. Несоответствие устраняется в том только случае, если допустить, что существует *темное вещество*, скрытое от использованных методов наблюдения. По предложению М. Тернера это вещество было названо *темная материя*. Причем масса невидимого вещества на порядок величины превосходит ту массу, которая определяется современными методами астрономии. Физическая природа темного вещества, которое проявляется только в гравитационном взаимодействии, в настоящее время является предметом научной дискуссии.

В самом центре Галактики зарегистрирован источник с экстремально большим энерговыделением. Имея сравнительно небольшие размеры (порядка размеров Солнечной системы), он обладает массой в четыре миллиарда (!) раз большей, чем Солнце, и светит в широком диапазоне излучений в 100 млн раз интенсивней. Первоначально природу такого источника связывали со вспышкой звездообразования «молодых» звезд. В настоящее время установлено, что в самом «сердце» Млечного Пути находится Черная дыра (природа таких объектов обсуждается ниже).

### ***Спиральные волны в галактиках***

Самая интересная особенность многих галактик – это их спиральная структура, вызывающая впечатление звездного вихря и часто красивая сама по себе. Как возникают спиральные рукава и почему за миллиарды и миллиарды лет они не «намотались» на центральную часть? Ведь звезды в галактике вращаются дифференциально, с разной угловой скоростью на различных расстояниях от центра (а не как твердый диск или обруч). Парадокс был разрешен только в середине 60-х гг. XX в. (вновь временные рамки становления современного естествознания!), когда Ц. Лин и Ф. Шу в США предложили идею звездных волн, бегущих по диску галактики вне зависимости от её дифференциального вращения. Оказывается спиральный рукав является той областью диска, куда подошел фронт волны, где вещество временно уплотнилось. Через

некоторое время гребень волны сгущения перейдет в новое положение, а в прежнем месте возникнет разрежение.

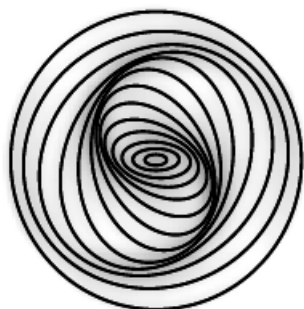


Рис. 70. Схема появления спиральной волны

Механизм формирования спиральной волны с пересечением (баром) показан на рис. 70 для случая, когда орбиты звезд вблизи центра ориентированы примерно одинаково, а при удалении к периферии – разворачиваются. Однако как убедиться в том, что реальные волны не только на поверхности воды или в газах, но и в космических структурах? Ведь период колебаний в звездной волне растягивается на сотни миллионов лет!

Здесь самое время вспомнить, что любой волновой процесс характеризуется как временной, так и пространственной периодичностью (см. формулу 41). Поэтому можно было ожидать периодического чередования значений скоростей движения звезд в галактическом диске. Проведенные измерения поля скоростей звезд в нашей Галактике позволили выделить периодическую структуру спиральной формы, и она полностью соответствует расположению спиральных рукавов в окрестностях Солнца. Иначе говоря, данные о периодичности поля скоростей стали решающим аргументом в пользу теории звездных галактических волн.

Следствием движения волнового фронта по диску галактики могут быть ударные волны в межзвездном газе. Для этого необходимо одно условие – скорость движения гребня звездной волны должна превышать скорость звука в межзвездном газе. Только тогда возникает галактическая ударная волна. Действительно, во многих галактиках (рис. 71) про-



Рис. 71. Галактика M31

являются узкие темные области сильно сжатого газа и пыли, тонкой спиралью протягивающиеся вдоль гораздо более широких рукавов. Из этих областей идет сильное гамма-излучение, возникающее при столкновениях протонов космических лучей с протонами сгущенного межзвездного водорода. Ещё более важно то, что с галактическими ударными волнами связано интенсивное звездообразование, так что

непосредственно в области ударной волны мы можем наблюдать самые молодые звезды, а в области за фронтом волны возраст звезд увеличивается. Чем дальше от фронта ударной волны в галактике, тем старше звездное «население» – такое распределение возрастов звезд по ширине



спиральных рукавов действительно было обнаружено в нашей и в других галактиках.

### **Слияние галактик**

Галактики Местной группы движутся вокруг общего центра масс. Сравнительно недавно, в 1993 г., были опубликованы результаты сравнения положения самой близкой к нам галактики Большого Магелланового Облака (БМО), произведенного с интервалом в 17 лет. Скорость движения БМО оказалась неожиданно высокой. Как и в случае движения шаровых скоплений в гало Галактики, приходится признать, что полная масса нашей Галактики и других больших спиральных галактик Местной группы на девять десятых состоит из невидимого, но действующего через гравитационное поле вещества. Кроме того, выяснилось, что орбита движения галактики-спутника, каковой является БМО по отношению к нашей галактике, проходит достаточно близко к диску Млечного Пути и приливные гравитационные силы деформируют БМО. Возможно, поэтому она не имеет спиральной структуры и относится к галактикам с нерегулярной формой. В результате неоднократных сближений двух галактик от Большого Магелланового Облака отделилась длинная тонкая дуга из вещества, падающего на нашу Галактику. Таким



*Рис. 72. Схема звездных потоков в нашу Галактику*

образом в нее вносятся не только водород газопылевых облаков, но и звезды и рассеянные звездные скопления. По оценкам астрономов, за время порядка 10 млрд лет все вещество БМО «перетечет» в Млечный Путь. Вторым из обнаруженных звездно-пылевых потоков стал поток Стрельца (рис. 72). В классическом естествознании подобные процессы считались бы совершенно фантастическими!

Независимые подтверждения возможности таких крупномасштабных явлений, как столкновение и слияние галактик, были получены в результате спутниковых наблюдений в ИК-области спектра. В частности, запущенный в 1983 г. космический аппарат *IRAS* позволил получить целый ряд снимков нового класса объектов – инфракрасных галактик. Их особенностью является громадная светимость, в 100 000 раз большая, чем у обычных видимых галактик. В видимом диапазоне такие галактики не проявляют себя, так как содержат большое количество пыли и газа. Пыль очень эффективно поглощает ультрафиолетовое и видимое

световое излучение, скрывая тем самым источник большого энерговыделения от прямых наблюдений. Однако поглощенная пылью энергия не пропадает, а переизлучается в ИК-диапазоне. Оказалось, что ИК-источники со светимостью на уровне квазаров обнаружены только среди сливающихся галактик. Эти результаты позволили предположить, что квазары формируются в процессах столкновения двух богатых газом и пылью галактик. Так как число квазаров велико, это означает, что столкновения галактик являются не таким уж экзотическим явлением. Позднее с помощью телескопа «Хаббл» удалось наблюдать близкое взаимодействие галактик и в видимом спектре (рис. 73).



*Рис. 73. Фотография слияния галактик*

В отличие от процессов столкновения в микромире, где наибольший эффект приносят столкновения частиц при высокой скорости относительного движения, при столкновении двух галактик наибольший эффект достигается при малой скорости прохождения галактик друг через друга. Здесь важно, чтобы был достаточный интервал времени взаимодействия двух систем, чтобы стало возможным образование приливных волн в галактиках, наподобие приливов в земном океане. В зависимости от типа галактик и конкретной геометрии сближения, столкновения могут приводить к появлению изогнутых «мостов», направленных навстречу, и «хвостов» из вытолкнутых звезд с противоположной стороны галактического диска. Возможно появление фрагментов, вращающихся перпендикулярно галактической плоскости, звездных или газовых колец, светящихся отростков и волокон.

После открытия инфракрасных галактик встал вопрос о причинах «эпидемии» звездообразования в сталкивающихся галактиках. Было известно, что новые звезды образуются в сгущениях газопылевых облаков обычных галактик. В Млечном Пути образуется по две-три новые звезды ежегодно. При столкновениях скорость образования возрастает на два порядка. Это значит, что сопоставимое по общей массе газопылевое облако стягивается при столкновении в центральную часть и его плотность резко возрастает. Почему?

С помощью компьютерного моделирования было показано, что при столкновении галактик звезды и межзвездный газ не могут больше двигаться согласованно, так как, в отличие от потоков звезд, газовые потоки при столкновении порождают мощные ударные волны и взаимно тормозятся. При уменьшении орбитальной скорости убывает и центро-

бежная сила, так что поле гравитации может сжимать пылегазовые облака к центрам галактик. Некоторые звезды образуются в процессе сжатия облаков. Но большая часть газа, собранного в центрах сталкивающихся галактик, падает по сходящейся спирали на центр масс слившейся пары, где и возникает более интенсивная вспышка образования новых звезд.

В ближайшей окрестности Местной группы наиболее заметной и наиболее массивной концентрацией галактик является скопление Дева с примыкающим к нему окружением других, меньших галактик. Это Местное сверхскопление, центр его лежит на расстоянии 40–80 млн св. л. от Солнечной системы. Местная группа галактик под действием поля тяготения Местного сверхскопления приближается к нему со скоростью 250 км/с. Около десяти лет тому назад было установлено, что Местное сверхскопление, следующее по удаленности от нас сверхскопление Гидра-Кентавр и целый ряд других скоплений и сверхскоплений движутся в направлении некоторой концентрации масс, примерно в 20 раз превосходящей массу Местного сверхскопления. Мало изученное пока образование, к которому направлен поток галактик, получило название Великий аттрактор. Если его существование подтвердится, то спектр масс во Вселенной пополнится еще одной «точкой», представляющей самую большую концентрацию вещества, которую удалось обнаружить человеку.

И наконец, самое общее движение, в котором участвуют все без исключения галактики, – это взаимное хаббловское разбегание. Оно было обнаружено Хабблом в 1929 г. на основании красного смещения линий излучения водорода в спектрах почти всех галактик.

### **6.3. Эмпирическое открытие расширения Вселенной**

Как известно, каждый химический элемент имеет свой индивидуальный спектр поглощения и излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Можно сказать, что спектр электромагнитного излучения является «визитной карточкой» данного элемента в атомарном или ионизованном состояниях. Этим обстоятельством и пользуются в земных лабораториях для качественного и количественного спектрального анализа веществ.

Если источник излучения движется по отношению к наблюдателю с его спектрографом, то вступает в действие эффект Доплера. Он заключается в том, что частота и длина волны регистрируемого излучения зависит от величины отношения скорости движения источника излучения к фазовой скорости волны.

Для электромагнитных излучений фазовая скорость в вакууме равна скорости света, и формула Доплера имеет вид

$$\nu^* = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{V}{c}}{1 + \frac{V}{c}}}, \quad (47)$$

где  $\nu^*$  – частота линии излучения, регистрируемая в случае подвижного источника;

$\nu_0$  – частота линии излучения в случае неподвижного источника;

$V$  – скорость движения источника по отношению к приемнику;

$c$  – скорость света.

В формуле (47) значение скорости  $V$  считают положительной величиной в случае удаления источника от приемника, в противоположном случае – отрицательной. В первом случае частота уменьшается, а длина волны увеличивается и положение линии излучения смещается в длинноволновую область, ближе к красной границе видимого спектра. Именно в этом случае говорят о «красном» смещении всех линий в спектре излучения. Когда В. Слейфер и позднее Э. Хаббл измеряли смещения положений линий в спектрах других галактик, они в большинстве случаев наблюдали красное смещение.

Если мы наблюдаем вращающуюся галактику «с ребра», то с одного края звезды и газ удаляются от нас, с противоположного края вещество галактики приближается к нам. В результате этого каждая спектральная линия расширяется как в сторону низких частот, так и в сторону высоких. Поэтому полное уширение линии позволяет рассчитать значение максимальной орбитальной скорости вещества в галактике (в дополнение к информации о скорости удаления галактики в целом). Значение максимальной орбитальной скорости легко определить, используя формулу (47) и зная величину разности частот  $\nu_1^*$  и  $\nu_2^*$  (рис. 74).

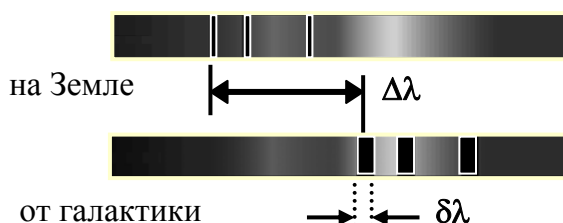


Рис. 74. Красное смещение и уширение линий в спектре галактики

Э. Хаббл разработал методику определения расстояний до далеких галактик и сопоставил величины красных смещений (пропорциональных скорости удаления) с величиной расстояния до данной галактики. В 1929 г. он опубликовал результаты сравнения данных для многих галактик, из которых следовало, что чем дальше расположена галактика, тем больше величина красного смещения линий в ее спектре (рис. 75).

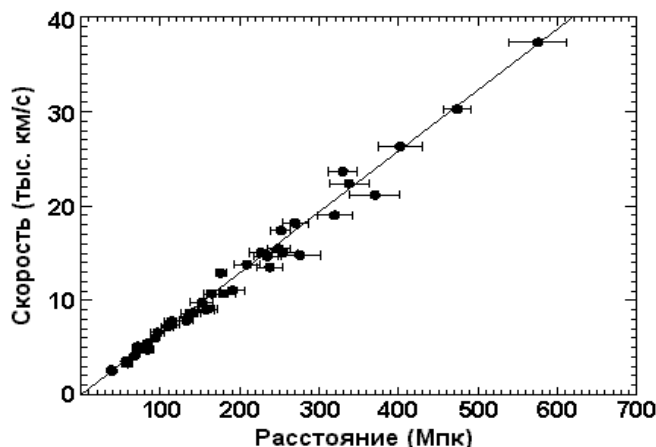


Рис. 75. Зависимость скорости удаления галактики от расстояния до нее

Физически это означало, что существует прямая пропорциональная зависимость между расстоянием до галактики и скоростью ее удаления от нашей Галактики. Здесь скорость выражена в метрах за секунду (м/с), а расстояние – в единицах измерения традиционных для астрономии, то есть в мегапарсеках (Мпс). Для перевода в более привычную метрическую систему мер можно использовать следующие соотношения между астрономическими единицами:

$$1 \text{ Мпс} = 3,26 \text{ св. г.},$$

$$1 \text{ св. г.} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м.}$$

Некоторое отклонение от линейной зависимости, наблюдаемое для ряда близких галактик, связано с их движением в рамках Местного сверхскопления или Местной группы галактик, о котором говорилось выше.

Открытый Хабблом закон можно записать в виде

$$V = H R, \tag{48}$$

где  $V$  – скорость удаления галактики;

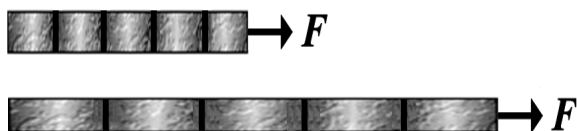
$R$  – расстояние до данной галактики;

$H$  – постоянная Хаббла.

Угол наклона графика зависимости  $V(R)$  позволяет оценить величину постоянной Хаббла. По современным данным, численное значение  $H$  лежит в интервале от 68 до 70 км/(с·Мпс).

Публикуя статью, Э. Хаббл считал, что его данные согласуются с общепринятым в то время положением о стационарности Вселенной. И даже много позднее он не признал, что его открытие привело к революционной ломке многих прежних представлений.

Самое главное заключается в том, что взаимное разбегание галактик свидетельствует о расширении всего видимого объема Вселенной. Чтобы пояснить физическую ситуацию, рассмотрим механическую аналогию. Допустим, Вы имеете резиновую ленту с нанесенными на нее сантиметровыми делениями. Прижмите начало ленты к столу и начните растягивать ленту за другой конец. При растягивании ленты вдвое за одно и то же время расстояние между первой и второй метками возрастет на 1 см, третья метка продвинется от первой на 2 см, четвертая – на 3 см и так далее (рис. 76).



*Рис. 76. Растяжение эластичной ленты с равномерными делениями*

Очевидно, что чем дальше от начала ленты находится метка, тем больше будет ее скорость по отношению к выбранной первой. Ведь по определению скорость равна расстоянию, проходимому за данное время. При этом будет выполняться линейная зависимость скорости от начального расстояния до точки наблюдения.

Другой аналогией, по-видимому, лучше соответствующей сути, может быть «опыт» с изюминками в равномерно поднимающемся тесте. По мере его расширения расстояние между изюминками (метками) будет линейно возрастать. Неважно, какую из изюмин приняты за начало координат, результат будет одним и тем же.

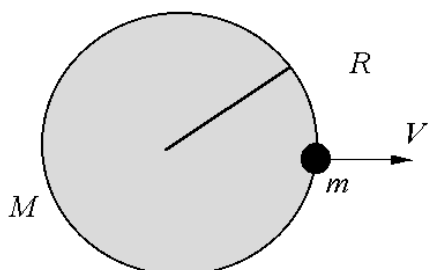
Иногда говорят, что Николо Коперник «сдвинул с места Землю», подразумевая революционную смену геоцентристской точки зрения на новую, гелиоцентристскую. Эдвин Хаббл «сдвинул с места» Вселенную!

#### **6.4. Сценарии будущего для Вселенной**

Факты свидетельствуют о расширении Вселенной «во все стороны» в современную эпоху. Будет ли этот процесс продолжаться в дальнейшем? Что могло бы повлиять на скорость расширения и возможно ли сжатие Вселенной? Такие вопросы неизбежно встают после открытия Хаббла. Пытаясь разобраться в ситуации «на пальцах», физики исполь-

зуют самую простую модель Вселенной в виде изотропной и однородной сферы возрастающего радиуса  $R$ .

Мы знаем, что реальная Вселенная «в разрезе» похожа на губку (см. рис. 68), но это в данном случае большой роли не играет. Достаточно ввести в рассмотрение среднюю плотность  $\rho$  Вселенной. Масса Вселенной  $M$  тогда будет равна плотности, умноженной на объем сферы:



$$M = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3. \quad (49)$$

Рис. 77. Модель однородной Вселенной

Выделим некоторую массу вещества  $m$  на краю Вселенной (рис. 77). Выбранная материальная точка будет обладать кинетической энергией  $W_c$  движения со скоростью  $V$  и потенциальной энергией  $W_p$  притяжения к центру масс вселенной. Соответствующие выражения известны из школьного курса физики:

$$W_c = \frac{mV^2}{2},$$

$$W_p = \frac{-G \cdot M \cdot m}{R}. \quad (50)$$

Ясно, что пока кинетическая энергия выше потенциальной, выделенная нами масса вещества  $m$  должна удаляться от центра Вселенной. Выразим массу вселенной по (49), возьмем отношение двух энергий и заменим скорость  $V$  произведением постоянной Хаббла на радиус Вселенной:

$$\Omega = \frac{W_p}{W_c} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{3 \cdot H^2} \cdot \rho. \quad (51)$$

Как видно, величина отношения  $\Omega$  не зависит от размера Вселенной и прямо пропорциональна средней плотности Вселенной  $\rho$ . Коэффициент пропорциональности определяется отношением гравитационной постоянной к квадрату постоянной Хаббла. Комбинацию величин, стоящих как множитель в формуле (51) перед средней плотностью  $\rho$ , можно заменить одной новой константой  $\rho^*$ :

$$\rho^* = \frac{3 \cdot H^2}{8 \cdot \pi \cdot G}. \quad (52)$$

Физический смысл введенной константы в том, что ее величина определяет значение плотности вселенной, при которой отношение двух

энергий равно единице. Если среднее значение плотности вещества во Вселенной меньше критического значения  $\rho^*$ , то преобладает кинетическая энергия и Вселенная будет только расширяться. Наоборот, если плотность Вселенной выше критического значения, то постепенно процесс расширения перейдет в процесс сжатия, коллапса Вселенной.

Третий вариант, когда выполняется равенство критического значения и реальной плотности вселенной, соответствует постепенному замедлению расширения без обращения процесса к коллапсу.

Различие сценариев будущего Вселенной представлено на рис. 78 тремя качественными графиками.

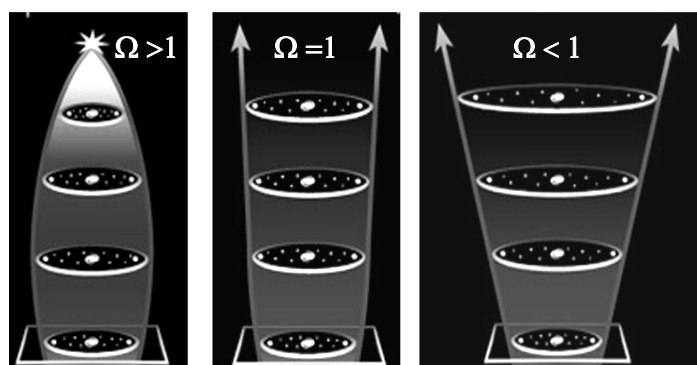


Рис. 78. Три теоретических варианта будущего Вселенной:  
 1 – последующее сжатие, 2 – замедленное расширение,  
 3 – равномерное расширение

Безразмерный параметр  $\Omega$ , указанный возле кривых, показывает величину отношения наблюдаемой средней плотности и критического значения  $\Omega = \rho/\rho^*$ . Чтобы сделать прогноз дальнейшего развития Вселенной, необходимо экспериментально определить численное значение средней плотности Вселенной. Это достаточно трудная задача для астрофизиков.

При попытке ее решения в недавние годы были получены сенсационные результаты, которые теоретическая модель не могла предвидеть. Здесь в очередной раз сказалась незавершенность достигнутого в космологии научного знания. По наблюдениям за вспышками сверхновых звезд, происходившими много лет тому назад, был сделан вывод об *ускоренном* расширении вселенной. Оценки 2003 г. показали, что, при сохранении наблюдаемого сегодня темпа ускорения, через 22 млрд лет станет возможным Большой разрыв вселенной. Художественная интерпретация процесса приведена на рис. 79.

Расхождение наблюдаемого состояния Вселенной и теоретической модели Вселенной с однородным распределением вещества в ней показывает, что какие-то факторы не были в модели учтены.



Для объяснения теоретики постулировали присутствие нового вида энергии, равномерно заполняющего пространство Вселенной. Поскольку природа этого вида энергии сейчас не установлена, ее назвали «темной энергией» (не путать с *темной материей!*). Важной особенностью этой энергии является создание давления на пространство вселенной.

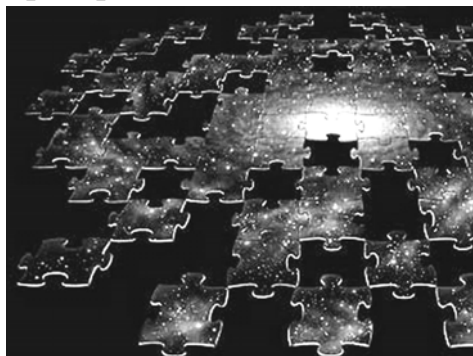


Рис. 79. Большой разрыв вселенной

Считают, что ранее действие давления расширения было скомпенсировано силами притяжения вещества по закону всемирного тяготения. Но в результате расширения Вселенной (по сценариям рис. 78), когда на определенном этапе объемная плотность вещества уменьшилась и стала меньше объемной плотности темной энергии (вспомним формулу Эйнштейна), действие этой энергии себя проявило. В

этом объяснении принято, что плотность энергии в расширяющемся пространстве остается без изменения (что возможно, если источником энергии служит само пространство).

Таким образом, в последние годы в современной космологии наметился определенный переворот в представлениях о свойствах пространства мегамира.

### 6.5. Концепция Большого взрыва

В приведенном выше анализе мы не оговаривали в явном виде одно положение, считая его само собой разумеющимся. Речь идет о сохранении массы  $M$  вещества в расширяющейся Вселенной. Если масса постоянна, то в будущем вещество Вселенной в среднем станет более разреженным. Наоборот, в прошлом Вселенная была гораздо более плотной, чем в современную эпоху. Это автоматически следует из положения о сохранении массы и наблюдаемого расширения. Так что если мы мысленно отправимся в прошлое, нам придется констатировать все более плотное вещество во Вселенной всё меньших размеров. И тогда в самом далеком прошлом мы неизбежно придем к началу всего сущего, к акту *однократного сотворения* первовселенной со всей ее массой-энергией. Такова, вкратце, суть концепции «Вселенной, имеющей начало».

Однако можно дать и другую, альтернативную, интерпретацию факту разбегания галактик. В 1946 г. Ф. Хойл, Т. Бонди и Т. Голд (США) предложили концепцию стационарной вселенной, не имеющей

во времени «дня рождения» и поэтому не имеющей возраста (стационарной). Суть её заключается в предположении существования неких процессов, приводящих к *непрерывному сотворению* вещества во Вселенной. По их мнению, Вселенная существовала всегда, а разрежение вещества, обусловленное её расширением, компенсируется непрерывным вечным творением нового вещества.

Сторонником первой концепции был Джордж Гамов, американский физик российского происхождения («невозвращенец» в СССР). В своем варианте космологической модели Гамов предположил, что ядра химических элементов могли образоваться в чрезвычайно плотном и высокоэнергетичном (горячем) нейтронном газе, который должен существовать в «первичном аду».



Часть нейтронов распадается на протоны и электроны, из которых затем собираются атомы водорода. Ядра водорода последовательно захватывают дополнительные нейтроны и протоны с образованием нуклидов других элементов. Процесс наработки химических элементов продолжается до тех пор, пока объем Вселенной не увеличится настолько, что температура станет

ниже порога ядерных реакций. По Гамову, сверхгорячее состояние, подобное ядерному взрывному процессу, просто необходимо для образования привычного для человека набора химических элементов. С другой стороны, знание условий, при которых происходят ядерные реакции, дает информацию об условиях в «первичном аду».

Так перекрываются области интересов космологии и ядерной химии. Атмосферу научного соперничества идей может передать небольшая цитата из статьи С. Дж. Браша «Как космология стала наукой»:

*Хойл попытался принизить значение конкурента своей теории стационарной Вселенной, назвав эту новую версию «the big bang theory» (теория большого хлопка), но эта попытка обернулась против него: фраза оказалась столь выразительной, что была принята последователями самой теории.*

На русский язык название теории Г.А. Гамова переводят как «теория Большого взрыва». По принципу противопоставления, для другого критического состояния вселенной и было предложено название Большой разрыв (у физиков хорошее чувство юмора, не так ли?)

Выбор между концепциями предстояло сделать на основании сравнения теоретических предсказаний альтернативных моделей и наблюдаемого строения объектов Вселенной. Скорость света конечна, поэтому чем дальше от нас расположены объекты, тем позже дойдут до нас

испущенные ими электромагнитные излучения. Это значит, что близкие галактики мы видим почти такими, какие они есть. От далеких галактик сейчас к нам поступает информация о положении, бывшем миллиарды лет тому назад. По выражению одного из физиков, «Астрономия – это археология во времени». Сравнивая картины далеких и близких галактик, можно получить аргументы в пользу выбора «правильной» концепции.

Согласно сторонникам стационарной Вселенной, она выглядит всегда одинаково, так что далекие галактики не должны отличаться от близких. Наблюдения говорят, что это не так. В частности, установлено, что в прошлом (т. е. для далеких галактик) столкновения и слияния галактик происходили гораздо чаще, чем в современную эпоху. С развитием радиоастрономии были открыты квазары – квазизвездные источники радиоизлучения гигантской светимости. Оказывается, что все квазары удалены от нас настолько, что их считают самыми старыми объектами, которые еще можно наблюдать с Земли (из-за конечности скорости света). Среди близких галактик аналогов квазарам нет. Приведенные факты показывают динамичность Вселенной в соответствии с концепцией начального творения. Еще большее обоснование теория Большого взрыва получила в середине 60-х гг. XX в., когда было открыто *реликтовое тепловое излучение*, оставшееся во Вселенной, как общий космический фон, до современной эпохи.

Из повседневного опыта мы знаем, что нагретые тела излучают энергию. Достаточно вспомнить хотя бы небольшой костерок, возле которого Вы сидели в один из вечеров Вашей жизни. Тем более должно было излучать энергию экстремально нагретое вещество во Вселенной малых пространственных размеров.

В силу ограниченности объема первоначальной Вселенной, вещество и излучение (электромагнитные волны различных частот) неизбежно должно было быть в энергетическом равновесии. Поэтому говорят, что начальная Вселенная была заполнена равновесным тепловым излучением. Квантовая механика предсказывает, какую форму имеет спектр равновесного теплового излучения абсолютно черного тела (далее в тексте – АЧТ) при различных температурах. Спектр излучения АЧТ описывается формулой М. Планка:

$$r_{\lambda} = \left( \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \right) \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (53)$$

где  $T$  – температура излучателя;  
 $k$  – постоянная Больцмана;

$c$  – скорость света;

$e$  – основание натуральных логарифмов;

$\nu$  – частота электромагнитного излучения;

$h$  – постоянная Планка;

$r_\nu$  – спектральная плотность энергетической светимости излучателя, равная энергии, излучаемой за единицу времени с единицы поверхности излучателя в единичном интервале частот.

Из формулы Планка можно вывести все экспериментально наблюдаемые закономерности в спектрах нагретых тел. Кстати, отметим, что спектр АЧТ и формула Планка никак не связаны ни с конкретным химическим составом излучателя, ни с его агрегатным состоянием. Формула (53) – одна из самых общезначимых формул, применимая вплоть до экстремальных состояний вещества.

Согласно теории Планка в области высоких частот излучения спектральная функция убывает пропорционально экспоненте с показателем  $(-h\nu/kT)$ . В области около нуля, при возрастании частоты, спектральная плотность светимости растет пропорционально квадрату частоты. Очевидно, что между ростом и последующим спадом есть область максимальной светимости. Положение максимума светимости на шкале длин волн и температура излучателя связаны законом смещения Вина:

$$\lambda^* = \frac{b}{T}, \quad (54)$$

где  $\lambda^*$  – длина волны, на которую приходится максимальная светимость в спектре излучения;

$T$  – температура излучателя;

$b$  – постоянная Вина.

При экстремально высокой температуре максимум светимости приходился на область высокоэнергетического гамма-излучения (образование гелия из водорода требует температуры порядка  $10^{10}$  К). По мере остывания Вселенной, при её расширении, область максимума светимости в спектре должна перемещаться в сторону длинных волн. Гамов считал, что для современной эпохи равновесная температура должна быть около 50 К. При такой температуре максимум спектра должен находиться в области микроволнового (0,6 мкм) излучения.

Его оппонент Хойл указывал, что такое значение не согласуется с данными о температуре молекул циана CN, существующих в межзвездной среде. По оценкам, сделанным для циана, температура соответствует 2,3 К.

В 1964 г. было открыто космическое радиоизлучение, неожиданной особенностью которого была «всенаправленность». Вне зависимости

от направления антенны, его регистрировали с одинаковой интенсивностью со всех сторон и днем и ночью как равномерный микроволновый шум. От него невозможно было избавиться, и сначала его рассматривали как помеху.

Позднее было понято, что основные характеристики данного радиоизлучения соответствуют ожидавшимся для остаточного теплового излучения Большого взрыва. Чтобы убедиться в том, что открытое изотропное излучение имеет непрерывный спектр с максимумом и спадающую ветвь, потребовалось около десяти лет. К середине 70-х гг. XX в. планковский характер излучения был достоверно установлен, и в 1978 г. А. Пензиас и Р. Уилсон (обнаружившие его в 1964 г.) получили Нобелевскую премию. В 2006 г. такую же премию получили Д. Мазер и Дж. Смут за рекордно точные измерения спектра реликтового излучения, приводящие к значению температуры излучения 2,726 К. Это значение хорошо согласуется с данными, полученными из измерений соотношения линий в спектре молекул циана в космосе.

Присутствие во Вселенной изотропного и равномерного микроволнового (в диапазоне 0,5–5 мм) фона считают самым важным наблюдательным подтверждением концепции Большого взрыва. Стационарная концепция Вселенной была признана несостоятельной.

В конце 80-х гг. прошлого века в СССР проводился спутниковый космический эксперимент «Реликт», задачей которого был поиск небольших неоднородностей в распределении фонового теплового излучения Большого взрыва. Они должны существовать как свидетельство начальных небольших неравномерностей в распределении массы вещества протовселенной. Без них в теории «не получается» образования локальных сгущений, порождающих галактики и звезды.

В местах сгущения массы локальное усиление гравитационного поля должно тормозить фотоны (вспомним об их динамической массе), уменьшая их энергию. Поэтому фоновое излучение этих областей должно казаться относительно холодным. По сравнению с ними фоновое излучение из областей разрежения массы будет казаться «более теплым». Неравномерности структуры в настоящее время должны проявляться на картах микроволнового излучения неба в виде пятен, которым соответствуют различающиеся температуры. Некоторые неравномерности действительно были отмечены.

Более достоверно существование вариаций реликтового теплового излучения было установлено в 1992 г. после запуска в США (1989 г.) космического аппарата COBE. Это означает, что уже на начальной стадии расширения Вселенной существовала «рябь» – флуктуации в распределении массы-энергии по её объему. Дальнейшее гравитационное

сгущивание вещества порождает «космические пузыри», в которых отсутствует вещество и «стенки пузырей», состоящие из сверхскоплений и скоплений галактик.

### *Из чего рождается Вселенная?*

Теория Большого взрыва в настоящее время является доминирующей теорией в космологии. Она признает рождение Вселенной как физический факт материального мира. Главной проблемой космологии является поиск ответа на поставленный в заголовке вопрос. Постараемся наметить общий подход, который вырисовывается в современном естествознании, для выработки ответа.

Прежде всего отметим, что классическая физика различает две формы существования материи: вещество и поле. Неклассическая, квантовая, физика показывает дуализм их свойств на уровне микромира, где существует некоторое минимальное разнообразие фундаментальных частиц полей (как правило, безмассовых) и частиц вещества (обладающих массой покоя). Частицы полей и вещества могут превращаться друг в друга, поскольку существует эквивалентность массы и энергии.

Современное естествознание подошло к выделению ещё одной формы существования материи – физического вакуума. Твердые, жидкие, газообразные вещества окружают человека, они ему привычны, их свойства исследованы в первую очередь. Некоторые поля (тяготения Земли, света и теплового излучения) человек также ощущает, хотя отсутствие четко выраженной геометрической формы полей требует большего интеллекта в исследовании их свойств. Свойства физического вакуума ещё мало изучены, и здесь требуются значительные интеллектуальные усилия для их понимания.

Они выглядят столь же непривычными и странными, как свойства частиц-волн в период становления квантовой физики. Физический вакуум не является абсолютной и стационарной пустотой, в нем непрерывно происходит виртуальное рождение и аннигиляция пар «частица–античастица». По аналогии с более известными явлениями макромира, такими, как поляризация диэлектриков, фазовые переходы между агрегатными состояниями или спонтанные изменения симметрии кристаллов, пытаются описать свойства вакуума. Вводится ассоциативная терминология: поляризация вакуума, спонтанное нарушение симметрии его вещественно-полевого состояния и ряд других.

Экспериментальные наблюдения эффекта Казимира показали, что даже в сравнительно простых условиях можно зарегистрировать влияние физического вакуума на процессы в макромире.

Эффект Казимира состоит в проявлении силы притяжения двух металлических пластин, изменяющейся с расстоянием между пластинами по зависимости

$$F \propto \frac{1}{d^4}. \quad (52)$$

Пространство между пластинами образует своеобразный резонатор (рис. 80), в котором могут реализоваться только стоячие волны с длиной волны кратной расстоянию между пластинами (см. п. 2.3, стоячие волны на струнах).

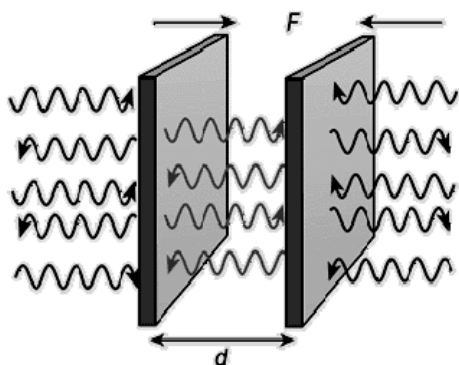


Рис. 80. Схема к объяснению эффекта Казимира

Для пространства вне пластин такого ограничения не накладывается и количество виртуальных волн будет неограниченным. Плотность энергии вакуума между пластинами будет меньше, чем снаружи, и появляется соответствующее давление на пластины.

Для исследования свойств вакуума на ускорителях требуются частицы-волны большой энергии, чтобы можно было «возмутить» непривычно энергоёмкую форму материи. Очевидно, что при анализе акта рождения Вселенной необходимо учитывать наличие и необычность свойств вакуума.

В самой общей формулировке ответ на проблемный вопрос сейчас дается в таком виде:

*Вселенная рождается из физического вакуума, как следствие спонтанного (самопроизвольного) изменения его энергомассового состояния.*

При этом акт рождения Вселенной в принципе не противоречит закону сохранения полной энергии Вселенной. На первый взгляд это утверждение парадоксально. Но давайте рассмотрим аргументацию академика Я.Б. Зельдовича. По его мнению, формулировка самого общего закона природы в виде «Из ничего не может образоваться ничего» является ненаучной и наивной. Во-первых, что для физика означает «ничего»? Содержательным ответом будет:

- «Ничего»:
1. Масса равна нулю:  $M = 0$ .
  2. Полная энергия равна нулю:  $W = 0$ .

Во-вторых, по условию «задачи», кроме Вселенной ничего больше не рождается и она является изолированной системой. Для неё можно применять закон сохранения энергии, в данном случае значение

начальной энергии равно нулю и должно оставаться нулевым. Это единственное ограничение, все остальное разрешено.

С появлением массы Вселенной  $M$  появляется гравитационная энергия взаимодействия всех её частей, и эта энергия *отрицательная*. По формуле Эйнштейна эквивалентная образованной массе энергия  $Mc^2$  должна быть *положительной*. Если эквивалентная величина энергии и энергия гравитационного поля равны по абсолютной величине, то их сумма (то есть полная энергия системы) будет равна нулю, что и необходимо для удовлетворения требований закона сохранения.

В книге Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица «Теория поля» строго математически доказано, что точная компенсация происходит тогда и только тогда, когда становится замкнутым искривленное пространство, в котором находится вещество.

Как пишет Я.Б. Зельдович, *энергия «ничего» равна нулю. Но и энергия замкнутой Вселенной равна нулю. Значит, закон сохранения энергии не противоречит образованию «из ничего» замкнутой Вселенной (но именно геометрически замкнутой, а не открытой бесконечной Вселенной).*

### ***Инфляция Вселенной***

Теория Г. Гамова неоднократно дополнялась другими космологами. В частности, в работах А. Гута, позднее А. Линде, П. Стейнхардта и других развито представление о том, что практически сразу после выхода из сингулярности (точки, в которую была стянута вся энергия-масса Вселенной) за время порядка  $10^{-32}$  с Вселенная расширилась в  $10^{30}$  раз.

Этот этап Большого взрыва теперь называют фазой инфляции Вселенной, по аналогии с ростом денежной массы при инфляции в экономике. Фаза инфляции очень важна. В этот период локальные вариации температуры расширялись и сглаживались, а начальная громадная кривизна пространства резко уменьшилась.

После инфляции Вселенная стала плоской (т. е. без кривизны). Кроме того, эта фаза запускает механизм образования крупных космических структур: ничтожно малые флуктуации квантовой энергии-массы расширились вместе с пространственно-временным континуумом и превратились в макроскопические области повышенной плотности, предшественники скоплений галактик. То, что после инфляции Вселенная не обладает большой кривизной, согласуется с близким к единице значением параметра  $\Omega$ .

Каковы причины быстрого расширения Вселенной в фазе инфляции? В современных теориях поля вакуум может существовать



в нескольких состояниях: либо с равной нулю плотностью энергии (основное состояние), либо с положительной плотностью энергии и отрицательным давлением (состояние «ложного» вакуума).

Рождение Вселенной происходит при «ложном» вакууме, и пока это состояние существует, Вселенная экспоненциально расширяется. Причина в том, что отрицательное давление означает антигравитацию, разлет частиц вещества. А что может остановить безудержное расширение? Оказывается, состояние «ложного» вакуума неустойчиво и за некоторое время происходит фазовый переход в состояние обычного вакуума с обычной гравитацией при положительном давлении.

Некоторые теоретики считают, что при фазовом переходе появляющиеся «пузыри» обычного вакуума представляют собой отдельные и не связанные между собой вселенные, одна из которых является «нашей». Такая точка зрения является философски обостренной. Ведь тогда не только наша Земля не является центром мироздания, но и наша Вселенная им не является, оказываясь одной из множества других! Подобное представление о Мультиверсуме может быть названо экстремально коперниковской концепцией.

### *Другие этапы Большого взрыва*

Последовательность процессов, происходящих после фазового перехода в обычный вакуум, при степенном (пропорционально степени 2/3) темпе расширения нашей Вселенной, более уверенно описывается теориями объединенных взаимодействий. Мы выделим лишь самые характерные моменты.

Фаза инфляции занимает чрезвычайно малое время. При выходе из нее температура настолько высока, что частицы вещества существовать не могут. Поэтому Вселенная заполнена квантами полей. Фотоны рожают пары частиц и античастиц, которые тут же аннигилируют. Температура излучения соответствует  $10^{14}$  К. С понижением температуры Вселенной по закону

$$T = 10^{10} \frac{1}{\sqrt{t}}$$

начинаются реакции рождения частиц вещества, и примерно до 1 мкс Вселенная заполнена «бульоном» из фотонов, кварков и лептонов, причем квантов излучения намного больше (в  $10^5$  раз).

На рубеже нескольких микросекунд происходит образование адронов из кварков и антикварков, в том числе появляются протоны и антипротоны. Необходимо заметить, что между веществом и антивеществом есть небольшое нарушение «паритета»: частиц обычного вещества

накапливается немного больше, чем антивещества. Нейтрино и электроны превращаются друг в друга, по мере понижения температуры реакция сдвигается в сторону накопления все большего числа электронов.

На рубеже миллисекунд накопившихся электронов так много, что начинают образовываться нейтроны, когда электроны соединяются с протонами. Свободные нейтроны нестабильны, среднее время их существования до распада на протон и электрон равно 100 с, поэтому последующие несколько минут являются решающими для синтеза ядер гелия.

По истечении трех минут температура снижается до  $10^8$  К и нуклеосинтез практически прекращается, вещество становится слишком холодным для протекания таких реакций по всему объему Вселенной.

За первые минуты около четверти протонов (ядер водорода) успевают превратиться в ядра гелия  $^4\text{He}$ , трития  $^3\text{H}$ , дейтерия  $^2\text{H}$  и лития  $^7\text{Li}$ . Остальные протоны «пойдут» в последующем на образование молекулярных облаков, звезд и галактик.

Спустя примерно 300 000 лет температура снижается до нескольких тысяч кельвинов, это уже позволяет ядрам удерживать электроны на орбитах. Фотоны электромагнитного излучения, всегда бывшие в тепловом равновесии с веществом, при такой температуре уже не могут ионизовать атомы водорода или гелия. Это значит, что они больше не поглощаются веществом, заполняющим Вселенную, и она становится для них прозрачной.

Образно говоря, с этого времени «расходятся пути» вещества и излучения, теплового равновесия между ними больше нет. Именно это изотропное и однородное тепловое излучение до настоящего времени как реликтовое. Но почему максимум спектра соответствует нескольким кельвинам, а не нескольким тысячам кельвинов?

Так как нет поглощения, спектр фотонов остается планковским. Если бы расширения Вселенной не происходило, спектр оставался бы неизменным. В расширяющемся пространстве импульсы всех фотонов (по отношению к нему) уменьшаются. Конечно, скорость фотонов остается равной скорости света, но импульс определяется произведением динамической массы фотона на скорость света, и уменьшается именно масса каждого из фотонов. В целом происходит «покраснение» всего планковского спектра так, что максимум смещается в область миллиметрового радиодиапазона.

Первые галактики и квазары формируются из гравитационно сгущенных облаков молекулярного водорода через миллиард лет после начала расширения. До появления звезд во вселенной был период, когда все пространство было заполнено инфракрасным излучением уже остывшей Вселенной (темные времена, см. рис. 81).

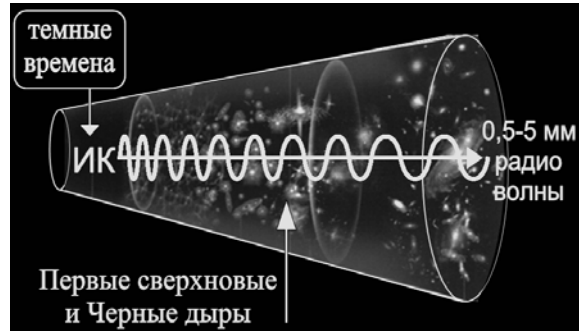


Рис. 81. Эволюция теплового излучения при расширении Вселенной

Затем появляется световое электромагнитное излучение первичных звезд, но оно уже никак не связано с фоновым излучением, равномерно и изотропно распределенном в пространстве Вселенной.

### 6.6. Концепции космического рециклинга

В повседневной жизни повторное использование лома цветных металлов, упаковочных и отработанных конструкционных материалов называют рециклингом. Примером естественного процесса рециклинга является круговорот воды в природе, в условиях Земли. Здесь есть атмосфера, суша и океан, с участием которых реализуется цикл. Есть поступление солнечной энергии и теплоотдача в космос, обеспечивающие фазовые переходы между агрегатными состояниями воды. Химический состав и полная масса её в цикле сохраняются. В биосфере Земли можно выделить цикл оборота азота, фосфора и других важных для живых организмов элементов.

Существуют естественные циклы многократного «использования» вещества и в масштабах Вселенной. В первую очередь это цикл водорода – основной химической составляющей галактик и звезд. Для поддержания циклов требуется энергия. Во Вселенной это энергия гравитации и термоядерных реакций. Изучая рециклинг водорода и других элементов в космосе, мы можем осознать «предназначение» звезд, их творческую (без кавычек!) роль в нуклеосинтезе.

Фактически без звезд эволюция вещества закончилась бы на самых легких элементах: литии, боре и бериллии. Ядра всех других элементов, существующих в природе, в масштабе всей Вселенной были образованы (сотворены) в недрах звезд. Представьте себе: ядра всех атомов, из которых Вы состоите, были когда-то частью звезд! Так что все мы «немножко звезды»...

#### *Что первично – галактики или звезды?*

Иногда говорят, что звезды – это алфавит языка Вселенной, словами и предложениями являются галактики и их скопления. Понятна

последовательность написания книги – от слова к строчке и странице. В какой последовательности пишется великая книга Вселенной? Образование одиночной звезды не исключается, в гало галактик имеются звезды, которые не относятся к каким-либо скоплениям. Но, по большей части, звезды образуются группами.

В составе нашей Галактики примерно половина звезд образуют двойные системы, в некоторых других галактиках доля двойных звезд ещё выше. В меньшей пропорции наблюдаются тройные и системы, где две пары звезд обращаются вокруг общего центра. Принято считать, что галактики образуются в едином процессе образования многих звезд.

Жизнь одной звезды быстротекуща по сравнению со временем существования галактик. Звезды рождаются, живут и умирают. Галактическое образование меняет форму, но остается в целом устойчивой системой. По оценкам, время «выгорания» массивной звезды первого поколения (с массой около 20 солнечных) не превышает 100 млн лет. Возраст же галактик порядка 10 млрд лет. Как отмечалось выше, галактики могут гравитационно взаимодействовать и сливаться за вселенски большие периоды времени.

Одна из первых космогонических концепций была развита в античные времена Левкиппом. Приведем его описание процесса образования структурных элементов во Вселенной:

*Возникновение миров происходит так. Из беспредельности отделяется и несется в великую пустоту множество разнообразных тел. Скапливаясь, они образуют единый вихрь, а в нем, сталкиваясь друг с другом и всячески кружась, разделяются по взаимному сходству. И так как по многочисленности своей они уже не могут кружиться в равновесии, то легкие тела отлетают во внешнюю пустоту, словно распыляясь в ней, а остальные остаются вместе, сцепляются, сбиваются в общем беге и образуют таким образом некоторое первоначальное соединение в виде шара. Оно, в свою очередь, отделяет от себя как бы оболочку. По мере того как она вращается в вихре, отталкиваемая от середины, эта внешняя оболочка становится тонкою. Из того, что уносилось в середину, и там держалось вместе, образовалась Земля. А сама окружающая оболочка тем временем росла, в свою очередь, за счет притока тел извне: вращаясь вихрем, она принимала в себя все, чего ни касалась. Некоторые из этих тел, сцепляясь, образовали соединение, которое сперва было влажным и грязным, потом высохло и закружилось в общем вихре, и, наконец, воспламенилось и стало природою светил. Все светила воспаляются от быстроты движения, а Солнце воспаляется еще и от звезд [1].*

Этот первый очерк космогонической гипотезы будет впоследствии, в XVII в. развит Декартом, а в XVIII в. – Кантом и Лапласом.

В современную эпоху формирование Млечного Пути теоретически описывается тремя космогоническими моделями. В одной из них он образуется при относительно быстром коллапсе (гравитационном падении вещества на центр масс системы) одного гигантского молекулярного облака-протогалактики (модель 1962 г. О. Эггена – Д. Линден-Белла – А. Сэндэйжа).

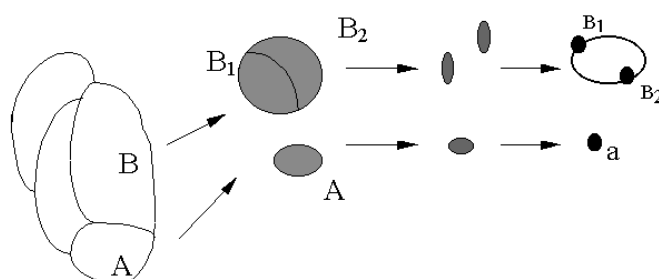
По модели А. Тумре, предложенной в 1977 г., происходит слияние нескольких крупных газопылевых комплексов с различной степенью их «продвинутости» по пути формирования собственных галактик. Она больше учитывает новые данные наблюдений за шаровыми скоплениями гало Галактики. Сферическое гало медленно вращается вокруг центра Млечного Пути, пересекая его спиральный диск. Удивительно, что некоторые из шаровых скоплений, как показывают современные наблюдения, вращаются против основной части гало. Это может быть объяснено моделью слияния облаков с различным направлением их вращения.

Третья модель Л. Сирла – Р. Цинна сходна с моделью Тумре, но исходный комплекс состоит из большего числа сравнительно малых кластеров. В последнем случае очевидна возможность протекания эволюции химического состава различных и удаленных друг от друга фрагментов независимо друг от друга. Тем самым объясняется разница в поколениях звезд балджа (центрального утолщения), диска, шаровых скоплений и рассеянных звездных групп. Действительно, отношение содержания кислорода к железу заметно отличается для звезд гало и старых звезд диска. В настоящее время считается, что простая первая модель применима к центральной части, тогда как более разреженные внешние области могли возникнуть путем слияния, как предсказывают последующие модели.

Возникает вопрос: какие физические факторы исходного гигантского холодного облака молекулярного водорода определяют, что из него получится – протогалактика или рассеянное звездное скопление? По-видимому, таким фактором является масштаб неоднородностей в облаке. Интуитивно можно ожидать, что при сжатии кучковатого, неоднородного облака в нем выделятся области с повышенной плотностью вещества, внутри которых выделятся фрагменты меньших размеров с еще большей плотностью, и так до образования протозвезды (см. рис. 82).

Известный американский астрофизик Д. Лейзер показал, что в таком случае (в распределенном веществе с флуктуациями плотности) положительные и отрицательные флуктуации дают примерно одинаковые

вклады и что величина флуктуирующей гравитационной силы практически целиком определяется конкретным распределением массы внутри сферы, радиус которой не превышает нескольких линейных масштабов флуктуаций. Вклады же других, более удаленных от точки наблюдения, областей взаимно уничтожаются. Это означает, что в неоднородной среде появляются области взаимопритяжения с ограниченным радиусом действия.



*Рис. 82. Схема формирования протозвезд*

Ситуация становится похожей на взаимодействие молекул реального газа, в котором при определенных условиях возникает критическое состояние самопроизвольного роста неоднородных областей. Это явление известно как критическая опалесценция (граница между жидкой фазой и газом теряется, и среда становится мутной). Продолжая аналогию, Лейзер развил теорию, согласно которой сгущивание вещества во Вселенной непрерывно возрастает. По его теории, если относительная амплитуда флуктуаций плотности достигает порядка единицы, область неоднородностей определенного пространственного масштаба выделяется в самогравитирующую систему.

### ***Параметры звезд***

О химическом составе внешней оболочки звезд – фотосферы – судят на основании данных спектрального анализа, не только качественного, но и количественного. В итоге большой работы астрофизиков удалось выяснить, что в общих чертах химический состав многих звезд удивительно похож.

Он характеризуется полным преобладанием водорода. На втором месте находится гелий, а содержание всех остальных элементов сравнительно невелико. Достаточно сказать, что на каждые 10 000 атомов водорода приходится 1000 атомов гелия, около 10 атомов кислорода, немного меньшее количество углерода и азота и всего лишь один атом железа. Содержание элементов с большей, чем у железа, массой ничтожно мало.

Какие выводы следуют из этого? Можно сказать, что наружные слои звезд – это гигантские водородо-гелиевые плазменные оболочки с небольшой примесью более тяжелых элементов. Конечно, нет правил без исключений... Есть звезды с аномально высоким содержанием углерода, или встречаются удивительные звезды с высоким содержанием редких элементов, которых и на Земле немного. Для выяснения типовых процессов энерговыделения эти частные особенности большого значения не имеют.

Индикатором температуры фотосферы служит её цвет. Горячие звезды спектральных классов О и В имеют голубой цвет, звезды, похожие на Солнце, выглядят желтыми, а звезды спектральных классов К и М представляются красными. Спектральных классов семь: О, В, А, Ф, Ж, К, М. Спектр звезд хорошо описывается формулой Планка (53) с соответствующим значением температуры  $T$ .

В зависимости от спектрального класса температура плавно меняется от значения 50–40 тыс. К для звезд класса О и до 3 тыс. К для звезд спектрального класса М. Указание спектрального класса звезды аналогично указанию температуры её поверхности. Зная температуру (по спектральному классу) и светимость, можно оценить радиус звезды.

При одинаковой температуре звезды с большим энерговыделением должны иметь большую поверхность, чтобы обеспечить высокую полную светимость. Можно было бы думать, что во Вселенной встречаются самые разные сочетания параметров звезд, без особых «предпочтений». Однако прямые астрономические наблюдения показывают, что есть закономерное распределение звезд по их размерам и температуре фотосферы. Если по вертикали указывать светимость (или её величину, радиус), а по горизонтальной оси – цвет (или спектральный класс, температуру), то распределение большинства звезд (в их скоплениях) попадает в сравнительно узкую полосу, по диагонали проходящей от голубых звезд с высокой светимостью к красным звездам с низкой светимостью (низкой температурой фотосферы).

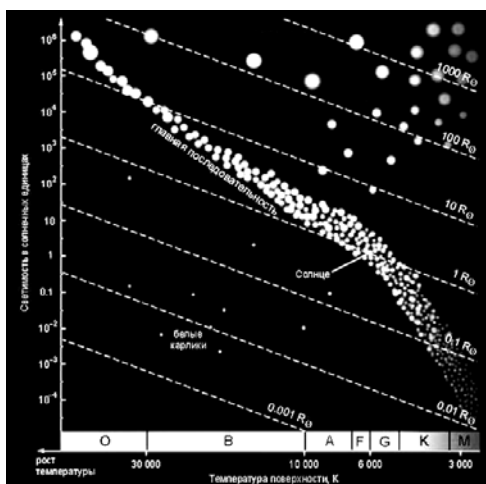


Рис. 83. Главная последовательность звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела

радиус), а по горизонтальной оси – цвет (или спектральный класс, температуру), то распределение большинства звезд (в их скоплениях) попадает в сравнительно узкую полосу, по диагонали проходящей от голубых звезд с высокой светимостью к красным звездам с низкой светимостью (низкой температурой фотосферы).

Эта последовательность получила название главной (рис. 83). Ниже её на координатном поле располагаются звезды, отнесенные к белым карликам, тогда как выше

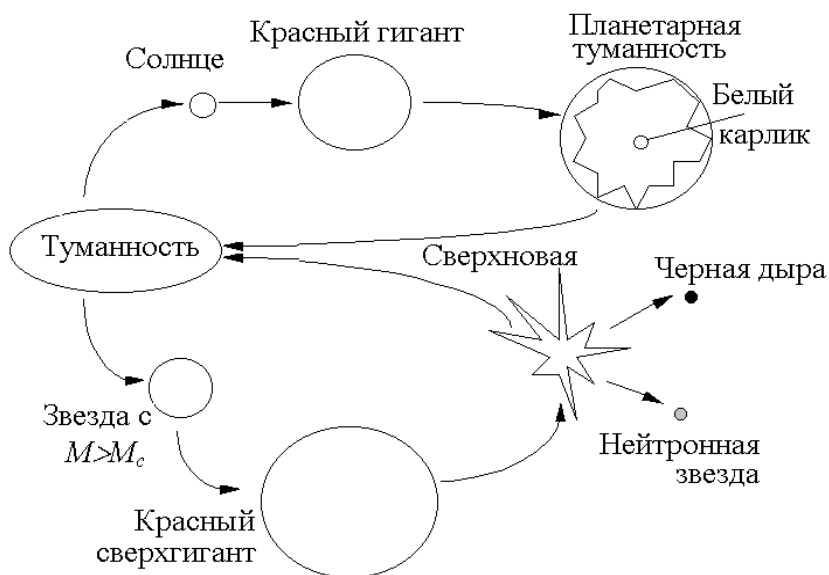
расположены красные гиганты. Теория эволюции звезд должна объяснять существование как гигантов, так и карликов среди множества обычных звезд.

Ход эволюции звезд различной массы обычно представляют в виде линий на диаграмме *цвет–светимость*, которая носит название диаграммы Герцшпрунга-Рессела.

Согласно типовому треку на этой диаграмме, в далеком будущем, на стадии Красного гиганта, наше Солнце должно настолько увеличиться в размерах, что поглотит планеты Меркурий и Венеру, а Землю нагреет до температуры 1000 К! Все живое на Земле должно будет погибнуть. Человечеству придется думать о поиске более подходящих условий для жизни. Близкими к современным условиям они будут тогда в области орбит планет-гигантов: Юпитера и Сатурна. Один из спутников Юпитера – Тритон мог бы послужить подходящим местом для его заселения потомками землян.

### ***Циклы эволюции звезд***

Звезды рождаются из вещества, рассеянного в пространстве Вселенной, перерабатывают водород в гелий и другие элементы и, заканчивая свою эволюцию во взрывах сверхновых, возвращают вещество в космическое пространство (рис. 84).



*Рис. 84. Схема двух ветвей космического рециклинга вещества*

Но это уже качественно другое вещество, с другим элементным составом, которое вновь рассеивается по Вселенной. Среди «возвращенного» вещества появляются не только новые элементы, но и их соеди-



нения: OH, CN, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CHO, и ещё более сложные соединения. Образно говоря, в этом предназначение звезд, их функция.

Рассмотрим некоторые типы звезд, входящие в круговорот вещества во Вселенной.

### *Белые карлики*

Считают, что Белыми карликами становятся звезды главной последовательности в конце их «жизненного пути», если их масса не превосходит солнечную более чем в 1,4 раза. В таких случаях масса остаточного вещества будет недостаточной для неудержимого гравитационного коллапса. Ядерное горючее (водород) выработано, нет высокого давления плазмы, радиус звезды уменьшается в сотни раз. Соответственно изменению объема возрастает плотность плазмы, электронный газ переходит в состояние вырождения, что стабилизирует ситуацию: сжатие прекращается. Теплоемкость звезд очень велика, поэтому Белый карлик долго светит «по инерции», переходя в разряд Коричневого и Черного (невидимого) карлика. Другой путь образования Белого карлика – при сбросе внешней части Красного гиганта.

### *Красные гиганты*

Это звезды с массами, примерно равными массе Солнца или ненамного большими. Когда в центре желтой звезды выгорает водород (его место занимает гелиевая сердцевина), внутри звезды назревают крупные перемены. Гелиевая сфера все больше сжимается, выделяющаяся гравитационная энергия передается на внешний слой, окружающий гелиевое «ядро», и там начинается протон-протонный цикл. Возрастающее давление «раздувает» звезду до размеров в десятки раз больших, чем в начале. Цвет звезды становится красным, так как площадь фотосферы растет быстрее, чем увеличивается энерговыделение.

Если в объеме Красного гиганта на предыдущем этапе его «жизненного пути» накопилось достаточно большое количество ядер углерода, то возможно возникновение ещё одного цикла реакций. Углеродно-азотный каскад термоядерных превращений включает шесть реакций, в которых действующими «лицами» являются изотопы углерода, азота, кислорода, водорода (протоны) и ядра гелия-4. Последней реакцией цикла является восстановление исходного ядра углерода из ядра изотопа азота:



В данном цикле водород превращается в гелий с помощью катализатора углерода-12, количество которого не меняется. Суммарное, ба-

лансовое выделение энергии составляет около 25 МэВ на один цикл. Особенно благоприятны условия для протекания углерод-азотного каскада в пограничной области между гелиевым ядром звезды и водородной оболочкой. Из внешней оболочки в реакционный слой поступает водород, а образованный гелий уходит в звездное ядро. Зона реакций продвигается к периферии, высокое газокинетическое и лучевое давление раздувает внешнюю оболочку, дополнительно сжимая гелиевое ядро. При определенных условиях Красный гигант может более-менее «спокойно» сбросить свою внешнюю плазменную оболочку, так что образуется холодная планетарная туманность с Белым карликом в её геометрическом центре.

Фотографии планетарных туманностей напоминают колечки дыма, средняя масса туманности примерно равна  $0,2 M_{\odot}$ . Они неограниченно расширяются со сравнительно небольшой скоростью и за несколько десятков тысяч лет рассеиваются в пространстве.

### *Нейтронные звезды*

Звезды более массивные, чем Солнце, образуют Красные сверхгиганты. Для них открываются другие пути эволюции. Оценки, сделанные по идеализированной модели без учета вращения звезды и потери её массы на излучение, показали, что если масса звезды находится в интервале значений  $1,2 M_{\odot} < M < 2,5 M_{\odot}$ , то давление вырожденного электронного газа в протон-электронной плазме не сможет удержать гравитационное сжатие на «уровне» Белого карлика. Электроны будут «впрессованы» в протоны, и появится нейтронный газ чрезвычайно высокой плотности. В этом случае формируется нейтронная звезда.

Радиус нейтронных звезд имеет порядок 10 км при плотности вещества порядка  $10^{11}$  кг/см<sup>3</sup>. Реакции



начинаются «разом» при достижении критической плотности и сопровождаются выделением энергии, разогревающей нейтронный газ до температуры порядка  $10^9$  К. Это очень большая температура, даже для звезд, но она быстро падает.

Дело в том, что образующиеся нейтрино эффективно уносят энергию из объема звезды. В отличие от электромагнитного излучения, они слабо взаимодействуют с веществом и не поглощаются им. За один месяц температура понижается до  $10^8$  К.

Как любое нагретое тело, нейтронная звезда излучает энергию, и максимум планковского спектра лежит в области рентгеновских лучей. Энергия квантов соответствует примерно 400 кэВ. Теоретики предска-

зывают слоевую структуру нейтронных звезд. Нейтронный газ сконденсирован до состояния сверхтекучей жидкости, в центре же возможно выпадание адронной жидкости в виде коллективизированных кварков. Внешняя часть образована «корой» из концентрических слоев сначала тяжелых, затем легких ядер.

Поскольку Красные гиганты и сверхгиганты обладают магнитным полем, его индукция при сжатии нейтронной звезды возрастает на многие порядки величины, становясь в миллион раз больше индукции земного магнитного поля. В свободном состоянии нейтроны нестабильны, мы об этом говорили ранее. При очень больших давлениях распад подавляется, энергетически более выгодно существование плотного газа нейтронов.

Но на поверхности звезды распады происходят, «восстанавливая» электроны и протоны. Электроны движутся в сильном магнитном поле звезды по спирали и являются источником радиоволн. Магнитные полюса нейтронной звезды служат своеобразным прожектором радиоизлучения. Как и для Земли, положение магнитного полюса может не совпадать с положением географического. Тогда луч радиопрожектора описывает конус вокруг оси вращения звезды. Когда луч «задевает» Землю, мы можем зарегистрировать импульс радиоизлучения. Первые радиопульсары были открыты в 1968 г., самые быстрые из них имеют период порядка тысячных долей секунды. Это значит, что многие нейтронные звезды делают тысячи оборотов за 1 с.

#### *Черные дыры и их роль в рождении галактик*

Для звезд с массой  $M > 2,5 M_c$  гравитационный коллапс не могут остановить никакие из известных сил, и образуется *черная дыра* (термин предложен Дж. Уиллером). Вся масса звезды будет стянута в объект с размерами порядка его гравитационного радиуса, величина которого находится из равенства полной энергии частицы вещества или излучения потенциальной энергии её взаимодействия с черной дырой массы  $M$ .

В рамках классической механики

$$m \frac{V^2}{2} = \frac{GmM}{R_c}. \quad (57)$$

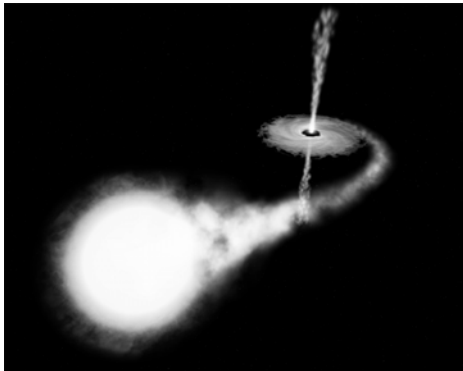
Отсюда получим для гравитационного радиуса, с учетом замены скорости частицы на максимальную скорость света (в точной теории коэффициента 2 нет):

$$R_s = \frac{GM}{c^2}. \quad (58)$$

В ходе образования черной дыры гравитационное поле может быть сильно переменным, так что в это время происходит мощное излучение гравитационных волн (см. п. 4.4). Однако очень быстро (за время порядка  $R_s/c$ ) нестационарные процессы затухают, а гравитационные волны уносятся частично в возникающую черную дыру, частично во Вселенную.

После этого вокруг такого необычного объекта остается только симметричное стационарное поле тяготения. Если образование черной дыры произошло в двойной звездной системе, вещество звезды-компаньона будет по спирали стекать в «воронку» черной дыры.

При падении на черную дыру потоков вещества соседней звезды, вокруг нее образуется газопылевой диск аккреции, из области которого извергаются релятивистские потоки намагниченной плазмы, названные джетами. Кроме того эта область становится источником электромагнитного излучения с весьма широким спектром: от жесткого гамма-излучения до радиоволнового (рис. 85).



*Рис. 85. Черная дыра в двойной системе*

По этим признакам можно опознать черные дыры. К настоящему времени установлено присутствие во Вселенной черных дыр, отличающихся по величине их массы. На одном краю распределения масс находятся черные дыры с массами не слишком отличающимися от типовых масс звезд. На противоположном краю находятся сверхмассивные черные дыры, обнаруженные в центрах многих галактик.

Предварительный анализ показывает, что чем больше масса галактики, тем больше и масса черной дыры в ее центре. Этому факту можно дать различные интерпретации. Первая из них лежит в русле обычных представлений о процессах звездообразования. Считают, что сначала могли быть образованы черные дыры обычных типовых масс, а затем всемирное тяготение вызвало их движение к центру галактик и слияние с образованием более массивного объекта.

Другая интерпретация появилась сравнительно недавно и совсем по-другому оценивает роль черных дыр в космогонической концепции. Здесь предполагают, что первое поколение звезд во Вселенной было необычайно массивным и быстро проходило эволюционный трек с обра-

зованием гигантских черных дыр. Они собирались силами гравитации в еще более массивные объекты, поле тяготения которых притягивало в область сверхмассивных черных дыр рассеянное во вселенной вещество. Таким образом, они становились центрами галактикообразования, т. е. играли активную роль в рождении галактик.

Долгое время черные дыры считали тупиками в эволюции звезд, куда безвозвратно «пропадает» вещество и излучения. Квантовомеханический анализ проблемы был недавно проведен выдающимся физиком современности Стивеном Хокингом (будучи инвалидом, передвигающимся в особом кресле и говорящим с помощью синтезатора речи, он является профессором кафедры, которую когда-то возглавлял Ньютон).

Им теоретически была открыта возможность квантового испарения черных дыр. Не вдаваясь во все детали расчетов, можно пояснить идею Хокинга с помощью рис. 86, на котором окружность изображает положение гравитационного радиуса черной дыры.

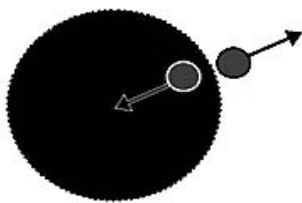


Рис. 86. Схема рождения пары «частица–античастица» вблизи границы черной дыры

По разные стороны от воображаемой границы (физически никаких особенностей пространство на ней не имеет) образована в результате флуктуаций энергии физического вакуума пара «частица – античастица». Из определения гравитационного радиуса следует, что у рожденных «близнецов» будет различная судьба. Один из них пленён полем тяготения черной дыры и должен в неё

упасть. Зато другой, рожденный хотя бы чуть-чуть дальше границы, имеет шанс покинуть область черной дыры.

Закон сохранения энергии выполняется: энергия поля черной дыры обеспечивает поляризацию физического вакуума, энергия последнего переходит в  $2 mc^2$  пары и их кинетическую энергию. За счет последней одна из частиц пары и уходит от места рождения. Само существование границы разводит компоненты пары.

Теория показывает, что в принципе возможен поток частиц (равно как и античастиц) от черной дыры. Термин «испарение» подчеркивает флуктуационный характер процесса и его постепенность. Хокинг считает, что черная дыра, как излучатель, эквивалентна абсолютно черному телу с температурой

$$T_{\text{ч}} = \frac{\hbar c}{4 \pi k R_{\text{г}}}, \quad (59)$$

где  $R_g$  – гравитационный радиус;  
 $\hbar$  – постоянная Дирака, равная  $h / 2\pi$ ;  
 $c$  – скорость света;  
 $k$  – постоянная Больцмана.

Обратим внимание на одну особенность формулы (59). Температура черной дыры обратно пропорциональна величине гравитационного радиуса. В свою очередь, он прямо пропорционален массе Черной дыры. Вывод: чем меньше масса Черной дыры, тем выше её эффективная температура. Это значит, что Черные дыры не являются «застывшими» объектами, они могут не только поглощать, но и излучать, теряя массу. Чем меньше будет масса, тем мощнее её тепловое излучение. При  $M \approx M_c$  температура  $T_c \approx 10^8$  К. Но мини-дыра с массой, примерно равной Эвересту, будет иметь температуру порядка  $10^{11}$  К! Можно полагать, что мини-дыры завершают свою эволюцию с бурным выделением энергии, близким к взрывному. Таким образом, энергия-масса Черных дыр снова возвращается и рассеивается во Вселенной.

### *Сверхновые звезды*

Возможность образования нейтронных звезд и черных дыр была показана теоретически ещё в 50-х годах двадцатого столетия, но лишь недавно была установлена их связь со вспышками сверхновых звезд. Когда в небе появляется «звезда-гостья» (одна из них упоминается в китайской хронике 1054 г.), то выделяется просто невероятное количество энергии: больше, чем излучает её наше Солнце за 10 млрд лет! Это самое мощное природное явление в мире звезд. Более грандиозными были только (согласно некоторым гипотезам) взрывы галактик.

Физической основой такого энерговыделения могут быть только термоядерные взрывы – цепные ветвящиеся реакции синтеза ядер более тяжелых элементов из ядер легких.

Развитие теории ядерных реакций позволило понять, почему обычные звезды, состоящие в основном из водорода и гелия, не взрываются. Дело в том, что реакции протон-протонного цикла включают в себя  $\beta$ -распад (с вылетом электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино). Он является результатом слабых взаимодействий и не зависит от температуры. Нет возможности его ускорить.

Другое дело реакции типа  $3^4\text{He} \Rightarrow ^{12}\text{C}$ , т. е. реакции углерод-азотного цикла, идущие по пути присоединения протонов к ядрам углерода, кислорода, азота, неона. Они резко ускоряются с ростом температуры, и накопление этих элементов в недрах звезд означает накопление «ядерной взрывчатки». Как показывают теоретические модели, в звездах типа Красных сверхгигантов, создается слоевая структура (лукови-

ца) распределения элементов. Центр занимают ядра железа (водород и гелий здесь выгорели). Его облегают «мантия» с преобладанием указанных выше легких элементов, над которой находится гелий-водородная оболочка. По одной из моделей, масса центрального ядра составляет три солнечных массы, масса кислородно-углеродно-азотной мантии доходит до 15 масс Солнца, 12 солнечных масс приходится на долю внешней оболочки. Условия для взрыва создаются тогда, когда железное ядро начнет коллапсировать.

Когда вещество «мантии», то есть слой ядерной взрывчатки, рухнет на поверхность нейтронной звезды, образуется ударная волна с высоким температурным фронтом. Она и вызывает детонацию «взрывчатки», и происходит вспышка сверхновой. В результате взрыва внешняя оболочка и мантия разгоняются до высоких скоростей и сбрасываются в космическое пространство. При этом «захватывается» и часть магнитного поля звезды. Релятивистские электроны даже в слабых магнитных полях испытывают большую силу Лоренца и при вращательном движении порождают электромагнитное излучение типа синхротронного. Оно характеризуется широким спектром, а положение максимума в спектре частот прямо пропорционально величинам индукции магнитного поля и квадрату энергии электрона. В большинстве случаев положение максимума попадает в радиодиапазон частот. По изолиниям радиоизлучения удается обнаружить даже слабые остатки оболочки, сброшенной при вспышке сверхновой.

Следует отметить два факта, связанных с рассматриваемым процессом. Во-первых, в процессе должны рождаться нейтрино и они выносят в окружающее пространство до 90 % высвобожденной при сжатии энергии. Во-вторых, часть энергии взрыва, направленная в центр звезды, может «стимулировать» сжатие до образования черной дыры.

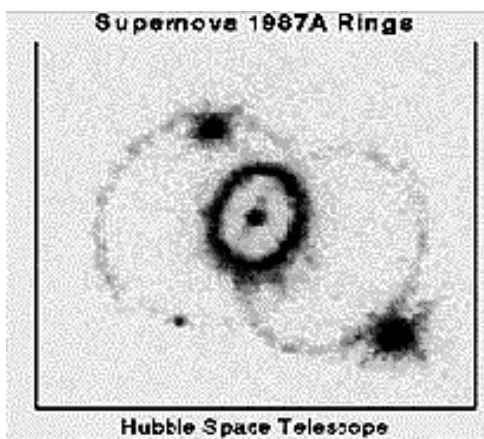


Рис. 87. Фотография оболочек вокруг сверхновой 1987 г.

24 февраля 1987 г. в соседней галактике, Большом Магеллановом Облаке, вспыхнула сверхновая, её можно было видеть невооруженным глазом в южном полушарии. Используя современные методы наблюдений, удалось узнать, что масса взорвавшейся звезды была равна примерно 17 солнечным, а возраст её приближался к 20 млн лет (рис. 87).

В соответствии с теорией, вспышка сопровождалась всплеском нейтринного потока. Однако на месте

вспышки не обнаружили пульсара. Возможно, что ориентация радиолуча такова, что он не захватывает Землю.

В августе 1990 г. космический телескоп «Хаббл» передал на Землю результаты наблюдения этой сверхновой, точнее её сброшенной оболочки. Анализ данных показал, что остатки от взрыва движутся со скоростью около 10 000 км/с (что составляет 0,1 от скорости света).

Совершенно неожиданными были другие результаты. Оказывается, остаток сверхновой окружает другая планетарная туманность, невидимая с Земли. Она представляет собою кольцо диаметром 1,4 св. г., и была сброшена звездой за 1000 лет до взрыва. Теперь за несколько десятков лет кольцо будет разрушено и перемешается с остатками Сверхновой. Этот пример показывает, что реальная природа всегда богаче наших научных теорий и упрощенных моделей, в том числе моделей эволюции звезд.

## **6.6. Нерешенные проблемы космологии**

Хотя в современном естествознании сложилась более или менее целостная концепция развития Вселенной и её структурных составляющих, не будем скрывать ряд нерешенных проблем.

1. В космологии это проблема сингулярности – области пространства с размерами порядка длины Планка, в которой известные для больших масштабов законы перестают действовать. «Как заниматься физикой, когда исчезает привычная связь в пространстве и времени, не написано даже в занимательной физике», – говорит об этой ситуации американский астрофизик Д. Шремм. Намечаемый подход состоит в использовании комплексных переменных. До момента рождения Вселенной вводится мнимое время и тогда график зависимости  $R(t)$  начинается не с «острия», а с «полусферы» в мнимой области комплексных переменных. По этой модели Вселенная рождается (переходит в область действительных переменных) с конечными геометрическими размерами и с конечным масштабом флуктуаций, что обеспечивает последующую дифференциацию вещества.

2. Проблемными являются вопросы о физической природе темной материи и темной энергии во Вселенной. Они будут решаться в экспериментах на ускорителе LHC (см. рис. 88). Парадоксально, что разработанные к настоящему времени теории относятся к относительно малому количеству вещества во Вселенной: по энергии оно соответствует только 4 % от общей. В сравнении с ним темная материя занимает 23 %, а темная энергия 73 % от общей величины энергии Вселенной.





*Рис. 88. Ускоритель LHC*

3. Дискуссионными являются вопросы о множественности вселенных и о реальности топологических пространственных связей между ними, так называемых «кротовых нор». Пока эта область интересов естествознания больше «осваивается» научной фантастикой, допускающей сверхсветовые скорости звездолетов, переходы в «субпространство», путешествия во времени и появление в нашем мире различного рода «терминаторов». В принципе, это так и

должно быть. Проблемы, стоящие на переднем крае науки, во все времена вызвали интерес в сопряженной естествознанию гуманитарной культуре, где большую роль играет интуиция, чем рациональные теории.

### ***Задания для самостоятельной работы***

1. Согласуется ли эллиптическая форма орбит планет с моделью хрустальных сфер в космологии Аристотеля–Птолемея?
2. Поясните Ваше понимание утверждения о том, что Коперник «сдвинул с места Землю».
3. Используя системно-элементный подход, перечислите в рабочей тетради последовательность систем все большего масштабного уровня, начиная с уровня «звезды».
4. Приведите Ваши доводы, почему для проявления приливных эффектов в сталкивающихся галактиках необходимо достаточно большое время взаимодействия их при пролете одной через другую.
5. Воспроизведите опыт с растягиванием резиновой ленты с равномерными делениями в рабочей тетради. Для этого выберите исходное положение в виде пяти соседних клеточек. Ниже нарисуйте ленту в виде десяти клеточек (расстояния между делениями теперь будут равны двум клеточкам). После этого укажите стрелками величины сдвигов каждой из меток (от начального положения до конечного). Опишите полученные результаты.
6. Спиральная форма галактик похожа на форму циклона в атмосфере. Почему циклон «расплывается», а спиральная структура рукавов галактик остается неизменной?