

В. П. Решетников

ПОЧЕМУ НЕБО ТЕМНОЕ

Как устроена Вселенная



ДМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО





Вы смогли скачать эту книгу бесплатно на законных основаниях благодаря проекту **«Дигитека»**. [Дигитека](#) — это цифровая коллекция лучших научно-популярных книг по самым важным темам — о том, как устроены мы сами и окружающий нас мир. Дигитека создается командой научно-просветительской программы [«Всенаука»](#). Чтобы сделать умные книги доступными для всех и при этом достойно вознаградить авторов и издателей, «Всенаука» организовала всенародный сбор средств.

Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин
Алексей Сейкин
Николай Кочкин
Роман Гольд
Максим Кузьмич
Арсений Лозбень
Михаил Бурцев
Ислам Курсаев
Вадим Мельников
Павел Дорожкин
Артем Шевченко
Валерий Окулов
Евгений Шевелев
Александр Анисимов
Роман Мойсеев
Евдоким Шевелев

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую и организационную помощь:

Российскую государственную библиотеку
Компанию «Яндекс»
Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

Этот экземпляр книги предназначен только для вашего личного использования. Его распространение, в том числе для извлечения коммерческой выгоды, не допускается.

Наука
для всех

Наука
для всех

В. П. Решетников

ПОЧЕМУ НЕБО ТЕМНОЕ

Как устроена Вселенная



Фрязино
2012

УДК 52
ББК 22.6
Р47

Издание осуществлено при поддержке
Фонда некоммерческих программ Дмитрия Зимина
«Династия»

Решетников В. П.

Почему небо темное. Как устроена Вселенная.
(Наука для всех). – Фрязино: «Век 2», 2012. – 192 с.
ISBN 978-5-85099-189-0

В книге рассказывается о том, как на протяжении нескольких столетий ученые пытались выяснить, почему ночью темно. Оказывается, этот вопрос связан с самым общим устройством нашей Вселенной – с тем, конечно она во времени и в пространстве или бесконечна, расширяется ли она на самом деле и из чего состоит. В книге подробно обсуждаются основные наблюдательные факты, лежащие в основе современной космологии, и история их открытия.

Для всех, кто интересуется астрономией и космологией – от старшеклассников до специалистов в других областях науки.

На обложке: Гравюра Фламариона, раскрашенная
в 1998 г. Хуго Хайкенвельдером

ISBN 978-5-85099-189-0

© Решетников В. П.
© Век 2, 2012



Династия

Фонд некоммерческих программ «Династия» основан в 2001 году Дмитрием Борисовичем Зиминым, почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда – развитие фундаментальной науки и образования в России, популяризация и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» – проект Фонда по изданию современных научно-популярных книг, отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена в рамках этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде «Династия» вы найдете по адресу

www.dynastyfdn.ru

Введение

Нет ничего сложнее «детских» вопросов. Почему небо голубое, а трава зеленая? Почему у людей две ноги, а у кошек четыре?.. Ответы на такие вопросы требуют либо хорошего чувства юмора¹, либо детального знания предмета.

Моя книга посвящена одному из таких «детских» вопросов – почему ночное небо темное? При всей внешней наивности этот вопрос затрагивает представления о самом общем устройстве нашей Вселенной – конечно ли она в пространстве и во времени, когда во Вселенной возникли первые объекты? Темнота ночного неба, вполне очевидный и простой факт, является на самом деле важнейшим и исторически самым первым космологическим наблюдением, сыгравшим свою роль в нашем понимании окружающего мира.

Для большинства людей подобные вопросы, по-видимому, уже не очень интересны. Еще в детстве мы получаем стандартный набор ответов на стандартные детские вопросы об устройстве окружающего мира. Эти ответы являются в целом правильными, но зачастую очень скучными и малопонятными. Школьный курс астрономии,

¹ Например, «Человек раздвоен снизу, а не сверху, – для того, что две опоры надежнее одной» (Козьма Прутков).

если он вообще был, очень краток и, в преддверии окончания школы и проблемы выбора будущей профессии, обычно проходит почти незамеченным. В итоге уровень астрономических, да и любых естественнонаучных знаний в обществе очень низок. Лучшее доказательство этому — ежедневные астрологические прогнозы по телевидению и в газетах, шоу экстрасенсов, шумиха, устраиваемая по поводу солнечных и лунных затмений, не говоря уже о запуске Большого адронного коллайдера... Достаточно спросить кого-либо о причине смены времен года — в лучшем случае собеседник ответит что-нибудь вроде того, что Земля то приближается к Солнцу, то удаляется. А о том, что в разных полушариях времена года наступают в разное время, люди вроде бы знают, но не задумываются о возникающем противоречии. Да что там времена года — социологические опросы показывают, что многие наши современники считают, что Солнце вращается вокруг Земли!

Впрочем, так было всегда — каждому следующему поколению кажется, что уровень образования все время падает. Конечно, это не может быть верным, так как человечество все-таки развивается. Однако, похоже, что средний уровень знаний об окружающем нас мире и о законах, им управляющих (к этим знаниям не относятся умение включить компьютер или завести машину), почти не меняется. Одним из средств борьбы с таким непреходящим невежеством являются научно-популярные книги. Желательно, конечно, чтобы они были очень хорошими и увлекательными как, например, книги Карла Сагана или Стивена Вайнберга, но и не столь блестящие книги могут быть полезными.

К сожалению, на русском языке не так уж и много популярных книг, в которых доступно и не слишком бегло объяснялись бы основные теоретические и экспериментальные факты, на которых базируется современная картина мира. Недостатком многих книг является попытка

«объять необъятное», приводящая к чересчур упрощенному и схематичному изложению. В результате у читателей складывается представление о науке, как о неупорядоченном складе разрозненных фактов, разбавленных голословными утверждениями теоретиков.

Чтобы не скатиться в такое слишком популярное изложение, я расскажу лишь об одной проблеме — о том, почему ночью темно, или, другими словами, о фоне ночного неба. Даже эта, казалось бы, частная тема на самом деле очень обширна, и мне придется затронуть многие важные вопросы современной космологии и внегалактической астрономии.

Разбираясь с загадкой ночного неба, мы сначала познакомимся со многими мыслителями прошлого, обратившими внимание на эту проблему. Некоторые из этих знакомств будут неожиданными — например, мы встретимся с возможным прототипом принца Гамлета и с Эдгаром Алланом По. Подробно рассказать обо всех участниках этой истории просто невозможно и поэтому особое внимание будет уделено относительно малоизвестным обстоятельствам.

Далее будут суммированы основные наблюдательные факты и предположения о структуре нашей Вселенной, а затем будет рассказано о том, как решается загадка ночного неба современной наукой. Местами эта книга может показаться немного сложной, но перед вами не просто популярная, а все-таки научно-популярная книга.

История фотометрического парадокса

1.1. Ночное небо

Когда я гляжу на небосклон, кишасий звездами, у меня из головы вылетают даже те скупые сведения по астрономии, которые были.

Станислав Ежи Лец

Вид ясного ночного неба — одно из очень немногих зрелищ, на которые можно смотреть бесконечно. Имеется в виду не городское небо, на котором из-за мощной подсветки, кроме Луны и ярчайших звезд, ничего не видно. На небо надо смотреть вдали от городов, а еще лучше — в горах.

Созерцание темного небосвода, усыпанного мерцающими звездами, его величественное вращение — все это доставляет колоссальное эстетическое удовольствие. Во все времена вид звездного неба служил источником вдохновения для поэтов, писателей и художников.

Иногда авторы используют вид неба и его восприятие литературным героем в «корыстных» целях — чтобы лучше охарактеризовать состояние персонажа. Например,

Манфред, герой поэмы Джорджа Байрона, разочаровавшись в жизни и в человечестве, смотрит на небо:

Сверкают звезды, — снежные вершины
Сияют в лунном свете. — Дивный вид!
Люблю я ночь, — мне образ ночи ближе,
Чем образ человека; в созерцанье
Ее спокойной, грустной красоты
Я постигаю речь иного мира.

(пер. И. Бунина)

А вот как это сделал Александр Куприн:

«Я лег на спину и долго глядел на темное, спокойное, безоблачное небо, — до того долго, что минутами мне казалось, будто я гляжу в глубокую пропасть, и тогда у меня начинала слабо, но приятно кружиться голова. А в душу мою сходил какой-то томный, согревающий мир. Кто-то стирал с нее властной рукою всю горечь прошедших неудач, мелкую и озлобленную суету городских интересов, мучительный позор обиженного самолюбия, никогда не засыпающую заботу о насущном хлебе».

Со словами Куприна перекликаются строчки Афанасия Фета:

На стог сена ночью южной
Лицом ко тверди я лежал,
И хор светил, живой и дружный,
Кругом, раскинувшись, дрожал.
Земля, как смутный сон немая,
Безвестно уносилась прочь,
И я, как первый житель рая,
Один в лицо увидел ночь.
Я ль нёсся к бездне полуночной,
Иль сонмы звёзд ко мне неслись?
Казалось, будто в длани мощной
Над этой бездной я повис.

Иногда поэты просто любят звездным небом:

...Взгляни, как небосвод
Весь выложен кружками золотыми;
И самый малый, если посмотреть,

Поет в своем движенье, словно ангел,
И вторит юноооким херувимам.

(В. Шекспир)

или

Небесный свод, горящий славой звездной,
Таинственно глядит из глубины —
И мы летим, пылающею бездной
Со всех сторон окружены.

(Ф. Тютчев)

Древнеримский писатель и философ Сенека в I веке н.э. выразил свое восхищение красотой неба так: «Если бы на Земле было только одно место, откуда видно звездное небо, то к нему со всех концов стекались бы толпы людей, жаждущих увидеть это чудо». Почти через два тысячелетия Сенеке вторит другой философ — Иммануил Кант: «Мироздание с его неизмеримым величием, с его сияющими отовсюду бесконечными разнообразием и красотой приводит нас в безмолвное изумление», или, одно из его самых известных высказываний, — «Две вещи наполняют душу всегда новым и все более сильным удивлением и благоговением, чем чаще и продолжительнее мы размышляем о них, — это звездное небо надо мной и моральный закон во мне».

Изменилось бы что-нибудь в нашей жизни, если бы звездное небо не было бы видно с поверхности Земли? Вопрос звучит странно, поскольку большинство людей никак не связывают воспринимаемые чисто эстетически пятнышки на темном небе с чем-либо практическим и полезным. Пострадали бы, конечно, литература и поэзия, лишившись важного источника вдохновения, но были бы и гораздо более существенные последствия, заключающиеся в том, что, вполне вероятно, развитие науки и человеческой цивилизации в целом было бы сильно заторможено. Чуть утрируя, можно сказать, что без звезд на небе, возможно, сейчас не было бы ни телевидения, ни интернета, ни мобильных телефонов, а также многого

другого, без чего невозможно представить современную жизнь. Все это, скорее всего, было бы создано, но *позднее*.

Очень важной особенностью небесных явлений, резко отличающей их от полной случайностей обыденной жизни человека, является их периодичность и предсказуемость. Наблюдения за этими явлениями – за движением Луны и ее фазами, перемещением Солнца, суточным вращением небесной сферы, систематическим изменением звездного узора в течение года – дали древнему человеку практическую возможность ориентации во времени и пространстве. Изучение небесных закономерностей позволило впервые сформулировать представление о существовании непреложных законов, управляющих окружающим миром. Развитие этих идей привело к возникновению науки в современном понимании. Хрестоматийным примером является открытие Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения на основе астрономических данных о движении Луны. Величайшие математики прошлого – Эйлер, Лагранж, Лаплас, Гаусс, Пуанкаре – создавали новые математические методы и оттачивали уже существующие при решении чисто астрономических задач, связанных с описанием видимых перемещений небесных объектов. Именно это имел в виду Альберт Эйнштейн, когда писал, что «интеллектуальные орудия, без которых было бы невозможно развитие современной техники, пришли в основном от наблюдения звезд».

Вот как об этом же писал Анри Пуанкаре: «Сколько раз физики могли пасть духом от множества испытываемых неудач, если бы в них не поддерживал веры блестящий пример успеха астрономов! Этот успех показывал им, что природа подчинена законам... Мало того. Астрономия не только открыла нам существование законов; она научила нас, что эти законы непреложны, что идти против них невозможно. Сколько времени понадобилось бы нам для усвоения этой мысли, если бы мы знали только земной мир?..»

Мир, в котором не видно звезд, описан братьями Стругацкими в романе «Обитаемый остров»: «Небо здесь было низкое и какое-то твердое, без этой легкомысленной прозрачности, намекающей на бездонность космоса и множественность обитаемых миров, — настоящая библейская твердь, гладкая и непроницаемая». Уникальные свойства атмосферы этой планеты — большое поглощение и сильная рефракция — привели ее обитателей к такой картине вселенной: «Обитаемый остров был Миром, единственным миром во вселенной. Под ногами аборигенов была твердая поверхность Сферы Мира. Над головами аборигенов имел место гигантский, но конечного объема газовый шар неизвестного пока состава и обладающий не вполне ясными пока физическими свойствами... Короче говоря, обитаемый остров существовал на внутренней поверхности огромного пузыря в бесконечной тверди, заполняющей остальную вселенную». Понятно, что наука на этой планете находилась на довольно низком уровне.

В 1941 году главный редактор журнала «Astounding Science Fiction» Джон Кэмпбелл показал Айзеку Азимову высказывание Ральфа Улдо Эмерсона: «Если бы звезды появлялись на небе лишь в одну ночь за тысячу лет, как бы истово веровали люди! На многие поколения сохранили бы они память о Граде Божьем...»

— Как ты думаешь, — спросил Кэмпбелл Азимова, — если бы и в самом деле люди видели звезды раз в тысячу лет, что бы происходило?

Азимов пожал плечами.

— Да они бы с ума сошли! — заявил Кэмпбелл. — Иди домой и пиши рассказ.

Через две недели Азимов принес рассказ «Приход ночи». Его действие происходит на планете, входящей в систему из шести звезд, и лишь раз в примерно две тысячи лет складываются условия, когда на несколько часов планета погружается во тьму — пять ее солнц находятся под горизонтом, а шестое затмевается спутником.

Обитатели планеты, никогда не видевшие звезд — о них существуют лишь легенды — и никогда подолгу не бывавшие в темноте, с ужасом ждут прихода ночи. И она приходит... Цивилизация гибнет в огне пожарищ, зажженных обезумевшими от страха людьми. А затем начнется новый двухтысячелетний цикл развития, к исходу которого обитатели планеты только-только успеют открыть закон всемирного тяготения и осознать, что их ждет новый Апокалипсис, который снова откинет их цивилизацию в почти первобытное состояние. Рассказ Азимова, конечно, преувеличение, однако он очень рельефно подчеркивает значение созерцания и исследования ночного неба для формирования мировоззрения человека и развития науки.

А теперь, после описаний красот ночного неба и обсуждения его важности, я вынужден разочаровать читателя — речь в этой книге пойдет не о том, что мы видим на небе, а о том, что мы на нем *не видим*. Это звучит, конечно, странно, поскольку мы чаще задумываемся о том, что видим, чем о том, что не видим.

В XIX веке известный французский физик и астроном Жак Бабине назвал кометы «видимым ничто». Основанием для такого заключения послужила очень низкая плотность вещества кометы по сравнению с ее колоссальными размерами и яркостью. Перефразируя высказывание Бабины, можно сказать, что фон неба — это «невидимое нечто». Это «нечто», и почему оно «невидимое», составляют основное содержание книги.

1.2. Главная загадка ночного неба

Погасите эту тьму!
Станислав Ежи Лец

Представим себе простейший, интуитивно принимаемый почти всеми, вариант мироустройства — вечная бесконечная Вселенная, равномерно заполненная звезда-

ми¹. Именно так представлял себе Вселенную, например, Джордано Бруно: «Это пространство мы называем бесконечным, потому что нет основания, расчета, возможности, смысла или природы, которые должны были бы его ограничить; в нем находится бесконечное множество миров, подобных нашему...», а задолго до него Эпикур: «Беспредельна Вселенная как по множеству тел, так и по обширности пустоты». А вот поэтический взгляд на бесконечную Вселенную:

Ночью я открываю мой люк и смотрю, как далеко
разбрызганы
в небе миры,
И все, что я вижу, умноженное на сколько хотите, есть
только
граница новых и новых вселенных.
Дальше и дальше уходят они, расширяясь, всегда
расширяясь,
За грани, за грани, вечно за грани миров.

.....

Как далеко ни смотри, за твоею далью есть дали.
Считай, сколько хочешь, неисчислимы года.

(Уолт Уитмен)

Представление о бесконечности окружающего мира кажется очень естественным. Ведь, действительно,

...коль признать, что пространство вселенной конечно,
То если б кто-нибудь вдруг, разбежавшись в стремительном
беге,
Крайних пределов достиг и оттуда, напрягши все силы,
Бросил с размаху копьё, то, – как ты считаешь? – оно бы
Вдаль полетело, стремясь неуклонно к намеченной цели,
Или же что-нибудь там на пути ему помешало?

(Тит Лукреций Кар)

¹ Когда впервые была осознана эта загадка, мир считался состоящим из звезд. Сейчас мы знаем, что основными «кирпичиками» Вселенной являются не звезды, а галактики. Однако для формулировки парадокса это не важно, поскольку галактики состоят из звезд.

В I веке до н.э. Лукреций сформулировал и другой аргумент в пользу бесконечности Вселенной:

...если все необъятной вселенной пространство
Замкнуто было б кругом и, имея предельные грани,
Было б конечным, давно уж материя вся под давлением
Плотных начал основных отовсюду осела бы в кучу,
И не могло бы ничто под покровом небес созидаться;
Не было б самых небес, да и солнца лучи не светили б,
Так как материя вся, оседая все ниже и ниже
От бесконечных времен, лежала бы сбившейся в кучу.

Заменяем у Лукреция слово «давление» на «гравитация» и получаем описание гравитационной неустойчивости. Вот, к примеру, как об этом же писал Ньютон: «Мне представляется, что если бы вещество нашего Солнца и планет, да и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно по всему небу, и каждая частица обладала бы внутренне присущим ей тяготением ко всем остальным, а все пространство, по которому было бы рассеяно это вещество, было бы конечным, то вне этого пространства вещество под действием своего тяготения стремилось бы ко всему веществу внутри него и, следовательно, падало бы к центру пространства и образовало бы там одну гигантскую сферическую массу».

Итак, пусть бесконечная стационарная Вселенная равномерно заполнена звездами, причем n – среднее число звезд в единице объема, а L – средняя светимость одной звезды, то есть полная энергия, излучаемая ею в единицу времени во всех направлениях. Рассмотрим звезду на расстоянии r от Земли. Освещенность, то есть поток энергии, приходящийся на единицу площади, от этой звезды на поверхности Земли равна

$$E(r) = L/4\pi r^2 \quad (1)$$

Смысл этой формулы очень прост – излучаемая звездой энергия распределяется по поверхности сферы радиуса r , площадь которой равна $4\pi r^2$.

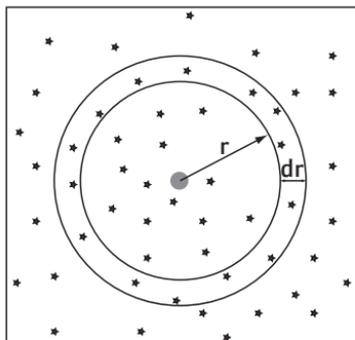


Рис. 1. Сферический слой, вырезанный в бесконечной Вселенной

Теперь рассмотрим окружающий Землю концентрический слой радиусом r и толщиной dr – см. рис. 1. Объем этого слоя равен $4\pi r^2 dr$ (это просто произведение площади сферы радиуса r на толщину слоя) и, следовательно,

в нем находятся $n \cdot 4\pi r^2 dr$ звезд. В итоге получаем, что полная освещенность от звезд этого слоя

$$dE(r) = n \cdot 4\pi r^2 dr \cdot L / 4\pi r^2 = nLdr \quad (2)$$

Любопытный факт – мы обнаружили, что суммарная освещенность от звезд, расположенных в каком-либо сферическом слое, зависит только от толщины этого слоя (dr), и не зависит от расстояния до него. Причиной является то, что, по мере удаления слоя, уменьшение освещенности от составляющих его звезд в точности компенсируется ростом числа звезд в слое (формула (2)).

Таким образом, если мы разбили Вселенную на слои одинаковой толщины, то каждый такой слой дает одинаковый вклад в освещенность на Земле. Вселенная бесконечна, а, значит, и число таких слоев бесконечно. Отсюда простой вывод – освещенность, создаваемая всеми объектами бесконечной Вселенной, бесконечна. Результат обескураживающий. Бесконечная яркость ночного неба очевидным образом противоречит повседневному опыту. Парадокс?

Попробуем сделать нашу модельную Вселенную более реалистичной. Учтем, что звезды не являются математическими точками, а имеют хотя и очень малый, но конечный угловой размер. Например, угловой размер нашего Солнца с расстояния 1 парсек (примерно 3.3 светового

года) равен 0.01 (одна сотая угловой секунды) – величина, безусловно, очень маленькая, но не нулевая. Это означает, что ближайšie к нам звезды загораживают более далекие и экранируют их излучение. Для иллюстрации этого утверждения обычно используют сравнение заполненного звездами пространства с густым лесом. Находясь в глубине леса, вы со всех сторон окружены деревьями. Если лес небольшой, то между стволами деревьев будут видны просветы. Если же лес очень большой и густой, то стволы ближайших деревьев сплошной стеной прикроют от вас все, что находится вдали.

Следовательно, в бесконечной Вселенной любой луч зрения рано или поздно упрется в диск какой-нибудь звезды и поэтому ночное небо должно равномерно сверкать как диск типичной звезды. Это уже лучше, чем бесконечная яркость, однако совсем не похоже на реальное ночное небо. Действительно, предположим, что Солнце – обычная средняя звезда (это и в самом деле близко к действительности). Тогда небосвод, точнее, полусфера, доступная наблюдениям, должен сиять примерно в $100\,000$ раз ярче, чем Солнце. Столь мощное излучение сделало бы невозможным не только обсуждение яркости ночного неба, но и вообще исключило бы появление жизни на нашей планете.

Описанный парадокс был осознан уже несколько столетий назад. Он носит название *фотометрического парадокса* или *парадокса Ольберса*. Как будет ясно из дальнейшего, Ольберс был далеко не первым исследователем, обратившим внимание на эту загадку, но, к сожалению, очень часто законы, формулы и вообще любые открытия носят имена не своих первооткрывателей – вспомним, к примеру, открытие Америки. Английский физик Майкл Берри в шутку сформулировал *принцип Арнольда* (в честь знаменитого русского математика В.И. Арнольда): если какой-нибудь предмет или понятие имеет персональное имя, то это – не имя первооткрывателя.

В свою очередь, *принцип Берри* гласит, что принцип Арнольда применим и к самому себе.²

Очевидно, что существование фотометрического парадокса означает, что с нашей модельной Вселенной что-то не в порядке и надо отказаться от одного из исходных предположений. Значит, Вселенная может быть ограниченной во времени и в пространстве, звезды могут быть распределены не равномерно, а каким-то специальным образом, Вселенная может быть не стационарной, а находиться в процессе расширения или сжатия. Все эти и другие соображения неоднократно высказывались при анализе фотометрического парадокса.

Именно об этом – о том, когда была осознана загадка ночного неба, и как на протяжении нескольких столетий пытались ее решать, – и пойдет речь в первой части этой книги. Фотометрический парадокс никогда не был модным направлением исследований и на протяжении многих лет находился, по сути, на периферии интересов астрономов и физиков. Тем более любопытно, что решать этот парадокс пытались многие известные ученые.

1.3. Рождение загадки: Коперник и Диггес

Бедные гении, они вынуждены были открывать то, что мы проходим в школе.

Неизвестная школьница

Коперниканская революция, которую зачастую считают своего рода эталоном научных революций, на самом деле свершилась очень буднично и прошла для современ-

²Наглядным подтверждением справедливости принципа Берри является то, что принцип Арнольда по сути дублирует сформулированный в 1980 году так называемый *закон эпонимии Стиглера* – ни одно открытие не носит имя того ученого, который его сделал. Сам Стиглер при этом ссылается на то, что формулировка этого закона принадлежит великому социологу Роберту Мертону.

ников почти незамеченной. По преданию считается, что в последний день своей жизни – 24 мая 1543 года – смертельно больной Николай Коперник успел прикоснуться к экземпляру своей только что отпечатанной книги. Эта книга – «О вращениях небесных сфер» – подытоживала результаты его жизни и знаменовала собой важнейший шаг в интеллектуальной жизни человечества. Однако умирающий Коперник уже вряд ли осознавал, что происходит вокруг него и что он держит в своих руках. По свидетельству современника Николай Коперник умер от «кровоизлияния и последовавшего за ним паралича правой стороны тела, задолго до этого впад в беспамятство и потеряв ясность ума».

Со школы мы знаем, что Коперник предложил гелиоцентрическую систему мира, то есть установил, что не

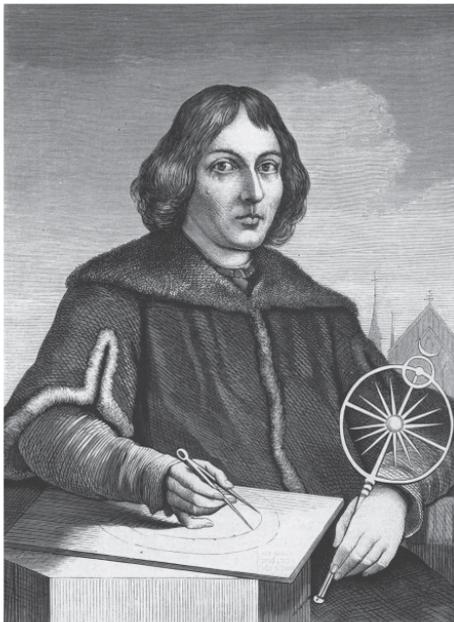


Рис. 2. Николай Коперник (1473–1543)

Солнце движется вокруг Земли, а все планеты, включая Землю, обращаются вокруг находящегося в центре Солнца. По сути это правда, но не совсем точно. На самом деле гелиоцентрическая модель Солнечной системы вполне серьезно рассматривалась еще в Древней Греции. Например, по свидетельству Архимеда еще в III веке до н.э. Аристарх Самосский принимал, что «...неподвижные звезды и Солнце остаются неподвижными,

а Земля движется вокруг Солнца по окружности круга, в центре которого лежит Солнце...» Коперник узнал об этой идее из сочинений древних авторов и его основной заслугой является то, что у него хватило смелости поверить в реальность такой картины мира и довести ее до детальной численной модели, позволяющей

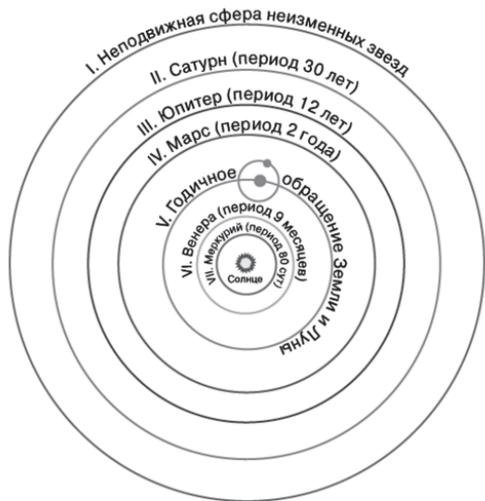


Рис. 3. Система мира Коперника

производить расчеты положений планет на небесной сфере. На основе новой системы мира Коперник сделал ряд предсказаний (сходство между планетами и Землей, фазы Меркурия и Венеры и др.), которые позднее были блистательно подтверждены Галилеем в ходе телескопических наблюдений.

В предисловии к «О вращениях небесных сфер» Коперник писал: «...после того как в течение долгого времени я обдумывал ненадежность математических традиций относительно установления движений мировых сфер, я стал досадовать, что у философов не существует никакой более надежной теории движений мирового механизма...». Его досада станет вполне понятной, если вспомнить, что в господствовавшей в то время геоцентрической модели мира Птолемея, усовершенствованной арабскими астрономами, для описания видимых положений Солнца, Луны и планет требовалось 77 кругов.

Чрезмерная сложность (увеличение точности наблюдений все время требовало увеличения количества исполь-

зуемых кругов – эпициклов и деферентов – для описания видимых движений планет) системы Птолемея побудила Коперника «перечитать книги всех философов, которые только мог достать, желая найти, не высказывал ли когда кто-нибудь мнения, что у мировых сфер существуют движения, отличные от тех, которые предполагают преподающие в математических школах». И, действительно, у Цицерона и Плутарха он нашел упоминания о таких «мнениях». Таким образом, приняв идею вращения Земли вокруг Солнца, «после многочисленных и продолжительных наблюдений обнаружил, – пишет Коперник, – что если с круговым движением Земли сравнить движения и остальных блуждающих светил и вычислить эти движения для периода обращения каждого светила, то получатся наблюдаемые у этих светил явления. Кроме того, последовательность и величины светил, все сферы и даже само небо окажутся так связанными, что ничего нельзя будет переставить ни в какой части, не произведя путаницы в остальных частях и во всей Вселенной».

Итак, Николай Коперник перевернул систему мира и переместил человека из центра Вселенной на одну из обращающихся вокруг Солнца планет. Однако в новой картине мира сохранились и многие элементы старой системы. Мир Коперника – не бесконечная Вселенная, он велик, но все-таки конечен и замкнут. Согласно Копернику, планеты перемещаются с помощью вполне материальных кристаллических сфер, причем «наивысшей из всех является сфера неподвижных звезд, содержащая самое себя и все и поэтому неподвижная».

Парадоксально, но публикация книги Коперника не привлекла в его время особого внимания. Были резкие нападки (например, Мартин Лютер называл Коперника «спятившим астрологом» и «дураком, жаждущим опрокинуть все здание астрономии»), однако большинство современников либо заняли выжидательную позицию, либо признали, что система Коперника имеет определенные

достоинства как математическая схема для расчета положений светил, но не более того. Лишь в начале XVII века (в первую очередь, в связи с открытиями Галилея) церковь в полной мере осознала революционный характер труда Коперника, и в 1616 году книга «О вращениях небесных сфер» была внесена в индекс запрещенных книг римско-католической церкви.

Следующий шаг по пути к современной картине мира – удаление сферы неподвижных звезд и рассмотрение бесконечной Вселенной – обычно связывают с именем Джордано Бруно. Итальянский философ и поэт прожил яркую и трагическую жизнь, закончившуюся в 1600 году на костре инквизиции. Одним из важнейших достижений Бруно является пропаганда учения Коперника и создание картины бесконечной Вселенной, заполненной бесчисленными мирами, подобными нашей Солнечной системе. В 1584 году он издал работу «О бесконечности, вселенной и мирах», в которой провозгласил, что «вселенная не имеет предела и края, но безмерна и бесконечна», «существует подобие между всеми звездами, между всеми мирами и ...наша земля имеет такое же соотношение с другими землями», «на этих мирах обитают живые существа, которые возделывают их».

Однако честь разрушения сферы неподвижных звезд принадлежит не Бруно, а другому мыслителю – английскому математику и астроному Томасу Диггесу, ставшему первым публичным защитником идей Коперника в Англии. Томас Диггес не относится к числу ученых, чьи имена мы знаем со школьной скамьи, и даже профессиональные астрономы, как правило, не знают, кем он был и что он сделал. О Диггесе написано не очень много и поэтому стоит рассказать о нем и о его замечательной семье, члены которой внесли вклад в самые разные области человеческой деятельности, немного подробнее.

Томас Диггес (ок. 1546–1595) был сыном известного английского математика Леонарда Диггеса (1520–1559), ко-

того иногда упоминают в качестве предполагаемого изобретателя теодолита и телескопа. За свою недолгую жизнь Леонард Диггес опубликовал несколько книг, содержащих сведения по математике, астрономии, метеорологии, геодезии. Эти книги, в отличие от традиции того времени писать о науке на латыни, были написаны на английском языке, что обусловило их широкое распространение и популярность.

Томас Диггес получил начальное образование под руководством отца. После смерти Леонарда (Томасу тогда исполнилось всего четырнадцать лет) его дальнейшее математическое образование прошло под присмотром знаменитого Джона Ди (1527–1608) — доверенного лица королевы Елизаветы I, придворного астролога, астронома, математика, переводчика трудов Евклида, картографа, архитектора, навигатора и даже, как предполагают, секретного агента Британской короны. (Во время войны Англии с Испанией Джон Ди подписывал свои секретные донесения британской королеве «007». Два нуля обозначали «только для Ваших глаз», а цифра семь была загадочным каббалистическим числом. Создатель Джеймса Бонда писатель Ян Флеминг, в течение многих лет состоявший «на секретной службе Ее Величества», несомненно, знал об этом.)

В своей научной деятельности Томас Диггес пошел по стопам отца и, помимо астрономии и математики, занимался очень широким кругом вопросов — от навигации и топографии до артиллерии и фортификации. Томас неоднократно переиздавал книги Леонарда Диггеса, внося в них свои изменения и дополнения, и поэтому иногда сложно понять, какие результаты были получены отцом, а какие — сыном.

Одно из главных астрономических достижений Томаса Диггеса связано со сверхновой 1572 года (SN1572). Эту сверхновую часто называют сверхновой Тихо Браге, поскольку после ее обнаружения знаменитый датский

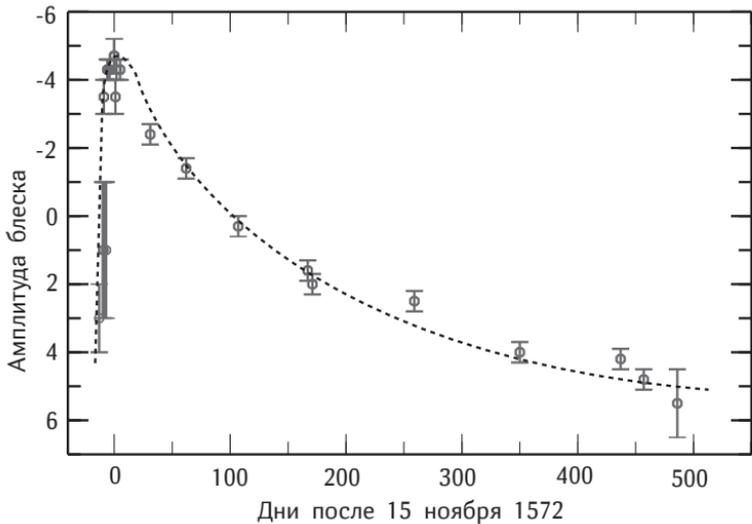


Рис. 4. Кривая блеска SN 1572 по визуальным наблюдениям астрономов XVI века. Все измерения после пика яркости выполнены Тихо Браге. Детальное изучение подобных звезд и их кривых блеска позволило в XX веке открыть ускоренное расширение Вселенной.

астроном по его словам сразу же «начал измерять ее положение и расстояния до ближайших звезд Кассиопеи и старательно замечать видимые глазом характеристики – видимый размер, форму, цвет и так далее». Кроме того, Тихо Браге оказался единственным астрономом, внимательно отслеживавшим падение ее блеска³ на протяжении многих месяцев, сравнивая ее сначала с Юпитером, а затем – с более слабыми звездами (рис. 4)

Появление на небосводе «новой» звезды (в максимуме блеска она была сравнима с Венерой и была видна даже днем) вызвало огромный интерес, как среди астрономов, так и среди населения. Многие исследователи (в их числе

³Кривая блеска – изменение видимой звездной величины небесного объекта со временем, а видимая звездная величина – это безразмерная характеристика освещенности (п.1.2). Для звезд понятия звездная величина, блеск и яркость часто используются как синонимы.

Рис. 5. Посох Якова (иллюстрация из «Практической навигации» Джона Селлера, 1672 год). На протяжении многих столетий «посох» оставался одним из основных инструментов астрономов.



учитель Кеплера Михаил Местлин и Джон Ди) пытались определить ее точные координаты и параллакс⁴. Занимался подобными наблюдениями и Томас Диггес. В 1573 году он опубликовал книгу, в которой суммировал результаты своих наблюдений. Используя очень простые инструменты вроде «посоха Якова» (две перекрещенные рейки, одна из которых скользит по другой – рис 5), он измерил угловые расстояния новой звезды от 6 звезд созвездия Кассиопея. В 1977 году английские астрономы Стефенсон и Кларк сравнили результаты определения координат SN1572 Диггесом и Тихо Браге с положением центроида остатка вспышки сверхновой. Оказалось, что координаты, полученные обоими исследователями (они, кстати, были ровесниками), совпадают с положением радиоисточника и оптической туманности на месте взрыва сверхновой. Неожиданным же оказалось то, что, несмотря на большой разброс индивидуальных измерений Диггеса, среднее положение сверхновой по его данным оказалось существенно более точным, чем у Тихо Браге. Исследователи заключили, что, скорее всего, в измерения или в обработку данных Тихо вкралась небольшая систематическая ошибка, которой не было у Диггеса.

⁴Параллакс – изменение направления на светило при наблюдениях из разных точек (видимое изменение положения небесного светила вследствие перемещения наблюдателя). Суточный параллакс – разница в направлениях на светило из центра Земли и из точки на поверхности Земли. Другими словами, это угол, под которым со светила виден радиус Земли.

Помимо координат SN1572, Томас Диггес попытался оценить и ее суточный параллакс и получил, что он не превышает двух угловых минут. Из этого следовало, что звезда находится значительно дальше Луны, параллакс которой равен примерно 1° . Сходные результаты были получены и другими астрономами (в первую очередь — Тихо Браге) и они означали, что, вопреки учению Аристотеля, в мире звезд также могут происходить большие изменения.

Результаты наблюдений сверхновой позволяют отнести Томаса Диггеса к одним из самых выдающихся наблюдателей своего времени. Однако самый значительный вклад в астрономию Диггес внес в качестве популяризатора системы Коперника.

В 1576 году он переиздал популярный альманах своего отца «*Prognostication Everlasting*», оставив основной текст без изменений, но добавив несколько приложений. Самое важное из приложений — это работа «*A Perfit Description of the Caelestiall Orbes, according to the most aunciente doctrine of the Pythagoreans, lately revived by Copernicus and Geometrical Demonstrations approved*» (примерный перевод названия — «Совершенное описание небесных сфер в соответствии с древней доктриной пифагорейцев, возрожденной Коперником, подкрепленное геометрическими демонстрациями»). В этой небольшой работе Диггес дает краткое изложение книги Коперника и приводит собственную диаграмму гелиоцентрической системы (рис. 6). Кардинальное отличие этой схемы от рассмотренной ранее Коперником — отсутствие сферы неподвижных звезд. Согласно Диггесу, звезды, природу которых он, впрочем, не конкретизирует, находятся от Солнца на разных расстояниях, заполняя бесконечное пространство. Любопытно, что Диггес не пишет, что это его собственная диаграмма, и поэтому многие читатели должны были решить, что идея бесконечной Вселенной также принадлежит Копернику.

A perfit description of the Cœlestiall Orbes,
 according to the most auncient doctrine of the
 Pythagoreans, &c.

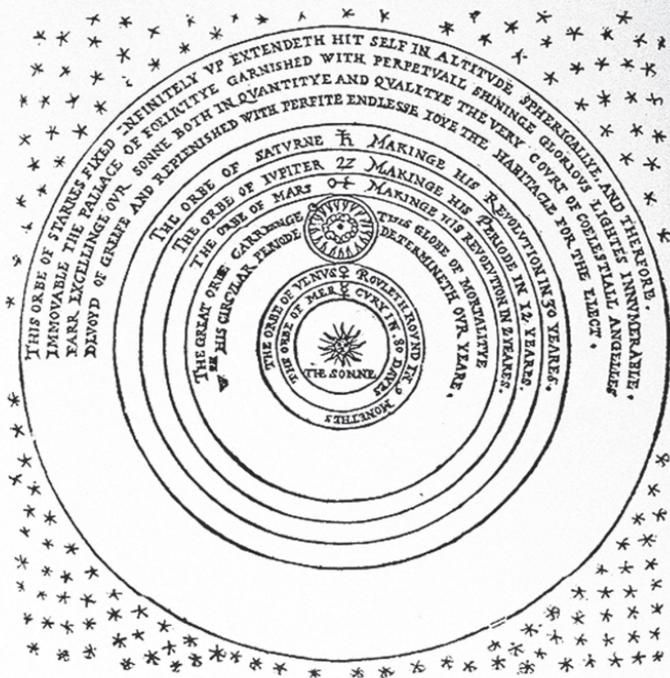


Рис. 6. Строение Вселенной по Томасу Диггесу (1576 год).

Примерный перевод надписи на диаграмме:

«Эта сфера звезд простирается бесконечно во всех направлениях. Нерушимый дворец счастья украшен бесчисленными, вечными и великолепными огнями, превосходящими наше Солнце по количеству и качеству и (он является вместилищем) беспечальных небесных ангелов, наполненных прекрасной бесконечной радостью, это дом элиты»

Работа Томаса Диггеса, написанная на английском языке, способствовала широкому распространению идеи Коперника в Англии. Предполагается, что и Джордано Бруно, живший в Англии с 1583 по 1585 годы, скорее всего,

был знаком с книгой Диггеса. Именно ему – Джордано Бруно – принадлежит следующий шаг по пути к современной картине мира – признание звезд объектами, подобными нашему Солнцу.

Диггес считал, что количество звезд бесконечно, но мы наблюдаем лишь ограниченное их число, поскольку большинство звезд находятся слишком далеко и потому они слишком слабы для наблюдений: «the greatest part rest by reason of their wonderfull distance invisible unto us». Известный британский космолог Эдвард Харрисон считает, что тем самым Томас Диггес оказался первым исследователем, осознавшим, что темнота ночного неба нуждается в объяснении. Предложенное самим Диггесом решение было, конечно, неверным, хотя оно и казалось в его время очевидным.

Помимо астрономии Томас Диггес занимался военными и прикладными вопросами, заседал в парламенте, строил гавань и замок в Дувре, принимал активное участие в войне Англии с Нидерландами. Оставили след в истории и два сына Диггеса. Один из них – сэр Дадли Диггес (1583–1639) – стал известным политиком и государственным деятелем (в Канаде есть мыс и острова Диггеса, названные в его честь Генри Гудзоном, другом Дадли). Другой сын – Леонард Диггес (1588–1635) – был поэтом и переводчиком, возможно знавшим Шекспира (известны два стихотворения Леонарда в память о Шекспире).

Заканчивая рассказ о начале истории фотометрического парадокса, хочется упомянуть, что имя Шекспира связано не только с сыном Томаса Диггеса, но и с ним самим. Первая связь вполне очевидна – после смерти Томаса его вдова Энн снова вышла замуж, причем ее вторым мужем в 1603 году стал Томас Рассел, близкий друг Шекспира, назначенный им исполнителем своего завещания (душеприказчиком). Другая связь менее формальна, довольно неожиданна, и она потребует от читателя определенного чувства юмора.

В 1996 году американский астрофизик Питер Ашер выдвинул гипотезу, что Томас Диггес является прототипом принца Гамлета в пьесе Шекспира. Согласно Ашеру, пьеса «Гамлет» в аллегорической форме описывает столкновение четырех различных космологических моделей, известных на рубеже XVI и XVII веков, – геоцентрической системы Птолемея, гелиоцентрической системы Коперника, гелиоцентрической системы, модифицированной Диггесом (бесконечная Вселенная без сферы неподвижных звезд) и, наконец, компромиссной модели Тихо Браге (эта модель соединяла в себе черты гео- и гелиоцентрических систем).

Персонажи «Гамлета» по Ашеру расшифровываются так: Клавдий, король Датский, конечно же, Клавдий Птолемей, и он воплощает царствующую, но уже отжившую геоцентрическую систему; система Тихо Браге воплощена через Гильденстерна и Розенкранца (это имена предков Тихо, изображенные на его портрете, посланном для распространения в Англию), казнь которых в Англии символизирует гибель этой гибридной системы; сам Гамлет – это, конечно, Томас Диггес. Персонажа, олицетворяющего Коперника, в пьесе нет, но его косвенное присутствие можно обнаружить в желании Гамлета возвратиться в Виттенберг на учебу, причем Клавдий препятствует этому. Ашер объясняет, что университет в Виттенберге (Германия) был одним из первых оплотов коперниканства (там работал Ретик – единственный ученик Николая Коперника, оказавший значительное содействие в публикации его главного труда). Причина, по которой Шекспир зашифровал основную тему пьесы – казнь Джордано Бруно в 1600 году («Гамлет», как предполагается, был написан в 1600–1601 годах).

В тексте «Гамлета» Ашер находит многочисленные детали, подтверждающие, по его мнению, астрономическую интерпретацию пьесы. Например, словами «О боже, я бы мог замкнуться в ореховой скорлупе и считать себя царем бесконечного пространства, если бы мне не снились

дурные сны» (пер. М. Лозинского) Гамлет прямо упоминает бесконечность Вселенной; в словах Первого могильщика «В писании сказано: «Адам копал»; как бы он копал, ничем для этого не вооружась?» («Адам копал» – в оригинальном тексте «Adam digged») Ашер видит упоминание Адомара Диггеса, предка Томаса Диггеса и т.п.

И даже более – Ашер полагает, что Шекспир был знаком с Томасом Диггесом, от которого он узнал о фазах Венеры, лунных кратерах, солнечных пятнах, о многочисленных звездах, невидимых человеческому глазу. Сам же Томас знал обо всем этом от отца, который, как я уже упоминал, иногда называется в качестве предполагаемого изобретателя телескопа. Описания всех этих видимых только в телескоп явлений Ашер тоже усматривает в тексте «Гамлета», что, конечно, свидетельствует скорее об изобретательности автора гипотезы, чем о реальном подтексте Шекспира:

Я не по звездам мыслю и сужу;
Хотя я астрономию и знаю...

(В. Шекспир, сонет 14, пер. А.М. Финкеля)

Однако... еще раньше следы гелиоцентрической системы увидела в «Гамлете» и другой астроном – Сесилия Пейн-Гапошкина. Несомненно, «Гамлет» остается одним из самых загадочных произведений мировой литературы.

1.4. От Галилея до Галлея

С другой стороны телескопа –
ну как?

Все то же, все так же –
космический мрак.

Станислав Ежи Лец

1609 и 1610 годы были особым временем в истории астрономии и науки вообще. Никогда еще на памяти человечества за столь короткий срок не было совершено столь много открытий. Эти открытия были сделаны с по-



Рис. 7. Иоганн Кеплер (1571–1630) и Галилео Галилей (1564–1642)

мощью телескопа итальянским физиком и математиком Галилео Галилеем, однако не надо забывать и о немецком астрономе Иоганне Кеплере, который в 1609 году опубликовал порвавшее с многовековой традицией доказательство того, что планеты обращаются не по круговым орбитам, а по эллипсам.

В начале XVII века в Европе появились первые зрительные трубы. История их изобретения не вполне ясна и, возможно, первые экземпляры таких инструментов появились еще в конце XVI века. Иногда упоминается, что первый телескоп был сооружен голландским очков дел мастером Захарием Янсеном в 1604 году по модели некоего итальянца, на которой было написано «anno 1590». Другой возможный изобретатель – Иоганн (Ханс) Липперсгей, голландский очковый мастер немецкого происхождения.

О том, что произошло летом 1609 года, пусть расскажет сам Галилей: «...Венецию, где я тогда находился, достигли новости, что синьору графу Маврициу была представлена одним голландцем оптическая труба, в которую



Рис. 8. Анри Детуш. «Галилей и дож Леонардо Донато» (XIX век)

удаленные предметы были видны столь совершенно, как будто они были совсем близко. Больше ничего в этом сообщении добавлено не было. Узнав об этом, я вернулся в Падую, где тогда проживал, и начал размышлять над этой задачей. В первую же ночь после моего возвращения я ее решил, и на следующий день изготовил инструмент, о коем и сообщил в Венецию тем же самым друзьям, с которыми предшествующий день я рассуждал о сем деле. Я принялся затем тотчас же за изготовление другого, более совершенного инструмента, который и привез шесть дней спустя в Венецию. Здесь в него с большим удивлением смотрело почти все высшее дворянство этой республики непрерывно в течение больше месяца...». На рис. 8 приведена репродукция картины XIX века, иллюстрирующая слова Галилея. На ней показан один из вечеров августа 1609 года, когда Галилей демонстрировал свою зрительную трубу дожу Венеции.

В конце 1609 года Галилео Галилей начал систематические наблюдения неба в свой телескоп и уже в марте 1610 года он опубликовал знаменитый «Звездный вестник» («Sidereus Nuncius»), суммировавший результаты его первых исследований. На Луне Галилей обнаружил горы, у Юпитера он открыл 4 спутника (тем самым в системе Юпитера он усмотрел подобие Солнечной системы). Сравнивая телескопические изображения звезд и планет, Галилей обнаружил, что они выглядят очень по-разному: звезды остались мерцающими точками, в то время как планеты предстали в виде четко очерченных кружков. Позднее Галилей открыл фазы Венеры, пятна на Солнце, странную форму Сатурна, связанную, как выяснилось позднее, с его знаменитыми кольцами.

Одно из самых известных открытий, описанных в «Звездном вестнике» и имеющих непосредственное отношение к теме этой книги, – Млечный Путь «является не чем иным, как собранием многочисленных звезд, расположенных группами. В какую бы его область ни направить зрительную трубу, сейчас же взгляду представляется громадное множество звезд, многие из которых кажутся достаточно большими и хорошо заметными. Множество же более мелких не поддается исследованию».

8 апреля 1610 года экземпляр книги Галилея попал в руки Иоганна Кеплера, бывшего в то время придворным математиком императора Рудольфа II в Праге. (К сожалению, красиво звучащая должность не приносила Кеплеру особого материального достатка.) А уже к 19 апреля Кеплер завершил «Разговор со звездным вестником, недавно ниспосланным смертным Галилео Галилеем, падуанским математиком» – своего рода развернутую рецензию на книгу Галилея.

В своем «Разговоре» Кеплер абсолютно доверяет тому, что увидел Галилей в свой телескоп: «Может быть, я покажусь слишком смелым, если так легко поверю твоим утверждениям, не подкрепляясь никаким собственным

опытом. Но почему же мне не верить ученойшему математику, о правоте которого свидетельствует самый стиль его суждений, который далек от суетности и для стяжения общего признания не будет говорить, что он видел то, чего на самом деле не видел, не колеблясь из любви к истине противоречить распространеннейшим мнениям».

Комментируя открытие Галилеем огромного количества слабых звезд, Кеплер пишет: «Ты, не колеблясь, утверждаешь, что число видимых звезд превышает 10 000. Но чем больше их и чем плотнее они располагаются на небе, тем правильнее моя аргументация против неограниченности мира, приведенная в книге «О новой звезде»... Там доказывается, что населенный людьми уголок мира с Солнцем и планетами занимает особое положение, в силу чего невозможно, чтобы с какой-нибудь неподвижной звезды открывалась такая же картина мира, как с нашей Земли или с Солнца». И далее: «Во сколько же раз будут превосходить по своим видимым размерам Солнце 10 000 малых дисков, слитых воедино? Если это верно и если те Солнца того же рода, что и наше Солнце, то почему бы им всем, взятым вместе, не превосходить по блеску наше Солнце? Как может быть свет, изливаемый всеми далекими Солнцами на открытые пространства, столь слаб, что наше Солнце, стоит лишь его лучам проникнуть в закрытую комнату через отверстие, проколотое кончиком тонкой иглы, по блеску превосходит неподвижные звезды в том виде, в каком мы видим их на почти безграничном удалении за стенами комнаты?»

На основе подобной аргументации Кеплер делает вывод, что многочисленные звезды, открытые Галилеем, гораздо слабее Солнца, иначе их суммарный блеск затмил бы его: «тело нашего Солнца по блеску в не поддающееся оценке число раз превосходит все неподвижные звезды, вместе взятые» и «...наш мир — не просто один из членов стада, содержащего бесконечно много других миров».

Вселенная Кеплера — это вспышка света в окружающем мраке. Она представляет собой сферу неподвижных

звезд, в середине которой находится Солнце с вращающимися вокруг него планетами. Эта Вселенная конечна — она окружена со всех сторон темной стеной, которую мы видим в просветах между звездами.

Как видно из предыдущего, Кеплер, по сути, сформулировал фотометрический парадокс (бесконечное множество подобных Солнцу далеких звезд должны затмить Солнце) и предложил его решение — Вселенная ограничена в пространстве и содержит конечное количество звезд.

В XVII столетии был еще один удивительный для науки год. В 1687 году Исаак Ньютон опубликовал «Математические начала натуральной философии», заложившие основу так называемой классической физики и картины мира, просуществовавших до начала XX века. В своих «Началах» Ньютон не затрагивает вопросы крупномасштабного строения мира, ничего не пишет и о звездах. Высказаться на эти темы его подтолкнула переписка с молодым священником Ричардом Бентли в 1692 и 1693 годах.

Преподобный Ричард Бентли (1662–1742), капеллан епископа Ворчестерского, обратился к Ньютону с просьбой ответить на ряд вопросов об устройстве Вселенной. Для такого обращения у Бентли была очень веская причина — в рамках «Бойлевских чтений» ему было поручено прочесть в Лондоне восемь публичных проповедей в защиту христианства. Одной из целей этих проповедей было показать, что подтвержденная трудами Ньютона гелиоцентрическая астрономия не противоречит теологической картине мира. Бентли был хорошим теологом и филологом, но с физикой и математикой знаком был плохо. Поэтому он написал Ньютону — кто как не Ньютон был самым большим авторитетом в вопросах «натурфилософии» в Англии? — и Ньютон ему охотно ответил.

В своих письмах (всего их было четыре) Ньютон рассмотрел случаи конечной и бесконечной Вселенных, в которых действует закон всемирного тяготения. В случае ограниченного объема Вселенной все составляющие ее

тела под действием взаимного притяжения рано или поздно должны были бы слиться в «одну гигантскую сферическую массу». Этого нет, следовательно, Вселенная бесконечна.

В бесконечном пространстве центров конденсации будет бесконечное множество и именно таким образом должны были образоваться Солнце и другие бесчисленные звезды. В бесконечной Вселенной на любую

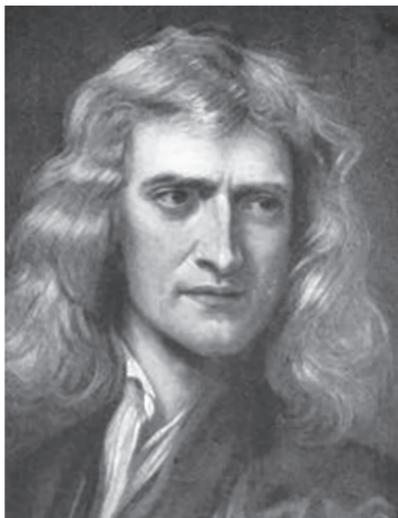


Рис. 9. Исаак Ньютон (1643–1727)

звезду с каждой из сторон действует бесконечная сила, эти силы уравнивают друг друга и звезда остается в покое. Однако такая Вселенная должна быть неустойчива, так как малейшее нарушение взаимных расстояний между звездами должно привести к тому, что *fixae stellae* («неподвижные звезды») начнут двигаться. Ньютон был уверен, что звезды не двигаются — это был один из основных наблюдательных фактов астрономии со времен античности, — и поэтому ему пришлось привлечь внешнюю организующую силу — божественную. Как сказал Ньютон Дэвиду Грегори, «непрерывно свершающееся чудо требуется для того, чтобы предотвратить падение Солнца и неподвижных звезд друг на друга под действием гравитации».

Таким образом, Ньютон рассмотрел то, что обычно называют «гравитационным парадоксом» в бесконечной Вселенной и предложил его решение. Несомненно, он должен был задумываться и о фотометрическом парадоксе, ведь каждая звезда влияет на все окружающее не только

гравитационным притяжением, но и излученным светом. Освещенность от звезды уменьшается, как и гравитация, обратно пропорционально квадрату расстояния, вклады от звезд суммируются и в каждой точке пространства освещенность с каждого из направлений должна быть бесконечной (как и гравитационное притяжение). Однако освещенности, в отличие от гравитации, не компенсируют друг друга, а суммируются. Что думал об этом Ньютон, неизвестно. Возможно, он столкнулся с необходимостью допустить еще одно непрерывно совершающееся «чудо».

Первым человеком, кто привлек математику для решения проблемы темноты ночного неба, был друг Ньютона английский астроном, математик и геофизик Эдмонд Галлей. Надо заметить, что Ньютон отличался довольно неуживчивым нравом, и Галлей был одним из немногих друзей, сохранявшим с ним хорошие отношения на протяжении нескольких десятилетий. Эдмонд Галлей, чье имя обычно помнят только из-за яркой кометы, орбиту которой он рассчитал и предсказал ее возвращение к Солнцу в 1758 году (комета Галлея), внес большой вклад в самые разные области – например, он открыл собственные движения звезд, составил первый каталог звезд южного неба, заложил основы геофизики и научной демографии. Не менее важной заслугой Галлея перед наукой является и то, что он убедил Ньютона написать «Математические начала натуральной философии», выполнил всю редакторскую работу и издал книгу за свой счет.



Рис. 10. Эдмонд Галлей (1656–1742)

Как ни странно, можно, по-видимому, назвать точную дату, когда Галлей заинтересовался проблемой ночного неба. Скорее всего, это произошло утром 23 февраля 1721 года во время совместного завтрака Ньютона, Галлея и Вильяма Стакли (1687–1765) (английского археолога, одного из первых исследователей Стоунхенджа). Разговор за завтраком шел на астрономические темы и Стакли скорее всего упомянул свои соображения о том, что звезды распределены в пространстве не однородно, как это требуется по космологии Ньютона, а в виде «гигантского меридиана», делящего бесконечное пространство на две части. Если бы это было не так, то, согласно Стакли, все небо должно было бы быть столь же ярким как Млечный Путь.

Эта беседа, вероятно, подтолкнула Галлея к собственным размышлениям и всего через две недели после этого завтрака – 9 марта 1721 года – он представил на заседании Королевского общества статью «О бесконечности сферы неподвижных звезд», в которой Галлей упомянул, не называя его по имени, и аргументацию Стакли. Вскоре – 16 марта – Галлей зачитал и вторую небольшую работу («О числе, порядке и свете неподвижных звезд») на ту же тему.

В своих работах Галлей сначала приводит аргументы в поддержку того, что система звезд бесконечна: чем более мощный телескоп используется при наблюдениях, тем больше звезд в него видно; кроме того, если система звезд конечна, то звезды под действием гравитации должны были сжаться в единый объект в центре (аргумент, использованный ранее Ньютоном). Затем Галлей обсуждает два возражения против бесконечности Вселенной. Одно из них чисто терминологическое, а второе – это, по сути, возражение Стакли, которое перекликается и с мнением Кеплера (см. ранее).

Для того, чтобы преодолеть это затруднение, Галлей вводит идею концентрических слоев одинаковой толщи-

ны (рис. 1), подсчитывает количество звезд в слое и создаваемую каждой из этих звезд освещенность по мере увеличения радиуса. Добравшись до звезд сотого слоя, освещенность от каждой из которых в 10 000 меньше, чем от звезды в первом слое, он заключает, что эта освещенность столь мала, что человеческий глаз даже в телескоп просто не увидит этих звезд.

Следовательно, для решения фотометрического парадокса Галлей использует тот же аргумент, что и Томас Диггес за полтора столетия до него — далекие звезды слишком слабы, чтобы быть увиденными. Галлей не догадался просуммировать вклад далеких звезд и убедиться, что им нельзя пренебречь. (Как видно из формулы (2), вклад каждого слоя одинаковой толщины одинаков — падение освещенностей от индивидуальных звезд точно компенсируется увеличением их числа).

Журнал Королевского общества зафиксировал еще один довод Галлея, сводящийся к тому, что освещенность от далеких звезд спадает быстрее, чем по закону обратных квадратов (см. формулу (1) в параграфе 1.2): «свет не делится до бесконечности и, следовательно, когда звезды находятся на очень больших расстояниях, их излучение слабеет быстрее, чем по общему правилу». Это предположение может решить фотометрический парадокс, но оно, конечно, неверно.

Ньютон председательствовал на заседаниях Королевского общества во время выступлений Галлея, однако его реакция на результаты Галлея осталась неизвестной. Возможно, пожилой Ньютон просто проспал выступления своего друга, что, судя по воспоминаниям современников, с ним нередко случалось на разных заседаниях.

Заметки Галлея были опубликованы в журнале Королевского общества «Philosophical Transactions» и, по видимому, они стимулировали работу швейцарского астронома и физика Шезо, который в 1744 году выполнил первый корректный математический анализ парадокса.

1.5. Шезо и Ольберс

Пустота чудовищно вместительна.
Станислав Ежи Лец

Жан-Филипп Луи де Шезо родился вблизи Лозанны в семье обеспеченного землевладельца. Он очень рано проявил интерес к астрономии и построил собственную обсерваторию, оборудованную парой небольших телескопов. Ранние работы Шезо по физике распространения звука, о торможении пушечных ядер воздухом и пр. привлекли к нему широкое внимание, и российская императрица Елизавета Петровна даже приглашала его на работу в Санкт-Петербург. По причине слабого здоровья Шезо не смог воспользоваться этим предложением.

В декабре 1743 года Шезо открыл комету (практически одновременно она была также обнаружена датчанином Дирком Клинкенбергом) и наблюдал ее до марта 1744 года. Комета была очень яркой, ярче Юпитера, и в одну из ночей продемонстрировала целых 6 хвостов. Через несколько месяцев после исчезновения кометы Шезо опубликовал о ней книгу. Книга содержала восемь приложений, посвященных разным вопросам астрономии. Второе приложение – «О силе света, его прохождении через эфир и расстоянии до неподвижных звезд» – содержало математический анализ загадки ночного неба.

Анализ Шезо был, по сути, эквивалентен приведенному ранее в параграфе 1.2 этой книги. Так же как и Галлей, Шезо рассматривает окружающие Солнце концентрические слои одинаковой толщины и в предположении однородного распределения звезд в пространстве находит, что освещенность от каждого слоя одинакова. Если звездное пространство бесконечно или даже просто очень велико, то любой участок небесной сферы должен сиять как Солнце (он предположил, что все звезды по размерам и по светимости подобны Солнцу), поскольку звезды перекроют своими видимыми дисками весь небосвод. Шезо

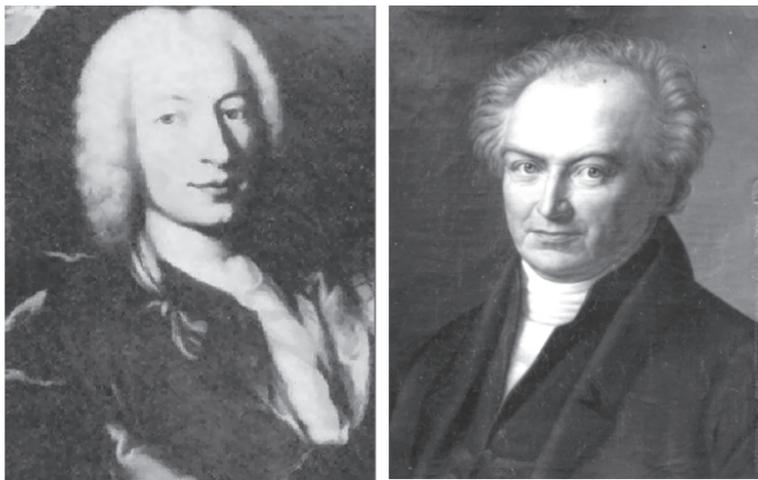


Рис. 11. Жан-Филипп Луи де Шезо (1718–1751)
и Генрих Вильгельм Ольберс (1758–1840)

оценил, что вся доступная наблюдениям полусфера в этом случае должна сиять в 91 850 раз ярче Солнца. (Эта оценка примерно равна отношению площади полусферы к площади солнечного диска.)

«Громадное несоответствие между этим заключением и опытом свидетельствует, что либо сфера неподвижных звезд не бесконечна..., либо освещенность спадает быстрее, чем по закону обратных квадратов», — пишет Шезо. Он считает, что второе допущение более правдоподобно и предполагает, что межзвездное пространство может быть заполнено разреженной средой, задерживающей излучение звезд. Он полагает, что даже ничтожное поглощение в межзвездной среде, постепенно накапливаясь, может объяснить темноту ночного неба. Решение, предложенное Шезо, выглядит правдоподобно, но, как будет показано, далее, неверно — межзвездное поглощение не может решить фотометрический парадокс.

В работе Шезо содержатся еще два примечательных результата. Во-первых, он оказался одним из первых ис-

следователей, правильно оценивших масштаб межзвездных расстояний. Этой задачей пытались заниматься многие (например, Гук, Пикар, Флемстид, Брайден, Вильям Гершель и другие), однако прямая оценка расстояний методом годичного параллакса из-за несовершенства используемых инструментов и методов обработки не давала результатов вплоть до XIX века.

В качестве альтернативного и, конечно, очень грубого подхода можно использовать видимый блеск звезды в сравнении с Солнцем. Если считать, что все звезды, включая Солнце, имеют одинаковую светимость, то, сравнивая освещенности от какой-либо звезды и от Солнца, можно оценить, во сколько раз звезда дальше от нас, чем Солнце. Используя этот метод, голландский физик, математик и астроном Христиан Гюйгенс (1629–1695) оценил, что Сириус находится в 28 000 раз дальше Солнца, то есть на расстоянии около 0.14 пк⁵.

Для того, чтобы получить этот результат, Гюйгенсу пришлось сравнивать яркость освещенного Солнцем отверстия в темной комнате с воспоминанием о яркости Сириуса ночью. Естественно, сделать это очень сложно, что и привело к заниженному почти в 20 раз расстоянию (расстояние до Сириуса равно 2.7 пк или 8.7 световых лет). Этот результат Гюйгенса был опубликован уже после его смерти – в 1698 году.

Однако еще раньше – в 1668 году – шотландский математик, астроном и оптик Джеймс Грегори (1638–1675) опубликовал замечательную модификацию фотометрического метода. Грегори предложил не сравнивать яркости звезд и Солнца, что на практике очень сложно, а использовать в качестве промежуточного стандарта яркость планет. Суть его метода очень проста – ночью можно сравнить яркость какой-либо звезды с яркостью внешней

⁵ 1 пк (парсек) – это расстояние, с которого средний радиус орбиты Земли виден под углом в 1 угловую секунду. Парсек равен 3.26 светового года или примерно $3 \cdot 10^{18}$ см. В окрестности Солнца характерные расстояния между звездами близки к 1 пк.

планеты (Марса, Юпитера, Сатурна), а затем, зная расстояние этой планеты от Солнца и ее угловой диаметр, можно рассчитать ее яркость по сравнению с яркостью Солнца (предполагая, конечно, что планета светит отраженным светом и задавая определенный коэффициент отражения). Применяв этот метод к Сириусу, и используя наблюдения Сатурна, Грегори получил, что эта звезда находится в 80 000 раз дальше Солнца – результат гораздо лучший, чем у Гюйгенса, хотя все еще существенно заниженный.

Во второй части работы о фотометрическом парадоксе Шезо использует метод Грегори для определения расстояний до ярчайших звезд (Сириуса и Регула) на основе сравнения их блеска с Сатурном, Юпитером и Марсом. Он заключает, что расстояние до ярчайших звезд примерно в 240 000 раз превышает расстояние от Земли до Солнца. Эта оценка составляет около 4 световых лет или чуть больше 1 пк. Учитывая грубость используемого метода, результат можно признать просто превосходным!

Однако Шезо не был первым человеком, правильно оценившим масштаб межзвездных расстояний. Как оказалось, это было сделано Исааком Ньютоном в «*De mundi systemate*» («Система мира») – дополнении к «Началам», написанном еще в 1680-х годах и опубликованном в 1728 году, уже после его смерти. В этой работе Ньютон методом Грегори нашел, что расстояние до звезд первой величины примерно в 100 000 раз превышает расстояние от Сатурна до Солнца, что составляет $\sim 1\,000\,000$ астрономических единиц (4.8 пк)⁶.

Еще один интересный результат небольшой работы Шезо о фотометрическом парадоксе – корректная математическая оценка доступной наблюдениям области Вселенной. Если предположить, что все звезды подобны

⁶Ньютон принял, что Сатурн отражает 1/4 падающего излучения, что примерно в два раза меньше реального альбедо планеты. Использование правильного альбедо несколько уменьшило бы оценку расстояния и сделало бы ее еще более реалистичной.

Солнцу и что они равномерно распределены в пространстве со средним взаимным расстоянием 4 световых года, то в пределах сферы радиусом 3×10^{15} световых лет звезды перекроют своими дисками всю небесную сферу. Свет от более далеких звезд будет экранирован дисками более близких объектов и внешняя часть Вселенной останется ненаблюдаемой.

Британский космолог Эдвард Харрисон считает, что, возможно, именно огромность, несоизмеримость этих масштабов могла подтолкнуть Шезо к идее межзвездного поглощения – ведь даже ничтожная непрозрачность межзвездной среды на столь больших расстояниях способна полностью скрыть далекие объекты и, тем самым, сделать ночное небо темным.

Следующий исследователь, внесший вклад в исследование парадокса, названного позднее его именем, – это немецкий врач и астроном-любитель Генрих Ольберс. Ольберс был дипломированным медиком, но, горячо увлекающаяся астрономией, он в течение многих лет сочетал оба занятия. Днем он был солидным бременским врачом, а ночью проводил наблюдения в частной обсерватории на верхнем этаже собственного дома. Лишь после смерти дочери и второй жены он оставил врачебную практику и с 1820 года полностью посвятил себя астрономии. В биографическом очерке, включенном в книгу С. Ньюкомба и Р. Энгельмана «Астрономия в общепонятном изложении» (опубликована на русском языке в 1896 году), об Ольберсе было написано так: «Едва ли можно назвать другого любителя, которому астрономия была бы так много обязана, как Ольберсу; и мало было специалистов по астрономии, которые обладали столь обширными познаниями в ней, как этот любитель».

Основные результаты Ольберса посвящены наблюдениям комет (он открыл их 7 штук) и расчетам их орбит (им разработан метод определения орбит комет по трем наблюдениям). В 1802 году Ольберс переоткрыл первую

малую планету (Цереру)⁷, которая вскоре после ее открытия в 1801 году итальянским астрономом Пиацци была потеряна. В том же 1802 году он открыл вторую малую планету (Палладу), а в 1807 – четвертую (Весту).

В 1823 году, почти через 80 лет после работы Шезо, Генрих Ольберс опубликовал статью «О прозрачности пространства». В своей статье Ольберс анализирует фотометрический парадокс – более пространно и в более качественном стиле по сравнению с кратким изложением Шезо – и предполагает, что учет поглощения света далеких звезд в межзвездном пространстве может решить эту проблему.

Изложение Ольберса в целом оригинально и вводит в обсуждение парадокса несколько новых идей. Например, Ольберс допускает, что звезды не обязательно должны быть однородно распределены в пространстве, а могут группироваться в системы, подобные Млечному Пути, то есть в галактики. Такое скучивание не избавляет от парадокса, поскольку любой луч зрения все равно рано или поздно должен упереться в диск какой-либо звезды. Ольберс считает, что полная прозрачность межзвездного пространства «в высокой степени невероятна» и обосновывает существование поглощающей среды тем, что вещество кометных хвостов рассеивается, пополняя окружающее пространство, а также существованием зодиакального света. (Строго говоря, это говорит лишь о межпланетной среде, но отсюда уже один шаг до признания существования и межзвездного вещества.)

Любопытен «научно-фантастический» пассаж Ольберса о том, что даже в случае, если бы вся небесная сфера сияла как поверхность Солнца, можно было бы вообразить живые организмы, приспособившиеся и к таким экстремальным условиям. Он отмечает, что астрономия у разумных существ такой планеты находилась бы в примитивном состоянии – обитателям ничего не было бы

⁷С 2006 года Церера классифицируется как «карликовая планета».

известно о звездах, о существовании Солнца можно было бы узнать лишь по наблюдениям его пятен, а Луна и планеты обнаруживались бы лишь как темные пятна на сверкающем фоне. (Соображения Ольберса отчасти переключаются с высказанными в п. 1.1 этой книги.)

В своей статье Ольберс цитирует Галлея, но ни разу не упоминает работу Шезо. Знал ли он о ней, и повлияла ли она как-нибудь на его собственную работу? Вопрос не праздный, поскольку подход Ольберса и предложенное им решение фотометрического парадокса в целом похоже на то, что сделал Шезо задолго до него. Кроме того, оказалось, что в библиотеке Ольберса была книга Шезо 1744 года, посвященная знаменитой шестихвостой комете, в приложении к которой Шезо описал свое решение фотометрического парадокса. Более того, Ольберс, несомненно, читал эту книгу — американский историк астрономии Стенли Яки обнаружил, что в записных книжках, относящихся к 1782–96 годам, Ольберс тщательно законспектировал часть книги Шезо, в которой тот описывает предложенный им метод определения кометных орбит.

Так что же произошло? Яки, да и не только он, считает, что речь не может идти о плагиате, поскольку это в сильнейшей степени противоречит тому, что известно об Ольберсе, о его характере и научных работах. Скорее всего, к 1823 году, когда Ольберс написал свою статью, он забыл или полузабыл о короткой заметке Шезо, которую он, возможно, читал тридцать или сорок лет назад в поисках информации о столь любимых им кометах. Как полагает Эдвард Харрисон, люди забывают об источниках своих идей гораздо чаще, чем обычно считают.

Какова дальнейшая судьба идеи Шезо и Ольберса о межзвездном поглощении как о возможном решении фотометрического парадокса? Идея эта, конечно, не верна, поскольку в заполненной звездами безграничной и вечной Вселенной само поглощающее вещество (межзвездная пыль и газ) начнет нагреваться до тех пор, пока не уста-

новится тепловое равновесие между поглощающей средой и излучением звезд, а тогда среда станет излучать столько же, сколько поглотит. Первым это понял, по-видимому, английский астроном Джон Гершель (1792–1871), знаменитый сын еще более знаменитого отца – Вильяма Гершеля (1738–1822).

В 1848 году Джон Гершель опубликовал рецензию на недавно появившийся первый том «Космоса» Александра фон Гумбольдта. Гершель упоминает Ольберса и идею поглощения света, а затем пишет, что, действительно, свет легко поглощается, однако поглощенный свет нагревает поглощающую материю и она должна начать излучать, отдавая через излучение столько же энергии, сколько поглотила. Гершель использовал немного другие слова, но суть его комментария именно в этом. Очень примечательно, что это было написано тогда, когда недавно открытый закон сохранения энергии еще не стал широко известным и общепринятым.

Джон Гершель предложил и свой вариант решения фотометрического парадокса. Будучи наблюдателем, он был уверен, что в некоторых направлениях на небе он и в самом деле видит пустое пространство за пределами нашей звездной системы. С другой стороны, он имел хорошую математическую подготовку и догадывался, что можно придумать такое пространственное распределение объектов, что даже при бесконечном числе звезд ночное небо будет оставаться темным: «...легко представить устройство вселенной, которая будет оставаться в точном смысле слова бесконечной, и в которой произвольное количество лучей зрения не будут пересекаться со звездами». Гершель коротко описал такое устройство – звезды распределены самоподобным образом на всех уровнях, – то, что позднее стали называть иерархическим или фрактальным распределением. Идея иерархического строения Вселенной позднее развивалась многими исследователями – например, Ричардом Проктором, Карлом Шарлье,

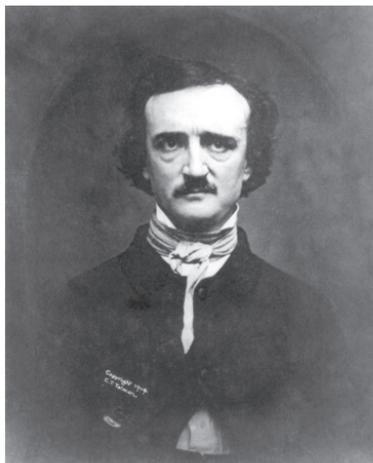
Фурнье д'Альбе. Эта идея, действительно, способна решить фотометрический парадокс, однако она противоречит наблюдаемой на больших масштабах однородности нашей Вселенной (см. следующую главу).

1.6. Динамическая Вселенная Эдгара По

Наука! ты — дитя Седых Времен!
Меня все вниманьем глаз прозрачных,
Зачем тревожишь ты поэта сон,
О коршун! крылья чьи — взмах истин мрачных!
Эдгар По

Появление имени знаменитого поэта, писателя, классика и родоначальника сразу нескольких жанров литературы, может показаться странным в книге по астрономии. Однако что не было странным в жизни этого человека?

Эдгар Аллан По рано остался без родителей и воспитывался в доме богатого коммерсанта из Ричмонда Джона Аллана. Вместе с приемной семьей Эдгар По пять лет прожил в Англии, где учился в дорогом пансионе в Лондоне. После возвращения Алланов в США Эдгар закончил колледж в Ричмонде, в 1826 году поступил в недавно открытый Университет штата



Вирджиния. Проучился в университете лишь год, вынужден был его бросить, записался добровольцем в армию, пытался закончить

Рис. 12. Дагерротип Эдгара Аллана По (1809–1849), изготовленный незадолго до смерти поэта.

элитную военную академию в Вест-Пойнте, но был отчислен. Дальше — работа в нескольких журналах, богемная жизнь, личные и семейные драмы, нервное перенапряжение, болезни, запои, и на фоне всего этого — многочисленные стихи, рассказы, новеллы... И смерть в 40 лет в унижительной бедности и горячем бреде. Биография, разительнейшим образом отличающаяся от жизни остальных героев этой книги.

Парадоксально, что именно этот парадоксальный человек предложил первое правильное, хотя и качественное, решение загадки темноты ночного неба. Даже более — Эдгара По можно назвать, пусть и с некоторой натяжкой, одним из идейных предшественников современной космологии в целом. Это не было случайностью — он очень интересовался наукой и, в особенности, астрономией, изучал книги классиков физики и астрономии (например, Ньютона, Лапласа, Вильяма и Джона Гершеля, Гумбольдта). Когда Эдгару было 16 лет, опекун подарил ему маленький телескоп и Эдгар По наблюдал в него Луну и звезды.

Рассказ «Необыкновенное приключение некоего Ганса Пфааля» (опубликован в 1835 году) по признанию самого Эдгара По был вдохновлен «Курсом астрономии» Джона Гершеля, американское издание которого вышло лишь годом ранее. Открываем это рассказ и находим в нем массу научной информации — параметры лунной орбиты, детальное описание вида Земли из космоса, сведения о кометах и зодиакальном свете, ссылки на великих ученых прошлого. Эдгар По так старался убедить читателей в подлинности фантастического путешествия на воздушном шаре на Луну, что превратил свой рассказ почти в научно-популярный астрономический очерк.

3 февраля 1848 года Эдгар По выступил в Общественной библиотеке Нью-Йорка с лекцией «О космогонии Вселенной». Аншлага не было — на лекцию пришло около 60 слушателей, большинству из которых лекция показалась

скучной, затянутой и малопонятной. Затем По переработал лекцию и в том же году тиражом в 500 экземпляров выпустил ее расширенную версию под названием «Эврика. Поэма в прозе» (По хотел напечатать 50000 экземпляров, издатель уменьшил тираж в сто раз). Эдгар По считал, что этой поэмой он «революционизирует мир физических и метафизических наук». Революции не произошло – «Эврика» на многие годы оказалась забытой и на развитие науки она уж точно никакого влияния не оказала. По словам Эдварда Харрисона, «ее наука была слишком метафизической, а ее метафизика – слишком научной».

Среди немногочисленных читателей «Эврики», высоко оценивших ее содержание, были в основном поэты – например, Шарль Бодлер (автор французского перевода), Поль Валери, Константин Бальмонт, переведший поэму на русский язык. Дочь знаменитого французского поэта Теофиля Готье – Юдит Готье – в 1864 году (ей было тогда только 15 лет!) написала о только что вышедшей на французском языке «Эврике»: «Было бы ошибочно думать, что Эдгар По, создавая «Эврику», ставил своей целью только написать поэму; он был абсолютно убежден, что открыл великий секрет Вселенной, и он использовал всю мощь своего таланта для развития своей идеи».

Рассмотрим нарисованную в «Эврике» картину Вселенной (все последующие цитаты взяты из перевода К. Бальмонта). Согласно По, пространство бесконечно, а «звездная Вселенная» или «Вселенная звезд», то есть заполненная материей часть бесконечного пространства, конечна во времени и в пространстве. В этой бесконечной «метавселенной» наша Вселенная не единственна – «существует некая беспредельная последовательность Вселенных, более или менее подобных той, о которой мы имеем осведомленность...» Каждая из этих Вселенных имеет свои собственные законы, и эти Вселенные никак друг с другом не взаимодействуют – «не имея доли в нашем происхождении, они не имеют доли в наших законах».

Ни они не притягивают нас, ни мы их... Между ними и нами... нет влияний взаимных...» (Нарисованная Эдгаром По картина очень напоминает современную концепцию Мультивселенной (Multiverse) – см. следующую главу.)

Что представляет собой наша «Вселенная звезд»? «Телескопические наблюдения, руководимые законами перспективы, позволяют нам установить, что постижимая Вселенная существует как гроздь гроздей, неправильно расположенных. «Гроздь», из которых эта вселенская «гроздь гроздей» состоит, суть просто то, что мы обычно определяем как «звездные туманности» – и из этих звездотуманностей одна есть верховнейшей завлекательности для человечества. Я разумею Светомлечность, или Млечный Путь.» (Слово «гроздь», использованное Бальмонтом при переводе, отчасти сбивает с толку. В оригинале Эдгар По использует слова «cluster» и «cluster of clusters», что более правильно перевести словами «скопление» и «скопление скоплений».) Сам Млечный Путь – это «чечевицеобразный звездоостров, или собрание звезд». В качестве оценки расстояний до ближайших галактик По, ссылаясь на Вильяма Гершеля, приводит величину 3 миллиона световых лет (≈ 1 Мпк). Кроме того, он упоминает о галактиках, свет от которых идет до нас «миллион веков», то есть расстояние до них составляет ≈ 30 Мпк. Следовательно, доступная наблюдениям «звездная Вселенная» по Эдгару По представляет собой гигантское скопление подобных Млечному Пути галактик.

«Звездная Вселенная» конечна. Обосновывая это, Эдгар По пишет: «Если бы непрерывность звезд была бесконечна, тогда бы заднее поле неба являло нам единообразную светящность, подобную исходящей от Млечного Пути, – ибо безусловно не было бы точки, на всем этом заднем поле, где не существовало бы звезды. Единственный способ поэтому, при таком положении вещей, понять пустоты, что открывают наши телескопы в бесчисленных направлениях, предположить, что рассеяние от незримого

заднего фона так несметно, что ни один его луч доселе совершенно не мог нас достигнуть». Первая фраза из этой цитаты – это краткая формулировка фотометрического парадокса для бесконечной и вечной Вселенной. Вторая фраза искажена переводом Бальмонта: в оригинале написано не «рассеяние», а «distance», то есть «расстояние». С учетом поправки, это предложение дает возможное решение парадокса – Вселенная конечна во времени и поэтому свет от самых далеких звезд до нас еще не дошел.

Как возникла и как эволюционирует «звездная Вселенная»? Здесь Эдгар По вступает в область метафизики. Основным принцип, вводимый По, – это первичное «Единство» вещества. Гравитационное притяжение – это проявление универсальной тенденции материи к возвращению в Единство: «каждый атом притягивает всякий другой атом». В состоянии Единства вещество находится в виде созданной Богом «Первичной Частицы». «Из одной частицы, как из центра, предположим, сферически излучается по всем направлениям – на безмерные, но еще определенные расстояния в первоначально пустом пространстве – известное, невыразимо большое, однако же ограниченное число невообразимых, однако же не бесконечно малых атомов». Причиной «излучения» вещества из Первичной Частицы является вводимая Эдгаром По сила отталкивания. Сила отталкивания действует лишь конечное время – после завершения фазы разлета Вселенная начинает сжиматься под влиянием универсального стремления вещества к Единству, то есть под действием гравитации.

Притяжение и отталкивание – единственные силы, действующие во Вселенной Эдгара По: «Не существует других основ. Все явления сводимы к одному или другому или к сочетанию обоих». Именно наличие двух противоборствующих сил позволяет Вселенной эволюционировать. Без отталкивания вещество замкнулось бы в первичном Единстве, в первочастице, а без притяжения

вещество рассеялось бы в бесконечном пространстве. Как отмечает известный итальянский астроном Альберто Каппи, две силы Эдгара По заставляют вспомнить о космологии Эмпедокла (V век до н.э.) — о силах «любви» и «вражды», управляющих Вселенной, однако у Эдгара По эти силы — физические, описываемые математическими законами.

Эдгар По пишет, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной однородно. Эта однородность противоречит представлению об однородном «излучении» вещества, поскольку тогда вблизи центра этого излучения плотность вещества должна быть выше, чем вдали. Далее По ставит вопрос о том, каким должен быть закон «излучения» для того, чтобы сохранялась крупномасштабная однородность в расширяющейся Вселенной и находит ответ — «сила излучения была прямо пропорциональна квадратам расстояний» ($F \propto r^2$), где под расстоянием понимается расстояние до конкретного слоя в момент максимального разлета. Таким образом, вещество выбрасывалось из Первичной Частицы последовательными сферическими слоями, причем каждый следующий слой содержал все меньше и меньше атомов, был выброшен под действием меньшей силы («число атомов каждого слоя суть мера силы, с которой они были устремлены») и, соответственно, удалился на меньшее расстояние. Эдгар По также приводит связь между силой, с которой был выброшен слой (F), и числом атомов в нем (N): $F \propto N$. (Как было показано Альберто Каппи, механизм «Большого взрыва» Эдгара По неточен — однородное распределение может быть получено лишь при $F \propto \sqrt{N}$).

В конце стадии разлета (в это время вещество существует лишь в виде рассеянных атомов, и никаких объектов во Вселенной еще нет) наступает время, когда не существует никаких законов динамики. На смену этому времени приходит эпоха физической Вселенной, когда начинает работать тяготение, являющееся проявлением

стремления вещества к возвращению в Единство. Силы отталкивания и притяжения по Эдгару По *симметричны* — они подчиняются обратным законам: поскольку «сила излучения была прямо пропорциональна квадратам расстояний», то «закон возврата будет в точности обратным закону исхода» ($F \propto r^{-2}$). Идея, несомненно, очень красивая, но, к сожалению, неверная, поскольку введенная Эдгаром По «сила излучения» не может обеспечить требуемое самим же По однородное распределение вещества.

Далее, на фоне глобального сжатия под действием гравитации, во Вселенной начинают образовываться объекты, возникающие из небольших, как мы бы сейчас сказали, флуктуаций плотности. Причиной существования этих флуктуаций являются атомы разной формы, первоначально однородно разбросанные в пространстве. В качестве механизма формирования звезд и планет Эдгар По принимает гипотезу Лапласа об их совместном образовании из вращающегося и сжимающегося протозвездного облака. Эпоха формирования звезд и галактик давно закончилась и наблюдаемое в настоящее время разнообразие «звездотуманностей» отражает не их разный эволюционный статус в настоящее время, а то, что они находятся от нас на очень разных расстояниях, и из-за конечности скорости распространения света мы видим их такими, какими они были очень давно.

Почему наша Вселенная столь велика? Для ответа на этот вопрос Эдгар По использует соображения, перекликающиеся с так называемым *антропным принципом* (см. следующую главу): «...Пространство и Длительность суть одно. Чтобы Вселенная могла длиться в течение летоисчисления... было необходимо, чтобы изначальное рассеяние атомов было сделано на такую непостижимую распространенность, только бы не быть бесконечным. Требовалось, словом, чтобы звезды могли собраться в зримость из незримой туманности... и потом поседеть, давая рождение и смерть несказанно многочисленным

и сложным различностям жизненного развития; требовалось, чтобы звезды сделали все это, чтобы они имели время целиком выполнить все эти Божественные замыслы...». Другими словами, Вселенная имеет большой размер и, соответственно, большой возраст, поскольку в противном случае наблюдаемое разнообразие объектов и, возможно, жизнь просто не успели бы в ней возникнуть. Прошло более ста лет и американский физик Роберт Дикке, не зная об этих рассуждениях Эдгара По, независимо развил сходные соображения для объяснения возраста Вселенной.

Какова конечная судьба сжимающейся «звездной Вселенной»? Планеты рано или поздно будут поглощены звездами, звезды сольются между собой, сольются галактики, и в итоге образуется «единый естественный шар шаров», который в свою очередь «мгновенно исчезнет», аннигилирует. Фантазия Эдгара По идет дальше и он допускает возможность циклического существования Вселенной: «Но должны ли мы здесь остановиться? Нет. Во Всемирном сцеплении и растворении могут возникнуть... некие новые и быть может совершенно отличающиеся ряды условий – другое мироздание и излучение... Ведя наше воображение этим всепревозмогающим законом законов, законом периодичности... не вполне ли мы оправданы, допуская верование – скажем лучше, услаждаясь надеждой, что поступательные развития... будут возобновляться и впредь, и впредь, и впредь; что новая Вселенная возрастет в бытие и потом погрузится в ничто...».

Итак, если отвлечься от многословной метафизики «Эврики» и оставить только физические идеи, то перед нами предстает стройная картина эволюционирующей динамической Вселенной. Эдгар По соединил астрономические знания первой половины XIX века и модель эволюционирующей Вселенной. По словам Альберто Каппи, «этот революционный и экстраординарный синтез является тем, что придает «Эврике» привкус современности». Действи-

тельно, рождение Вселенной в процессе своеобразного «Большого взрыва» из исходного сверхкомпактного состояния, ее крупномасштабная однородность, существование других вселенных, подчиняющихся неизвестным нам законам, возможная цикличность эволюции Вселенной, наличие в прошлом эпохи формирования объектов, сила отталкивания, существовавшая на определенной стадии развития Вселенной, — все это звучит в наше время необычайно знакомо! Кроме того, возвращаясь к основной теме этой книги, Эдгаром По было предложено и упомянутое ранее решение фотометрического парадокса.

Как Эдгар По смог высказать столь современно звучащие идеи? Сам По объясняет это тем, что он использовал не стандартные пути научного открытия — индукцию и дедукцию, — которые он назвал «узкими и кривыми тропинками — по одной ползти, по другой волочиться», а интуицию. В этом с ним солидарен и Эйнштейн, полагавший, что к самым общим законам природы «ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция». Ключевыми словами здесь является не столько «интуиция», сколько «основанная на проникновении в суть опыта» — интуиция должна на чем-то базироваться, у нее должна быть основа. Лучшей базой для интуиции является, конечно, хорошее знание предмета и его фактической, опытной основы. Все это было у Эдгара Аллана По — он был знаком с основными идеями и результатами современной ему астрономии.

Знали ли создатели современной космологии (им посвящена следующая глава) об «Эврике»? Даже если бы они и были знакомы с ее содержанием, заметного влияния на их работу она оказать не могла. «Эврика» — это не научная статья или монография (хотя список ученых, на работы которых По ссылается, впечатляет — Бессель, Гершель, Гумбольдт, Кеплер, Лагранж, Лаплас, Медлер, Ньютон, Росс, Струве и многие другие), а вольные размышления Эдгара По о строении Вселенной, в которые,

наряду с известными или даже неправильными представлениями, вкраплены удивительные, но практически ни на чем не основанные догадки. Автор одной из самых известных и авторитетных биографий Эдгара По – Артур Куинн – в 1940 году обратился к Артуру Эддингтону с просьбой высказать свое мнение об «Эврике». Ознакомившись с «поэмой в прозе», Эддингтон оценил ее достаточно высоко, написав, что «Эврика» – это творение человека, пытавшегося согласовать науку своего времени с более философскими и духовными стремлениями разума. Он отметил также, что По, по-видимому, имел ум математика и что «соответствие между некоторыми его идеями и современными взглядами является интересным». Сохранилось и короткое замечание Эйнштейна, который в одном из своих писем в 1934 году упомянул, что «Эврика» – это «очень красивое достижение удивительно независимого ума».

Заканчивая рассказ об Эдгаре По, хочу привести цитату из еще одного представителя литературы, в шутливой форме решившего фотометрический парадокс. Стивен Ликок (1869–1944) – известнейший канадский писатель-юморист и по совместительству профессор, специалист в области политической экономии – в веселых «Очерках обо всем» (1926 год) написал: «Мир, или Вселенная, где мы устраиваем свои дела, состоит из бесчисленного количества – может быть, сотни миллиардов, а, впрочем, может быть, и нет – сверкающих звезд, звездочек, комет, темных планет, астероидов, метеоров, метеоритов и пылевых облаков, вращающихся по огромным орбитам во всевозможных направлениях, со всевозможными скоростями... Свет, излучаемый этими звездами, преодолевает такие огромные расстояния, что в основном он до нас еще не дошел».

Эти слова дают решение парадокса, вполне созвучное мыслям Эдгара По, а также с подходом Медлера и Томсона, о которых сейчас пойдет речь.

1.7. Медлер и лорд Кельвин

О, эти бездны, влекущие нас ввысь!
Станислав Ежи Лец

Иоганн Генрих Медлер и Уильям Томсон (лорд Кельвин) были первыми профессиональными учеными, предложившими корректное решение фотометрического парадокса.

Немецкий астроном Иоганн Медлер вырос в Берлине. В 19 лет он потерял обоих родителей и был вынужден взять на себя заботу о трех младших сестрах. Медлер стал преподавать в семинарии, давать частные уроки и одновременно посещать занятия в Берлинском университете. В 1824 году он начал читать лекции по астрономии и по математике богатому банкиру Вильгельму Беру, встреча с которым изменила всю жизнь Иоганна. Медлер убедил банкира построить небольшую частную обсерваторию, на которой они с Бером, начиная с 1830 года, стали активно работать. Основным результатом совместной работы Медлера и Бера стала первая подробная карта Луны «*Marra selenographica*» (1834 год) и подробный текст к ней (1837 год). Эта работа сделала имя Медлера известным и с 1836 года он становится сотрудником Берлинской обсерватории. В 1840 году, после ухода Василия Струве в Пулковскую обсерваторию, освободилось место директора обсерватории в Дерпте (Тарту, Эстония). Медлер занял этот пост, а также стал профессором Дерптского университета. В 1866 году из-за болезни глаз, сделавшей невозможным проведение наблюдений, Медлер ушел в отставку и вернулся в Германию.

Основные научные результаты Иоганна Медлера связаны с исследованием и картографированием поверхностей Луны и Марса, изучением двойных звезд, собственных движений звезд. Известен предложенный Медлером проект календаря, более точного, чем григорианский (в этом календаре на каждые 128 лет приходится не 32 високосных года, а 31).

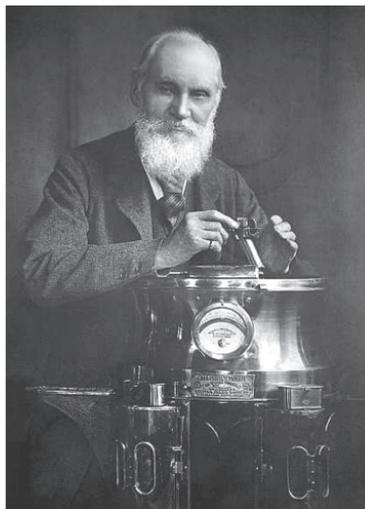


Рис. 13. Иоганн Генрих Медлер (1794-1874)
и Уильям Томсон (лорд Кельвин) (1824-1907)

Иоганн Медлер был также очень известным историком и популяризатором астрономии. Его книга «Популярная астрономия», опубликованная в 1841 году и выдержавшая шесть прижизненных изданий, стала знаменитой, ее читали по всему миру. Упоминается в этой книге и фотометрический парадокс, причем разные издания отражают изменение взгляда Медлера на эту проблему. В первых четырех изданиях парадокс обсуждается в терминах поглощения света от далеких звезд. В пятом издании (1861 год) Медлер пишет, что в бесконечной Вселенной, заполненной бесчисленным количеством звезд, все небо должно сиять как Солнце. Этого нет и, следовательно, должно быть расстояние, начиная с которого свет звезд до нас не доходит. Далее, ссылаясь на Ольберса, он упоминает поглощение света, как возможный механизм такой блокировки излучения. Затем следуют слова: «Действительно, такое расстояние существует, но причина совсем в другом. Скорость света конечна; конечное время прошло

от начала Творения до наших дней и мы, следовательно, можем наблюдать небесные тела только до расстояния, которое свет прошел в течение этого конечного времени... Вместо того, чтобы говорить, что свет с этих расстояний не дошел до нас, надо говорить, что он еще не дошел до нас».

Приведенные слова Медлера дают четкое решение фотометрического парадокса: Вселенная конечна во времени (но может быть пространственно-бесконечной), скорость света также конечна и, следовательно, начиная с определенного расстояния, равному произведению возраста Вселенной на скорость света, свет более далеких звезд до нас еще не дошел и поэтому ночное небо остается темным.

В XIX веке решение Медлера не привлекло особого внимания. Единственным известным человеком, заметившим его, был Фридрих Энгельс. В своей «Диалектике природы» (1873–82, 1885–86 годы) он написал о приведенных выше словах Медлера как о «великолепном» возражении «против так называемого поглощения света», а предположение, «что только поглощение света способно объяснить темноту заполненного во все стороны на бесконечное расстояние светящимися звездами неба», Энгельс назвал «старомодным взглядом».

В 1895 году, после смерти Энгельса, рукопись «Диалектики природы» попала к его другу — Эдуарду Бернштейну, который ее, однако, не опубликовал. Возможной причиной этого был отзыв Эйнштейна, прочитавшего в 1924 году по просьбе Бернштейна рукопись Энгельса. К идее публикации «Диалектики» Эйнштейн отнесся в целом одобрительно, хотя, по его мнению, она не представляет особого интереса ни для физики, ни для истории физики.

Имя английского физика Уильяма Томсона, более известного как лорд Кельвин, знакомо практически каждому жителю Земли благодаря введенной им абсолютной шкале температуры — шкале Кельвина — и, соответствен-

но, градусам Кельвина. Однако не это сделало его одним из самых выдающихся и авторитетных физиков XIX века. Как писал Эйнштейн, «одаренный богатой фантазией, редким умением применять математический аппарат и проникновенным умом, Томсон около 60 лет участвовал в развитии физики и различных отраслей техники, добыв множество результатов, сохранивших свое значение до сегодняшнего дня; немногие ученые были столь же плодотворны».

Работы Уильяма Томсона относятся к термодинамике, одним из основоположников которой он является, гидродинамике, электромагнетизму, упругости, математике. Очень много сделал Томсон в практической физике и в технике — он изобрел или улучшил множество приборов, вошедших во всеобщее употребление. К концу своей долгой жизни Томсон зарегистрировал 70 патентов и опубликовал более 600 научных работ. За деятельность, связанную с прокладкой трансатлантического кабеля, Уильям Томсон в 1866 году был возведен в дворянское достоинство, а в 1892 году королева Виктория пожаловала ему пэрство с титулом «барон Кельвин».

В 1884 году Уильям Томсон выступил в США с циклом лекций перед избранной аудиторией, состоявшей в основном из американских физиков. Позднее Томсон расширил и дополнил эти лекции, и они были изданы в 1904 году под названием «Балтиморские лекции». Однако еще раньше — в 1901 году — одна из лекций была опубликована как отдельная статья в «Philosophical Magazine». В этой статье Томсон проанализировал фотометрический парадокс в рамках модели свободной от поглощения, однородной статической Вселенной и предложил его первое *количественное* решение.

Сначала Томсон, используя подход, аналогичный описанному в п. 1.2, оценивает относительную долю небесной сферы α , закрываемую изображениями звезд, равномерно распределенных внутри сферы радиуса r :

$$\alpha = \frac{3}{4} \cdot N \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^2, \quad (3)$$

где N — полное число звезд внутри этой сферы, а a — линейный радиус звезды (все звезды считаются равными Солнцу по светимости и размеру). Далее он отмечает, что эта доля — α — может быть выражена и через отношение яркости покрытого звездами неба $I(\text{sky})$ к яркости диска Солнца ($I(\odot)$):

$$\alpha = \frac{I(\text{sky})}{I(\odot)}.$$

Последняя формула примечательна своей простотой и наглядностью. Из нее сразу следует, что яркость звездного неба (не фона неба, а неба в целом) может быть записана просто как $I(\text{sky}) = \alpha \cdot I(\odot)$. Как отметил Эдвард Харрисон, удивительно, что за четыреста лет истории парадокса Кельвин оказался единственным человеком, обратившим внимание на эту простую связь между яркостью звездного неба и долей небосвода, покрываемого изображениями звезд.

Далее Томсон переходит к количественным оценкам. Он берет характеристики нашей звездной системы, примерно соответствующие модели Галактики Вильяма Гершеля, — $r = 1000 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{16} \text{ км}$, $N = 10^9$ и $a = 7 \cdot 10^5 \text{ км}$ — и из формулы (3) получает, что $\alpha \sim 10^{-13}$. Это означает, что яркость неба, определяемая звездами Галактики, какой во времена Томсона ее себе представляли, очень мала и небо должно оставаться темным.

Для того чтобы при сохранении средней пространственной плотности звезд увеличить α , например, до 0.04 (то есть 4% небесной сферы будет покрыто изображениями звезд), необходимо увеличить радиус звездной системы в 100 миллиардов раз, то есть он должен быть равен $3 \cdot 10^{27} \text{ км}$. Свет будет преодолевать это расстояние примерно за $3 \cdot 10^{14}$ лет. Однако, как отмечает Томсон, суще-

ствуют неоспоримые динамические аргументы в пользу того, что Солнце может существовать как светящийся объект лишь несколько десятков миллионов лет⁸.

Если допустить, что все звезды светят в течение 100 млн лет, то время, в течение которого свет от внешних областей нашей воображаемой сферы добирается до Земли, будет в 3 миллиона раз превышать время жизни звезд. Следовательно, для того чтобы вся небесная сфера была заполнена излучением, необходимо предположить, что приход излучения от звезд, находящихся на разных расстояниях от Земли, синхронизирован – чем дальше от нас звезда, тем раньше она зажглась. Это, конечно, невозможно, поскольку означало бы выделенность положения Земли во Вселенной.

Кроме того, заключает Томсон, предположение о том, что звезды распределены однородно с одинаковой плотностью за пределами нашей звездной системы, конечно, необоснованно. В сфере с радиусом большим, чем наша Галактика, плотность звезд должна быть гораздо меньше и, в итоге, практически нет никакой возможности сделать так, чтобы значение α (то есть величина относительной яркости неба) превышала 10^{-12} или 10^{-11} .

Таким образом, предложенное Томсоном решение фотометрического парадокса, по сути, состоит в том, что размер наблюдаемой Вселенной гораздо меньше того, который требуется для того, чтобы вся небесная сфера сверкала, как поверхность Солнца. Томсон, по-видимому, считал, что возраст нашей Вселенной ограничен – тогда, естественно, ограничен и размер доступной наблюдениям Вселенной – и поэтому его решение созвучно более ранним идеям Эдгара По и Медлера.

⁸ Эта оценка основана на идее Гельмгольца о том, что Солнце излучает за счет выделения гравитационной энергии при постепенном сжатии. Основной механизм энерговыделения в звездах, конечно, другой – это термоядерные реакции, за счет которых подобные Солнцу звезды могут светить $\sim 10^{10}$ лет. Однако такое увеличение продолжительности жизни звезд, по сути, не меняет выводы Томсона.

На этом я заканчиваю рассказ об истории фотометрического парадокса в его простейшей формулировке, описанной в начале этой главы. Этот рассказ, естественно, не полон, можно упомянуть еще ряд исследователей, так или иначе затрагивавших парадокс (например, Отто фон Герике, Роберт Гук, Бернар де Фонтенель, Христиан Гюйгенс и др.), однако с основными идеями и с главными действующими лицами в его истории мы уже познакомились.

Если бы книга была посвящена только фотометрическому парадоксу, то на этом ее можно было бы закончить. Действительно, наша Вселенная может быть относительно небольшим звездным островком, окруженным со всех сторон темной стеной (так предполагал Кеплер), она может быть конечна во времени и в пространстве (Эдгар По, Медлер, лорд Кельвин) — все эти предположения избавляют нас от парадокса. Однако, конечно, интересно узнать, что *на самом деле* представляет собой окружающий нас мир и как в реальной Вселенной решается загадка темноты ночного неба. Не менее интересен ответ на этот вопрос в числах — почему ночное небо столь тускло и что из этого следует. Ответам на эти вопросы посвящены две следующие главы книги.

Как устроена наша Вселенная

В предыдущей главе, следуя хронологическому порядку, мы подошли к XX веку, в котором представления о структуре и эволюции нашей Вселенной изменились кардинальным образом. Для того чтобы продолжить обсуждение фотометрического парадокса, нам нужно познакомиться с основными элементами современной картины Вселенной. Эта картина достаточно сложна и поэтому мы остановимся лишь на основных ее чертах, опирающихся на наблюдения.

На рубеже XIX и XX веков окружающая человека Вселенная представлялась очень своеобразной. Согласно книге С. Ньюкомба и Р. Энгельмана «Астрономия в общепонятном изложении», «большинство звезд, видимых... в зрительную трубу, занимает пространство, имеющее вид более или менее округлого, сравнительно плоского слоя», «наше солнце с его планетной системой находится около центра описанного выше пространства», «по обе стороны области Млечного пути простирается область туманных пятен, в которой мы находим мало или вовсе не находим звезд, но встречаем много туманностей» (рис. 14). Природа «туманных пятен» оставалась неясной. С одной стороны, еще в XVIII веке начали догадываться, что они

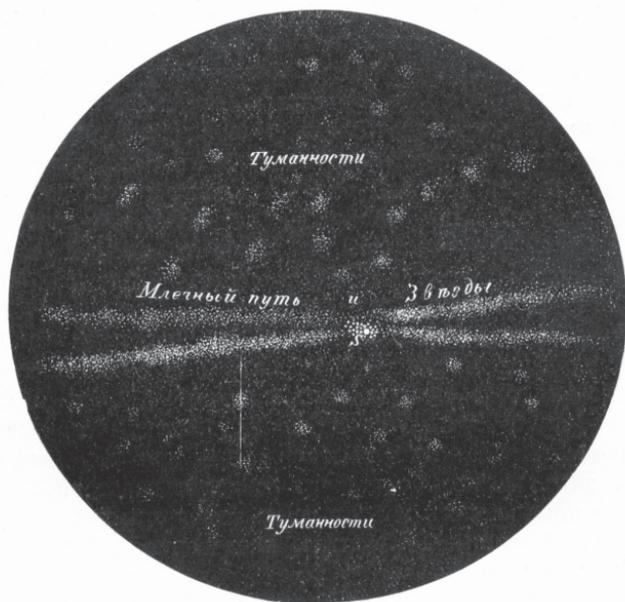


Рис. 14. Устройство видимой Вселенной по представлениям конца XIX—начала XX веков. Положение Солнца отмечено буквой «S». (Рисунок из книги С. Ньюкомба и Р. Энгельмана «Астрономия в общепонятном изложении», 1896, Санкт-Петербург: Издание К. Л. Риккера)

могут являться отдельными звездными островами или, говоря словами Вильяма Гершеля, иными «млечными путями». С другой стороны, некоторые «пятна» разрешались на звезды, в других было видно, что центральная звезда окружена туманной оболочкой и, кроме того, туманности отчетливо избегали плоскости Млечного Пути. Эти наблюдения свидетельствовали скорее о локальной природе «пятен», то есть о том, что они образуют особую подсистему, связанную с самим Млечным Путем. Кроме того, оставалась возможность, что часть «туманностей», действительно, связана с нашей Галактикой, а другая представляет собой далекие «млечные пути».

Для того чтобы выяснить природу слабых туманностей требовалось научиться оценивать их расстояния. В начале XX века этим пытались заниматься многие (например, Кнут Лундмарк, Гебер Кертис, Эрнст Эпик), но решающий шаг был сделан американским астрономом Эдвином Хабблом.

Эдвин Хаббл в 1910 году получил степень бакалавра наук в Чикагском университете (во время обучения он в основном интересовался математикой, астрономией и философией), а затем три года проучился в Оксфордском университете в Англии, став еще и бакалавром права. Однако на юридическую стезю Хаббл так и не вступил, поскольку зародившееся еще в детстве увлечение астрономией привело его в 1914 году в Йеркскую обсерваторию Чикагского университета. Во время Первой мировой войны Хаббл два года прослужил в армии. Демобилизовавшись, он принял предложение Джорджа Хейла – первого директора обсерватории Маунт Вилсон – и с 1919 года стал сотрудником этой обсерватории.

В итоге нужный человек оказался в нужном месте в нужное время. Известный американский астроном Милтон Хьюмасон, работавший в то время в обсерватории ночным ассистентом, так вспоминал о Хаббле, начавшем работу на Маунт Вилсон: «Уверенность и энтузиазм... были обычными для него при решении всех своих проблем. Он твердо знал, что хотел делать и как это выполнить». Что же касается места и времени, то совсем недавно – в ноябре 1917 года – в обсерватории вступил в строй крупнейший в мире 100-дюймовый телескоп-рефлектор. Столь удачное сочетание исследователя, полного новых идей и желаний их реализовывать, и уникального инструмента не могло не привести к выдающимся результатам.

Одним из таких результатов стало обнаружение Хабблом осенью 1923 года переменных звезд в галактике M31 (туманность Андромеды), а затем в NGC 6822 и в M33 (туманность Треугольника). Некоторые из этих пере-

Рис. 15. Эдвин Пауэл Хаббл
(1889–1953)



менных оказались цефеидами¹ — замечательными звездами, для которых в начале XX века была установлена четкая зависимость между периодом колебаний блеска (P) и светимостью (L). Тем самым цефеиды дают возможность оценить расстояние до них — построив кривую блеска звезды, можно найти период колебаний, а затем, зная как у таких звезд связаны P и L , можно найти истинную светимость, а сравнивая наблюдаемый блеск цефеиды и L , находим расстояние.

Изучив ряд цефеид в М31 и М33, Хаббл пришел к выводу, что обе галактики находятся на расстоянии около 900 000 световых лет. Это сразу выводило туманности Андромеды и Треугольника далеко за пределы Млечного Пути и, по сути, решало так долго вызывавшую споры проблему природы «туманных пятен». Границы наблюдаемой Вселенной безмерно раздвинулись, и на смену

¹Цефеиды — яркие звезды, систематически изменяющие свой блеск. Причиной изменения блеска цефеид являются радиальные пульсации, в ходе которых они периодически увеличивают и уменьшают свой размер. Механизм этих пульсаций отчасти сходен с подпрыгиванием крышки на кастрюле с кипящей водой — давление накапливающегося пара заставляет крышку приподняться, пар выходит, крышка опускается, давление пара снова начинает расти и т.д. У цефеид роль крышки играет внешний слой частично ионизованного гелия, а роль пара — излучение звезды: непрозрачность наружного слоя задерживает идущее из недр звезды излучение, слой нагревается, начинает расширяться, состояние ионизации увеличивается, слой становится более прозрачным, затем расширившаяся оболочка охлаждается, сжимается, непрозрачность растет, излучение снова запирается и т.д.



Рис. 16. Центральная область скопления галактик в Персее

картине, показанной на рис. 14, пришло представление о Вселенной, заполненной бесчисленными звездными островами, среди которых наш Млечный Путь ничем особенным (конечно, за исключением нашего существования!) не выделяется (рис. 16).

Эдвин Хаббл продолжил наблюдательное исследование мира галактик и вскоре ему было суждено совершить еще одно фундаментальное открытие.

2.1. Расширение Вселенной

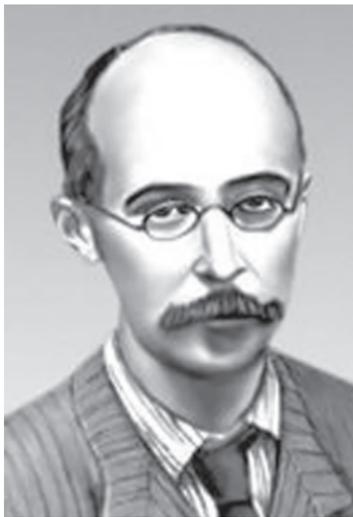
Пустота все чаще требует
расширения жизненного пространства.
Станислав Ежи Лец

Расширение Вселенной – это, наверное, самое грандиозное из известных человечеству явлений. Непросто представить себе, что огромные галактики и их колоссальные скопления на протяжении многих миллиардов лет

стремительно разлетаются друг от друга, будто гонимые неведомой силой. Еще менее просто принять очевидные следствия такого разлета. Но расскажем обо всем по порядку.

Открытие расширения Вселенной, как и многие другие великие достижения человечества, не было совершено одним человеком и, тем более, не было сделано в результате внезапного озарения. Любому открытию, как правило, предшествует длительная подготовительная работа – часто очень утомительная и не слишком интересная. Наивные анекдоты – например, про Архимеда и ванну, про яблоко Ньютона, про явившуюся Менделееву во сне периодическую систему – отражают лишь завершающий этап открытия, когда исследователю вдруг становится ясно то, над чем он очень долго размышлял.

Расширение Вселенной было открыто и, что не менее важно, правильно интерпретировано как реальное расширение, не сразу и было сделано не в одиночку. Ключевые имена в этой истории – это, конечно, А. А. Фридман (рис. 17) и уже знакомый нам Эдвин Хаббл, однако очень



большой вклад был внесен и целым рядом других исследователей. Обнаружение расширения Вселенной неоднократно подробно описывалось и поэтому я остановлюсь лишь на важнейших этапах этой истории.

1912 год: Американский астроном Весто Слайфер начинает спектральные наблюдения туманности Андромеды на 24-дюймовом

Рис. 17. Александр Александрович Фридман (1888–1925)

рефракторе Ловелловской обсерватории. К концу года он накопил несколько фотографических пластинок, полученных с многочасовыми экспозициями, и смог оценить систематическое смещение спектральных линий в спектре туманности по сравнению со спектром сравнения (в качестве стандарта лучевых скоростей использовался Сатурн). Результат оказался неожиданным – если интерпретировать смещение спектральных линий как следствие эффекта Доплера, то «мы можем заключить, что туманность Андромеды приближается к Солнечной системе со скоростью около 300 км/с». В конце своей заметки, опубликованной в 1913 году, Слайфер пишет: «расширение работы на другие объекты обещает результаты фундаментальной важности, но слабость спектров делает работу тяжелой, а накопление результатов – медленным».

Это, действительно, было очень непросто. Прежде, чем были получены первые результаты, Слайфер в течение нескольких лет экспериментировал со спектрографом и с фотоэмульсиями, пытаясь повысить эффективность наблюдений слабых объектов. Кроме того, наблюдения приходилось проводить с многочасовыми экспозициями, которые иногда растягивались на несколько ночей – на день пластинка плотно закрывалась в спектрографе, а следующей ночью наблюдения галактики возобновлялись. Дополнительную сложность придавало то, что телескоп, который использовал Слайфер, не был снабжен точной системой ведения, позволяющей автоматически удерживать в центре поля зрения объект, непрерывно меняющий свое положение из-за суточного вращения небесной сферы. Это означало, что длительные наблюдения на нем превращались почти в пытку – астроном ни на минуту не мог отвлечься от процесса наблюдений, так как ему все время приходилось вручную подправлять положение телескопа. (На вопрос, как он выдерживал столь утомительные наблюдения, Слайфер в шутку отвечал, что он «прислонялся к телескопу».)

Ученик Хаббла Алан Сендидж позднее охарактеризует подобные наблюдения так: «Наблюдения у телескопа, даже в наилучших условиях, утомительны. В худшем случае может быть холодно и тоскливо²...»

1915 год: Весто Слайфер публикует оценки лучевых скоростей для 15 туманностей. За исключением Андромеды и ее спутника, все остальные объекты демонстрируют смещение линий в красную область спектра, означающее их удаление от нас с типичными скоростями, достигающими нескольких сотен км/с. Максимальная измеренная скорость составляет +1100 км/с у NGC 4594.

В ноябре этого же года Альберт Эйнштейн завершает создание общей теории относительности (ОТО), ставшей основой релятивистской космологии.

1916 год: Джордж Паддок из Ликской обсерватории публикует анализ лучевых скоростей туманностей по данным Слайфера. В своем анализе он учел возможность того, что вся система известных туманностей удаляется, причем не только от нас, но и друг от друга. Для этого он впервые ввел в рассмотрение «К-член» – систематическую добавку к скорости, положительное значение которой означает расширение системы туманностей. (Сейчас «К-член» знаком нам под названием «красное смещение».) Формальное решение, найденное Паддоком, свидетельствовало о реальности такого расширения.

1917 год: Весто Слайфер довел число спиральных туманностей с измеренной скоростью до 25. В своей статье он отмечает, что средняя скорость туманностей составляет 570 км/с, что примерно в 30 раз превышает среднюю скорость движения звезд. Большие положительные скорости «подразумевают, что туманности удаляются со скоростью около 500 км/с». Далее он пишет: «Это может означать, что спиральные туманности разлетаются, однако их распределение на небе не согласуется с этим, поскольку они имеют тенденцию к образованию скоплений».

²Цитируется по книге Ю.Н. Ефремова «Вглубь Вселенной».

В этом же году Альберт Эйнштейн публикует первую космологическую модель, основанную на ОТО. Модель Эйнштейна — это пространственно-замкнутая, однородная и изотропная статическая Вселенная. Предположение об однородности и изотропности (сейчас оно называется *космологическим принципом*) было введено из соображений простоты, так как оно сильно упрощает решение уравнений. Статичность же модели тоже казалась вполне естественной: «Самое важное из всего, что нам известно из опыта о распределении материи, заключается в том, что относительные скорости звезд очень малы по сравнению со скоростью света. Поэтому я полагаю, что на первых порах в основу наших рассуждений можно положить следующее приближенное допущение: имеется координатная система, относительно которой материю можно рассматривать находящейся в течение продолжительного времени в покое». (Замечательные слова! Эйнштейн использует максимально осторожные формулировки — «на первых порах» и «приближенное допущение», — формально допуская возможность, как бы она ему и ни была неприятна, и нестационарных решений.) Напомню также, что в 1917 году истинная природа «туманностей» еще не была надежно установлена, и Вселенная считалась состоящей из звезд.

Пытаясь создать стационарную модель Вселенной, Эйнштейн столкнулся с тем, что ему необходимо чуть модифицировать свои уравнения поля, введя в них неизвестную фундаментальную константу Λ (ее также называют космологической постоянной). Если $\Lambda > 0$, то учет соответствующего члена в уравнениях эквивалентен некоторому отталкиванию, противодействующему гравитационному притяжению обычного вещества. Вспомним «непрерывное чудо» («a continual miracle»), которое потребовалось Ньютону, чтобы предотвратить гравитационный коллапс его Вселенной (см. предыдущую главу). С поправкой на более чем двухсотлетнее развитие науки Λ -член Эйнштейна играет роль ньютоновского «чуда»!

Вскоре после публикации работы Эйнштейна, в том же 1917 году, голландский астроном Виллем де Ситтер (рис. 18) нашел решение обобщенных, то есть содержащих Λ -член, уравнений Эйнштейна для пустой (плотность обычного вещества $\rho = 0$) Вселенной. Вселенная де Ситтера – это пустой, искривленный, замкнутый мир, равномерно заполненный гипотетической антигравитирующей средой, ответственной за Λ -член Эйнштейна. В этом странном мире де Ситтер обнаружил интересный эффект – Вселенная в целом остается статической, однако «частота колебаний света уменьшается с удалением от начала координат. Линии в спектрах очень далеких звезд и туманностей должны, следовательно, быть систематически смещены в красную область, приводя к росту кажущейся положительной радиальной скорости». Здесь речь идет именно о «кажущейся» скорости – красное смещение будет присутствовать в спектрах даже покоящихся относительно наблюдателя объектов, причем величина этого смещения будет пропорциональна квадрату расстояния.

Де Ситтер попытался сравнить это предсказание с наблюдениями, однако ему были доступны измерения лучевых скоростей только для трех туманностей, наблюдавшихся более чем одним наблюдателем. (Одиноким измерениям де Ситтер, видимо, не доверял.) Де Ситтер заключил, что скорости спиральных туманностей, действительно, велики по сравнению со скоростями ближайших звезд, однако «этот результат, найденный только по трем туманностям, практически не имеет ценности». Затем он формулирует, как мы сейчас сказали бы, космологический тест – будущие наблюдения лучевых скоростей спиральных туманностей должны показать, наблюдаются или нет у них большие положительные скорости, и тем самым дать аргументы в пользу модели Эйнштейна или де Ситтера.

Таким образом, в 1917 году были созданы две модели Вселенной. Обе модели были однородными и изотроп-

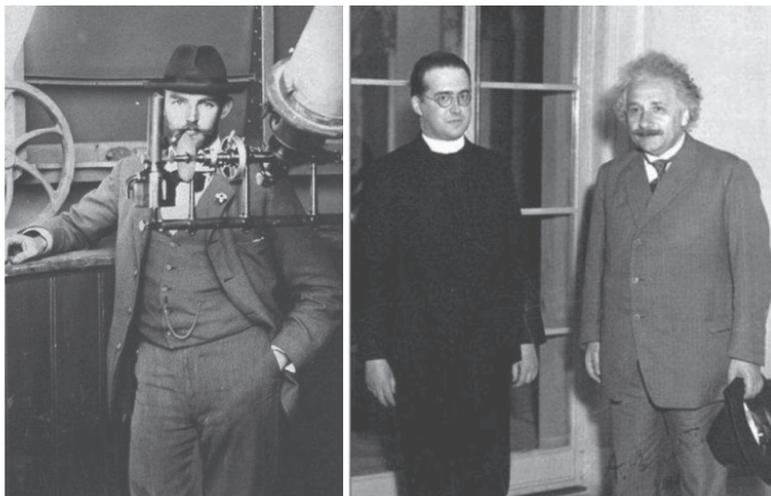


Рис. 18. Слева – Виллем де Ситтер (1872–1934) у телескопа, справа – Жорж Леметр (1894–1966) и Альберт Эйнштейн (1879–1955)

ными, статическими и обе содержали Λ -член. Модель Эйнштейна была заполнена веществом, но излучение от далеких объектов не было смещено в красную область спектра. Модель де Ситтера была пустой, но излучение (предположим, что оно там откуда-то взялось) должно было демонстрировать красное смещение. Однако реальная Вселенная содержит и вещество, и красное смещение в спектрах объектов!

1918 год: Немецкий астроном Карл Вирц повторяет анализ Джорджа Паддока и приходит к заключению, что «система спиральных туманностей по отношению к нынешнему положению Солнечной системы, как центра, движется прочь со скоростью примерно 656 км/с». Иногда можно встретить утверждения, что Вирц не знал о работе Паддока, однако это не так, поскольку список туманностей с измеренными скоростями взят Вирцем именно из работы Паддока (в статье Вирца есть прямая ссылка на соответствующую страницу в статье Паддока). В дальней-

шем, как это иногда бывает в науке, о вкладе Паддока забыли и введение «K-члена» стали считать заслугой Вирца.

1919 год: 29 мая состоялось солнечное затмение, во время которого две группы английских исследователей, работавших в Бразилии и на острове Принсипи рядом с западным побережьем Африки, измерили угловое отклонение лучей света звезд Солнцем. Величина отклонения в пределах ошибок оказалась близка к предсказанию ОТО. С этого времени ОТО становится общепризнанной теорией гравитации и основой для построения моделей Вселенной.

Выходит статья Харлоу и Марты Шепли, в которой изучаются характеристики шаровых звездных скоплений и спиральных туманностей. Один из выводов статьи – спиральные туманности в целом двигаются от Солнца и от плоскости Галактики. И даже более – скорость туманностей зависит от их видимой звездной величины, что может свидетельствовать о существовании зависимости скорости туманности от расстояния.

1922 год: Карл Вирц анализирует по возросшим данным Слайфера лучевые скорости 29 спиральных туманностей. По-видимому, именно в этой его работе впервые появляется термин «красное смещение» («Rotverschiebung» по-немецки), ставший впоследствии общепринятым³.

Вирц подтверждает свои предыдущие результаты, а также результаты Паддока и супругов Шепли, о разлете системы туманностей.

1922, 1924 годы: Александр Александрович Фридман публикует две статьи, в которых он показывает, что уравнения ОТО допускают решения, отвечающие однородному

³Красное смещение, обычно обозначаемое буквой z , – это относительное смещение линий в спектре небесного объекта: $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ – наблюдаемая длина волны линии в спектре космического объекта, а λ_0 – длина волны той же линии в спектре неподвижного лабораторного источника. При интерпретации z как следствия движения источника, то есть результата эффекта Доплера, скорость движения объекта находится просто как $v = c \cdot z$ (при $v \ll c$), где c – скорость света.

пространству, в котором все расстояния изменяются со временем. Фридман решил уравнения в общем виде, то есть с $\rho > 0$ и Λ -членом, однако вывод о существовании таких решений справедлив и для $\Lambda = 0$. Как написал Эйнштейн в 1923 году в заметке, посвященной результатам Фридмана, «оказывается, что уравнения поля допускают, наряду со статическими, также и динамические (т. е. переменные относительно времени) центрально-симметричные решения для структуры пространства». (Появление заметки связано с тем, что сначала Эйнштейн публично не согласился с этими результатами, а затем, убедившись в своей ошибке, так же публично признал их справедливость. Очень редкий случай в истории науки!) Упомянутые ранее модели Эйнштейна и де Ситтера оказались лишь частными случаями решений Фридмана.

Смысл найденного Фридманом решения состоял в том, что наша Вселенная просто не может быть статической — она должна либо расширяться, либо сжиматься. (Как показали позднейшие исследования, статическая Вселенная Эйнштейна, в которой гравитация точно уравновешивается создаваемым Λ -членом «антитяготением», неустойчива — малейшее отклонение от этого равновесия приведет к тому, что Вселенная начнет сжиматься под действием гравитации или расширяться под влиянием Λ -члена.) В каком конкретно состоянии находится Вселенная, должны были показать наблюдения: «Данные, которыми мы располагаем, совершенно недостаточны для каких-либо численных подсчетов и для решения вопроса о том, каким миром является наша Вселенная...». По воспоминаниям Д. Д. Иваненко, в 1924 году Фридман обсуждал измеренные Слайфером большие лучевые скорости спиральных туманностей на семинаре в Петроградском университете. Он полагал, что эти наблюдения могут быть прямым наблюдательным свидетельством в пользу теории расширяющейся Вселенной, однако исследовать этот вопрос он просто не успел.

А. А. Фридман не был астрономом или космологом. Чаще всего его называют математиком, геофизиком или метеорологом, поскольку он получил важные результаты во всех этих науках. В 1910 году он закончил математическое отделение физико-математического факультета Санкт-Петербургского университета и был оставлен в университете «для приготовления к профессорскому званию». Во время Первой мировой он, как и Хаббл, добровольцем поступил в армию, служил в авиационных частях, заведовал Центральной аэронавигационной и аэрологической службой фронта в Киеве. После войны Фридман сначала оказался в Москве, а в 1918 году стал профессором кафедры механики Пермского университета. В 1920 году он, наконец, возвращается в Петроград, начинает преподавать в ряде учебных заведений, включая университет и Политехнический институт. В 1925 году он стал директором Главной геофизической обсерватории. Летом 1925 года А. А. Фридман и П. Ф. Федосеенко с научными целями поднялись на аэростате на высоту 7400 м, поставив тем самым рекорд России.

Даже этот очень неполный и краткий набросок основных этапов жизни и деятельности А. А. Фридмана наглядно иллюстрирует его удивительную разносторонность и активность. Как ученый и как организатор науки А. А. Фридман мог бы сделать еще очень многое, однако 16 сентября 1925 он безвременно (ему было всего 37 лет!) скончался от брюшного тифа.

Почти вся жизнь А. А. Фридмана уместилась в записанных сплошным текстом строчках стихотворения Леонида Мартынова:

«Фридман? До сих пор он житель лишь немногих книжных полок – математики любитель, молодой метеоролог и военный авиатор на германском фронте где-то, а позднее организатор Пермского университета на заре советской власти... Член Осоавиахима. Тиф схватив в Крыму, к несчастью, не вернулся он из Кры-

ма. Умер, и о нем забыли. Только через четверть века вспомнили про человека, вроде как бы оценили! Молод, дерзновенья полон, мыслил он не безыдейно. Факт, что кое в чем пошел он дальше самого Эйнштейна: чуя форм непостоянство в этом мире-урагане, видел в кривизне пространства он галактик разбеганье.»

1923 год: Немецкий математик Генрих Вейль отметил, что, если в модель пустой Вселенной де Ситтера добавить немного вещества, то взаимным тяготением объектов можно пренебречь, а «отталкивающее» влияние Λ -члена должно привести к разлету объектов. Для малых взаимных расстояний скорость разлета оказалась пропорциональной расстоянию между объектами. К аналогичному выводу в этом же году пришел и знаменитый английский физик и астроном Артур Эддингтон.

1924 год: Карл Вирц публикует статью под названием «Де Ситтеровская космология и радиальные движения спиральных туманностей», в которой он впервые попытался найти зависимость между красным смещением (z) и расстоянием по данным о 42 туманностях. Расстояний до туманностей у него не было и тогда, предположив, что все они имеют одинаковый линейный размер, Вирц в качестве характеристики расстояния использовал логарифм углового диаметра. Оказалось, что, действительно, чем меньше угловой размер, тем, в среднем, больше радиальная скорость туманности. Зависимость оказалась не слишком отчетливой (коэффициент линейной корреляции был равен -0.455), однако вполне достаточной, чтобы предположить существование реальной связи между z и расстоянием.

В этом и в следующем годах подобными работами с переменным успехом занимались и другие исследователи (например, Людвиг Зильберштейн, Кнут Лундмарк, Густав Стремберг). Результаты были неуверенными, искомая зависимость оставалась миражом: «нанося лучевые скорости против относительных расстояний, мы находим, что

между двумя величинами может быть связь, хотя и не очень определенная» (К. Лундмарк, 1924). Причинами такого положения являлись, во-первых, отсутствие надежных оценок расстояний до туманностей и, во-вторых, слишком маленький диапазон доступных лучевых скоростей и расстояний (к этому времени Весто Слайфер уже почти исчерпал возможности своего 24-дюймового рефрактора). Ключ к решению этих проблем был в руках у Эдвина Хаббла, который через несколько лет подключится к поиску наблюдательной зависимости между красным смещением и расстоянием.

1925 год: Жорж Леметр (рис. 18) бельгийский католический священник, астроном и математик, публикует свою первую работу по космологии. Леметр проанализировал модель, описывающую мир де Ситтера в системе отсчета, связанной с внесенными в этот мир пробными частицами. В частности, развивая соображения, высказанные ранее Эддингтоном, он дал математическое описание присущей модели де Ситтера внутренней нестатичности.

1927 год: Жорж Леметр заново открывает нестационарные решения уравнений ОТО. Чисто математически работы Леметра и Фридмана очень похожи (за исключением того, что Леметр в своих уравнениях учел вклад давления излучения). Однако в вопросе о связи модели с реальностью Леметр, сделал следующий важный шаг. Во-первых, он впервые в явном виде выписал ожидаемую в модели расширяющейся Вселенной связь между скоростью и расстоянием: $v \propto r$. Во-вторых, он проанализировал доступные данные о скоростях и расстояниях галактик (работами Хаббла было уже доказано, что «спиральные туманности» — это «внегалактические туманности» или просто «галактики») и заключил, что между ними, действительно, есть связь. Леметр даже смог оценить значение коэффициента пропорциональности H_0 зависимости $v = H_0 \cdot r$: $H_0 = 625$ км/с/Мпк. (Коэффициент H_0 позднее стали называть «постоянная Хаббла», а саму эту

зависимость — «закон Хаббла».) В статье Леметра было впервые публично заявлено, что «скорости удаления внегалактических туманностей представляют собой космический эффект расширения вселенной».

Знал ли Леметр о работах А.А. Фридмана? В своих письмах и воспоминаниях он неоднократно писал, что не знал. Впервые о вкладе Фридмана он услышал от Эйнштейна в октябре 1927 года — через полгода после публикации своей статьи. Когда в 1931 году работа Леметра по инициативе Эддингтона была переведена на английский язык (в оригинале она была издана на французском), Леметр добавил в нее ссылку на статью Фридмана 1922 года, которой не было в исходном тексте 1927 года. (Этот нюанс иногда создает путаницу в вопросе об оригинальности работы Леметра.) Кроме того, при «переиздании» из работы Леметра выпала часть, в которой он сравнивает модель расширяющейся Вселенной с данными о лучевых скоростях галактик.

1928 год: Американский физик и математик Говард Робертсон предпринял вторую попытку оценить значение постоянной Хаббла, правда, не на основе концепции Фридмана–Леметра, а в рамках модели де Ситтера. Независимо от более ранних результатов Вейля, Эддингтона и Леметра, он пришел к выводу, что пробные частицы в модели де Ситтера будут разбегаться, причем при малых r будет приближенно выполняться закон $v \propto r$. Взяв красные смещения Слайфера и расстояния галактик по Хабблу, Робертсон нашел, что $H_0 = 461$ км/с/Мпк.

В этом же году начинается программа наблюдений спектров галактик на обсерватории Маунт Вильсон. Для проверки модели де Ситтера Эдвин Хаббл составил список слабых и, вероятно, далеких галактик, у которых было бы желательно получить спектры и измерить лучевые скорости. (О работах Фридмана и Леметра Хаббл в это время не знал, хотя, возможно, знал о результатах Робертсона.) Наблюдениями по этой программе занялся

Милтон Хьюмасон, а сам Хаббл посвятил себя оценкам расстояний до галактик с измеренными к тому времени красными смещениями.

1929 год: 17 января в «Труды Национальной академии наук США» поступили две статьи. Первой была небольшая заметка Хьюмасона, в которой он сообщал о результатах измерения лучевой скорости галактики NGC 7619. Скорость галактики – 3779 км/с – оказалась вдвое больше, чем максимальная скорость, измеренная до этого Слайфером.

Во второй статье Хаббл приводит результаты оценки расстояний до 24 галактик, основанные в основном на предположении об одинаковой светимости ярчайших звезд в них. Сравнив эти расстояния со скоростями по данным Слайфера и отчасти Хьюмасона, Эдвин Хаббл приходит к выводу, что существует «...примерно линейная связь между скоростями и расстояниями туманностей, для которых ранее были опубликованы лучевые скорости...» (рис. 19). Наклон этой зависимости (H_0) составляет примерно 500 км/с/Мпк.

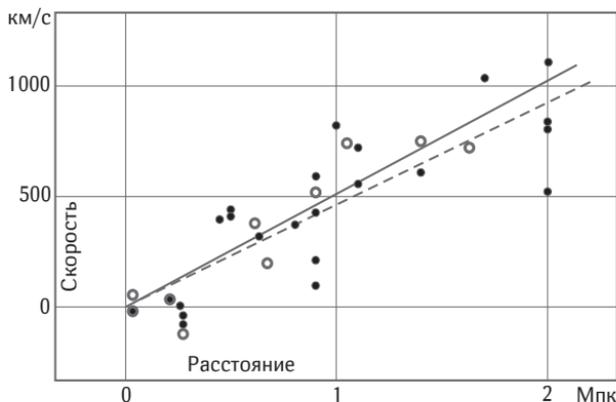


Рис. 19. Соотношение скорость – расстояние (по вертикальной оси отложена радиальная скорость галактики в км/с, по горизонтальной – расстояние в мегапарсеках). Из работы Хаббла 1929 года.

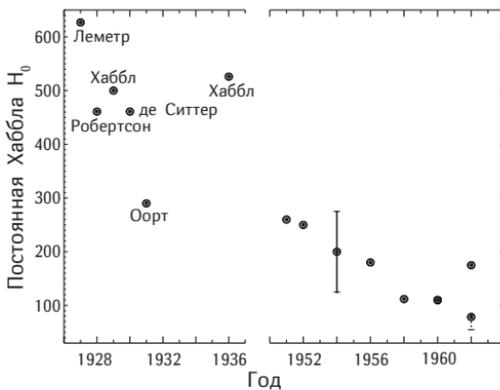


Рис. 20. История определения постоянной Хаббла с 20-х по 60-е годы XX века (Тамман 2006). Первые попытки ее измерения были предприняты Жоржем Леметром и Говардом Робертсоном.

По сравнению с ранними результатами других наблюдателей – в первую очередь, Карла Вирца, которого иногда называют «европейским Хабблом без телескопа», и Кнута Лундмарка – данные Хаббла выглядят гораздо более убедительными. В первую очередь это объясняется тем, что Хаббл использовал не косвенные методы оценки расстояний, которые замывали наблюдательную корреляцию, а более прямые. Позднее, однако, оказалось, что шкала расстояний Хаббла была систематически заниженной, причем избежать этого в начале XX века было практически невозможно. Например, тогда использовалось неточная калибровка соотношения период – светимость для цефеид, а именно по этой зависимости определялась светимость ярчайших звезд в ближайших галактиках. Кроме того, на применявшихся Хабблом фотопластинках у относительно далеких галактик нельзя было отличить изображения ярчайших звезд от компактных эмиссионных туманностей. Во всех этих и других систематических ошибках шкалы расстояний постепенно разобрались (рис. 20) и в настоящее время считается, что значение постоянной Хаббла близко к 70 км/с/Мпк (рис. 21).

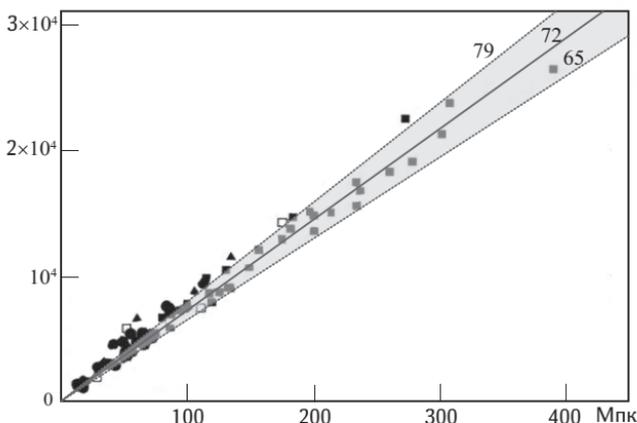


Рис. 21. Современная версия соотношения скорость – расстояние, построенная с использованием различных методов оценки расстояний до галактик (данные Hubble Space Telescope Key Project). Числа в верхнем правом углу – значения постоянной Хаббла, соответствующие трем разным прямым на рисунке.

Можно ли считать, что работа Хаббла 1929 года ознаменовала собой открытие расширения Вселенной? Да, если смотреть в ретроспективе из нашего времени. Именно эта статья Хаббла, а также его последующая работа по уточнению наблюдательной зависимости $v-r$, убедили большинство астрономов в реальности этого явления. Нет, если вернуться в 1929 год.

Хаббл, как я уже упоминал, не знал о моделях динамической Вселенной Фридмана и Леметра и предполагал, что его наблюдения могут быть использованы для проверки модели де Ситтера. В конце своей знаменитой статьи он пишет, что «зависимость скорость – расстояние может представлять собой эффект де Ситтера и, следовательно, в дискуссию об общей кривизне пространства могут быть введены количественные данные». Далее он объясняет, что имеет в виду: «В космологии де Ситтера смещение спектра может происходить по двум

причинам — кажущееся замедление атомных вибраций и общая тенденция материальных частиц к разбеганию... Относительный вклад этих двух эффектов должен определять форму соотношения между расстояниями и наблюдаемыми скоростями; и в этой связи можно подчеркнуть, что линейная зависимость... является первым приближением, представляющим ограниченный диапазон расстояний».

Другими словами, есть *два* «эффекта де Ситтера». Первый эффект появился в 1917 году в статье де Ситтера про пустую Вселенную с лямбда-членом и он состоит в том, что у покоящихся объектов может наблюдаться красное смещение, пропорциональное квадрату расстояния до них. Второй эффект появился позднее в работах теоретиков, показавших, что пробные частицы в модели де Ситтера будут разбегаться под действием отталкивающей силы лямбда-члена, причем на малых взаимных расстояниях должна выполняться зависимость $v \propto r$. Если один из эффектов доминирует, то можно ожидать как линейную, так и квадратичную зависимость v от r . Хаббл, как следует из его слов, считает свои результаты предварительными и полагает, что при наблюдениях более далеких галактик может проявиться нелинейность зависимости v от r .

Итак, в начале 1929 года все элементы мозаики заняли свои места — было установлено, пусть еще и не слишком надежно, линейное соотношение скорость — расстояние, Фридманом была создана модель динамической, эволюционирующей Вселенной, эта модель была переоткрыта Леметром и им же сравнена с наблюдательными данными (конечно, еще не столь точными, как у Хаббла) — и, казалось бы, это должно было привести к быстрому признанию картины расширяющейся Вселенной. Однако работы Фридмана и Леметра оставались практически неизвестными, а при интерпретации зависимости скорость — расстояние преобладала осторожность.

Например, в июле 1929 года вышла «листовка» (leaflet) Тихоокеанского астрономического общества с популярным изложением результатов Хьюмасона и Хаббла. В частности, там было написано: «Сложно поверить, что скорости реальны, что вся материя в действительности разбегается от нашей области пространства. Проще предположить, что световые волны удлинняются и линии в спектрах смещаются в красную область, как будто объекты удаляются, по причине некоторого свойства пространства или за счет каких-то сил, влияющих на свет во время его долгого путешествия к Земле».

1930, 1931: Жорж Леметр, узнав о достижениях Хаббла, написал письмо Артуру Эддингтону, в котором он напомнил о своей работе 1927 года. Эддингтон, сам уже начавший заниматься построением модели нестационарной Вселенной, был огорчен, что его опередили. Однако, как он написал в письме де Ситтеру, удар был смягчен тем, что в прошлом Леметр был его – Эддингтона – студентом.

Эддингтон сразу понял значение работы Леметра и ее связь с результатами Хаббла и Хьюмасона. В этом и в последующем годах он и де Ситтер публикуют работы, обращающие внимание на результаты Леметра. Кроме того, в 1931 году по инициативе Эддингтона издается перевод статьи Леметра на английский язык. В том же 1931 году выходит капитальная статья Хаббла и Хьюмасона, в которой они подтвердили существование соотношения $v - r$ на гораздо большем материале: «...наблюдения охватили интервал расстояний в 18 раз больший, чем было в предварительном исследовании... Но форма корреляции остается неизменной... и, таким образом, зависимость скорость – расстояние представляется общей характеристикой наблюдаемой области пространства». По-видимому, именно начало 30-х годов можно считать временем, когда окончательно сложилась концепция расширяющейся Вселенной.

К сожалению, А. А. Фридман не дожил до 30-х годов и не смог принять участие в дальнейшем развитии теории расширяющейся Вселенной. Его результаты были переткрыты Леметром, которому принадлежат еще много интересных идей в этой области. Отчасти поэтому, вероятно, пионерский вклад Фридмана оказался «в тени» работ Леметра, который в западной литературе долго считался чуть ли не единственным автором модели расширяющейся Вселенной. В этой связи любопытно, что пионеры релятивистской космологии – де Ситтер, Леметр, Робертсон, Эддингтон и не упоминавшийся ранее Ричард Толмен – знали работы Фридмана и, пусть и далеко не всегда, ссылались на них.

Что же касается Эйнштейна, то, как было написано раньше, он публично признал справедливость результатов Фридмана еще в 1923 году. Позднее он также не раз признавал приоритет Фридмана. В 1931 году Эйнштейн, имея в виду расширяющуюся Вселенную, сказал, что первым на этот путь вступил Фридман. В том же году в устном выступлении на тему «Современное состояние теории относительности» он говорит о «русском математике», который пришел к мысли, «что *видимая материя* находится в состоянии расширения». В приложении к многократно переиздававшейся книге «О специальной и общей теории относительности» Эйнштейн снова отметил, что Фридман показал, что «...уравнения поля допускают решение, в котором «радиус мира» зависит от времени (расширяющееся пространство). В этом смысле, согласно Фридману, теория требует расширения пространства... Поэтому открытие Хаббла можно рассматривать до некоторой степени как подтверждение теории».

Эдвин Хаббл, поставивший последнюю точку в вопросе о существовании и форме соотношения $v-r$, относился к своему открытию неоднозначно. Он всегда активно отстаивал свой и Хьюмаса приоритет в открытии линейного соотношения между скоростью и расстоянием галак-

тик, подчеркивал, что оно является «маунтвилсоновским достижением», но никогда не утверждал, что он открыл расширение Вселенной. Сомнения по поводу интерпретации красного смещения в спектрах галактик оставались у него до конца жизни. Например, в популярной заметке, изданной в 1946 году, он написал: «Свет, приходящий к нам от туманностей, теряет энергию, пропорционально пройденному им расстоянию. Этот факт установлен, но его объяснение все еще остается неясным». Определенная непоследовательность Хаббла в этом вопросе, возможно, помешала ему стать первым астрономом, который получил бы Нобелевскую премию по физике. К сожалению, Хаббл просто не успел ее получить — он должен был стать лауреатом премии за 1953 год, однако не дожил до нее несколько месяцев, а посмертно Нобелевская премия не вручается.

Как видно из моего рассказа (конечно, неполного), расширение Вселенной было открыто в результате многолетней и целеустремленной работы многих исследователей — как наблюдателей, так и теоретиков. В области наблюдений основополагающими были работы Слайфера, измерившего красные смещения ближайших галактик, и Хаббла, научившегося оценивать их расстояния. Теоретическая возможность нестационарности нашей Вселенной была открыта Фридманом (поэтическую Вселенную Эдгара По считать серьезной космологической моделью все-таки сложно), Леметр подтвердил это открытие и впервые сравнил наблюдения с теорией. Отчасти курьезом выглядит то, что работы Фридмана и Леметра остались незамеченными, в то время как искусственная модель де Ситтера послужила стимулом для наблюдательных работ по поиску связи v и r . Окончательный синтез теории и наблюдений сложился в начале 30-х годов, причем очень большой вклад в пропаганду новой картины Вселенной внес Артур Эддингтон.

2.2. Расширяется ли Вселенная на самом деле?

Размышляя над всей этой историей, я исходил из предпосылки, что истиной, какой бы невероятной она ни казалась, является то, что останется, если отбросить все невозможное. Не исключено, что это оставшееся допускает несколько объяснений. В таком случае необходимо проанализировать каждый вариант, пока не останется один, достаточно убедительный.

Артур Конан Дойл

Почему все так уверены, что Вселенная действительно расширяется? В научной литературе реальность расширения уже почти не обсуждается, так как профессиональные ученые, знающие проблему во всей ее полноте, в этом практически не сомневаются. Активные обсуждения этого вопроса часто вспыхивают на разного рода интернет-форумах, где представители так называемой «альтернативной науки» (в противовес «ортодоксальной») снова и снова пытаются «изобрести велосипед» и найти другое, не связанное с удалением объектов, объяснение наблюдаемому в спектрах галактик красному смещению. Такие попытки, как правило, основаны на незнании того, что, помимо красного смещения, есть и другие свидетельства в пользу реальности космологического расширения. Строго говоря, стационарность Вселенной была бы гораздо большей проблемой для науки, чем ее расширение!

Современная наука представляет собой плотно сотканную ткань взаимосвязанных результатов или, если угодно, постоянно строящееся здание, из основания которого уже нельзя вытащить ни один из кирпичей без того, чтобы все здание не рухнуло. Расширение Вселенной и созданная на его основе картина строения и эволюции Вселенной и составляющих ее объектов – один из таких базовых результатов современной науки.

Но сначала несколько слов о недоплеровской интерпретации красного смещения. Вскоре после открытия зависимости z от расстояния возникла — и это вполне естественно — идея, что красное смещение может быть связано не с удалением объектов, а с тем, что по пути от далеких галактик часть энергии фотонов теряется и, следовательно, длина волны излучения увеличивается, оно «краснеет». Приверженцами такой точки зрения были, к примеру, один из основоположников астрофизики в России А. А. Белопольский, а также Фриц Цвикки — один из самых нестандартно мыслящих и плодотворных астрономов XX века. К подобному объяснению z время от времени склонялся и сам Хаббл. Вскоре, однако, выяснилось, что подобные процессы потери энергии фотонами должны сопровождаться размыванием изображений источников (чем дальше галактика, тем сильнее размывание), что не наблюдалось. Другой вариант этого сценария, как было показано советским физиком М. П. Бронштейном, предсказывал, что эффект покраснения должен быть разным в разных частях спектра, то есть он должен зависеть от длины волны. К началу 60-х годов XX века развитие радиоастрономии закрыло и эту возможность — для данной галактики величина красного смещения оказалась не зависящей от длины волны. Знаменитый советский астрофизик В. А. Амбарцумян еще в 1957 году резюмировал ситуацию с разными вариантами интерпретации красного смещения таким образом: «Все попытки объяснить красное смещение каким-либо механизмом, отличным от принципа Доплера, окончились неудачей. Эти попытки вызывались не столько логической или научной необходимостью, сколько известным страхом... перед грандиозностью самого явления...».

Рассмотрим теперь несколько наблюдательных тестов, поддерживающих картину глобального космологического расширения Вселенной. Первый из них был предложен еще в 1930 году американским физиком Ричардом Тол-

меном. Толмен обнаружил, что так называемая поверхностная яркость объектов будет вести себя по-разному в стационарной и в расширяющейся Вселенной.

Поверхностная яркость — это просто энергия, излучаемая единицей площади объекта в единицу времени (например, за секунду) в каком-нибудь направлении или, более точно, в единице телесного угла. В стационарной Вселенной, в которой причиной красного смещения является какой-то неизвестный закон природы, приводящий к уменьшению энергии фотонов по пути к наблюдателю («старение» или «усталость» фотонов), поверхностная яркость объекта должна уменьшаться пропорционально величине $1 + z$. Это означает, что, если галактика находится на таком расстоянии, что для нее $z = 1$, то она должна выглядеть в два раза тусклее по сравнению с такими же галактиками вблизи нас, то есть при $z = 0$.

В расширяющейся Вселенной зависимость яркости (имеется в виду болометрическая, то есть полная, просуммированная по всему спектру, яркость) от красного смещения становится гораздо сильнее — она спадает как $(1 + z)^4$. В этом случае объект с $z = 1$ будет выглядеть уже не в 2, а в 16 раз более тусклым. Причиной столь сильного падения яркости является то, что, помимо уменьшения энергии фотонов из-за красного смещения, при реальном удалении галактик начинают работать дополнительные эффекты. Так, каждый новый фотон, испускаемый далекой галактикой, будет добираться до наблюдателя со все большего расстояния и тратить на дорогу все большее время. Интервалы между приходами фотонов возрастут и, значит, за единицу времени на приемник излучения будет попадать меньше энергии и наблюдаемая нами галактика будет казаться слабее. Кроме того, в случае реального расширения зависимость углового размера галактики от z будет другой, чем для стационарной Вселенной, что также приводит к изменению ее наблюдаемой поверхностной яркости.

Тест Толмена выглядит очень простым и наглядным — действительно, достаточно взять два сходных объекта на разных красных смещениях и сравнить их яркости. Однако технические сложности его осуществления таковы, что применить этот тест смогли лишь относительно недавно — в девяностых годах XX века. Сделал это ученик и последователь Хаббла знаменитый американский астроном Алан Сендидж⁴. Совместно с разными коллегами Сендидж опубликовал целую серию статей, в которых он рассмотрел тест Толмена для далеких эллиптических галактик.

Эллиптические галактики примечательны тем, что они относительно просто устроены. В первом приближении их можно представить как гигантские конгломераты родившихся практически одновременно звезд, имеющие сглаженное, без каких-либо особенностей, крупномасштабное распределение яркости (ярчайшие галактики на рис. 16 относятся как раз к этому типу). У эллиптических галактик существует простое эмпирическое соотношение, связывающие воедино их основные наблюдательные характеристики — размер, поверхностную яркость и разброс скоростей звезд вдоль луча зрения. (При определенных допущениях это соотношение является следствием предположения об устойчивости эллиптических галактик.) Разные двумерные проекции этой трехпараметрической зависимости также показывают хорошую корреляцию —

⁴Как вспоминал Сендидж, Хаббл плохо реагировал на критику и, когда Джесси Гринстейн в конце 1930-х годов опубликовал заметку, в чем-то опровергавшую его результаты, Хаббл был недоволен. В конце 1940-х годов Гринстейн перебрался в Калифорнийский университет и по совместительству стал работать в обсерватории Маунт Вилсон, где с 1919 года уже работал Хаббл. Сендидж отметил, что Хаббл и Гринстейн так и не стали близкими коллегами и их отношения всегда оставались холодными.

Летом 1949 года Хабблу для работы на Маунт Вилсон понадобился студент. Он обратился с этим вопросом к Гринстейну и тот порекомендовал ему Сендиджа. Таким образом, с начала 1950 года Алан Сендидж стал сотрудником Хаббла. Свои воспоминания о том времени Сендидж закончил вопросом: «Кого бы Гринстейн послал к Хабблу, если бы они были друзьями?».

например, существует зависимость между размером и яркостью галактик. Значит, сравнивая эллиптические галактики одного характерного линейного размера на разных z , можно реализовать тест Толмена.

Примерно так и действовал Сендидж. Он рассмотрел несколько скоплений галактик на $z \sim 1$ и сравнил поверхностные яркости наблюдаемых в них эллиптических галактик с данными для подобных галактик вблизи нас. Для корректности сравнения Сендиджу пришлось учесть ожидаемую эволюцию яркостей галактик за счет «пассивной» эволюции составляющих их звезд, однако эта поправка в настоящее время определяется вполне надежно. Результаты оказались однозначными – поверхностная яркость галактик изменяется пропорционально $1/(1+z)^4$ и, следовательно, Вселенная расширяется. Модель стационарной Вселенной со «стареющими» фотонами не удовлетворяет наблюдениям.

Еще один интересный тест был также предложен очень давно, а реализован лишь относительно недавно. Фундаментальным свойством расширяющейся Вселенной является кажущееся замедление времени у далеких объектов. Чем дальше от нас в расширяющейся Вселенной находятся часы, тем медленнее, как нам кажется, они идут – на больших z длительность всех процессов кажет-

ся растянутой в $(1+z)$ раз (рис 22). (Этот эффект подобен релятивистскому замедлению времени в специаль-

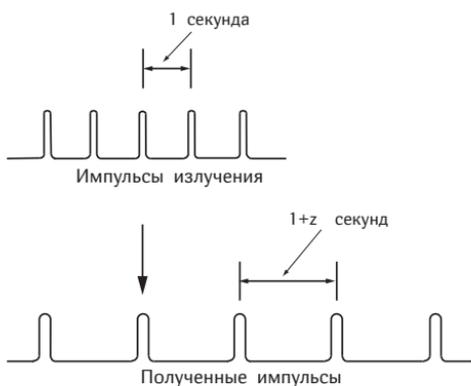


Рис. 22. Импульсы, испущенные далеким объектом на красном смещении z с интервалом в 1 секунду, доберутся до нас с интервалами $1+z$ секунд.

ной теории относительности.) Поэтому, если найти такие «часы», которые можно наблюдать на больших расстояниях, то можно непосредственно проверить реальность расширения Вселенной.

В 1939 году американский астроном Олин Вилсон опубликовал заметку, в которой он отметил удивительное постоянство формы кривых блеска сверхновых звезд (см. пример кривой блеска сверхновой Тихо Браге на рис. 4, а также рис. 23) и предложил использовать эти кривые в качестве «космологических часов». Вспышка сверхновой – это один из самых мощных катастрофических процессов во Вселенной. В ходе такой вспышки звезда со скоростью $\sim 10^4$ км/с сбрасывает оболочку с массой, сравнимой с массой Солнца. При этом звезда становится ярче в десятки миллионов раз, и в максимуме блеска она способна затмить всю галактику, в которой она вспыхнула. Столь яркий объект, естественно, виден на очень больших, космологических расстояниях.

Как можно использовать кривые блеска сверхновых в качестве «часов»? (Их можно использовать и в качестве «стандартной свечи», но об этом я расскажу чуть позже.) Во-первых, не все сверхновые одинаковы по своим наблюдательным проявлениям и по кривым блеска. Их делят на два типа (I и II), а те в свою очередь подразделяют на несколько подтипов. В дальнейшем мы будем обсуждать только кривые блеска сверхновых типа Ia. Во-вторых, даже у этого типа звезд кривые блеска на первый взгляд выглядят очень разнообразными и совсем не очевидно, что с ними можно сделать. Например, на рисунке 23 показаны наблюдаемые кривые блеска нескольких близких сверхновых типа Ia. Эти кривые довольно сильно отличаются: например, светимости показанных на рисунке звезд в максимуме блеска различаются почти в три раза.

Ситуацию спасает то, что разнообразие форм наблюдаемых кривых блеска подчиняется четкой корреляции: чем ярче SN в максимуме, тем более плавно затем спада-

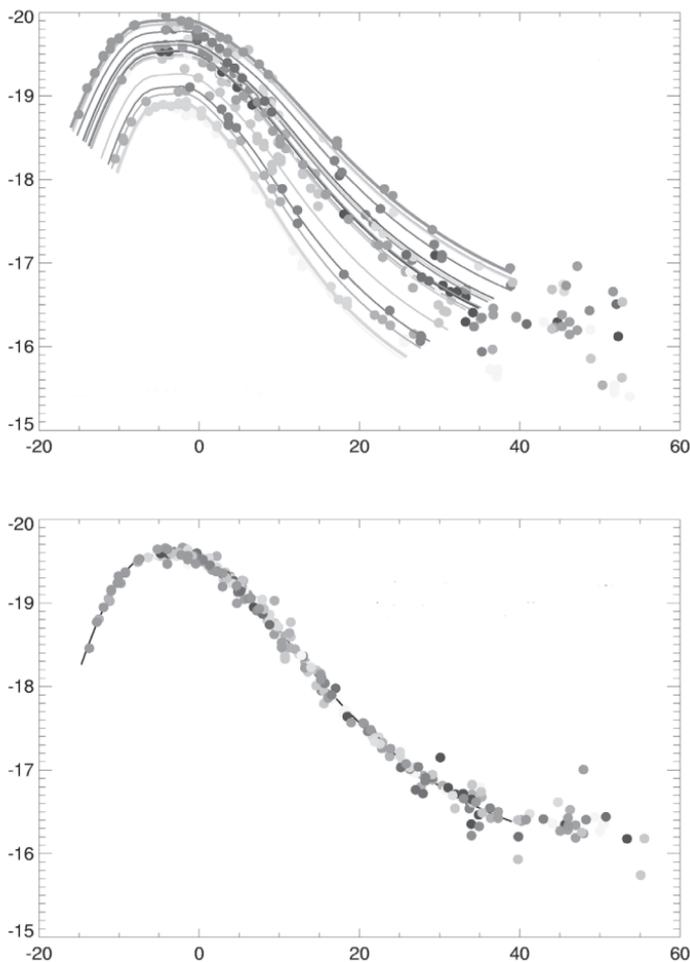


Рис. 23. Кривые блеска SNIa: на верхнем рисунке показаны наблюдаемые кривые, на нижнем они сведены в одну с учетом корреляции между формой кривой блеска и светимостью сверхновой в максимуме. По горизонтальной оси отложены дни после максимума блеска, по вертикальной — абсолютная звездная величина (мера светимости).

По данным проекта Calan-Tololo Supernova Survey

ет ее яркость. Эта зависимость была открыта советским астрономом Юрием Псковским еще в 1970-х годах и позднее – уже в 1990-х – была подробно изучена другими исследователями. Оказалось, что с учетом этой корреляции кривые блеска SN Ia удивительно однородны (см. рис. 23) – например, разброс светимостей SN Ia в максимуме блеска составляет лишь около 10%! Следовательно, изменение блеска у SN Ia может рассматриваться как стандартный процесс, длительность которого в локальной системе отсчета хорошо известна. Использование этих «часов» показало, что у далеких сверхновых (сейчас обнаружено уже несколько десятков SN с $z > 1$) изменения видимого блеска и спектра замедлены на множитель $(1 + z)$. Это является непосредственным и очень сильным аргументом в пользу реальности космологического расширения.

Еще одним аргументом является согласие возраста Вселенной, получаемого в рамках модели расширяющейся Вселенной, с возрастом реально наблюдаемых объектов. Расширение означает, что с течением времени расстояния между галактиками увеличиваются. Мысленно обратив этот процесс вспять, мы приходим к выводу, что это глобальное расширение должно было когда-то начаться. Зная текущий темп расширения Вселенной (он определяется значением постоянной Хаббла) и баланс плотностей составляющих ее подсистем (обычное вещество, темная материя, темная энергия), можно найти, что расширение началось примерно 14 миллиардов лет назад. Значит, мы не должны наблюдать в нашей Вселенной объекты с возрастом, превышающим эту оценку.

Но как можно найти возраст космических объектов? По-разному. Например, с помощью радиоактивных «часов» – методами ядерной космохронологии, которые позволяют оценивать возраст объектов путем анализа относительной распространенности изотопов с большими периодами полураспада. Изучение содержания изотопов в метеоритах, в земных и лунных породах показало, что

возраст Солнечной системы близок к 5 млрд лет. Возраст Галактики, в которой находится наша Солнечная система, конечно, больше. Его можно оценить по времени, которое необходимо для образования наблюдаемого в Солнечной системе количества тяжёлых элементов. Расчеты показывают, что синтез этих элементов должен был продолжаться в течение ~ 5 млрд лет до образования Солнечной системы. Следовательно, возраст окружающих нас областей Млечного Пути близок к 10 млрд лет.

Другой способ датирования Млечного Пути основан на оценке возраста составляющих его старейших звезд и звездных скоплений. Этот метод основан на теории звездной эволюции, хорошо подтвержденной разнообразными наблюдениями. Результат этого подхода – возраст различных объектов Галактики (звезд, шаровых скоплений, белых карликов и пр.) не превышает $\approx 10\text{--}15$ млрд лет, что согласуется с современными представлениями о времени начала космологического расширения.

Возраст других галактик определить, конечно, сложнее, чем возраст Млечного Пути. У далеких объектов мы не видим отдельные звезды и вынуждены изучать лишь интегральные характеристики галактик – спектры, распределение яркости и пр. Эти интегральные характеристики складываются из вкладов огромного числа составляющих галактики звезд. Кроме того, наблюдаемые характеристики галактик сильно зависят от наличия и распределения в них межзвездной среды – газа и пыли. Все эти трудности преодолимы и современные астрономы научились восстанавливать истории звездообразования, которые должны были привести к наблюдаемым в настоящее время интегральным характеристикам галактик. У галактик разных типов эти истории различны (например, эллиптические галактики возникли в ходе мощной одиночной вспышки звездообразования много миллиардов лет назад, в спиральных галактиках звезды рождаются и в настоящее время), однако не обнаружено га-

лактик, начало звездообразования в которых превышало бы возраст Вселенной. Кроме того, наблюдается вполне определенный, ожидаемый для реально расширяющейся Вселенной, тренд – чем дальше по z мы забираемся во Вселенную, то есть переходим к все более ранним этапам ее эволюции, тем, в среднем, более молодые объекты мы наблюдаем.

Важными аргументами, поддерживающими расширение Вселенной, являются также существование реликтового излучения, наблюдаемое увеличение его температуры с ростом красного смещения, а также содержание элементов во Вселенной, но об этом я расскажу чуть позже. Закончить же свой рассказ я хочу, быть может, самым наглядным свидетельством расширения Вселенной – изображениями далеких галактик (см. пример на рис. 24).

Одними из самых эффектных результатов работы космического телескопа «Хаббл» (Hubble Space Telescope), несомненно, являются замечательные картинки разнообразных космических объектов – туманностей, звездных скоплений, галактик и пр. Наблюдениям из космоса не мешает земная атмосфера, размывающая изображения, и поэтому снимки HST примерно в десять раз более четкие, чем наземные. На этих очень четких снимках (их угловое разрешение составляет около $0.''1$) в 1990-х годах впервые удалось детально рассмотреть структуру далеких галактик. Как оказалось, далекие галактики не похожи на те, что мы наблюдаем около нас. С ростом красного смещения увеличивается доля асимметричных и неправильных галактик, а также галактик в составе взаимодействующих и сливающихся систем: если при $z = 0$ к таким объектам можно отнести лишь несколько процентов галактик, то к $z = 1$ их доля возрастает до $\sim 30\text{--}40\%$.

Почему это происходит? Простейшее объяснение связано с расширением Вселенной – в более ранние эпохи взаимные расстояния между галактиками были меньше (при $z = 1$ они были в два раза меньше) и, следовательно

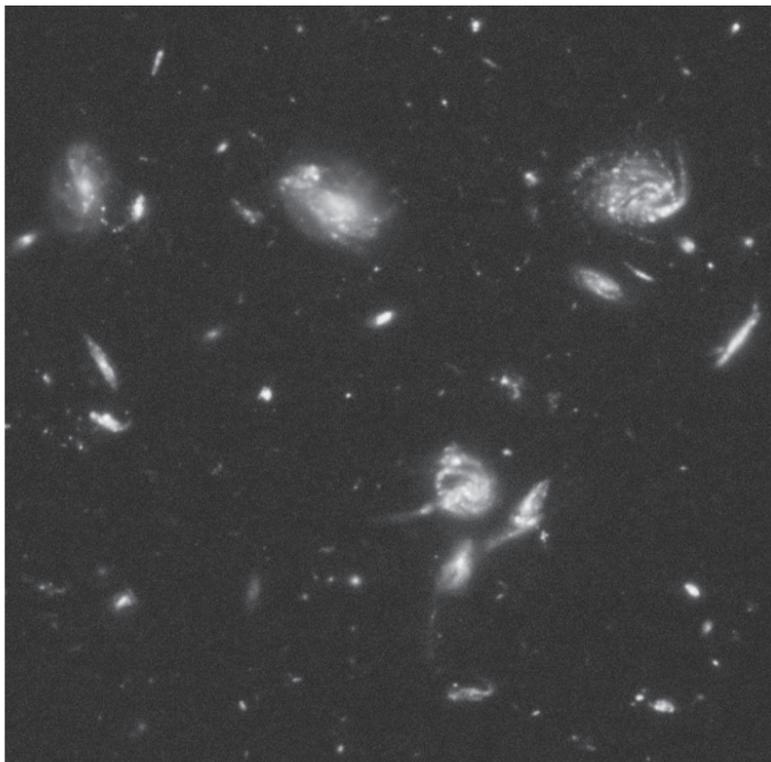


Рис. 24. Фрагмент Сверхглубокого поля космического телескопа «Хаббл» (размер изображения $30'' \times 30''$). Большинство видимых на рисунке галактик имеют $z \approx 0.5 \div 1$, то есть они относятся к эпохе, когда Вселенная была примерно вдвое моложе.

но, галактики должны были чаще возмущать друг друга близкими прохождениями и чаще сливаться. Этот аргумент не является столь однозначным, как упомянутые раньше, однако он наглядно свидетельствует о вполне определенной, соответствующей картине расширяющейся Вселенной, эволюции свойств галактик со временем.

Итак, расширение Вселенной подтверждается разнообразными, совершенно не связанными друг с другом, независимыми наблюдательными тестами. Кроме того, не-

стационарность Вселенной неизбежно возникает и при теоретических исследованиях ее структуры и эволюции. Все это позволило знаменитому советскому физику-теоретику Якову Зельдовичу еще в начале 1980-х годов заключить, что теория Большого взрыва, основой которой является расширение Вселенной, «столь же надежно установлена и верна, сколь верно, что Земля вращается вокруг Солнца. Обе теории занимали центральное место в картине мироздания своего времени, и обе имели много противников, утверждавших, что новые идеи, заложенные в них, абсурдны и противоречат здравому смыслу. Но подобные выступления не в состоянии препятствовать успеху новых теорий».

2.3. Что означает расширение Вселенной?

– Все страньше и страньше! –
Вскричала Алиса... – Я теперь раз-
двигаюсь, словно подзорная труба.
Прощайте, ноги! (В эту минуту она
как раз взглянула на ноги и увидела,
как они стремительно уносятся вниз.
Еще мгновение – и они скроются из
виду).

Льюис Кэрролл

Итак, наша Вселенная расширяется. Однако что это означает? Есть ли центр, из которого началось расширение, и где он находится? Что было до начала этого расширения? Что находится вне Вселенной – ведь она должна расширяться во что-то? Эти и подобные им вопросы часто возникают при первом знакомстве с космологией.

Скажу сразу, что такие вопросы в их простейшей формулировке лишены смысла и они, как правило, основаны на сравнении процесса расширения Вселенной с обычным

взрывом. Стивен Хокинг предложил такую аналогию: почти в любом месте на Земле вопрос о том, что находится к северу от него, имеет смысл, но в точке Северного полюса этот вопрос становится бессмысленным. Так и разговор о структуре и рождении Вселенной в терминах непосредственного житейского опыта также не имеет смысла.

Слово «взрыв» появилось в названии стандартной космологической модели уже довольно давно. Весной 1949 года знаменитый английский астрофизик Фред Хойл выступил на радио BBC с серией научно-популярных передач об астрономии и, рассказывая о модели расширяющейся Вселенной, впервые назвал ее знаменитым сейчас термином «Большой взрыв» – «Big Bang». (На самом деле слово «Bang» правильнее переводить с английского как «удар», «стук», звук удара или взрыва – «бац», «бабах».) Возможно, Хойл вложил в эти слова иронический смысл, так как он был противником стандартной космологии и автором собственной теории стационарной Вселенной, возможно, он просто хотел, чтобы слушатели лучше представили себе эту модель, но, как бы то ни было, вскоре это название стало практически синонимом теории расширяющейся Вселенной. Не исключено, что не вполне корректный перевод введенного Фредом Хойлом термина нанес больше вреда пониманию модели расширяющейся Вселенной для русскоязычных любителей астрономии, чем его – Хойла – критика теории Большого взрыва!

Дело в том, что расширяющаяся Вселенная не является результатом «взрыва» в обычном понимании. Расширение при взрыве любого взрывчатого вещества происходит из-за разности давления продуктов взрыва и окружающей среды (например, воздуха). В эволюционирующей Вселенной никаких градиентов давления нет. При обычном взрыве всегда можно локализовать его центр, кроме того, всегда можно указать, куда разлетаются остатки взрыва. В расширяющейся Вселенной нет ни центра, ни стан-

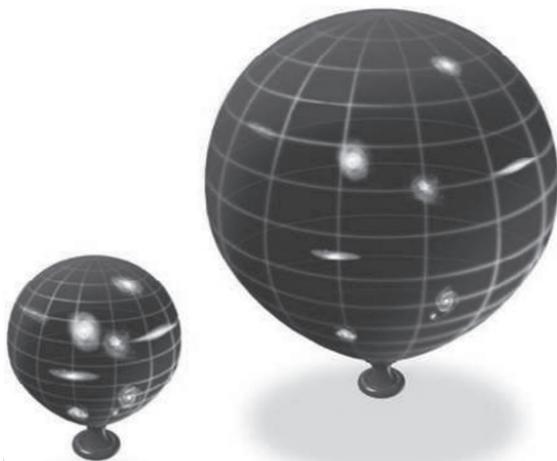


Рис. 25. Модель расширения Вселенной в виде раздувающегося воздушного шарика. При раздувании шара расстояния между галактиками увеличиваются, хотя сами галактики остаются неподвижными по отношению к сопутствующей, расширяющейся вместе с шариком, системе координат (вертикальные и горизонтальные линии на шарах). Размеры самих галактик также не меняются в ходе расширения Вселенной (рисунок из статьи Линевивера и Дэвис (2005))

дартно трактуемого окружающего пространства. Эдвард Харрисон сформулировал это так: «вселенная не в пространстве, она содержит пространство». Так как можно представить себе расширение Вселенной?⁵

По-видимому, самая популярная аналогия, хотя, как и любая аналогия, не вполне точная, была предложена еще в 1930 году Артуром Эддингтоном. В статье, посвященной обсуждению устойчивости замкнутой космологической модели Эйнштейна, он сравнил процесс расширения с

⁵ В 1961 году во время одной из конференций Алан Сендидж оказался рядом с Жоржем Леметром. Леметр поинтересовался у Сендиджа, может ли он представить себе кривизну пространства, его красоту и неевклидов характер. Сендидж признался, что он пытался, но это оказалось не по силам его воображению. Леметр ответил: «Жаль. Мир нельзя понять без этого. Если ваша интуиция не срабатывает, возможно, вам стоит сменить вид деятельности».

раздуванием резинового шара, причем галактики и все другие объекты находятся *на поверхности* этого шара (рис. 25). Очевидно, что по мере раздувания шара галактики будут удаляться друг от друга, причем в каждой точке поверхности шара будет казаться, что все объекты удаляются именно от этого места. Тем самым, центр расширения резинового «пространства» будет находиться вне этого «пространства».

Другая наглядная модель расширения Вселенной – это кусок обыкновенного теста с вкрапленными в него изюминками. По мере разбухания теста изюминки (галактики) начинают удаляться друг от друга, однако по отношению к окружающему тесту (пространству) изюминки никуда не двигаются. Отсутствует и центр расширения – если не рассматривать области вблизи границы куска, то «разбегание» изюминок можно обнаружить в каждой точке теста.

По-другому представил себе расширяющуюся Вселенную американский художник Джосайя МакИлхени (рис. 26). В его скульптуре (!), вдохновленной беседами с известным космологом Дэвидом Вайнбергом, сам момент начала космологического расширения скрыт центральной алюминиевой сферой. Эта сфера изображает так называемую поверхность последнего рассеяния (см. следующий параграф), из которой в разных направлениях торчат стержни. Стержни – это не траектории частиц, это визуализация времени: длина стержней служит мерой времени, прошедшего после начала расширения. Стержни имеют разную длину, и их концах закреплены стеклянные диски, изображающие галактики и их скопления, а также лампочки (квазары). При продвижении от центра скульптуры к ее краям происходит эволюция свойств космических объектов – растут размеры галактик и скоплений, появляются эллиптические галактики (стеклянные шарик), яркость и частота встречаемости лампочек меняются в соответствии с наблюдаемой эволюцией свойств кваза-

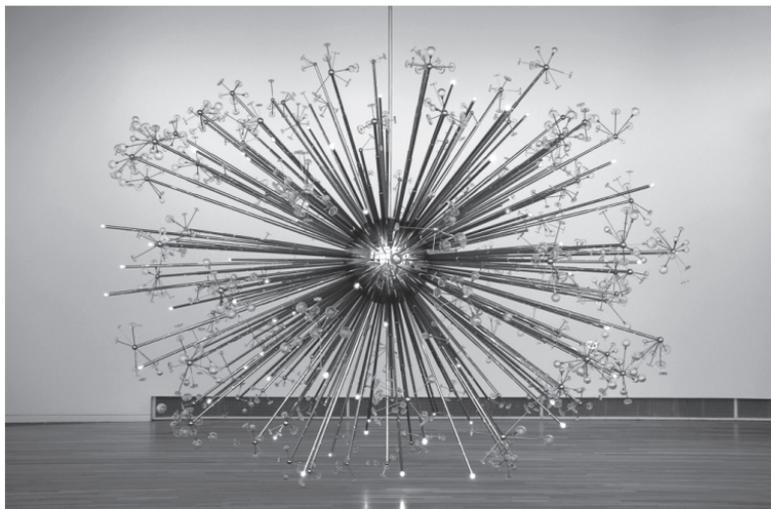


Рис. 26. «An End to Modernity» – скульптура, иллюстрирующая эволюцию нашей Вселенной (©МакИлхени 2005).

Photo courtesy the artist Collection Tate Modern, London, United Kingdom

ров. Стоя возле этой скульптуры, можно читать лекции по космологии и эволюции галактик!

Вернемся снова к расширению Вселенной. При описании обычного взрыва мы можем говорить о скорости разлета его продуктов по отношению, например, к центру взрыва. В случае расширения Вселенной на больших – космологических – расстояниях понятия скорости и расстояния теряют свою однозначность, становятся модельно зависимыми. Поэтому для описания расширения астрономы используют величину, легко определяемую из наблюдений, – красное смещение (z) в спектрах галактик.

В рамках стандартных представлений красное смещение возникает из-за расширения Вселенной – в процессе распространения в расширяющемся пространстве длины волн фотонов непрерывно растут (рис. 27). Этот рост пропорционален так называемому масштабному фактору $R(t)$, который характеризует изменение со временем (t) про-



Рис. 27. Формирование красного смещения (λ_0 – длина волны, испущенная удаляющимся из-за расширения Вселенной источником; λ – длина волны этого же объекта при наблюдениях с Земли)

странственных расстояний в однородно расширяющейся Вселенной :

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + z = \frac{R(t)}{R(t_0)},$$

где $R(t)$ – масштабный фактор в настоящую эпоху, а $R(t_0)$ – значение этого фактора в более раннюю эпоху t_0 , когда был испущен регистрируемый в настоящее время фотон.

Несколько числовых примеров. Как видно из приведенной выше формулы, красному смещению, равному 1, соответствует отношение масштабных факторов, равное 2, что означает, что при $z = 1$ расстояния между несвязанными гравитационно объектами были в 2 раза меньше. Кроме того, длина волны излучения, распространяющегося от галактики с $z = 1$, увеличилась к настоящему времени в 2 раза. По сравнению с эпохой, когда z было равно 9, расстояния увеличились в 10 раз, в 10 раз увеличились и длины волн детектируемого на Земле излучения.

Связь между временем и красным смещением нелинейная, и зависит от принятой модели Вселенной. Так, в рамках современных представлений нашей эпохе ($z = 0$) соответствует время после начала космологического расширения, равное примерно 14 млрд лет. Возраст Вселенной при $z = 1$ равен примерно 6 млрд лет, то есть нас от той эпохи отделяют почти 8 млрд лет. К $z = 9$ – примерно на этом красном смещении сейчас наблюдаются самые

далекие галактики – Вселенная расширялась лишь около 500 млн лет.

Раньше в научно-популярной литературе было принято характеризовать далекие квазары и галактики скоростью, с которой они удаляются от нас. Например, рассказывая об удаленном квазаре, авторы, чтобы поразить воображение читателя, писали, что он удаляется от нас со скоростью, составляющей 90% скорости света. Для расчета скорости, как правило, использовали релятивистскую, то есть полученную в рамках специальной теории относительности, формулу для эффекта Доплера. Такой подход, конечно, не верен. Во-первых, эта формула применима лишь для *отклонений* от глобального космологического расширения (например, для описания пекулярных, вызванных взаимодействием друг с другом, скоростей галактик) и она не подходит для описания глобального расширения. В случае расширяющейся Вселенной связь между z и скоростью выражается более сложным образом, чем по формуле для эффекта Доплера. Во-вторых, как обычно считается, увеличение длин волн при космологическом расширении – это вообще не эффект Доплера в его классическом понимании.

Остановлюсь на последнем утверждении чуть подробнее. Обычный, знакомый со школы, эффект Доплера – это изменение длины волны фотона, излученного источником, движущимся в обычном пространстве, в «жесткой» системе координат. При этом скорость фотона по отношению и к источнику излучения, и к наблюдателю равна скорости света и, кроме того, с испущенным фотоном по пути до наблюдателя ничего не происходит. В расширяющемся пространстве фотон движется со скоростью света относительно той точки, в которой он находится, но из-за глобального расширения каждая такая точка непрерывно удаляется от наблюдателя. Изменение длины волны фотона происходит непрерывно на протяжении всего пути до наблюдателя (рис. 27), так что итоговое красное смеще-

ние является кумулятивным эффектом. Можно, упрощая, сказать, что в обычном эффекте Доплера объекты перемещаются в пространстве, а при формировании космологического красного смещения объекты никуда не двигаются, а расширяется само пространство между ними, включая распространяющееся в нем излучение.

В относительно небольших областях пространства, в которых расширение происходит с малыми относительными скоростями ($\Delta z \leq 0.1$), связь космологического z и скорости совпадает с формулой для классического эффекта Доплера. Поэтому в астрономии и возникла отчасти неудачная традиция оперировать скоростями удаления галактик, что имеет смысл лишь для $v \ll c$, и для простоты говорить о красном смещении как об эффекте Доплера. Корректнее этот эффект называть, скажем, космологическим эффектом Доплера⁶.

Таким образом, наблюдаемое в спектрах галактик красное смещение имеет, по меньшей мере, две составляющие — космологическое z , вызванное расширением Вселенной, и классическое доплеровское, связанное с упоминавшимися чуть ранее пекулярными скоростями галактик из-за их взаимодействия друг с другом. (Конечно, вклад в красное смещение дают лишь радиальные составляющие этих скоростей.) Пекулярные скорости галактик,

⁶Приведенное выше описание красного смещения в терминах концепции расширяющегося пространства является в настоящее время наиболее популярным. Однако, как отмечают некоторые космологи, слишком буквальная трактовка расширения в виде поверхности расширяющегося резинового шарика, может приводить к ошибкам. При таком описании, например, сложно удержаться от неверного представления, что наша Галактика, Солнечная система и вообще любые объекты также должны расширяться. Как считает, например, известный английский космолог Джон Пикок, космологическое красное смещение более естественно рассматривать как совокупность бесконечно малых кинематических доплеровских смещений. Это означает, что о наблюдаемом в спектрах далеких объектов красном смещении можно все-таки говорить как об эффекте Доплера с той оговоркой, что для его расчета нельзя пользоваться известными из классической физики или специальной теории относительности формулами.

как правило, малы (сотни—тысячи км/с) и поэтому их вклад в итоговое красное смещение далеких галактик незначителен. Есть еще один — третий — фактор, влияющий на наблюдаемое z , — гравитационное красное смещение, связанное с «покраснением» фотонов, удаляющихся от массивных объектов. В большинстве случаев вклад этого эффекта также мал по сравнению с глобальным расширением.

2.4. Реликтовое излучение

Время настало. Эксперимент должен начаться. Наклонившись вперед, он устремил взгляд во тьму и произнес:
— Да будет свет. И стал свет.

Эрик Френк Рассел

Существование и свойства так называемого реликтового излучения (в англоязычной литературе принято название «космическое микроволновое фоновое излучение» или просто CMBR) — краеугольный камень современной космологии. Именно открытие этого излучения в середине 1960-х годов привело к всеобщему признанию теории Большого взрыва. Предсказание реликтового излучения связано с именем русского, а впоследствии американского, физика Георгия Гамова — свою научную карьеру он начал в России, а затем в 1934 году навсегда переехал в США (рис. 28). Однако у этого открытия была и предыстория.

В мае 1931 Жорж Леметр опубликовал небольшую заметку, в которой он попытался впервые рассмотреть самые ранние стадии образования Вселенной с точки зрения физики. Он предположил, что Вселенная родилась при взрыве, понимаемом, по-видимому, буквально, сверхплотного «первичного атома» (при этом сразу вспоминается «Первичная Частица» Эдгара По). Этот первичный атом представляет по Леметру гигантское, размером в несколь-

ко астрономических единиц, атомное ядро с огромным атомным номером и массой, равной массе Вселенной. Атом неустойчив, и за счет «сверхрадиоактивности» он начал распадаться «на все меньшие и меньшие атомы». Леметр предположил, что остатки этого первичного радиоактивного взрыва наблюдаются до сих пор в виде так называемых космических лучей — потоков частиц высокой энергии, приходящих со



Рис. 28. Георгий Антонович Гамов (1904–1968)

всех направлений из космического пространства. Эти идеи Леметра не привлекли особого внимания и не получили развития. Сама концепция расширяющейся Вселенной в те годы еще только складывалась, а уж наблюдаемый в настоящее время некий «реликт» ранних стадий ее эволюции казался полной фантастикой.

Еще один классик космологии — Ричард Толмен — в 1930-х годах ввел идею термодинамической истории расширяющейся Вселенной и рассмотрел поведение излучения при расширении. Он показал, что, если во Вселенной есть излучение со спектром, соответствующим спектру излучения абсолютно черного тела, то такое излучение в ходе расширения будет остывать, сохраняя свой чернотельный характер.

В 1940-х годах к космологии обратился Георгий Гамов. Его интерес к расширяющейся Вселенной был не случайным — в 1920-х годах он слушал лекции А. А. Фридмана в

Ленинградском университете и еще в те годы планировал заняться релятивистской космологией. Гамов был очень необычным человеком и еще более необычным ученым. О нем написано много воспоминаний и книг, в его честь продолжают собираться конференции, как в России, так и за рубежом. Лучше всего, наверное, о нем скажут приводимые ниже высказывания его коллег и учеников.

Станислав Улам, знаменитый американский математик польского происхождения, писал: «Воистину «трехмерный» человек, он источал энергию, был полон жизни... любил анекдоты и коварные шутки, которым мог отдаваться, не зная меры...

Банах как-то сказал мне: «Хорошие математики видят аналогии между теоремами или теориями, а лучшие математики видят аналогии между аналогиями». У Гамова эта способность усматривать аналогии между моделями, описывающими физические теории, проявлялась с поразительным размахом. Было удивительно наблюдать, как при тех невиданно сложных и крайне труднодостижимых уровнях, на которых применялась нами математика, он мог заходить так далеко в использовании интуитивных образов и аналогий, черпая их из исторических и даже художественных сопоставлений».

Эдвард Теллер, «отец американской водородной бомбы», вспоминал, что идеи Гамова были фантастичными. Иногда правильными, чаще неправильными, но всегда интересными. Он также написал, что, когда он думает о Гамове, он думает о простых, красивых и ведущих к цели физических идеях.

Вера Рубин, одна из пионеров исследования скрытой массы в галактиках, в начале 1950-х годов была аспиранткой Гамова. Она отмечала, что Гамов был далеко впереди астрономического общественного мнения, как, впрочем, и доступных астрономических данных. По ее мнению величайшее значение Гамова состояло в том, что он задавал пророческие, далеко идущие вопросы.

Роберт Херман (вскоре он появится на этих страницах) писал, что Гамов был одним из величайших физиков XX столетия, чей интуитивный гений часто превышал чисто технические способности развивать собственные идеи. По мнению Хермана, к сожалению, Гамов так и не получил при жизни то формальное признание, которое он заслуживал за многие выдающиеся, созидательные достижения.

Одним из таких достижений явилось создание теории горячего начала Вселенной. Для Гамова казалось очевидным, что Вселенная родилась из горячего и сверхкомпактного состояния. (Гамов считал, что эта идея принадлежит Фридману, однако сам Фридман в своих публикациях о температуре Вселенной нигде не упоминал.) Гамов предположил⁷, что в ранней Вселенной в условиях гигантских плотностей и температур произошел синтез всех химических элементов. Он также понял, что ядерные реакции в ранней Вселенной протекали в сильно неравновесных условиях, причем в течение очень короткого времени, так как Вселенная стремительно расширялась и ее плотность и температура также стремительно падали. По сути, идея Гамова была почти правильной — космическая распространенность двух самых главных элементов — водорода и гелия — и в самом деле объясняется ядерными реакциями в ранней Вселенной, однако более тяжелые элементы синтезируются, как было выяснено позднее, в звездах, в процессе их эволюции. Развитие этих идей требовало проведения очень нелюбимых Гамовым сложных и громоздких расчетов и поэтому в 1946 году он подключил к работе по первичному нуклеосинтезу своего аспиранта Ральфа Альфера, а затем и молодого физика Роберта Хермана.

В 1948 году Гамов рассмотрел поведение вещества и излучения в расширяющейся Вселенной. На самой ранней стадии эволюции Вселенная состояла из смеси вещества

⁷ Основы этих идей были высказаны Гамовым в устном докладе еще в 1942 году, а первая публикация относится к 1946 году.

и излучения, находившихся в термодинамическом равновесии при колоссальной температуре, причем плотность энергии излучения преобладала над плотностью вещества. По мере расширения плотности энергии излучения и вещества уменьшались, законы падения были разными (плотность излучения спадала быстрее), и поэтому должен был наступить момент, когда они – эти плотности – сравниваются. Эпоха, когда преобладание излучения над веществом сменяется доминированием вещества, имеет по Гамову очень важное космогоническое значение – только после этого момента возможно образование галактик за счет гравитационной неустойчивости материи. Гамов привел грубую, но верную по порядку величины, оценку температуры в переходную эпоху эволюции Вселенной: $\sim 10^3$ К.

В своей работе Гамов использовал простые аппроксимации и приближенные оценки. Альфер и Херман к тому времени получили точные решения уравнений Фридмана для расширяющейся Вселенной и, узнав о результатах Гамова, поняли, что могут уточнить его оценки для переходной эпохи. Гамов помог быстрой публикации заметки своих учеников, и она вышла из печати всего через 2 недели после его собственной. Так появилась знаменитая работа Альфера и Хермана, важнейшим результатом которой стала первая оценка современной температуры заполняющего Вселенную реликтового излучения – 5 К. (В работе Гамова этой оценки не было – он оценил температуру излучения лишь в «демаркационную», переходную эпоху.)

Оценка температуры реликтового излучения была получена Альфером и Херманом на основе относительно громоздких вычислений. Гамов не любил длинных вычислений, кроме того, он, по-видимому, полагал, что столь фундаментальный результат можно получить проще – из общих соображений. Поэтому, к удивлению своих учеников, он в последующие годы неоднократно возвращался к

оценке современной температуры реликтового излучения, применяя для этого столь любимые им простые соображения и приближенные формулы⁸.

В 1953 году на основе общих формул космологической динамики он получил 7К, а в 1956 году – 6К. Учитывая уровень развития космологии 1940–1950-х годов, согласие с реальным значением (3К) следует признать просто превосходным!

Итак, существование слабого «отблеска» Большого взрыва предсказано, но можно ли его обнаружить? Вопреки иногда встречающемуся мнению, пионеры понимали важность наблюдений реликтового излучения и даже предпринимали для этого некоторые шаги. Еще в конце 1940-х годов Альфер и Херман обсуждали этот вопрос с экспертами по радарам (при столь низкой температуре максимум излучения реликтового излучения должен был находиться в радиодиапазоне), но, очевидно, без успеха – в те годы радиоастрономия находилась еще в процессе становления! Как вспоминал Алан Сендидж, в середине 1950-х у него состоялся разговор с Джеймсом Фоллиным, который в то время сотрудничал с Альфером и Херманом. К своему удивлению Сендидж услышал, что они планируют использовать ракетные наблюдения для обнаружения предсказанного ранее «5К» излучения. Сендидж, не очень поняв, о чем идет речь, не придал разговору особого значения. Как бы то ни было, к концу 1950-х годов у Гамова и его учеников изменились научные интересы, а их работы по первичному нуклеосинтезу и эволюции ранней Вселенной, и так не привлекавшие особого внимания, были полностью забыты.

Дальнейшее хорошо известно и неоднократно описывалось в популярной литературе (см., например, «Первые три минуты» Стивена Вайнберга и книги И. Д. Новикова) –

⁸История одной из этих работ увлекательно описана А.Д. Чернинным в статье «Как Гамов вычислил температуру реликтового излучения, или немного об искусстве теоретической физики» – см. Успехи физических наук, том 164, стр. 889, 1994.

в 1964 году сотрудники американской компании «Белл» Арно Пензиас и Роберт Вилсон⁹, работая с 20-футовой рупорной радиоантенной (Холмдел, США), совершенно случайно открыли реликтовое излучение. Определенный драматизм их открытию придавало то, что существование реликтового излучения было незадолго до этого переоткрыто в работах американских и советских теоретиков, причем по соседству – в Принстоне – для поиска этого излучения уже было начато сооружение специальной антенны. Кроме того, как это было осознано позднее, реликтовое излучение фактически уже было открыто раньше, но, к сожалению, не узнано как таковое!

Основными особенностями открытого Пензиасом и Вилсоном излучения были его удивительная изотропность (сигнал не зависел от направления антенны) и, как вскоре выяснилось в ходе новых наблюдений, чисто тепловой, соответствующий излучению абсолютно черного тела, спектр. Температура этого излучения составляла примерно 3 К, что хорошо согласовывалось с теоретическими расчетами ожидаемой в настоящую эпоху температуры. При такой температуре максимум излучения реликтового излучения приходится на длину волны около 2 мм (рис. 29).

В настоящее время представление о реликтовом излучении и о его роли усложнилось. В эволюции Вселенной, помимо выделенной Гамовым переходной эпохи, был еще один очень важный этап – рекомбинация. Рекомбинация – это эпоха, когда первичная смесь заряженных ядер, электронов и фотонов охладилась до температуры при-

⁹Иногда можно встретить утверждения, что Пензиас и Вилсон были радиоинженерами. Это не совсем так. Работая в компании, Пензиас и Вилсон занимались, конечно, и техническими вопросами, но их основные интересы лежали в области астрономии. Ко времени своей работы в «Белл» оба исследователя уже защитили диссертации по радиоастрономии – работа Пензиаса была посвящена исследованию радиоизлучения галактик в скоплениях, а Вилсон занимался изучением нашей собственной Галактики. Реликтовое излучение было открыто ими в ходе тестовых астрономических наблюдений.

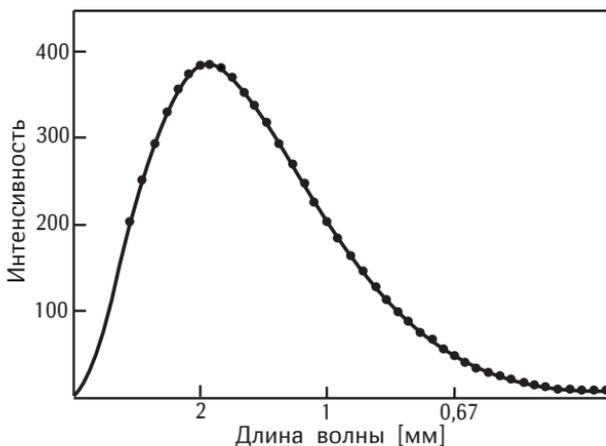


Рис. 29. Спектр излучения космического микроволнового фонового излучения по данным спутника COBE (по горизонтальной оси отложена длина волны излучения в миллиметрах, по вертикальной – интенсивность излучения). Точками показаны результаты измерений, непрерывная кривая – теоретический спектр излучения абсолютно черного тела с температурой $T = 2,725$ К.

мерно 3000 К и при этой температуре свободные электроны начали соединяться с протонами, образуя нейтральные атомы водорода.¹⁰ С исчезновением свободных электронов Вселенная стала «прозрачной» для излучения, так как фотоны перестали на них рассеиваться и стали свободно распространяться в пространстве. Энергия их постепенно уменьшалась из-за космологического расширения. Именно эпоха рекомбинации – источник окружающих нас фотонов реликтового излучения. Другими словами, эпоха

¹⁰ Температура рекомбинации в первом приближении определяется энергией связи атома водорода, равной 13,6 эВ (именно такая энергия требуется, чтобы ионизовать водород, «оторвать» от него электрон). Реальная рекомбинация (переход из плазменного в газообразное состояние) произошла при гораздо меньшей температуре (~0,3 эВ или ~3000 К). Основная причина – в эту эпоху плотность фотонов уменьшилась настолько, что процессы рекомбинации начали преобладать над процессами ионизации, то есть нейтральные атомы стали попросту «выживать». До этого времени образующиеся нейтральные атомы снова быстро ионизовывались.

рекомбинации – последний период в эволюции горячей Вселенной, когда фотоны испытывали рассеяние на свободных электронах. (Этим, кстати, объясняется название «поверхность последнего рассеяния», упоминавшееся в параграфе 2.3.)

Эпоха рекомбинации – это относительно короткий период времени. К моменту рекомбинации водорода (в первую очередь мы говорим о нем, пренебрегая влиянием гелия) прошло примерно 400 000 лет после начала космологического расширения (столько времени потребовалось, чтобы температура первичной плазмы упала до 3000 К), а длительность рекомбинации составила лишь несколько процентов этого времени. Красное смещение эпохи рекомбинации оценить очень просто: температура реликтового излучения при расширении падает $\propto (1+z)^{-1}$, в эпоху рекомбинации температура составляла примерно 3000 К, современная температура равна 2.7 К, следовательно, красное смещение рекомбинации $z \approx 3000/2.7 \approx 10^3$.

Любопытно, что эпохи рекомбинации и равенства плотностей энергии излучения и вещества («демаркационной точки» Гамова) относительно близки. По современным представлениям плотности энергии излучения и вещества сравнялись до эпохи рекомбинации – примерно через 10^5 лет после начала расширения Вселенной. Соответствующее красное смещение составляло $z \approx 3000$, температура $T \propto 10^4$ К.

Чем важно открытие реликтового излучения и что оно дало для космологии? Реликтовое излучение – важнейший составной элемент картины горячей расширяющейся Вселенной. Если наши представления о структуре и эволюции Вселенной верны, то такое излучение и именно с такими наблюдаемыми свойствами (чисто тепловой спектр, температура ~ 3 К, изотропия) просто должно существовать. Именно поэтому открытие реликтового излучения привело к быстрому признанию модели Большого взрыва.

Не менее важно и то, что в модели расширяющейся Вселенной микроволновое фоновое излучение должно иметь ряд особенностей, поддающихся наблюдательной проверке и являющихся прямыми тестами самой этой модели. Одним из таких уже упоминавшихся свойств должен быть рост температуры излучения с увеличением z , то есть при движении в прошлое нашей Вселенной. Но как можно измерить температуру реликтового излучения в прошлые эпохи? Это, конечно, непросто, но все-таки возможно. Например, наблюдаемые свойства реликтового излучения в направлении далеких скоплений галактик, содержащих большое количество горячего межгалактического газа, несколько меняются — так называемый эффект Сюняева–Зельдовича.¹¹ Тщательные наблюдения этого эффекта позволяют оценивать температуру фонового излучения в эпоху, соответствующую красному смещению изучаемого скопления. Другой метод — анализ спектров далеких квазаров, в которых могут наблюдаться линии, источником возбуждения которых являются фотоны реликтового излучения. Эти способы не лишены проблем, их реализация сопряжена с большими трудностями, но, тем не менее, они дают вполне согласованные результаты — температура реликтового излучения растет с z и этот рост соответствует предсказаниям модели Большого взрыва (рис. 30). Тем самым мы получили еще одно доказательство реальности расширения Вселенной (см. параграф 2.2).

Открытие реликтового излучения сразу же поставило перед учеными важную задачу. Фоновое излучение, как это следовало из теории и наблюдений, удивительно изотропно — его температура практически не зависит от направления на небе. Однако отклонения от изотропии должны наблюдаться. Ведь, с одной стороны, Земля об-

¹¹ Этот эффект состоит в том, что фотоны микроволнового фонового излучения рассеиваются на горячем газе скоплений, что приводит к искажению наблюдаемого спектра реликтового излучения и к локальному уменьшению температуры реликтового фона в направлении на скопления.

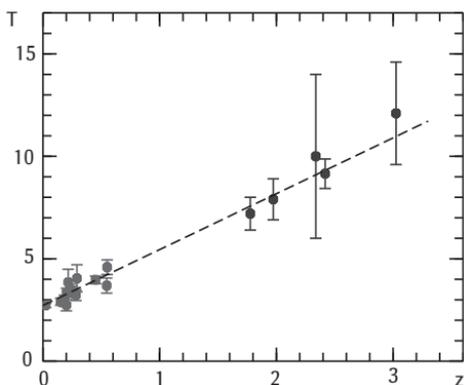


Рис. 30. Зависимость температуры реликтового излучения от красного смещения (Джетсер и др. 2010). Данные для $z < 1$ получены по эффекту Сюняева–Зельдовича, для $z > 1$ использованы наблюдения абсорбционных спектров квазаров. Штриховой прямой показана зависимость $T(z) = 2.725 \times (1 + z)$, предсказываемая моделью Большого взрыва.

ращается вокруг Солнца, Солнце движется относительно центра Галактики, сама наша Галактика летит в пространстве относительно ближайших звездных систем – в итоге реликтовое излучение должно быть чуть горячее по направлению результирующего вектора движения Земли и чуть холоднее в противоположном направлении. С другой стороны, в современную эпоху нас окружает большое разнообразие структур – звезды, галактики, группы галактик, скопления и сверхскопления, – которые должны были возникнуть за счет гравитационной неустойчивости из первичных возмущений плотности. В эпоху рекомбинации эти возмущения плотности вещества и, соответственно, температуры излучения уже должны были существовать. Возникает вопрос, каковы амплитуда и размер этих флуктуаций? Ответ на него зависит от состава и крупномасштабных свойств нашей Вселенной и поэтому поиск и исследование флуктуаций реликта – важнейший космологический тест.

Крупномасштабная анизотропия, вызванная движением Земли относительно реликтового фона, была обнаружена в 1977 году группой ученых из Калифорнийского университета с помощью наблюдений на высотном самолете-разведчике U-2¹².

Оказалось, что Солнечная система движется относительно реликта в направлении созвездий Льва и Чаша со скоростью примерно 370 км/с. В этом направлении температура реликтового излучения оказалась примерно на 0.003 K выше, а в противоположном (в направлении созвездия Водолей) – на столько же ниже, чем среднее значение. Следовательно, амплитуда дипольной составляющей фонового излучения $\Delta T/T \approx 0.003/2.7 \approx 10^{-3}$.

Мелкомасштабные вариации температуры реликтового излучения были открыты с помощью внеатмосферных наблюдений, причем важнейшую роль в этом сыграла космическая обсерватория COBE (COsmic Background Explorer). В 1992 году было обнаружено, что на масштабах $\sim 10^\circ$ амплитуда флуктуаций реликтового фона составляет $\Delta T/T \approx 10^{-5}$. Последующие наблюдения из космоса, с поверхности Земли и с аэростатов подтвердили эти результаты и распространили их на еще меньшие угловые масштабы.

Результатом многолетней работы астрономов явилась детальная карта распределения температуры реликтового излучения по небесной сфере. На рис. 31 показана репродукция такой карты в галактических координатах (плоскость Млечного Пути вытянута вдоль большой оси рисунка). На этой карте удалены многочисленные мешающие эффекты (дипольная составляющая из-за движения Земли в пространстве, излучение Млечного Пути, внегалактические источники радиоизлучения) и оставлены, как предполагается, только реальные, космологические флук-

¹²Именно такой самолет 1 мая 1960 года был сбит советской зенитной ракетой в районе Свердловска. Пилот – Фрэнсис Пауэрс – спасся на парашюте и в феврале 1962 года его обменяли на знаменитого советского разведчика Рудольфа Абея.

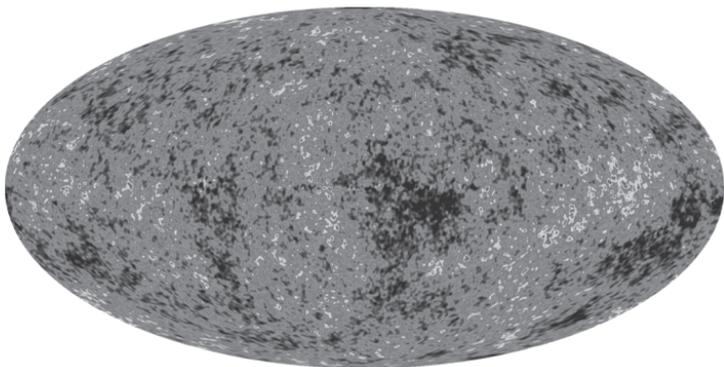


Рис. 31. Распределение температуры реликтового излучения по небесной сфере (темные области – пониженная температура, светлые – повышенная) по результатам 7-летней работы спутника WMAP.

туации. На карте на разных масштабах видны многочисленные «холодные» и «горячие» пятна. К сожалению, есть подозрения, что часть особенностей этой карты все-таки связана с не совсем точным учетом влияния излучения нашей Галактики и, возможно, даже Солнечной системы.

Какую информацию можно извлечь из анализа флуктуаций фонового излучения? Огромную. По сути, такой анализ дает основную информацию о Вселенной в целом. Ранняя Вселенная с точки зрения физики была очень простой и многие шедшие в ней процессы оставили отпечаток в свойствах реликтового излучения. Например, реликтовое излучение дает возможность оценить геометрию пространства–времени. На стадии формирования фотонов реликтового излучения – в эпоху рекомбинации – Вселенная была примерно в 1000 раз меньше ($z \approx 1000$) и ее возраст составлял $\approx 400\,000$ лет. Следовательно, характерный размер наибольшего возмущения не мог превышать 400 000 световых лет. При более точном подходе получается, что на момент рекомбинации длина волны наибольшего колебания была несколько меньше и составляла

≈ 220000 св. лет – это так называемый звуковой горизонт. Из наблюдений анизотропии реликтового излучения мы можем найти угловой размер, соответствующий самым большим неоднородностям, ($\sim 1^\circ$) и, зная соответствующий линейный размер (220 000 св. лет) и красное смещение формирования, легко определить кривизну пространства. Оказалось, что с очень большой точностью наше пространство является плоским, евклидовым. Детальный анализ зависимости амплитуды флуктуаций реликтового излучения от углового масштаба дает возможность оценить множество других характеристик Вселенной – ее полную плотность, плотность обычного (барионного) вещества и темной энергии (см. параграф 2.7), возраст Вселенной, значение постоянной Хаббла, а также многие другие.

Как сказал Джордж Смут, получивший в 2006 году Нобелевскую премию по физике за свой основополагающий вклад в открытие флуктуаций фонового излучения, «открытие анизотропии температуры космического реликтового излучения произвело переворот в наших представлениях о Вселенной, и его современные исследования продолжают революцию в космологии».

2.5. Скрытая масса во Вселенной

Все наши ребята время от времени отправлялись к святому Граалю. Это путешествие занимало несколько лет. Уехав, они долго блуждали, плутая самым добросовестным образом, так как никто толком не знал, где находится этот святой Грааль.

Марк Твен

Скрытая масса или, как ее часто называют, темная материя (в дальнейшем я буду использовать эти термины как синонимы, хотя это и не вполне правильно) – это почти святой Грааль современной астрономии. На про-

тяжении нескольких столетий каждый уважающий себя рыцарь считал своим долгом отправиться на поиски чудодейственной чаши. Так и со скрытой массой – уже несколько десятилетий ее активно ищут, но до сих пор, несмотря на огромное количество косвенных свидетельств ее существования, она однозначно не идентифицирована.

Слово «темная» не означает, что эта материя и в самом деле темная, оно просто означает, что материя очень слабо излучает в оптическом диапазоне и ее до сих пор не удалось увидеть. Темное вещество пока что «скрыто» от современных методов наблюдений, и мы знаем о его существовании в основном по гравитационному влиянию этой материи на доступные наблюдениям объекты.

Формально говоря, история скрытой массы насчитывает уже не одно столетие. Например, в первой половине XIX века было обнаружено, что планета Уран движется по своей орбите чуть-чуть неправильно, в ее движении присутствуют так называемые возмущения. Для объяснения этих неправильностей было выдвинуто предположение о существовании еще одной планеты Солнечной системы, которая своим притяжением возмущает орбиту Урана. Француз Урбен Лавуазье и англичанин Джон Адамс почти одновременно решили задачу о предсказании свойств и о местоположении новой планеты, и в 1846 году эта планета (Нептун) была обнаружена вблизи предсказанного места. Примерно в эти же годы немецкий астроном Фридрих Бессель заметил легкие периодические изменения координат ярчайшей звезды ночного неба – Сириуса. Бессель предположил, что у Сириуса есть невидимый спутник, который позднее был, действительно, открыт.

В обоих примерах была открыта «темная материя» – в первом случае в межпланетном пространстве (новая планета), во втором случае в межзвездном пространстве (новый тип звезд – белый карлик). Так и на больших масштабах скрытая материя, несомненно, будет открыта и отождествлена, тем более, что известно уже много кан-

дидатов в то, чем она может быть. В дальнейшем речь пойдет о темном веществе на галактических и межгалактических масштабах, то есть о веществе, дающем очень большой вклад в полную плотность Вселенной.

Современная история изучения скрытой массы начинается в 1920–1930-х годах. В 1922 году Якубус Каптейн, а затем и Джеймс Джинс, опубликовали исследования динамической структуры Млечного Пути, в которых они заключили, что в его диске присутствуют «темные звезды», чья масса превышает массу светящихся звезд. В этих же статьях, возможно, впервые появляется и термин «темная материя» («dark matter»). В 1932 году голландский астроном Ян Оорт также нашел, что наблюдаемых звезд недостаточно для объяснения вертикального ускорения звезд в Галактике, вследствие чего приходится предположить наличие темной материи вблизи галактической плоскости. Без этой материи получалось, что Млечный Путь должен быстро терять звезды. (Позднее оказалось, что результаты Оорта на самом деле не свидетельствовали о существовании в плоскости Галактики скрытой массы, так как на движение звезд влияет не только диск, но и протяженное и массивное гало Галактики.)

Первое свидетельство существования скрытой массы на внегалактических масштабах было получено в 1933 году Фрицем Цвикки, который рассмотрел радиальные скорости 8 галактик в скоплении Кома в созвездии Волосы Вероники. Наблюдаемый разброс скоростей оказался очень велик – около 1000 км/с. Из этого факта Цвикки заключил, что, если скопление в целом находится в равновесии, то есть не сжимается и не разлетается, то его полная масса должна быть примерно в 400 раз больше, чем звездная масса галактик скопления. (Цвикки использовал сильно завышенное значение постоянной Хаббла. При современном значении этой постоянной превышение массы составляет ~ 50 раз.) Цвикки написал, что, если этот результат будет подтвержден, то это будет означать удиви-

тельный вывод – в скоплении присутствует значительное количество темной материи. Через три года – в 1936 году – американский астроном Синклер Смит получил похожий результат для скопления галактик в Деве (это ближайшее к Млечному Пути скопление). Смит заключил, что в скоплении присутствует много межгалактического вещества. Эта вещь либо однородно распределена в пределах скопления, либо образует гигантские слабосветящиеся облака вокруг галактик.

В 1939 году Хорес Бэбкок опубликовал самую подробную к тому времени кривую вращения галактики туманность Андромеды (зависимость скорости вращения, измеряемой по доплеровскому смещению спектральных линий, от расстояния от центра). Кривая вращения оказалась необычной – на большом расстоянии от центра скорость вращения не спадала, как ожидалось, а оставалась высокой. (Почему это было необычно, я объясню чуть дальше.) Годом позже Ян Оорт обсудил кривую вращения галактики NGC 3115 и также заключил, что наблюдаемая скорость вращения внешних областей галактики не соответствует ожидаемой для случая, если вся масса галактики заключена в ее звездах. И Бэбкок, и Оорт отметили важность исследования кривых вращения внешних областей галактик, однако их результаты не привлекли в то время внимания, как, впрочем, и результаты Цвикки и Смита, что, по крайней мере отчасти, вероятно, было связано с начавшейся Второй мировой войной.¹³

¹³Годы войны оставили почти незамеченными еще несколько замечательных, сильно опередивших свое время, работ. Например, в 1941 году шведский астроном Эрик Хольмберг впервые смоделировал процесс взаимодействия двух галактик, на два-три десятилетия предвосхитив некоторые результаты, полученные позднее с помощью компьютеров. В своей работе Хольмберг воспользовался тем, что освещенность, как и гравитация, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Это позволило Хольмбергу представить каждую из двух галактик в виде круга из 37 лампочек, а неоднородности гравитационного поля, в соответствии с которыми перемещались звезды (лампочки), измерялись им с помощью фотоэлемента!

Прошло два десятка лет, и темная материя снова всплыла, но уже в совсем другом контексте. В 1959 году Кан и Вольтер предположили, что сближение нашей Галактики и туманности Андромеды вызвано силами взаимного притяжения. Это дает возможность оценить их суммарную массу, которая оказалась в несколько раз большей, чем сумма индивидуальных масс. Кан и Вольтер заключили, что эта недостающая материя существует в виде гало из горячего газа, окружающих галактики.

В 1960–1970-е годы появились технические возможности для массового измерения протяженных кривых вращения галактик в оптике и по наблюдениям в линии H I ($\lambda = 21$ см). (Радиолиния атомарного водорода на 21 см является одной из самых популярных в астрономии. Излучение в этой линии обусловлено сверхтонким расщеплением основного уровня энергии атома водорода на два близких подуровня. По интенсивности этой линии можно оценивать распределение и массу нейтрального водорода в галактиках, а по ее профилю и по величине доплеровского смещения можно изучать их вращение.) Кроме того, начали появляться и теоретические аргументы в пользу существования массивных невидимых гало, окружающих галактики. С этого времени скрытая масса становится все более популярна и вездесуща – без ее привлечения сейчас не объяснить ни свойств отдельных галактик, ни их систем, ни крупномасштабную структуру Вселенной в целом. Далее я попытаюсь коротко суммировать основные астрономические свидетельства существования темной материи на разных масштабах.

Осталась незамеченной и работа американца Карла Сейферта, описавшего в 1943 году несколько галактик с сильными эмиссионными линиями в ядрах. Сейчас такие объекты называют галактиками Сейферта и они являются представителями интенсивно изучаемого класса галактик с активными ядрами, к которому принадлежат, кстати, и знаменитые квазары.

• Кривые вращения галактик

Плоские кривые вращения — это самый известный и наиболее часто упоминаемый довод в пользу окружающих галактики массивных невидимых гало. Смысл этого довода очень прост. Рассмотрим какой-либо сферический объект (например, Солнце) и расположенный за его пределами небольшой спутник (например, планету), обращающийся вокруг него по круговой орбите под действием гравитации.

Тогда скорость этого спутника выражается хорошо известной со школы формулой: $v = \sqrt{GM/r}$, где G — гравитационная постоянная, M — масса центрального объекта, а r — расстояние между центральным телом и спутником. Отсюда видно, что с удалением спутника его скорость должна уменьшаться как $1/\sqrt{r}$. Например, мы знаем, что Земля движется вокруг Солнца по почти круговой орбите со скоростью 30 км/с. Юпитер находится от Солнца примерно в 5.2 раза дальше и, следовательно, скорость его движения по орбите в $\sqrt{5.2} = 2.3$ раза меньше, чем у Земли, и равна $30/2.3 = 13$ км/с. Чем дальше планета от Солнца — тем медленнее она движется.

Реальные галактики не являются, конечно, сферически-симметричными и у них отсутствует четкая граница. Тем не менее, приведенная выше формула для круговой скорости в первом приближении применима и для них, только вместо полной массы в нее надо подставить массу, заключенную в пределах орбиты спутника. Итак, на основе простых соображений можно ожидать, что спектральные наблюдения галактик будут показывать их вращение в пределах оптических изображений, а затем должен наблюдаться спад, пропорциональный $1/\sqrt{r}$. В действительности все оказалось не так.

На рис. 32 представлена типичная кривая вращения спиральной галактики — она не показывает спад на периферии, а остается «плоской», то есть демонстрирует почти неизменную скорость, даже за пределами звездного диска!

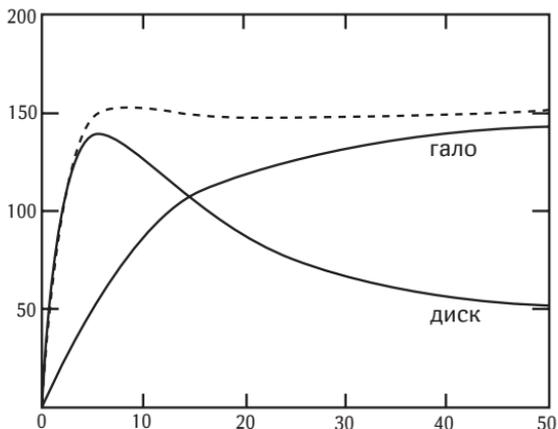


Рис. 32. Наблюдаемая кривая вращения спиральной галактики NGC 3198 (штриховая линия). Две нижние непрерывные линии — кривые вращения звездного диска галактики и темного гало (ван Албада и др. 1985). Вдоль горизонтальной оси отложено расстояние до центра галактики в килопарсеках, вдоль вертикальной — скорость вращения в км/с.

Есть галактики, у которых плоская кривая вращения по радионаблюдениям в HI прослеживается до расстояний, в несколько раз превышающих размеры их звездных дисков. Если бы в галактиках были только звезды и немного газа, то скорость вращения должна была бы вести себя примерно как кривая «диск» на рисунке 32, — галактика закончилась бы на $r \approx 10$ кпк и далее круговая скорость должна быстро уменьшаться. Реальные скорости вращения на периферии большинства галактик остаются примерно постоянными, простейшим объяснением чего является наличие какого-то вещества, дающего большой вклад в полную массу галактик. На рисунке изображен вклад этого вещества (кривая «гало») в итоговую кривую вращения. Как видно на рисунке, гало из темной материи начинает заметно проявлять себя лишь на периферии звездного диска галактики и за его пределами.

Рисунок 32 иллюстрирует типичную кривую вращения спиральной галактики. Наблюдаются, конечно, и разнообразные отклонения, например, связанные с взаимодействием галактик друг с другом, но, в среднем, у большинства галактик скорость вращения не показывает уменьшения вплоть до последних доступных наблюдений областей. Этот факт послужил одним из первых аргументов в пользу представления о том, что галактики погружены в массивные невидимые гало.

• Спутники галактик

Каждая массивная галактика, вроде Млечного Пути или туманности Андромеды, окружена целой свитой карликовых галактик-спутников. Кроме того, к этой свите можно отнести и систему шаровых скоплений, — компактных и массивных звездных скоплений, содержащих $\sim 10^4$ – 10^6 звезд, — которая в нашей Галактике прослеживается вплоть до нескольких десятков килопарсеков от ее центра. Естественно, что и движение этой свиты, и структура составляющих ее небольших галактик и шаровых скоплений должны определяться массой центральной галактики — например, приливная сила со стороны Галактики ограничивает размер и меняет структуру звездной системы, обдирая ее внешние области.

Наблюдения показали, что для объяснения динамических и морфологических характеристик систем спутников нашей и других ближайших галактик необходимо допустить, что массы центральных галактик в несколько раз превышают массу их звезд.

• Системы галактик

Галактики часто образуют физические пары с галактиками сравнимой массы (в состав двойных систем входят $\sim 10\%$ всех галактик), группы из нескольких объектов (рис. 33), а также скопления — гигантские конгломераты, содержащие сотни и тысячи членов (рис. 16, 34). Если пред-



Рис. 33. Триплет галактик Arp 274.
(Снимок космического телескопа «Хаббл»)

положить, что такие системы являются гравитационно-связанными, то, зная лучевые скорости их членов, можно оценить характерный разброс скоростей галактик и оценить полные массы этих систем. Именно так действовали Цвикки и Смит, впервые обнаружившие темную материю в скоплениях Кома и Дева.

Сейчас изучены уже тысячи различных систем галактик от масштабов двойных систем (десятки кпк), до скоплений галактик (тысячи кпк). Основной результат этих работ: скрытая масса присутствует на всех уровнях иерархии галактик, причем ее вклад растет с увеличением масштаба — в двойных системах она превышает вклад «светящейся» материи в разы, а в скоплениях галактик — в десятки–сотни раз.

- **Горячий газ**

Наблюдения на орбитальных обсерваториях («Ухуру», «Эйнштейн» и др.) показали, что гигантские эллиптические галактики и скопления галактик излучают в рентгеновском диапазоне. Источником этого излучения является

горячий ($\sim 10^6$ – 10^8 K) газ, образующий протяженные короны вокруг эллиптических галактик и заполняющий скопления. Масса этого газа относительно велика – например, в скоплениях она составляет ~ 10 – 20% полной массы.

Если бы в галактиках и в скоплениях ничего, кроме звезд и газа, не было, то создаваемое ими гравитационное поле было бы недостаточным для удержания столь сильно нагретой среды. Оценки содержания скрытой массы, необходимой для удержания горячего газа в скоплениях, согласуются с динамическими, полученными по скоростям движения галактик.

• Гравитационное линзирование

Предыдущие свидетельства существования темного вещества были основаны на его гравитационном влиянии на звезды и газ, однако есть еще один вид материи, на который влияет гравитационное поле – электромагнитное излучение, свет. Именно этот эффект – отклонение лучей света фоновых звезд Солнцем – послужил, кстати, одним из первых тестов общей теории относительности.

Итак, если между далеким источником (например, галактикой) и нами есть какой-то массивный объект (например, скопление галактик), то изображение этого источника исказится весьма специфическим образом. Наиболее эффектные, известные в настоящее время, гравитационные линзы – это, конечно, богатые скопления галактик, на периферии которых часто наблюдаются дуги или арки, являющиеся усиленными и искаженными изображениями фоновых галактик (рис. 34). Расположение и форма этих дуг зависят от распределения массы в скоплении и поэтому их можно использовать для реконструкции его потенциала. Детальное моделирование ряда таких скоплений подтвердило оценки их масс, найденные динамическим методом и по горячему газу – массы скоплений галактик многократно превышают суммарную массу входящих в них галактик.



Рис. 34. Изображение центральной части скопления галактик Abell 2218. Дугообразные детали на снимке – изображения далеких галактик, искаженные гравитационным полем скопления.
(Снимок космического телескопа «Хаббл»)

Используется и слабое гравитационное линзирование, влияние которого выделяется при статистическом анализе множества изображений. Например, при отсутствии близкой концентрации массы ориентация далеких, фоновых галактик должна быть хаотической. Если же такая масса присутствует, она приведет к изменению видимых вытянутостей галактик и к появлению некоторой упорядоченности в их ориентациях. С использованием такого подхода удалось даже построить крупномасштабные карты распределения скрытой массы. Например, на рис. 35 показана первая такая трехмерная карта. На рисунке

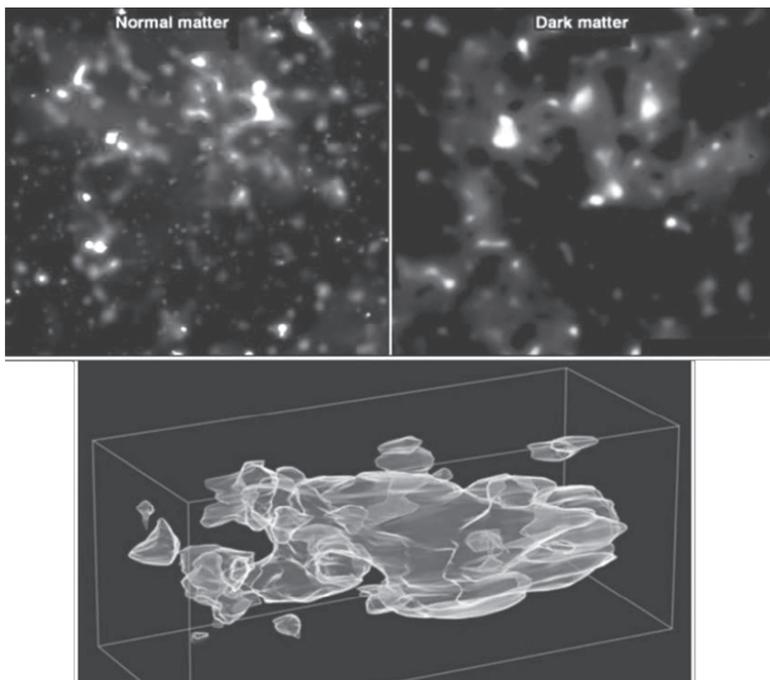


Рис. 35. Наверху: спроецированное распределение галактик в области проекта COSMOS (1600 кв. градусов) (слева) и распределение скрытой массы, построенное методом слабого гравитационного линзирования (справа). Внизу: трехмерное распределение темной материи в той же области. На нижнем рисунке красное смещение увеличивается слева направо от $z = 0$ до $z \sim 1$.

(По данным Масси и др. 2007)

видно, что темная материя, в среднем, хорошо отслеживает распределение видимого вещества, хотя имеются и определенные отличия. В целом слабое гравитационное линзирование дает результаты о скрытой массе, согласующиеся с получаемыми другими методами.

Есть и другие наблюдательные свидетельства присутствия во Вселенной значительного количества темной материи, однако существуют и теоретические аргументы. По-видимому, первым из них явилось высказанное в 1973

году Острайкером и Пиблсом соображение, что без массивных темных гало диски спиральных галактик должны быть неустойчивыми. Однако самым важным является то, что без скрытой массы галактики вообще не смогли бы образоваться! По современным представлениям галактики формируются и растут за счет гравитационной неустойчивости из исходных возмущений плотности в ранней Вселенной. Как мы убедились в параграфе о реликтовом излучении, через 400 000 лет после начала космологического расширения эти флуктуации плотности были еще очень малы – всего лишь $\sim 10^{-5}$. Оказывается, что если бы во Вселенной было только обычное (так называемое барионное)¹⁴ вещество, из которого состоят звезды и галактики, то эти неоднородности просто не успели бы усилиться до такой степени, чтобы создать окружающее нас разнообразие структур! Решением этого парадокса является учет наличия во Вселенной значительного количества небарионной скрытой массы. Фотоны реликтового излучения взаимодействуют лишь с барионным веществом, и поэтому анизотропия фонового излучения несет информацию только о флуктуациях обычной материи. Небарионное вещество на момент рекомбинации могло быть сжато уже гораздо сильнее, подготовив «затравки» для роста будущих галактик и их скоплений.

Сколько во Вселенной «обычного» и «темного» вещества? О количестве (или о плотности) вещества в космологии принято говорить в терминах так называемой критической плотности. Критическая плотность зависит от современного значения постоянной Хаббла (H_0) – $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G \approx 10^{-29}$ г/см³. В рамках стандартной Фридмановской космологии, если средняя плотность Вселенной превышает это значение, то есть $\rho > \rho_c$, то расширение Вселенной должно смениться ее сжатием («закрытая Все-

¹⁴Барионы – общее название тяжелых элементарных частиц с полуцелым спином, самыми известными из которых являются протоны и нейтроны.

ленная»). Если $\rho < \rho_c$, то расширение будет продолжаться вечно («открытая Вселенная»). Случай $\rho = \rho_c$, является пограничным — расширение будет продолжаться вечно, причем скорость расширения будет асимптотически стремиться к нулю. При $\rho = \rho_c$, геометрия Вселенной является плоской, ее пространственная кривизна равна нулю. В остальных случаях геометрия пространства неевклидова. При плотности, меньшей критической, кривизна пространства отрицательна, при большей — положительна.

Оценить плотность заключенного в звездах обычного вещества довольно просто. Основным источником оптического излучения во Вселенной — это состоящие из звезд галактики. Поэтому можно построить распределение галактик по их светимостям и пересчитать его в распределение по массам, задав отношение масса—светимость (M/L). Отношение M/L для звезд разных типов можно найти как из наблюдений, так и из теории, и оно хорошо известно. (Например, для звезд типа нашего Солнца отношение массы к болометрической светимости в системе единиц СГС равно 0.5.) Просуммировав массы галактик в единице объема Вселенной, находим полную массу звезд и, соответственно, плотность светящегося вещества. По современным оценкам плотность такого вещества составляет лишь примерно 0.3% от критической плотности Вселенной: $\Omega_* = \rho_*/\rho_c \approx 0.003$. Эта оценка нам пока мало о чем говорит, поскольку мы не знаем полную плотность вещества, — помимо звезд во Вселенной есть еще другое барионное вещество (например, газ) и, кроме того, небарионная темная материя.

Полную плотность барионного вещества помогает найти теория первичного нуклеосинтеза, начало развития которой было положено Гамовым и его учениками. Оказывается, предсказываемый теорией химический состав Вселенной довольно сильно зависит от полной плотности барионов. Особенно чувствительно к доле барионов первичное содержание дейтерия. Современные измерения

первичного химического состава (доля водорода по массе $\sim 75\%$, гелия $\sim 25\%$, доля дейтерия по числу атомов относительно водорода $\sim 10^{-5}$) дают независимую оценку полной плотности барионного вещества: $\Omega_b = \rho_b/\rho_c \approx 0.045$. Значит, в звездах заключена лишь примерно 1/15 доля всего барионного вещества Вселенной! Где же оно? По-видимому, существенная часть этих недостающих барионов заключена в горячем газе скоплений галактик, а другая часть может быть отнесена к барионной скрытой массе, представляющей собой, например, межгалактический газ, остатки звездной эволюции (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры), холодный и труднодоступный для наблюдений молекулярный газ.

Теперь обсудим, сколько небарионного вещества во Вселенной. На рис. 36 суммированы результаты измерения отношения масса–светимость для галактик и их систем в зависимости от размера системы. На самых больших масштабах масса оценена на основе анализа крупномасштабных движений галактик, индуцированных гравитационным влиянием скоплений и сверхскоплений галактик,

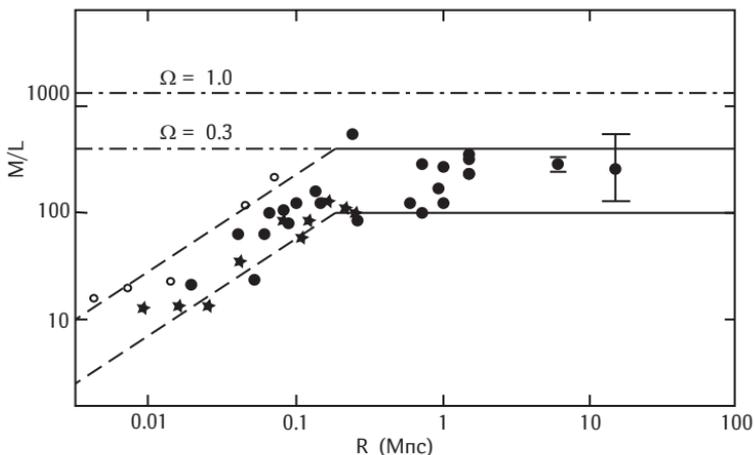


Рис. 36. Зависимость отношения масса–светимость в голубом фильтре от масштаба (Бакал 2000)

на меньших масштабах использованы динамические, а также найденные по наблюдениям горячего газа оценки масс скоплений и групп. На рисунке видно, что масса, приходящаяся на единицу светимости, сначала растет, а затем на масштабах $\geq 10^2$ кпк выходит на плато. Выход на плато означает, что при увеличении масштаба усреднения во Вселенной не появляется значительного количества дополнительной скрытой массы.

Эти (рис. 36), а также другие подобные данные привели в 1990-х годах к выводу, что полная плотность массы вещества Вселенной составляет примерно 20–30% от значения критической плотности. Но, как мы только что выяснили, барионного вещества во Вселенной всего лишь около 4.5%. Следовательно, то, что дополняет плотность барионов до $\Omega \approx 0.2-0.3$, — это небарионная скрытая масса, которой должно быть примерно в 5 раз больше, чем обычного вещества.

Таким образом, используя разные методы и подходы, мы получили, что в нашей Вселенной очень много темной материи. Эта материя неоднородна — есть барионная скрытая масса, о природе которой можно строить вполне определенные предположения, но еще больше небарионной, о которой мало что известно. Однако мало — не значит ничего. Частицы небарионной темной материи сейчас очень активно ищут, строят наземные экспериментальные установки, проводят космические эксперименты. Дело в том, что свойствами таких частиц (они должны быть относительно массивными и слабо взаимодействовать с барионами) обладают гипотетические элементарные частицы, появляющиеся в некоторых расширениях Стандартной модели. Один из самых популярных кандидатов в частицы темной материи так и называется — слабо взаимодействующие массивные частицы или WIMPs (weakly interacting massive particles). Открытие частиц темной материи станет одним из наиболее громких и ожидаемых открытий начала XXI века.

2.6. Расширение с ускорением

Астрофизика напоминает следствие по делу, в котором все улики косвенные.

Станислав Лем

В 1990-х годах сложилась довольно странная картина – хорошо видимые всем звезды оказались лишь небольшим «придатком» к таинственной скрытой массе, дающей основной вклад в плотность Вселенной, а полная, наблюдаемая по ее гравитационному влиянию, плотность вещества Вселенной ($\Omega = 0.2-0.3$) в несколько раз меньше критической плотности. Однако обнаруженные примерно в это же время флуктуации реликтового излучения свидетельствовали, что полная плотность Вселенной должна быть близка к критической, то есть $\Omega = 1$ (раздел 2.4). Еще одна парадоксальная вещь – возраст Вселенной для $\Omega = 0.2-0.3$ получался равным примерно 11–12 млрд лет, что вступало в противоречие с возрастом старейших объектов нашей Галактики (например, шаровых скоплений).

Низкая наблюдаемая плотность Вселенной противоречила и взглядам многих теоретиков-космологов, активно развивающих представление об *инфляции* – особой стадии ранней эволюции Вселенной, в ходе которой она чрезвычайно быстро (за время $\sim 10^{-34}$ с) и сильно (в $\sim 10^{43}$ раз) расширилась. По окончании инфляции Вселенная разогрелась до очень высокой температуры, после чего наступила эпоха горячего Большого взрыва. Инфляция позволяла решить ряд проблем стандартной фридмановской космологии и, кроме того, она предсказывала, что средняя плотность Вселенной с большой точностью должна быть равна критической. Когда Алан Гут – один из создателей теории инфляции – узнал, что наблюдения свидетельствуют об $\Omega = 0.2-0.3$, он заявил, что рано или поздно все устаканится и наблюдатели обязательно получат $\Omega = 1$.

Каков же выход из этой ситуации? Что же *пропущено* во Вселенной? Из наблюдений было ясно, что это *что-то* не скучивается на масштабах скоплений галактик и ниже, иначе оно, подобно темной материи, было бы обнаружено по своему гравитационному влиянию. Значит, это *что-то* не является темной материей, и, с другой стороны, чтобы добрать плотность Вселенной до $\Omega = 1$, этого *что-то* должно быть очень много – больше, чем темной материи и, естественно, гораздо больше, чем барионного вещества.

Если оглянуться на историю космологии, еще в 1917 году Эйнштейн через обобщение уравнений ОТО ввел во Вселенную некую новую сущность (раздел 2.1). Речь идет о его Λ -члене или о космологической постоянной, введение которой было равносильно признанию существования во Вселенной среды, создающей не притяжение, а отталкивание. Эта среда обладает энергией и плотностью и в принципе может давать заметный вклад в полную плотность Вселенной. Сам Эйнштейн, узнав о результатах Фридмана и Хаббла, от этого обобщения своих уравнений гравитации отказался, признав его, по свидетельству Гамова, своей самой большой ошибкой. (Вспомним, что он ввел этот член лишь для того, чтобы сделать свою модель Вселенной стационарной.) Но, как это иногда бывает, даже ошибки гениев могут оказаться важными достижениями науки.

В 1990-х годах несколько ученых попытались реанимировать Λ -член. Впрочем, о нем никогда, по сути, и не забывали, но он в качестве своего рода курьеза оставался на периферии внимания физиков. В 1995 году американские астрофизики Иеремиа Острайкер и Пол Стейнхардт проанализировали разнообразные наблюдательные факты о Вселенной – оценки ее плотности, возраста объектов, реликтовое излучение – и пришли к выводу, что все они согласуются с ненулевой космологической постоянной, вклад которой в плотность Вселенной $\Omega_\Lambda = 0.65 \pm 0.1$. Суммарная плотность Вселенной таким образом получа-

ется близкой к 1, что и требуется инфляцией и данными о реликтовом излучении. К относительно большой оценке величины космологической постоянной пришел на рубеже 1990-х годов и Стивен Вайнберг. Он воспользовался антропными соображениями (см. раздел 2.8) и заключил, что наблюдаемые свойства нашей Вселенной свидетельствуют о том, что вклад космологической постоянной может заметно превышать плотность обычной материи.

Были и другие исследователи, обсуждавшие возможность ненулевой космологической постоянной, но эти работы не привлекли в то время особого интереса. Тем большей неожиданностью для большинства физиков стало открытие в 1998 году двумя группами исследователей ускоренного расширения Вселенной, означавшего, что $\Lambda > 0$.

Формальная история этого открытия началась в 1988 году, когда под руководством Сола Перлмуттера (рис. 37) и Карла Пеннипакера в Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли (США) была создана группа (ее сокращенное название SCP – Supernova Cosmology Project), основной целью которой было определение космологических параметров Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых типа Ia (см. раздел 2.2)¹⁵.

Основная идея этого проекта состояла в том, что SNIa обладают замечательным постоянством в максимуме блеска (см. рис. 23) и поэтому их можно использовать в качестве «стандартных свечей» – объектов, истинная мощность излучения которых известна, и которые, тем самым, можно использовать для точных оценок расстояний. Если пронаблюдать кривую блеска далекой сверхновой и найти ее видимую звездную величину в момент максимума блеска, то, сравнив эту величину с истинной светимостью, можно сразу найти расстояние до звезды.

¹⁵ Вскоре после образования группы интересы Пеннипакера стали все больше смещаться в сторону образования. Он основал знаменитый международный образовательный проект «Hands-on Universe» и стал посвящать ему основное время.

С другой стороны, расстояние до этой же звезды можно оценить по ее красному смещению и по задаваемой космологической модели. Сопоставив данные для множества сверхновых в широком диапазоне z , можно с разумной точностью оценить основные параметры Вселенной — значение постоянной Хаббла, плотность вещества, кривизну пространства.

Для того чтобы использовать сверхновую для космологических целей, нужно решить три наблюдательные задачи: 1) нужно ее обнаружить, 2) получить спектр и убедиться, что она относится к типу Ia, 3) построить кривую блеска, чтобы с хорошей точностью оценить ее блеск в максимуме. Открыть сверхновую можно и на небольшом телескопе, так как в максимуме блеска она может затмить излучение целой галактики, но вот для дальнейшего изучения потребуются крупные инструменты. И тут встает основная проблема — наблюдательное время на больших телескопах заказывается на полгода–год вперед, но ведь заранее никак не предугадать, когда же вспыхнет та сверхновая, для изучения которой этот инструмент понадобится! Блеск сверхновой нарастает очень быстро — если повезет, то до максимума блеска у наблюдателей есть лишь 1–2 недели, — и организовать за это время наблюдения на крупном телескопе почти невозможно.

Для решения этой проблемы Сол Перлмуттер предложил следующую стратегию. Вскоре после новолуния (Луна, засвечивая небо, делает невозможным наблюдения слабых далеких объектов) на относительно небольшом телескопе получают снимки нескольких десятков площадок на небе, включающих изображения множества галактик. Для увеличения числа объектов лучше наблюдать далекие скопления галактик. Затем, в начале следующего новолуния, то есть примерно через 3 недели, эти области снова наблюдают и с помощью автоматических процедур, сравнивающих изображения, выделяют появившиеся за это время точечные объекты. После исключения возмож-

ных дефектов изображений и следов космических частиц остаются кандидаты в сверхновые звезды. Эти кандидаты тут же начинают исследовать на крупном телескопе, время на котором было заранее заказано на нужные даты. Такой подход позволяет почти гарантированно, «по заказу» открывать новые сверхновые, причем, чем больше галактик попало в исследуемую область неба, тем больше вероятность открыть сверхновую.

Эффективность этой методики была наглядно продемонстрирована в 1992 году. Используя телескопы на Канарских островах (2.5-метровый телескоп для фотометрии площадок и 4.2-метровый – для спектроскопии), группа SCP открыла самую далекую на тот момент сверхновую на $z = 0.458$. С этим результатом «в кармане» группе стало легче добывать наблюдательное время на более крупных инструментах. Позднее поиск сверхновых производился на 4-метровых телескопах в Австралии и в Чили, а их спектральные наблюдения – на 10-метровом телескопе «Keck». (С 1997 года к наблюдениям подключился и космический телескоп «Хаббл».) В 1994 году у Перлмуттера и его команды были результаты наблюдений уже 7 открытых ими далеких сверхновых.

Надо заметить, что за последние сто лет специфика наблюдений на крупных оптических телескопах, да и работы астрономов в целом, изменилась очень сильно. Наблюдения уже не требуют таких подвигов, как во времена Слайфера (см. п. 2.1). Современный телескоп и его приборы – очень сложные устройства и астрономов, приезжающих на наблюдения в обсерваторию, обычно к ним даже не подпускают. Оптикой телескопов занимаются профессиональные оптики, аппаратурой – специалисты по приборам. Во время наблюдений астроном сидит в теплой комнате и следит за экранами мониторов – контролирует ход наблюдений, анализирует промежуточные результаты, принимает оперативные решения по изменению методики наблюдений. Зачастую автор наблюдательной



Рис. 37. Сол Перлмуттер и Брайан Шмидт – организаторы групп, открывших в 1998 году ускоренное расширение Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых звезд.

Фото с сайтов supernova.lbl.gov и msowwww.anu.edu.au.

задачи даже не приезжает в обсерваторию, так как он может принимать участие в наблюдениях по интернету, а вся работа телескопа обеспечивается сменным техническим персоналом или даже осуществляется полностью автоматически. В этих условиях основной ролью астронома является постановка интересной и осмысленной задачи, которую можно решить в ходе наблюдений.

Нарисованная почти идеальная картина относится к наблюдениям на больших телескопах, у которых диаметр главного зеркала составляет несколько метров. На небольших инструментах место старой, «слайферовской» романтики, конечно, еще осталось – астроному приходится проводить всю ночь под открытым небом, вручную управляя телескопом и его аппаратурой. Однако и эта специфика стремительно уходит из профессиональной астрономии, так как даже совсем маленькие телескопы все чаще строят полностью автоматизированными.

Еще одна особенность современной астрономии – огромное количество необработанного наблюдательного материала, накопленного в электронных архивах наземных и космических обсерваторий или полученного в ходе разнообразных цифровых обзоров неба. Этот материал доступен через интернет, и он позволяет решать многие задачи, вплоть до открытия объектов нового типа, без проведения новых наблюдений.

В 1994 году была создана HZT (High-Z Supernova Team) – вторая группа по поиску далеких сверхновых. (Одним из стимулов для ее создания послужили успехи SCP по обнаружению SN на больших z .) Руководителем группы стал Брайан Шмидт (рис. 37), незадолго до этого защитивший диссертацию по сверхновым в Гарварде. Подобно SCP, группа Шмидта была интернациональной – в нее входили исследователи из США, Австралии, Европы и Южной Америки. Наблюдательная стратегия HZT была схожа со стратегией SCP, и ее первым громким результатом стало открытие в 1995 году самой далекой сверхновой на $z = 0.479$.

Любопытны высказывания Алексея Филиппенко об обеих конкурирующих группах. Филиппенко – известный американский специалист в области изучения сверхновых звезд – с 1993 по 1996 годы работал в составе SCP, а затем перешел в HZT. Причиной для перехода послужило то, что в SCP ему работалось некомфортно. Главная причина дискомфорта – иерархическая структура SCP, подобная тем, что складываются у физиков при работе над большими проектами. Группа HZT состояла в основном из астрономов, ее организация была более аморфной и поэтому голос каждого из участников с большей вероятностью мог быть услышан и принят во внимание. Обратная сторона такой организации – в HZT было много «генералов» и, к сожалению, мало «солдат». Филиппенко пишет, что существование двух групп с точки зрения науки оказалось очень полезным – работа пошла быстрее,

а результаты стали более тщательно тестироваться в поисках возможных ошибок. Можно долго спорить о том, какой метод организации научных исследований лучше — иерархический, как в SCP, или «горизонтальный», как в HZT, но факт остается фактом, что обе группы пришли к основным результатам практически одновременно.

Путь к открытию не был гладким и прямым. Первый подробный анализ космологических параметров по характеристикам далеких сверхновых был опубликован Перлмуттером и др. летом 1997 года. Этот анализ основывался на данных о 7 из примерно 30 открытых к тому моменту SN на $z \sim 0.4$. Данные свидетельствовали о том, что вклад «светящегося» и «темного» вещества составляет почти 90% от критической плотности и, следовательно, если плотность Вселенной равна критической, то на долю Λ -члена почти ничего не остается. Формальная погрешность этого результата была очень велика, и результат мог рассматриваться лишь как сугубо предварительный. Последующее включение в рассмотрение *только одной* вновь открытой звезды с рекордным на тот момент красным смещением $z = 0.83$ существенно изменило результат в сторону уменьшения плотности вещества во Вселенной. Примерно в это же время (осенью 1997 года) группа HZT проанализировала наблюдения четырех сверхновых, включая очередной рекордный объект на $z = 0.97$, и также получила низкую оценку плотности вещества. Однако эти ранние результаты были статистически недостоверными и не могли ничего доказать или опровергнуть.

В конце 1997 года обе команды активно анализировали накопленные данные. В HZT были собраны наблюдения для 16 сверхновых типа Ia. Их окончательным анализом занимался Адам Райсс, который с 1996 года работал в Калифорнийском университете в качестве постдока Алексея Филиппенко. В декабре 1997 года стало совершенно ясно, что наблюдения приводят к очень странному выводу — если предположить, что $\Omega_\Lambda = 0$, то суммарная

плотность барионного и небарионного вещества (Ω_m), как следовало из формального решения, должна быть отрицательной, что, конечно, не имело смысла. Следовательно, космологическая постоянная должна быть больше нуля! Филиппенко пишет: «У меня отвисла челюсть, когда Адам показал мне построенную им диаграмму Хаббла¹⁶ и вывод, что сверхновые на больших z примерно на 0.25^{17} слабее, чем ожидается в модели Вселенной с низкой плотностью». Удивление Филиппенко объяснялось тем, что, если сверхновые выглядят слабее на четверть звездной величины, то, значит, они находятся от нас *дальше*, чем следовало из принимаемой в то время космологической модели. Простейшим объяснением этого факта является существование глобального отталкивания, антигравитации, введенной Эйнштейном в виде Λ -члена в свои уравнения, которое приводит к тому, что расширение Вселенной не замедляется под действием гравитации, а, наоборот, ускоряется. Члены HZT не ожидали такого результата и настойчиво искали у себя ошибку. И тут до них стали доходить слухи, что группа Перлмуттера тоже обнаружила что-то странное!

В конце 1997 года у группы SCP накопились наблюдения примерно для четырех десятков далеких сверхновых. В октябре–ноябре участники SCP несколько раз представляли свои результаты на семинарах Калифорнийского университета. В частности, на этих выступлениях звучало, что для плоской Вселенной получается $\Omega_m \approx 0.3$ и, соответственно, $\Omega_\Lambda \approx 0.7$. Если же зафиксировать, что $\Omega_\Lambda = 0$, то $\Omega_m < 0$, что не имеет физического смысла. Эти результаты рассматривались членами SCP как сугубо предварительные и они, как и участники HZT, максимально тщательно перепроверяли свои результаты, стараясь убедить в первую очередь самих себя, что Вселенная, действительно, расширяется с ускорением.

¹⁶ Диаграмма Хаббла – зависимость видимой звездной величины объекта от красного смещения.

¹⁷ Верхний значок «m» означает звездную величину.

Первый повод официально объявить об открытии ускоренного расширения Вселенной появился в самом начале следующего года. 8 января 1998 года на съезде Американского астрономического общества Сол Перлмуттер представил результаты своей группы для 40 сверхновых и указал на свидетельства в пользу ненулевой космологической постоянной. Перлмуттер подчеркнул предварительность этого заключения, а также то, что наблюдательные данные можно объяснить и без ускорения. Видимо поэтому представители прессы практически не обратили внимания на это выступление. Представители команды HZT, конечно, присутствовали на съезде, но, поскольку ряд проверок все еще не был завершен, они решили пока не объявлять о своих результатах. Но, как написал Филиппенко, «члены HZT не преминули заметить, что результаты SCP указывали на тот же вывод, что сделал Адам (Райсс) по данным HZT».

К середине февраля обе группы были уже уверены в своих результатах. 18 февраля на конференции, посвященной изучению скрытой массы («Dark Matter 98», Marina Del Rey, California), прозвучали доклады, провозгласившие открытие ускоренного расширения. Сначала прозвучали доклады членов SCP Герсона Голдхабера и Сола Перлмуттера, а затем выступил Алексей Филиппенко, представивший результаты HZT. Обе группы пришли к одинаковому заключению — плотность вещества Вселенной составляет примерно 0.3 (в долях критической плотности) и Вселенная расширяется с ускорением, ответственным за которое является космологическая постоянная, причем $\Omega_\Lambda \approx 0.7$.

Подробная статья с описанием этих результатов командой HZT была отправлена в печать в марте и опубликована в сентябре 1998 года. Члены SCP чуть задержались — их обобщающая публикация была готова осенью, а вышла лишь летом 1999 года. Впрочем, для приоритетных споров повода нет — результаты были получены и публично представлены практически одновременно.

Выборка команды SCP насчитывала 42 сверхновые, у группы HZT их было только 16, однако данные для этих звезд были более точными. В итоге результаты обеих групп обладали примерно одинаковой статистической значимостью, причем они были получены практически независимо друг от друга – группы почти не пересекались по составу (за очень редкими исключениями), выборки далеких SN Ia были разными (только две общие звезды), анализ данных производился независимо и разными методами. Хорошее согласие результатов двух групп заставило астрономическое сообщество серьезно воспринять их кажущийся фантастическим результат.¹⁸

Рис. 38 показывает доступные в 1998 году данные двух групп. Разброс точек выглядит очень большим и кажется, что результат не очень надежен. Кроме того, слабым местом открытия являлось то, что потускнение сверхновых с расстоянием можно было объяснить, к примеру, эволюцией их максимальной светимости со временем, а также тем, что на их видимый блеск влияет поглощение пылью в межгалактической среде. Авторы все это прекрасно понимали и в последовавшие годы быстро наращивали наблюдательный материал и проводили разнообразные дополнительные проверки и исследования. Ни наличие пыли, ни возможная эволюция сверхновых, как оказалось, не влияют ощутимым образом на результаты. Кроме того, увеличение числа далеких SN Ia только повышало достоверность существования ускоренного расширения.

Итак, что же было открыто? Как я уже писал, далекие сверхновые оказались более слабыми по сравнению с тем, какими они должны быть во Вселенной с плот-

¹⁸ Один из первооткрывателей, Брайан Шмидт, чье высказывание было процитировано в журнале «Science» в феврале 1998 года, сказал так: «Моя собственная реакция была чем-то между изумлением и ужасом. Изумлением, потому что я просто не ожидал этого результата, а ужасом – от знания того, что в него, вероятно, не поверит большинство астрономов, которые, как и я сам, чрезвычайно скептически относятся к неожиданностям».

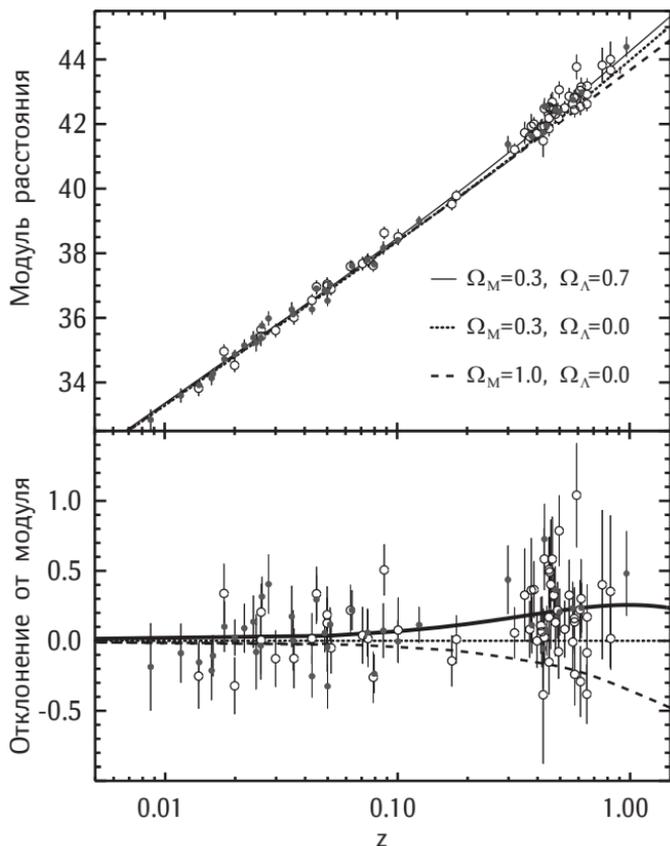


Рис. 38. Объединенные результаты SCP (открытые кружки) и HZT (черные точки) для далеких SNIa. На верхнем рисунке показана зависимость модуля расстояния (разность видимой и абсолютной звездной величин сверхновой в максимуме блеска) от красного смещения. Линиями показаны ожидаемые зависимости для разных космологических моделей. Внизу изображены отклонения модулей расстояния от предсказаний модели пустой Вселенной с $\Omega_m = 0.3$ и с нулевой космологической постоянной. Видно, что данные для далеких SN лежат, в среднем, выше этой теоретической зависимости, изображенной горизонтальной прямой из точек. Сдвиг наблюдательных точек описывается моделью с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$ (непрерывная кривая). (Перлмуттер, Шмидт 2003)

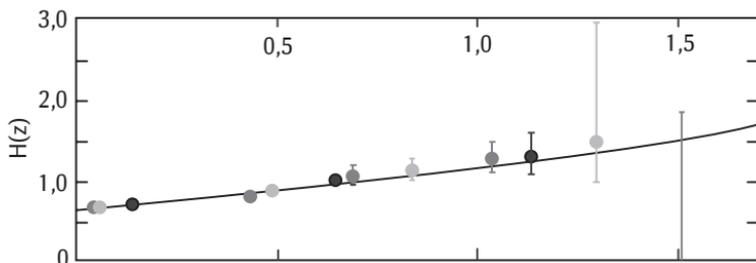


Рис. 39. Эволюция значения постоянной Хаббла по данным о далеких SNIa согласно Райссу и др. (2007). По вертикальной оси отложено нормированное на 100 км/с/Мпк значение постоянной Хаббла, по горизонтальной – красное смещение (числа вдоль верхней горизонтальной оси – значения z). Кружки – результаты измерений, непрерывная кривая – ожидаемая зависимость для модели с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$.

ностью $\Omega \approx 0.3$. Это означало, что они находятся от нас дальше, чем ожидалось. При полной плотности $\Omega \approx 0.3$ Вселенная должна расширяться вечно, причем темп расширения должен постепенно замедляться. Наблюдения показали, что замедление происходит не так сильно, как ожидается для $\Omega \approx 0.3$ и поэтому галактики со сверхновыми оказались от нас заметно дальше.

На рис. 39 показано изменение постоянной Хаббла со временем по данным о далеких сверхновых. Наглядно видно «торможение» Вселенной – при $z \sim 1-1.5$ (то есть 8–9 млрд лет назад) постоянная Хаббла была примерно в два раза больше. Видно также, что открытие ускоренного расширения не означает, что уже сейчас темп расширения Вселенной растет. На самом деле он еще падает, но не так быстро, как ранее ожидалось – замедление расширения Вселенной тормозится и когда-нибудь постоянная Хаббла, действительно, начнет расти.

Простейшей интерпретацией наблюдений являлось предположение о существовании некоей формы энергии (ее стали называть *темная энергия*)¹⁹, «расталкивающей»

¹⁹ Не путать с темной материей, обсуждавшейся в п. 2.5!

Вселенную и приводящей к изменению темпа ее расширения. Как следовало из наблюдений, свойства этой субстанции должны быть очень странными. Во-первых, она не сгущается, то есть не собирается в обычные объекты типа галактик и их скоплений, и ее распределение в пространстве, по-видимому, близко к равномерному. Во-вторых, как уже не раз писалось, она заставляет Вселенную расширяться, то есть темная энергия, в отличие от обычной материи, создает не тяготение, а антитяготение, антигравитацию. В-третьих, сколь бы необычным это не выглядело, плотность темной энергии по современным данным практически не зависит от времени (имеется ввиду абсолютная плотность, измеренная, скажем, в г/см^3). В-четвертых, в настоящую эпоху вклад темной энергии в полную плотность Вселенной является определяющим — $\Omega_\Lambda \approx 0.7$. Это не всегда было так — плотности обычного вещества и темной материи, в отличие от темной энергии, зависят от времени, и в более ранние эпохи эволюции Вселенной относительный вклад темной энергии был меньше (рис. 40).

Что может представлять собой эта темная энергия? Возможны разные варианты, но, по-видимому, самый простой и естественный — темная энергия представляет собой энергию вакуума. Вакуум, вопреки бытовой точке зрения, это не просто пустота²⁰, а состояние с минимальной возможной энергией, причем эта энергия не обязательно должна быть равна нулю. Если из какого-то объема убрать все частицы и поля, то, согласно законам квантовой механики, на сверхмалых расстояниях этот объем является ареной очень активной деятельности — в нем непрерывно рождаются и исчезают так называемые виртуальные частицы. Энергия этого кипящего «супа» частиц и является энергией вакуума. (Корректно рассчитать

²⁰ Не могу удержаться, чтобы не привести шуточные высказывания знаменитого советского физика Я.И. Померанчука, заметившего, что вакуум не пуст, он полон глубокого физического содержания, и что вся физика — это физика вакуума.

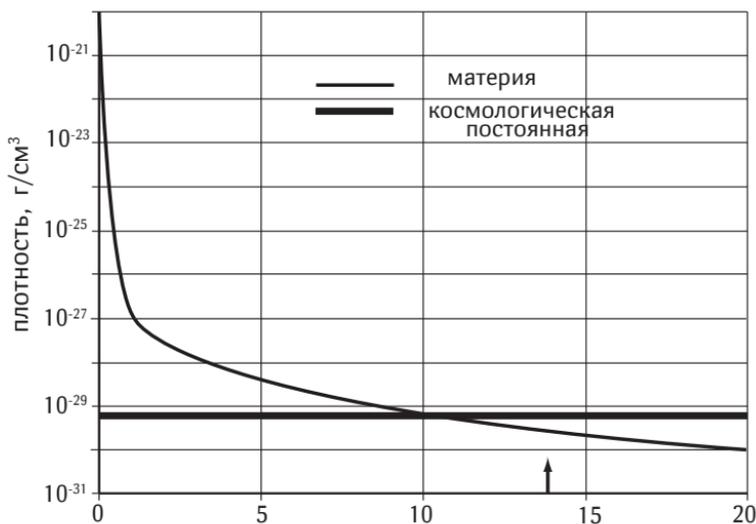


Рис. 40. Зависимость плотности вещества (кривая линия) и темной энергии (горизонтальная прямая) от времени (Краус 2002). Вдоль вертикальной оси отложена плотность в г/см^3 , вдоль горизонтальной — время, прошедшее после Большого взрыва, в миллиардах лет. Стрелочкой указана современная эпоха.

энергию вакуума из общих физических принципов весьма непросто и поэтому полученная чисто астрономическими методами оценка значения Ω_Λ оказалась очень кстати). Свойства вакуума близки к требуемым для темной энергии — его плотность не зависит от времени (она определяется физикой очень малых расстояний и времен), он не сгущивается и, согласно квантовой физике, его давление отрицательно, что и приводит к появлению эффекта антигравитации. Эти особенности вакуума привели к тому, что он часто рассматривается в качестве основного кандидата в темную энергию.

Открытие ускоренного расширения Вселенной, возможное отождествление причины этого ускорения с космическим вакуумом — это, несомненно, эпохальные

достижения, существенно меняющие представления об окружающем нас мире. Однако насколько серьезно можно относиться к этим открытиям? Ведь кажется, что они основываются лишь на нескольких точках, уклоняющихся от ожидаемой прямой на рис. 38. Во-первых, в настоящее время данных уже гораздо больше. Число далеких SN Ia с измеренными кривыми блеска достигает уже нескольких сотен и новые наблюдения лишь подтверждают и уточняют исходные результаты групп SCP и HZT. Во-вторых, как я уже писал в начале этого раздела, и до результатов по сверхновым были наблюдательные и теоретические аргументы в пользу ненулевой космологической постоянной – например, противоречие между оценками возраста Вселенной и возрастом старейших объектов, предсказания теории инфляции. И, наконец, в-третьих, сейчас существует целый ряд новых, независимых от наблюдений SN Ia, тестов, также свидетельствующих об $\Omega_\Lambda > 0$.

Первый из этих аргументов уже упоминался – анализ анизотропии реликтового излучения показывает, что полная плотность нашей Вселенной близка к критической, в то время как плотность всех видов вещества составляет лишь около четверти критической. Этот дисбаланс компенсируется вкладом темной энергии. Еще одна группа свидетельств основывается на наблюдениях крупномасштабного распределения галактик. Так называемые акустические флуктуации, наблюдаемые примерно через 400 000 лет после Большого взрыва в реликтовом излучении (п. 2.4), должны были отпечататься и в распределении окружающих нас галактик на масштабах ~ 100 Мпк. Появление больших, однородных выборок галактик с измеренными красными смещениями позволило относительно недавно (в начале 2000-х годов) действительно обнаружить этот эффект. Его анализ дал возможность независимой оценки плотности вещества во Вселенной и, в сочетании с данными о реликтовом излучении, уточнил параметры темной энергии.

Эффект Сакса–Вольфа (изменение частоты фотона реликтового излучения, движущегося в изменяющемся гравитационном поле) приводит к появлению корреляции между наблюдаемой неоднородностью реликтового излучения и распределением относительно близких ($z \leq 1$) галактик. Если во Вселенной доминирует вещество, этот эффект не проявляется. Если же космологическая постоянная достаточно велика, то она влияет на темп роста крупномасштабных структур (скоплений и сверхскоплений галактик) и приводит к тому, что поле возмущений гравитационного потенциала успеваает измениться за время полета фотона от далекой галактики до нас. Следствием этого должна быть дополнительная анизотропия реликтового фона, зависящая от крупномасштабного распределения вещества в эпоху, когда темная энергия стала динамически важным компонентом Вселенной. Анализ крупномасштабного распределения галактик и радиоисточников подтвердил существование этого эффекта.

Неожиданный подход к изучению темной энергии дают излучающие в рентгеновском диапазоне скопления галактик. Скопления галактик, как обычно пишут, — это самые крупные гравитационно-связанные объекты Вселенной. Они содержат тысячи галактик в пределах нескольких мегапарсеков (напомню, что расстояние от нашей Галактики до туманности Андромеды составляет примерно $2/3$ мегапарсека). Большой вклад в барионную массу скоплений дает горячий газ, являющийся источником сильного рентгеновского излучения. Предположив, что доля газа в скоплениях является постоянной и не зависит от красного смещения (эта доля просто отражает долю барионного вещества во Вселенной), можно получить независимые от красного смещения оценки расстояний до скоплений. Оказалось, что эти оценки согласуются с моделью Вселенной с большим значением космологической постоянной.

Есть и другие свидетельства существования темной энергии – подсчеты далеких скоплений галактик, слабое и сильное гравитационное линзирование и пр. Эти свидетельства следуют из разных, не связанных между собой наблюдательных эффектов. По отдельности к каждому из них можно придаться и придумать другое объяснение, но лишь существование темной энергии единым и, по сути, самым простым образом объясняет весь весьма разнородный комплекс данных. Именно совокупность наблюдательных тестов позволяет считать существование темной энергии надежно установленным фактом. Напомним, что расширение Вселенной и наличие в ней темной материи также подтверждается самыми разными и независимыми свидетельствами (разделы 2.2 и 2.5). Нелишне будет также напомнить, что темная энергия довольно естественным образом возникает и в разнообразных построениях теоретиков – в частности, эта энергия, возможно, представляет собой давно обсуждавшуюся (еще с первой половины XX века) энергию физического вакуума.

Основные участники этой истории – Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Райсс – стали лауреатами Нобелевской премии по физике за 2011 год с официальной формулировкой «За открытие ускоренного расширения Вселенной с помощью наблюдений далеких сверхновых».

2.7. Портрет Вселенной

Чем более постижимой представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной.

Стивен Вайнберг

В предыдущих разделах я остановился на наиболее общих наблюдательных основах космологии, к которым можно отнести расширение Вселенной, реликтовое излучение, темную материю, ускоренное расширение. Это, конечно, далеко не все, что можно было обсудить. На-

пример, я почти не писал о первичном нуклеосинтезе, предсказания которого подтверждают картину Большого взрыва, и о крупномасштабной структуре Вселенной, свойства которой также согласуются с этой картиной. К фундаменту космологии можно отнести и основную тему этой книги — факт, что ночное небо является темным, но к этому я снова вернусь в последней главе.

Попробуем восстановить основные черты эволюции Вселенной и ее характеристики. При этом под Вселенной, как и везде в этой книге, я буду подразумевать конкретный объект — расширяющийся пузырек пространства-времени, возникший около 14 млрд лет назад. Слово Вселенная я всегда пишу с большой буквы, имея в виду что она, возможно, не является единственной, и что существует бесчисленное множество других вселенных, подобно тому, как за пределами нашей Галактики существуют миллиарды других галактик (см. следующий параграф).

Итак, соберем воедино кусочки мозаики и представим себе портрет окружающей нас Вселенной. Сначала о том, что видно, то есть о распределении галактик. На относительно небольших масштабах их распределение сильно неоднородно — яркие галактики окружены свитами из карликовых галактик, галактики часто образуют пары и группы, существуют гигантские конгломераты галактик — скопления и, наконец, на масштабах десятков мегапарсеков наблюдаются сверхскопления, волокна (филаменты) и пустоты (войды) (рис. 41). Что же дальше? Есть ли во Вселенной более крупные образования? Нет, как показывают наблюдения, по мере роста масштаба усреднения распределение галактик становится все более и более однородным. (Напомню, что сильнейшим аргументом в пользу глобальной однородности Вселенной является также удивительная изотропия реликтового излучения, характеризующего распределение плотности во Вселенной при $z \approx 1000$.) Об этом же свидетельствуют и теоретиче-

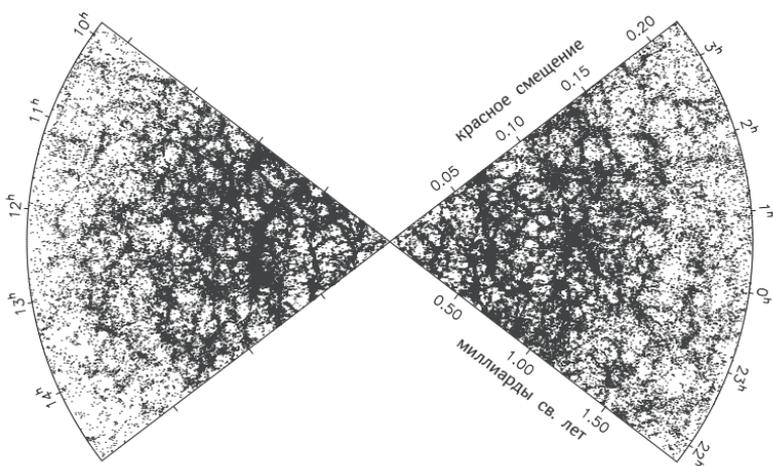
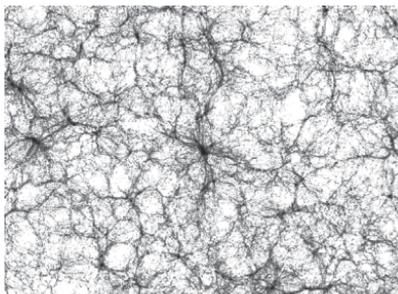


Рис. 41. Крупномасштабное распределение 62 559 галактик (точки) в двух узких (толщиной 3°) конических разрезах по данным обзора 2dF. Земля находится в центре рисунка, вдоль радиуса отложено красное смещение, максимальному z соответствует расстояние около 1 гигапарсека. (Рисунок с сайта www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/)

ские работы, посвященные моделированию образования структур во Вселенной.

На рис. 42 в качестве примера показаны результаты численных расчетов формирования крупномасштабной структуры Вселенной в рамках стандартной космологической модели, учитывающей вклад Λ -члена и скрытой массы (так называемая Λ -CDM модель). Эти, и другие подобные им, расчеты стартуют с исходно почти однородного распределения скрытой массы, прослеживают рост индивидуальных сгущений темной материи — темных гало, затем рассматривается, как эти гало нагребают газ из окружающего пространства, в них стартует процесс рождения звезд и, наконец, «вылупляется» звездная галактика. Отдельные этапы этого процесса понятны, конечно, еще плохо, но в целом в этом сценарии удастся хорошо воспроизвести как особенности пространственного распределения (наличие структур на небольших масштабах,

Рис. 42. Крупномасштабное распределение галактик в современную эпоху по данным численных расчетов (Шпрингел и др. 2005). Размер показанной области составляет примерно 0.5 гигапарсека.



крупномасштабную однородность), так и удовлетворительно описать свойства

самых галактик. Естественно, сравнение наблюдений (рис. 41) и расчетов (рис. 42) осуществляется не просто разглядыванием картинок (они, действительно, похожи), а детальным математическим анализом.

Основные характеристики Вселенной суммированы в следующей таблице.

Таблица 1. Основные характеристики Вселенной

Возраст Вселенной	13.8 млрд лет
Постоянная Хаббла H_0	70 км/с/Мпк
Полная плотность Вселенной (ρ/ρ_c)	1.00
Плотность барионов $\Omega_b = \rho_b/\rho_c$	0.046
Плотность темной материи Ω_{dm}	0.23
Плотность темной энергии Ω_Λ	0.72

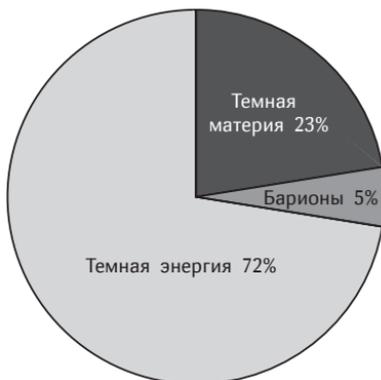
Таблица основана на результатах семилетней работы космической обсерватории WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), наблюдавшей реликтовое излучение, в сочетании с данными по барионным акустическим флуктуациям (см. предыдущий раздел) и по космологическим сверхновым. Насколько точны эти числа? Формальная точность очень высока. Например, значение постоянной Хаббла в современную эпоху оценивается с точностью около ± 1 км/с/Мпк, остальные характеристики также известны с погрешностью в несколько процентов. Лет 20–30 назад это показалось бы просто фантастикой – например,

значение H_0 у разных авторов в те годы варьировалось от 50 до 100 км/с/Мпк, да и оценки других параметров различались в разы.

Один из наиболее интересных параметров – это, конечно, полная плотность Ω , поскольку она определяет геометрию Вселенной. Как видно из таблицы, плотность вещества $\Omega_m = \Omega_b + \Omega_{dm}$ равна 0.28, плотность темной энергии составляет 0.72 и Ω равна 1.00 (вкладом остальных ингредиентов Вселенной, например, излучения, можно пренебречь). Точность определения Ω все время растет и по современным оценкам отличие Ω от единицы не превышает 1–2 процента, так что нашу Вселенную с большой точностью можно считать плоской (кривизна пространства близка к нулю).

На рис. 43 интегральный состав Вселенной для наглядности изображен в виде круговой диаграммы. Этот рисунок в сочетании с таблицей и с рис. 40 позволяет сделать несколько общих заключений. Во-первых, как уже не раз говорилось, основной вклад в Ω дает не обычное вещество, изучаемое учеными уже много столетий, и даже не скрытая масса, известная уже несколько десятилетий, а нечто, о чем сейчас не известно почти ничего – темная энергия. Обычное вещество, гравитирующее согласно закону всемирного тяготения, дает лишь относительно небольшой вклад в полную плотность, а доминирующая составляющая Вселенной обладает антитяготением. Во-вторых, мы живем в особое время эволюции Вселенной. Доминирование темной энергии началось по космическим меркам относительно недавно (рис. 40), и с этого времени замедляющееся расширение Вселенной сменяется расширением с ускорением. В-третьих, будущее Вселенной будет определяться темной энергией. Ее усиливающееся влияние начнет постепенно, в течение миллиардов лет, подавлять формирование структур (скоплений галактик, групп и пр.) – сначала на больших, а затем и на все меньших и меньших масштабах. Усиливающийся разгон материи темной энергией приведет

Рис. 43. Относительный состав Вселенной (в процентах от критической плотности)



к тому, что через многие десятки миллиардов лет Вселенная будет выглядеть очень скучной – в ней на огромных расстояниях друг от друга будут разбросаны стремительно удаляющиеся друг от друга темные галактики, состоящие из потухших, проэволюционировавших звезд.

Размер наблюдаемой части Вселенной превышает 10 гигапарсеков. Это выглядит парадоксальным, поскольку за время жизни Вселенной свет может успеть пройти лишь 14 млрд световых лет и поэтому кажется, что ее размер не может превышать эту величину. Однако Вселенная расширяется и поэтому, если мы наблюдаем изображение предельно далекой галактики с $z = 10$ (после Большого взрыва к этому времени прошло лишь около 500 млн лет), то за время, пока ее излучение добиралось до нас, Вселенная очень сильно увеличилась в размерах и расстояние до галактики составило уже около 30 млрд световых лет или 10 Гпк. Расстояние до сферы последнего рассеяния, из которой мы наблюдаем фотоны реликтового излучения, равно 14 Гпк.

В качестве характерного размера Вселенной можно также взять, например, хаббловское расстояние l_H , то есть такое расстояние, при котором скорость расширения Вселенной равна скорости света. Если расстояние от нас превышает l_H , то скорость удаления объекта превышает скорость света, а, значит, мы никогда не сможем достичь этой галактики. Используя закон Хаббла, можно оценить, что $l_H = c/H_0 = 4300$ Мпк. Этому расстоянию соответствует

красное смещение $z \approx 1.5$, а объекты с $z > 1.5$ для нас принципиально недостижимы. Может показаться странным, что мы видим излучение от столь быстро — со скоростью, превышающей c , — удаляющихся объектов. Противоречия здесь нет — фотон, странствуя от такой сверхсветовой галактики, будет по пути к нам входить в области пространства, удаляющиеся от нас со все меньшей и меньшей скоростью и, наконец, начнет приближаться.

Вселенная содержит $\sim 10^{11}$ галактик, каждая галактика состоит из 10^{10} – 10^{11} звезд, следовательно, полное число звезд во Вселенной достигает 10^{21} – 10^{22} штук. Много это или мало? В столовой ложке воды более 10^{23} молекул, так что такую жидкую «Вселенную галактик» можно проглотить одним глотком. Полная масса Вселенной в пределах l_H составляет $\sim 10^{56}$ г или примерно 10^{80} масс протона.

Вынесенная в эпиграф фраза появилась в самом конце знаменитой книги Стивена Вайнберга «Первые три минуты». Это замечание неоднозначно и существует множество его толкований²¹. Воспользовавшись многозначностью этой фразы, я вложу в нее свой смысл: чем более подробно и детально мы изучаем Вселенную, тем менее понятно, *почему* она именно такая, а не иная. Но об этом в следующем параграфе.

2.8. За пределами нашей Вселенной

Вокруг столько миров, сколько способно уместиться у нас под шляпой.

Станислав Ежи Лец

Как мы увидели в предыдущем параграфе, наша Вселенная — довольно странное место. Действительно, ее крупномасштабные характеристики выглядят произвольными — *почему*, например, в ней именно столько темной

²¹ Реакция нескольких коллег-физиков приведена Вайнбергом в книге «Мечты об окончательной теории». К примеру, американский космолог Джим Пиблс предположил, что в тот день, когда Вайнберг это написал, у него просто было плохое настроение.

материи и темной энергии, почему барионное вещество — это лишь небольшая «примесь» к другим ее составляющим, почему она столь велика или, в зависимости от вкуса, столь мала? Подобных вопросов можно задавать много. Кажется естественным, что рано или поздно мы должны узнать ответы, например, построив некую фундаментальную теорию, в которой все особенности Вселенной будут объяснены, так сказать, «из первых принципов». Однако уже сейчас существует подход, называемый антропным принципом, позволяющий ответить на подобные вопросы. С выводами, следующими из антропного принципа, можно не соглашаться, однако они, несомненно, очень интересны.

Давайте представим себе, что мы находимся в далеком прошлом, когда не было известно о существовании других звезд и планет. Проницательный исследователь, размышляя об окружающем его мире, мог бы обратить внимание на то, что этот мир удивительно комфортен для человека²².

Эти удобства можно перечислять долго — например, на Земле тепло, полно пищи, легко найти естественные укрытия от непогоды и от разнообразных опасностей, реки и моря дают возможности для далеких путешествий. Если не считать, что все это кем-то создано специально для человека, то можно сделать вывод, что существует огромное количество других миров с самыми разнообразными температурными режимами и условиями для жизни, а мы живем в том мире, где условия для нас подходят.

Возможно, отчасти подобная логика привела ряд античных философов к выводу о множественности других, в том числе обитаемых, миров. Например, в III в. н.э. Ипполит так описывает взгляды философа-атомиста Де-

²² В стихотворении «Странно» Игорь Северянин написал так:

Мы живем, точно в сне неразгаданном,
На одной из удобных планет...

мокрита: «Миры бесконечны по числу и отличаются друг от друга по величине. В одних из них нет ни солнца, ни луны, в других – солнце и луна большие, чем у нас, в третьих – их не по одному, а несколько. Расстояния между мирами не одинаковые; кроме того, в одном месте миров больше, в другом – меньше... В одном месте миры возникают, в другом – идут на убыль... Некоторые из миров лишены животных, растений и какой бы то ни было влаги».

В неподходящих условиях жизнь просто не появилась бы, и не было бы наблюдателей, рассуждающих о комфортности окружения. Создание гелиоцентрической системы, превратившее Землю в рядовую планету, а также открытие в последние годы огромного числа планет у других звезд, – все это подтвердило приведенные выше рассуждения.

Теперь вместо Земли рассмотрим Вселенную – насколько она уютна для нашего существования? Оказывается, очень! Самые разнообразные ее характеристики замечательным образом «подогнаны» для того, чтобы могла существовать жизнь, подобная земной. Например, все знают, что в нашем мире 3 пространственных измерения. Это не случайно. Как показал еще в начале XX века Пауль Эренфест, только в трехмерном мире возможно существование устойчивых планетных орбит и устойчивых атомов. Маленькое изменение массы электрона или разности масс протона и нейтрона привело бы к тому, что атом водорода стал бы нестабилен и основным веществом во Вселенной стали бы атомы гелия. Эволюция звезд радикально изменилась бы, и возникновение жизни стало бы невозможно. В физике еще много других эффектных примеров зависимости нашего мира от «шевеления» фундаментальных констант. Например, сильное увеличение скорости света приведет к тому, что при фиксированной энергии фотона, задаваемой разностью энергий атомных уровней, его импульс уменьшится, длина

волны увеличится, изменится сечение рассеяния фотонов электронами. В итоге фотоны практически перестали бы взаимодействовать с веществом и, как пишет российский физик Л.Б. Окунь, «не было бы ни Солнца, ни электрической лампочки, чтобы светить, ни глаза, чтобы видеть».

Итогом подобного анализа является заключение, что наш мир имеет относительно небольшой запас прочности по отношению к изменению фундаментальных констант. Размышляя, подобно нашему древнему мыслителю, о «комфортности» Вселенной, можно сделать простой вывод — возможно, существует очень большая последовательность вселенных, в которых реализуются самые разнообразные наборы физических констант, и мы живем в той из них, в которой условия благоприятны для появления жизни земного типа. Это утверждение, по сути, почти тривиальное, и есть антропный принцип. На самом деле существуют десятки вариантов формулировки принципа, но в дальнейшем я буду иметь в виду лишь эту.

Антропный принцип обычно связывают с именем английского астрофизика Брэндона Картера. В 1974 году он предложил это название для утверждения, что то, что мы ожидаем получить из наблюдений, должно удовлетворять условиям, необходимым для присутствия человека в качестве наблюдателя. Скажем, мы не можем ожидать, что получим из наблюдений, что нейтрон в два раза легче протона, поскольку это противоречит существованию атомов и молекул и, следовательно, жизни нашего типа. Картеру принадлежит удачное название, однако он не был первооткрывателем самого принципа. В разном обличье эти соображения высказывались и использовались задолго до него. Например, Эдгар По использовал сходные рассуждения для обоснования большого размера и возраста Вселенной (см. предыдущую главу). Дух антропного принципа можно усмотреть и в построениях Людвиг Больцмана, описавшего огромную Вселенную, в которой то тут, то там возникают гигантские статистические флуктуации,

условия в которых очень сильно отличаются от средних. Если в какой-либо флуктуации существуют мыслящие существа, то они обнаружат, что их существование связано с крайне маловероятными условиями, сложившимися в пределах флуктуации и сильно отличающимися от окружающих областей Вселенной. В 1960-е годы четкие формулировки антропного принципа высказали советский космолог А. Л. Зельманов и американец Роберт Дикке.

Что нам дает антропный принцип? Как ни странно, у столь общего утверждения, есть вполне конкретные достижения. Например, я уже упоминал, что Стивен Вайнберг задолго до результатов групп Перлмуттера и Шмидта использовал его для обоснования большого значения космологической постоянной. Замечательным применением антропного принципа (по крайней мере так об этом пишут во многих учебниках по космологии) считают и предсказание Фредом Хойлом в 1953 году существования энергетического уровня ядра углерода с энергией возбуждения 7.65 МэВ. Без этого уровня углерод образовывался бы в звездах гораздо менее эффективно, и наша Вселенная была бы столь им бедна, что возникновение жизни на основе углерода стало бы невозможным. Примерно через неделю после этого предсказания уровень возбуждения 7.65 МэВ был действительно открыт в эксперименте! Еще одним предсказанием антропного принципа может считаться и существование Мультивселенной²³ – совокупности огромного количества вселенных, в каждой из которых реализуется свой набор значений физических констант.

Мультивселенная – концепция довольно старая. Например, что-то подобное можно найти у Эдгара По в «Эврике»: «существует некая беспредельная последовательность Вселенных, более или менее подобных той, о которой мы имеем осведомленность...», «не имея доли в нашем проис-

²³ Существует множество терминов для описания такого ансамбля вселенных – Мегавселенная, Метавселенная, Мультиверс (от английского Multiverse) и др.

хождении, они не имеют доли в наших законах. Ни они не притягивают нас, ни мы их... Между ними и нами... нет влияний взаимных...». Своего рода Мультивселенной является и упоминавшийся выше мир Больцмана, состоящий из огромного числа отдельных «вселенных-флуктуаций».

Мультивселенная – благодатное поле деятельности и для писателей-фантастов, герои произведений которых часто скачут из вселенной во вселенную на суперзвездолетах (иногда, правда, авторы путают галактики и вселенные). Кстати, одно из первых художественных описаний своеобразной Мультивселенной было дано знаменитым польским писателем Станиславом Лемом в «Новой космогонии» (1971 год). «Новая космогония» – это речь вымышленного лауреата Нобелевской премии Альфреда Тесты, в которой он описывает Вселенную, разбитую на отдельные «ячейки». Внутри ячеек существуют «различные разновидности физики» и «цивилизации могли возникнуть лишь в немногих очагах, значительно удаленных друг от друга». Собственно фантастика начинается дальше, когда Теста описывает эволюцию такой Вселенной как своего рода состязание или игру сверхцивилизаций, возникших в некоторых из ячеек, по переделке законов физики внутри своих ареалов обитания и во Вселенной в целом.

Все написанное выше можно отнести к общим рассуждениям. Есть ли какие-нибудь *физические* основания в поддержку существования Мультивселенной? Первые свидетельства такой возможности появились в теории инфляции. Эта теория возникла на рубеже 1970–1980-х годов усилиями ряда российских и зарубежных физиков-теоретиков (Алексей Старобинский, Андрей Линде, Алан Гут и др.). К этому времени в космологии накопился ряд проблем, неразрешимых в рамках стандартной фридмановской космологии. Например, каким образом во Вселенной установилось однородное и изотропное распределение материи на больших масштабах, почему раз-

ные, очень далеко разнесенные и причинно не связанные области Вселенной имеют одинаковые свойства, почему глобальная геометрия нашего мира близка к евклидовой? Теория инфляции успешно разрешила эти и другие проблемы фридмановской космологии, но, естественно, породила новые.

Основой теории инфляции является представление о существовании так называемого скалярного поля – особого вида материи, обладающего огромной плотностью и отрицательным давлением. Отрицательное давление означает, что эта среда порождает мощные силы гравитационного отталкивания. Скалярное поле испытывает квантовые флуктуации и в нем возникают области с большими значениями поля, которое начинает вести себя как космологическая постоянная и которое приводит к возникновению быстро расширяющихся областей.

В самом начале эволюции нашей Вселенной, еще до стадии Большого взрыва, был период такого сверхбыстрого ускоренного расширения (или раздувания) – инфляции. Инфляция длилась $\sim 10^{-34}$ с, и за это время размер флуктуации вырос в огромное, невообразимое число раз. В некоторых вариантах теории этот рост составляет $10^{10^{10}}$ раз! В итоге, в конце инфляционной стадии исходная флуктуация плотности, имевшая так называемый планковский масштаб ($\sim 10^{-33}$ см), вырастает до колоссальных размеров, во много раз превышающих размер доступной наблюдениям современной Вселенной. Это объясняет однородность и изотропию, а также плоскую геометрию Вселенной – она представляет собой лишь крошечную часть чего-то гораздо большего, подобно тому, как небольшой участок поверхности огромного шара в первом приближении можно считать плоским, хотя сам шар, естественно, сильно искривлен.

В конце инфляции скалярное поле распадается, энергия поля переходит в энергию обычного вещества и возникает то, что уже знакомо по космологии Фридма-

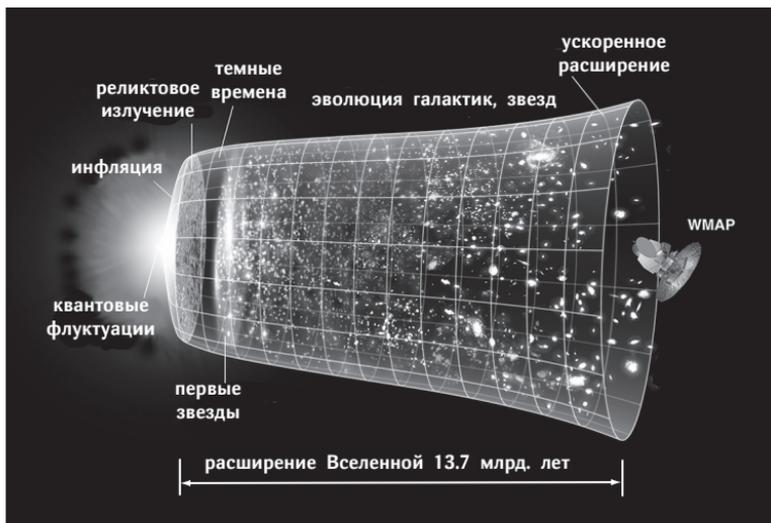


Рис. 44. Основные этапы эволюции нашей Вселенной: Вселенная возникла в ходе квантовой флуктуации скалярного поля почти 14 млрд лет назад, затем последовала фаза инфляции, примерно через 400 000 лет после начала сформировалось наблюдаемое сейчас реликтовое излучение, первые звезды и галактики начали образовываться через несколько сотен миллионов лет и, наконец, несколько миллиардов лет назад торможение расширения Вселенной начало постепенно сменяться ускоренным расширением под влиянием темной энергии. (Рисунок с сайта map.gsfc.nasa.gov)

на, — расширяющийся по инерции (начальные скорости расширения сформировались в конце стадии инфляции) сверхплотный сгусток элементарных частиц. Тем самым, можно сказать, что стадия инфляции подготавливает горячий Большой взрыв, создавая высокотемпературную плазму и заставляя новорожденную Вселенную расширяться (рис. 44). Или, другими словами, расширение Вселенной — следствие условий, сложившихся по окончании стадии инфляции, а сама инфляция — следствие определенных свойств скалярного поля. В настоящую эпоху Вселенная начинает потихоньку разгоняться под действием

другого скалярного поля – того, что выше обсуждалось под названием «темная энергия»²⁴.

Представим себе, что скалярное поле неоднородно и его плотность случайным образом меняется, тогда в тех областях, где поле большое, начинается инфляция и возникают, по словам А. Линде, «острова в первичном хаосе» – другие вселенные. Следовательно, в таком варианте инфляционной теории мы естественным образом приходим к картине Мультивселенной, в которой наша Вселенная – лишь одна из многих. Вот как об этом написал сам автор модели хаотической инфляции Андрей Линде: «В результате квантовых скачков скалярных полей вселенная оказывается разделенной на бесконечное множество экспоненциально больших областей с различными законами физики при малых энергиях. Каждая из этих областей настолько велика, что практически может рассматриваться как отдельная вселенная: существа, ее населяющие, будут жить экспоненциально далеко от ее границ, и потому никогда ничего не узнают о существовании других «вселенных» с другими свойствами».

Итак, из приведенного выше упрощенного описания следует, что возникновение Вселенной и Мультивселенной объясняется свойствами предшествующего им скалярного поля. Скалярное поле – это простейший вариант поля. Оно характеризуется единственным значением какой-либо величины в каждой точке, причем значение этой величины может меняться от места к месту и со временем. Примерами скалярного поля являются распределения температуры или высот над уровнем моря по поверхности Земли. Согласно современным представлениям, Вселенная заполнена рядом скалярных полей, задающих вакуум, а также массы частиц и то, как они взаимодействуют. Говоря об этих полях, сложно не вспомнить апейрон античных философов!

²⁴Полувшутку-полувсерьез космологи иногда говорят, что история Вселенной – это просто история образования и распада скалярных полей.

Однако не является ли введение этого поля неким произволом и не подобраны ли его свойства искусственным образом так, чтобы объяснить рождение вселенных? Даже если это и так, ничего плохого в этом нет, так как гипотеза о скалярном поле позволяет единообразным образом объяснить очень широкий круг явлений. Однако скалярные поля известны в физике уже давно — они естественным образом возникают «на кончике пера» теоретиков. Например, один из столпов Стандартной модели физики элементарных частиц — модель Вайнберга–Салама — основывается на существовании особого скалярного поля, поля Хиггса, которое отвечает за появление массы у фундаментальных частиц, таких как кварки и электроны. Механизм появления массы можно представить, например, как движение пловца в бассейне — вода (поле Хиггса) сопротивляется движению пловца, и это сопротивление ощущается как масса. Важное уточнение — поле Хиггса, в отличие от воды, сопротивляется только ускоренному движению. Частица,двигающаяся через это поле с постоянной скоростью, не тормозится, торможение начнется лишь при попытке ускорить или замедлить ее движение. Те частицы, которые сильно взаимодействуют с полем Хиггса, являются тяжелыми, слабо взаимодействующие — легкими. Фотон проходит через это поле без сопротивления, и он не имеет массы. Бозоном Хиггса (или просто частицей Хиггса) называют квант поля Хиггса.²⁵

Стандартная модель Вселенной успешно прошла проверку множеством экспериментов. Ее важнейшее предсказание — существование бозона Хиггса — было подтверждено в 2012 году в ходе экспериментов на Большом адронном коллайдере. Это открытие дало важный, пусть

²⁵ Известный американский физик Брайан Грин предложил следующую метафору: «Если мы сравним массу частицы со степенью известности личности, то океан Хиггса будет подобен толпе папарацци: неизвестные персоны проходят через толпящихся фотографов с легкостью, но видные политики и кинозвезды проталкиваются с большим трудом». Папарацци в этом сравнении играют роль бозонов Хиггса.

и косвенный, аргумент в пользу теории инфляции!

Еще один независимый взгляд на Мультивселенную возник из активно развиваемой в последние десятилетия теории струн. Согласно этой теории, элементарные частицы и их фундаментальные взаимодействия возникают в результате колебаний и взаимодействий крошечных (размером $\sim 10^{-33}$ см) одномерных струн. Все известные элементарные частицы интерпретируются как различные режимы их колебаний. Продольные размеры струн очень малы и поэтому на масштабах, превышающих планковский, они выглядят как точечные объекты. Теория струн очень сложна и пока что не является полноценной непротиворечивой и законченной теорией, а представляет собой отдельные фрагменты будущего подхода, который, как многие надеются, когда-нибудь сможет стать единой теорией всех известных физических взаимодействий.

Одним из результатов теории струн является предсказание существования огромного количества (по некоторым, конечно, *очень* грубым оценкам, $\sim 10^{500}$) различных типов вакуумов (см. раздел 2.6), поддерживающих совершенно разные частицы, взаимодействия, значения фундаментальных постоянных и даже разное количество пространственных измерений. Эта совокупность вакуумов получила название струнного ландшафта. Объединение ландшафта с инфляционной космологией породило представление о Мультивселенной, состоящей из вселенных — раздувающихся «пузырьков» — со всеми возможными типами вакуумов. Мы живем в одном из редких пузырьков, в нашей Вселенной, где физические законы оказались благоприятны для возникновения жизни.

Возможное существование немислимого, невообразимого, почти бесконечного набора разнообразных вселенных возродило старую идею о существовании «клонов» Вселенной и земной цивилизации. Вот что пишет об этом Александр Виленкин, американский физик русского про-

исхождения, в книге «Мир многих миров»: «Удивительным следствием этой новой картины мира является существование бесконечного числа миров, идентичных нашему. Да, дорогой читатель, десятки ваших дублей держат сейчас в руках эту книгу. Они живут на планетах, в точности таких же, как наша Земля со всеми ее горами, городами, деревьями и бабочками. Эти земли обращаются вокруг точных копий Солнца, и каждое солнце принадлежит огромной спиральной галактике – точной копии Млечного Пути... Должны существовать регионы, где истории немного отличаются от нашей, со всеми возможными вариациями».

Поразительно, что это написано не фантастом, а известным физиком-теоретиком! Хотя, конечно, фантасты давно опередили космологов. Например, магистр Мальгрим, волшебник из повести Джона Пристли «31 июня», сформулировал это так: «Все, созданное воображением, должно существовать где-то во Вселенной». «Принцип Мальгрима» – конечно, очень сильное утверждение, однако современная космология, отчасти смыкаясь с фантастикой, неожиданно приходит к близкой картине мира.

Стивен Хокинг начал свою книгу «Краткая история времени» поучительным анекдотом. В конце публичного выступления астронома, рассказавшего о строении Вселенной, из зала звучит реплика, что все это неправда, а на самом деле наш мир покоится на спине огромной черепахи, которая стоит на спине другой черепахи, та – на следующей и так далее. Эта бесконечная последовательность черепах может до некоторой степени, чисто аллегорически, служить образом того, как человечество познает окружающий его мир. Это познание – череда ударов по человеческому самолюбию, когда, ощупав очередную «черепаху», исследователи снова и снова начинают догадываться о существовании следующей. При этом место человека во Вселенной постепенно смещается на все более далекую периферию.

Библейская картина мира была построена вокруг человека. Человек находился в центре Вселенной – на Земле, вокруг которой обращались планеты, Солнце и Луна, а снаружи все это замыкалось сферой божественного. Коперник передвинул Землю из центра Солнечной системы, затем Диггес и Бруно убрали ограничивающую нашу планетную систему внешнюю сферу, сделав Солнце рядовой звездой среди множества подобных. Вильям Гершель открыл нашу Галактику в виде гигантского уплощенного скопления звезд. Солнце по Гершелю находилось вблизи центра Галактики. В XX веке, в первую очередь усилиями Хаббла, было доказано, что Галактика – рядовой объект среди множества других. Кроме того, Солнце было передвинуто на периферию нашей звездной системы. Окружающая Солнце планетная система тоже не уникальна – планеты присутствуют, по-видимому, у большинства звезд. И вот, на рубеже XX и XXI веков, начало формироваться представление, что очередная «черепаша» – наш заполненный галактиками расширяющийся пузырек пространства-времени – не последняя и за ее пределами уже маячит следующая – Мультивселенная. Удастся ли нам когда-нибудь найти и понять последнюю «черепашу», если она, конечно, существует?

Фон ночного неба

В предыдущей главе я описал несколько основных наблюдательных фактов, на которых базируется наше представление о Вселенной. Получившаяся картина Вселенной делает решение фотометрического парадокса почти тривиальным – наша Вселенная конечна во времени и в пространстве, содержит конечный запас энергии и, естественно, в таких условиях парадокс не может возникнуть. Однако темнота ночного неба сама по себе является важным космологическим наблюдательным фактом и содержит полезную информацию о Вселенной. Эта – самая короткая – глава посвящена подробному описанию фона ночного неба и тому, что можно из него извлечь.

3.1. Наблюдаемый фон

Иной фон не выносит
переднего плана.

Станислав Ежи Лец

Поговорим теперь о наблюдаемом фоне ночного неба, то есть о том, что виднеется между звездами. Нашим глазам этот фон кажется совершенно темным, но на самом деле это, конечно, не так – фон и не пуст, и не темен.

Рассмотрим повнимательней какой-либо участок ночного неба. На рис. 45 показано изображение участка неба в направлении созвездия Большая Медведица (левый рисунок). Размер этой площадки примерно равен диаметру полной Луны и в этой области неба видна лишь россыпь неярких звезд. В центре изображения многоугольником выделена небольшая площадка, которую в декабре 1995 года наблюдал космический телескоп «Хаббл». Форма области соответствует полю зрения так называемой Широкоугольной и планетарной камеры космического телескопа. Наблюдения этого участка неба (он получил название Северного глубокого поля телескопа «Хаббл» или HDF-N) проводились почти непрерывно в течение двух недель. На итоговом изображении (средний рисунок) видно около 3000 галактик и всего лишь несколько звезд нашей Галактики. Это, конечно, не случайно. Целью наблюдений HDF-N было изучение далеких галактик, и поэтому область поля была выбрана далеко от плоскости Млечного Пути, где спроецированная плотность звезд относительно невелика.

Самые слабые из галактик в HDF-N имеют видимую звездную величину $\approx 29^m$, то есть они более, чем в миллиард раз тусклее самых слабых звезд, доступных чело-

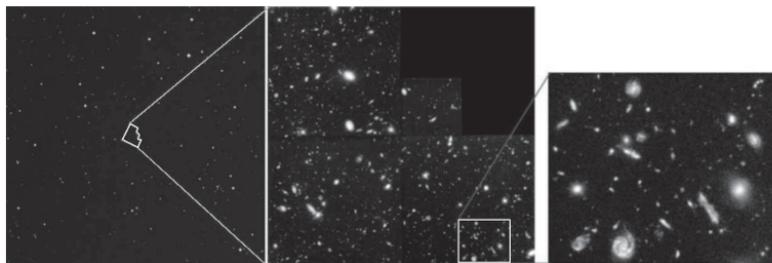


Рис. 45. Слева: участок неба размером 0.5×0.5 в области созвездия Большая Медведица. Многоугольником указана область Северного глубокого поля космического телескопа «Хаббл» (HDF-N). В центре: репродукция HDF-N (размер изображения – 2.7×2.7). Справа: фрагмент изображения HDF-N размером $25'' \times 29''$.

веческому глазу. При увеличении любого из фрагментов HDF-N в кажущейся пустоте между яркими объектами появляются более слабые (см. правую часть рис. 45). В итоге, если посчитать, сколько галактик приходится на единицу площади в глубоких полях, подобных HDF-N, то оказывается, что каждый квадрат небесной сферы со стороной 2"–3" содержит галактику.

Из приведенного примера становится понятно, что фон ночного неба складывается из свечения слабых звезд нашей Галактики и из излучения далеких галактик. Кроме того, на наблюдаемый фон ночного неба очень сильно влияет атмосфера Земли – она сама по себе немножко светится из-за фотохимических процессов в ее верхних слоях. Заметный вклад в наблюдаемый фон дает и межпланетная пыль, подсвечиваемая Солнцем – зодиакальный свет, и межзвездная пыль, подсвечиваемая звездами Галактики. Есть и другие факторы, влияющие на фон неба, но их вклад менее значителен.

Суммарный фон ночного неба при наблюдениях с Земли довольно ярк, хотя и уступает примерно в 10 миллионов раз яркости дневного неба. Например, на высокогорных обсерваториях, удаленных от яркой подсветки городов и находящихся выше приземного слоя воздуха, одна квадратная секунда безлунного ночного неба в зените светит в видимом диапазоне примерно как звезда 22 звездной величины. Один квадратный градус неба светит уже как звезда 4^m (такая звезда уже легко различима глазом), а вся полусфера ночного неба излучает как объект –6^m или –7^m. Это означает, что ночное небо как целое светит ярче любой звезды или планеты, и уступает лишь Солнцу и Луне!

Вклад разных факторов в итоговую яркость ночного неба варьируется со временем (например, свечение атмосферы усиливается в периоды максимума солнечной активности) и в зависимости от положения относительно плоскостей Солнечной системы и Галактики. В оптиче-

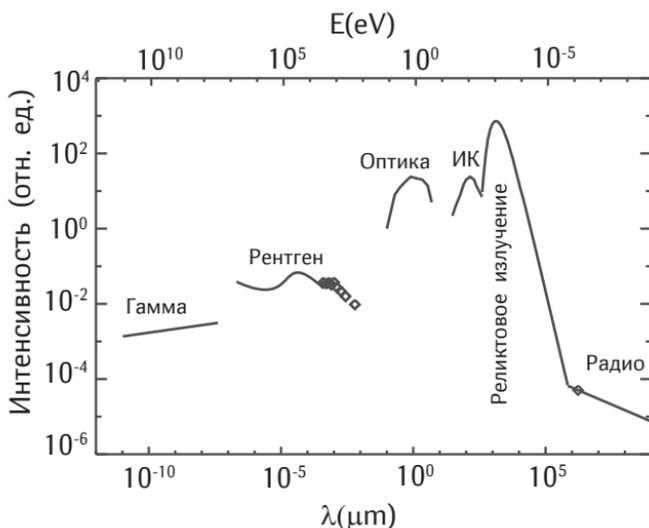


Рис. 46. Интенсивность космического фонового излучения в разных спектральных диапазонах. Вдоль нижней горизонтальной оси отложена длина волны излучения в микронах, вдоль верхней — соответствующие энергии квантов в электронвольтах.

ском диапазоне этот вклад в среднем выглядит примерно так¹:

свечение атмосферы — $145 N_{10}$,

зодиакальный свет — $60 N_{10}$,

интегральный свет слабых звезд Галактики — $< 5 N_{10}$,

свет звезд, рассеиваемый межзвездной пылью, — $10 N_{10}$,

диффузное излучение внегалактических объектов $\sim 1 N_{10}$.

Итак, оказывается, что оценить реальный фон ночного неба, создаваемый далекими внегалактическими объектами, совсем непросто. Этот фон заслоняется «передним планом» — земной атмосферой, межпланетной и межзвездной средой, звездами Млечного Пути. Если учесть все эти помехи, то остающийся внегалактический фон выглядит примерно так, как показано на рис. 46. Природа

¹ $1 N_{10}$ — одна звезда 10-й звездной величины на квадратный градус.

этого фонового свечения в разных спектральных диапазонах сильно отличается. В области самых высоких энергий источник фона не вполне ясен, хотя заметный вклад в него, по-видимому, должно вносить излучение активных ядер галактик (квazarов, блазаров и др.). В оптическом и инфракрасном диапазонах фоновое излучение — это интегральный свет звезд и пыли, нагретой молодыми звездами, от галактик на разных красных смещениях. В миллиметровом диапазоне, как видно на рис. 46, доминирует вклад реликтового излучения (раздел 2.4). В радиодиапазоне за фон, по-видимому, отвечают радиоисточники — радиогалактики, радиоизлучающие квазары и другие подобные объекты.

Итак, внегалактическое фоновое излучение — это дошедший до нас интегральный свет от всех звезд, галактик и активных ядер галактик, родившихся и эволюционирующих во Вселенной. Поэтому анализ этого излучения может дать информацию об истории звездообразования во Вселенной и даже о ее возрасте.

Рассмотрим простой случай. Пусть мы находимся в центре сферы, равномерно заполненной светящимся веществом (звездами и галактиками) и пусть радиус этой сферы равен R , а плотность светимости вещества — $L(r) = L_0$. Тогда наблюдаемая освещенность, создаваемая всем излучением от нас и до границы сферы, может быть найдена суммированием от $r = 0$ до $r = R$: $Q = ct_0 L_0$, где $R = ct_0$, c — скорость света, а t_0 — возраст нашей модельной Вселенной. Из этого выражения сразу видно, что величина фонового излучения (Q) определяется временем, в течение которого светили звезды и галактики, то есть, в конечном счете, возрастом Вселенной.

Чему равны значения Q и L_0 в нашей Вселенной? Q — это поток энергии, проходящий за единицу времени через единицу площади от всех излучающих источников. Q может быть найдено суммированием фонового излучения по всем длинам волн. По современным дан-

ным $Q \approx (5-10) \times 10^{-4}$ эрг/(с·см²). Среднюю плотность светимости L_0 можно грубо оценить, используя в качестве своего рода стандарта энерговыделения наше Солнце. Интегральная светимость Солнца $L_{\odot} = 4 \times 10^{33}$ эрг/с, масса $M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$ г и, следовательно, энерговыделение единицы массы Солнца: $e_{\odot} = L_{\odot}/M_{\odot} = 2$ эрг/(с·г). Плотность «светящегося» вещества Вселенной составляет примерно $0.003 \rho_c = 3 \times 10^{-32}$ г/см³ (0,3% критической плотности, см. раздел 2.5 предыдущей главы). Умножаем плотность на e_{\odot} и получаем следующую оценку плотности светимости: $L_0 \approx 6 \times 10^{-32}$ эрг/(с·см³). Подставляем эти значения в формулу для Q и получаем оценку времени, в течение которого должны были излучать звезды и галактики для того, чтобы обеспечить наблюдаемую яркость ночного неба, — $t_0 = Q/(c \times L_0) \approx 10-20$ млрд лет. Замечательный результат! Яркость ночного неба не только говорит нам о том, что был Большой взрыв, то есть было некое событие, приведшее к появлению звезд и галактик, но и о том, *когда* он произошел.

Предыдущие рассуждения и оценки были, конечно, очень грубыми. Кроме того, они касались лишь интегральной, просуммированной по всем длинам волн, яркости фона. Более детальное рассмотрение фона в разных спектральных диапазонах — от гамма-излучения до радиодиапазона (рис. 4б) — позволяет получить гораздо больше информации о Вселенной и о населяющих ее объектах.

Рассмотрим теперь более реалистичный подход, учитывающий, в частности, расширение Вселенной. Расширение приводит к увеличению длины волны фотонов и, следовательно, к уменьшению их энергии. Так может расширение Вселенной само по себе способно решить фотометрический парадокс? Это предположение было высказано в середине XX века английским космологом Германом Бонди, которому, кстати, принадлежит и не вполне удачное название «парадокс Ольберса».

Бонди совместно с Голдом в 1948 году предложил собственную космологическую модель. (Сходную модель практически одновременно рассмотрел Фред Хойл и поэтому теорию стационарной Вселенной называют также теорией Бонди, Голда и Хойла.) Модель стационарной Вселенной выглядит довольно привлекательно – Вселенная вечна, бесконечна и находится в состоянии непрерывного расширения, то есть в ней выполняется закон Хаббла. Вместо космологического принципа, лежащего в основе космологии Фридмана, теория стационарной Вселенной опирается на *совершенный космологический принцип* – Вселенная не только однородна и изотропна, но и одинакова во все моменты времени. Для того, чтобы согласовать расширение Вселенной с ее постоянной плотностью, в модели Бонди и др. пришлось допустить непрерывное рождение вещества. Темп этого рождения очень невелик – требуется появление лишь одного атома водорода в год в кубе со стороной полтора километра. Спонтанное рождение вещества – вещь, конечно, странная, но в космологии много необычного. Важнее то, что стационарная космологическая модель давала четкие предсказания, которые можно было проверить наблюдениями – например, она предсказывает вполне определенную зависимость между расстоянием и красным смещением. Именно наблюдения, в первую очередь, реликтового излучения, в конечном итоге и опровергли модель Бонди и др.

В стационарной модели Вселенная вечна и бесконечна. Следовательно, если она статична, излучение звезд должно заполнить все пространство и небесная сфера будет сверкать как поверхность звезды. Герман Бонди заключил, что нестационарность Вселенной, то есть ее расширение, решает эту проблему. Галактики на больших расстояниях удаляются от Земли со скоростью, превышающей скорость света, и поэтому их излучение никогда до нас не доберется. В теории стационарной Вселенной небосвод, действительно, покрыт изображениями звезд,

но мы не видим эти сверкающие небеса, поскольку большинство галактик имеют колоссальные красные смещения и ненаблюдаемы.

Решение Бонди справедливо для его модели Вселенной, однако это решение часто неправомерно переносят на реальную Вселенную, которая, конечно, расширяется, но является ограниченной во времени и в пространстве. В нашей Вселенной роль красного смещения в формировании темного ночного неба не столь велика.

Подробные расчеты яркости ночного неба для разных моделей Вселенной показали, что расширение, действительно, уменьшает яркость фона, но не слишком сильно. При любом разумном выборе космологических параметров падение яркости составляет лишь примерно 40% от значения для стационарной, не расширяющейся Вселенной. Следовательно, возраст Вселенной и, соответственно, время жизни галактик и составляющих их звезд, — основные факторы, определяющие наблюдаемую яркость ночного неба. Расширение Вселенной уменьшает эту яркость не более, чем в два раза.

3.2. Решение фотометрического парадокса

Кей посмотрел вверх. Джей всполошился:

— Что?

— Какие они красивые, верно?

— Кто?

— Звезды. Отсюда их видно плохо. Из-за городских огней. Один умный человек недавно сказал мне, что мы теперь на них редко смотрим. Думаю, он был прав на все сто процентов. Я давно на них не смотрю, и они действительно... прекрасны.

Фильм «Люди в черном»

В конце книги давайте суммируем предложенные за несколько столетий варианты решения фотометрического парадокса. Следуя Эдварду Харрисону, большую часть из

них можно свести в простую таблицу (см. табл. 2). Из таблицы видно, что решения в первом приближении делятся на две группы: 1) звезды закрывают все небо, но что-то мешает их увидеть, и 2) звезды не закрывают все небо и темные промежутки между ними реальны.

Таблица 2. История фотометрического парадокса

Авторы	Год	Решение
Диггес	1576	слабость блеска звезд
Кеплер	1610	число звезд конечно
фон Герике	1672	—//—
Галлей	1721	слабость блеска звезд
Шезо	1744	межзвездное поглощение
Ольберс	1823	—//—
Джон Гершель	1848	иерархическая структура
Эдгар По	1848	Вселенная конечна
Медлер	1861	—//—
Проктор	1870	иерархическая структура
лорд Кельвин	1901	Вселенная конечна
Фурнье д'Альбе	1907	иерархическая структура, межзвездное поглощение
Бонди	1952	расширение Вселенной

В пользу первого варианта высказывались Диггес (звезды невидимы из-за огромных расстояний до них), Галлей (далекие звезды слишком слабы для наблюдений и «когда звезды находятся на очень больших расстояниях, их излучение слабеет быстрее, чем по общему правилу»), Шезо («звездное пространство заполнено средой, способной слегка задерживать свет»), Ольберс («вселенная не является абсолютно прозрачной»), Бонди (красное смещение, то есть расширение Вселенной). При таком подходе решение фотометрического парадокса свелось к поиску причины, по которой свет далеких звезд до нас не дохо-

дит. Предложенные объяснения частично или полностью неверны.

Вторая группа решений фотометрического парадокса сводится к объяснению, почему звезды не покрывают всю небесную сферу. Свои варианты ответов дали Кеплер (Солнечная система окружена сферой, содержащей конечное число звезд), фон Герике (число звезд конечно, в промежутках между ними проглядывает бесконечное беззвездное пространство), Гершель и Проктор («...легко представить устройство вселенной, которая будет оставаться в точном смысле слова бесконечной, и в которой произвольное количество лучей зрения не будут пересекаться со звездами»), Эдгар По (Вселенная конечна во времени и в пространстве), Медлер («конечное время прошло от начала Творения до наших дней и мы, следовательно, можем наблюдать небесные тела только до расстояния, которое свет прошел в течение этого конечного времени»), лорд Кельвин (ограниченность Вселенной). Фурнье д'Альбе рассмотрел несколько возможностей — по его мнению Вселенная фрактальна и, кроме того, она может содержать огромное количество темных звезд, экранирующих излучение.

Таблица доведена до середины XX века, поскольку к этому времени все основные идеи были уже высказаны. Кроме того, в XX веке стало понятно, что в реальной Вселенной, которая конечна во времени и в пространстве и, вдобавок, расширяется (см. предыдущую главу), фотометрический парадокс просто не может возникнуть. За пределами нашей Вселенной, возможно, находится что-то еще — Мультивселенная, — однако какие-либо контакты с другими вселенными, обмен с ними энергией и информацией невозможны. Здесь будет снова уместна цитата из «Эврики» Эдгара По: «...не имея доли в нашем происхождении, они не имеют доли в наших законах. Ни они не притягивают нас, ни мы их... Между ними и нами... нет влияний взаимных».

Ночное небо – это гигантская, окружающая нас со всех сторон, машина времени. Взгляд на Луну отправляет нас назад на секунду с небольшим, свет от Юпитера и Сатурна, в зависимости от взаимного расположения планеты и Земли, идет до нас уже десятки минут. Ярчайшие звезды мы видим такими, какими они были десятки лет назад. Расплывчатое пятнышко на небе – туманность Андромеды – отправляет нас в прошлое уже на два миллиона лет. Но все это несравнимо с фоном неба – темнота, видимая между изображениями звезд и галактик, имеет возраст в миллиарды лет и она отсылает нас ко времени, когда во Вселенной рождались первые звезды и галактики. Взглянув на небо в радиодиапазоне, мы видим портрет Вселенной – реликтовое излучение – в возрасте лишь около 400 000 лет. Ничуть не преувеличивая можно сказать, что на окружающем нас со всех сторон ночном небе изображено рождение и эволюция Вселенной. В этом, пожалуй, и есть основная тайна неба – на нем, выражаясь немного высокопарно, запечатлен Большой взрыв.

На этом книга закончена. Ее основной темой была загадка ночного неба – почему ночное небо столь темное и что это означает. Как оказалось, ответить на этот вопрос совсем непросто. Хоть сколько-нибудь внятный ответ требует рассказа о том, как устроена Вселенная, а заодно и о том, откуда мы все это знаем и почему мы в этом так уверены. Одно тянет за собой другое, и рассказ грозит стать бесконечным, как бесконечно само познание окружающего мира. В итоге, у меня получилась очередная попытка «объять необъятное» – описать Вселенную в немногих словах, не скатываясь в чрезмерное упрощение и не сильно греша против истины.

Надеюсь, что рассказ о ночном небе не показался слишком скучным и у вас, как и у героя стихотворения Уолта Уитмена, сохранилось желание «взглядывать порою на звезды»:

Когда я слушал ученого астронома
И он выводил предо мною целые столбцы мудрых цифр
И показывал небесные карты, диаграммы для измерения звезд,
Я сидел в аудитории и слушал его, и все рукоплескали ему,
Но скоро - я и сам не пойму отчего - мне стало так нудно
и скучно,
И как я был счастлив, когда выскользнул прочь и в полном
молчании зашагал одинокий
Среди влажной таинственной ночи
И взглядывал порою на звезды.

Литература

О многих затронутых в книге вопросах можно прочитать в следующих научно-популярных книгах (список, конечно, не полон):

Архангельская И.В., Розенталь И.Л., Чернин А.Д. 2007. Космология и физический вакуум. М.: КомКнига.

Барышев Ю., Теерикорпи П. 2005. Фрактальная структура Вселенной. Очерк развития космологии. САО РАН.

Бронштэн В.А. 1974. Гипотезы о звездах и Вселенной. М.: Наука.

Вайнберг С. 1981. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: Энергоиздат.

Виленкин А. 2010. Мир многих миров: Физики в поисках параллельных вселенных. М.: Астрель, CORPUS.

Гриб А.А. 2008. Основные представления современной космологии. М.: Физматлит.

Грин Б. 2009. Ткань космоса: Пространство, время и текстура реальности. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»

Громов А., Малиновский А. 2009. Вселенная. Вопросов больше, чем ответов. М.: Эксмо.

Девис П. 1985. Случайная Вселенная. М.: Мир.

Ефремов Ю.Н. 2009. Вглубь Вселенной. Звезды, галактики и мироздание. 5-е изд. М.: УРСС.

Лейзер Д. 1988. Создавая картину Вселенной. М.: Мир.

Лидсей Дж.Э. 2005. Рождение Вселенной. М.: Весь Мир.

Нарликар Дж. 1985. Неистовая Вселенная. М.: Мир.

Новиков И.Д. 1988. Как взорвалась Вселенная. М.: Наука.

Новиков И.Д. 1990. Эволюция Вселенной. 3-е изд. М.: Наука.

- Роуэн-Робинсон М.* 2008. Космология. М.: РХД.
- Рубин С.Г.* 2008. Устройство нашей Вселенной. Фрязино: Век 2.
- Сажин М.В.* 2002. Современная космология в популярном изложении. М.: Едиториал УРСС.
- Силк Дж.* 1982. Большой взрыв. М.: Мир.
- Сурдин В.Г.* (ред.) 2007. Астрономия: век XXI. Фрязино: Век 2.
- Сюняев Р.А.* (ред.) 1986. Физика космоса. М.: Советская энциклопедия.
- Тропп Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д.* 1988. Александр Александрович Фридман. Жизнь и деятельность. М.: Наука.
- Хеллер М., Чернин А.Д.* 1991. У истоков космологии: Фридман и Леметр. М.: Наука.
- Хокинг С.* 2001. Краткая история времени: От большого взрыва до черных дыр. СПб: Амфора.
- Хокинг С.* 2007. Мир в ореховой скорлупке. СПб: Амфора.
- Черепашук А.М., Чернин А.Д.* 2003. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век 2.
- Чернин А.Д.* 2006. Космология: Большой Взрыв. Фрязино: Век 2.
- Шаров А.С., Новиков И.Д.* 1989. Человек, открывший взрыв Вселенной. М.: Наука.

Посвященные фотометрическому парадоксу книги на английском языке:

- Jaki S.L.* 1969. The Paradox of Olbers' Paradox: A Case History of Scientific Thought. New York: Herder and Herder.
- Harrison E.R.* 1987. Darkness at Night: A Riddle of the Universe. Cambridge: Harvard University Press.
- Harrison E.R.* 2000. Cosmology: the science of the universe. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Overduin J.M., Wesson P.S.* 2003. Dark Sky, Dark Matter. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

Содержание

Введение	7
Глава 1. История фотометрического парадокса.....	10
1.1. Ночное небо.....	10
1.2. Главная загадка ночного неба.....	15
1.3. Рождение загадки: Коперник и Диггес	20
1.4. От Галилея до Галлея	32
1.5. Шезо и Ольберс	42
1.6. Динамическая Вселенная Эдгара По.....	50
1.7. Медлер и лорд Кельвин	60
Глава 2. Как устроена наша Вселенная	67
2.1. Расширение Вселенной.....	71
2.2. Расширится ли Вселенная на самом деле?.....	91
2.3. Что означает расширение Вселенной?.....	102
2.4. Реликтовое излучение	110
2.5. Скрытая масса во Вселенной.....	123
2.6. Расширение с ускорением	139
2.7. Портрет Вселенной	156
2.8. За пределами нашей Вселенной	162
Глава 3. Фон ночного неба.....	175
3.1. Наблюдаемый фон.....	175
3.2. Решение фотометрического парадокса.....	182
Литература.....	187

А. М. Черепашук, А. Д. Чернин

Вселенная, жизнь, черные дыры

Е. Л. Фейнберг

Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке

В. Г. Ротштейн

Психиатрия. Наука или искусство?

Б. М. Владимирский и др.

Космическая погода и наша жизнь

Л. Б. Вишняцкий

История одной случайности или происхождение человека

А. И. Козлов

Пища людей

Ю. Н. Ефремов

Звездные острова. Галактики звезд и Вселенная галактик

А. А. Ивин

Современная логика

С. Г. Рубин

Устройство нашей Вселенной, 2-е изд.

Мишель Жуве

Замок снов

П. Р. Амнуэль

Далекие маяки Вселенной

Отдельные издания

АСТРОНОМИЯ: Век XXI, 2-е изд.

Редактор-составитель Сурдин В. Г.

А. В. Засов, К. А. Постнов

Общая астрофизика, 2-е изд.

В. А. Цимбал

Растения. Параллельный мир

М. Б. Менский

Сознание и квантовая механика

Артур Чернин

Космология: Большой Взрыв

Анатолий Черепашук

Черные дыры во Вселенной

Марина Бутовская

Власть, пол и репродуктивный успех

Марина Бутовская

Гомосексуализм и эволюция

Владимир Сурдин

Неуловимая планета

Леонид Корочкин

Клонирование

Юрий Ефремов

Млечный Путь

Светлана Боринская, Николай Янковский

Люди и их гены: нити судьбы

Сергей Попов, Михаил Прохоров

Звезды: жизнь после смерти

Валентин Руденко

Поиск гравитационных волн

Владимир Сурдин

НЛО: записки астронома

Владимир Сурдин

Астрология и наука

Б. В. Заходер

Заходерзости

ООО «Век 2», www.vek2.ru тел. (496) 567-82-35.

Высылаем книги наложенным платежом.

mail@vek2.ru

Научно-популярное издание
Решетников Владимир Петрович
Почему небо темное.
Как устроена Вселенная

Подп. в печ. 29.02.2012. Формат 84x108/32.
Усл. п.л. 10,08. Тираж 3000 экз. Заказ №

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл., а/я 107.
Тел. (496) 567-82-35
E-mail: mail@vek2.ru; www.vek2.ru
Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в соответствии
с предоставленными материалами
в ЗАО «ИПК Парето-Принт», г. Тверь,
www.pareto-print.ru