

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Эта книга посвящена астрономии в ее разнообразных воплощениях: от изучения Луны и планет до поисков гравитационных волн, темного вещества и темной энергии. Мои коллеги и я расскажем вам о том, какие важнейшие события произошли в астрономии на рубеже нового тысячелетия. По странному стечению событий именно этот условный исторический рубеж был отмечен несколькими важнейшими открытиями в изучении Вселенной, как на ее ближних рубежах, так и на самых дальних. Последние годы без преувеличения можно назвать великим десятилетием астрономии. И вполне возможно, что это только начало ее нового «золотого века». В самом деле, просто дух захватывает от одного перечисления фундаментальных открытий, сделанных за короткое время.

**1992 г.** Открыты пространственные флуктуации реликтового излучения (Нобелевская премия по физике за 2006 г.), чем окончательно доказана теория Большого взрыва и поставлена на твердую основу теория происхождения галактик и звезд.

**1992–1995 гг.** Открыты многочисленные малые планеты на периферии Солнечной системы, в области, получившей название «пояс Койпера» (точнее, Эджворта–Койпера). С 1930 г. за орбитой Нептуна был известен лишь один объект – маленькая планета Плутон; в 1978 г. был открыт его спутник Харон. Казалось, что это граница нашей планетной системы. Но с 1992 г. в окрестности орбиты Плутона и за ней начали обнаруживаться новые объекты. К 1995 г. стало ясно, что эта область – пояс Эджворта–Койпера – населена множеством тел с характерным размером в сотни и тысячи километров, причем некоторые из них больше Плутона и имеют собственные спутники. Границы Солнечной системы «раздвинулись» в несколько раз.

**1993–1995 гг.** Радиоастрономическими методами обнаружена планетная система у нейтронной звезды-радиопульсара (1993 г.). Методами оптической спектроскопии обнаружено присутствие планет-гигантов рядом с нормальными звездами (1995 г.). К началу 2015 г. в околосолнечной окрестности Галактики уже найдено около 1200 планетных систем, содержащих в сумме около 1900 планет.

**1996–1997 гг.** Открыт новый класс небесных объектов – коричневые карлики, занимающие промежуточное положение между звездами и планетами. Их массы (от 0,0013 до 0,08 массы Солнца) слишком малы, и поэтому температура в недрах слишком низка для термоядерных реакций с участием основного, легкого, изотопа водорода, хотя и достаточна для сгорания редкого изотопа – дейтерия, не дающего, однако, существенного вклада в энергию. Единствен-

ным долговременным источником энергии коричневых карликов служит их гравитационное сжатие.

**1997–1999 гг.** Приоткрыта тайна космических гамма-всплесков, часть из которых отождествлена с фантастически мощными взрывами массивных звезд, вероятно, сопровождающими рождение черных дыр.

**1998 г.** Обнаружено, что расширение Вселенной в последние миллиарды лет происходит с ускорением, что свидетельствует о существовании некой «темной энергии» со свойством антигравитации.

**1998–2002 гг.** На подземных нейтринных детекторах открыты осцилляции нейтрино, в частности превращение солнечного электронного нейтрино в мюонное и тау, т. е. доказано, что у нейтрино есть масса покоя, теория внутреннего строения звезд верна и нужно корректировать теорию элементарных частиц.

**2004–2006 гг.** Начали работать первые полномасштабные детекторы гравитационных волн. Их первая регистрация произошла в 2015 г. С этого момента распахнулось новое «окно» во Вселенную.

**2008–2013 гг.** Открыто явление нового типа – килоновая (kilonova), взрыв при слиянии двух нейтронных звезд или нейтронной звезды с черной дырой. Излучаемая при этом энергия в тысячу раз превосходит энергию обычных новых, но в десятки раз уступает энергии сверхновых. Килоновые служат источником сильных гравитационных волн. При слиянии двух компактных звезд происходит синтез тяжелых ионов в результате быстрого захвата нейтронов ядрами атомов. Поэтому килоновые – один из главных источников элементов тяжелее железа.

**2011–2014 гг.** На установке «Борексико» в Гран-Сассо (Италия) надежно зарегистрированы низкоэнергетические солнечные нейтрино, рождающиеся в термоядерной протон-протонной реакции – основном источнике энергии Солнца.

**2022 г.** Открыто явление нового типа – микроновая (micronova), термоядерный взрыв с энергией  $\sim 10^{32}$  Дж, происходящий на поверхности белого карлика в окрестности его магнитного полюса при аккреции туда газа с соседней звезды.

Удивительно насыщенными оказались прошедшие годы в астрономии. И ведь я перечислил только самые «сливки», а сколько за это время было сделано «рядовых» открытий! Прошедшие два десятилетия оставят в истории науки заметный след, причем не только в астрономии – вспомним хотя бы о впервые созданном антивеществе: в 1995 г. в CERN и в 1998 г. в Лаборатории Ферми были получены не просто античастицы типа позитронов, а настоящие атомы антиводорода – идеальное топливо для будущих звездолетов. В 2012–2013 гг. на Большом адронном коллайдере открыт долгожданный бозон Хиггса, ответственный за массы элементарных частиц. Множество достижений и в биологии: не так давно (2000 г.) был впервые прочитан геном человека, а сегодня эта операция стала рутинной. Базы геномных данных уже позволяют реконструировать ход биологической эволюции. И эти открытия имеют отношение к нашей профессии, поскольку рабочее поле астронома – Вселенная со всеми происходящими в ней процессами. Именно поэтому астрономы следят за всеми новостями, поступающими из лабораторий естествоиспытателей.



Маленький цветок и гигантская спиральная галактика, по существу, состоят из одного и того же вещества – из обычных химических элементов, т. е. из протонов и нейтронов, или барионов. Однако барионное вещество, демонстрирующее нам всю красоту Вселенной, как выяснилось, представляет собой наименьшую составляющую нашего мира, в основном состоящего из темного вещества и темной энергии.

Пока нам неизвестно, какие структуры сложены этими невидимыми формами материи

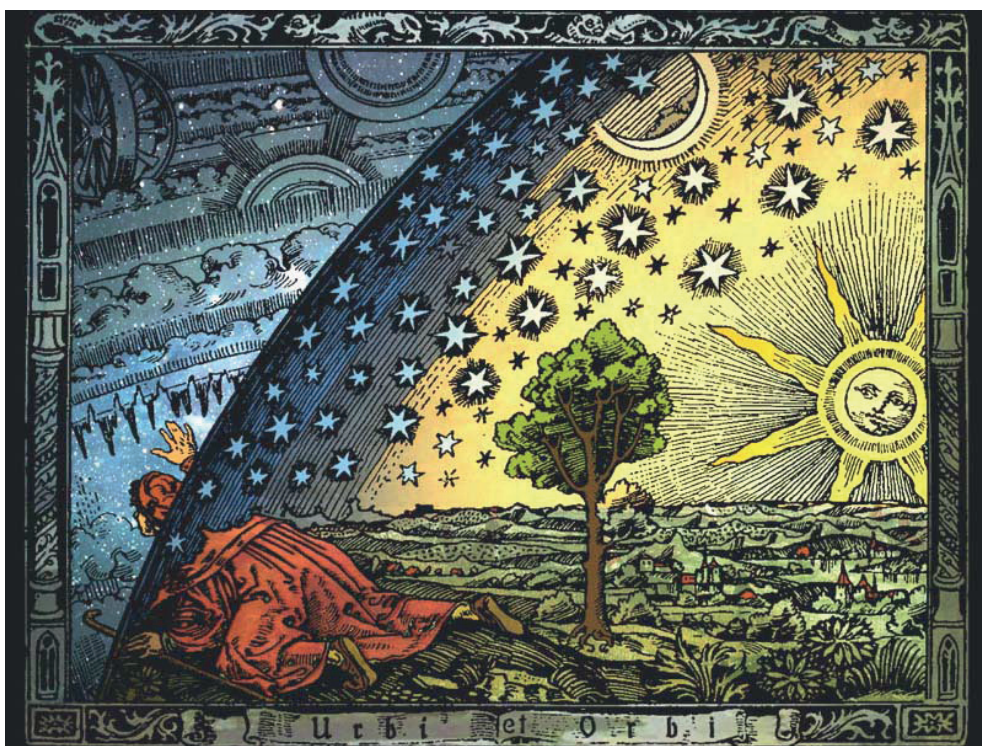


Процентный состав материи Вселенной. Если вам становится не по себе от безбрежного моря темной энергии и темного вещества, заполняющего наш мир, то пусть вас согреет мысль о том, что безмерно малая доля серого вещества Вселенной оказалась способной понять устройство этого мира

А с другой стороны, ученые разных профессий стараются быть в курсе астрономических открытий. Ведь в науке о Вселенной каждый день происходит что-то новое. И кто знает, не окажутся ли находки астрономов жизненно важными для биологов или физиков. Например, для физиков космологические исследования сейчас приобрели особую привлекательность в связи с тем, что ускорительная техника ныне почти достигла практического предела своих возможностей, и дальнейшее продвижение в область высоких энергий, а значит – вглубь микромира, сильно замедлилось. Создание новых ускорителей обходится чрезвычайно дорого и позволяет лишь немного продвинуться вверх по шкале энергий. В то же время космос бесплатно поставляет нам частицы сверхвысоких энергий (в космических лучах встречаются частицы с энергией до  $10^{21}$  эВ), а космологические исследования позволяют анализировать процессы, происходившие в ранней Вселенной при фантастических энергиях. (В этом смысле оправдываются слова акад. Я. Б. Зельдовича: «Вселенная – это ускоритель для бедных».) Не менее ценны астрономические находки и для биологов. В межзвездном пространстве и в ядрах комет обнаружены органические молекулы. В нескольких неожиданных областях Солнечной системы обнаружены благоприятные для жизни условия. Наконец, найдены планетные системы и уже начинается поиск в них обитаемых планет! Собственно, эта книга и была

задумана, чтобы рассказать о достижениях и перспективах астрономии нашим коллегам-ученым и всем, кто интересуется изучением природы.

Авторов книги объединяет то, что все они трудятся в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ) при МГУ. Начало истории ГАИШ, ныне крупнейшего астрономического центра России, восходит к первой трети XIX в., к основанию Астрономической обсерватории Московского университета, на базе которой и был в 1931 г. создан наш институт. В конце 2021 г. ГАИШ исполнилось 190 лет – цветущий возраст для храма астрономии, науки, которая непрерывно развивается уже несколько тысячелетий. Этот юбилей и побудил нас сделать скромный подарок себе, а также нашим коллегам и всем любителям астрономии – коллективно написать данную книгу и рассказать в ней о своей работе по изучению космоса. Мы влюблены в эту работу и хотим, чтобы частица нашего восхищения окружающей природой вплоть до самых далеких ее рубежей передалась и вам, наш уважаемый читатель.



Понятие «антропный принцип» стало модным, но ему часто дают неверное толкование: якобы согласно ему Вселенная создана для человека. В действительности антропный принцип заключается не в этом. Он всего лишь постулирует связь между глобальными свойствами нашего мира и фактом существования в нем конкретного существа, изучающего эти свойства. В частности, антропный принцип утверждает, что даже те характеристики Вселенной, которые нам пока неизвестны, должны быть таковы, чтобы «здесь и сейчас» мог существовать человек

Понятно, что охватить все направления исследований Вселенной в одной книге невозможно. Мы выбрали некоторые, на наш взгляд – важнейшие. В книге рассказано и об исследованиях Солнечной системы, и о загадках эволюции звезд (включая нейронные звезды и черные дыры), и об изучении галактик, и об открытии антигравитации («темной энергии»), и о поиске гравитационных волн... Своими читателями мы представляли старших школьников, студентов, учителей и наших коллег-естествоиспытателей. Хотя большинство специальных понятий объясняется по ходу изложения, в конце книги помещен словарь терминов, который будет полезен при чтении не только этой, но и других астрономических книг.

Кроме того, в Приложениях собраны обширные справочные таблицы с данными о важнейших астрономических объектах – Солнце, планетах и их спутниках, ярчайших и ближайших звездах, созвездиях, ярких галактиках, приведены современные значения физических и астрономических постоянных, а также часто используемые в астрономии обозначения. В полном виде даны каталоги Мессье и Колдуэлла, представляющие особый интерес для наблюдающих любителей астрономии.

Замечу, что в качестве единиц расстояния мы используем как парсек (килопарсек, мегапарсек), так и световой год, хотя традиция предполагает использование парсеков в профессиональных, а световых лет – в научно-популярных текстах. Но в такой книге, как эта, охватывающей огромный диапазон астрономических масштабов, использовать какую-то одну единицу длины неудобно. Мы пользуемся разными, чтобы сделать рассказ нагляднее. Напомню, что 1 пк  $\approx$  3,26 св. года.

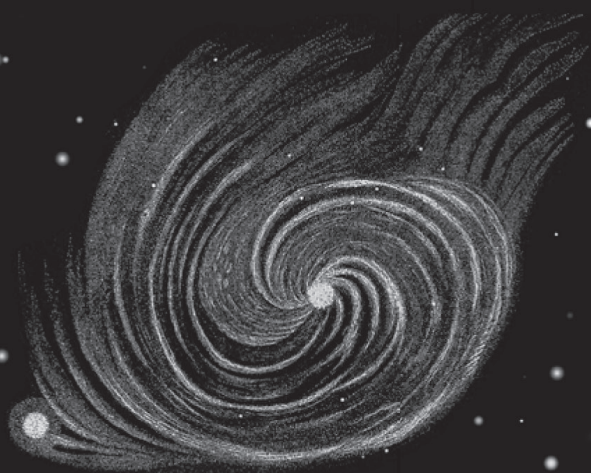
В книге много иллюстраций – фотографий планет, звезд, галактик. Авторы большинства из них – наши коллеги из разных стран, которым мы чрезвычайно признательны. А еще мы и наши коллеги всегда с глубокой благодарностью думаем о тех инженерах, программистах, рабочих, которые создали изумительную технику, позволяющую нам изучать Вселенную: это и прекрасные телескопы, включая великий космический телескоп «Хаббл», новый гигант «Джеймс Уэбб» и замечательные космические зонды, десятилетиями работающие в сотнях миллионов километров от Земли, и суперкомпьютеры, позволяющие «взрывать звезды» и «сталкивать галактики» на письменном столе. Наконец, наша благодарность создателям сети Интернет, объединившей всех любознательных людей планеты Земля и позволившей им (уже сейчас!) самостоятельно искать контакты с другими любознательными существами Вселенной.

А еще мы благодарны читателю, взявшему с полки эту книгу. Надеемся, что она послужит вам долго и поможет в увлекательном мысленном путешествии к тем рубежам, где наше знание соприкасается с фантазией.

*В. Г. Сурдин*

*Введение*

АСТРОНОМИЯ –  
ОТ ВЕКА К ВЕКУ



**А**строномия последнего десятилетия переживает очередной этап быстрого развития, возвращающий ее в лидеры естествознания. В течение долгих лет развитие науки идет путем медленного количественного уточнения знаний о мире, но время от времени происходит быстрое расширение сферы познания, открытия следуют одно за другим, и старое знание предстает лишь как островок в океане нового, о самом существовании которого и не подозревали.

## Предвидение Лапласа

Главный вопрос, волнующий нас при обращении к прошлому: может ли оно подсказать нам судьбу наших нынешних представлений о Вселенной? Говорят: кто владеет прошлым, владеет будущим... С конца XVIII в. ученым людям каждого поколения было свойственно думать, что основы мироздания уже постигнуты и осталось лишь уточнить детали. Ньютоновская механика превосходно описывала движение планет и двойных звезд; казалось, что ее достаточно для описания космоса. Пьер Симон Лаплас говорил в конце XVIII в. о перспективе объять «в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движением легчайших атомов», что в известном смысле остается серьезной задачей и для современного естествознания. Последние слова Лапласа были: «То, что мы знаем, так ничтожно по сравнению с тем, чего мы не знаем». Открытия в астрономии на рубеже XX и XXI вв. подтвердили буквальную правоту этих слов. Будут ли они справедливы и в будущем? Величайшая проблема естествознания – возможно ли построение Окончательной Теории Всего? К этому вопросу мы еще вернемся.

Успехи астрономии будущего, как считал Лаплас, будут зависеть от трех условий: точности измерения времени и углов и совершенства оптических инструментов, причем «первые два в настоящее время не оставляют желать почти ничего лучшего». Ныне, два века спустя, окончательно решена лишь первая задача: измерение времени перешло в ведение атомной и молекулярной физики и достигло абсолютного предела точности, определяемого законами квантовой механики. В измерении угловых расстояний на небесной сфере – после почти двухвекового застоя – применение интерференционных методов и выход в космос привели к радикальному прогрессу, пределов которому не видно. Совершенствование оптических инструментов, на которое Лаплас возлагал особые надежды (поскольку измерения времени и углов, как он считал, уже достигло совершенства!), также ничем не ограничено. В 2015 г. количество гигантских наземных телескопов с зеркалами, превышающими 5 метров в диаметре, уже перевалило за два десятка. Сегодня лучшие оптические инструменты имеют зеркала диаметром 8–10 м, уже спроектированы телескопы с зеркалами от 30 до 100 м.

Никто не может предвидеть развития в тех областях науки, которые еще не родились. Например, Лаплас не мог знать о появлении спектрального анализа – основы наших нынешних знаний о физике и химии объектов Вселенной. Хорошо известны слова французского философа, основоположника позитивизма Огюста Конта (1798–1857) о том, что есть вещи, которые мы никогда не узнаем, например химический состав звезд. Но в 1859 г. Киргхоф и Бунзен



доказали, что яркие и темные линии в спектрах указывают на присутствие в источнике света (или на пути луча) того или иного химического элемента; осталось только приставить спектрограф к телескопу. Это сделал Уильям Хёггинс, и он же в 1866 г. по сдвигу линий в спектре первым измерил лучевые скорости звезд. Как видим, напрасно Конт не следовал правилу «никогда не говори “никогда”»... Впрочем, Лаплас тоже ему не следовал – он писал, что мы никогда не увидим обратной стороны Луны.

## Сто лет назад

Какими наблюдательными средствами обладала астрономия сто лет назад? Крупнейшими инструментами были 40-дюймовый рефрактор Йеркской обсерватории, 36-дюймовый рефрактор Ликской обсерватории и 36-дюймовый рефлектор Кросслея, также работавший на Ликской обсерватории, а в 1908 г. вступил в строй 60-дюймовый рефлектор на Маунт-Вилсон. Именно эти два рефлектора, установленные довольно высоко в горах Калифорнии, и открыли мир галактик, исследование которых стало главной задачей астрономии XX в.

Конечно, видели их давно: Магеллановы Облака на южном небе и галактика Андромеды на северном заметны даже невооруженным глазом. Первый список «помех в небесной охоте за кометами» составил известный ловец комет Шарль Мессье в 1781 г.; в этом списке ныне 109 объектов, многие из которых – галактики. Номера по каталогу Мессье до сих пор используются для обозначения самых ярких звездных скоплений, туманностей и галактик. Уильям Гершель в конце XVIII в. составил каталог звездных скоплений и туманностей (большинство из них также оказалось далекими галактиками), в котором было около 2500 объектов. В начале XX в. кросслеевский рефлектор зарегистрировал на фотографических пластинках около 120 000 «слабых туманностей», но об их природе еще долго продолжались споры. Сам Уильям Гершель считал, что наблюдаемые им слабые пятнышки света могут быть далекими системами звезд. В самом деле, некоторые из таких туманностей Гершель смог разрешить на звезды, и вполне естественно было предположить, что с более мощными телескопами это будет сделано и для многих других. Сам он вполне справедливо считал, что некоторые туманности могут быть истинными и состоять из диффузного светящегося вещества, а другие являются далекими звездными системами.

Однако итоговое суждение XIX в. оказалось другим. В книге о развитии астрономии в XIX в. Агнеса Кларк (Agnes Clerke) писала: «Вопрос о том, являются ли туманности внешними галактиками, вряд ли заслуживает теперь обсуждения. Прогресс исследований ответил на него. Можно с уверенностью сказать, что ни один компетентный мыслитель перед лицом существующих фактов не будет утверждать, что хотя бы одна туманность может быть звездной системой, сравнимой по размерам с Млечным Путем». Первое издание этой книги вышло в 1882 г. В четвертом ее издании, вышедшем в русском переводе в 1913 г., именно этих слов я не нашел, но другие галактики, равно как и наша, не упоминаются и в нем. Здесь говорится, что мнение, будто «все без исключения туманности являются отдельными вселенными, отдельными далекими собраниями солнц», в последний раз и ненадолго восторжествовало после открытия лордом Россом спиральных туманностей.

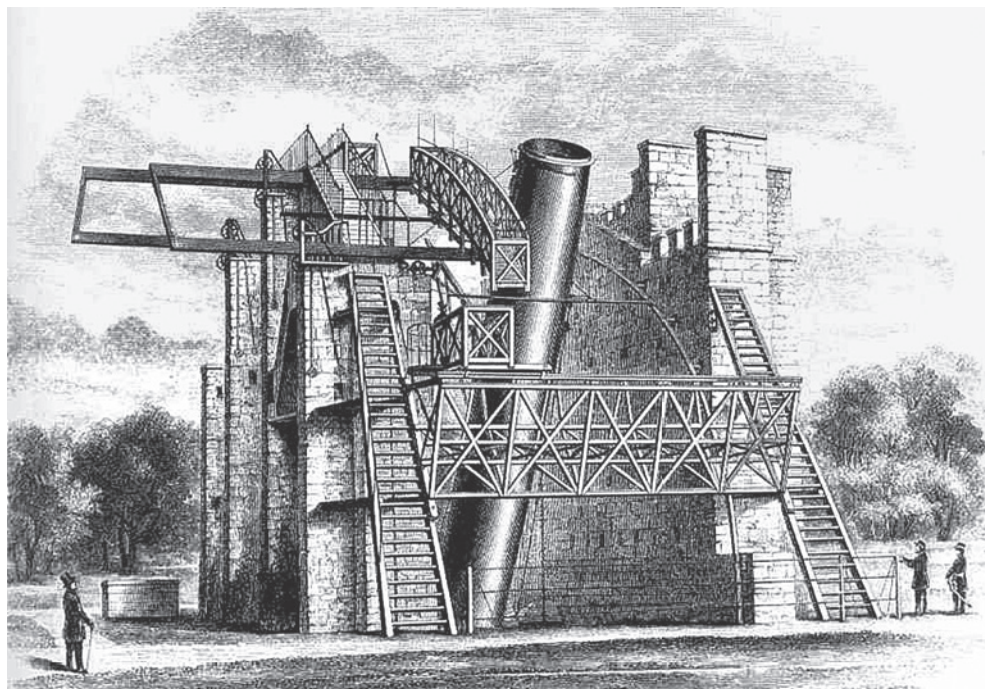
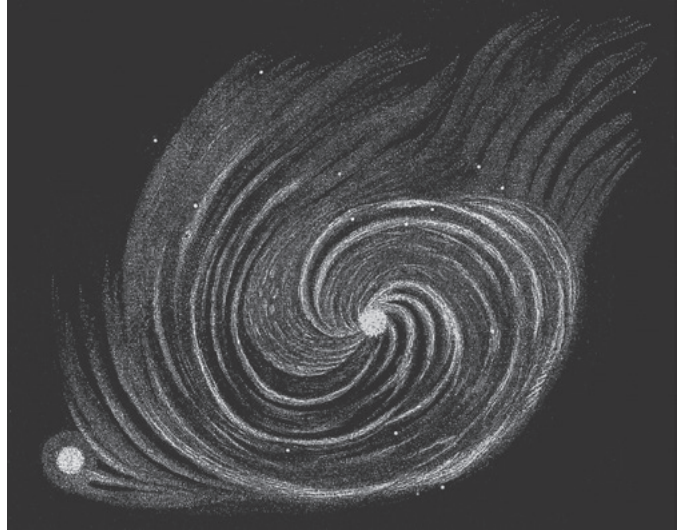


Рис. 1. Гигантский телескоп лорда Росса. В 1845 г. ирландский астроном Уильям Парсонс, третий лорд Росс, спроектировал и построил в своем родовом поместье Бёр-Касл колоссальный 182-сантиметровый рефлектор с фокусным расстоянием 17 м. Телескоп получил прозвище «Левиафан». С его помощью У. Парсонс открыл множество новых деталей в туманностях, в частности спиральную структуру некоторых из них, оказавшихся галактиками

Это случилось в апреле 1845 г., когда гигантский телескоп Росса с металлическим зеркалом диаметром почти 2 метра был наведен на туманность М51 в Гончих Псах. К 1850 г. стало известно уже 14 спиральных туманностей. Но их природа оставалась неясной. Даже в первые десятилетия XX в. по-прежнему господствовало убеждение, что все видимые на небе звезды и туманности принадлежат гигантской всеобъемлющей системе Млечного Пути, близ центра которой находится Солнце. Это была так называемая «Вселенная Каптейна», схема, развитая голландским астрономом Яном Каптейном. Одним из доводов в пользу принадлежности слабых туманностей к системе Млечного Пути было их отсутствие в самой светящейся полосе Млечного Пути. Это был сильный аргумент: если туманности в своем пространственном распределении «чувствовали географию» Млечного Пути, значит, они были с ним как-то связаны. Предположить, что сияющий звездами Млечный Путь непрозрачен для света далеких туманностей, оказалось нелегко. О наличии поглощения света в межзвездном пространстве вообще были только догадки, а мысль о том, что поглощающая свет среда сконцентрирована именно к плоскости Млечного Пути, никому не приходила в голову до 1914 г., когда это предположение высказал Артур Эддингтон. В наше время галактики в «полосе избегания» вдоль Млечного Пути обнаруживаются в инфракрасных лучах, пробивающих слой межзвездной пыли.

Рис. 2. Рисунок спиральной галактики М51, сделанный лордом Россом при наблюдении в его гигантский телескоп



Чтобы понять природу «слабых туманностей», надо было знать расстояние до них. Здесь могли помочь только фотометрические методы, но для их применения требовалось знать истинную светимость каких-либо объектов, находящихся внутри этих туманностей, и сравнить ее с видимым блеском этих объектов, т. е. с их звездной величиной. Эту задачу впервые решил американский физик и астроном Фрэнк Верн в 1911 г. Сначала он оценил расстояние до новой Персея 1901 г., сравнив со скоростью света угловую скорость расширения туманности, возникшей вокруг звезды после ее вспышки. Он совершенно спра-



Рис. 3. Современный снимок галактики М51 (фото космического телескопа «Хаббл»)

ведливо предполагал, что расширение туманности – это не что иное, как вызванное вспышкой распространение волны освещения в межзвездной среде, окружающей новую звезду. Затем Вери сравнил определенную им из расстояния и видимой величины светимость новой Персея с видимой величиной новой 1885 г., вспыхнувшей близ центра туманности Андромеды, и оценил расстояние до туманности в 500 парсек. Более слабые туманности, заключил Вери, лежат на расстояниях в миллионы парсек. В этом рассуждении все правильно, кроме того, что новая 1885 г. была на самом деле сверхновой, которые ярче обычных новых в сотни тысяч раз, – и, значит, расстояние до М31 – не 500 пк, а в тысячу раз больше. В результате этого заблуждения Туманность Андромеды «оказалась» внутри Млечного Пути.



Рис. 4. Спиральная система NGC4414 в созвездии Волосы Вероники

Однако в эти годы стали меняться взгляды на строение самого Млечного Пути. Харлоу Шепли, опираясь на зависимость «период–светимость» для цефеид, оценил размер звездной системы Млечного Пути в 100 кпк. Он также предположил, что концентрация шаровых звездных скоплений в созвездии Стрелец объясняется тем, что они сгущаются к центру системы Млечного Пути, и определил расстояние до него в 15 кпк.



Рис. 5. Спиральная галактика в Треугольнике (M33, NGC598). Фото VLT Survey Telescope (ESO)

## Открытие Вселенной

Таким образом, еще в начале 1920-х гг. конкурировали две системы мироздания. По Шепли, в нашей гигантской Галактике, системе Млечного Пути, Солнце помещалось на далекой окраине, как и «слабые туманности». Вселен-



Рис. 6. Спиральная галактика туманность Андромеды (M31, NGC224)

ная Каптейна содержала Солнце близ центра и была намного меньше. О том, что же находится за пределами Млечного Пути, обе схемы мироздания поразительным образом умалчивали, хотя некоторые астрономы были убеждены

(как и Гершель в XVIII в.!), что многочисленные слабые туманности являются огромными звездными системами, сравнимыми с нашей, и что спиральные туманности Андромеды (М31) и Треугольника (М33) – лишь ближайшие из них.

Но окончательно доказать это удалось лишь в 1924 г. Эдвину Хаббл. Используя 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, он нашел цефеиды в М33 и в М31 и по ним с помощью зависимости «период–светимость» определил расстояния: обе звездные системы оказались далеко за пределами Млечного Пути. Опираясь на «цефеидные» расстояния ближайших галактик, Хаббл смог оценить расстояния и до более далеких систем. К 1929 г., пользуясь своими данными о расстояниях и лучевыми скоростями, определенными Хьюмасоном,



Рис. 7. Эдвин Хаббл (1889–1953)

он представил доказательства того, что лучевые скорости галактик возрастают с увеличением расстояний до них. Вообще говоря, тот факт, что далекие туманности имеют большие положительные лучевые скорости, был известен давно, но Хаббл впервые, располагая надежными данными, смог уверенно определить коэффициент пропорциональности между расстояниями и скоростями галактик, известный ныне как постоянная Хаббла. Из этой зависимости следовало, что Вселенная расширяется: все расстояния между скоплениями галактик увеличиваются со временем. До конца XX в. это оставалось величайшим достижением астрономии: Вселенная населена галактиками, и она расширяется. Переворот, произошедший в те годы в сознании астрономов за какой-то десяток лет, сравним по своей значимости с революцией, которую произвело учение Коперника.

## Эволюция звезд

Важнейшими проблемами астрофизики первых десятилетий XX в. были внутреннее строение звезд, перенос излучения в звездных атмосферах и количественный анализ звездных атмосфер. Э. Герцшпрунг в 1908 г. и Г. Рассел в 1910 г. построили диаграмму, связывающую температуру поверхности звезды с ее светимостью (подробнее об этом рассказано в главе «Звезды: рождение, жизнь, смерть»). Оказалось, что большинство звезд расположено вдоль полосы, названной главной последовательностью: она тянется от горячих ярких звезд до слабых и холодных. Есть еще и группа холодных звезд высокой светимости – красных гигантов и сверхгигантов. Объяснение этой диаграммы стало важнейшей задачей теории внутреннего строения звезд, в создании которой особая заслуга принадлежит А. Эддингтону. Он разработал к 1924 г. модель звезды, механическая устойчивость которой определяется балансом



Рис. 8. Артур Эддингтон (1882–1944),  
один из создателей физической теории звезд

сил тяжести и лучевого плюс газового давления. Но звезда постоянно теряет энергию за счет излучения; что же является источником ее энергии? Джеймс Джинс считал, что это аннигиляция, превращение вещества в энергию, а Эддингтон – что это ядерные реакции, то есть превращения элементов. Он говорил в 1926 г., что возможное в лаборатории Резерфорда не может оказаться слишком трудным для природы и что «разумно надеяться, что в не слишком отдаленном будущем мы будем способны понять такую простую вещь, как звезда».

В те же годы была разгадана причина различной интенсивности линий в спектрах звезд и тем самым были определены температуры и точный химический состав их поверхностных слоев. Это сделала

в 1925 г. Сесилия Пейн, опираясь на теорию возбуждения и ионизации атомов. Выяснилось, что относительное содержание химических элементов у всех звезд примерно одинаково и близко к солнечному: на 96–99,9 % внешние слои звезд состоят из водорода и гелия, а остальное составляют железо, кальций и другие элементы в пропорции, примерно соответствующей среднему составу Земли и метеоритов. Резкое различие спектров звезд было объяснено в основном различием температур их поверхности.

С 1920-х гг. развитие астрономии стало зависеть от успехов физики, которая начала возвращать свой старый долг астрономии, ибо механика была создана Ньютоном, Лагранжем и Лапласом на основе данных о движении планет. Успехи ядерной физики позволили Хансу Бете заложить в 1938 г. основы теории источников энергии звезд. Концентрация большинства звезд на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рассела была объяснена тем, что это самая длительная стадия эволюции, на которой источником энергии звезды служит превращение водорода в гелий. Ядро гелия чуть легче исходных четырех протонов, и в соответствии с формулой Эйнштейна ( $E = mc^2$ ) избыток их массы переходит в энергию излучения. Термоядерные реакции идут при температурах во много миллионов градусов, которые достигаются в ядре звезды после ее формирования из облака межзвездного газа и последующего гравитационного сжатия.

После выгорания водорода ядро звезды сжимается и нагревается еще сильнее, так что становятся возможны реакции превращения гелия в более тяжелые элементы, но теплотворная способность этих реакций невелика. Уже в 1940-е гг. стало ясно, что запасов ядерного горючего у наиболее расточительных звезд высокой светимости хватает лишь на миллионы лет, следо-



вательно, они должны образовываться в нашу космическую эпоху. Соседство этих звезд с газовой-пылевыми туманностями указывало на их генетическую связь, и в 1942 г. Ф. Уиппл заключил, что межзвездное вещество – единственный очевидный источник вещества для формирования звезд. Молодость звезд высокой светимости вскоре получила подтверждение из совсем других сообщений. В 1947 г. В. А. Амбарцумян доказал, что в разреженных группировках – звездных ассоциациях – звезды не могут долго удерживаться вместе силой тяготения, следовательно, эти группировки образовались недавно. Вывод о групповом образовании звезд, продолжающемся и в наше время, стал общепризнанным. Но плотные облака, в недрах которых формируются звезды, долго оставались невидимыми из-за их низкой температуры и были обнаружены по излучению молекул межзвездного газа только после рождения радиоастрономии миллиметрового диапазона, в середине 1970-х гг.

Создание теории звезд – объяснение их строения, источников энергии, происхождения и эволюции – величайший триумф науки XX в.

## Галактика Млечный Путь

Открытие населенной галактиками Вселенной было и открытием нашей галактики как одной из многих ей подобных. Мы теперь сравниваем нашу звездную систему с другими и, наоборот, опираемся при их изучении на знания о Галактике. Две трудности препятствуют исследованиям Галактики. Одна из них – поглощение света частицами пыли, рассеянными в межзвездном пространстве, из-за чего уменьшается видимый блеск звезд и искажаются их фотометрические расстояния. Преодолеть эту трудность удалось лишь недавно, благодаря наблюдениям в далеком инфракрасном диапазоне, в котором поглощение мало (рис. 9). Впрочем, развитие интерференционных наблюдений из космоса в ближайшие десятилетия позволит определять расстояния объектов в нашей Галактике исходя из геометрических расчетов, без необходимости знать светимость и видимый блеск источников, искаженные поглощением.

**Фотометрические расстояния** до объектов вычисляются по их светимости на основании правила, согласно которому поток энергии от источника обратно пропорционален квадрату расстояния до него.

Вторая трудность носит принципиальный характер. Мы живем близ экватора нашей дискообразной звездной системы и поэтому не можем окинуть ее взглядом сверху. С этим уже ничего не поделаешь – разве что когда-нибудь мы

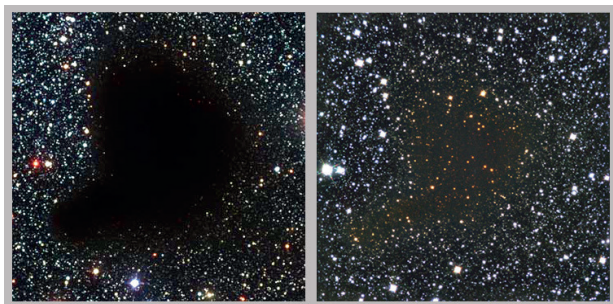


Рис. 9. Плотное газово-пылевое облако – глобула Барнард 68 – на богатом звездами фоне Млечного Пути. В видимом диапазоне спектра (слева) это облако совершенно непрозрачно, но в ближнем ИК-диапазоне (справа) уже полупрозрачно. Фото Европейской южной обсерватории (Чили)

установим связь с разумными существами, живущими хотя бы в килопарсеке над (или под) плоскостью Галактики, и они поделятся своими фотографиями галактического диска, но надежды на это мало. Остается уповать на повышение точности определения расстояний для все возрастающего числа объектов разного рода.

В 1940-е гг. было установлено, что в Галактике имеются два типа населения. Население типа I, к которому относятся Солнце, рассеянные скопления, звезды-сверхгиганты, облака газа и пыли, сконцентрировано к плоскости Галактики, а население типа II – шаровые скопления, планетарные туманности, некоторые звезды-гиганты и др. – к ее центру, образуя сфероидальное гало. Объекты населения I обращаются вокруг центра Галактики «стройными рядами», в одном направлении, по почти круговым орбитам (как планеты Солнечной системы). Объекты населения II движутся по вытянутым орбитам, хаотически ориентированным к экватору Галактики. Выяснилось также, что два типа звездного населения различаются не только кинематикой и распределением в пространстве. Содержание тяжелых элементов у объектов населения II оказалось в сотни раз меньше, чем у населения I.

Создание к концу 1950-х гг. теории звездной эволюции позволило оценить возраст звезд. У населения II он составляет около 10–15 млрд лет, тогда как у подавляющего большинства объектов диска не превышает 8 млрд лет и может быть сколь угодно мал. Иными словами, только в диске наблюдаются признаки звездообразования, идущего на наших глазах в газовой-пылевой облаках. Содержание элементов тяжелее гелия у всех звезд населения I «нормальное» (близкое к солнечному) именно потому, что они образовались из газа, уже обогащенного этими элементами при вспышках сверхновых первого поколения. Большинство спиральных галактик, видимых с ребра, четко показывает плоскую дискообразную систему голубых (молодых) звезд и газовой-пылевой облаков, а также сфероидальную систему звезд и шаровых скоплений, сконцентрированных к центру галактики. Эллиптические галактики состоят почти исключительно из объектов населения II, а в неправильных галактиках преобладает население I. Причину этого нам еще предстоит понять.

## **Все шло хорошо...**

Таким образом, к середине XX в. был заложен фундамент наших представлений о природе звезд, о строении галактик и Вселенной в целом. В 1952 г. нашла разрешение, казалось бы, последняя серьезная проблема астрономии. Ее суть заключалась в том, что согласно найденной Хабблом в 1929 г. скорости расширения Вселенной все вещество около 2 млрд лет назад было сосредоточено в точке бесконечно большой плотности; возраст Вселенной при этом получался неприемлемо малым – меньше возраста Земли, известного из геологии. Значение же постоянной Хаббла, дающей «возраст Вселенной», определялось на основе расстояний галактик, вычисленных по светимостям цефеид<sup>1</sup> и их видимых звездных величин. Цефеиды исследовались в близких галактиках, где они доступны крупнейшим телескопам.

---

<sup>1</sup> Подробнее о них см. в разделе «Переменные звезды».

В 1952 г. В. Бааде в результате исследований галактики Андромеды на 5-метровом Паломарском рефлекторе пришел к выводу, что светимость цефеид примерно на 1,5 звездные величины выше, чем считал Хаббл. Выявилась и еще одна ошибка классика: расстояния до далеких галактик он определял, измеряя яркость их ярчайших звезд, но многие из них оказались компактными звездными скоплениями, светимость которых намного больше, чем индивидуальных звезд. В результате вместо 500 км/(с·Мпк), как было у Хаббла, постоянная его имени составила примерно 50–100 км/(с·Мпк), а возраст Вселенной увеличился до 15–20 млрд лет. К этому времени было уже ясно, что возраст самых старых объектов населения II – шаровых звездных скоплений – составляет около 10–15 млрд лет. В картине эволюции звезд, галактик и Вселенной больше не было противоречий.

Завершение эта картина получила в 1965 г., когда было обнаружено микроволновое фоновое излучение, реликт первоначального горячего состояния Вселенной. Оно возникло в момент отделения вещества от излучения, когда его температура составляла около 4000 К, но ныне из-за расширения Вселенной она уменьшилась до 2,7 К. Подтвержденная этим открытием космологическая модель первоначально горячей расширяющейся Вселенной объяснила, почему даже в самых старых звездах населения II наблюдается высокое (25–30 % по массе) содержание гелия: он образовался в основном еще в дозвездном газе на ранней стадии расширения. Впоследствии начальные флуктуации плотности развились в протоскопления галактик.

Открытие реликтового излучения подтверждало космологическую модель А. А. Фридмана, основанную на теории гравитации Эйнштейна. Казалось, что основные проблемы астрономии решены.

## **Старое «облачко» – темная масса**

Правда, оставалось облачко сомнений, зародыш которого возник еще в 1933 г. Ныне оно разрослось в гигантскую проблему ненаблюдаемой, но гравитирующей материи, общую и для физики, и для астрономии. А недавно к ней прибавилась и проблема «темной энергии».

В 1933 г. Фриц Цвикки обнаружил, что скорости хаотического движения галактик в скоплении Волос Вероники составляют около 1000 км/с. Если предположить, что галактики в скоплении движутся стационарно, что само скопление не расширяется и не сжимается, то по скорости движения галактик нетрудно вычислить полную массу скопления, что и сделал Цвикки. Разделив массу скопления на число галактик в нем, он нашел среднюю массу, приходящуюся на одну галактику. Она оказалась значительно больше, чем следовало ожидать, исходя из количества звезд в галактиках. Цвикки не мог найти объяснений этой странности, большинство же астрономов вообще не обращало внимания на эту проблему.

Однако уже с конца 1930-х гг. начали появляться признаки того, что ненаблюдаемое вещество имеется не только в скоплениях, но и в индивидуальных галактиках. На это указывали высокие скорости вращения дисков галактик на больших расстояниях от центра, там, где звезд уже не видно. В 1974 г. Дж. Острайкер и Дж. Пиблс и независимо от них Я. Эйнасто и его сотрудники



Рис. 10. Фриц Цвикки (1898–1974)

пришли к выводу о существовании у галактик обширных корон из темного вещества, содержащих около 90 % массы галактики. Таким образом, значения масс галактик следовало увеличить на порядок. При этом сразу стало понятно, почему скопления галактик остаются гравитационно связанными, несмотря на большую скорость движения их членов, а также – как эти скопления удерживают внутри себя чрезвычайно горячий газ, обнаруженный в те же годы по наблюдениям в рентгеновском диапазоне.

Однако что же является носителем невидимой массы в галактиках? Проблема «скрытой массы» до сих пор не решена, хотя практически все уверены, что это не обычное барионное вещество. Ясно, что без понимания природы этого вещества попытки построить теорию происхождения галактик напоминают попытки создать теорию источников энергии звезд до открытия ядерных реакций... Ну что ж, придется подождать. Поиски нейтрино от Солнца завершились успехом лишь после 30 лет работы подземных «нейтринных телескопов». Будем терпеливо продолжать поиски носителей невидимой массы.

## Пять проблем Шкловского

В 1979 г. И. С. Шкловский опубликовал статью «Вторая революция в астрономии подходит к концу». В ней он писал: «Эпоха “бури и натиска” в астрономии, связанная со второй революцией, подходит к концу».

Первая революция была связана с именами Коперника и Галилея, с Возрождением и Великими географическими открытиями, вторая – с научно-технической революцией XX в., с развитием электроники. Всеволновая астрономия вскрыла природу звезд и ядер галактик, принесла понимание Вселенной вплоть до самых отдаленных времен. Но важнее всего, писал Шкловский, то, что «генеральный план, взаимосвязь объектов, а главное – история развития, понятии и перешли в категорию абсолютных истин. Во Вселенной нет такого фундаментального фактора, который, будучи от нас скрытым, определяет физические условия в космических объектах. Достигнутый в настоящее время физикой уровень познания структуры материи принципиально достаточен для объяснения почти всех явлений во Вселенной (кроме сингулярности)». Он отмечал далее, что каждое важное явление во Вселенной связано с ядерными процессами, а астрономия долгое время успешно развивалась, не подозревая об этом. Такая ситуация больше не может повториться: «Ни одно из будущих открытий физики... не изменит сколько-нибудь радикально ту картину строения и развития Вселенной, которая была создана в результате великих открытий второй революции в астрономии. Не может быть больше такой ситуации,

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)