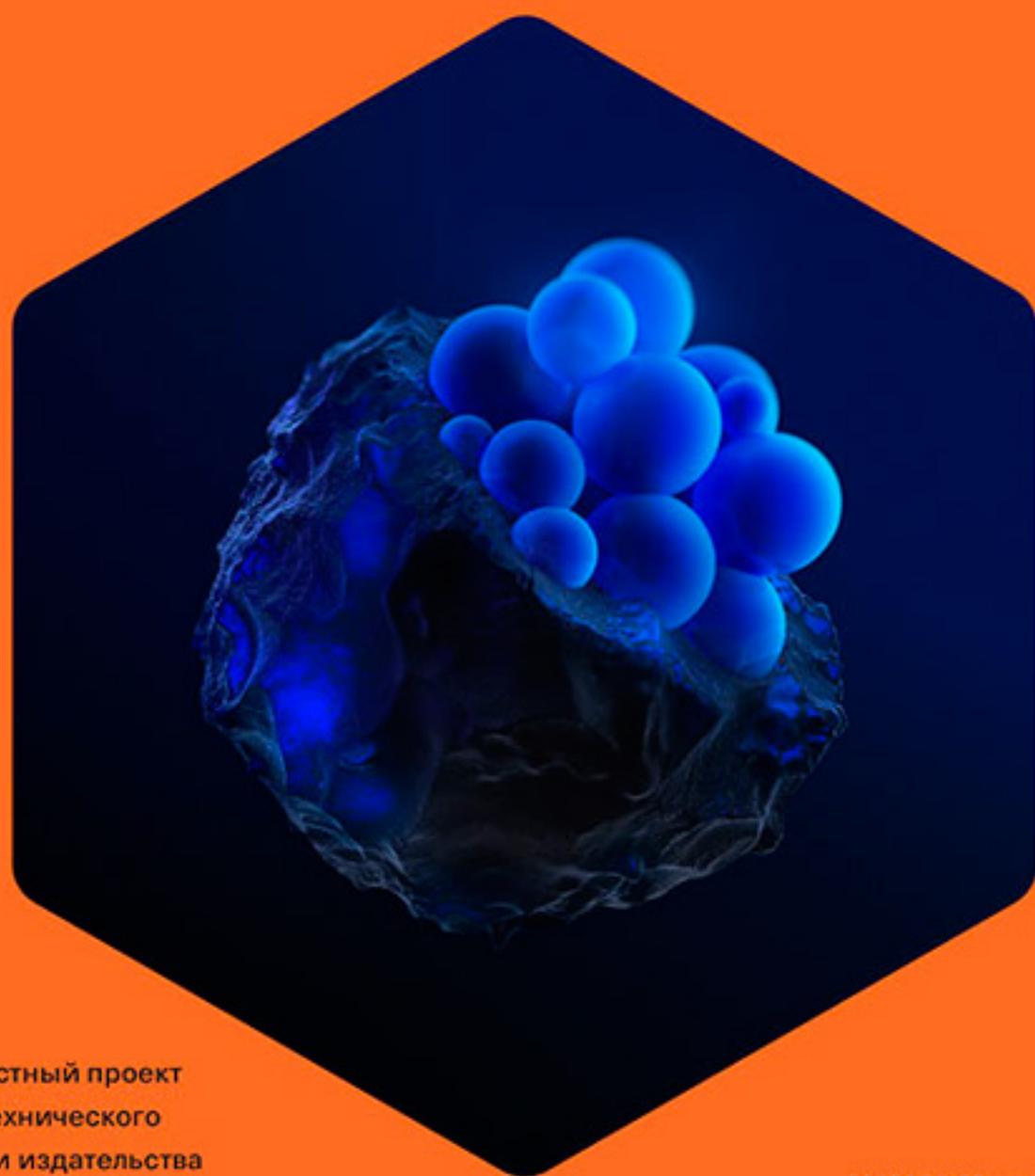


ВСЕЛЕННАЯ

Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого взрыва до будущего Вселенной

СЕРГЕЙ ПОПОВ

Ученый и популяризатор науки, доктор физико-математических наук, профессор РАН и лауреат премии «За верность науке» 2015 года



Совместный проект
Политехнического
музея и издательства
«Альпина нон-фикшн»

КНИГИ ПОЛИТЕХА

КНИГИ ПОЛИТЕХА

Научно-популярное издание

ВСЕЛЕННАЯ

**Краткий путеводитель по пространству
и времени: от Солнечной системы до
самых далеких галактик и от Большого
взрыва до будущего Вселенной**

СЕРГЕЙ ПОПОВ

УДК 524.8
ББК 22.632

Данная книга издана в рамках совместного
проекта Политехнического музея
и издательства ООО «Альпина нон-фикшн»

ПОЛИТЕХ АНО

Научный редактор
Анатолий Засов,
доктор физико-математических наук
Редактор
Дмитрий Мамонтов

П58 Попов С.
Вселенная. Краткий путеводитель по пространству и времени:
от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого
взрыва до будущего Вселенной / Сергей Попов. — М.: Альпина нон-
фикшн, 2018. — 400 с.

ISBN 978-5-91671-726-6

УДК 524.8
ББК 22.632

Современная астрофизика — быстро развивающаяся наука, которая использует новейшие (и очень дорогие) приборы и суперкомпьютеры, дополняющие и меняющие астрономическую картину мира. Сегодня мы знаем, что живем в расширяющейся Вселенной, чей возраст составляет немногим менее 14 млрд лет. Нам известно, как синтезировались и синтезируются ядра элементов. Мы можем наблюдать разные стадии формирования звезд и планетных систем. Удастся даже разглядеть, как в дисках вокруг звезд образуются планеты. Тем не менее остается много вопросов и загадок. Что такое темное вещество и темная энергия? Как взрываются сверхновые разных типов? Как устроены черные дыры? Наконец, есть ли где-то еще жизнь во Вселенной и какой она может быть? В этой книге известный российский астрофизик и популяризатор науки Сергей Попов систематизирует сложившиеся научные представления о Вселенной и одновременно обращается к новейшим открытиям и нерешенным вопросам.

ISBN 978-5-91671-726-6

© ФОНД РАЗВИТИЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО МУЗЕЯ, 2018
© ООО «АЛЬПИНА НОН-ФИКШН», 2018

Содержание

Предисловие	15
Благодарности	19
Глава 1	
Солнце	21
1.1	Строение Солнца и условия в недрах 23
1.2	Реакции в Солнце. Нейтрино 26
1.3	11-летний цикл активности 30
1.4	Солнечные пятна, протуберанцы и все-все-все 34
1.5	Солнечная корона и затмения 37
1.6	Гелиосейсмология 41
1.7	Солнечные вспышки и их опасность 45
1.8	Эволюция Солнца и жизнь на Земле 50
Глава 2	
Солнечная система	57
2.1	Образование Солнечной системы 59
2.2	Планеты и их спутники 63
2.3	Астероиды 68
2.4	Пояс Койпера, Плутон и компания 73
2.5	Кометы и облако Оорта 77
Глава 3	
Экзопланеты	83
3.1	Способы обнаружения и изучения экзопланет 85
3.2	Основные типы экзопланет 90
3.3	Формирование и миграция планет 94

Глава 4

Звезды и их эволюция 103

4.1	Расстояния до звезд	105
4.2	Устойчивость звезд и их структура	108
4.3	Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Цефеиды	111
4.4	Двойные и кратные звезды. Аккреция	116
4.5	Образование звезд. Три населения	121
4.6	Смена термоядерных реакций	124
4.7	Сверхновые	128

Глава 5

Синтез элементов и термоядерные реакции 135

5.1	Первичный состав. Реакции в ранней Вселенной. Первые звезды	137
5.2	Химическая эволюция Вселенной. Звезды	139

Глава 6

Компактные объекты: белые карлики и нейтронные звезды 147

6.1	Белые карлики	149
6.2	Нейтронные звезды	154

Глава	7		
		Черные дыры	161
7.1	Природа черных дыр. Коллапс		163
7.2	Кандидаты в черные дыры в тесных двойных системах		167
7.3	Сверхмассивные черные дыры		170
7.4	Первичные черные дыры и испарение Хокинга		175
Глава	8		
		Наша Галактика	179
8.1	Структура Галактики		181
8.2	Наше место в Галактике и структура наших окрестностей		185
8.3	Природа спиральных рукавов		188
8.4	Рассеянные и шаровые скопления		191
8.5	Сверхмассивная черная дыра — Sgr A*		195
8.6	Спутники Галактики. Местная группа		197
Глава	9		
		Межзвездная среда	201
9.1	Межзвездный газ и пыль. Состав среды		203
9.2	Поглощение света		206
9.3	Круговорот вещества в межзвездной среде		208
9.4	Межзвездные магнитные поля		210

Глава 10

Мир галактик 215

10.1	Типы галактик	217
10.2	Образование и взаимодействие галактик	222
10.3	Сверхмассивные черные дыры и активные ядра	226
10.4	Скопления галактик и крупномасштабная структура	231

Глава 11

Расширение Вселенной 237

11.1	Разбегание галактик. Закон Хаббла	239
11.2	Горизонт частиц и горизонт событий. Возраст Вселенной	242
11.3	Космологическое красное смещение	244
11.4	Геометрия Вселенной	246
11.5	Состав Вселенной. Темное вещество	249
11.6	Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной	253
11.7	Стадия инфляции	257
11.8	Ранняя Вселенная	260

Глава 12

Реликтовое излучение 265

12.1	Модель горячего Большого взрыва	267
12.2	Космологические данные по наблюдению реликта	269
12.3	Измерение температуры реликта в разные эпохи	272
12.4	Спектр первичных возмущений	273

Глава	13		
		Телескопы	277
13.1	Принцип работы телескопа		279
13.2	Рефракторы и рефлекторы		283
13.3	Современные оптические телескопы и проекты ближайшего будущего		286
13.4	Радиотелескопы		290
13.5	Рентгеновские телескопы		294
13.6	Гамма-телескопы на Земле и в космосе		299
13.7	Детекторы нейтрино		303
13.8	Детекторы космических лучей		308
13.9	Детекторы гравитационных волн		313
Глава	14		
		Космические исследования	321
14.1	Наблюдения из космоса. Космические телескопы		323
14.2	Полеты к телам Солнечной системы		329
14.3	Изучение Земли из космоса и исследования околоземного пространства		334
14.4	Пилотируемая космонавтика		337
Глава	15		
		Компьютеры в астрономии	343
15.1	Управление инструментами, телескопы-роботы		345
15.2	Обработка данных. Big data		348
15.3	Численный эксперимент и моделирование		353
15.4	Виртуальная обсерватория		358

Глава 16

Жизнь во Вселенной 361

16.1 Жизнь в Солнечной системе 363

16.2 Жизнь на экзопланетах 367

16.3 Двойники Земли. Зона обитаемости. Биомаркеры 371

16.4 Другие формы жизни 377

16.5 SETI 380

Эпилог 387

Рекомендуемая литература 389

Моим учителям и ученикам

Предисловие

Астрономия — одна из самых быстро развивающихся наук наших дней. Поток результатов чрезвычайно велик: каждый месяц появляется более тысячи новых публикаций. Во многом это связано с вводом в строй новых наземных телескопов, с запуском космических аппаратов и с ростом производительности компьютеров. Поэтому довольно часто прямо на наших глазах совершаются важные открытия или появляются теоретические работы, которые заметно влияют на существенные детали нашего научного описания мира. Эта книга является скромной попыткой зафиксировать общий вид астрономической картины мира на середину 2017 г. Безусловно, дальнейшее развитие науки приведет к необходимости уточнять, а иногда и перерисовывать разные части этого полотна. Однако, надеюсь, какое-то время данный томик будет оставаться актуальным описанием того, какими астрономы видят Вселенную и ее обитателей — астрономические объекты.

Современная астрономия, которой посвящена данная книга, — это в основном астрофизика, наука о природе небесных тел. Она изучает свойства космических объектов: как устроены звезды, планеты, галактики, какие физические процессы определяют их наблюдательные проявления. Мы последовательно рассмотрим все важнейшие типы наблюдаемых астрономических источников — от объектов Солнечной системы до мира галактик, не забудем также про межзвездную среду и синтез элементов, а затем перейдем к космологии. Кроме того, разберемся, как именно получают все эти данные, с помощью каких инструментов и аппаратов наблюдатели изучают далекие источники, прямые эксперименты с которыми попросту невозможны. Наконец, мы получим представление о работе современного астронома, которого сейчас скорее можно увидеть перед экраном компьютера, чем у окуляра телескопа. А «на десерт» представим рассказ о поиске жизни во Вселенной и различных формах, которые она может принимать.

По ходу изложения я постарался по возможности обойтись без формул, таблиц и графиков. Мне кажется, что важно попробовать рассказать о ключевых физических процессах и астрономических явлениях просто словами (даже если они не всегда простые, а изложение зачастую получается чересчур сжатым из-за ограниченного объема). Но читатель должен понимать, что это неизбежно приводит к существенному упрощению: мир устроен слишком сложно, чтобы его было возможно полностью описать привычными понятиями. Галилею

принадлежит знаменитое изречение: «Философия написана в величественной книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики, и знаки ее — треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту». Поэтому словесное описание физических процессов всегда является неполным, и для получения более детальной информации нужно обратиться к другим источникам, в том числе к научным статьям, обзорам и монографиям (ссылки на некоторые из них приведены в конце книги).

Книга состоит из 16 глав, которые делятся на 79 разделов. Текст можно читать как подряд от начала до конца, так и выбирая отдельные части. Кое-где это неизбежно привело к смысловым повторам, которые заметит внимательный читатель, зато это позволяет более удобно использовать книгу и как справочник для уточнения отдельных фактов. Так что, надеюсь, вы будете возвращаться к тексту даже после того, как прочтете его в первый раз.

Хотя детальное описание некоторых важных понятий содержится только в тематических разделах, соответствующие термины могут встречаться в разных частях книги (например, при описании галактик упоминаются темная материя и темная энергия, хотя подробный рассказ об этих понятиях читатель найдет ниже, в разделе о космологии). Если по ходу чтения какой-то термин покажется непонятным, можно быстро посмотреть его значение в соответствующем разделе или обратиться к бумажным или онлайн-словарям астрономических терминов, которые перечислены в разделе «Рекомендуемая литература».

Каждой главе предшествует краткое введение с упоминанием основных вопросов, а в тексте выделяются ключевые факты и понятия. Надеюсь, эти заметки будут полезны и после того, как вы прочтете книгу, когда понадобится что-то вспомнить или уточнить. Но не надо стесняться делать и свои пометки, выделяя важное, непонятное, а может быть, на ваш взгляд, и ошибочное: с этой книгой можно работать с карандашом в руках.

Эта книга, безусловно, не является учебником. Однако она дает целостное упорядоченное описание наших представлений о Вселенной и о методах ее исследования. Книга может послужить своего рода хрестоматией, важным дополнением к школьному курсу астрономии, а отдельные части будут полезны при преподавании курсов естествознания, в том числе и на вузовском уровне. Надеюсь, что любители астрономии и посетители астрономических кружков также найдут для себя много интересного и полезного, тем более что наличие базовых

астрономических знаний поможет легче и лучше разобраться в ряде деталей. И, конечно, весь представленный материал может послужить основой для того, чтобы с большим пониманием и удовольствием читать многочисленные современные научно-популярные книги по астрофизике (включая космологию, исследование Солнечной системы и вопросы поиска жизни во Вселенной). Поэтому, если вы хотите понять физику небесных тел несколько глубже, чем это обычно излагается в массовой популярной литературе, но не готовы сразу разбираться со множеством сложных формул, то эта книга для вас.

Книга не является такой уж простой. Но ведь и мир устроен сложно. Итак, взглянем на Вселенную!

Благодарности

После появления первой версии текста издательство «Альпина нон-фикшн» сделало все возможное, чтобы рукопись стала настоящей книгой, доступной большому числу читателей. Я благодарен сотрудникам АНФ за их труд.

Отдельные главы и параграфы были просмотрены моими коллегами из ГАИШ Леонидом Зотовым, Александром Петровым, Георгием Рудницким и Алексеем Топоренским. Их комментарии помогли сделать книгу лучше.

Особая благодарность Дмитрию Вибе, тщательно прочитавшему весь первоначальный вариант рукописи и сделавшему массу важных замечаний, учет которых помог избежать некоторых ошибок и неточностей.

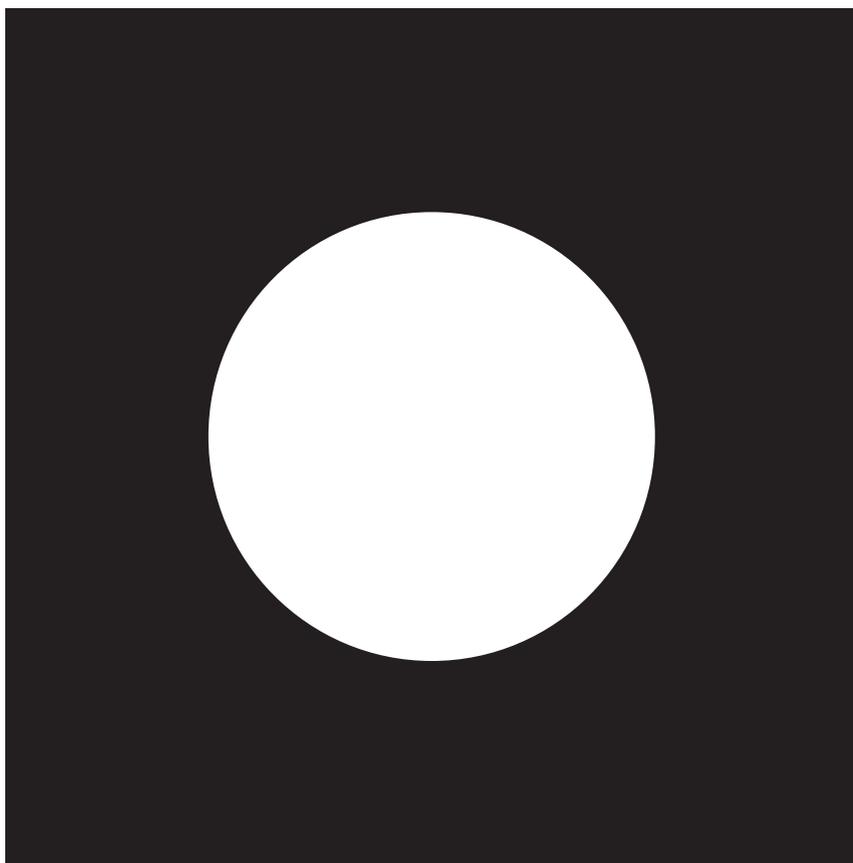
Многие мои коллеги консультировали меня по отдельным вопросам. Не имея возможности перечислить их всех, отмечу Сергея Блиникова, Юрия Ковалева и Константина Постнова.

Скрупулезная работа научного редактора книги Анатолия Владимировича Засова и редактора Дмитрия Мамонтова привела к радикальному улучшению всего текста как с точки зрения точности и достоверности, так и с точки зрения подачи материала. Ими был проделан очень большой объем работы, требующей глубоких знаний и внимания к деталям.

Во всех оставшихся недочетах прошу винить автора.

Работа над книгой заняла полтора года, и я признателен моей супруге Сусанне за поддержку и помощь в течение всего этого времени. Отдельное спасибо моим соавторам по научной работе и студентам, общение с которыми помогало прояснить некоторые вопросы и которые не могли не ощутить, что более года что-то сильно отвлекло меня от науки.

Я бы хотел посвятить эту книгу своим учителям и ученикам. Приятно чувствовать себя звеном в цепи создания, накопления и передачи новых знаний. К счастью, когда делишься знаниями, их становится только больше.



Глава 1

СОЛНЦЕ

1.1	Строение Солнца и условия в недрах	23
1.2	Реакции в Солнце. Нейтрино	26
1.3	11-летний цикл активности	30
1.4	Солнечные пятна, протуберанцы и все-все-все	34
1.5	Солнечная корона и затмения	37
1.6	Гелиосейсмология	41
1.7	Солнечные вспышки и их опасность	45
1.8	Эволюция Солнца и жизнь на Земле	50

Солнце — это звезда Главной последовательности, т. е. в ее недрах идет стабильный процесс превращения водорода в гелий путем цепочки реакций, в результате которых четыре протона превращаются в альфа-частицу. При этом выделяется энергия в виде кинетической энергии частиц, квантов электромагнитного излучения (фотонов) и нейтрино. Фотоны также возникают в результате аннигиляции электронов и рождающихся в реакциях позитронов. Нейтрино слабо взаимодействуют с веществом и поэтому свободно покидают недра Солнца. Регистрируя эти частицы, мы можем получить прямую информацию о происходящих в недрах Солнца термоядерных реакциях. Энергия фотонов и кинетическая энергия образующихся частиц нагревают недра звезды, позволяя ей противостоять силам гравитации, которые стремятся сжать звезду.

Солнце имеет радиус около 696 000 км, масса его составляет примерно 2×10^{30} кг. Температура поверхности составляет 5800 К, а светимость (мощность солнечного излучения) — $3,86 \times 10^{26}$ Дж/с. Расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 150 млн км, свет проходит его за 8 минут с небольшим. На небе Солнце имеет угловой размер около половины градуса. Возраст Солнца равен примерно 4,6 млрд лет, а полная продолжительность его жизни составляет около 12 млрд лет. В конце своего пути, пройдя стадию красного гиганта и «горения» гелия в ядре, наша звезда станет углеродно-кислородным белым карликом.

1.1

Строение Солнца и условия в недрах

Устойчивость Солнца и его структура определяются выделением и переносом энергии, источником которой являются реакции превращения водорода в гелий. Для обеспечения стабильного протекания термоядерных реакций необходимы достаточно высокая температура и плотность. В центральной части Солнца плотность составляет более 100 г/см^3 , а температура превосходит 10^7 К . И плотность, и температура уменьшаются по мере продвижения к поверхности.

Структура Солнца связана с переносом энергии от горячих плотных недр к более холодным и менее плотным поверхностным слоям.

Термоядерные реакции идут в ядре, которое занимает около четверти солнечного радиуса. Вокруг ядра расположена горячая (несколько миллионов градусов) и потому достаточно прозрачная для излучения так называемая лучистая зона, простирающаяся до примерно 70–75% радиуса Солнца. Перенос энергии в этой области происходит с помощью излучения, при этом в процессе распространения фотоны многократно поглощаются и переизлучаются в случайном направлении. Поэтому от рождения фотона до покидания им Солнца (с учетом всех актов поглощения и излучения) проходит в среднем около 170000 лет.

Во внешних слоях температура вещества падает (до пары миллионов градусов), и оно становится непрозрачным для излучения. При этом возрастает градиент температуры и начинается перенос энергии в этих слоях за счет конвекции. Конвективная зона занимает внешние 25–30% звезды, и ее наличие приводит к появлению нескольких видов солнечной активности. Такие образования, как гранулы, солнечные пятна, факельные поля и некоторые другие, обязаны своим происхождением магнитогидродинамическим процессам в конвективной зоне.

Солнце вращается вокруг своей оси, но не как твердое тело, поскольку оно является газовым (плазменным) шаром. Скорость вращения в конвективной зоне различна на разной глубине и разных широтах. Приповерхностные слои в экваториальных областях делают один оборот за 25 дней, а в полярных — за 38 дней. По мере

продвижения внутрь Солнца, к границе конвективной и лучистой зон, угловые скорости вращения выравниваются. Лучистая зона и ядро вращаются уже как твердое тело с периодом около 27 дней. Профиль скорости вращения на разных глубинах и широтах, как и многие другие свойства солнечных недр, в настоящее время с достаточной точностью измеряется методами гелиосейсмологии — раздела астрофизики, изучающего колебания Солнца.

Во внутренней структуре Солнца выделяют ядро, зону лучистого переноса энергии и зону конвективного переноса.

Наличие конвективной оболочки приводит к возбуждению колебаний во внешних слоях Солнца. Эти колебания распространяются внутрь и по сути зондируют недра Солнца, отражаясь от глубинных слоев и проявляясь в виде сложных пульсационных движений поверхности (фотосферы) с периодами в несколько минут и более и различными угловыми масштабами.

По характеру этих пульсаций можно определить физические параметры внутренних слоев нашей звезды.

В строении Солнца выделяют три внешние зоны: фотосферу, хромосферу и корону. Фотосфера является видимой поверхностью Солнца (которое представляет собой газовый шар и потому не имеет твердой поверхности). В этом тонком слое толщиной всего лишь около 300 км атмосфера Солнца становится непрозрачной в видимом диапазоне для внешнего наблюдателя. На разных длинах волн непрозрачность достигается на разной глубине: в ультрафиолетовом диапазоне это происходит во внешних слоях фотосферы, где видимая поверхность Солнца имеет более низкую температуру, чуть менее 5000 К, а в видимом и инфракрасном — в нижних слоях фотосферы, где температура несколько выше (более 6500 К).

В спектре фотосферы наблюдается огромное количество линий, позволяющих с высокой точностью определять физические условия и состав вещества. Поэтому долгое время именно фотосфера служила основным источником информации о свойствах Солнца.

Внешние, «атмосферные», слои Солнца подразделяют на фотосферу, хромосферу и корону.

Между фотосферой и самой внешней частью солнечной атмосферы — короной — находится так называемая хромосфера. Ее назвали так из-за того, что на изображениях Солнца во время затмений выглядит как окрашенный ореол вокруг фотосферы. Цвет возникает благодаря эмиссионным линиям (прежде всего,

водородным) солнечного излучения. Хромосфера имеет толщину несколько тысяч километров и эффективно нагревается плазменными волнами. Поэтому температура в ней быстро растет по мере удаления от поверхности звезды: от 5000 К (температура верхней фотосферы) до примерно 35 000 К. А на высоте несколько тысяч километров температура резко возрастает до миллиона градусов — температуры короны.

Солнечная корона хорошо видна во время затмения. Она визуально прослеживается на несколько солнечных радиусов и характеризуется очень низкой плотностью (поэтому ее невозможно увидеть на фоне дневного неба), но очень высокой температурой. Вид короны сильно зависит от солнечной активности в данный момент. На больших расстояниях корона постепенно переходит в солнечный ветер.

Стабильность полной светимости Солнца связана со стабильностью его внутренней структуры.

Несмотря на различные проявления поверхностной активности, полная светимость Солнца, в основном приходящаяся на оптический диапазон, крайне стабильна. Это связано со стабильностью внутренней структуры, которая поддерживается за счет равновесия сил гравитации и сил давления (газа и излучения). Однако светимость за пределами видимого диапазона (в радиодиапазоне, ультрафиолете, рентгене, гамма-лучах) может существенно изменяться как в коротком временном масштабе (вспышки), так и в длительном (11-летний цикл активности, а также более долгопериодические изменения). Активность Солнца связана с процессами в самых внешних (конвективных) слоях, а не с основным источником энергии — термоядерными реакциями в ядре. Однако даже такие небольшие вариации в поведении Солнца могут заметно влиять на земной климат.

Солнце состоит в основном из водорода (более 70% по массе) и гелия. Лишь менее 2% приходится на более тяжелые элементы. Распределение элементов по радиусу не является равномерным. Во-первых, в ядре происходит синтез гелия, а отсутствие конвекции во внутренних слоях исключает заметное перемешивание вещества и вынос продуктов синтеза во внешние слои. Во-вторых, внутренние слои обогащаются тяжелыми элементами, которые опускаются из внешних слоев.

Солнце более чем на 98% состоит из водорода и гелия.

По этим причинам фотосферный состав не отражает точного содержания элементов в Солнце. Разумеется, усредненный химический состав Солнца медленно меняется со временем из-за превращения водорода в гелий в ядре.

Солнце образовалось около 4,6 млрд лет назад. Еще чуть более 5 млрд лет Солнце будет оставаться на Главной последовательности. В течение этого времени светимость и радиус будут немного расти, но структура Солнца останется неизменной до ухода с Главной последовательности. Затем, когда запасы водорода в ядре будут исчерпаны, структура и основные параметры (светимость, масса, температура поверхности) нашей звезды начнут сильно меняться.

1.2

Реакции в Солнце. Нейтрино

Источником энергии Солнца являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Благодаря регистрации выделяющихся при этом нейтрино мы достаточно точно знаем характеристики каждой из этих реакций.

Источником энергии Солнца являются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода.

Ядро обычного гелия (${}^4\text{He}$) — альфа-частица — состоит из двух протонов и двух нейтронов, поэтому для его синтеза необходимы четыре протона — ядра водорода (${}^1\text{H}$). Но сделать это за один этап невозможно, требуется цепочка из нескольких реакций. Более того, существуют альтернативные каналы реакций, которые вносят разный вклад в энергетику Солнца.

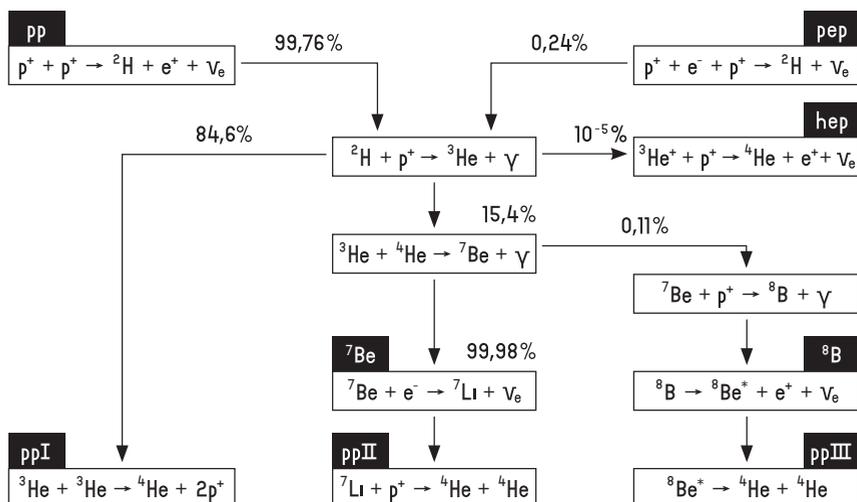
Основной канал называют pp-цепочкой, или pp-циклом, на первом шаге которого в реакцию вступают два протона (p). Однако даже эта реакция идет в недрах Солнца в двух вариантах. Основной (99,76% случаев) состоит во взаимодействии двух протонов, в результате чего образуется дейтерий (один из протонов превращается в нейтрон), рождаются позитрон и электронное нейтрино. Эти нейтрино имеют низкую энергию, поэтому их удалось детально исследовать лишь недавно, в 2014 г., на установке *Вогехипо* в Италии.

В другом варианте (0,24%) в реакции участвует третья частица — электрон. В этой так называемой pep-реакции также образуются дейтерий и электронное нейтрино (pep-нейтрино). Эти более редкие pep-нейтрино, обнаруженные с помощью *Вогехипо* в 2012 г., имеют несколько большую энергию, чем те, которые образуются в pp-цикле.

На следующем этапе дейтерий взаимодействует с еще одним протоном. Образуется изотоп гелия ^3He и рождается гамма-квант. У гелия-3 есть несколько возможностей для дальнейших реакций. Реже всего — в ничтожно малой доле случаев — в реакцию вступает протон, образуя на выходе ^4He , позитрон и электронное нейтрино (эти нейтрино крайне важны, несмотря на свою редкость, поскольку они имеют самую высокую энергию).

Более 98% энергии рождается в реакциях протон-протонного (pp) цикла.

Но чаще идут другие реакции. В 84,6% случаев два ядра гелия-3 взаимодействуют друг с другом, порождая ядро ^4He и два протона. В оставшихся 15,4% начинается другая цепочка реакций: гелий-3 взаимодействует с гелием-4, образуя ядро бериллия-7 (^7Be) и испуская гамма-квант. Однако бериллий не является конечным продуктом, он вступает в реакцию или с электроном (99,98% случаев), порождая литий-7 (^7Li) и электронное нейтрино, или с протоном (0,11%), порождая бор-8 (^8B) и гамма-квант. В свою очередь литий-7 захватывает протон и распадается на две альфа-частицы, а бор-8 превращается в возбужденное ядро бериллия-8 с испусканием позитрона и электронного нейтрино (это так называемые борные нейтрино, из всех рождающихся в Солнце в заметном количестве они имеют наибольшую энергию). И, наконец, ядро бериллия распадается на две альфа-частицы.



На схеме показаны различные каналы реакций pp-цикла в Солнце. Проценты соответствуют доли отдельных вариантов протекания синтеза.

Среди всех реакций, идущих в ядре Солнца, в пяти испускается электронное нейтрино. Антинейтрино или нейтрино другого типа в pp-цикле не возникают. Проще всего зарегистрировать борные нейтрино, поскольку они имеют высокую энергию и их достаточно много. Сложнее всего — нейтрино от первой (pp) реакции из-за их низкой энергии.

Такие же реакции идут во всех звездах того же типа, что и Солнце, однако из-за разной зависимости скорости реакций от температуры вклад различных каналов у звезд разной массы отличается.

Протон-протонный цикл вносит основной (более 98%) вклад в энергетику Солнца. Однако есть еще одна цепочка реакций, также ведущая к синтезу гелия из водорода. В Солнце она отвечает менее чем за 2% энерговыделения, но в более горячих (массивных) звездах этот вариант, называемый CNO-циклом, становится доминирующим.

Свое название CNO-цикл получил благодаря углероду (C), азоту (N) и кислороду (O). Однако эти элементы в реакциях CNO-цикла не расходуются и не синтезируются: на входе мы имеем четыре протона, а на выходе — альфа-частицу (плюс, конечно, нейтрино и энергию). Можно сказать, что углерод выступает в роли катализатора, а азот и кислород принимают участие в промежуточных этапах синтеза.

CNO-цикл отвечает менее чем за 2% энергетики Солнца, но становится доминирующим в более массивных звездах.

Цикл начинается с того, что обычный углерод-12 (^{12}C) захватывает протон, превращаясь в азот-13 (^{13}N) с рождением фотона. Затем в результате бета-распада азот-13 превращается в углерод-13 с испусканием позитрона и электронного нейтрино.

В результате реакций часть энергии уносится электронными нейтрино, регистрируемыми на Земле.

Углерод-13 снова взаимодействует с протоном с образованием азота-14 и фотона. Азот-14 взаимодействует с протоном, порождая кислород-15 и фотон. В ядре ^{15}O один из протонов в результате бета-распада превращается в нейтрон. Возникает азот-15, и, как во всяком бета-распаде протона, вылетают позитрон и электронное нейтрино. Наконец, азот-15 взаимодействует с протоном с образованием углерода-12 и альфа-частицы. Цикл завершен. Как видим, ядро ^{12}C , использованное в самом начале цикла, возникло снова, а четыре протона превратились в ядро ^4He .

У CNO-цикла есть еще несколько вариантов. Один из них идет только при высокой температуре и для Солнца совсем не актуален.

Второй все-таки дает ничтожный вклад в энергетику Солнца. При взаимодействии азота-15 с протоном в редких случаях возникает не углерод-12 и альфа-частица, а кислород-16. Кислород захватывает еще один протон, превращаясь во фтор-17. В результате бета-распада фтор-17 превращается в кислород-17 с испусканием нейтрино и рождением позитронов. Кислород-17 снова взаимодействует с протоном, а итогом реакции становятся азот-14 и альфа-частица. Но это еще не конец, ведь цепочка началась с азота-15, который необходимо получить для замыкания цикла. ^{14}N захватывает протон, превращаясь в кислород-15, который в результате бета-распада превращается в исходный ^{15}N .

Нейтрино обладают небольшой (но не нулевой!) массой.

Как видно, в ходе CNO-цикла также рождаются электронные нейтрино, которые, как и нейтрино от pp-реакций, удалось зарегистрировать в подземных нейтринных лабораториях.

Теоретики разработали основные цепочки pp- и CNO-циклов в конце 1930-х гг. В 1946 г. Бруно Понтекорво (Bruno Pontecorvo) отметил, что Солнце должно быть достаточно мощным источником нейтрино. В 1950-е гг. Рэй Дэвис (Ray Davis) начал работать над экспериментом, способным обнаружить солнечные нейтрино. В 1968 г. ему удалось получить важнейший результат: экспериментальный верхний предел на поток нейтрино от Солнца оказался почти в три раза ниже теоретического предсказания. Возникла *проблема солнечных нейтрино*. Затем на протяжении десятков лет ученые с помощью различных установок научились регистрировать нейтрино, испускаемые в ходе различных реакций, и все они подтверждали наличие дефицита. Окончательно решить проблему удалось в самом начале XXI в. Выяснилось, что расчеты структуры Солнца и процессов в нем были верны. Сюрприз был связан с природой нейтрино.

Нейтринные осцилляции объясняют, почему поток электронных нейтрино на Земле меньше, чем предсказывает стандартная модель Солнца.

На протяжении десятилетий шел спор о том, имеют ли нейтрино массу. Изначальная гипотеза Паули (1930 г.) о существовании нейтральной частицы, которая позволяла объяснить особенности бета-распада (а заодно, в варианте Паули, и свойства атомных ядер), предполагала ненулевую массу. С течением времени эксперименты показали, что есть три типа нейтрино, соответствующих трем лептонам: электронное, мюонное и тау-нейтрино. В минимальной Стандартной

модели элементарных частиц, созданной в середине 1970-х гг., все три нейтрино предполагаются безмассовыми (т. е. с нулевой массой). Обнаружение так называемых нейтринных осцилляций в экспериментах Super-Kamiokande («Супер-Камиоканде»), или просто Super-K, и на нейтринной обсерватории в Садбери (Sudbury Neutrino Observatory, SNO) в 2015 г. было отмечено Нобелевской премией по физике. Нейтринные осцилляции свидетельствуют, что на самом деле эти частицы имеют ненулевую массу. Хотя на момент открытия формально можно было объяснить явление нейтринных осцилляций не массой частиц, а «новой физикой», теперь такие объяснения не только выглядят «не элегантно», но и плохо согласуются с новыми экспериментальными данными, также свидетельствующими в пользу ненулевой массы нейтрино.

Феномен нейтринных осцилляций был предсказан в 1957 г. Бруно Понтекерво. С точки зрения наблюдателя, он состоит в том, что после испускания нейтрино любого типа детекторы на разных расстояниях от источника будут регистрировать нейтрино всех трех типов. Строго говоря, это не означает взаимное превращение частиц друг в друга. Нейтрино всегда является суперпозицией трех состояний, одно из которых может проявляться в данный момент. Осцилляции происходят и в вакууме, но наличие вещества может их усилить (так называемый эффект Михеева — Смирнова — Вольфенштейна, иногда в данном случае говорят о неосцилляторных превращениях одного сорта нейтрино в другой, называя их адиабатическими превращениями сорта (adiabatic flavor conversion), но мы будем называть все превращения осцилляциями, чтобы не усложнять терминологию). Это позволяет решить проблему солнечных нейтрино. Эти частицы рождаются в результате термоядерных реакций в недрах Солнца, и при энергии нейтрино выше нескольких мегаэлектронвольт осцилляции в основном происходят внутри Солнца, а при более низких энергиях — по пути от Солнца до Земли. В результате мы регистрируем лишь около трети электронных нейтрино, возникающих при синтезе гелия из водорода.

1.3

11-летний цикл активности

Одной из главных особенностей солнечной активности является наличие так называемого 11-летнего цикла. С этим периодом меняется количество солнечных пятен, вспышек, а также всех других проявлений активности, включая потоки радио-, рентгеновского

и гамма-излучения. Этот цикл связан с изменением магнитного поля Солнца, полярность (направление) которого меняется с периодичностью около 22 лет. Однако детальные причины такого поведения Солнца остаются неизвестными: существующие модели генерации и эволюции магнитного поля, объясняющие солнечный цикл, нуждаются в проверке и, возможно, модификации и развитии.

Одиннадцатилетняя периодичность в количестве солнечных пятен была установлена в 1840-е гг. Генрихом Швабе (Samuel Heinrich Schwabe). С 1849 г. Рудольф Вольф (Rudolf Wolf) начал регулярные подсчеты солнечных пятен и их групп по разработанной им методике (так называемого числа Вольфа). Кроме того, он использовал архивные данные, чтобы установить, как менялось число пятен и групп начиная с 1749 г. Благодаря работе Вольфа и его последователей у нас есть качественные непрерывные данные по солнечным пятнам на протяжении 24 циклов. Именно это делает ряды наблюдений пятен ценнейшим материалом для изучения поведения Солнца, хотя в последние десятилетия разработаны и более надежные методы мониторинга солнечной активности.

Цикл начинается с минимума в количестве солнечных пятен. Первый цикл отсчитывают с 1755 г., а текущий (24-й) цикл начался в 2009 г. Продолжительность цикла лишь в среднем равна 11 годам, отклонения могут превосходить год (а иногда и два!) в ту или иную сторону.

Активность Солнца меняется с периодичностью около 11 лет.

Сейчас используется несколько методик подсчета солнечных пятен и их групп. Помимо подсчета числа пятен и групп измеряется и их площадь, а с 1946 г. для мониторинга солнечной активности используют также радионаблюдения на частоте 2,8 ГГц (длина волны 10,7 см). Разные методы по-разному определяют момент начала цикла, разброс между ними может составлять несколько месяцев.

Начало 11-летнего цикла солнечной активности принято отсчитывать с минимума.

Цикл — это всплеск солнечной активности, вызванный внутренними процессами, связанными с магнитным полем. Последовательно наступающие циклы могут слегка перекрываться, и это можно установить различными методами. Например, пятна в цикле начинают появляться на широтах ± 30 – 40 градусов, а потом постепенно места появления новых пятен сдвигаются ближе к экватору. Соответственно, вблизи минимумов на Солнце могут присутствовать пятна и старого, и нового циклов.

Среднее (глобальное) магнитное поле на Солнце невелико. По порядку величины оно примерно такое же, как на поверхности Земли. Но локально (например, в пятнах) поля могут достигать величин в тысячи раз больше. Изменения полей порождают индукционные токи, сложная эволюция системы полей и токов в плазме приводит к богатству магнитогидродинамических процессов и многообразию активных явлений на Солнце (и других звездах).

Цикличность солнечной активности связана с изменениями магнитного поля.

Данные наблюдений указывают, что магнитное поле играет ключевую роль во всех проявлениях солнечной активности. В максимуме цикла меняется полярность глобального магнитного поля Солнца, величина поля в это время минимальна. Непосредственно вблизи максимума активности полярность поля может поменяться несколько раз. В минимуме солнечной активности величина глобального магнитного поля достигает максимума. Поэтому полный магнитный цикл составляет 22 года, за это время поле возвращается к прежней конфигурации.

Кроме того, меняется направление магнитного поля в солнечных пятнах. Обычно пятна появляются парами. Пятна в паре соединены линиями магнитного поля. В течение 11-летнего цикла лидирующее пятно в каждой паре в северном полушарии Солнца имеет одну и ту же полярность, а в южном — противоположную. В следующем цикле полярность меняется.

В максимуме цикла солнечной активности существенно возрастает светимость в радио-, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах. Однако полное энергосодержание звезды практически не изменяется.

Кривая интенсивности солнечной активности в цикле несимметрична. В среднем от минимума до максимума проходит около 4 лет, а потом в течение 7 лет активность уменьшается. Но циклы вовсе не одинаковы, они имеют разную форму кривой активности, длительность, уровень активности в минимуме и максимуме. Закономерности в изменении параметров циклов пытаются найти, но этот процесс, к сожалению, затруднен недостатком информации: данные по пятнам охватывают менее трех столетий, по магнитным полям — около века, а детальные данные наблюдений в других диапазонах спектра — всего лишь чуть более полувека.

Однако известно, что на больших промежутках времени активность Солнца претерпевает существенные изменения. Так, в так

называемом минимуме Маундера (1645–1715 гг.) на Солнце практически не было пятен, а изучение косвенных данных позволяет установить, что подобные затяжные периоды слабой активности Солнца наблюдались и ранее. Существовали и периоды, когда активность Солнца в среднем была повышена.

Солнечная активность существенно изменяется на длительных временных масштабах.

Вблизи максимума активности возрастает частота появления солнечных вспышек, протуберанцев, корональных выбросов и др. Также возрастает светимость в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом и радиодиапазонах. Однако полное энерговыделение Солнца при этом изменяется крайне незначительно — менее чем на 0,1%. Тем не менее повышенная солнечная активность может весьма значительно сказываться на параметрах земной магнитосферы и даже на климате. Кроме того, высокая солнечная активность, сопровождаемая мощными вспышками и корональными выбросами, отрицательно воздействует на космические аппараты, космические и наземные сегменты систем навигации, связи и сигнализации, нарушая их работу (вплоть до полного выхода из строя).

В годы минимумов солнечной активности поток галактических космических лучей во внутренней части Солнечной системы возрастает, поскольку в годы максимумов последствия выбросов вещества Солнца препятствуют их проникновению в эту область. Космические лучи, взаимодействуя с атмосферой Земли, приводят к появлению изотопов ^{14}C и ^{10}Be . Анализ содержания этих изотопов в древних остатках растений и в ледовых отложениях позволяет судить о солнечной активности в далеком прошлом.

Плохое понимание причин существования 11-летнего цикла не позволяет надежно предсказывать солнечную активность более чем на несколько лет вперед.

На протяжении десятков лет продолжают попытки научиться предсказывать солнечную активность. К сожалению, из-за плохого понимания физических механизмов солнечных процессов пока это делается только с использованием феноменологических методов. В настоящее время поведение цикла можно предсказать с достаточной точностью лишь спустя 2–3 года после его начала. При этом важным оказывается поведение Солнца во время предыдущего цикла.

1.4

Солнечные пятна, протуберанцы и все-все-все

Существует множество образований, связанных с солнечной активностью: пятна, протуберанцы, спикулы, факелы. Важную роль в структуре поверхности Солнца играют гранулы и супергранулы. Вспышки и корональные выбросы также связаны с различными активными процессами.

Поверхность (фотосфера) Солнца состоит из гранул — образований размером около 1000 км, живущих в среднем несколько минут. Своим существованием гранулы обязаны конвективным потокам, приносящим тепло из недр звезды. Центральная (светлая) часть гранулы соответствует восходящему потоку и имеет более высокую температуру. Относительно темные прожилки между гранулами соответствуют нисходящим потокам уже несколько остывшего вещества.

В середине XX в. на Солнце были обнаружены более крупные структуры — супергранулы. Как и гранулы, они связаны с конвективным переносом энергии во внешних частях Солнца.

Супергранулы имеют размеры в десятки тысяч километров и живут около суток. Их изучают, наблюдая скорости движения вещества в хромосфере Солнца.

Солнечная грануляция и сверхгрануляция возникают из-за конвективного перемешивания и переноса тепла во внешних слоях Солнца.

С конвективным переносом тепла связаны и самые известные детали на солнечном диске — пятна. Они наблюдаются как темные области размером от десятков до десятков тысяч километров. В пятнах сильные магнитные поля (достигающие в области тени — самой темной части пятна — нескольких тысяч гаусс) подавляют конвекцию, препятствуя переносу тепла снизу. В результате в области пятна поверхность Солнца имеет температуру около 3000–4000 К. Поскольку поток излучения с единичной площади пропорционален четвертой степени температуры излучающего тела, пятна выглядят намного темнее поверхности.

Крупные пятна иногда могут быть замечены даже невооруженным глазом, особенно если Солнце наблюдается сквозь дымку.

Поэтому существуют десятки письменных свидетельств наблюдения пятен в дотелескопическую эпоху. Кроме того, даже после изобретения телескопа пятна успешно наблюдали с помощью камеры-обскуры. Однако именно создание оптических приборов позволило приступить к систематическому изучению этого явления. Количество пятен на протяжении сотен лет служит мерилем уровня активности Солнца.

Пятна на диске Солнца темнее окружающей поверхности, поскольку имеют более низкую температуру. Это объясняется наличием сильных магнитных полей, препятствующих конвекции.

Процесс рождения пятна связан с крупномасштабной конвекцией и занимает несколько дней, а процесс разрушения пятна связан с мелкомасштабной конвекцией и занимает несколько недель. Поэтому можно наблюдать, как группа пятен исчезает за краем Солнца, а через пол-оборота появляется из-за противоположного края. Именно такие наблюдения позволили Галилею и его современникам открыть и измерить период вращения Солнца вокруг своей оси.

Яркие факельные поля компенсируют падение светимости Солнца из-за присутствия пятен.

Активные явления на Солнце в основном возникают благодаря сильным магнитным полям, и многие образования появляются именно в области пятен, где величина полей особенно велика. Поэтому солнечные пятна — и в пространстве, и во времени — являются хорошими индикаторами солнечной активности: их количество отражает общий уровень активности, а местоположение позволяет локализовать активные области на солнечном диске. В максимуме активности наблюдается намного больше пятен, и может показаться, что полная светимость Солнца в этот момент немного падает, поскольку на нем много темных областей. Однако на самом деле это не так: наоборот, в максимуме Солнце излучает на несколько сотых долей процента больше энергии, чем в минимуме. Этот эффект связан с наличием ярких горячих областей — факельных полей.

Факельные поля состоят из небольших магнитных элементов — магнитных трубок диаметром менее 300 км и с индукцией магнитного поля около 1000 Гс (это в несколько тысяч раз сильнее магнитного поля Земли). Магнитное поле подавляет конвекцию, однако более важно, что при этом формируется узкое углубление в фотосфере. Дно его более холодное, но стенки горячие, так как к ним подводится тепло из горячих соседних областей. В результате возникает область с повышенной яркостью. Факельные поля лучше

видны, если на них смотреть сбоку, и поэтому на солнечном диске они ярче видны вблизи лимба (на краю). Факельные поля часто связаны с областями солнечных пятен. Яркие факельные поля с лихвой компенсируют уменьшение светимости Солнца за счет большого количества темных пятен.

Протуберанцы могут подниматься над солнечным диском на сотни тысяч километров.

С активными областями связано и образование самых впечатляющих структур в атмосфере Солнца — протуберанцев. Существуют данные о том, что протуберанцы наблюдали во время солнечного затмения еще в XII–XIII вв. С появлением телескопов стали возможны более детальные наблюдения, однако первые несколько веков протуберанцы все равно в основном наблюдали во время затмений на краю солнечного диска. По этой причине часть астрономов связывала их не с Солнцем, а с Луной, и лишь с середины XIX в. окончательно сформировалось правильное понимание о природе протуберанцев как феномена в атмосфере Солнца. С появлением спектральных наблюдений в 1860-е гг. стало возможным наблюдать протуберанцы и вне затмений.

Протуберанцы — это аркоподобные структуры над солнечным диском, хорошо заметные на его краю. Это относительно холодные (5000–10 000 К) и плотные образования из хромосферного вещества, оказавшегося в разреженной горячей (около миллиона градусов) короне. Форма в виде арок объясняется поддерживающим действием магнитного поля. Если протуберанец проецируется на солнечный диск, то его обычно можно заметить как темное волокно при наблюдении в спектральной линии водорода H α . Гигантские протуберанцы могут иметь размеры сотни тысяч километров.

Менее впечатляющие структуры, возвышающиеся над солнечным диском, — спикулы. Эти короткоживущие «колонны» на несколько минут поднимаются на высоту до нескольких тысяч километров, а потом разрушаются. Одновременно на Солнце существует несколько сотен тысяч таких образований.

Однако, несмотря на большое количество детальных наблюдений, происхождение многих структур на Солнце и детали их эволюции остаются во многом загадкой. Как правило, для объяснения физических механизмов активных процессов на Солнце существуют конкурирующие модели.

1.5

Солнечная корона и затмения

На снимках полного солнечного затмения вокруг темного диска Луны, заслоняющего Солнце, можно увидеть сияние короны. Корона — это самые внешние, крайне разреженные (плотность порядка 10^{-12} от плотности фотосферы) слои солнечной атмосферы, имеющие высокую температуру (миллионы градусов) и простирающиеся вплоть до расстояний в несколько солнечных радиусов (миллионы километров), где она постепенно переходит в солнечный ветер. Из-за низкой плотности поверхностная яркость короны невелика, и на ярком фоне дневного неба она не видна, поэтому до 1930-х гг. ее можно было наблюдать исключительно во время затмений.

В 1930-е гг. были созданы первые внезатменные коронографы, позволяющие изучать корону постоянно, а не только в редкие моменты затмений. С началом эры космических полетов появилась возможность изучать солнечную корону из космоса, где не мешает фон неба, а также можно проводить наблюдения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, на которые приходится основное излучение горячей короны.

Солнечная корона имеет низкую плотность и высокую температуру.

Средняя температура короны составляет 1–2 млн градусов, однако во время вспышек в ней возникают области с температурой, достигающей 20–40 млн градусов. Условия в короне настолько экстремальны, что астрономы долгое время не могли идентифицировать одну из спектральных линий, открытых еще в XIX в., приписывая ее новому элементу — коронию. Лишь в конце 1930-х гг. удалось установить, что это линия железа, потерявшего 13 электронов.

Наблюдать корону можно либо во время затмений, либо с помощью специальных приборов, либо же из космоса в коротковолновых диапазонах спектра.

Излучение короны в оптическом диапазоне в основном определяется томсоновским рассеянием солнечного света на электронах, рассеянием излучения на пыли и излучением ионов в линиях. В коротковолновом диапазоне основной вклад дают свободно-свободные

переходы (так называемое тормозное излучение), а также, возможно, некоторый вклад вносит комптоновское рассеяние на горячих электронах. На корону приходится лишь около одной миллионной доли всего излучения, испускаемого Солнцем, в основном в ультрафиолете и рентгеновском диапазоне, однако корона является мощным источником радиоизлучения.

Вид короны зависит от уровня солнечной активности.

Корона обладает сложной, постоянно меняющейся структурой. Во многом это связано с магнитными полями, конфигурация которых изменяется со временем. Ионизированное вещество движется вдоль магнитных силовых линий. При этом в нижней короне (до высоты в сотни тысяч километров) именно давление магнитного поля является определяющим — там поле полностью контролирует поведение плазмы.

В короне возникают структуры самых разных масштабов. Современные наблюдения позволяют изучать образования размером в сотни километров и более. На разных этапах 11-летнего цикла солнечной активности корона имеет различный вид: в годы максимумов она более симметрична, а во время минимумов корональные структуры в основном сконцентрированы вблизи солнечного экватора, где обычно больше активных областей, а значит, и солнечных пятен.

Наблюдения, проведенные с помощью приборов спутника *Yohkoh* (1991–2005), позволили изучить структуры и магнитные поля солнечной короны и проследить их эволюцию на протяжении солнечного цикла. Получены прямые данные о пересоединении магнитных полей («замыкании» противоположно направленных силовых линий поля), что приводит к выделению энергии (излучению и нагреву вещества) и ускорению частиц. В настоящее время существует несколько космических проектов, в задачи которых входит изучение структур и процессов в солнечной короне.

Особый интерес представляют корональные дыры и корональные выбросы. Корональные дыры — это области открытых силовых линий магнитного поля, плазма из которых истекает наружу. Температура в корональной дыре падает ниже миллиона градусов, поэтому (а также из-за понижения плотности) в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах такая область короны выглядит более темной (существенно, что корональные дыры часто видны как темные области именно в проекции на солнечный диск). Также корональные дыры хорошо заметны при наблюдениях в некоторых спектральных линиях, формирующихся в короне. Можно сказать, что в периоды низкой солнечной активности обе приполярные области являются гигантскими корональными дырами. В годы высокой активности, когда корона

обладает большей сферической симметрией, дыры могут возникать на любых широтах. Истекая из корональных дыр, электроны и ионы формируют быструю компоненту солнечного ветра.

Корональные дыры являются одним из основных источников солнечного ветра.

Солнечный ветер — это поток плазмы, истекающий от Солнца. Для Солнца это небольшая потеря (лишь около одной миллиардной доли полной массы за 40 000 лет), но поток заряженных частиц может оказывать серьезное воздействие на тела Солнечной системы — именно он несет ответственность за полярные сияния и появление хвостов у комет. Выделяют две компоненты солнечного ветра: быстрый ветер (со скоростью 700–800 км/с) и медленный (400 км/с). Обе компоненты зарождаются в солнечной короне.

Корональные выбросы вещества впервые наблюдали в начале 1970-х гг. с помощью приборов спутника OSO-7 (Orbiting Solar Observatory). В основном выбрасывается вещество нижней короны. В момент возникновения будущий выброс имеет размер около 10 000 км, что соответствует размеру петли коронального магнитного поля (часто выбросы связаны с так называемыми шлемовидными стримерами — крупными, хорошо заметными петлевидными образованиями, чья форма напоминает прусские военные шлемы). Такие события наблюдаются достаточно часто, и на сегодняшний день зафиксировано более 10 000 корональных выбросов.

Корональные выбросы делят на два основных типа. Так называемые нормальные выбросы похожи на поднимающийся протуберанец с ярким ядром внутри петли (иногда это яркое ядро отсутствует). В них выделяют три части: яркую наружную петлю, темную полость сразу под ней и яркую область ниже. Второй тип выброса имеет вид узкой струи, они обычно связаны с корональными дырами.

Корональные выбросы оказывают большое влияние на космическую погоду.

Типичная масса выброса составляет 10^{11} – 10^{14} кг, около 15% выбросов имеет меньшие массы. Типичные скорости составляют сотни километров в секунду, но иногда могут отличаться на порядок (в 10 раз) в большую или меньшую сторону. Энергетика выбросов составляет порядка 10^{29} – 10^{32} эрг (10^{22} – 10^{25} Дж), что сравнимо с энергиями солнечных вспышек. Нередко вспышки и выбросы происходят одновременно. Однако корональные выбросы могут быть не связаны со вспышками, и, наоборот, вспышки не обязательно сопровождаются выбросом. Выбросы также хорошо коррелируют с появлением волокон (протуберанцев), которые

могут становиться яркими ядрами корональных выбросов. По темпу появления выбросов можно судить об этапе солнечного цикла: в минимуме выбросы появляются раз в несколько дней, а в максимуме — несколько раз в день. Корональные выбросы являются одним из определяющих факторов в так называемой *космической погоде*, они оказывают серьезное влияние на состояние межпланетной плазмы, магнитосферы планет, а также, разумеется, на работоспособность космических аппаратов.

Появление корональных выбросов коррелирует с общим уровнем солнечной активности.

Детали происхождения корональных выбросов остаются предметом споров. Однако очевидно, что основным источником энергии для большинства вспышек является магнитное поле.

В механизме нагрева короны и эволюции корональных структур остается много нерешенных проблем.

Долгое время нерешенным оставался вопрос о нагреве солнечной короны до высоких температур, в сто раз превосходящих температуру хромосферы и в сотни раз — температуру поверхности. Спутниковые наблюдения прояснили многие аспекты, однако в деталях этот вопрос до сих пор не решен. Тем не менее понятно, что основную роль играют магнитогидродинамические волны (волны в плазме, для существования которых важно присутствие магнитных полей), приносящие энергию от поверхности Солнца. Большое значение в механизме нагрева имеют также магнитные поля, простирающиеся от фотосферы до короны. Наблюдения показывают, что самые горячие области короны обычно связаны со структурами магнитного поля.

Несмотря на обилие космических аппаратов и наземных внеатмосферных коронографов актуальными остаются и наблюдения короны во время полных солнечных затмений. В частности, речь идет о спектрографии высокого разрешения (в первую очередь в линиях ионизованного железа) и поляриметрических наблюдениях в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. На спутниках наблюдения обычно проводятся в ультрафиолетовом и более коротковолновых диапазонах спектра. Вне затмений наземные коронографы не позволяют получать данные достаточно высокого качества, охватывающие одновременно всю корону. Поэтому «погоня за затмениями» все еще остается актуальным занятием для астрономов, изучающих солнечную корону. Альтернативой этому была бы установка достаточно крупных инструментов, работающих в видимом и ИК-диапазонах на спутниках. Причем лучше, если орбита спутников будет позволять регулярно видеть затмения Солнца

Луной (искусственное затмение не позволяет получать часть данных в требуемом качестве). Пока же только наземные наблюдения во время затмений позволяют разом изучать структуру короны от края диска до нескольких радиусов Солнца в диапазоне длин волн от 300 нм до нескольких микрометров. Причем важно проводить многократные наблюдения, поскольку структура короны постоянно меняется, в том числе и в зависимости от уровня солнечной активности.

1.6 Гелиосейсмология

Гелиосейсмология — молодая область исследований, позволяющая изучать внутреннее строение Солнца по наблюдению колебаний его внешних слоев. Процессы во внешней части конвективной оболочки порождают волны, распространяющиеся внутрь. Солнце в ответ на эти возмущения ведет себя как резонирующая полость (для упрощения попробуйте представить себе, что по резонирующей полости не бьют, а сыпят на нее песок). На определенной глубине происходит отражение волны, она возвращается во внешние слои и порождает наблюдаемые колебания. Анализ этих колебаний на разных частотах и пространственных масштабах позволяет восстановить свойства солнечных недр на всех глубинах конвективной оболочки, в лучистой зоне и даже в ядре, где идут термоядерные реакции!

Гелиосейсмология изучает внутреннюю структуру Солнца с помощью анализа колебаний его поверхности.

Наблюдаемые волны возбуждаются турбулентной конвекцией в приповерхностном слое, где скорость этого процесса наиболее высока. Однако в деталях механизма генерации волн остается немало неясностей. Волна, возбужденная вблизи поверхности, начинает распространяться внутрь со скоростью звука. Скорость звука в среде растёт по мере погружения вглубь Солнца, поэтому на некоторой глубине волна отражается и движется обратно к поверхности. Поверхность также отражает волны, но по другой причине — из-за скачка плотности. В результате волны оказываются «запертыми».

Существует три основных типа волн. Во-первых, это собственно акустические волны — р-волны (р — pressure, давление).

Они в основном присутствуют в конвективной оболочке и верхней части лучистой зоны. Во-вторых, g -волны (g — gravity), для которых важна архимедова сила. Этот тип колебаний в основном сконцентрирован в недрах Солнца, под конвективной зоной, поэтому наблюдать их очень сложно. Наконец, есть просто поверхностные гравитационные волны (не путать с гравитационными волнами в общей теории относительности!), которые обозначают буквой f . Чаще всего обсуждаются акустические p -волны.

Колебания поверхностных слоев измеряются по доплеровскому сдвигу при наблюдениях в спектральных линиях. Впервые это было обнаружено в начале 1960-х гг. Лейтоном и его соавторами (Robert Leighton, Robert Noyers, George Simon). Эти ученые открыли пятиминутные колебания Солнца (названы по продолжительности их периода) с амплитудой скорости несколько сотен метров в секунду и пространственными масштабами порядка тысяч километров. Это самые заметные вертикальные колебания атмосферы Солнца.

Волны возбуждаются вблизи поверхности Солнца турбулентной конвекцией.

Дальнейшие исследования показали, что наблюдаемые осцилляции с периодом около 5 минут — это стоячие акустические волны. Сейчас обнаружены колебания с периодами от 3 до 55 минут. Для их существования должно выполняться условие, сводящееся к комбинации длины волны (в горизонтальном направлении) и ее частоты. По сути, удается построить зависимость скорости звука от глубины.

Типичные периоды наблюдаемых колебаний Солнца составляют от нескольких минут до часа.

На распространение акустических волн влияют магнитные поля. Во-первых, они меняют параметры среды, изменяя и скорость звука. Во-вторых, поскольку вещество Солнца ионизовано, колебания среды с магнитным полем могут приводить к возникновению магнитогидродинамических волн. Из-за этого энергия акустических волн переходит в энергию волн магнитогидродинамических. К тому же магнитные поля могут оказывать влияние и на само возникновение волн, а не только на их распространение. Все это позволяет получать данные о магнитных полях в рамках гелиосейсмологических исследований. Правда, зачастую результаты оказываются зависимыми от выбранных моделей.

Кроме того, на колебания влияет вращение Солнца. В результате оказывается возможным определить, как меняется скорость вращения с глубиной на разных широтах. Также удается получить

данные о крупномасштабных потоках вещества в недрах Солнца (например, связанных с конвекцией).

Гелиосейсмологические данные играли важную роль в решении проблемы солнечных нейтрино. Именно анализ данных о солнечных колебаниях позволил подтвердить стандартную модель Солнца, показав, что решение проблемы должно быть связано со свойствами нейтрино, а не с неизвестными отклонениями от модели строения звезды.

Разные волны проникают на разную глубину, что позволяет определять условия в недрах Солнца.

Именно гелиосейсмологические данные позволили достаточно точно определить положение так называемой *тахолинии* — границы между лучистым ядром и конвективной оболочкой. Она залегает на глубине около 0,3 радиуса Солнца. В этом месте резко изменяется значение скорости звука. Видимо, именно эта область играет ключевую роль в работе солнечного динамо — в генерации (усилении) магнитного поля. Вообще же анализ р-мод (мода — тип колебаний) колебаний Солнца позволяет изучать его структуру от самых глубин (0,05 радиуса) до внешних слоев.

Анализ р-мод колебаний позволяет изучать структуру Солнца на глубине от 0,05 до 0,96 радиуса.

Кроме того, гелиосейсмологические данные помогают оценить содержание гелия в конвективной оболочке. Присутствие гелия меняет среднюю молекулярную массу вещества, что, в свою очередь, сказывается на скорости звука. Такие данные весьма важны, поскольку помогают определить начальное содержание гелия в Солнце.

Начиная с запуска спутника SOHO (Solar and Heliospheric Observatory — Солнечная и гелиосферная обсерватория) в 1995 г., основной поток гелиосейсмологических данных получают с помощью космических аппаратов (в настоящее время это в первую очередь спутник SDO — Solar Dynamics Observatory). Однако и наземные наблюдения тоже вносят свой вклад.

Для нужд гелиосейсмологии активно используют спутниковые наблюдения.

Кроме подходов, связанных с изучением глобальных мод солнечных осцилляций, позволяющих анализировать общие, стабильные на заметных временных интервалах характеристики Солнца, существует так называемая локальная гелиосейсмология. Задачей

этого подхода является исследование структур под солнечной поверхностью на относительно небольших пространственных и временных масштабах.

Волны могут распространяться вглубь Солнца по разным траекториям. На некоторой глубине произойдет отражение волны и ее возврат к поверхности, которая, в свою очередь, снова отразит волну, начав новый цикл. Испущенные в одной точке, но идущие по разным траекториям волны будут отражаться на разной глубине, а потому и на поверхность выйдут на разных расстояниях от точки генерации. Волна, распространяющаяся под небольшим углом к поверхности, отразится на меньшей глубине и выйдет на поверхность ближе к точке старта. Волна, уходящая вглубь почти по радиусу, до отражения может проникнуть глубже в недра Солнца и вернется к поверхности далеко от места генерации. Обработка данных дает возможность определить, сколько времени требуется волне для распространения от одной точки поверхности до другой. Из одной точки в другую волна может попасть разными путями: распространяясь вблизи поверхности и совершив много циклов отражения или совершив один цикл с отражением на большей глубине. При этом чем глубже уйдет волна, тем быстрее она проделает свой путь (на большей глубине скорость звука выше!). Измерение времени распространения в зависимости от пройденного пути, в свою очередь, позволяет решить обратную задачу по определению параметров в недрах (прямой задачей был бы расчет наблюдаемой картины при известных параметрах недр).

Такая методика позволила, в частности, обнаружить крупномасштабные подповерхностные потоки вещества, существующие вокруг активных областей. Локальная гелиосейсмология также позволила выяснить структуру подповерхностных потоков вещества в областях супергранул и под солнечными пятнами.

Локальная гелиосейсмология позволяет изучать внутреннюю структуру в локализованных областях, таких как пятна и супергранулы.

Подобно тому как недра Земли удается «просветить» благодаря мощным землетрясениям или подземным ядерным взрывам, недра Солнца зондируются сейсмическими волнами, возникающими при очень мощных солнечных вспышках. Это также входит в сферу интересов (и методов) гелиосейсмологии.

Дальнейшим развитием методов, разработанных для изучения Солнца, стала астросейсмология, но в этом случае изучаются колебания других звезд. Хотя мы не видим звездные диски в деталях, благодаря спутниковым наблюдениям (с помощью аппаратов CoRoT, MOST,

Kepler) удается получать данные о колебаниях звезд (и обычных, и гигантов). Эти данные помогли существенно пополнить запас наших знаний о структуре и эволюции звезд

1.7

Солнечные вспышки и их опасность

В 1859 г. впервые наблюдалась солнечная вспышка, которая до сих пор считается самой мощной из всех достоверно известных. Ее называют событием Каррингтона, в честь английского астронома-любителя Ричарда Каррингтона (Richard Carrington), который (как и Ричард Ходжсон (Richard Hodgson)) заметил яркую белую вспышку на Солнце, произошедшую 1 сентября 1859 г. Это был период высокой солнечной активности, с 28 августа по 2 сентября на Солнце были отмечены крупные группы солнечных пятен. Вспышка сопровождалась корональным выбросом, который достиг Земли 2 сентября (для этого ему понадобилось чуть менее 18 часов, т. е. скорость его составила более 2300 км/с). В результате были отмечены сильные магнитные возмущения, полярные сияния наблюдались даже на низких широтах (например, на Кубе), и функционирование телеграфных сетей было серьезно нарушено.

Самая мощная из достоверно известных солнечных вспышек наблюдалась в 1859 г.

С тех пор столь мощные вспышки, сопровождаемые гигантскими корональными выбросами, не были зарегистрированы (возможно, сравнимое событие произошло на Солнце в июле 2012 г., но выброс вещества не попал в Землю). Однако анализ отложений в ледяных ядрах, а также изучение годичных колец деревьев позволяют аргументированно предположить, что мощные солнечные вспышки происходили и ранее (например, в I тыс. н. э.). Как бы то ни было, и в наше время солнечные вспышки являются самыми мощными транзитными (т. е. происходящими время от времени) явлениями в Солнечной системе. Такие события являются потенциально опасными, поскольку они способны оказывать губительное влияние (в том числе необратимое) на электрические и электронные системы и устройства, наземную инфраструктуру и космические аппараты.

Основное излучение испускается вспышкой в хромосфере в видимом, ИК- и УФ-диапазонах электромагнитного спектра. Кроме того, несколько процентов энергии вспышки может уходить в рентгеновский диапазон. Радиосветимость Солнца (на этот диапазон обычно приходится крайне малая доля полной светимости) может во время вспышки возрасти на несколько порядков. Наконец, значительная энергия переходит в движение вещества и в ускорение частиц (последнее наблюдается в том числе по увеличению числа солнечных космических лучей и падению числа галактических космических лучей — так называемый эффект Форбуша).

Максимальная энергия хорошо изученных солнечных вспышек составляет более 10^{32} эрг (10^{25} Дж). Основная классификация вспышек по энергетике основана на потоке рентгеновского излучения от них и включает пять групп: А (самые слабые), затем В, С, М и Х (самые мощные). Внутри группы мощность обозначается цифрами. Так, С1 в 10 раз мощнее В1, а Х4 в два раза мощнее вспышки Х2. При этом мощность коронального выброса, а также светимость в видимом диапазоне лишь в среднем коррелируют с параметрами рентгеновского излучения. Самые мощные из наблюдавшихся за последние десятилетия (когда стали доступны прямые рентгеновские наблюдения и другие способы детального изучения вспышек) имеют обозначения > Х20. Например, вспышка, которой приписывают класс Х28, наблюдалась 4 ноября 2003 г., а событие Каррингтона предположительно можно оценить как вспышку класса Х40–Х45, хотя, конечно, точно восстановить энергетику этого события невозможно по причине отсутствия достоверных данных (рентгеновских наблюдений в то время не существовало).

Максимальная энергия известных солнечных вспышек составляет чуть более 10^{32} эрг.

Типичная длительность основной фазы вспышки составляет несколько минут. В это время наблюдается излучение в жестком рентгеновском диапазоне (тормозное излучение), а также в радиодиапазоне (гиротронное излучение). Примерно в это же время происходит и мощная вспышка в видимом диапазоне (подобная той, что наблюдали Каррингтон и Ходжсон). Вещество начинает двигаться наружу, попадая в солнечную корону. Там оно постепенно (на протяжении десятков минут) остывает, излучая в мягком рентгеновском, жестком ультрафиолетовом и, наконец, видимом диапазонах. В случае мощных вспышек заброс вещества в верхние слои приводит к появлению коронального выброса. Чем мощнее вспышка, тем больше вероятность того, что она сопровождается выбросом.

Слабых вспышек, разумеется, больше, чем мощных. Однако их число с уменьшением энергии вспышки растет не очень быстро

(дифференциальный рост числа вспышек в малом интервале энергий происходит медленнее, чем спадает квадрат энергии: $dN/dE \sim E^{-\alpha}$, где $\alpha < 2$). Эта зависимость, построенная по данным наблюдений, тянется от энергий, превосходящих 10^{32} эрг, до энергии менее чем 10^{24} эрг. В результате оказывается, что в мощных вспышках суммарно выделяется немного больше энергии, чем в слабых. В частности, это означает, что слабые вспышки не могут являться эффективным механизмом нагрева солнечной короны.

Вспышки чаще происходят вблизи максимумов солнечной активности, поскольку места локализации этих событий связаны с активными областями на Солнце (крайне редко вспышки классов M и X происходят в местах, где нет крупных пятен). Нередко мощные вспышки связаны с эруптивными протуберанцами, которые приводят к выбросам вещества. Однако зависимость числа вспышек от уровня активности слабее, чем для числа пятен. В минимумах количество вспышек падает не столь сильно, как количество активных областей.

Вспышки коррелируют с другими типами солнечной активности.

Мощные вспышки порождают динамические процессы в солнечной атмосфере. Одним из наиболее впечатляющих феноменов являются так называемые мортоновские волны, получившее свое имя в честь Гейла Мортона (Gail Moreton), который вместе с коллегами открыл и изучил их в конце 1950-х гг. Это явление получило также колоритное название «солнечные цунами»: в результате вспышки крупномасштабная ударная волна в короне порождает движение в более низких слоях. Мортоновские волны наиболее хорошо наблюдаются в хромосфере в спектральных линиях (например, в H α), их скорость составляет около 1000 км/с. Вспышка также вызывает сейсмические волны во внешних слоях Солнца.

Во время вспышки выделяется энергия, запасенная в магнитном поле. В механизме этого процесса остается пока много неясного.

Источником энергии вспышек является магнитное поле, сосредоточенное в основном в солнечной короне. В области пересоединения температура может возрастать до десятков миллионов градусов. Кроме того, частицы ускоряются до высоких энергий, достигающих несколько мегаэлектронвольт. К сожалению, микрофизика начала вспышек остается за пределами наблюдательных возможностей, поэтому для построения моделей в основном используются глобальные свойства вспышек, что приводит к неопределенностям в теоретических сценариях. При компьютерном моделировании одной из проблем является невозможность

охватить в расчетах очень разные масштабы: от относительно небольших в фотосфере до очень больших в короне, куда уходят магнитные поля. Соответственно, в физике солнечных вспышек есть ряд нерешенных вопросов. А это, в свою очередь, не позволяет прогнозировать появление сильных вспышек с достаточной точностью.

Вспышки и сопровождающие их выбросы представляют опасность для приборов и людей на космических аппаратах, находящихся за пределами земной магнитосферы. При разработке кораблей для межпланетных пилотируемых полетов даже обсуждаются специальные защитные помещения, позволяющие переждать периоды повышенной радиации, когда аппарат попадает в зону влияния коронального выброса. Кроме того, увеличенная светимость Солнца в жестком УФ-диапазоне во время возросшей активности служит причиной разогрева верхних слоев земной атмосферы (так называемой термосферы). В результате этого космические аппараты на низких околоземных орбитах тормозятся о «вспухшую» атмосферу и без корректировки могут даже преждевременно сойти с орбиты (наиболее известной иллюстрацией является американская орбитальная станция Skylab «Небесная лаборатория»).

Мощные вспышки часто сопровождаются корональными выбросами вещества. Попадание выброса в Землю приводит к сильным магнитным бурям, полярным сияниям и сбоям электронных систем.

Вспышка 13 марта 1989 г. привела к отключению систем электроснабжения в Канаде (влияние вспышек наиболее велико вблизи магнитных полюсов Земли). Событие относилось к классу X5–X15, т. е. это одна из самых мощных вспышек за историю серьезных наблюдений. Кроме того, она сопровождалась мощным корональным выбросом в сторону Земли. С тех пор были сделаны соответствующие выводы, что привело к изменениям в устройстве систем электропередач, трубопроводов и другой наземной инфраструктуры.

Данные наблюдений показывают, что звезды типа Солнца могут порождать мощные вспышки.

Могут ли на Солнце происходить гораздо более мощные вспышки? Есть косвенные данные по анализу содержания изотопов в образцах различных возрастов. Они свидетельствуют в пользу того, что наша звезда может давать вспышки на порядок-два мощнее известных, и происходит это примерно раз в 1000 лет. Более подробную статистику удастся собрать, наблюдая звезды, похожие на Солнце.

Наилучшую статистику удалось собрать по результатам работы спутника Kepler («Кеплер»), который изучал более 100 000 звезд с целью поиска экзопланет транзитным методом. Мощные вспышки проявляют себя как увеличение яркости звезды. Среди звезд, исследованных Kepler, есть немало объектов, похожих на Солнце как по массе, так и по другим параметрам. Среди этих параметров особое значение имеет темп вращения: чем быстрее вращается звезда, тем выше ее активность.

Возможно, примерно раз в 1000 лет на Солнце происходят вспышки в десятки раз мощнее, чем те, которые наблюдались за последние пару веков.

Наблюдения показали, что на звездах вроде Солнца вспышки с энергией 10^{34} эрг происходят раз в 800 лет, а 10^{35} эрг — раз в 5000 лет. Однако есть еще несколько вопросов, которые пока не имеют четкого ответа. По всей видимости, для мощной вспышки необходимо в одной области сформировать очень большое магнитное поле, чтобы получить большой магнитный поток. Этот процесс требует времени. По оценкам, для подготовки к вспышке с мощностью 10^{35} эрг на Солнце потребуется около 40 лет, а это больше продолжительности солнечного цикла. Поэтому в настоящее время представляется маловероятным, что Солнце в его современном состоянии может производить вспышки с энерговыделением более 10^{34} эрг (а это почти в сто раз больше вспышек X20–X30). Но даже вспышки таких энергий потенциально опасны для различной техники.

Очень важно понимать, что столь мощная вспышка не может произойти «на пустом месте». Потребуется время для роста активной области, а кроме того, наибольшая опасность связана с мощным корональным выбросом, а он может пройти мимо Земли. Поэтому, несмотря на то что мощные вспышки представляют вполне реальную опасность, они, по всей видимости, являются наибольшей угрозой для технических устройств, происходят относительно редко и к ним можно успеть подготовиться.

1.8

Эволюция Солнца и жизнь на Земле

Солнце — очень стабильный саморегулирующийся объект. Гравитация уравновешена давлением, связанным с выделением энергии в недрах. При увеличении энерговыделения Солнце немного расширилось бы, что привело бы к падению плотности и температуры в недрах, а тем самым и к падению энерговыделения. Если же, наоборот, энерговыделение уменьшилось, то Солнце бы немного сжалось, увеличив в центральных частях температуру и плотность, стимулируя тем самым термоядерный синтез.

Энергия передается из недр наружу очень медленно, весь процесс занимает многие десятки тысяч лет. Поэтому внезапное временное исчезновение источника энергии в центре сказалось бы на внешних слоях не сразу. Это добавляет стабильности на коротких временных масштабах.

Более того, даже если бы вдруг термоядерные реакции полностью прекратились, резких изменений не произошло бы даже за миллион лет. Это связано с тем, что Солнце обладает дополнительным источником энергии: просто сжимаясь, оно может поддерживать светимость на текущем уровне на протяжении примерно 30 млн лет (это так называемое время Кельвина — Гельмгольца). Разумеется, Солнце не оставалось бы весь этот период абсолютно неизменным: оно становилось бы меньше, изменялись бы его температура и светимость. Однако такая простая оценка показывает, что серьезные изменения нашей звезды возможны лишь на очень большом временном масштабе.

Солнце — очень стабильный источник излучения как на коротких, так и на длительных временных масштабах.

Иногда это характерное время называют ядерным, оно соответствует существенному исчерпанию водорода в ядре Солнца. Полное время жизни Солнца составляет около 12 млрд лет, и более 80% этого времени оно проводит на Главной последовательности, «пережигая» водород в гелий. Это стабильное состояние, однако небольшие изменения происходят с Солнцем и в этот период. Поскольку условия для существования жизни на Земле заданы достаточно

жестко, даже небольшие изменения параметров Солнца на масштабе миллиард лет могут иметь серьезные последствия.

Самым главным вопросом в контексте долговременной эволюции и появления жизни на Земле является так называемый *парадокс тусклого молодого Солнца*. В 1950-е гг. стало окончательно ясно, что светимость Солнца на стадии Главной последовательности возрастает. Ключевые работы на эту тему опубликовали в 1958 г. Фред Хойл (Fred Hoyle) и Мартин Шварцшильд (Martin Schwarzschild). Сейчас мы знаем, что к моменту окончательного формирования Земли солнечная светимость составляла около 70% от современной. В 1961 г. Альфред Рингвуд (Alfred Ringwood) отметил, что этот факт должен существенно влиять на ранний климат Земли. В 1972 г. Карл Саган (Carl Sagan) и Джордж Мулен (George Mullen) сделали эту проблему широко известной. В 1975 г. с легкой руки Роджера Ульриха (Roger Ulrich) появился сам термин «парадокс тусклого молодого Солнца» (faint young Sun paradox).

4,5 млрд лет назад светимость Солнца составляла 70% от современной.

Проблема заключается в том, что у нас есть надежные данные о существовании жидкой воды на поверхности Земли миллиарды лет назад. Однако добиться этого при столь низкой светимости Солнца непросто. Обсуждались самые разные гипотезы, но на сегодняшний день однозначного решения нет. Большинство исследователей склоняется к тому, что причиной теплого климата 3–4 млрд лет назад был парниковый эффект. Наиболее подходящими парниковыми газами считаются метан, углекислый газ и аммиак.

Парадокс тусклого молодого Солнца: как на Земле могла существовать жидкая вода при низком потоке солнечной энергии?

Другим важным аспектом, связанным со свойствами молодого Солнца, является его активность. Несмотря на меньшую полную светимость, наша звезда вращалась быстрее и поэтому была гораздо более активной. Это приводило к более мощному потоку ультрафиолета и рентгеновских лучей, а также к более интенсивному солнечному ветру. Все это оказывало заметное влияние на атмосферы планет. Возможно, именно эта активность молодого Солнца привела к тому, что в атмосфере Венеры почти не осталось воды, а Марс просто потерял большую часть атмосферы. Земная атмосфера в существенной степени защищена от солнечного ветра магнитосферой. Однако мощный поток ультрафиолета все равно приводил к разрушению молекул в атмосфере

и изменению ее состава (если разрушается водородосодержащая молекула — вода, метан и др., водород может затем легко покидать атмосферу, улетающая в космос).

Кроме постепенных изменений (в первую очередь роста светимости), происходящих на очень больших временных масштабах — в масштабе от сотен до тысяч лет, — в поведении Солнца имеются и более слабые изменения. Они также могут оказывать влияние на земную биосферу, да и просто представляют научный интерес. Для их изучения нужны особые методы, поскольку детальные данные наблюдений ограничены всего лишь несколькими столетиями, а теоретические модели не позволяют пока достоверно просчитать такие вариации.

Молодое Солнце было более активным.

Так, например, используя дендрохронологические данные (вариации свойств годичных колец древесины), Илья Усоскин и его коллеги в 2014 г. показали, что за последние 3000 лет на Солнце имело место несколько заметных минимумов активности. Кроме известных минимума Шпёгера (XIV–XV вв.) и минимума Маундера (XVI–XVII вв.) это два заметных минимума в VIII и IV вв. до н. э. и три менее выраженных минимума в VII, XI и XIV вв. На такие затяжные минимумы, когда на Солнце почти нет пятен, приходится до 16% времени.

Используя данные изотопного анализа, удается восстановить солнечную активность на масштабе около 10 000 лет.

Этот результат удалось получить благодаря анализу содержания углерода-14 в остатках растений. Происхождение этого изотопа связано с галактическими космическими лучами. Высокая солнечная активность мешает частицам лучей проникать внутрь гелиосферы, а в годы затяжных минимумов поток галактических космических лучей, наоборот, возрастает, при этом образуется больше изотопа углерод-14. Такой метод хорошо работает на масштабах сотен и тысяч лет.

Уровень солнечной активности сказывается на земном климате.

Можно использовать и данные по другим изотопам, таким как бериллий-10 (он также производится космическими лучами) в многовековых ледниковых отложениях. Та же группа исследователей в 2016 г. смогла оценить уровень солнечной активности на протяжении почти 10 000 лет, используя одновременно данные и по бериллию,

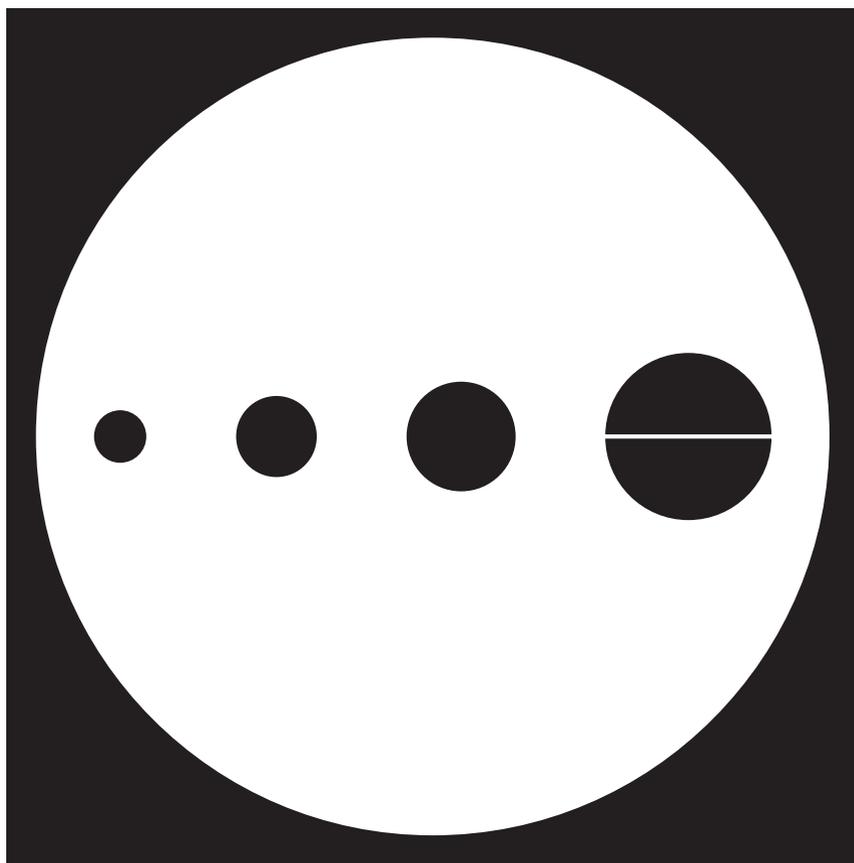
и по углероду. На этом интервале кроме минимумов (их обнаружено 20, они занимают 17% всего времени) выделяются и длительные периоды повышенной солнечной активности. Их выявлено 14, однако в состоянии *больших максимумов* Солнце проводит лишь 8% времени. Например, их было относительно много в VII тыс. до н. э. и на рубеже III–IV тыс. до н. э. Возможно, и сейчас Солнце находится в стадии большого максимума (по крайней мере, вторая половина XX в. была периодом высокой активности). Кроме того, исследователи обнаружили периодичность в изменении активности Солнца с периодом около 2400 лет, однако этот результат нуждается в уточнении и подтверждении. Как бы то ни было, эти выводы показывают, что изотопные данные принципиально возможно использовать для изучения поведения Солнца на масштабах тысяч лет.

Глобальные необратимые климатические изменения произойдут через миллиард лет, когда светимость Солнца возрастет на 10%.

Различные данные указывают на то, что уровень солнечной активности сказывается на земном климате. С теоретической точки зрения очень многое в солнечно-земных связях остается непонятным, однако с феноменологической точки зрения корреляция климатических изменений с уровнем солнечной активности на масштабе десятилетий присутствует. Механизмы этой связи продолжают обсуждаться. В частности, считается, что большую роль может играть сильное изменение потока ультрафиолетового излучения во время разных периодов активности. Ясно, что механизмов влияния может быть много, поскольку сама система земного климата очень сложна. Тем не менее возможности анализа свойств тропосферы, воздушных течений и других параметров позволяют говорить о значимых корреляциях с различными показателями активности Солнца. Но и здесь есть проблемы. Например, европейские данные свидетельствуют о том, что среднегодовые температуры в период маундеровского минимума были ниже. Однако данные по климату в других регионах Земли не подтверждают падение температуры. Возможно, влияние Солнца по-разному сказывается в разных частях нашей планеты.

Что же будет с Солнцем и климатом на Земле в будущем? Еще задолго до того, как Солнце превратится в красный гигант, температура на Земле повысится до уровня, при котором жизнь станет невозможна. Причиной этого будет продолжающийся рост светимости Солнца (он объясняется и непрерывным ростом радиуса, и ростом температуры, который закончится через 2,5 млрд лет). Это произойдет примерно через миллиард лет, когда светимость Солнца вырастет примерно на 10%. Океаны начнут активно испаряться, вызвав сильный

парниковый эффект, который приведет к еще более активному испарению (видимо, подобные явления в прошлом произошли на Венере, изменив ее климат). Почва прогреется на большую глубину, так что даже бактерии, живущие глубоко под землей, погибнут. В итоге, когда Солнце начнет уходить с Главной последовательности (в возрасте 10 млрд лет, т. е. примерно через 5,5 млрд лет), а его светимость будет на 84% выше современной, Земля уже более 4 млрд лет будет безжизненной. Позднее Земля может быть поглощена красным гигантом. Кстати, когда Солнце превратится в красный гигант, формально в зону обитаемости будут попадать объекты пояса Койпера.



Глава 2

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

2.1	Образование Солнечной системы	59
2.2	Планеты и их спутники	63
2.3	Астероиды	68
2.4	Пояс Койпера, Плутон и компания	73
2.5	Кометы и облако Оорта	77

Солнечная система возникла чуть более 4,5 млрд лет назад. В ее состав (помимо собственно Солнца) входят 8 планет, подразделяющихся на две группы: четыре планеты-гиганта (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун), находящиеся во внешней части системы, и четыре планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) — во внутренней. У большинства планет есть спутники, некоторые весьма значительных размеров (до нескольких тысяч километров). В настоящее время также выделяют пять карликовых планет (Церера, Плутон, Эрида, Хаумеа, Макемаке). Они оказались недостаточно массивны, чтобы очистить свои орбиты от более мелких объектов. Кроме того, в Солнечной системе присутствует множество тел размерами менее нескольких сотен километров, которые в первом приближении можно разделить на кометы, астероиды и совсем небольшие метеорные тела. И, наконец, еще одним важным компонентом Солнечной системы является межпланетная среда.

После этапа формирования, который занял более 10 млн лет, Солнечная система находилась в стадии медленной эволюции, на протяжении которой орбиты планет плавно менялись. Примерно через 600 млн лет этот период завершился бурным эпизодом неустойчивости орбит. После этого орбиты в основном приняли современный вид, в котором они, скорее всего, будут находиться еще около 6 млрд лет. Затем Солнце, исчерпав запасы водорода в ядре, начнет превращаться в красного гиганта, что снова приведет к катастрофическим изменениям во всей Солнечной системе.

2.1

Образование Солнечной системы

Возраст Солнечной системы составляет 4,567 млрд лет. Это очень точное значение получено в первую очередь на основе анализа содержания различных изотопов в образцах метеоритов. Неопределенность возраста не превышает пару миллионов лет.

Возраст Солнечной системы немного больше 4,5 млрд лет.

После стадии сжатия протозвездного облака и появления Солнца с протопланетным диском вокруг него в истории Солнечной системы можно выделить несколько важных этапов. Первый — это собственно образование планет. За несколько миллионов лет формируются планеты-гиганты. За несколько десятков миллионов лет — планеты земной группы. Кроме того, за орбитой самой далекой планеты-гиганта остается множество небольших тел — планетезималей. Затем, согласно современным теориям, следует примерно 600 млн лет «застоя», когда система меняется крайне мало. Однако потом происходит относительно быстрая ее перестройка. По ее окончании Солнечная система принимает практически современный вид, в котором и существует с тех пор на протяжении почти 4 млрд лет в почти неизменном состоянии.

Можно выделить три основных источника информации об истории формирования Солнечной системы и о процессах, происходивших при этом. Во-первых, данные по составу метеоритов и комет. Во-вторых, наблюдения многочисленных систем других звезд, находящихся на разных стадиях формирования. Наконец, современная структура нашей системы — в первую очередь орбиты малых тел (кометы, объекты пояса Койпера и т. п.) хранит на себе отпечатки ее бурной молодости.

Информацию о далеком прошлом Солнечной системы получают, изучая состав метеоритов, а также анализируя орбиты небольших тел.

Метеориты делятся на три основных типа. Ахондриты (вместе с хондритами их еще называют каменными метеоритами) и железные

метеориты представляют собой осколки крупных астероидов. Таким образом, их вещество уже прошло процесс дифференциации в массивном теле (более тяжелые вещества, такие как железо, под действием гравитации опускались ближе к центру). Третий тип метеоритов — хондриты — представляет собой вещество, не попадавшее в массивные тела, где под действием гравитации могла происходить дифференциация компонентов и их нагрев, или же это осколки внешних частей планетезималей, которые не подвергались дифференциации.

Возраст Солнечной системы устанавливают, анализируя содержание различных изотопов в метеоритах.

Ключевая датировка «момента ноль» в Солнечной системе производится по включениям кальция и алюминия в углистых хондритах. Эти небольшие (от долей миллиметра до сантиметров) образования сформировались в горячей среде в молодом протопланетном диске. Изотопный анализ говорит о том, что это самые древние структуры из всех обнаруженных в Солнечной системе. Короткоживущий изотоп ^{26}Al позволяет провести датировку с точностью в несколько миллионов лет. Использование нескольких изотопов разных элементов с разным временем жизни позволяет еще уточнить эту оценку. Согласно метеоритным данным, первое поколение планетезималей сформировалось менее чем за миллион лет.

В элементном составе метеоритов наблюдаются некоторые аномалии, требующие объяснения. Речь идет о присутствии короткоживущих изотопов на момент формирования первых планетезималей. К этому времени протосолнечная туманность уже миллионы лет как «отцепилась» от молекулярного облака, в котором возникла. Поэтому короткоживущие изотопы (например, ^{26}Al и ^{60}Fe) должны были стать очень редкими. Производить их в нужном количестве внутри протосолнечной туманности или протопланетного диска невозможно. Значит, необходим некоторый внешний источник изотопов с небольшим временем жизни. Обсуждаются две основные гипотезы.

Солнце образовалось в звездном скоплении, которое влияло на протопланетный диск и параметры орбит формирующихся объектов.

Солнце, как и подавляющее большинство других звезд, должно было рождаться в звездном скоплении. Значит, источником изотопов могла быть другая, относительно близкая, звезда. Это мог быть либо взрыв сверхновой, либо же звезда с сильным ветром на поздней стадии эволюции: например, на стадии асимптотической ветви

гигантов — позднем этапе эволюции звезд типа Солнца, на протяжении которого в звезде существует два слоевых источника, в которых идут термоядерные реакции: водородный и гелиевый (см. раздел 4.6 «Смена термоядерных реакций»). На настоящий момент у нас нет достаточного количества данных, чтобы отдать решающее предпочтение той или иной гипотезе.

Формирование планет-гигантов занимает до нескольких миллионов лет, а планет земной группы — до нескольких десятков миллионов.

Кроме обогащения протосолнечной туманности элементами звездное скопление могло оказывать еще два основных воздействия. Ультрафиолетовое излучение звезд скопления могло приводить к активному испарению вещества туманности. А близкие пролеты звезд — влиять на орбиты тел Солнечной системы. Эффективность и вероятность воздействия зависят от количества звезд в окрестности формирующегося Солнца. С одной стороны, взрыв сверхновой должен быть достаточно близким (0,2 парсека), а пролет проэволюционировавшей звезды — достаточно вероятным. С другой стороны, слишком частые и близкие пролеты звезд могут катастрофически влиять на внешние части формирующейся Солнечной системы, а ультрафиолетовое излучение от очень близкой сверхновой может разрушить протопланетный диск. Итоговые оценки показывают, что Солнце должно было родиться в скоплении из нескольких тысяч звезд, чтобы влияние было не слишком сильным, но достаточным для объяснения присутствия короткоживущих изотопов в нужном количестве.

Спустя примерно 600 млн лет после образования Солнечная система претерпела существенную перестройку орбит планет.

Частицы пыли в диске растут за счет столкновений и слипаний до размеров небольших камней (около сантиметра). В частности, это следует и из наблюдений протопланетных дисков у других звезд. Однако, как происходит дальнейший рост, мы точно не знаем. Рост частиц от размеров порядка сантиметра до километра не может проходить просто за счет столкновений. Во-первых, при ударе частицы разрушаются, а их гравитации еще недостаточно, чтобы удержать осколки от разлета. Во-вторых, торможение камней размером от сантиметров до метров в газе диска приводит к их слишком быстрому радиальному дрейфу в сторону Солнца. Рассматривают разные модели быстрого формирования достаточно массивных планетезималей, но полной ясности в этом вопросе пока нет.

Далее формирование планет-гигантов и планет земной группы протекает немного по-разному. У гигантов, состоящих в основном из газа, мало времени, так как газовый диск довольно быстро рассеивается. Поэтому вначале их твердые ядра должны быстро расти за счет столкновения планетезималей и аккреции мелких твердых тел. Дальше, если ядро набрало массу 10–20 земных, то оно успевает захватить достаточно газа для возникновения планеты-гиганта. Этот процесс занимает около миллиона лет. Небольшие железно-каменные планеты имеют больше времени для роста, поскольку им не нужен газ. Они набирают массу в первую очередь за счет столкновения планетезималей. Самая активная фаза этого периода занимает около 10 млн лет, хотя в дальнейшем более редкие столкновения могут происходить еще десятки миллионов лет. Столкновение Земли с крупным телом, произошедшее примерно спустя 60–100 млн лет после начала образования планет и приведшее к формированию Луны, можно считать одним из поздних эпизодов этого процесса. С тех пор Земля не испытывала столь мощных катаклизмов.

Важную роль в описании формирования планетной системы играет так называемая *снеговая линия*. Она соответствует расстоянию, на котором начинают замерзать летучие соединения: CO, H₂O и др. В молодой Солнечной системе она соответствует примерно 3 а. е. (значение различно для разных веществ). Таким образом, за орбитой Нептуна в основном формировались ледяные планетезимали, и они не смогли объединиться в единое крупное тело. Современный вид эта группа тел (классический пояс Койпера, рассеянный диск, плутино и другие объекты в резонансе с Нептуном) приняла в результате планетной миграции в первые сотни миллионов лет существования Солнечной системы. В первую очередь на орбиты этих тел влиял Нептун.

После эпохи поздней тяжелой бомбардировки Солнечная система практически не меняла свой облик.

Основой современного описания ранней эволюции Солнечной системы является так называемая *Ниццкая модель* (от города Ницца, где работали основные авторы этого сценария). В ней четыре планеты-гиганта формируются на расстояниях 5–17 а. е. от Солнца. Затем из-за взаимодействия с небольшими телами три внешние планеты (Нептун, Уран и Сатурн) медленно мигрируют наружу, а Юпитер — внутрь. В тот момент, когда орбитальные периоды Юпитера и Сатурна оказываются в отношении 1 к 2, система становится неустойчивой и происходит ее быстрая перестройка. Это случилось примерно спустя 600 млн лет после формирования Солнечной системы.

Примерно за 100 млн лет планеты-гиганты занимают свое современное положение. В ходе этой быстрой миграции Нептун

вторгается в рой ледяных планетезималей, формируя современный вид этой области. Около 99% тел оказываются выброшенными со своих орбит. Многие из них попадают во внешние части Солнечной системы, другие направляются во внутренние области. Происходит так называемая *поздняя тяжелая бомбардировка*. Попадая во внутренние части Солнечной системы, планетезимали могут сталкиваться с уже сформировавшимися планетами и их спутниками. Анализ лунной поверхности, а также многих других тел в Солнечной системе показал, что множество крупных кратеров имеют примерно одинаковый возраст — 3,8–4 млрд лет, что соответствует периоду поздней тяжелой бомбардировки. На этой же стадии Юпитер и Нептун собирают «троянские» астероиды в окрестности точек Лагранжа, а многие планеты (например, Уран и Сатурн) захватывают свои спутники.

После этого Солнечная система становится относительно стабильной на миллиарды лет. Численные расчеты показывают, что без мощного внешнего влияния орбиты планет будут оставаться достаточно стабильными вплоть до ухода Солнца с Главной последовательности.

2.2

Планеты и их спутники

В Солнечной системе насчитывается восемь больших планет. Половина из них относится к планетам земной группы. Они имеют железно-каменный состав и располагаются на расстояниях от 0,4 (Меркурий) до 1,5 а. е. (Марс) от Солнца. Вторая половина — это планеты-гиганты. Их ядра состоят из более тяжелых элементов, но основная масса находится в плотных оболочках, где главными составляющими являются водород и гелий (у Юпитера и Сатурна) и углерод, кислород и азот (у Урана и Нептуна). Они находятся на расстояниях от 5,2 (Юпитер) до 30 а. е. (Нептун). Иногда Уран и Нептун выделяют в отдельный подкласс ледяных гигантов. У всех планет, кроме Меркурия и Венеры, есть спутники, а у планет-гигантов также присутствуют системы колец.

Астрономическая единица (а. е.) — это расстояние от Земли до Солнца, примерно равное 150 млн км.

Пять планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн — видны невооруженным глазом и известны с древности. Уран был

открыт Уильямом Гершелем (William Herschel) в результате обзоров неба в 1781 г. Нептун был обнаружен в 1846 г. Иоганном Галле (Johann Gottfried Galle) на основе расчетов Урбена Леверье (Urbain Jean Joseph Le Verrier) (расчеты положения Нептуна на основании отклонений в движении Урана также проводил Джон Адамс (John Couch Adams)). В 1930 г. Клайдом Томбо (Clyde William Tombaugh) в результате специальных обзорных поисков был открыт Плутон, ставший девятой планетой. Однако в 2006 г. Плутон потерял статус планеты из-за обнаружения крупных транснептуновых объектов, в основном входящих в пояс Койпера.

Все планеты в той или иной степени были исследованы с помощью космических аппаратов. Наиболее хорошо изученными являются Марс, Венера, Юпитер и Сатурн.

Планеты Солнечной системы делятся на гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) и планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс).

Планеты формировались из вещества той же протосолнечной туманности, из которой сформировалась наша звезда. Самым распространенным элементом в ней был водород, затем гелий и только потом тяжелые элементы. Это объясняет, почему самые массивные газовые планеты в основном состоят именно из водорода и гелия. Несмотря на хорошее понимание среднего состава планет, многие детали внутреннего строения остаются неясными, поскольку исследования недр затруднены даже для Земли. Кроме того, современный уровень знаний не позволяет с надежностью говорить о поведении вещества в недрах планет из-за сочетания высокой плотности и давления.

Содержание элементов в протосолнечной туманности (отражающее вообще содержание элементов во Вселенной) налагает ограничения на возможный состав планет. Небольшие твердые планеты (или ядра более крупных тел) могут состоять из железа или «камней», которые в основном включают в себя магний, кремний и кислород. Ледяные тела состоят в основном из углерода, кислорода и азота, которые вместе с обильным водородом образуют такие соединения, как H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2 и др.

В целом состав планет определяется распространенностью элементов во Вселенной.

Внутри планет сегрегирующее действие гравитации заставляет тяжелые элементы постепенно опускаться в центральную часть. Поэтому планеты земного типа могут иметь железные ядра, а гиганты, подобные Урану и Нептуну, — богатые водородом и гелием внешние оболочки,

покрывающие слои льдов (существующих в виде очень плотного газа или жидкости, а не твердого вещества), под которыми находится ядро из более тяжелых элементов.

Несмотря на многие сходные черты, планеты земной группы существенно отличаются друг от друга. Это касается не только их атмосфер (отсутствие таковой у Меркурия, разреженная атмосфера Марса, достаточно плотная у Земли и очень плотная у Венеры), но и их недр, что в первую очередь отражает различия в их массах, поскольку состав планет примерно одинаков (хотя, например, Меркурий содержит немного больше железа относительно кремния, чем другие три планеты, а Марс может иметь несколько меньше железа). Земля, будучи самой массивной, обладает более сложной внутренней динамикой, что выражается в активном вулканизме (сохранившемся и в наши дни, в отличие от Марса и Венеры) и движении литосферных плит (которое отсутствует у других планет земной группы). Есть предположения, что литосферная динамика является необходимым условием для появления жизни, подобной земной.

Марс почти в 10 раз легче Земли, не имеет мощного магнитного поля и в настоящее время обладает довольно разреженной атмосферой. Однако недавние исследования показали, что в прошлом ситуация на Марсе могла быть иной. В частности, на его поверхности в больших количествах могла существовать жидкая вода, о чем свидетельствует анализ некоторых минералов. Возможно, в далеком прошлом этой планеты мощный вулканизм привел на какое-то время к существованию более плотной атмосферы и жидкой воды на поверхности.

Климат Марса и Венеры в далеком прошлом был иным.

Венера, несмотря на отсутствие магнитного поля, наоборот, имеет очень плотную атмосферу, в основном состоящую из CO_2 . Из-за этого мощнейший парниковый эффект привел к очень высокой температуре на поверхности (около 450°C). Возможно, в далеком прошлом условия на Венере были гораздо более мягкими, пока парниковый эффект не начал существенно менять климат.

По составу и строению планеты-гиганты удобно разделить на две группы, поскольку более массивные Юпитер и Сатурн в основном состоят из водорода и гелия, в то время как более легкие Уран и Нептун имеют лишь относительно небольшие (по массе) самые внешние оболочки из этих легких элементов.

В Юпитере общая масса элементов тяжелее гелия может составлять до 40 масс Земли. Масса ядра при этом около 10 масс Земли. У Сатурна, в состав которого входит примерно 20–30 масс Земли в виде тяжелых элементов, ядро более тяжелое — от 10

до 20 земных масс. Расчеты показывают, что ядра этих планет не могут находиться в твердом состоянии, так что эти гиганты, вероятно, не имеют твердых составных частей (ни в ядре, ни во внешних оболочках), и потому конвекция играет большую роль в их структуре и эволюции. Нептун, по всей видимости, также не имеет твердого ядра. Ситуация с Ураном более сложная. Не исключено, что у этой планеты есть небольшое твердое ядро. Все планеты-гиганты обладают достаточно сильным магнитным полем, особенно Юпитер.

Внешние слои планет-гигантов — это толстые газовые оболочки. Поскольку все четыре гиганта быстро вращаются, мы видим их атмосферы «полосатыми» из-за зональных ветров, а ориентация полос перпендикулярна оси вращения. В верхних слоях дуют сильные ветры и возникают крупномасштабные вихревые структуры (самая известная из них — Большое красное пятно на Юпитере), связанные с штормовыми явлениями в атмосфере. Также из-за быстрого вращения все планеты-гиганты заметно сплюснуты.

Все четыре планеты-гиганта имеют системы колец. Самая большая и известная из них — у Сатурна. Еще в 1610 г. ее наблюдал Галилео Галилей, однако понять, что речь идет именно о кольцах, удалось лишь спустя несколько десятилетий Христиану Гюйгенсу (Christiaan Huygens). В наши дни наиболее детальные данные по кольцам Сатурна получены межпланетной станцией Cassini («Кассини»). Кольца Урана и Нептуна были открыты при наземных наблюдениях покрытий этими планетами звезд во второй половине XX в. А вот кольца Юпитера как следует разглядел только космический аппарат Voyager 1 («Вояджер-1»).

Планеты-гиганты (кроме, возможно, Урана) не имеют твердых ядер или оболочек.

В вопросе происхождения колец остается много неясного. Кольца Юпитера состоят из мелких пылинок размером порядка микрометра. За появление этой пыли отвечают близкие спутники (Амальтея и др.), которые постоянно бомбардируются микрометеоритами. Без них кольца исчезли бы за сотню тысяч лет. Кольца Урана и Нептуна, по-видимому, старые, их возраст может составлять миллиарды лет. Красивые кольца Сатурна могут в основном состоять из вещества, попавшего туда достаточно давно, но структура колец со временем должна меняться, так что современный облик колец, видимо, не старше нескольких десятков миллионов лет.

Спутники делятся на регулярные и иррегулярные. Первые из них имеют почти круговые орбиты, лежащие вблизи плоскости экватора. Орбиты иррегулярных могут быть сильно наклонены к экватору планеты, вытянуты, а кроме того, направление вращения может

быть обратным. Считается, что регулярные спутники в основном образовались вместе с планетами, а иррегулярные были захвачены впоследствии.

Спутники планет-гигантов могут быть достаточно крупными. Самым большим (если считать массу и радиус твердой поверхности) является спутник Юпитера Ганимед. Он в два раза тяжелее Луны, а по размерам превосходит Меркурий. Спутник Сатурна Титан лишь немногим меньше и легче, но зато он имеет плотную атмосферу, и его видимый размер больше, чем у Ганимеда.

Все планеты-гиганты имеют системы колец.

По всей видимости, четыре крупнейших спутника Юпитера (так называемые галилеевы спутники — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто), как и Титан, образовались вместе с планетой. Это регулярные спутники. А вот большой спутник Нептуна Тритон, который лишь втрое легче Луны, вероятно, был захвачен ледяным гигантом во время миграции в эпоху поздней тяжелой бомбардировки.

Для Луны был предложен особый механизм формирования, отличный от прочих спутников. Весь комплекс данных говорит о том, что примерно спустя 60–100 млн лет после образования Солнечной системы Земля столкнулась с массивным телом (по массе сравнимым с Марсом) и в результате этого катаклизма у нашей планеты появился необычно крупный спутник, чья масса составляет более 1% массы Земли. В некоторых сценариях Луне отводится важная роль в эволюции Земли, в том числе в развитии жизни.

Луна сформировалась в результате столкновения молодой Земли с крупным телом.

Некоторые из спутников считаются кандидатами в обитаемые миры. Разумеется, речь может идти лишь о простейших формах жизни. В первую очередь потенциально обитаемыми считают подледные океаны, которые есть, например, на спутнике Юпитера Европе и спутнике Сатурна Энцеладе. Также существуют экзотические модели, в которых обсуждается потенциальная обитаемость Титана. При этом метаболизм гипотетических организмов должен принципиально отличаться от такового у земных существ. Наличие толстой азотной атмосферы (давление на поверхности сравнимо с земным) и озер из жидких углеводородов дает основания для таких экстравагантных гипотез.

2.3

Астероиды

Термин «*астероиды*» объединяет большую группу объектов Солнечной системы с довольно разными свойствами. В первую очередь их роднит то, что по размерам они уступают карликовым планетам (размеры астероидов менее 600 км) и не являются спутниками других тел (кроме разве что в редких случаях других астероидов). Кроме того, они обычно отличаются от комет, не проявля бурной активности в виде выбросов газа и пыли при приближении к Солнцу (хотя бывают и важные отклонения от этого общего правила). Нижняя граница размеров астероидов не определена жестко: в настоящее время самые маленькие объекты, классифицированные как астероиды, имеют размеры около метра. Так что определение астероида не является достаточно строгим, и зачастую необходима более тонкая классификация.

Первый обнаруженный астероид, Церера, был открыт 1 января 1801 г. итальянским астрономом Джузеппе Пиацци (Giuseppe Piazzi). Церера с размерами около 1000 км является самым крупным объектом, когда-либо отнесенным к классу астероидов. Интересно, что изначально Церера была классифицирована как планета, но позднее, по мере обнаружения более мелких астероидов, она стала считаться одним из них. А с начала XXI в. в связи с новым изменением классификации Церера относится к классу карликовых планет (вместе с Плутоном и некоторыми другими транснептуновыми объектами).

Основная доля астероидов располагается в Главном поясе между орбитами Марса и Юпитера.

Сейчас самыми крупными астероидами являются Паллада и Веста с размерами около 500 км. Как и Церера, и множество более мелких объектов, они относятся к Главному поясу астероидов. Он располагается между орбитами Марса и Юпитера (примерно от 2,2 до 3,2 а. е.). В него входит более миллиона тел с размером от километра и больше, около трети из этого количества уже идентифицировано.

В последние годы открытия в основном совершаются в рамках автоматизированных обзоров, позволяющих обнаружить десятки новых тел в день. Подавляющее большинство астероидов не имеет собственных имен, у них есть лишь обозначения (например, 2016 GE₁). До сих пор работает правило, согласно которому первооткрыватель может

предложить имя открытого им астероида с хорошо установленной орбитой (хотя в регламенте существуют ограничения на присваиваемые имена), но окончательное решение принимает Международный астрономический союз (МАС). На сегодняшний день более 20000 астероидов получили собственные имена, среди которых Хокинг, Зельдович, Хаббл и др.

Юпитер сильно влияет на орбиты астероидов Главного пояса.

На орбиты астероидов Главного пояса основное влияние оказывает Юпитер. В связи с этим (а также с влиянием других тел, например Сатурна) траектории движения распределены неравномерно, т. е. не случайным образом. За время существования Солнечной системы астероиды совершили около миллиарда оборотов вокруг Солнца, поэтому регулярные воздействия массивных тел «выстроили» их орбиты определенным образом, заставив занять устойчивые положения. Например, выделяется две группы астероидов, связанных с Юпитером и движущихся вблизи его орбиты. Одна группа опережает Юпитер на 60° , а другая — отстает. Первая группа носит название «греки» (Ахиллес, Агамемнон, Аякс и др.), а вторая — «троянцы» (Парис, Приам и др.)¹. Свои троянцы есть и у Нептуна (вообще устоялась терминология, в которой подобные группы тел — как отстающие, так и опережающие планету — называют троянцами, в том числе и у Юпитера).

Существуют группы астероидов, орбиты которых пересекают земную, все время оставаясь недалеко от нее. Иногда их обобщенно называют астероидами, сближающимися с Землей (или околоземными астероидами, от англ. Near-Earth asteroids — NEA), однако это не означает, что они все время находятся рядом с нашей планетой и постоянно представляют угрозу. Сейчас к околоземным астероидам относят около 15000 тел, среди которых около тысячи имеют размер более километра. Ни один из этих объектов не является опасным на промежутке времени, для которого существуют достаточно точные расчеты.

Для астероидов, сближающихся с Землей, были получены детальные карты с помощью радаров.

Разумеется, столкновения с крупными астероидами, пусть и редкие, должны приводить к катастрофическим последствиям. Популярны сценарии, в которых глобальные вымирания видов на Земле связывают с падением большого небесного тела. Для этого астероид

¹ Гектор и Патрокл находятся не в своих «лагерях», поскольку они были названы до того, как была принята эта традиция именования астероидов.

должен иметь размеры порядка нескольких километров. Тело размером в сотни метров может вызвать локальную катастрофу, если упадет на достаточно населенный район. Однако стоит иметь в виду, что большая часть земной поверхности покрыта океанами, морями, пустынями и лесами, так что вероятность падения тела на густонаселенный участок мала. В настоящее время работает несколько программ по мониторингу потенциально опасных объектов.

Сближение астероидов с Землей позволяет подробно рассмотреть их. Правда, в основном это делается не с помощью оптических телескопов, угловое разрешение которых недостаточно из-за влияния атмосферы. Для этого используют радары (например, трехсотметровую антенну в Аресибо), и в некоторых случаях такое зондирование позволяет распознать детали поверхности размером в несколько метров. В частности, такие наблюдения позволили надежно показать, что среди астероидов встречаются двойные (есть даже тройные астероиды, например Клеопатра).

Двойственность астероидов была заподозрена и ранее по результатам изучения их кривых блеска. Однако без детальных наблюдений трудно разделить эффект вращения объекта неправильной формы от обращения двух тел друг вокруг друга. Астероиды, как правило, имеют сложную форму, поскольку они недостаточно массивны, чтобы гравитация выровняла их, придав сферическую форму. Все астероиды размером менее 10 км наверняка являются осколками столкновений, что объясняет и их неправильную форму, и вращение.

Вращение астероидов может быть очень быстрым. Это особенно верно для самых маленьких тел размером менее нескольких сот метров, некоторые из них при размере около 10 м делают оборот менее чем за минуту. Наблюдения близких двойных астероидов позволяют измерить их массу, а значит, и среднюю плотность. Она оказывается достаточно низкой — около $1\text{--}2 \text{ г/см}^3$. Это означает, что астероиды имеют довольно пористую структуру.

Существуют двойные и быстро вращающиеся астероиды.

Кроме астероидов Главного пояса есть еще одна большая группа малых тел — пояс Койпера. Иногда его еще называют поясом Эйджворта — Койпера в честь Кеннета Эйджворта (Kenneth Edgeworth) и Джерарда Койпера (Gerard Kuiper). Свои идеи и гипотезы о существовании большого числа транснептуновых тел они начали развивать в 1940–1950-е гг. Однако лишь в конце 1980-х — начале 1990-х гг. развитие техники наблюдений позволило начать массовое обнаружение небесных тел с размерами порядка крупных астероидов за орбитой Нептуна.

Еще одна существенная группа объектов — кентавры. Это название отражает тот факт, что они объединяют свойства астероидов и комет. Во-первых, многие из них, подобно кометам, двигаются по очень вытянутым орбитам с большими эксцентриситетами (классический пример — астероид Хирон, орбита которого имеет эксцентриситет примерно 0,4). Во-вторых, некоторые из кентавров демонстрируют кометную активность, они выбрасывают газ, формирующий вокруг них оболочку — кому. Это говорит о том, что нельзя просто классифицировать кометы как ледяные объекты, а астероиды — как каменные или железно-каменные. Среди астероидов также встречаются объекты с большим содержанием замороженных летучих веществ.

Некоторые астероиды включают большое количество замороженных летучих соединений.

Есть и другие интересные примеры полуастероидов-полукомет. В 1979 г. было открыто малое тело 1979 OW7, которое сейчас имеет двойное наименование: кометное 133P/Elst-Pizarro и астероидное 7968 Elst-Pizarro (назван в честь Эрика Елста и Гуидо Пизарро (Eric W. Elst, Guido Pizarro)). Это первая так называемая *комета Главного пояса*. Всего их известно около десятка.

Таким образом, астероиды, будучи все-таки по преимуществу объектами из силикатов и железа, могут включать в себя значительные массы льда, в том числе водяного. В некоторых моделях предполагается, что наряду с кометами астероиды играли роль в доставке воды на молодую Землю, поскольку в ряде сценариев сразу после формирования наша планета не обладала достаточным запасом воды, чтобы объяснить наблюдаемое сейчас количество этого важнейшего для жизни вещества.

Для дюжины астероидов были получены изображения с близкого расстояния с помощью межпланетных станций.

Существуют модели, в которых значительное количество железно-каменных астероидов вскоре после своего рождения на расстоянии менее 3 а. е. от Солнца было выброшено массивными планетами на высокие орбиты. Сейчас такие объекты должны находиться в облаке Оорта, а их количество на порядки превосходит число астероидов во внутренней Солнечной системе.

Некоторые астероиды были в деталях исследованы космическими аппаратами с близкого расстояния. Первыми стали Гаспра и Ида, мимо которых в 1991 и 1993 гг. соответственно пролетел

космический аппарат Galileo («Галилео»), направлявшийся к Юпитеру. При этом удалось получить высококачественные изображения поверхности. Затем с помощью аппарата NEAR в 1997–1998 гг. были исследованы астероиды Матильда и Эрос. Сейчас существует около десятка околоземных астероидов (NEA) и астероидов Главного пояса, для которых с помощью различных межпланетных станций получены снимки поверхности в высоком разрешении, что позволяет исследовать их особенности и обсуждать эволюцию.

Под действием солнечного ветра и микрометеоритов поверхность астероидов подвергается выветриванию.

Отметим несколько интересных фактов. Во-первых, на астероидах обнаружены крупные валуны. Например, астероид Итокава прямо-таки завален ими. В основном валуны, видимо, связаны с падением на астероиды других тел. Продуктами столкновения и являются наблюдаемые камни. В случае Итокавы, однако, валунов слишком много, поэтому выдвигаются и другие гипотезы: например, они могли попасть на астероид в процессе образования Итокавы после разрушения более крупного тела.

Искусственные аппараты совершали посадки на астероиды, и однажды пробы грунта были доставлены на Землю.

Во-вторых, поверхность астероидов подвергается космическому выветриванию под действием солнечного ветра и микрометеоритов. Некоторые астероиды имеют относительно молодую поверхность (миллионы лет), поскольку являются продуктом недавних столкновений. У других поверхность более старая, возраст которой может исчисляться сотнями миллионов лет (как правило, такие астероиды темнее).

Разрабатываются проекты пилотируемых миссий к астероидам и возможности их промышленного использования.

Кроме фотографий с близкого расстояния в двух случаях у нас есть существенно более детальные данные об астероидах. В феврале 2001 г. спутник NEAR смог совершить мягкую посадку на астероид Эрос. В течение двух недель устройство передавало информацию с поверхности: в частности, с помощью гамма-спектрометра удалось получить точную информацию о составе грунта.

Еще более впечатляющий результат был достигнут в ходе проекта Hayabusa японского космического агентства. Аппарат в 2005 г.

совершил посадку на астероид Итокава, а затем вернул образцы грунта на Землю. Миссия проходила с рядом технических трудностей, однако их удалось преодолеть, и в 2010 г. драгоценный груз попал в руки ученых.

Сейчас в NASA активно разрабатываются проекты пилотируемых миссий по изучению астероидов: в частности, предполагается захват и буксировка небольшого околоземного астероида. Также существуют проекты частных компаний по промышленному использованию этих объектов.

2.4

Пояс Койпера, Плутон и компания

За орбитой Нептуна располагается множество объектов, уступающих в размере и массе большим планетам, которые объединяют под общим наименованием *транснептуновые*. Также родственными им являются так называемые околонептуновые (*cis-neptunian*) объекты. В основном это тела с большим содержанием льдов, некоторые из них имеют достаточно большие размеры и классифицируются как карликовые планеты. Это Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида (пятой карликовой планетой на сегодняшний день является Церера в Главном поясе астероидов). Суммарная масса тел в этой области составляет доли массы Земли (что немало). Таким образом, количество мелких объектов, таких как кометные ядра, здесь очень велико.

На расстоянии 40–50 а. е. от Солнца находится большая группа транснептуновых объектов.

Транснептуновые объекты в зависимости от характеристик их орбит делят на несколько групп. Главными являются классический пояс Койпера и так называемый рассеянный диск (*scattered disc*). Иногда их объединяют под общим названием *пояс Койпера*. Объекты классического пояса в основном располагаются на расстояниях 42–48 а. е. Они имеют небольшие эксцентриситеты (менее 0,2), и плоскости их орбит лежат вблизи плоскости эклиптики. Тела в рассеянном диске в свое время сильно провзаимодействовали с Нептуном, поэтому их орбиты могут быть существенно наклонены к плоскости эклиптики,

а также они могут иметь заметные эксцентриситеты (до 0,6). Большие полуоси их орбит достигают 100 а. е. Суммарная масса тел классического пояса Койпера составляет около 0,001 земной (в основном она сконцентрирована в телах с размерами около 50 км). Самым массивным телом является Макемаке, у которого в 2016 г. был открыт спутник. Масса рассеянного диска на пару порядков больше.

Основную часть транснептуновых объектов относят к так называемому поясу Койпера.

Возможность существования аналога пояса астероидов на занептуновых орбитах обсуждалась с 1930-х гг. Вскоре после обнаружения Плутона Фредерик Леонард (Frederick C. Leonard) высказал гипотезу, что это лишь первое из многих подобных тел, которые будут открыты за Нептуном. В 1943 г. Кеннет Эйджворт предположил, что при образовании Солнечной системы мелкие тела не могли образовать крупную планету за Нептуном и поэтому должны образовывать некий аналог пояса астероидов. Койпер высказал свой вариант гипотезы лишь в 1951 г. Были и другие ученые, которые на основе более надежных идей или наблюдений предсказывали существование популяции транснептуновых объектов, однако по историческим причинам известная нам теперь структура чаще всего называется поясом Койпера.

Гипотезу о большом количестве транснептуновых тел, образующих единую структуру, на протяжении нескольких десятилетий развивали многие ученые. Однако обнаружить небольшие тела на таких больших расстояниях непросто. Первый объект пояса Койпера был открыт в 1992 г. Это тело, пока обозначаемое как 1992 QB1, обнаружили Дэвид Джевитт и Джейн Луу (David Jewitt, Jane Luu). Сейчас регулярно происходят обнаружения новых транснептуновых объектов и разрабатываются проекты космических миссий для их исследования. Также обсуждается гипотеза о возможном существовании достаточно крупного тела далеко за орбитой Нептуна, на расстоянии 200–300 а. е.

Первый объект в поясе Койпера был открыт в 1992 г.

В дополнение к классическому поясу Койпера и рассеянному диску среди транснептуновых тел выделяют объекты, находящиеся в орбитальном резонансе с Нептуном. Это означает, что их орбитальные периоды находятся в целочисленном отношении к орбитальному периоду Нептуна: например, как 3:2 (Плутон и плутино — небольшие тела примерно с тем же орбитальным периодом), 2:1, 5:2 и т. д. Отдельно можно отметить околонептуновые объекты с резонансом 1:1, это троянцы Нептуна, орбитальное движение которых подобно движению троянцев и греков Юпитера. Наконец, уже внутри орбиты Нептуна,

находятся кентавры, названные так по первому объекту этого типа — астероиду Хирон. Видимо, эти тела недавно ушли из пояса Койпера. На современных орбитах они смогут просуществовать лишь около 10 млн лет, а в дальнейшем из-за взаимодействия с планетами-гигантами их орбиты существенно изменятся. Кентавры, например Хирон, явно демонстрируют наличие большого количества льда (необязательно водяного), это полуастероиды-полукометы, что и послужило основанием для их названия. При приближении к Солнцу у некоторых из этих тел появляется кома (аналог атмосферы), как у комет.

В свое время, на заре образования Солнечной системы, маленькие объекты в этой области не смогли объединиться в одно крупное тело, в первую очередь из-за низкой пространственной плотности и неэффективности взаимодействия друг с другом. Небольшие объекты, видимо, не образовывались далее 50 а. е., поэтому сейчас внешняя граница пояса Койпера обрывается довольно резко. Современная структура распределения транснептуновых объектов сформировалась во время так называемой поздней тяжелой бомбардировки (спустя несколько сотен миллионов лет после формирования Солнечной системы), когда произошла существенная миграция планет-гигантов. С точки зрения распределения орбит транснептуновых объектов главную роль играло именно перемещение Нептуна. Начальная масса объектов в занептуновой области могла составлять от 3 до 30 земных масс, но во время миграции значительная часть из них была выброшена во внешнюю Солнечную систему (облако Оорта) или вовсе за пределы нашей системы. С тех пор масса пояса Койпера постепенно уменьшается, поскольку объекты меняют орбиты, например превращаясь в кентавров. Кроме того, столкновения транснептуновых объектов приводят к их разрушению, а не к укрупнению. Поэтому некоторые авторы считают пояс Койпера аналогом остаточных (debris) дисков, наблюдаемых у других звезд.

Некоторые транснептуновые объекты имеют орбитальные периоды, связанные с периодом Нептуна.

О внутреннем строении транснептуновых объектов известно немного. Наблюдения позволяют определять характеристики поверхности для крупных тел. Хорошо видно наличие замерзшего метана, который под действием солнечного излучения превращается в другие углеводородные соединения (например, C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3OH): этим объясняется красноватый цвет многих из этих тел. Также наблюдается присутствие водяного льда, замерзшего углекислого газа и молекулярного азота, аммиака.

Транснептуновые объекты имеют очень разную плотность, причины этого не известны. В среднем плотность растет с ростом

массы объектов, для Плутона она составляет примерно 2 г/см^3 (соотношение льда и камней примерно 3:7). У некоторых тел плотность очень мала, что указывает на их пористое строение.

Поверхность многих транснептуновых объектов покрыта льдами. Небольшие тела могут быть в основном ледяными.

Многие транснептуновые объекты образовались в результате столкновений. Так, например, спутник Плутона Харон (и, видимо, два других небольших спутника этой карликовой планеты) возник в результате столкновения. То же можно сказать и о спутниках карликовой планеты Хаумеа, имеющих, как и она, очень яркую поверхность, что объясняют присутствием большого количества водяного льда. Спутники у крупных транснептуновых объектов не редкость, все четыре транснептуновые карликовые планеты имеют спутники, да и вообще среди тел в поясе Койпера очень много двойных.

Некоторые объекты, когда-то входившие в пояс Койпера, удается изучить лучше других, поскольку они существенно поменяли свои орбиты и теперь могут приближаться к Солнцу. Кроме уже упоминавшихся кентавров к ним относятся некоторые кометы: например, 81P/Wild (она же Wild 2, открыта швейцарским астрономом Паулем Вильдом (Paul Wild)). Некоторые спутники планет-гигантов могли быть транснептуновыми объектами, захваченными во время миграции. К таковым относят спутник Сатурна Фебу, который имеет обратное движение вокруг своей планеты. Крупный спутник Нептуна Тритон, также, вероятнее всего, изначально был самостоятельным транснептуновым объектом. Эти тела удалось изучить с помощью космических аппаратов, исследовавших Сатурн и Нептун.

Сейчас наиболее изученными транснептуновыми телами являются Плутон и Харон, поскольку мимо них в 2015 г. пролетел аппарат New Horizons («Новые горизонты»). Сюрпризом было обнаружение на Плуtone обширных областей молодой поверхности, не покрытой большим количеством кратеров. Возраст этих участков менее нескольких миллионов лет, поэтому Плутон не является «мертвой планетой».

Исследования Плутона выявили, что на его поверхности есть очень молодые участки.

Изучение орбит транснептуновых объектов помогает точнее восстановить историю Солнечной системы. Однако для существенного продвижения необходимы новые межпланетные станции, специально предназначенные для изучения транснептуновых объектов и их «родственников».

2.5

Кометы и облако Оорта

Кометы давно и хорошо известны благодаря своему впечатляющему внешнему виду, который они приобретают при подлете к Солнцу. Голова кометы может иметь диаметр до миллиона километров, а хвост — тянуться на сотню миллионов километров. Однако масса кометы мала — как правило, 10^{16} – 10^{18} г (менее одной миллиардной массы Земли). К тому же плотным является лишь небольшое ядро. Именно ядра комет наиболее интересны для астрономов. Из-за маленькой массы вещество в них практически не изменилось со времени их образования (не происходило ни сегрегации, ни сильного нагрева). Оно было в буквальном смысле заморожено на 4,5 млрд лет. Кроме того, в распределении параметров орбит комет отпечатались различные этапы эволюции Солнечной системы. Так что, изучая кометы, можно многое узнать о жизни нашей системы в целом.

Основная масса кометы сосредоточена в ее ядре. Это неправильной формы конгломерат из льда, пыли и камней. Размеры самых крупных кометных ядер могут составлять десятки километров. В ряде моделей ядро является не единым образованием, а совокупностью отдельных кометезималей (аналог планетезималей, но применительно к кометам), лишь слабо связанных друг с другом. Наблюдения распадающихся комет (например, известнейшей кометы Шумейкеров — Леви-9, разорванной приливными силами Юпитера) косвенно подтверждают эту модель. Также в пользу этого сценария говорит отсутствие комет с периодами собственного вращения менее 5 часов (более быстрое вращение приводит к разрушению ядра).

Практически вся масса кометы сосредоточена в ядре.

Сейчас основная доля информации о кометных ядрах получена благодаря работе космических аппаратов, изучавших эти объекты с близкого расстояния. Начало было положено в 1986 г. во время очередного прохождения перигелия кометой Галлея. Ее изучала целая флотилия межпланетных станций. Советские аппараты «Вега-1» и «Вега-2» («ВЕНЕРА-ГАЛЛЕЙ») пролетели на расстоянии менее 10 000 км от ядра, а европейский аппарат Giotto («Джотто») впервые смог получить изображения ядра с расстояния около 1000 км. Также комету изучали два японских спутника. В дальнейшем были проведены более детальные исследования комет с помощью космических аппаратов.

Запущенный в 1998 г. спутник Deep Space 1 («Дальний космос-1»), предназначенный в первую очередь для тестирования новых космических технологий, пролетел в 2001 г. вблизи кометы 19P/Borrelly (Боррелли), получив самые детальные на тот момент времени изображения ядра. Аппарат Deep Impact («Глубокий удар») в 2005 г. сбросил на комету 9P/Tempel 1 (Темпеля) массивную (370 кг!) болванку, создавшую кратер диаметром около 200 м и глубиной в десятки метров. С помощью приборов космического аппарата, а также крупных наземных телескопов был проведен анализ выброшенного вещества.

Ядро кометы состоит из льда, пыли и камней.

Разумеется, анализ вещества лучше проводить в наземных лабораториях. В 1999 г. была запущена миссия Stardust («Звездная пыль»), задачей которой была доставка образцов вещества атмосферы кометы на Землю. В 2004 г. космический аппарат пролетел вблизи кометы 81P/Wild и собрал образцы вещества, а в 2006 г. они были доставлены на Землю. Интересно, что в 2011 г. спутник также пролетел вблизи кометы 9P/Tempel 1, которую ранее исследовал спутник Deep Impact.

Самое детальное на сегодняшний день исследование кометы было проведено европейской миссией Rosetta («Розетта»). Этот космический аппарат не только исследовал комету 67P/Churyumov-Gerasimenko (Чурюмова — Герасименко) с очень близкого расстояния, но и впервые была осуществлена посадка зонда Philae («Филы») на поверхность кометы. С зондом возникли технические проблемы, но тем не менее была получена уникальная информация, в том числе и непосредственно с поверхности (включая снимки, в том числе в ИК-диапазоне, с разрешением около 1 мм на пиксел).

Ядро кометы Чурюмова — Герасименко имеет, как и некоторые другие хорошо исследованные объекты этого типа, двухкомпонентную структуру. Два эллипсоидальных тела размером 2–4 км соединены перемычкой, в районе которой происходит основной выброс вещества. Были обнаружены «гейзеры», из которых бьют струи вещества. Получены изображения поверхности кометы с детализацией меньше метра (!).

Несколько комет были детально исследованы космическими аппаратами.

Благодаря работе межпланетных станций мы неплохо представляем себе свойства ядер комет. Средняя плотность ядра составляет от нескольких десятых до 1 г/см³. Столь низкое значение связано с высокой пористостью комет, которая обычно превосходит 50%.

Плотность самого вещества комет выше — 1,5–2 г/см³ (в полтора-два раза превосходит плотность воды). Поверхность ядра чаще всего очень темная (темнее Луны и большинства астероидов), с альбедо 3–5%. Там доминируют камни и органика, а лед обычно спрятан в глубине. Поэтому часто ядро кометы сравнивают с городским мартовским сугробом: он в целом ледяной, но сверху покрыт темной коркой из пыли и твердых частиц.

В кометах содержатся многочисленные органические соединения (формальдегид, глицин и др.). Периодически обсуждается роль комет в поставке на молодую Землю воды и органики, сыгравших важную роль в процессе появления жизни на нашей планете.

Из-за нагрева Солнцем вещество ядра кометы испаряется, образуя голову (кому) и хвост.

По мере приближения к Солнцу ядро кометы нагревается и его ледяная составляющая начинает испаряться (строго говоря, переход происходит из твердого состояния сразу в газообразное, поэтому более правильно называть это не испарением, а сублимацией или возгонкой). Обычно заметное испарение начинается на расстояниях менее 3–4 а. е. от Солнца. Лед в кометах не только водяной, это также замерзший аммиак, метан, угарный газ, углекислый газ, но в сформировавшейся голове кометы доминирует вода. Вместе с испарившимися частицами льда из ядра вылетают пылинки, а иногда и более крупные объекты. Вокруг ядра возникает квазисферическая оболочка — кома. Затем под действием давления солнечного излучения и солнечного ветра она может вытянуться в красивый хвост. Само название «комета» (греч. «косматая») связано с ее головой — комой (от греч. «волосы») — и хвостом, которые иногда приобретают поистине гигантские размеры.

Самые большие комы имели размеры, превосходящие диаметр Солнца, а хвосты вытягивались на расстояние более 1 а. е. Головы и хвосты хорошо видны, потому что частицы пыли отражают солнечный свет, а газ также может переизлучать его в спектральных линиях. Кроме того, свет рассеивается веществом хвоста и головы. Интересно, что кометы испускают даже рентгеновское излучение! Оно возникает из-за взаимодействия ионизованных частиц солнечного ветра с молекулами атмосфер комет.

Ежегодно к Солнцу приближаются десятки комет.

Гигантский хвост кометы, пересекающий полнеба, — красивейшее зрелище, и ученые давно пытались понять природу этого явления. Большой вклад в изучение кометных хвостов в XIX в. внес

Федор Бредихин. Газовые хвосты комет, в основном состоящие из ионизованных атомов, направлены прямо от Солнца, так как на них очень эффективно воздействует солнечный ветер. Поэтому если комета удаляется от Солнца, то она летит вперед хвостом. Пылевые хвосты более изогнуты, поскольку частицы пыли достаточно тяжелые и влияние солнечного излучения и ветра на них не столь сильно. Направление таких хвостов зависит и от направления движения кометы, и от ориентации кометы относительно Солнца.

Ежегодно к Солнцу приближаются десятки комет. В основном это «новые» кометы, имеющие очень большие периоды обращения. Если учесть, что несколько прохождений вблизи Солнца становятся для комет фатальными (они разрушаются или, потеряв большую часть летучих веществ, становятся неотличимы от астероидов), а возраст Солнечной системы составляет более 4,5 млрд лет, то мы приходим к выводу, что где-то на окраинах должен быть резервуар, содержащий сотни миллиард кометных ядер. Именно такую гипотезу высказал в 1950 г. Ян Оорт (Jan Oort), проанализировав параметры кометных орбит. В его честь этот резервуар называют облаком Оорта.

Облако Оорта — резервуар кометных ядер, содержащий сотни миллиардов таких объектов.

Облако Оорта простирается от границ пояса Койпера примерно до половины расстояния до ближайших звезд (т. е. более чем 100 000 а. е.). Оценки показывают, что в нем содержится более 10^{11} кометных ядер. Основная масса объектов находится на расстоянии более 10 000 а. е. Если орбита кометы имеет большую полуось менее 10 000 а. е., то из-за взаимодействия с планетами-гигантами со временем она или будет выброшена из Солнечной системы, или превратится в комету семейства Юпитера. Детали происхождения этой структуры продолжают обсуждаться специалистами.

По оценкам, полная масса облака Оорта составляет от нескольких единиц до нескольких десятков масс Земли. Выделяют внешнее облако и внутреннее, граница между ними проходит примерно на 20 000 а. е. Видимо, облако формировалось в два этапа. Первый имел место во время и сразу после формирования планет-гигантов. Небольшие объекты — будущие кометные ядра — забрасывались массивными планетами на высокие вытянутые орбиты. Затем, если большие полуоси комет достигали 10 000 а. е., под действием гравитационного поля Галактики перигелий их орбиты повышался, и они окончательно становились объектами облака Оорта. Второй этап проходил во время *поздней тяжелой бомбардировки*. Тогда в результате миграции планет-гигантов, спустя примерно 600–650 млн лет после образования Солнечной системы, произошла существенная перестройка

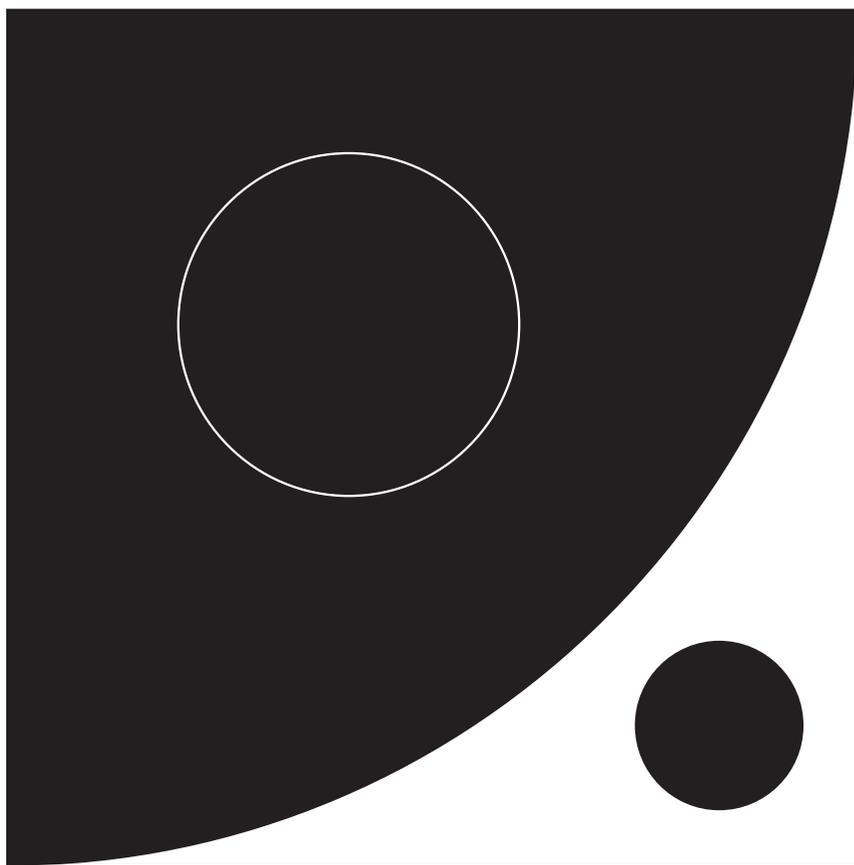
орбит, в результате которой множество тел, находившихся во внешнем диске за орбитой Нептуна (на расстоянии около 30 а. е.), перешло на более высокие траектории движения вокруг Солнца. Численные модели показывают, что рост числа комет в облаке продолжался почти миллиард лет.

Орбиты комет в облаке Оорта изменяются под действием внешних воздействий. В результате кометы могут попадать во внутренние области Солнечной системы.

Всего известно более 5000 комет. Несколько сотен комет принадлежит к так называемому семейству Юпитера. Орбиты этих объектов, изначально располагавшихся в основном в так называемом *рассеянном диске* за орбитой Нептуна, были изменены Юпитером, сделавшим их периоды более короткими (менее 20 лет), а расстояния в перигелии — более близкими к Солнцу, что позволяет регулярно и многократно их наблюдать. Также существует несколько тысяч комет, родственных комете Галлея, с относительно большими орбитальными периодами обращения (более 20 лет).

Кометы из облака Оорта испытывают влияние галактического гравитационного потенциала, а также звезд, пролетающих вблизи Солнца. В результате этого орбиты комет меняют свою ориентацию относительно плоскости эклиптики и почти равномерно заполняют пространство. Со временем из-за внешнего влияния перигелии некоторых из них уменьшаются, на них начинают воздействовать планеты-гиганты, и в итоге некоторые из этих кометных ядер попадают во внутренние области Солнечной системы, где их можно наблюдать. В ближайшее время с запуском таких инструментов, как большой обзорный телескоп LSST (Large Synoptic Survey Telescope, Большой обзорный телескоп), можно будет наблюдать большее количество комет, чьи перигелии лежат дальше 3 а. е. от Солнца, где активность комет (т. е. испарение ядра) еще не велика.

Современные исследования показывают, что судьба комет из разных семейств может быть различной. Кометы системы Юпитера, происходящие из рассеянного диска транснептуновых объектов, со временем перестают проявлять активность, и мы регистрируем их как астероиды (многие околоземные астероиды — это бывшие кометы). А долгопериодические кометы из облака Оорта после нескольких прохождений перигелия, по-видимому, разваливаются, не оставляя крупных фрагментов. Причины этого до конца не ясны. Возможно, в кометах семейства Юпитера меньше летучих элементов, так как значительную часть времени они проводили не столь далеко от Солнца, как их родственники из облака Оорта.



Глава 3

ЭКЗОПЛАНЕТЫ

3.1	Способы обнаружения и изучения экзопланет	85
3.2	Основные типы экзопланет	90
3.3	Формирование и миграция планет	94

Технический прогресс позволил к началу 1990-х гг. вплотную приблизиться к возможности поиска экзопланет. Сразу несколько подходов позволили открывать планеты у разных типов объектов. Первый сюрприз был связан с обнаружением планет у нейтронной звезды (радиопульсара), второй — с открытием горячих юпитеров, планет-гигантов, обращающихся очень близко от своих звезд. Сейчас достоверно известны несколько тысяч планет и есть многие тысячи кандидатов, в основном обнаруженных путем наблюдений с помощью космической обсерватории Kepler. Некоторые из них по своим параметрам не похожи ни на одну планету Солнечной системы, да и сама структура многих экзопланетных систем отличается от Солнечной. В изучении экзопланет наблюдается значительный и быстрый прогресс. Постоянно появляются новые инструменты, позволяющие совершать новые открытия, и каждые несколько месяцев астрономы получают новые важные результаты в этой области исследований.

3.1

Способы обнаружения и изучения экзопланет

На вопрос, какая экзопланета была открыта первой, нет однозначного ответа. Если говорить о первом достоверно обнаруженном объекте планетной массы вне Солнечной системы, то это планета у пульсара, открытая в 1992 г. Если мы говорим о первой достоверно обнаруженной планете у нормальной звезды, то это 51 Пегаса b (1995 г.). Однако можно говорить и о более ранних (конец 1980-х гг.) работах. В одном случае был достоверно открыт объект вокруг нормальной звезды, хотя до сих пор нет точной оценки его массы (и поэтому неясно, то ли это гигантская планета, то ли бурый карлик). В другом случае был заподозрен объект планетной массы, но не хватало точности, и подтвердить его удалось лишь годы спустя. Эти планеты были обнаружены методами тайминга (т. е. по измерению изменений времен прихода импульсов, в данном случае — радиопульсара) и лучевых скоростей. Однако некоторые специалисты считают, что полная убежденность научного сообщества в существовании экзопланет появилась только после начала открытия транзитных планет. В чем же преимущества и недостатки разных методов обнаружения экзопланет?

Александр Вольцшан и Дейл Фрэйл в 1992 г. открыли первую планету, обращающуюся вокруг пульсара.

Можно выделить восемь методов, которые позволяют открывать планеты у других звезд (а также в некоторых случаях одиночные планеты, свободно летающие в пространстве):

1. Измерение вариации лучевых скоростей звезд.
2. Наблюдение прохождения планет по диску звезды (транзиты).
3. Тайминг транзитов, двойных систем и пульсирующих источников.
4. Фотометрическое микролинзирование.
5. Астрометрическое микролинзирование.
6. Астрометрические измерения смещения звезд.
7. Выделение вклада планеты в полное излучение системы.
8. Получение прямых изображений.

Большинство из этих способов уже хорошо себя зарекомендовали, а некоторые пока недостаточно точны, но достигнут необходимой точности в ближайшем будущем.

Метод лучевых скоростей основан на том, что звезда совершает движения под действием гравитации планет. В простейшем случае, когда есть одна планета (или же одна из планет намного тяжелее остальных), мы имеем дело с аналогом двойной системы: два тела вращаются вокруг общего центра масс (барицентра). Мы не можем видеть планету, но видим звезду, и, анализируя ее спектр, мы можем измерить доплеровское смещение линий, соответствующее проекции орбитальной скорости на луч зрения (направление от наблюдателя к звезде).

Мишель Майер и Дидье Кело в 1995 г. открыли первую планету (горячий юпитер), обращающуюся вокруг нормальной звезды.

Идея была очевидна уже давно, но существовал ряд технических проблем. Во-первых, надо измерять скорость звезды с точностью порядка метров в секунду. Во-вторых, это надо делать в рамках длинной серии наблюдений. Проблемы удалось решить лишь к середине 1990-х гг., используя наземные телескопы. Результатом стало обнаружение Мишелем Майером (Michel Mayor) и Дидье Кело (Didier Queloz) планеты у звезды 51 Пегаса.

В настоящее время точность измерений по эффекту Доплера превосходит 1 м/с, однако для обнаружения таким способом полного аналога Земли необходима точность на уровне 0,1 м/с. Кроме того, активность звезд и их пульсации мешают высокоточным измерениям с помощью метода лучевых скоростей. Видимо, следующее поколение детекторов сможет достичь этого уровня. Пока же таким способом в основном открывают или более массивные планеты, или легкие планеты у маломассивных звезд с меньшими, чем у Земли, орбитальными периодами.

Этот метод позволяет определить массу планеты, если известна масса звезды. Неопределенность измерения зависит от неизвестного наклона орбиты к лучу зрения. Однако в подавляющем большинстве случаев (87%) оценка без знания угла наклона отличается от истинного значения менее чем в два раза.

На сегодняшний день большинство экзопланет было открыто **методом транзитов** — прохождения планеты по диску звезды. Это приводит к падению блеска, поскольку яркий звездный диск оказывается частично закрыт более темной планетой. Падение обычно составляет от нескольких десятитысячных до пары десятков тысячных (т. е. от сотых долей процента до пары процентов) — это очень небольшие величины. Кроме того, для надежного обнаружения экзопланеты

необходимо зарегистрировать несколько транзитов, т. е. необходимы стабильные высокоточные измерения. Из-за влияния атмосферы при наблюдениях с Земли достичь такой точности трудно, поэтому наиболее эффективны космические проекты.

Космическая обсерватория Kepler — первый крупный специализированный космический проект для поиска транзитных экзопланет.

Для поиска транзитных планет использовалось несколько космических аппаратов, однако самой мощной «машиной открытий» стала космическая обсерватория Kepler, запущенная в 2009 г. Проработав до 2013 г. в штатном режиме и наблюдая около 150 000 звезд в направлении созвездий Лебедь и Лира, этот аппарат обнаружил несколько тысяч планет и десятки тысяч кандидатов в планеты. Начиная с 2013 г. аппарат работает без фиксации области наблюдений, сканируя небо и продолжая открывать планеты и изучать звезды.

Если известен размер звезды, при использовании транзитного метода удастся измерить радиус планеты, а в редких случаях определить и ее массу. На сегодняшний день известно несколько сотен планет, для которых одновременно известны и масса, и радиус (часто это требует использования двух разных методов наблюдений), что позволяет делать более надежные выводы о составе таких тел.

Наличие планет вызывает наблюдаемые периодические отклонения в движении компонент двойных звезд.

Самый первый объект планетной массы был обнаружен **методом тайминга**. Если мы наблюдаем периодический сигнал, то движение источника сигнала относительно барицентра из-за присутствия планеты будет приводить к сдвигу моментов прихода импульсов. Источником сигнала может быть, например, пульсирующий белый карлик, а может быть нейтронная звезда — радиопульсар. Именно у такого объекта PSR 1257 + 12 Александр Вольшан (Aleksander Wolszczan) и Дейл Фрэйл (Dale Frail) в 1992 г. обнаружили три планеты малой массы.

Кроме того, наличие планет приводит к сбоям в периоде двойных систем, что также можно наблюдать. Примером является система NN Змеи, состоящая из красного и белого карликов. Тщательный анализ орбит звезд в этой двойной привел к выводу о существовании в ней двух планет-гигантов.

Несколько особняком стоит метод тайминга транзитов (transit timing variation). В данном случае сбои происходят во временах транзитов планет, что вызвано влиянием других (нетранзитных) планет в той

же системе. Изменяется как время транзита, так и его длительность. Таким способом (в первую очередь по данным Kepler) открыто уже довольно много объектов.

Следующие два метода связаны с гравитационным линзированием. Массивные тела искажают вокруг себя геометрию пространства-времени. Поэтому свет, проходя мимо них, будет изменять направление своего движения. Если между нами и звездой-источником оказывается другая звезда или подобное массивное тело, то оно выступает в роли гравитационной собирающей линзы. Поэтому первый эффект связан с увеличением блеска звезды-источника.

Измерение кривой блеска при микролинзировании позволяет открывать невидимые маломассивные спутники звезд.

Характер кривой блеска при прохождении гравитационной линзы между источником и наблюдателем зависит от свойств линзы. Звезду можно считать точечной линзой. Однако если у нее есть спутник, то его присутствие отразится в кривой блеска при линзировании. Данный метод, называющийся **фотометрическим микролинзированием**, позволяет обнаруживать даже маломассивные спутники звезд. Первое такое открытие было сделано в 2003 г., и сейчас есть уже десятки планет, обнаруженных таким методом.

Преимуществом этого метода является возможность открывать планеты на далеких орбитах в несколько астрономических единиц (что соответствует орбитальным периодам в несколько лет) за короткое время. Но есть у этого метода и недостаток: микролинзирование — чаще всего одноразовое событие, и после его завершения мы не можем вновь наблюдать звезду-линзу и ее планеты (хотя есть и исключения, когда звезда-линза была затем обнаружена непосредственно).

Астрометрические наблюдения с помощью космических аппаратов и наземных интерферометров позволяют открывать экзопланеты.

Кроме изменения блеска звезды-источника также изменяется ее положение. Ожидается, что космический телескоп Gaia («Гайя») позволит в ближайшее время обнаружить эффект **астрометрического микролинзирования** на нейтронных звездах и черных дырах. Потенциально высокоточные наблюдения в будущем могут позволить обнаруживать таким образом и объекты планетных масс, выступающие в роли линзы. В том числе и одиночные объекты планетных масс, по каким-то причинам оторвавшиеся от своих звезд или родившиеся сразу одиночными.

С космическим телескопом Gaia связывают еще один астрометрический метод поиска экзопланет. При вращении звезды вокруг барицентра системы можно обнаружить не только изменение ее лучевой скорости, но и **собственно смещение**. Разумеется, оно крайне мало, однако высокоточные измерения положения звезд должны позволить проведение таких измерений. По оценкам, точности приборов Gaia будет достаточно для этого. Также таким методом можно обнаруживать планеты, используя наземные интерферометры. Преимуществом такого подхода является то, что, зная массу звезды, можно непосредственно определить массу планеты.

Все перечисленные методы в некотором смысле являются косвенными, поскольку мы не видим планеты непосредственно, а измеряем эффекты, вызванные их присутствием. Однако существуют методы, позволяющие непосредственно увидеть свет далеких планет.

Первый такой метод связан именно с **выделением вклада планеты в общее излучение звезды и ее спутников**. Например, в случае транзитной планеты (если она является достаточно мощным источником собственного или отраженного излучения) мы можем увидеть не только падение блеска системы при транзите, но и рост блеска в те моменты, когда одновременно виден и весь диск звезды, и диск планеты. Таким способом удалось изучить свойства нескольких планет, например в системе Кеплер-70.

Вклад планеты можно выделить и изучая спектры. Линии, излучаемые планетой, во-первых, будут соответствовать другим скоростям и смещаться (из-за эффекта Доплера) относительно звездных линий. А во-вторых, по свойствам линий можно понять, что они связаны с относительно холодным веществом. Этот метод также успешно используется.

В нескольких десятках случаев удалось получить непосредственные изображения молодых экзопланет.

Наконец, в редких случаях удается **непосредственно получить изображения планет**. Как правило, речь идет об объектах, которые находятся достаточно далеко от своих звезд и к тому же достаточно молоды, чтобы являться мощными источниками (в основном в инфракрасном диапазоне).

После своего рождения планеты-гиганты в течение долгого времени продолжают медленно сжиматься, что приводит к выделению энергии. Фотосферы таких планет могут иметь температуры 1000–2000 К. Этого оказывается достаточно, чтобы с помощью крупнейших наземных телескопов получить их изображения и даже спектры. Ярким примером является система HR8799, в которой непосредственно видны четыре планеты-гиганта, удаленные от своей звезды на десятки астрономических единиц.

3.2

Основные типы экзопланет

В Солнечной системе планеты делятся на две основные группы: землеподобные и планеты-гиганты (Уран и Нептун часто выделяют в отдельную подгруппу ледяных гигантов). Обнаружение нескольких тысяч экзопланет помогло существенно расширить классификацию возможных типов планет.

Данные наблюдений позволяют определить массу планеты, ее радиус, расстояние от звезды и количество энергии, получаемое от звезды. В очень редких случаях удается измерить другие параметры, включая даже атмосферные, но эти исключения не влияют на основную классификацию типов планет.

Современная классификация экзопланет в основном базируется на измерении их масс, радиусов и расстояния от звезды.

Планеты формируются в окружающем молодую звезду диске, состоящем из газа и пыли (газа по массе больше). Ближе определенного критического расстояния от звезды (это так называемая *снеговая линия*) такие соединения, как метан, аммиак, углекислый газ, вода и др., существуют в виде газа, а пылинки состоят в основном из кремния, магния, углерода и железа. За снеговой линией метан, вода и другие подобные соединения замерзают, поэтому возможно образование ледяных пылинок, а потом и более крупных ледяных тел. Поэтому можно выделить три основных компонента, которые могут войти в состав планет: водород и гелий в виде газа, различные «льды» (в недрах планет они могут не принимать привычную нам форму твердого льда) и «камни» (к ним также относят железо и его соединения, и при этом в недрах массивных планет тяжелые элементы могут не формировать твердое ядро).

Параметры планет определяются параметрами протопланетного диска и их местом рождения в нем.

Эволюционно параметры планет задаются свойствами протопланетного диска. Химический состав диска соответствует звездному составу — там доминируют водород и гелий, а количество более тяжелых элементов невелико. Причем элементов группы CNO больше, чем Mg-Si-Fe, что объясняется свойствами термоядерных реакций

в звездах и интенсивностью выброса разных продуктов синтеза в межзвездную среду. Поэтому все массивные планеты — газовые, а ледяные в среднем тяжелее каменных.

Если планета сформировалась вдали от звезды, за снеговой линией, то около половины состава (без учета атмосферы) придется на воду и другие «льды», а половина — на более тяжелые элементы. При формировании внутри снеговой линии доля льдов мала (скажем, сейчас вода в составе Земли составляет 0,02% по массе). Около двух третей приходится на силикаты, а оставшаяся треть — на элементы группы железа.

Основные компоненты планет — это водородно-гелиевые газовые оболочки, «льды» и «камни».

Данные наблюдений позволяют выделить четыре основных типа планет. Первый — это газовые гиганты, примером которых является Юпитер. Второй — ледяные гиганты, подобные Нептуну. Третий — сверхземли, планеты с массами от нескольких земных до долей непунианской. И, наконец, четвертый — это железно-каменные планеты типа Земли.

Среди планет-гигантов можно выделить несколько подклассов. Во-первых, это так называемые *горячие юпитеры*. Так называют массивные газовые планеты, располагающиеся вблизи своих звезд (орбитальные периоды их составляют менее нескольких дней). Анализ показывает, что число таких планет невелико, они имеются лишь около 1% звезд солнечного типа. Тем не менее, поскольку их легко наблюдать и методом транзитов, и методом лучевых скоростей, среди известных планет их доля велика. К этому типу относилась и первая достоверно обнаруженная планета около нормальной звезды — 51 Пегаса b.

Выделяют четыре основных типа планет: газовые гиганты, ледяные гиганты, сверхземли и землеподобные планеты.

Особенностью многих горячих юпитеров является относительно большой радиус: близость звезды приводит к высокой температуре их атмосфер, планета получает дополнительную энергию, и ее атмосфера «раздувается». Как именно происходит разогрев недр, остается предметом дискуссий. Некоторые из этих планет настолько близки к своим звездам, что их атмосферы начинают активно испаряться или перетекать на звезду.

Второй подгруппой газовых гигантов можно считать наиболее массивные планеты с массами около 10 масс Юпитера. В их недрах становится очень важным так называемое *вырождение* вещества.

Интересным наблюдаемым проявлением этого является уменьшение радиуса планеты с ростом ее массы.

Ледяные гиганты типа Нептуна являются одним из самых распространенных типов планет. Причем они могут встречаться не только вдали от своих звезд, как их прототипы в Солнечной системе, но и вблизи звезд (горячие нептуны) — заведомо внутри снеговой линии. Это означает, что планеты существенно мигрировали в протопланетном диске от мест своего рождения к современному положению (это относится и к горячим юпитерам). У ледяных гигантов масса внешней водородно-гелиевой оболочки составляет менее половины массы планеты. Тяжелые элементы — Mg-Si-Fe — также не вносят основного вклада в полную массу. Доминируют углерод, кислород и азот, образующие (чаще всего в соединении с водородом) «жидкий лед» при высоком давлении.

Сюрпризом стало обнаружение сверхземель — возможно, самого распространенного типа планет в Галактике, которые при этом отсутствуют в Солнечной системе. Детальный анализ показывает, что более половины звезд спектральных классов от F до K имеют хотя бы одну планету с массой примерно от полутора до десятка земных на орбите с периодом от нескольких дней до нескольких месяцев.

Сверхземли являются самым разнообразным и многочисленным классом экзопланет.

Возможно, что состав и структура планет с массами от нескольких масс Земли до массы Нептуна могут быть весьма разными. По всей видимости, со временем можно будет надежно выделить несколько основных подгрупп. Первая — это собственно сверхземли, у которых доминирует твердое ядро (как у Земли). Вторая — это мини-нептуны, в составе которых много более легких элементов (льдов) и нередко мощные газовые оболочки, которые хотя и составляют лишь несколько процентов от полной массы, но зато вносят существенный вклад в видимый размер. Возможно, в третью, отдельную, подгруппу попадут так называемые *планеты-океаны*, в составе которых, как полагают, много воды в разной форме, но нет толстой атмосферы (такой как у мини-нептунов). В среднем среди этих трех подгрупп мини-нептун должны быть самыми тяжелыми, а твердые сверхземли — самыми легкими. Однако есть и интересные исключения, которые плохо вписываются в общую картину. Это не слишком удивительно, если учитывать потенциальное разнообразие параметров протозвездных туманностей и возможные особенности образования планет в каких-то отдельных случаях.

Различие масс и состава планет приводит к разной средней плотности. Интересно, что наименьшая плотность наблюдается

не у самых больших газовых гигантов. Чтобы набрать толстую газовую оболочку, необходимо массивное ядро, которое состоит из элементов тяжелее гелия. По этой причине не существует целиком водородно-гелиевых планет и, наоборот, очень массивных планет без водородно-гелиевых оболочек, кроме тех случаев, когда близость к звезде привела к испарению или стеканию внешних слоев. Поэтому самую низкую плотность имеют некоторые «недогиганты», у которых не успело сформироваться достаточно массивное ядро (примерно 10 масс Земли), однако они тем не менее смогли накопить путем аккреции достаточно толстую атмосферу.

Для формирования массивной планеты путем аккреции газа необходимо тяжелое ядро.

Необходимость массивного ядра для формирования газового гиганта объясняет и зависимость частоты встречаемости этих планет от так называемой *металличности* звезды, т. е. от доли элементов тяжелее гелия в ее составе. При низкой металличности в протопланетном диске недостаточно материала для создания массивных ядер. А вот частота встречаемости более легких каменных планет с массой порядка земной не демонстрирует сильной зависимости от звездной металличности.

Существенно, что структура планет-гигантов значительно меняется со временем. Происходит сжатие и оседание более тяжелых элементов ближе к центру. Например, гелий из внешних слоев может выпадать во внутренние. В результате такого процесса, к примеру, внешние слои Юпитера обеднены гелием. Перераспределение вещества приводит к значительному энерговыделению (а вот радиоактивный распад для планет-гигантов не вносит большого вклада в энерговыделение). Поэтому молодые гиганты могут быть больше и горячее, чем более проэволюционировавшие. С наблюдательной точки зрения это приводит к тому, что для больших планет с возрастными несколькими десятками миллионов лет и менее можно получать прямые изображения в ИК-диапазоне, так как, с одной стороны, сами планеты являются достаточно яркими объектами, а с другой — в ИК-части спектра свет звезды уже не так мешает наблюдениям.

Для построения детальных моделей недр пока не хватает экспериментальных данных.

Представление о недрах планет во многом основано на расчетах, так как лабораторные эксперименты не позволяют воспроизвести даже условия в земных недрах, не говоря уже о центральных частях планет-гигантов. Однако даже существующие данные позволяют сделать

интересные предсказания. Например, более массивные аналоги Земли должны иметь твердое железное ядро, что приводит к отсутствию мощного магнитного поля. При этом магнитное поле считается существенным фактором для развития сложных форм жизни, поскольку оно защищает планету от звездного ветра и предотвращает потерю газов из атмосферы. Поэтому железно-каменные, но при этом слишком массивные планеты (особенно вокруг красных карликов) не следует рассматривать как хорошие кандидаты в потенциально обитаемые планеты.

3.3

Формирование и миграция планет

В жизни планетной системы можно выделить несколько этапов, основные из которых связаны с периодом ее формирования и становления. Первую стадию можно назвать протозвездной, в это время происходит сжатие сравнительно плотного холодного сгустка межзвездной среды, из его основной массы сформируется звезда (или несколько звезд). Однако из-за вращения и наличия магнитного поля в среде также формируется диск вокруг звезды (если речь идет о двойной системе, то диски могут образоваться и вокруг каждой из звезд, и вокруг всей системы). Постепенно в диске, состоящем из газа и пыли, начинается формирование все более крупных объектов, что может в итоге привести к возникновению планетной системы. Наличие подобного этапа стало первым шагом в моделях образования планет еще со времен Канта (Immanuel Kant) и Лапласа (Pierre-Simon de Laplace).

Иммануил Кант и Пьер-Симон Лаплас — авторы первых реалистичных моделей образования Солнечной системы.

Начальная масса и состав вещества в протозвездной туманности задают многие свойства будущей планетной системы. Поскольку содержание элементов в среднем одинаково и доминируют водород и гелий (около 98% по массе), то массивные планеты могут быть только газовыми. Во-первых, только этих элементов достаточно много, а во-вторых, даже в случае возникновения твердого протопланетного

ядра из более тяжелых элементов оно сразу же аккрецирует много газа, и в окончательном составе планеты все равно будут доминировать легкие летучие вещества.

Параметры планет в первую очередь определяются свойствами протозвездной туманности.

Твердые планеты могут быть в основном железно-каменными, так как в продуктах звездного нуклеосинтеза из всех тяжелых элементов, способных образовывать твердые тела, преобладают железо, кремний и магний. Также в протозвездном облаке достаточно много углерода и кислорода. Вместе с водородом они образуют соединения (воду, метан, углекислый газ), способные в реальных условиях протопланетного диска становиться льдом. Поэтому вдали от звезды, кроме железно-каменных, могут возникать и ледяные твердые тела.

Первоначально рост пылинок в диске происходит за счет слипания, этот процесс довольно быстро приводит к образованию тел миллиметрового размера. Однако далее возникают проблемы.

Двигаясь в газовом диске, тела размерами от сантиметров до метров очень быстро теряют энергию и выпадают на звезду. Это происходит буквально за сотни или тысячи лет — слишком быстро, чтобы они могли стать крупными. Кроме того, при столкновении таких тел они не слипаются, а разрушаются, дробятся. При этом их гравитация еще слишком слаба, чтобы не дать разлететься осколкам столкновения. Поэтому у нас сейчас нет четкого понимания, как из тел миллиметрового размера формируются планетезимали с размерами в десятки километров и более.

За счет слипания пылинок формируются тела миллиметровых размеров.

Существует несколько конкурирующих гипотез о том, как формируются достаточно крупные планетезимали. Например, могут возникать такие аэродинамические условия, что образуется «газовый мешок», заполненный камнями. Они могут сколлапсировать, сформировав твердое тело, которое продолжит аккрецировать «щебенку» (pebbles), увеличивая свою массу (это не единственный сценарий, существуют и другие).

В протопланетном диске протекает два процесса. Во-первых, планетезимали взаимодействуют друг с другом, сталкиваются. При этом можно говорить о том, что крупные поглощают мелких — этот период называют стадией олигархического роста. Во-вторых, могут сложиться условия, при которых крупный объект начнет активно

аккрецировать «щебенку» — тела сантиметровых размеров. Это важно для появления массивных газовых планет.

Дело в том, что легкие твердые планеты земной группы могут формироваться относительно долго, десятки миллионов лет, за счет взаимодействия планетезималей (например, Меркурий и Марс, возможно, являются именно такими «последними из планетезималей» — самыми крупными из выживших), однако для роста гигантов есть более жесткий предел.

Для появления планеты-гиганта необходимо создать массивное ядро, пока еще в диске сохранился газ.

Газовая составляющая протопланетного диска относительно быстро рассеивается из-за излучения звезды (а в некоторых случаях и из-за излучения близких звезд). Наблюдения показывают, что диски в среднем живут менее 10 млн лет. Соответственно, для активного роста массы планеты-гиганта есть лишь несколько миллионов лет. Для начала такого роста необходимо достаточно быстро сформировать тяжелое ядро с массой около 20 земных. Это является проблемой для теоретических сценариев, и полной ясности здесь нет.

Также существует проблема объяснения существования планет-гигантов на расстояниях более нескольких астрономических единиц от звезды (например, в известной системе HR 8799, где получены прямые изображения четырех гигантских планет). Рассматривается возможность гравитационной неустойчивости в протопланетном диске, в результате которой сразу могут возникать достаточно массивные объекты (в частности, известно, что так могут формироваться маломассивные звезды и бурые карлики). Этот процесс должен доминировать именно на больших расстояниях от звезд в наиболее массивных протопланетных дисках.

Газовый протопланетный диск рассеивается за 10 млн лет.

Из-за наличия в центре диска источника энергии — звезды — температура в нем падает по мере удаления от центра. На внутренней границе диска даже силикатные и углеродные пылинки могут быть испарены, а во внешних частях диска возможно существование ледяных частиц. Для разных льдов (вода, угарный газ, аммиак и т. д.) снеговая линия (см. раздел 3.2 «Основные типы экзопланет») проходит на разном расстоянии, положение этой границы также зависит от свойств звезды. Для параметров новорожденного Солнца снеговые линии (для разных типов льдов) соответствуют расстоянию около 3–5 а. е. Процесс формирования планет за снеговой линией несколько отличается

от роста масс тел во внутренних частях диска. В частности, там не так остра проблема «сантиметрового барьера», так как ледяные тела могут слипаться при соударениях, образуя рыхлые структуры даже при таких небольших размерах.

По мере формирования планеты взаимодействуют с диском. Характер этого взаимодействия зависит от массы планеты и поверхностной (проинтегрированной по высоте) плотности в диске. Важнейшим процессом является миграция планет, позволяющая объяснить как ряд деталей строения Солнечной системы, так и существование таких планет, как горячие юпитеры и горячие нептуны, располагающихся очень близко от своих звезд, в местах, где они никак не могли сформироваться.

За снеговой линией возможно формирование ледяных тел.

Миграция происходит из-за обмена энергией и моментом импульса (орбитальным моментом) между планетой и диском. В принципе, в результате такого взаимодействия планета может как приближаться к звезде, так и удаляться (ситуация также может осложниться из-за присутствия второй близкой массивной планеты). Но обычно миграция в газовом диске направлена к звезде. Выделяют два основных типа миграции. В первом случае планета недостаточно массивна, чтобы сильно изменить распределение вещества в диске. Воздействуя на газ, она формирует спиральные структуры внутри и снаружи своей орбиты, а также меняет распределение газа прямо на своей орбите (формируется так называемая подковообразная структура). В итоге, как правило, планета медленно движется внутрь, к звезде. Темп миграции при этом режиме зависит от массы планеты. Для массы порядка земной скорость достаточно мала. А вот планеты в несколько раз тяжелее могут мигрировать под действием данного механизма очень быстро и даже выпадать на звезду.

Из-за взаимодействия с протопланетным диском планеты меняют свое положение.

Интересно, что своей гравитацией достаточно массивная планета «расталкивает» газ на своей орбите, формируя в итоге заметную щель в диске. Это происходит следующим образом: частицы на более низкой (чем планета) околозвездной орбите имеют большую (чем планета) скорость и при взаимодействии с планетой отдают ей часть энергии и тормозятся, опускаясь на еще более низкую околозвездную орбиту и тем самым еще больше удаляясь от планеты. С частицами на более высоких околозвездных орбитах происходит аналогичный процесс,

но планета, которая движется быстрее, теперь разгоняет частицу (передает ей энергию), в результате чего частица переходит на более высокую орбиту и тоже удаляется от планеты. Таким образом планета пытается сформировать вокруг себя пустое пространство, хотя притекающий сверху и снизу (по толщине диска) газ мешает добиться этого в полной мере.

По мере роста массы планеты щель становится все шире, пока наконец ее ширина не достигает толщины диска. Обычно это происходит при массе планеты порядка нескольких нептунианских. Теперь вещество не может притекать сверху и снизу, и на орбите планеты в диске образуется видимая щель. Такие образования действительно наблюдаются в протопланетных дисках (они недавно были обнаружены при наблюдении с помощью системы телескопов ALMA, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, Атакамская миллиметровая/субмиллиметровая антенная решетка, см. раздел 13.4 «Радиотелескопы»). Это приводит к совершенно новому, второму, режиму миграции.

Миграция планет необходима для объяснения существования горячих юпитеров.

Миграция второго типа, которая начинается после возникновения щели в диске на орбите планеты, происходит медленнее и практически не зависит от планетной массы — все в основном определяется свойствами диска. При этом может продолжаться рост планетной массы, поскольку она не полностью отделена щелью от двух краев диска: между ними и планетой переброшен «мост», по которому продолжает течь вещество.

После исчезновения газового диска планеты и планетезимали продолжают взаимодействовать друг с другом.

Существуют и другие режимы миграции (равно как и модификации уже перечисленных). Эта область еще недостаточно изучена и с точки зрения теории, и с точки зрения наблюдательных данных. Как бы то ни было, в результате миграции в планетном диске на момент его рассеяния (т. е. примерно спустя 10 млн лет после рождения звезды) положения планет могут существенно отличаться от первоначальных. Кроме того, значительная миграция самых массивных планет ближе к звезде естественным образом приводит к изменениям орбит всех более легких тел, встречающихся им на пути, переводя их на более низкие орбиты или выбрасывая из внутренних частей системы. Анализ архитектуры сотен известных планетных систем показывает, что в среднем ближе к звезде все равно оказываются легкие планеты, даже

если происходила существенная миграция самых массивных из них. По-видимому, это связано и с особенностями миграции, и с распределением планет разных масс по первоначальным положениям орбит.

После рассеяния газового диска планеты и планетезимали продолжают взаимодействовать друг с другом. На этой стадии, кроме существенного изменения орбит легких тел за счет взаимодействия с наиболее массивными, также может происходить и миграция крупных планет (как это имело место, например, в Солнечной системе). Таким образом, параметры орбит могут меняться еще на протяжении сотен миллионов лет, пока остаются доступные для взаимодействия легкие тела (астероиды, кометные ядра, легкие планетезимали и т. д.). Но в целом период формирования завершается вскоре после исчезновения диска.

Общая схема образования планетных систем такова: сжатие газопылевого облака, формирование звезды и диска вокруг нее, рост и взаимодействие планетезималей, формирование планет в диске и их миграция.

Какое-то время в системе еще наблюдается так называемый остаточный диск. Он пополняется пылью в результате столкновений остающихся небольших тел, в основном на больших расстояниях от звезды (что в Солнечной системе примерно соответствует будущему поясу Койпера до эпохи поздней тяжелой бомбардировки). Со временем интенсивность столкновений падает, и остаточный диск также рассеивается.

В дальнейшем орбиты планет могут претерпевать изменения за счет взаимодействия друг с другом или с другими звездами, если система кратная. Важным является эффект Лидова — Козаи, приводящий к колебательному изменению эксцентриситетов и наклонов орбит под влиянием внешних массивных тел в той же системе.

Эффекты Лидова — Козаи и Ярковского играют важную роль в эволюции орбит на протяжении существования планетной системы.

На небольшие тела влияние оказывает излучение звезды посредством эффекта Ярковского. Он был предсказан в 1900 г. инженером Иваном Ярковским. Эффект состоит в неизотропном испускании излучения неравномерно нагретым вращающимся телом. Он является существенным для астероидов и, накапливаясь, за время существования системы может существенно менять их орбиты, как повышая, так и понижая их. Астероид как бы приобретает слабый

«фотонный двигатель», который может разгонять или тормозить его в зависимости от направления собственного вращения относительно орбитального движения.

Планеты, расположенные очень близко от звезды, могут взаимодействовать с ней за счет приливных сил. Если орбитальный период планеты короче периода вращения звезды, приливные силы тормозят движение планеты по орбите, при этом планета переходит на более низкую орбиту и может со временем упасть на звезду. В случае газовых планет могут также происходить испарение внешних оболочек и аккреция вещества планеты на звезду.

Орбиты планет изменяются на финальных стадиях эволюции звезды.

Наконец, планеты могут снова начать менять свои орбиты на финальных стадиях существования звезды, когда она начинает претерпевать существенные эволюционные изменения, превращаясь в гигант и сбрасывая внешние слои. Это приводит к уменьшению звездной массы. Гравитационное поле звезды ослабевает, в результате планеты и другие тела переходят на более высокие орбиты, а при значительной потере массы звездой система может полностью разрушиться.

Разрушение планетной системы неизбежно приводит к появлению планет-бродяг (rogue planets). Кроме того, вероятно, что массивные планеты могут формироваться «по звездному механизму». Сейчас известно несколько массивных одиночных планет (в основном они обнаружены при поисках коричневых карликов). Кроме того, известны планеты в паре с коричневыми карликами (например, система OGLE-2016-BLG-1195Lb, обнаруженная с помощью микролинзирования). Наконец, известна интереснейшая система 2MASS J1119-1137, состоящая из двух массивных планет с массами 3–5 масс Юпитера. Эту пару удалось изучить по прямым изображениям, полученным с помощью телескопа обсерватории Кека (W. M. Keck Observatory) (см. раздел 13.3 «Современные оптические телескопы и проекты ближайшего будущего»).



Глава 4

ЗВЕЗДЫ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

4.1	Расстояния до звезд	105
4.2	Устойчивость звезд и их структура	108
4.3	Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Цефеиды	111
4.4	Двойные и кратные звезды. Аккреция	116
4.5	Образование звезд. Три населения	121
4.6	Смена термоядерных реакций	124
4.7	Сверхновые	128

Здесь речь пойдет о так называемых нормальных звездах — объектах, в недрах которых идет термоядерный синтез. В результате этих реакций легкие элементы, начиная с обычного водорода, превращаются в тяжелые. Для запуска синтеза нужны достаточно высокие температура и плотность. Обе величины регулируются массой звезды, что задает нижний предел на ее массу, который зависит от химического состава и обычно составляет примерно 0,08 массы Солнца. Более легкие объекты относят к бурым (коричневым) карликам. Самые массивные звезды, рождающиеся сейчас в нашей Галактике, имеют массы менее 200 солнечных.

Звезды, видимые нами на ночном небе, входят в состав нашей Галактики. Типичные расстояния между звездами в солнечной окрестности измеряются световыми годами. Многие звезды входят в состав кратных систем. Самым простым примером являются двойные звезды, обращающиеся вокруг общего центра масс, но есть связанные системы из трех, четырех и даже шести звезд.

Эволюция звезды в первую очередь связана с характером протекания термоядерных реакций в их недрах. Он зависит в основном от массы звезды. На втором месте стоит химический состав, от которого также зависят многие параметры, но состав молодых звезд варьируется в не слишком больших пределах: примерно на 70–75% звезды состоят из водорода и на 25–28% из гелия, на долю более тяжелых элементов обычно приходится менее 2% массы.

Продолжительность жизни звезды зависит от ее массы. Для самых тяжелых объектов это время составляет около миллиона лет. Для самых легких — многие десятки миллиардов. В конце своей жизни звезды в основном превращаются в компактные объекты: белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. Образование нейтронных звезд (и в некоторых случаях черных дыр) сопровождается вспышкой сверхновой.

4.1

Расстояния до звезд

Проблема измерения расстояний до звезд играла важную роль в истории астрономии. Если исходить из гипотезы о том, что звезды — это далекие солнца, то можно сразу получить неплохую оценку: самые близкие находятся примерно в сотни тысяч раз дальше нашего светила, так как выглядят примерно в 10^{11} раз слабее¹. Однако с консервативной точки зрения ситуация обратная: необходимо измерить расстояния до звезд, и если окажется, что расстояния до видимых невооруженным глазом источников примерно в миллион раз больше астрономической единицы, то это будет прямым и надежным аргументом в пользу того, что это солнцеподобные объекты и Солнце — звезда.

Видимые глазом звезды примерно в 10^{11} – 10^{13} раз слабее Солнца.

Проблема состоит в технической сложности измерения расстояний до столь далеких объектов. Еще сотни лет назад астрономы поняли, что вращение Земли вокруг Солнца дает возможность определить расстояния до звезд. Если мы выберем какую-нибудь близкую (например, яркую) звезду и проведем ее наблюдения 22 марта, а потом повторим их 22 сентября, то получим два сеанса наблюдений из примерно противоположных точек земной орбиты, отстоящих друг от друга почти на 300 млн км. Видимое положение звезды сместится относительно более далеких звезд (как смещается видимое положение близких предметов, если мы смотрим на них то одним, то другим глазом). Такое смещение называют параллактическим, а саму величину угла — параллаксом (в измерении расстояний обычно используют половину угла смещения, т. е. тот угол, под которым со звезды была бы видна большая полуось земной орбиты, это так называемый годичный параллакс данной звезды). Измерение параллактического смещения позволило бы не только измерить расстояния до звезд, но и напрямую доказать вращение Земли вокруг Солнца. Но насколько велико это смещение?

Если звезды похожи на Солнце, то минимальное расстояние до них — несколько световых лет, а ожидаемое смещение составит

¹ Заметим, что непосредственное измерение разницы в блеске Солнца и звезд — крайне непростая задача.

всего лишь около одной угловой секунды ($1'' = 1/3600$ градуса). Такие углы невозможно было измерить не только до изобретения телескопа, но и еще на протяжении двух столетий. Лишь в 1830-е гг. сразу трое ученых в разных странах сумели это сделать.

Самый точный метод измерения расстояний до звезд — параллактический.

Британский астроном Томас Хендерсон (Thomas Henderson), работавший в Южной Африке, выбрал для наблюдений самую, как оказалось, близкую из ярких звезд — альфу Центавра. В 1833 г. он провел наблюдения и получил значение параллакса примерно равным $1''$, а расстояние до звезды, соответственно, около трех световых лет. Однако сам он полагал, что его измерения недостаточно точны, и опубликовал свои результаты лишь в 1839 г. Василий Струве (Friedrich Struve) наблюдал из Тарту одну из ярчайших звезд, видимых в Европе, — Вега. В 1837 г. он опубликовал первые результаты, но, как ему показалось, не достиг достаточной точности и поэтому продолжил наблюдения, представив новые данные в 1839 г. Фридрих Бессель (Friedrich Bessel), работавший в Кёнигсберге, не стал выбирать яркий объект, а взял звезду 61 Лебеда, обладающую большим собственным движением, — и не прогадал. В 1838 г. он опубликовал достаточно точные результаты: параллакс оказался равным примерно $0,3''$, т. е. звезда находится на расстоянии около 10 световых лет.

Парсек в 206 265 раз больше астрономической единицы — расстояния от Земли до Солнца — и равен 3,26 светового года.

Измерения параллаксов — это самый прямой и точный способ измерения расстояний до звезд. Астрономы даже придумали специальную величину — парсек. Это расстояние до звезды, чей годичный параллакс равен одной угловой секунде. Один парсек примерно равен 3,26 светового года, или $3,1 \times 10^{18}$ см. Однако даже самые близкие звезды имеют параллакс менее $1''$, а измерять столь малые углы сложно. До 1990-х гг. таким способом расстояния с хорошей точностью измерялись лишь в пределах сотни парсек, причем для довольно небольшого числа звезд. В 1989 г. был запущен астрометрический спутник Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite, Спутник для измерения параллаксов с высокой точностью, акроним созвучен с именем древнегреческого астронома Гиппарха Никейского), работа которого позволила за несколько лет с достаточной точностью измерить расстояния до десятков тысяч звезд в пределах сотен парсек. Сейчас на орбите работает спутник Gaia, который поможет надежно измерять расстояния

уже до сотен миллионов звезд в пределах 10 000 парсек, что позволит впервые создать трехмерную карту Галактики (точнее, ее половины).

До появления первых результатов, полученных Gaia, для звезд на расстояниях более тысячи световых лет не было возможности надежных массовых измерений. Поэтому были разработаны другие методы. Первый из них — метод групповых параллаксов.

Этот метод применим для близких рассеянных звездных скоплений, в первую очередь Гиад и Плеяд. Все звезды скопления движутся вместе, но мы можем измерить их индивидуальные скорости: вдоль луча зрения — по эффекту Доплера, перпендикулярно лучу зрения — по их смещению на небе. Поскольку Солнце движется относительно скоплений, то из-за эффекта перспективы нам кажется, что все звезды Гиад и Плеяд летят в одну точку — туда направлены векторы их скоростей, измеряемые с Земли. Это позволяет определить расстояния до скоплений, что до недавнего времени было крайне важно, поскольку в рассеянных скоплениях наблюдаются такие переменные звезды, как цефеиды.

Метод групповых параллаксов позволяет измерять расстояния до близких рассеянных скоплений.

Цефеиды — это звезды-гиганты, периодически меняющие свой блеск. Период изменения блеска зависит от светимости звезды, так что, измерив этот период (что достаточно просто) и зная видимый блеск звезды, мы сразу получаем оценку удаленности. Но шкалу расстояний, определяемых по цефеидам, нужно откалибровать, измерив расстояния до них независимым способом. К сожалению, до недавнего времени измерить расстояния до цефеид с помощью метода параллакса не удавалось. Лишь в XXI в. с помощью космического телескопа Hubble («Хаббл») удалось измерить параллаксы нескольких десятков цефеид (включая и сам прототип — дельта Цефея, до которой оказалось примерно 1000 световых лет) с точностью в несколько процентов. Незадолго до этого Hipparcos измерил параллаксы некоторых цефеид, но с недостаточной точностью (самые близкие звезды этого класса, кроме аномальной Полярной, находятся почти в 1000 световых лет от нас). Поэтому долгое время в основном использовалось фотометрическое расстояние до рассеянных скоплений, в которых наблюдали цефеиды.

Расстояния до цефеид можно измерить, зная период изменения их блеска.

Фотометрическое расстояния до скопления определяют следующим образом. Рассеянные скопления — это относительно молодые объекты. Все звезды в каждом отдельно взятом скоплении имеют

примерно одинаковый возраст и находятся почти на одном и том же расстоянии. Поэтому на диаграмме цвет — звездная величина (это вариант диаграммы Герцшпрунга — Рассела, см. одноименный раздел 4.3) они располагаются вдоль так называемой Главной последовательности. Построим такие диаграммы для нескольких скоплений (например, Гиад и Плеяд) с известными расстояниями, используя абсолютные звездные величины (или светимости) вместо видимых величин. Для других рассеянных скоплений (с неизвестными расстояниями) со сходным химическим составом звезд мы также можем построить диаграммы Герцшпрунга — Рассела, но только для видимых звездных величин. Если бы мы могли использовать и для них абсолютные звездные величины (или светимость), то все диаграммы для скоплений одного состава совпали бы. Теперь попробуем совместить диаграммы для скоплений с известными и неизвестными расстояниями. Для последних это даст нам разность между видимой и абсолютной звездной величиной. По этой разности (и при известном межзвездном поглощении) мы можем определить расстояние до скопления.

Абсолютная звездная величина — это блеск, который имела бы звезда, находясь на расстоянии 10 парсек от нас.

Наконец, зная достаточно большое количество точных расстояний до хорошо изученных звезд, астрономы могут получать оценки, используя детальные звездные параметры. Скажем, по спектру какой-либо звезды можно найти похожую на уже известном расстоянии. Сравнивая их параметры, можно получить оценку расстояния до изучаемой звезды.

4.2

Устойчивость звезд и их структура

Устойчивость звезд определяется равновесием двух сил: гравитация стремится сжать звезду, а выделение энергии в термоядерных реакциях приводит к давлению (давлению излучения и газовому давлению), которое противодействует сжатию. При этом звезда находится в состоянии гидростатического равновесия (или колеблется вблизи него).

Энергия выделяется во внутренних областях, а затем в основном передается к поверхности, откуда излучается в виде электромагнитных волн. При этом часть энергии (обычно несколько процентов) уносится нейтрино непосредственно из областей термоядерных реакций, поскольку недра звезд прозрачны для этих частиц. Ядро звезды имеет температуру от нескольких миллионов градусов и выше, а поверхность — от менее чем 3000 К примерно до 100 000–200 000 К (низкие температуры ядра и поверхности соответствуют легким звездам). Существует два основных способа передачи энергии от недр к поверхности — конвекция и излучение, и оба механизма реализуются в звездах.

Устойчивость звезды определяется равновесием между силами гравитации и давления.

В маломассивных звездах (с массой менее 1,2–1,3 солнечных), где горение водорода связано в первую очередь с pp-цепочкой, темп выделения энергии не слишком велик. Поэтому ее перенос во внутренних частях (ближе к ядру) может осуществляться в основном излучением. В более массивных звездах, в которых на Главной последовательности преобладает CNO-цикл, энергии выделяется больше, создается большой градиент температуры, и в итоге возникает необходимость в конвективном переносе энергии.

Энергия передается от недр к поверхности излучением и конвекцией.

Во внешних частях ситуация обратная. Из-за относительно невысокой температуры во внешних слоях маломассивных звезд среда становится недостаточно прозрачной. Поэтому перенос энергии излучением становится неэффективным, и запускается конвекция. В массивных звездах вещество остается полностью ионизованным, а потому среда достаточно прозрачна, и излучение справляется с переносом энергии к самой поверхности.

Количество лучистой энергии в звездах может быть настолько велико, что чрезвычайно важную роль начинает играть давление света. При росте массы звезды растет темп энерговыделения, в итоге возрастает световой поток во внешних областях звезды. Он не только вносит основной вклад в давление во внешних частях массивных звезд, он может быть настолько велик, что начнет «сдувать» наружные слои. Чем больше масса звезды, тем сильнее звездный ветер и больше потеря массы. Поэтому самые массивные звезды очень быстро «худеют».

Для звезды любой массы можно определить предельную светимость, ее называют эддингтоновской. Обычно чем массивнее звезда, тем ближе ее светимость к предельному значению. Звезда

с массой в 20–30 раз больше солнечной имеет предельную светимость, в миллион раз превосходящую светимость Солнца. При этом наблюдаемая светимость таких звезд на Главной последовательности больше солнечной примерно в 100 000 раз. Самые массивные звезды имеют очень высокую светимость, но она все же меньше предельной.

Непрозрачность вещества звезды зависит от содержания тяжелых элементов, поэтому у малометаллических звезд ветер слабее. Соответственно, предельная светимость также зависит от металличности звезды. Значит, от этого может зависеть и предельная масса. Чем меньше содержание элементов тяжелее гелия, тем, по всей видимости, больше может быть максимальная масса звезд. Для так называемого солнечного (типичного сейчас для межзвездной среды нашей Галактики) состава эта величина составляет несколько сотен солнечных масс в случае невращающихся звезд. Возможно, особенности звездообразования (например, способность коллапсирующего газа остывать и фрагментировать на отдельные сгустки, что также зависит от химического состава) определяют более низкий верхний предел на массу. Первые звезды с крайне низким содержанием тяжелых элементов могли иметь массы в несколько сотен солнечных. Также на предельную светимость и массу может влиять вращение звезды.

Давление света вносит вклад в баланс сил внутри звезд. Этот эффект растет с массой звезды.

Наличие конвективных оболочек у маломассивных звезд приводит к важным последствиям. Такие объекты могут иметь сильные магнитные поля на поверхности. Эти поля постоянно эволюционируют, создавая области с большой магнитной энергией, которая может выделяться в виде звездных вспышек. Как правило, чем меньше масса звезды, тем глубже конвективная оболочка (для масс ниже примерно трети солнечной вся звезда становится конвективной) и тем мощнее вспышечная активность. Красные карлики, чья масса в несколько раз меньше солнечной, известны как источники частых и мощных вспышек. В последние годы большую статистику по этим явлениям собрал космический телескоп Kepler.

Звезды имеют отрицательную теплоемкость, что создает условия для саморегуляции.

Звезды являются очень устойчивыми и стабильными объектами благодаря так называемой отрицательной теплоемкости. Если температура в центральной части звезды увеличивается (например, возрастает темп термоядерных реакций), то дополнительное энерговыделение приведет к раздуванию звезды и тем самым уменьшению

ее температуры. Падение температуры, в свою очередь, приведет к уменьшению темпа термоядерных реакций. За счет такой саморегуляции с отрицательной обратной связью звезда вернется в исходное состояние. Аналогично будут развиваться события, если каким-то образом увеличится отвод тепла: давление упадет, звезда сожмется, что приведет к росту температуры и плотности, увеличится темп термоядерных реакций, и звезда снова вернется в исходное состояние. Отрицательная теплоемкость позволяет звездам сохранять равновесие в течение длительного времени.

Отрицательная теплоемкость звезд связана с тем, что одной из основных сил, определяющих их состояние, является гравитация. Аналогичные явления свойственны и более простым системам, например планетам и спутникам. Если мы затормозим движение спутника, то он, потеряв энергию, опустится на более низкую орбиту, но при этом скорость его движения возрастет: отбирая энергию, мы увеличиваем кинетическую энергию спутника. Этот кажущийся парадокс легко понять, если вспомнить, что в поле тяготения тела имеют отрицательную потенциальную энергию. Полная энергия спутника действительно уменьшается, как и должно быть. Кинетическая энергия растет, но при этом растет (по модулю) и отрицательная потенциальная энергия.

Для таких систем, находящихся в равновесии в гравитационном поле, верна так называемая теорема вириала. Она гласит, что потенциальная энергия по модулю равна удвоенной кинетической. Для звезд роль кинетической энергии выполняет внутренняя энергия, связанная с давлением газа, т. е. кинетическая энергия движения составляющих его частиц.

4.3 Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Цефеиды

Огромную роль в визуализации параметров звезд и свойств их эволюции играет диаграмма Герцшпрунга — Рассела. В типичном современном виде она связывает светимость звезд с их температурой. Однако обе величины трудно измерить напрямую, поэтому часто используют варианты диаграммы с другими параметрами, связанными со светимостью и температурой.

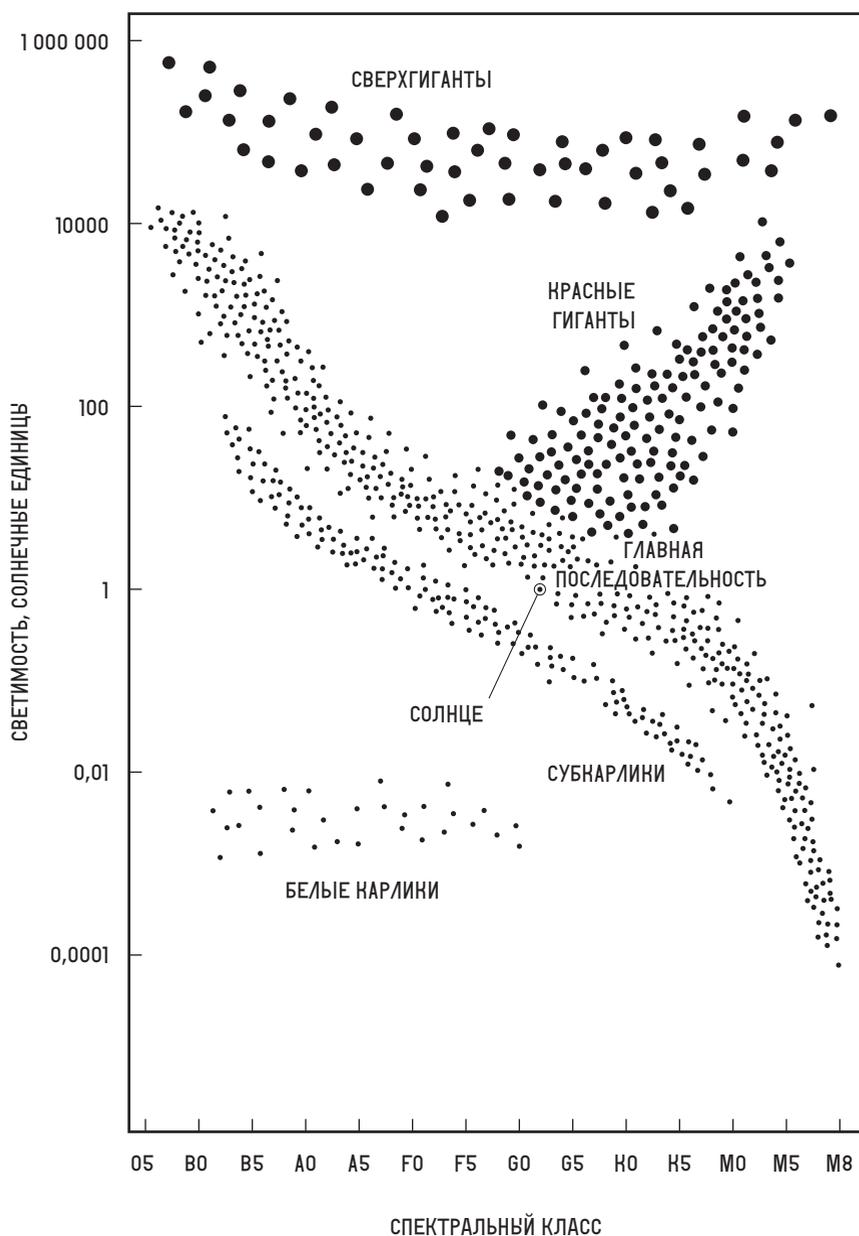


Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. По горизонтальной оси слева направо отложены спектральные классы (они отражают температуру звезд — от горячих к холодным), по вертикальной — светимости (яркие вверх, слабые вниз) в единицах светимости Солнца. Основные последовательности соответствуют различным стадиям эволюции звезд (однако последовательности не являются эволюционными треками). Большую часть своей жизни звезда проводит на так называемой Главной последовательности, превращая водород в гелий.

Для определения светимости необходимо знать расстояние до звезды. Однако, если мы используем звезды одного скопления, все они лежат примерно на одном расстоянии от нас. Значит, можно просто использовать их наблюдаемый блеск (звездную величину) как меру относительной светимости. Точное определение температуры также является непростой задачей, однако можно использовать различные спектральные характеристики (например, так называемые показатели цвета, которые можно в первом приближении представить себе как цвет звезды). Именно так и поступали первые исследователи.

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела связывает светимость и температуру звезд.

Диаграмма получила свое имя в честь Эйнара Герцшпрунга (Ejnar Hertzsprung) и Генри Рассела (Henry Russell). Герцшпрунг для своих первых диаграмм использовал звезды скопления Плеяды, а Рассел использовал звезды с расстояниями, определенными тем или иным образом. Непосредственные измерения температур не были доступны, поэтому Рассел использовал так называемые спектральные классы звезд, а Герцшпрунг — характерную длину волны, соответствующую максимуму спектра (по сути, цвет звезды).

Основная часть звезд находится на Главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рассела.

Однако первый опубликованный график такого типа не принадлежал ни Герцшпрунгу (который опубликовал свои результаты в 1911 г.), ни Расселу (в 1913 г.) — его построил в 1910 г. Ганс Розенберг (Hans Rosenberg) также для звезд Плеяд, используя спектральные классы, определяемые по соотношению интенсивностей линий в спектре.

Положение звезды на диаграмме светимость-температура дает нам представление и о размерах звезд. Излучение звезды, например Солнца, приблизительно можно описать законом излучения абсолютно черного тела (формулой Планка). Светимость при этом подчиняется закону Стефана — Больцмана: она пропорциональна площади поверхности (т. е. квадрату радиуса звезды) и четвертой степени ее температуры. Соответственно, высокой светимостью могут обладать или звезды с высокой температурой, или звезды с большим радиусом (оба варианта реализуются в природе).

Основной особенностью распределения звезд на диаграмме Герцшпрунга — Рассела является так называемая *Главная последовательность*. Оказалось, что подавляющее большинство звезд попадает на полосу, тянущуюся от левого верхнего (мощные звезды с высокой

температурой поверхности) к правому нижнему углу (слабые звезды с низкой температурой — красные карлики). Сейчас мы знаем, что, попав в определенную часть Главной последовательности (куда именно, в первую очередь зависит от массы), звезда проводит там около 90% своей жизни. Это самая длинная стадия, на которой происходит превращение водорода в гелий.

На стадии Главной последовательности происходит превращение водорода в гелий.

По окончании термоядерного горения водорода в ядре звезды она покидает Главную последовательность. Дальнейшая жизнь звезды — это ее путешествие по диаграмме Герцшпрунга — Рассела. В зависимости от массы этот путь (эволюционный трек) может быть более или менее замысловатым.

Звезды типа Солнца смещаются вправо (более низкие температуры поверхности) и значительно вверх (рост светимости), превращаясь в красных гигантов. В конце своей жизни они сбрасывают внешние оболочки (которые могут быть видны как планетарные туманности) и превращаются в белые карлики.

Массивные звезды значительно смещаются вправо и немного вверх, возможно, выписывая петли на диаграмме. Их называют яркими гигантами и сверхгигантами. В конце своей жизни они чаще всего вспыхивают как сверхновые и оставляют после себя нейтронные звезды, а иногда и черные дыры.

Положение звезды на Главной последовательности, а также ее эволюционный путь зависят не только от массы, но и от начального химического состава. Маломассивные звезды с сильно пониженным содержанием тяжелых элементов немного сдвинуты от стандартной Главной последовательности влево (в сторону более высоких температур) и немного вверх, образуя параллельную последовательность субкарликов. В общих чертах эволюция малометаллических звезд по окончании горения водорода в ядре подобна эволюции звезд с солнечным составом, но конкретный вид треков может отличаться, особенно для массивных объектов.

Положение звезды на Главной последовательности и ее эволюция определяются в первую очередь массой, а также химическим составом.

Звезды со сходным поведением на диаграмме Герцшпрунга — Рассела группируются. В частности, некоторые пульсирующие звезды занимают строго определенные области. Самые известные из них — цефеиды, они попадают в так называемую полосу неустойчивости.

Цефеиды получили свое название по звезде-прототипу. Переменность дельты Цефея описал в 1784 г. Джон Гудрайк (John Goodricke). К цефеидам относится и самая яркая звезда в кратной системе Полярной звезды. Аристарх Белопольский, исследуя спектры дельты Цефея, в 1894 г. обнаружил, что лучевая скорость этой звезды периодически изменяется. Однако тогда не удалось показать, что это связано именно с пульсациями (сам Белопольский полагал, что такая переменность объясняется двойственностью звезды). Окончательно существование пульсаций стало ясным пару десятилетий спустя, в основном благодаря работам Харлоу Шепли (Harlow Shapley). Тем не менее причина такого поведения оставалась неясной еще более полувека.

Цефеиды — это пульсирующие звезды-гиганты.

Идея механизма работы цефеид была высказана Артуром Эддингтоном (Arthur Stanley Eddington) еще в 1920-е гг.: если во время пульсаций будет меняться (увеличиваться во время расширения и уменьшаться во время сжатия) прозрачность значительного слоя вещества внутри звезды, то периодическое «запирание» излучения сможет поддерживать эти колебания. А в 1950-е гг. Сергей Жевакин внес основной вклад в решение загадки пульсаций цефеид (и некоторых других пульсирующих звезд), показав, что частичная ионизация водорода и гелия может приводить к необходимому изменению прозрачности слоев оболочки звезды на нужной глубине. При сжатии часть энергии идет на ионизацию, а не на повышение температуры в слое, при этом возрастает плотность. В результате вещество становится менее прозрачным, и излучение, как поршень, начинает толкать вещество наружу. При этом прозрачность растет, излучение покидает слой, и оболочка вновь начинает сжиматься. Этот цикл повторяется снова и снова.

Период пульсаций цефеид связан с их светимостью, что позволяет использовать эти объекты для определения расстояний.

Такой цикл работает только в случае залегания запирающего слоя на нужной глубине. Соблюдение этого условия в первую очередь определяется температурой звезды. Поэтому на диаграмме Герцшпрунга — Рассела возникает достаточно узкая, почти вертикальная полоса неустойчивости, где и расположены практически все типы регулярно пульсирующих с достаточно большой амплитудой звезд. Сейчас строятся более детальные модели пульсаций, которые могут объяснять очень сложное поведение некоторых объектов, демонстрирующих вариации периодов, различные типы пульсаций, их сочетания и эволюцию.

Важной особенностью цефеид является то, что период их пульсаций (он составляет от 1 до 100 дней) связан со светимостью. Это установила в 1912 г. Генриетта Левитт (Henrietta Leavitt), изучая цефеиды Малого Магелланова Облака. Поскольку цефеиды — гиганты, т. е. обладают высокой светимостью (обычно она в несколько тысяч раз превосходит солнечную), уже сто лет назад их можно было наблюдать в соседних галактиках. Именно это позволило в 1920-е гг. Эдвину Хабблу (Edwin Hubble) и другим исследователям определить природу спиральных туманностей и продемонстрировать, что это гигантские звездные системы, подобные нашей и находящиеся на расстояниях в миллионы световых лет. В настоящее время цефеиды используют как одну из основ определения расстояний до других галактик.

В последние годы благодаря работе космического телескопа Hipparcos, а позднее космического телескопа Hubble, удалось с высокой точностью измерить параллаксы для нескольких десятков цефеид. Это позволило уточнить внегалактическую шкалу расстояний благодаря лучшей калибровке определения расстояний по цефеидам.

4.4

Двойные и кратные звезды.

Аккреция

Исключая самые легкие, около половины звезд входит в физически (гравитационно) связанные кратные системы, в некоторых случаях они наблюдаются даже невооруженным глазом или в небольшой любительский телескоп. Однако две звезды, видимые рядом на небе, необязательно образуют пару: это может быть случайной проекцией. Для установления физической связи лучше всего обнаружить вращение вокруг общего центра масс (непосредственно по смещению звезд или по их скоростям, определяемым по спектру). Иногда (в первую очередь в очень широких парах с большими орбитальными периодами) это невозможно сделать (например, вплоть до 2016 г. продолжались споры о том, образует ли Проксима Центавра гравитационно-связанную тройную систему с двумя звездами альфы Центавра). Тогда факт связи можно установить или по одинаковому расстоянию, или по одинаковому собственному движению звезд (смещению на небе из-за их движения относительно Солнца).

Существуют не только двойные, но и тройные, а также системы из четырех, пяти и даже шести звезд, гравитационно связанные друг с другом. Более 10% звезд (опять же, исключая самые легкие) входит в состав тройных или систем более высокой кратности. Однако в таких системах всегда реализуется иерархический принцип. Например, тройная система устойчива только в том случае, если две из трех звезд образуют тесную пару с расстоянием между ними существенно меньшим, чем расстояние до третьей звезды (например, как Проксима Центавра в системе альфы Центавра). Иными словами, звезда в каждый момент времени может иметь только одного близкого соседа, если система устойчива.

Около половины звезд типа Солнца входит в двойные системы.

Расстояние между компонентами может сильно варьироваться от системы к системе. С одной стороны, оно ограничено воздействием звезд друг на друга, а потому не может составлять менее нескольких звездных радиусов (если только звезды не находятся на быстрой стадии слияния). Соответственно, среди нормальных звезд самые тесные пары могут образовывать красные карлики, а вообще среди тел звездных масс — компактные объекты. Например, известна пара белых карликов НМ Рака, делающая один оборот всего лишь за пять минут; тела в этой системе имеют орбитальные скорости более миллиона километров в час! С другой стороны, двойные системы не могут быть очень широкими (т. е. с большой орбитой), поскольку их могут разрушить пролетающие мимо звезды или их суммарное воздействие (многие звезды рождаются в плотных группах и скоплениях, так что разрушение широких пар может происходить очень рано). Поэтому систем шире нескольких десятков тысяч астрономических единиц практически не бывает, и число примеров систем большего размера очень незначительно. Обычно же расстояние между компонентами двойных составляет от нескольких до нескольких сотен астрономических единиц (в среднем оно меньше для более легких пар).

Системы высокой кратности имеют иерархическое устройство.

Обычно компоненты двойных систем не слишком различаются по массам, отличия более чем в несколько раз являются довольно редкими. Легкие звезды с меньшей вероятностью образуют пары, у самых маломассивных этот показатель всего лишь около 20%, и наоборот, среди более массивных образуют пары более 80%.

Существует несколько сценариев образования двойных звезд. Первый вариант состоит в том, что сжимающееся «ядро» внутри молекулярного облака может начать по тем или иным причинам фрагментироваться. В результате внутри «ядра» формируется не одна звезда, а несколько, образующих связанную систему. Современное моделирование показывает, что хорошим кандидатом в причины фрагментации является турбулентность в облаке. Второй сценарий связан с фрагментацией протозвездного диска, этот механизм особенно интересен для создания тесных систем. Третий сценарий связан со взаимодействием звезд, образующихся плотной группой, в котором также важно участие газа, аккрецируемого звездами. Однако достоверно определить, какие системы образуются в разных сценариях и с какой частотой, пока не получается, так что сделать окончательный выбор между сценариями затруднительно.

Легкие звезды реже образуют двойные и кратные системы, массивные — чаще.

В достаточно тесных парах звезды могут начать взаимодействовать: обмениваться веществом и даже сливаться. Это приводит к появлению ряда интересных систем, особенно на поздних стадиях эволюции, когда в двойной системе уже сформировались компактные объекты — белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. (Поскольку кратные системы устроены иерархически, интенсивное взаимодействие всегда происходит между двумя звездами, так что в дальнейшем пойдет речь именно об этом.)

Вокруг каждой звезды существует область, где она контролирует движение вещества, — это так называемая полость Роша. В двойной системе полости Роша образуют фигуру, похожую в сечении на знак «бесконечность», соприкасаясь в так называемой внутренней точке Лагранжа. Существует два основных сценария переноса вещества с одного компонента двойной на другой.

В тесных двойных системах происходит обмен масс.

Во-первых, одна из звезд может стать источником мощного звездного ветра. Вещество будет покидать ее полость Роша и частично может захватываться соседом. Если это компактный объект (белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра), то падение захваченного вещества на него (этот процесс называют аккрецией) приведет к заметному энерговыделению. Аккреция может идти как в почти симметричном режиме (так называемая сферическая аккреция), так и с образованием аккреционного диска.

Аккреционные диски всегда образуются во втором сценарии переноса вещества. В нем один из компонентов заполняет свою полость Роша, что происходит, например, при превращении звезды в красного гиганта, или же размер полости уменьшается при сближении компонент. Вещество начинает перетекать в соседнюю полость Роша через внутреннюю точку Лагранжа. Из-за большого момента импульса (углового момента) захваченное вещество не может сразу упасть на вторую звезду (особенно если это компактный объект), поэтому оно закручивается в кольцо, которое из-за вязкости расплывается в диск.

Аккреция на компактные объекты приводит к появлению ярких, часто рентгеновских, источников.

Теория аккреции начала развиваться еще в 1940-е гг. трудами британских ученых — Германа Бонди (Hermann Bondi), Фреда Хойла и Реймонда Литтлтона (Raymond Lyttleton). Новое развитие она получила после открытия первых рентгеновских источников в двойных системах в 1960-е гг.

В 1972–1973 гг. Николай Шакура и Рашид Сюняев построили теорию дисковой аккреции, являющуюся в настоящее время базовой моделью, позволяющей рассчитывать наблюдаемые свойства аккрецирующих компактных объектов. Эта модель применима и для других ситуаций, в которых образуются диски (активные ядра галактик, молодые звезды и т. д.). Большой вклад в развитие теории аккреции также внесли Кип Торн (Kip Thorne) и Игорь Новиков, которые впервые построили модель с достаточно полным учетом эффектов общей теории относительности.

Слияние двух достаточно массивных белых карликов приводит к вспышке сверхновой типа Ia.

При падении на компактный объект и при образовании аккреционного диска происходит сильный разогрев вещества, поэтому мы наблюдаем аккрецирующие объекты как яркие источники. Если аккреция идет на нейтронную звезду или черную дыру звездной массы, то основная часть энергии уносится рентгеновским излучением. Эффективность энерговыделения может достигать десятков процентов от предельно возможного значения (mc^2). Такие источники были впервые открыты с помощью космических аппаратов в 1960-е гг., а начиная с 1970-х гг. стали одним из основных источников информации о нейтронных звездах и черных дырах.

Особое место занимают системы, состоящие сразу из двух компактных объектов. Их слияния приводят к появлению мощных

источников разных классов. Сейчас известно несколько двойных, состоящих из двух белых карликов или двух нейтронных звезд, а также системы из белого карлика и нейтронной звезды.

Слияния двух белых карликов приводят к вспышке сверхновой типа Ia. Для этого необходимо, чтобы суммарная масса сливающихся объектов превосходила критическую. Сверхновые этого типа являются одним из основных поставщиков тяжелых элементов (в первую очередь группы железа), поскольку обычно происходит полное разрушение взрывающегося объекта.

Слияния двух нейтронных звезд приводят к появлению короткого гамма-всплеска. При этом также происходит выделение энергии и на более длинных волнах — вспыхивают так называемые *килоновые*. Кроме того, такие события важны с точки зрения синтеза ряда тяжелых элементов (например, золота), рождающихся в быстром (r-) процессе (см. раздел 5.2 «Химическая эволюция Вселенной. Звезды»). Наконец, слияния нейтронных звезд являются источниками гравитационных волн.

Слияния двойных нейтронных звезд и черных дыр сопровождаются мощным гравитационно-волновым всплеском.

Первый гравитационно-волновой всплеск был зарегистрирован установками LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория, см. раздел 13.9 «Детекторы гравитационных волн») осенью 2015 г., причиной события стало слияние двух черных дыр. Благодаря большой массе сливающихся объектов всплески можно обнаруживать на космологических расстояниях, превышающих миллиард световых лет. Для расчета темпа таких событий важно хорошо понимать эволюцию двойных звезд. Слияния нейтронных звезд происходят чаще слияний с участием черных дыр, зато большая масса последних позволяет видеть такие события с больших расстояний. Сейчас данные с гравитационно-волновых детекторов позволяют уточнить картину эволюции двойных звезд.

4.5

Образование звезд. Три населения

Звезды образуются из облаков газа и пыли в процессе их сжатия. Соответственно, процесс звездообразования зависит от свойств газа: плотности, температуры, химического состава, турбулентности, магнитных полей и других параметров.

Процесс формирования первых звезд начался спустя десятки миллионов лет после начала расширения Вселенной, когда газ содержал очень малое количество элементов тяжелее гелия. Возникшие из этой среды звезды относят к населению III (иногда вместо термина «население» используют «популяция» или «поколение»). В настоящее время такие звезды с нулевым содержанием элементов тяжелее гелия не обнаружены ни в наших окрестностях, ни при наблюдениях далеких объектов в молодой Вселенной.

Первые звезды, возникшие из газа первичного состава, относят к населению III.

Следующий важный этап связан с началом формирования нашей Галактики, когда вещество уже было немного обогащено тяжелыми элементами благодаря взрывам первых массивных звезд. Первые пару миллиардов лет темп образования звезд в Галактике был очень велик. На ранних этапах формирования Галактики и возникла большая звездная популяция — население II, в основном звезды этой популяции находятся в гало и шаровых скоплениях, а также в балдже (см. раздел 8.1 «Структура Галактики»).

В Галактике выделяют два звездных населения: I и II. Звезды населения II бедны элементами тяжелее гелия, а звезды населения I имеют примерно солнечный состав. Кроме того, у них разные кинематические свойства.

Наконец, процесс звездообразования продолжился в диске Галактики, где идет и сейчас. Химический состав Галактики (газа и звезд в ней) меняется, но уже не слишком существенно, он примерно соответствует солнечному, и все звезды Галактики с таким составом

относят к населению I. Населения I и II впервые были выделены в 1944 г. Вальтером Бааде (Walter Baade) по результатам сравнения звезд нашей Галактики со звездами туманности Андромеды (M31).

Процесс формирования звезд вызывает еще много вопросов, однако в общих чертах картина представляется ясной, особенно применительно к современному звездообразованию. Развитие наблюдательных возможностей позволяет видеть различные этапы образования звезд: начиная от появления уплотнений в молекулярных облаках и заканчивая молодыми объектами, выходящими на Главную последовательность и еще окруженными протопланетными или остаточными дисками.

Звезды рождаются в результате коллапса внутренних частей молекулярных облаков.

Молекулярные облака содержат практически весь молекулярный водород в Галактике. Их средняя плотность обычно составляет несколько сотен атомов водорода в кубическом сантиметре, а массы — от сотен до миллионов масс Солнца. Внутренняя структура облака довольно сложная: выделяют сгустки, в которых могут образовываться звезды, и протозвездные ядра, где этот процесс уже идет. В сгустках плотность составляет от тысячи до сотни тысяч атомов в кубическом сантиметре, а в протозвездных ядрах — превосходит сто тысяч атомов в кубическом сантиметре. Средняя температура в облаках 10–30 К, в сгустках она чуть меньше, а в протозвездных ядрах часто даже ниже 10 К. Типичные размеры облаков — несколько парсек, сгустков — менее 2 парсек, а размеры протозвездных ядер исчисляются уже десятками тысяч астрономических единиц.

В облаках существуют мощные турбулентные потоки и магнитные поля, обеспечивающие устойчивость облака. В процессе сжатия и под действием турбулентности возникают уплотнения, масса которых превосходит критическую (так называемую джинсовскую массу), и тогда начинается коллапс, приводящий к образованию звезд. Протозвезда аккрецирует газ, пока он не закончится или пока излучение звезды не начнет ионизировать, нагревать и отбрасывать газ. Если сжатие началось, то протозвезда формируется относительно быстро — за миллион лет (а массивные звезды даже быстрее).

Детальное рассмотрение условий сжатия газа под действием гравитации выполнил в 1902 г. Джеймс Джинс (James Jeans), в честь которого и были названы соответствующие критические величины — джинсовские масса и длина. Он показал, что для сгустка газа, находящегося в равновесии (как правило, его внутреннее давление уравнивается давлением внешней среды и силой гравитации), существуют критическая масса и размер, при превышении которых начинается сжатие.

Есть простое объяснение этих критических условий: сила гравитации уравновешена градиентом давления, при росте массы (а значит, и размера) сила гравитации возрастает, в итоге она побеждает, и начинается сжатие. Более детальное объяснение заключается в рассмотрении характеристик противоборствующих процессов. В ходе сжатия сгустка силы гравитации растут, сгусток продолжает сжиматься, и у этого процесса есть характерные время и скорость — время и скорость свободного падения. Равновесие может быть восстановлено ростом давления, характерная скорость этого процесса равна скорости звука. Если время пересечения сгустка звуковой волной меньше времени свободного падения, равновесие будет восстановлено. Если же, наоборот, время свободного падения меньше — сжатие продолжится.

Коллапс большого сгустка газа сопровождается фрагментацией. Поэтому звезды обычно рождаются группами.

В реальности условия начала сжатия выглядят гораздо сложнее, поскольку необходимо учитывать сложную структуру сгустков, а также наличие турбулентности и магнитных полей. Оценки показывают, что в реальной межзвездной среде могут коллапсировать молекулярные облака в целом или их внутренние части, условия сжатия зависят от температуры и плотности. При сжатии газ может нагреваться, что ведет к росту давления, поэтому необходимо, чтобы он мог достаточно быстро остывать. В межзвездной среде это осуществляется излучением молекул и пыли. Если остывание достаточно эффективно, а среда сильно турбулентна, то в процессе коллапса сгустки будут фрагментироваться, в результате чего возникает множество протозвезд. Они продолжают аккрецировать газ (конкурируя за него), и в итоге возникает группа или скопление звезд.

Условия в молодой Вселенной, когда газ еще не был обогащен элементами тяжелее гелия, существенно отличались от современных: тогда еще не существовало основных молекул (СО и др.) и пыли, отвечающих за остывание сжимающегося облака посредством излучения. Поэтому основным охлаждающим агентом являлся молекулярный водород H_2 . Поскольку эта молекула симметрична, она не является эффективным излучателем, и это осложняет образование первого поколения звезд.

Условия рождения звезд в молодой Вселенной отличались от современных.

В ранней Вселенной из-за существования и роста флуктуаций плотности возникают так называемые мини-гало, состоящие из темного вещества и водородно-гелиевого газа (см. главу 10 «Мир

галактик», а также раздел 12.4 «Спектр первичных возмущений»). В достаточно массивных гало (около миллиона масс Солнца, большая часть массы определяется темным веществом) возникают условия для начала образования звезд. Детали этого процесса остаются пока неясными. Первые расчеты показывали, что в основном возникают очень массивные звезды (сотни масс Солнца) — часто одна на мини-гало. Они должны были довольно быстро завершать свою эволюцию, обогащая среду тяжелыми элементами и превращаясь в черные дыры с массами 100–200 солнечных. Однако последующее компьютерное моделирование показало, что в населении III могут возникать группы звезд, содержащие и достаточно легкие (с массой порядка солнечной) объекты. Некоторые из самых легких звезд популяции III могли дожить и до наших дней, хотя пока такие объекты не обнаружены.

Мы наблюдаем различные стадии формирования звезд, включая протозвездные ядра и сами протозвезды.

При примерно солнечном составе газа формирование звезды занимает от нескольких сотен тысяч (в случае массивных объектов) до нескольких десятков миллионов лет (для массы немного меньше солнечной). Пока вещество довольно прозрачно и поэтому может быстро остывать, выделившийся сгусток достаточно быстро сжимается от размеров порядка 0,1 парсека до сотни радиусов Солнца — возникает протозвезда. Она продолжает медленно сжиматься и аккрецировать газ (такие объекты наблюдаются как мощные инфракрасные источники). Наконец, температура в недрах вырастает до достаточно больших значений, чтобы начались термоядерные реакции превращения водорода в гелий. В этот момент звезда оказывается на Главной последовательности.

4.6 Смена термоядерных реакций

Эволюция звезды — это в первую очередь история термоядерных реакций в ее ядре. Жизнь звезды начинается со стадии ее формирования. Еще до попадания на Главную последовательность в ее недрах идут низкотемпературные термоядерные реакции — прежде всего горение дейтерия. Однако можно считать, что звезда окончательно

сформировалась, когда начинается стабильный синтез гелия из водорода. У достаточно массивных звезд впоследствии могут начаться реакции синтеза других, более тяжелых элементов. Когда запасы какого-то элемента подходят к концу, реакции прекращаются, и звезда начинает сжиматься для сохранения гидростатического равновесия. Это приводит к повышению температуры и плотности в ее недрах, и, если они достигают необходимых критических значений, могут начаться реакции синтеза более тяжелых элементов.

В ходе эволюции звезды происходит смена термоядерных реакций в ее недрах.

Превращение водорода в гелий — это не одна реакция, а целая цепочка. Более того, существует два независимых канала синтеза гелия. Первый доминирует в маломассивных звездах (включая Солнце) и называется pp-цепочкой, поскольку все начинается взаимодействием двух протонов (этот канал синтеза был впервые рассмотрен Гансом Бете (Hans Bethe) в 1939 г.). Два протона, будучи положительно заряженными частицами, испытывают сильное кулоновское отталкивание. Поэтому для этой реакции (как и для многих других в термоядерном синтезе) необходимы не только высокая плотность и температура, но и такой квантовый эффект, как туннелирование, позволяющий частицам преодолеть кулоновский барьер (первым квантовое туннелирование рассмотрел Георгий Гамов в 1928 г. при разработке теории альфа-распада).

Два протона образуют изотоп ${}^2_2\text{He}$ (дипротон), при этом выделяется энергия. Благодаря бета-распаду один из протонов превращается в нейтрон, испуская позитрон (который тут же аннигилирует) и электронное нейтрино. Получившийся дейтерий захватывает еще один протон, образуя гелий-3 (${}^3_2\text{He}$) с выделением энергии. Далее возможны три пути. Первый: гелий-3 взаимодействует с таким же ядром, образуя гелий-4 (${}^4_2\text{He}$) и два протона с выделением энергии. Два других пути идут через взаимодействие гелия-3 с гелием-4. Их итогом также становится синтез гелия-4, плюс по ходу реакций испускаются нейтрино и выделяется энергия.

Судьба звезды и запуск последующих реакций зависят от температуры в недрах, которая определяется массой звезды.

В более массивных звездах доминирует так называемый CNO-цикл (он имеет место и в Солнце, где отвечает менее чем за 2% энерговыделения). В этом канале также есть несколько цепочек реакций. Особенностью этого цикла является то, что для протекания

реакций необходимо присутствие ядер углерода, азота и кислорода, выступающих в роли катализатора (при этом азот и кислород создаются и исчезают в процессе цикла, см. раздел 1.2 «Реакции в Солнце. Нейтрино»). Итогом реакций вновь является синтез гелия-4 из четырех протонов с выделением энергии и испусканием нейтрино. Впервые этот цикл был рассмотрен Карлом фон Вайцзеккером (Carl Friedrich von Weizsäcker) и Гансом Бете в 1938–1939 гг.

Когда водород в ядре звезды исчерпан, реакции прекращаются. Энерговыведение падает, и ядро начинает сжиматься, чтобы сохранить гидростатическое равновесие, и при этом нагревается. У звезд с массой менее половины солнечной нагрев ядра оказывается недостаточным для запуска следующей реакции — синтеза углерода. В этом случае плотность в ядре растет, пока газ не перейдет в вырожденное состояние — образуется гелиевый белый карлик. Однако, поскольку время эволюции столь маломассивных светил превышает современный возраст Вселенной, ни одна звезда еще не прошла этот путь до конца.

В звездах с массой менее половины солнечной реакции останавливаются после синтеза гелия.

У звезд тяжелее примерно половины массы Солнца иная судьба. При сжатии ядра температура в его внешних слоях может повыситься настолько, что начнет гореть сохранившийся снаружи ядра водород — возникает так называемый слоевой источник. Энерговыведение достаточно велико, поэтому внешняя оболочка расширяется. Температура поверхности падает, но полная светимость звезды возрастает: появляется красный гигант.

В звездах с массой от 0,5 до 8 масс Солнца реакции не идут дальше синтеза углерода и кислорода.

Рост температуры в ядре приведет к началу термоядерного горения гелия. Причем у звезд с массой менее 1,8 солнечной вещество в ядре успевает достичь вырожденного состояния, поэтому зажигание гелия носит характер вспышки². Гелий превращается в углерод в так называемой 3-альфа реакции: две альфа-частицы (ядра гелия-4) образуют нестабильный ${}^8_4\text{Be}$, и, прежде чем он распадается, третья альфа-частица вступает в реакцию, формируя ядро углерода-12. Первая реакция идет с небольшой затратой энергии, зато вторая — с большим энерговыведением. Светимость звезды на этой стадии больше, чем на Главной последовательности, но сама стадия при этом короче.

² Быстро возрастает темп горения гелия, однако резкого всплеска светимости звезды при этом не происходит.

Если температура в ядре достаточно высока (что зависит от массы звезды), то углерод может взаимодействовать с альфа-частицей, образуя кислород. По окончании горения гелия возникает углеродно-кислородное ядро. Оно также со временем начинает сжиматься, и при этом возможно появление слоевых источников двух типов: водородного (расположен выше) и гелиевого (ниже). На этой стадии звезда может стать красным сверхгигантом с радиусом до миллиарда километров. В конце концов, если масса звезды менее 8–10 солнечных, составляющая большую часть массы звезды оболочка будет сброшена, и образуется углеродно-кислородный (CO-) белый карлик.

В звездах с массой более 8–10 солнечных температура в ядре может повыситься до значений, открывающих возможности для дальнейшего термоядерного синтеза — вплоть до элементов группы железа. Каждая последующая стадия горения короче предыдущей и требует более высокой температуры в недрах.

В ядрах тяжелых звезд синтез идет вплоть до образования элементов группы железа.

Все начинается со стадии горения углерода, когда два ядра этого элемента взаимодействуют, синтезируя неон, натрий и магний. Натрий в основном захватывает протон, превращаясь в неон и альфа-частицу. Поэтому основным продуктом горения углерода является неон (плюс небольшое количество магния). Существуют каналы образования белых карликов с кислородно-неоново-магниевым (O-Ne-Mg) составом. Для этого надо предотвратить дальнейшие реакции, что может быть достигнуто, например, сбросом внешних слоев при взрывном начале горения углерода в вырожденном веществе.

Отметим, что у звезды с массой в десятки солнечных нет стадии, аналогичной классическим красным гигантам, так как их оболочки быстро истекают из-за сильного звездного ветра. Поэтому их движения по диаграмме Герцшпрунга — Рассела носят в основном горизонтальный характер.

В ходе эволюции звезда перемещается по диаграмме Герцшпрунга — Рассела. Ключевые точки связаны с выключением или включением различных термоядерных реакций.

Следующей является реакция горения неона, который превращается в магний, захватывая альфа-частицу. При температуре выше 2 млрд К начинается термоядерное горение кислорода. Самый важный канал такой реакции — превращение двух ядер этого элемента в кремний.

Наконец, при 5 млрд градусов идут реакции с участием кремния. Присоединяя к себе альфа-частицы (рождающиеся в процессе распада части кремния на магний и гелий-4 под воздействием фотонов высокой энергии), он последовательно дает серу, аргон, кальций и т. д. Эта цепочка заканчивается формированием железного ядра. После этого звезда, вероятнее всего, превращается в сверхновую.

4.7

Сверхновые

Существует несколько типов сверхновых. Первоначально деление на типы происходило на основе наблюдательных данных (спектры, кривые блеска), но гораздо важнее отличие в физическом механизме. Существует два принципиально разных типа сверхновых. Первые — это сверхновые с коллапсом ядра, у которых вспышка является финальным аккордом эволюции массивной звезды, чье ядро потеряло устойчивость. Как правило, после вспышки сверхновой такого типа остается компактный остаток — нейтронная звезда или черная дыра. Второй тип сверхновых — это термоядерные взрывы белых карликов. В этом случае вырожденный звездный остаток (белый карлик) достигает критической массы, что приводит к термоядерному взрыву. Чаще всего при этом все вещество оказывается рассеянным в окружающем пространстве. Сверхновые с коллапсом ядра могут относиться к разным подклассам — III, II, Ib/c и др. Взрывы белых карликов — это сверхновые типа Ia. Кроме того, массивные звезды могут заканчивать свою жизнь без взрыва, их ядра при этом превращаются в черные дыры.

Взрывы сверхновых связаны с процессами в ядрах массивных звезд на финальных стадиях эволюции или со взрывами сверхкритических белых карликов.

Звезды-прародители сверхновых с коллапсом ядра характеризуются тем, что углерод в них загорается, когда вещество ядра еще не находится в вырожденном состоянии (иначе образуется O-Ne-Mg белый карлик). Это позволяет в дальнейшем пройти цепочку термоядерных реакций вплоть до формирования железного ядра (если звезда не взорвется раньше из-за неустойчивости кислородного ядра, см. ниже). Граница, разделяющая взрывающиеся и невзрывающиеся звезды, соответствует массам на Главной последовательности в диапазоне

8–10 масс Солнца. Точное значение этой граничной массы зависит от параметров звезды (химический состав, вращение) и ее эволюции (является ли звезда компонентом тесной двойной системы).

В зависимости от массы звезды сверхновые с коллапсом ядра могут сильно отличаться друг от друга по механизму взрыва (из-за разных свойств ядра) и по наблюдаемым проявлениям (из-за разной структуры внешних слоев).

Судьба ядра массивной звезды в первую очередь зависит от ее массы.

Самые легкие из взрывающихся звезд порождают особый тип вспышек — сверхновые с захватом электронов. У таких объектов еще не сформировалось железное ядро, и их недра состоят из кислорода, неона и магния. Ядра магния и неона начинают захватывать электроны, перескакивая на одну клетку назад в таблице Менделеева. Это приводит к дальнейшему сжатию ядра, поскольку восстановить гидростатическое равновесие не удается. Процесс продолжается, пока не начнется взрывное термоядерное горение кислорода, ядро сжимается и дальше, превращаясь в нейтронную звезду. А внешний наблюдатель видит взрыв сверхновой.

У более массивных звезд (примерно 10–80 масс Солнца, точные значения плохо известны и зависят от множества параметров) коллапсирует железное ядро. Внутренние части звезды теряют устойчивость не по причине падения давления, а потому что при сжатии оно теперь растет медленнее, чем это необходимо для восстановления равновесия. Например, это может происходить из-за диссоциации (деления) ядер железа фотонами или из-за захвата электронов ядрами, но теперь все начинается не с магния и неона, а с элементов группы железа.

Коллапс ядра продолжается, пока не достигается ядерная плотность. В этот момент происходит так называемый отскок (bounce). Упругость внутренних частей резко возрастает, а внешние части падают на них, и происходят два события. Во-первых, наружу начинает двигаться ударная волна. Во-вторых, запускаются урка-процессы³, при которых протоны захватывают электроны (а нейтроны — позитроны), при этом испускаются нейтрино (или антинейтрино).

3 Урка-процессы — это процессы уноса энергии из ядра звезды с помощью нейтрино. Впервые этот механизм был предложен в 1940 г. Георгием (Джорджем) Гамовым и Марио Шёнбергом (Mario Schenberg). Происхождение названия Гамов объяснил в своей книге «Моя мировая линия: Неформальная биография» (М.: Наука, 1994): «Мы назвали его урка-процессом, отчасти чтобы отметить казино, в котором мы впервые встретились, и отчасти потому, что урка-процесс приводит к быстрой откатке тепловой энергии изнутри звезды, подобно быстрому исчезновению денег из карманов игроков в Казино да Урка».

Основная энергия при коллапсе связана со сжатием ядра, т. е. с выделением гравитационной потенциальной энергии. Изначально, до начала коллапса, ядро похоже на белый карлик и при массе около 2 солнечных имеет размер порядка нескольких тысяч километров. В результате катастрофического сжатия до размеров в десятки километров выделяется огромная энергия, превосходящая 10^{53} эрг (10^{46} Дж). В основном эта энергия переходит именно в нейтрино, которые из-за высоких температуры и плотности какое-то время «заперты» внутри звезды (она для них непрозрачна). Чтобы произошел взрыв, нужно передать эту энергию ударной волне. Сделать это непросто, и в настоящее время продолжают дискуссии о том, как это происходит. Основной гипотезой долгое время была именно передача энергии от нейтрино расширяющейся оболочке, но сейчас рассматриваются и другие варианты, в которых важную роль играет магнитное поле или другие процессы.

Массивные звезды с массами менее 30 масс Солнца в основном дают нейтронные звезды.

Как бы то ни было, мы наблюдаем сверхновые, а значит, условия для взрыва создаются. Кинетическая энергия расширяющегося вещества составляет около 10^{51} эрг (10^{44} Дж) — примерно 1% от полной энергии сверхновой. Чтобы при этом наблюдалась яркая вспышка, часть энергии должна выделяться в видимом диапазоне. Для этого есть несколько возможностей.

Во-первых, ударная волна, проходя сквозь внешние части звезды, нагревает их. Затем эта энергия постепенно высвечивается в видимом диапазоне. Во-вторых, в результате взрыва сверхновой (это особенно важно для сверхновых Ia, где нет внешней оболочки, в которой можно было бы запастись энергией) создается большое количество радиоактивных элементов, прежде всего никеля-56 (^{56}Ni). Этот элемент затем превращается в кобальт-56 и наконец в стабильное железо-56. При этом выделяется энергия, которую мы и видим как вспышку сверхновой со спаданием блеска иногда в течение сотен дней после достижения максимума. Как правило, высвечиваемая энергия меньше кинетической энергии взрыва.

Коллапс связан с невозможностью поддерживать гидростатическое равновесие в ядре.

Иногда коллапс не останавливается — тогда рождается черная дыра. Этот процесс не сопровождается взрывом. Недавно появились первые непосредственные наблюдательные свидетельства в пользу этого: обнаружено исчезновение массивных звезд,

не сопровождаемое вспышкой. Возможен и промежуточный случай. Коллапс останавливается — появляется протонейтронная звезда, происходит взрыв, но на компактный объект продолжает выпадать вещество. Если масса его дорастет до критической, то произойдет коллапс в черную дыру. Если же выделение энергии при отскоке окажется слишком незначительным, тогда взрыв не произойдет, а выпадение большой массы на появившийся компактный объект приведет к формированию черной дыры.

Энергия сверхновой с коллапсом ядра связана с выделением гравитационной потенциальной энергии.

Наконец, очень массивные звезды (примерно 150–260 масс Солнца) дают особый вид сверхновых без остатка. Это сверхновые с рождением пар. В кислородных ядрах таких звезд температура вырастает настолько, что энергии фотонов оказывается достаточно для рождения электрон-позитронных пар. Энергия идет не на поддержание давления, а на рождение новых частиц, и в результате начинается коллапс, поскольку нарушается гидростатическое равновесие. Если масса звезды не слишком велика, то термоядерное горение кислорода может остановить коллапс, и тогда очень мощный взрыв разнесит всю звезду без остатка. Если же звезда очень массивна, то образуется черная дыра.

Звезды с массами от 30 до 150 масс Солнца в основном порождают черные дыры.

Последние стадии жизни очень массивных звезд, предшествующие окончательному взрыву из-за рождения пар, могут сопровождаться пульсациями с очень большим выделением энергии. По светимости они соответствуют сверхновым, но полное энерговыделение при таких пульсациях, конечно, меньше, поскольку не происходит сильного сжатия (т. е. нет выделения большой гравитационной потенциальной энергии) и рождения нейтрино.

Звезды от 150 до 260 масс Солнца могут взрываться без остатка.

В последние годы обнаружено много необычных сверхновых с очень высокой светимостью или нестандартной кривой блеска. Для их объяснения привлекаются различные механизмы. Отметим среди них дополнительное выделение энергии в результате образования быстро вращающейся нейтронной звезды с сильным магнитным полем.

Замедляя свое вращение (как экстремальный радиопульсар), такой объект может поставлять дополнительную энергию, сравнимую с полной кинетической энергией взрыва.

Сверхновые типа Ia — это термоядерный взрыв массивного белого карлика.

Если сверхновые, связанные с массивными звездами, могут быть очень разными, то сверхновые типа Ia, наоборот, очень похожи друг на друга. Это связано с тем, что взрываются очень похожие объекты — сверхкритические белые карлики.

Известно, что для белых карликов существует верхний предел массы, называемый чандрасекаровским. Однако по мере роста массы еще до достижения этого предела в недрах компактного объекта могут сложиться условия для термоядерного горения углерода. Поскольку белый карлик состоит из вырожденного вещества, то он не может быстро отреагировать на выделение энергии и восстановить равновесие. Поэтому происходит термоядерный взрыв, полностью разрушающий звезду.

Массивные звезды взрываются в нашей Галактике раз в 30–50 лет. Белые карлики — в несколько раз реже.

Есть две основные возможности увеличения массы белого карлика, обе реализуются в тесных двойных системах. Это или постепенная аккреция вещества звезды-соседки через внутреннюю точку Лагранжа, или слияние двух белых карликов с суммарной массой, превосходящей критическую. По всей видимости, оба канала могут быть реализованы в природе. Однако данные наблюдений свидетельствуют в пользу того, что основная доля сверхновых типа Ia связана со слияниями белых карликов.

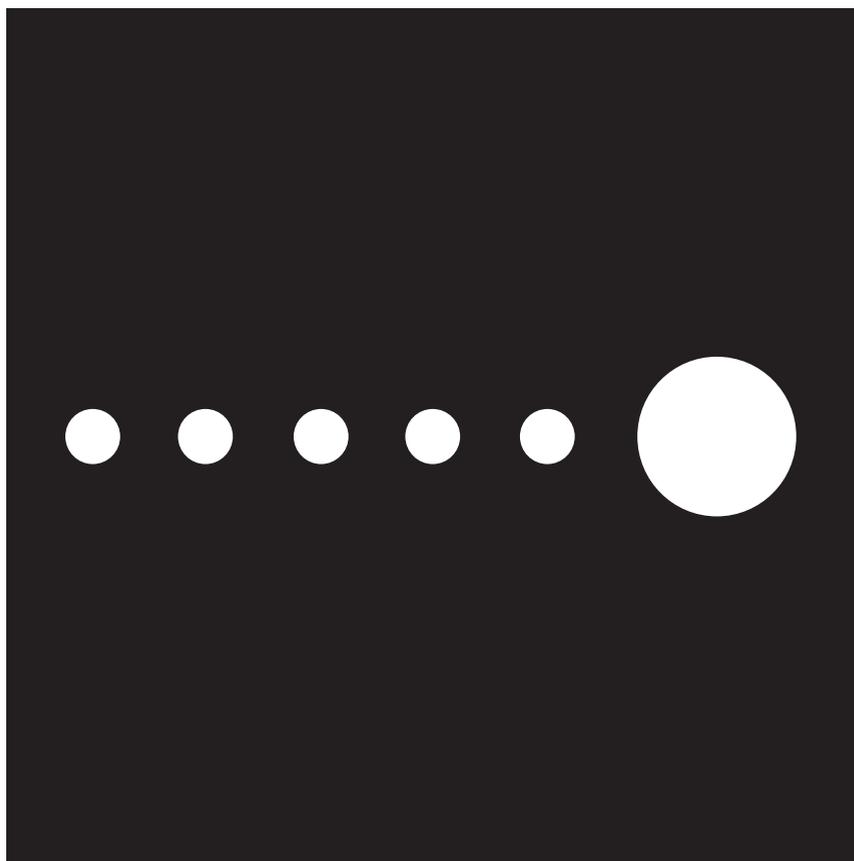
В нашей Галактике сверхновые с коллапсом ядра в среднем происходят раз в 30–50 лет, а сверхновые типа Ia — в 5–10 раз реже. К сожалению, за все время телескопических наблюдений не удалось увидеть ни одной вспышки в нашей Галактике. Самой близкой сверхновой за последние годы была SN1987A, вспыхнувшая в 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке. От нее даже удалось зафиксировать нейтринный сигнал, подтвердивший правильность наших базовых представлений о физике этого процесса.

При вспышке сверхновой блеск в максимуме может в миллиарды раз превосходить светимость Солнца, а сама длительность вспышки исчисляется месяцами. Поэтому сверхновые хорошо видны на больших расстояниях, и их можно обнаружить даже спустя значительное время после максимума блеска. Благодаря современным обзорам неба удается открывать сотни сверхновых в год в далеких

галактиках. Особое значение придается изучению сверхновых типа Ia, поскольку они важны для космологических приложений (именно с их помощью впервые было обнаружено ускоренное расширение Вселенной).

В максимуме блеска светимость сверхновой может превосходить несколько миллиардов солнечных.

Взрывы сверхновых всех типов играют большую роль в эволюции Вселенной, поскольку в результате этих событий синтезируются большое количество тяжелых элементов, которые выбрасываются в межзвездную среду. Взрывы звезд первого поколения — так называемого населения III — смогли уже на ранних этапах жизни Вселенной обогатить газ элементами тяжелее гелия, что было важно для космической эволюции.



СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

5.1	Первичный состав. Реакции в ранней Вселенной. Первые звезды	137
5.2	Химическая эволюция Вселенной. Звезды	139

В ранней Вселенной плотность и температура были слишком высоки для появления составных структур. В первые мгновения после рождения во Вселенной не могли существовать даже ядра элементов периодической системы. Однако спустя несколько микросекунд после начала расширения стало возможно возникновение протонов — ядер водорода. В интервале от нескольких секунд до нескольких минут шел процесс первичного нуклеосинтеза: протоны и нейтроны объединялись в более сложные ядра. По окончании этого процесса Вселенная оказалась состоящей на 75% (по массе) из водорода и на 25% — из гелия. Количество более тяжелых элементов было пренебрежимо мало.

Остальные элементы формировались позже. Элементы легче железа главным образом получаются в результате термоядерных реакций в звездах, которые по окончании своего жизненного цикла выбрасывают часть наработанных элементов в окружающее пространство. Элементы «железного пика» (Fe, Ni, Co) в основном образуются и попадают в межзвездную среду в результате вспышек сверхновых разного типа. Таким же образом образуются и многие более тяжелые элементы. Наконец, часть тяжелых элементов (например, золото) могут формироваться в результате слияния нейтронных звезд в двойных системах.

5.1

Первичный состав. Реакции в ранней Вселенной. Первые звезды

Наряду с наблюдением реликтового излучения, определением параметров крупномасштабной структуры и данными по динамике расширения видимой части Вселенной модель первичного нуклеосинтеза является одной из основ современной космологии.

Элементы тяжелее гелия в основном формируются в звездах или в катастрофических процессах, связанных со звездными остатками.

По мере расширения Вселенной ее температура и плотность уменьшаются. Спустя несколько секунд после начала расширения, когда температура снижается до 10^8 – 10^7 К, создаются условия для протекания термоядерных реакций.

Первичный нуклеосинтез протекает в период от нескольких секунд до нескольких минут после начала расширения Вселенной.

Первыми образуются ядра дейтерия. Однако они эффективно «сгорают» в последующих реакциях, и лишь ничтожное количество этого изотопа попадет в первые звезды и межзвездный газ. Поэтому изучать его первичное обилие очень непросто. В последнее время это удастся сделать путем изучения спектра очень далеких квазаров.

Затем наступает очередь более тяжелых ядер. В частности, формируется большое количество ядер гелия-4 (^4He). Однако значительная часть протонов не попадает в состав сложных ядер по причине нехватки нейтронов, которых на этой стадии примерно в семь раз меньше. Это связано с тем, что нейтрон немного тяжелее протона, поэтому в ранней Вселенной формируется разное количество этих частиц. В ядре гелия-4 два протона и два нейтрона, и, если Вселенная состоит только из водорода и гелия, а отношение числа нейтронов и протонов составляет $1/7$, можно легко подсчитать, что на одно ядро гелия придется 12 протонов (ядер водорода ^1H). Масса ядра гелия-4

примерно в 4 раза больше массы протона, поэтому доля гелия (по массе) во Вселенной составляет $4/16$ (т. е. $1/4$), а доля водорода — $3/4$.

По окончании эпохи первичного нуклеосинтеза барионное вещество во Вселенной в основном состоит из водорода (75%) и гелия (25%).

Доля элементов тяжелее гелия во Вселенной в эту эпоху крайне мала, поскольку присоединение нейтронов и протонов к гелию-4, а также объединение двух ядер гелия-4 (альфа-частиц) не приводит к образованию устойчивых ядер (таковых с массами 5 и 8 не существует). Из более тяжелых элементов образуются только небольшие количества ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ (бериллий достаточно быстро превращается в литий, захватывая электрон). Однако Вселенная достаточно быстро расширяется (ее плотность падает) и остывает. Кроме того, постепенно становится важным распад свободных нейтронов. Поэтому спустя примерно тысячу секунд термоядерные реакции полностью прекращаются, и химический состав остается постоянным до образования первых звезд.

Первые модели первичного нуклеосинтеза появились в 1940-е гг. в работах Ральфа Альфера (Ralph Alpher), Георгия Гамова и Роберта Хермана (Robert Herman). Побочным эффектом этих работ стало предсказание существования реликтового излучения и достаточно точное теоретическое определение его температуры. В конце 1960-х – начале 1970-х гг. эта тема активно развивалась, и в настоящий момент теория первичного нуклеосинтеза является развитым разделом астрофизики ранней Вселенной. Точность расчетов первичного нуклеосинтеза постоянно растет, потому что данные экспериментов позволяют уточнять сечения ряда термоядерных реакций, также уточняется время жизни свободного нейтрона. Кроме того, предсказания модели первичного нуклеосинтеза постоянно проверяются на основе результатов наблюдений.

Основы модели нуклеосинтеза были заложены в 1940-е гг. Альфером, Гамовым и Херманом.

Данные наблюдений реликтового излучения (в первую очередь полученные с помощью спутников WMAP и Planck) позволяют достаточно точно определить количество барионного вещества во Вселенной. Это дает возможность с высокой точностью рассчитать ожидаемое соотношение различных изотопов по окончании эпохи первичного нуклеосинтеза. Если бы вклад барионов в полную плотность Вселенной был выше, доля гелия-4 возросла бы, а доля дейтерия и гелия-3 — упала, поскольку они тогда активнее перерабатывались

бы в гелий-4. Содержание лития ведет себя более сложным образом. В итоге массовая доля гелия-4 во Вселенной на момент окончания эпохи первичного нуклеосинтеза составляет чуть менее 25%, доля водорода (^1H) — 75%, а на остальные элементы и их изотопы приходится существенно меньше 1%.

Наблюдения содержания различных элементов, таких как D, ^3He , ^4He , ^7Li , в том числе и в очень далеких объектах, которые мы видим такими, какими они были миллиарды лет назад, а также в очень старых звездах — самых первых в нашей Галактике, показывают, что модель первичного нуклеосинтеза находится в хорошем согласии с результатами наблюдений. Однако получение данных о первичном химическом составе является очень непростой задачей, поскольку реакции в звездах и другие процессы постоянно меняют химический состав Вселенной, а наблюдать первичное вещество непосредственно мы пока не можем. Существуют вопросы с объяснением наблюдаемого содержания лития, но такие проблемы не ставят под сомнение модель в целом.

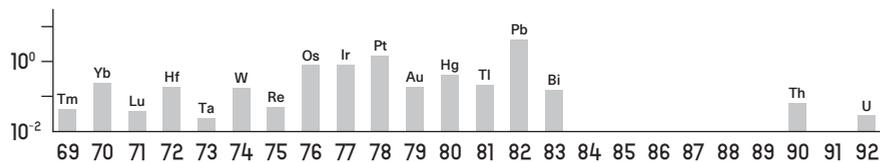
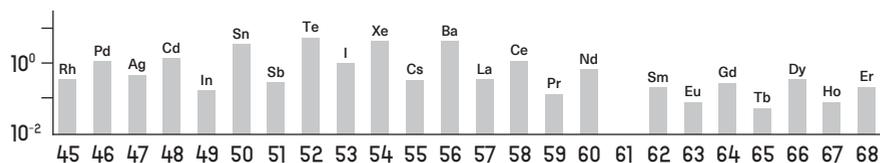
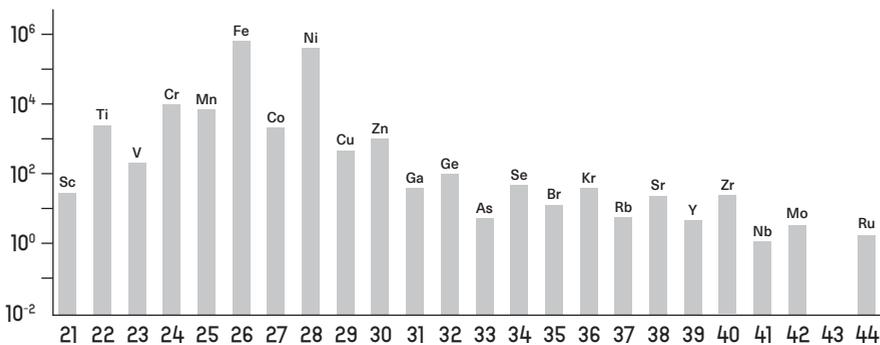
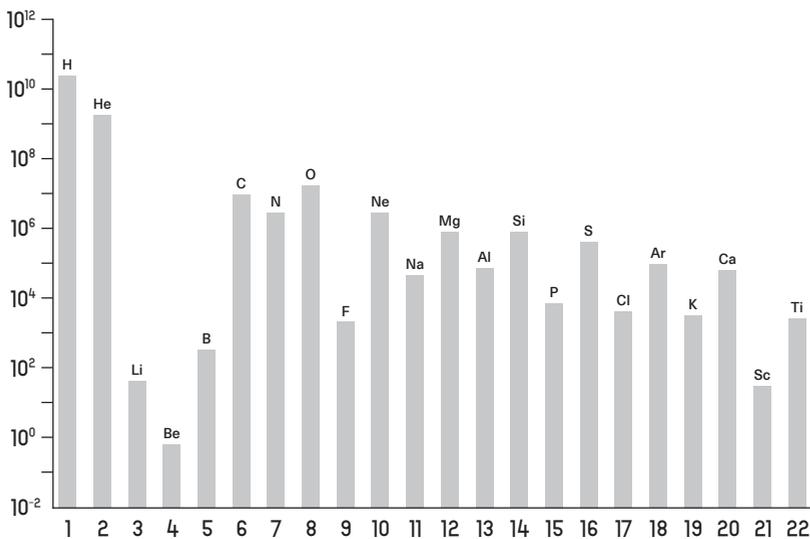
Данные по реликтовому излучению позволяют определить плотность барионов и тем самым уточнить предсказания модели первичного нуклеосинтеза.

5.2

Химическая эволюция Вселенной. Звезды

Детальные исследования позволяют с высокой точностью определить относительное содержание элементов в Солнце (так называемый *солнечный химический состав*), в других звездах, межзвездной среде. Содержание различных элементов в Солнечной системе также хорошо известно — оно соответствует составу туманности, из которой образовалась Солнечная система. Все это позволяет вполне надежно судить и о содержании элементов во Вселенной.

Самыми распространенными (благодаря первичному нуклеосинтезу) являются водород и гелий. В десятку самых часто встречающихся элементов входят также кислород, углерод, неон, железо, азот, кремний, магний, сера. Этот ряд элементов в порядке уменьшения



Относительное содержание различных элементов в Солнечной системе.

распространенности плавно падает вплоть до висмута (при этом элементы с четным числом частиц в ядре обычно чуть более распространены). После висмута в содержании элементов наблюдается серьезное снижение, и последовательность заканчивается на уране (более тяжелые ядра неустойчивы, и их содержание в природе крайне мало). Формирование всех этих элементов в основном связано со звездами и их остатками, начиная со звезд населения III, рождающихся спустя десятки миллионов лет после Большого взрыва. При этом даже межгалактические облака, наблюдаемые с большим красным смещением, уже хоть немного, но обогащены элементами тяжелее гелия, в первую очередь благодаря взрывам первого поколения звезд (населения III).

Звезды могут иметь различные параметры: температуру, размер, время жизни, внутреннюю структуру. Ключевым параметром для этих объектов является масса, которая варьирует примерно от нескольких сотых долей до сотен масс Солнца. Однако все звезды объединяет то, что в их недрах идут термоядерные реакции: легкие элементы превращаются в более тяжелые. С момента своего появления именно звезды (и их остатки) определяют химическую эволюцию Вселенной — изменение содержания различных элементов.

Водород и гелий — самые распространенные элементы во Вселенной. Остальные элементы в основном формируются в результате эволюции звезд и их остатков.

Больше всего времени любая звезда проводит на стадии Главной последовательности, где идут реакции превращения водорода в гелий (одним из первых такую идею рассмотрел Артур Эддингтон). Таким образом, благодаря существованию звезд во Вселенной массовая доля водорода непрерывно уменьшается. Однако на гелии реакции останавливаются лишь в самых легких звездах, а в других они идут дальше — вплоть до элементов «железного пика».

Термоядерные реакции в ядрах звезд идут до элементов «железного пика».

Термоядерные реакции в звездных недрах идут при высокой температуре и плотности, поскольку положительно заряженным ядрам для слияния нужно преодолеть кулоновский барьер, связанный с электростатическим отталкиванием. Это происходит благодаря квантовому туннелированию. Такой процесс впервые был рассмотрен Георгием Гамовым, а затем важный вклад в разработку этого эффекта в применении к звездам внесли Роберт Аткинсон (Robert d'Escourt

Atkinson) и Фриц Хоутерманс (Fritz Houtermans). Наконец, в конце 1930-х гг. Ганс Бете и Карл фон Вайцзеккер построили модель горения водорода в звездах.

На первом этапе водород превращается в гелий. Для дальнейших реакций нужны более высокие плотности и температуры, поэтому они идут только в более массивных звездах. Эти стадии впервые были подробно рассмотрены Фредом Хойлом. Затем в деталях модель нуклеосинтеза была разработана в 1950-е гг. в работах Алистера Кэмерона (Alastair Cameron) и группы ученых с участием Фреда Хойла (знаменитая статья В2НФ — Бербидж, Бербидж, Хойл, Фаулер). Термоядерные реакции в ядрах звезд идут с выделением энергии вплоть до элементов группы железа (так называемого «железного пика»), а синтез более тяжелых элементов идет с поглощением энергии, поэтому они в ядрах звезд не образуются.

С точки зрения химической эволюции Вселенной важно не только создать элементы, но и выбросить их в межзвездную среду. Значительная часть элементов, синтезированная в процессе жизненного цикла звезды, накапливается в ее ядре. Во внешнюю среду они могут попасть только в результате катастрофических процессов. Такими процессами в первую очередь являются взрывы сверхновых. Это могут быть сверхновые, связанные с коллапсом ядра массивной звезды, или же сверхновые типа Ia (термоядерный взрыв белого карлика). Во время взрыва происходит не только выброс элементов в окружающую среду, но и синтез новых элементов. Кроме того, новые элементы возникают и после взрыва за счет распада образующихся радиоактивных изотопов.

Наряду с одиночными звездами (или широкими двойными) тесные звездные пары могут внести свой особый вклад благодаря экзотическим процессам, протекающим в таких системах. Известен феномен *новых звезд*. В них вещество накапливается в результате аккреции на белом карлике в тесной двойной системе, а затем в накопленном веществе происходит термоядерный взрыв. Наблюдения показали, что сброшенное вещество обогащено ядрами углерода, азота и кислорода (CNO). По всей видимости, это не ядра, синтезированные в результате вспышки, а вещество из внешних слоев белого карлика. Таким образом, вспышки новых помогают сбрасывать часть вещества, накопленного в ядре звезды в течение ее эволюции.

Большое количество элементов синтезируется и выбрасывается во внешнюю среду в результате вспышек сверхновых.

Аналогом вспышек новых звезд являются вспышки рентгеновских барстеров, только аккреция и накопление вещества в данном случае происходит не на белый карлик, а на нейтронную звезду.

В результате таких вспышек должно происходить образование элементов с массами до 110 атомных единиц за счет быстрого захвата протонов. Если это вещество эффективно сбрасывается в окружающую среду, то такой сценарий вносит большой вклад в содержание богатых протонами относительно легких ядер (не тяжелее теллурия).

Экстремальным примером сброса вещества белых карликов являются сверхновые типа Ia. При слиянии двух белых карликов, суммарная масса которых превосходит критическую, или при длительной аккреции вещества на белый карлик происходит мощный термоядерный взрыв, приводящий к полному разлету вещества (при этом также идут реакции синтеза). Основная часть железа, окружающего нас, появилась именно в результате таких событий. Кроме того, огромное количество железа, синтезируемого массивными звездами, по большей части оказывается внутри нейтронных звезд и черных дыр, где разрушается и не попадает в окружающее пространство.

Окружающее нас железо в основном обязано своим происхождением взрывам белых карликов.

Далеко не все тяжелые элементы образуются в ядрах звезд. Реакции образования тяжелых элементов, не связанные с термоядерным горением в ядрах звезд, делят на несколько групп. Это медленный (s-) процесс, быстрый (r-) процесс и p-процесс (связанный с p-ядрами, в которых много протонов).

s-процесс, предложенный Дональдом Клейтоном (Donald D. Clayton), связан с медленным захватом нейтронов. В s-процессе образуются элементы с самыми разными массами, но он более важен для элементов с массами ядер менее 100, а также в районе масс 138 и 208. Поставщиком нейтронов в основном являются реакции захвата альфа-частиц ядрами ^{13}C и ^{22}Ne . Первая реакция дает ^{16}O и нейтрон, а вторая — ^{25}Mg и нейтрон. S-процесс идет в первую очередь во внешних слоях звезд-гигантов, поэтому образующиеся в этом процессе элементы потом легко попадают в межзвездную среду в результате сброса оболочек. Освобожденные в результате s-процесса нейтроны легко проникают в ядра, а затем в результате бета-распада, т. е. испускания электрона, превращаются в протоны. Таким образом происходит переход элемента в таблице Менделеева на одну клетку право.

Ядра могут захватывать нейтроны и очень быстро (r-процесс): скорость захвата при этом существенно превосходит темп бета-распада. Это позволяет при наличии очень мощного потока нейтронов за короткое время продвинуться в сторону тяжелых ядер. Такой процесс реализуется в двух основных случаях: взрывы сверхновых с коллапсом ядра и слияние нейтронных звезд. В обоих случаях

есть мощный поток нейтрино (и антинейтрино), который способствует появлению элементов, богатых нейтронами (вплоть до урана). Современные расчеты показывают, что элементы с массой ядра более 140 в основном синтезируются при слияниях нейтронных звезд.

s-процесс — это медленный захват нейтронов, который идет в оболочках звезд-гигантов.

Распад образовавшихся радиоактивных элементов вносит большой вклад в кривые блеска сверхновых (на поздних стадиях) и в светимость пока еще гипотетических «килоновых», возникающих в результате слияния нейтронных звезд.

r-процесс — это быстрый захват нейтронов, который идет при взрывах сверхновых и слияниях нейтронных звезд.

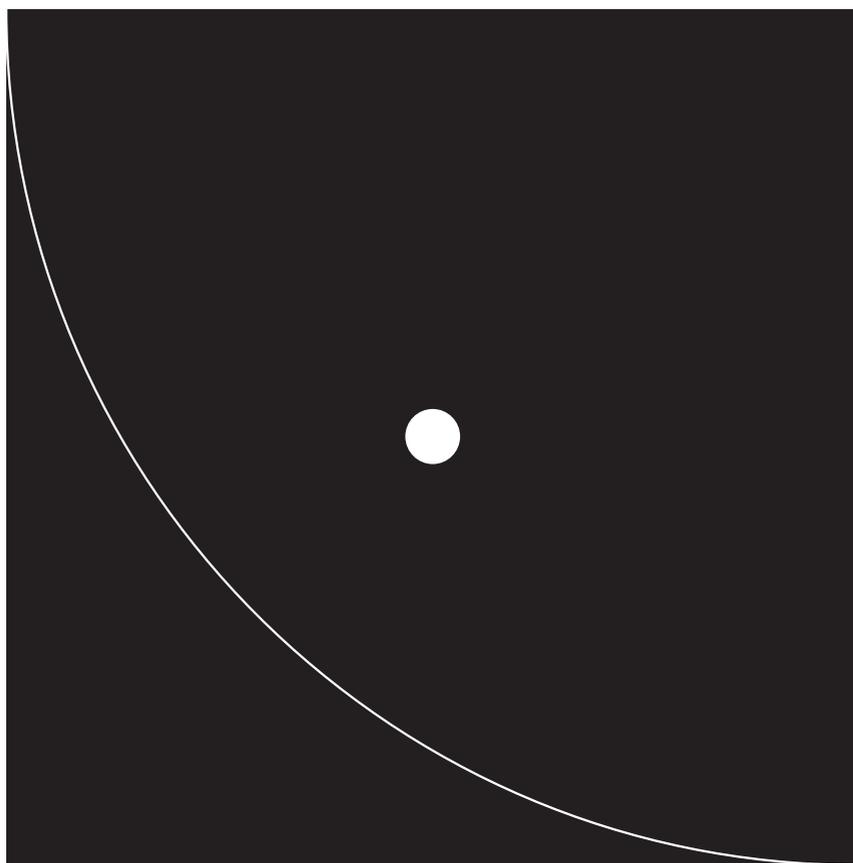
Особый, так называемый r-процесс необходим для создания богатых протонами ядер. К ним относятся, например, ^{74}Se , ^{92}Mo , ^{120}Te , ^{190}Pt . Обсуждается два варианта r-процесса: или в ядро добавляются протоны, или из него убираются нейтроны. В настоящее время нет полной ясности в том, какой вариант является преобладающим, поскольку пока не выявлены астрофизические сценарии, в которых сразу с нужной эффективностью создавались бы все r-ядра. По всей видимости, часть таких ядер формируется в результате выбивания нейтронов фотонами. Это возможно в горячей плазме, при температуре 2–4 млрд градусов, когда по веществу проходит фронт ударной волны во время вспышки сверхновой. Возможно, что мощный поток нейтрино помогает в этой же ситуации сформировать еще некоторые r-ядра.

Литий, бериллий и бор образуются в реакциях скальвания с участием космических лучей.

Наконец, литий, бериллий и бор формируются в так называемых реакциях скальвания (небольшие количества изотопа ^7Li образуются также в результате первичного нуклеосинтеза): частицы космических лучей, обладающие большими энергиями, налетают на ядра и раскалывают их с образованием легких элементов. Вероятность взаимодействия частицы с ядром невелика, поэтому такие реакции происходят довольно редко, и этих элементов в природе довольно мало. Интересно, что не только протоны космических лучей могут образовывать легкие ядра в результате «налетания» на ядра кислорода, углерода, азота и т. д. в межзвездной среде, но и наоборот — CNO-ядра космических лучей могут взаимодействовать с водородом и гелием в межзвездной среде.

В результате космические лучи обогащаются LiBeB-ядрами по сравнению с типичным солнечным химическим составом.

Измеряя химический состав звезд разных возрастов, можно изучать химическую эволюцию нашей Галактики и других галактик. Важный вклад в эту область исследований внесла Беатрис Тинслей (Beatrice Tinsley), написавшая в 1970-е гг. ряд фундаментальных статей по эволюции галактик, в том числе и в контексте изменения содержания различных элементов. Наблюдения показывают, что наиболее старые звезды оказываются бедны тяжелыми (тяжелее гелия) элементами. Качественно картина химической эволюции в настоящее время представляется понятной, но в ней есть еще много нерешенных проблем.



КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ: БЕЛЫЕ КАРЛИКИ И НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

6.1	Белые карлики	149
6.2	Нейтронные звезды	154

Существует три основных типа компактных объектов: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Все три могут являться финальными стадиями звездной эволюции. Кроме того, черные дыры могут возникать на ранних этапах эволюции Вселенной и в результате коллапса облаков газа. Все три типа объектов связаны с очень интересной физикой, поскольку вещество внутри и/или в окрестности этих объектов находится в экстремальном состоянии. Это делает наблюдательные проявления этих объектов разнообразными и захватывающими. С точки зрения астрономов, между этими объектами также есть много общего: будучи компонентами двойных систем, они часто проявляют себя благодаря аккреции вещества на них, а одиночные объекты могут быть обнаружены благодаря гравитационному микролинзированию.

Вещество белых карликов и нейтронных звезд, обсуждаемых в этой главе, находится при очень высокой плотности. Поэтому для их описания необходимо применять квантовую механику. Оба типа объектов рождаются горячими, поэтому в течение некоторого времени их можно видеть благодаря тепловому излучению поверхности. Нейтронные звезды, обладая мощными магнитными полями, а часто и быстрым вращением, наблюдаются также как радиопульсары, магнитары и другие типы источников.

6.1

Белые карлики

Белые карлики — это компактные объекты, являющиеся финальным продуктом эволюции маломассивных звезд с начальными массами менее 8–10 солнечных. При типичном радиусе от 5000 до 10 000 км белые карлики обладают типичными массами от 0,5 до 1 массы Солнца (при этом более тяжелые имеют меньший радиус). Это соответствует плотности вещества около тонны на кубический сантиметр. Столь высокая плотность делает их весьма необычными объектами, для описания которых необходима квантовая механика.

При эволюции ядра звезды типа Солнца образуется белый карлик — объект, устойчивый благодаря квантовому эффекту — запрету Паули.

Трудно сказать, кто и когда открыл первый белый карлик и какой объект был идентифицирован первым. В 1844 г. Фридрих Бессель показал, что у Сириуса — ярчайшей звезды ночного неба — есть невидимый компаньон достаточно большой массы (Сириус В). Увидеть его смог в 1862 г. Алван Кларк (Alvan Clark), но лишь в 1915 г. стало ясно, что это именно белый карлик, который до сих пор остается самым близким из всех известных астрономам (до него менее 9 световых лет). История другого кандидата, белого карлика в тройной системе 40 Эридана, начинается в 1783 г., когда Уильям Гершель обнаружил, что у звезды 40 Эридана есть спутник. Теперь нам известно, что этот спутник является парой из белого и красного карлика. Именно для 40 Эридана В впервые в 1910 г. был получен достаточно хороший спектр, чтобы определить его температуру и радиус. Существует и третий кандидат — звезда Ван Маанена (Van Maanen star). Это первый обнаруженный и до сих пор самый близкий известный одиночный белый карлик, находящийся на расстоянии 14 световых лет от нас. Как белый карлик его идентифицировал Виллем Лейтен (Willem Luyten) в 1923 г., который, собственно, и ввел само название подобных объектов.

Фридрих Бессель в 1844 г. обнаружил невидимый спутник Сириуса, оказавшийся белым карликом.

Итак, астрономические наблюдения показали, что у звезд есть спутники, обладающие массой, как у звезд, радиусом, как у планет,

и высокой температурой (отсюда и белый цвет, давший название этому типу объектов). Но оказалось, что даже в начале XX в. физика была не в состоянии объяснить природу этих объектов.

Простые расчеты показывают, что расстояния между атомами в белых карликах меньше, чем размер орбиты электрона в атоме. Это означает, что все атомы ионизованы. Такой способ «отрыва» электронов называется ионизацией давлением. Если рассчитать расстояние между электронами, оно окажется меньше длины волны де Бройля для этих частиц.

Чтобы описать устройство белых карликов, понадобилось дождаться создания квантовой механики. Недра белых карликов находятся в состоянии так называемого вырожденного газа. Его главной особенностью является то, что давление в основном определяется не температурой вещества, а его плотностью. В обычном газе для определения давления важно, с какой скоростью движутся частицы. А здесь плотность настолько велика, что скорость движения (т. е. температура) уже не так важна. Вещество сопротивляется сжатию из-за квантово-механических причин — из-за принципа (запрета) Паули.

Ральф Фаулер в 1926 г. построил первую теорию белых карликов.

Электроны являются фермионами (частицами с полуцелым спином), и их поведение описывается статистикой Ферми — Дирака. Согласно принципу Паули, два фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии (другими словами, такие частицы с одинаковыми параметрами не могут одновременно находиться внутри некоторого очень малого объема пространства). Это свойство, по сути, является основой химии. А в белых карликах оно приводит к тому, что их вещество сопротивляется сжатию, когда электроны пытаются упаковаться еще плотнее.

У белых карликов существует предельная масса. Слишком тяжелые карлики взрываются (сверхновая типа Ia) или коллапсируют, превращаясь в нейтронные звезды.

Теория белых карликов была разработана в конце 1920-х — начале 1930-х гг. Первая важная работа принадлежит Ральфу Фаулеру (Ralph Fowler), показавшему, что белые карлики устойчивы благодаря давлению вырожденного газа электронов. Затем последовал ряд работ Эдмунда Стонера (Edmund Stoner), Вильгельма Андерсона (Wilhelm Anderson), Якова Френкеля, Субраманьяна Чандрасекара (Subrahmanyan Chandrasekhar) и Льва Ландау. В 1930-е гг. были сформулированы

все основные положения теории белых карликов. В частности, было показано, что существует верхний предел для массы этих объектов (сейчас он называется *пределом Чандрасекара*).

Самые тяжелые из известных в настоящее время белых карликов имеют массы около 1,3 солнечных, самые легкие — около 0,2. Интересно, что легкие карлики должны возникать из легких звезд, но при массе менее примерно 0,8 солнечной светило не успеет закончить свою жизнь, даже если оно возникло почти сразу после Большого взрыва. Так что самые легкие белые карлики возникли в двойных системах в результате процесса обмена веществом, а не из одиночных звезд.

Белый карлик с массой больше чандрасекаровской (примерно 1,4 массы Солнца) теряет устойчивость и коллапсирует в нейтронную звезду. Однако чаще всего углеродно-кислородные белые карлики чуть раньше (при немного меньшей массе) становятся неустойчивыми относительно начала в них термоядерной реакции горения углерода, приводящей к взрыву — сверхновой типа Ia.

Субраманьян Чандрасекар в 1931 г. обосновал существование верхнего предела масс белых карликов. Этот же результат независимо от него был получен Эдмундом Стонером, Вильгельмом Андерсоном и Львом Ландау.

Будучи продуктами эволюции многочисленных маломассивных звезд, белые карлики и сами являются весьма многочисленными, их число составляет более нескольких процентов от всех звезд Галактики, т. е. десятки миллиардов. Известны десятки тысяч белых карликов, в подавляющем большинстве — в нашей Галактике. Обнаруживать старые одиночные объекты этого типа непросто — они успевают остыть до температур в несколько тысяч градусов, что при небольшом радиусе делает их очень слабыми источниками. Поэтому они видны в основном в солнечной окрестности на расстояниях менее 1000 световых лет. Вещество внутри остывших белых карликов может перейти в новое состояние — кристаллизоваться.

Белые карлики могут очень быстро вращаться. Самые быстрые из них имеют периоды (т. е. «сутки») меньше минуты, и при размере объектов, сравнимом с размером Земли, скорость на экваторе достигает тысячи километров в секунду (порядка процента от скорости света!). Кроме того, белые карлики могут образовать очень тесную двойную систему с большой орбитальной скоростью. Рекорд принадлежит системе НМ Рака, где «год» длится около 5 минут, т. е. орбитальная скорость превосходит миллион километров в час. Такая система должна быть мощным источником гравитационных волн, которые можно будет зарегистрировать с помощью космического лазерного интерферометра,

такого как проект eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna, Усовершенствованный космический лазерный интерферометр).

Первые обнаруженные белые карлики являются компонентами двойных систем. Впоследствии оказалось, что двойственность белых карликов может приводить к важным последствиям: взрывам и синтезу элементов.

В достаточно тесных системах на некоторой стадии эволюции вещество может начать перетекать с одной звезды на другую — начинается аккреция. Захват вещества белым карликом приводит к появлению интересных источников излучения. Падение 1 г вещества на белый карлик приводит к выделению примерно 10 млрд Дж энергии, поэтому поток газа с нормальной звезды на компактную является причиной мощного излучения. Есть несколько типов источников, связанных с аккрецией на белые карлики: например, поляры. Свое название они получили благодаря сильной поляризации их излучения, что связано с мощными магнитными полями белых карликов.

В нашей Галактике находятся десятки миллиардов белых карликов.

Магнитные поля белых карликов могут достигать очень больших величин — в миллиард раз больших, чем у Солнца. Впрочем, подобные объекты редки, однако даже типичные белые карлики могут иметь сильные магнитные поля, в тысячи и даже в миллионы раз больше солнечных.

Поляры относятся к катаклизмическим переменным звездам. Как следует из их названия, эти источники показывают большие вариации блеска. Но среди них есть источники, чья переменность имеет действительно катастрофический характер, — это так называемые новые звезды.

Вспышка новой — это термоядерный взрыв на поверхности аккрецирующего белого карлика в двойной системе.

Во время вспышки новой блеск системы может возрасти в миллионы раз. Без мощных телескопов это выглядит как появление новой звезды на небе, отсюда и название, которое еще в XVI в. дал этим объектам Тихо Браге (Tycho Brahe) (правда, наблюдал он то, что мы теперь называем сверхновой, но понадобились сотни лет, чтобы разобраться в этом). Затем блеск на протяжении нескольких месяцев спадает, возвращаясь к первоначальному значению. Вспышка новой — это термоядерный взрыв на поверхности белого карлика. Вещество, перетекающее на него со звезды-соседки, состоит из водорода и гелия.

По мере накопления вещество уплотняется и разогревается, пока наконец не достигаются условия для начала термоядерной реакции — и тогда происходит взрыв. Чаще всего мы наблюдаем именно термоядерное горение водорода (в нашей Галактике это происходит примерно полсотни раз в год, хотя не все случаи удается зарегистрировать), но могут происходить и вспышки, связанные с горением гелия.

Если на белый карлик течет достаточно много вещества, то, казалось бы, он может быстро нарастить свою массу, достичь предела (близкого к чандрасекаровской массе) и взорваться. Однако чаще всего такой процесс занимает много времени из-за вспышек новых (или их аналогов). При этом почти все накопленное вещество сбрасывается, и процесс начинается сначала. Однако существуют двойные системы, чья эволюция в конце концов завершается взрывом белого карлика.

Сейчас полагают, что основная часть сверхновых типа Ia происходит при слияниях белых карликов, чья суммарная масса превосходит предельную (если суммарная масса ниже, то просто образуется массивный быстровращающийся белый карлик, возможно, с сильным магнитным полем). В галактике вроде нашей они случаются раз в две-три сотни лет. Такие сверхновые являются важным поставщиком тяжелых элементов, поскольку обычно происходит полный разлет вещества звезды (в отличие от сверхновых с коллапсом ядра, где значительная масса остается в виде компактного объекта — нейтронной звезды или черной дыры). Кроме того, эти сверхновые важны для космологических наблюдений, они дают возможность определить расстояние до галактик, в которых находятся. Именно наблюдения сверхновых типа Ia позволили в 1998 г. открыть ускорение расширения Вселенной, которое мы связываем с действием темной энергии (см. раздел 11.6 «Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной»).

Сверхновые типа Ia — это взрыв белого карлика.

Если суммарная масса слившихся карликов заметно больше чандрасекаровской, то сверхновая получается особенно мощной, поскольку в реакциях принимает участие большая масса. Такие вспышки тоже наблюдаются астрономами.

Иногда в результате коллапса белый карлик может превращаться в нейтронную звезду.

Хотя чаще всего белый карлик полностью взрывается, набрав большую массу, иногда может происходить коллапс с образованием нейтронной звезды; для этого карлик должен добраться до чандрасекаровского предела и не взорваться. Это возможно с изначалью

массивными объектами, состоящими из кислорода, неона и магния. Нейтронные звезды могут, по-видимому, возникать и при слияниях двух массивных белых карликов, и при постепенной аккреции на карлик в двойной системе.

Особую роль в астрофизике играют системы, состоящие из белого карлика и радиопульсара. В таких парах наблюдаются самые массивные из известных нейтронных звезд.

6.2

Нейтронные звезды

Нейтронные звезды — это компактные объекты, состоящие из вырожденного нейтронного вещества. Свободные нейтроны нестабильны и распадаются на протон и электрон с испусканием антинейтрино (бета-распад с периодом полураспада чуть более 10 минут). Но в некоторых условиях, в частности в недрах нейтронных звезд, нейтроны становятся стабильными и перестают распадаться. Обычно под названием «нейтронные звезды» объединяют целый класс компактных объектов, к которым относятся также кварковые звезды, гиперонные звезды и другие типы объектов со схожими характеристиками и историей образования.

Нейтронные звезды являются финальной стадией эволюции массивных звезд. Звезды с начальными массами примерно от 10 до 30 солнечных масс, исчерпав термоядерное горючее, претерпевают коллапс ядра, который сопровождается вспышкой сверхновой. В итоге образуется компактный объект с массой с массой 1–2 солнечных [масс] и радиусом 10–15 км.

Нейтронные звезды образуются в результате взрывов сверхновых.

Большая часть сверхновых с коллапсом ядра приводит к образованию нейтронных звезд. Современный темп рождения нейтронных звезд в нашей Галактике составляет примерно 2–3 объекта за 100 лет, так что за время жизни Галактики в ней образовалось несколько сотен миллионов нейтронных звезд. Примерно половина из них покинула Галактику из-за больших начальных скоростей, связанных со взрывами сверхновых и/или распадами тесных двойных систем, в которые входили прародители нейтронных звезд.

Нейтронные звезды наблюдаются как астрономические источники разных типов. Наиболее многочисленными и известными являются радиопульсары. На момент написания книги (2017 г.) их известно более 2500, а в скором времени это число существенно возрастет благодаря работе новых радиотелескопов.

Лев Ландау предположил существование объекта звездной массы с плотностью порядка ядерной. Вальтер Бааде и Фриц Цвикки предсказали рождение нейтронных звезд в результате вспышек сверхновых.

Нейтронные звезды были открыты в 1967 г. как радиопульсары. Открытие было неожиданным: несмотря на то что в целом многие свойства нейтронных звезд были правильно описаны теоретиками до их обнаружения, мощное пульсирующее радиоизлучение предсказано не было. Основной вклад в открытие внесла Джоселин Белл (Jocelyn Bell). В основном за этот результат ее научный руководитель Энтони Хьюиш (Antony Hewish) получил Нобелевскую премию по физике (то, что сама Белл не была включена в список лауреатов, считается одной из самых крупных ошибок в истории Нобелевских премий по физике).

Джоселин Белл и Энтони Хьюиш в 1967 г. открыли радиопульсары.

Интервал между последовательными импульсами радиопульсара — это период вращения нейтронной звезды (иногда за оборот наблюдают два импульса от обоих магнитных полюсов, соответственно, интервал между импульсами равен половине оборота). Механизм радиоизлучения пульсаров до конца не ясен, хотя понятно, что речь идет о когерентном излучении, рождающемся в магнитосферах нейтронных звезд. Многие пульсары наблюдаются и в других диапазонах (некоторые — во всех: от радио- до гамма-). Рентгеновское излучение пульсаров с коротким периодом позволяет сделать их прекрасными ориентирами для систем независимой навигации межпланетных станций (такие системы называют XNAV, X-ray pulsar-based navigation and timing). Первые космические аппараты, тестирующие эту технологию, уже находятся на орбите — это китайский спутник XPNV-1, а также демонстрационная система SEXTANT (Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology) в составе инструмента NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) на борту Международной космической станции (МКС).

Кроме этого, одиночные нейтронные звезды наблюдаются как молодые остывающие объекты, магнитары и источники других типов. Также большое количество нейтронных звезд (сотни источников) можно

видеть в тесных двойных системах благодаря аккреции. Рентгеновские источники этого типа были обнаружены на несколько лет раньше радиопульсаров, в 1962 г., благодаря работе Риккардо Жиаккони (Riccardo Giacconi) и его коллег. Однако доказать присутствие в этих рентгеновских источниках именно нейтронных звезд удалось лишь в начале 1970-х гг.

Активность ряда нейтронных звезд связана с выделением энергии магнитного поля (токов). Самый яркий пример — магнитары.

Нейтронные звезды обладают рядом экстремальных свойств, что делает их крайне интересными объектами с точки зрения фундаментальной физики. Вещество в нейтронных звездах находится в условиях, которые недостижимы в земных лабораториях: сверхсильная гравитация на поверхности, сверхсильные магнитные поля и сверхвысокая плотность в недрах.

Из всех наблюдаемых объектов (за исключением черных дыр) нейтронные звезды наиболее компактны, их радиус наиболее близок к шварцшильдовскому радиусу (радиус невращающейся черной дыры для данной массы, см. раздел 7.1 «Природа черных дыр. Коллапс»). Так называемая вторая космическая скорость (скорость убегания) на поверхности нейтронной звезды составляет примерно 0,3 скорости света. Если масса нейтронной звезды превышает предельную (около 2,5 массы Солнца), происходит коллапс в черную дыру. Для расчета структуры и многих свойств нейтронных звезд необходим учет эффектов общей теории относительности.

Известные нейтронные звезды обладают сильными магнитными полями: от 10^8 до 10^{15} Гс (для сравнения: поле на магнитном полюсе Земли составляет менее 1 Гс). Большая величина поля частично достигается сохранением магнитного потока при сжатии ядра звезды, порождающей компактный объект, а частично связана с генерацией поля.

Для описания свойств нейтронных звезд необходимо применение квантовой теории и общей теории относительности.

Недра компактных объектов состоят из вещества высокой плотности, в центрах нейтронных звезд в некоторых моделях она может превосходить ядерную плотность в 10–15 раз. Исследование такого вещества в лабораторных условиях невозможно, поэтому астрофизические данные по компактным объектам являются ценным источником информации для ядерной физики.

Наблюдательные проявления известных одиночных нейтронных звезд связаны с гравитационной энергией (аккреция), вращательной энергией (радиопульсары), тепловой энергией (остывающие нейтронные звезды) или энергией магнитного поля (магнитары).

В случае аккреции вещество соседа по двойной системе или газ из межзвездной среды гравитационно захватывается нейтронной звездой, разгоняется в поле тяготения до высокой скорости, а затем в аккреционном потоке или непосредственно при взаимодействии с поверхностью значительная часть кинетической энергии излучается (в основном в рентгеновском диапазоне).

В случае радиопульсаров быстрое вращение нейтронной звезды (известные радиопульсары имеют периоды вращения от миллисекунды до 10 секунд) с сильным магнитным полем приводит к ускорению частиц и генерации электромагнитного излучения.

В случае остывающих нейтронных звезд мы наблюдаем тепловое излучение молодой (до нескольких сотен тысяч лет) нейтронной звезды с температурой поверхности от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов градусов. В основном такие источники наблюдаются в мягком рентгеновском диапазоне (энергии квантов от десятков до сотен электронвольт). Но у некоторых тепловое излучение обнаружено также в оптическом диапазоне спектра.

Наконец, магнитары, согласно принятой в настоящее время модели, высвечивают в регулярном или вспышечном режиме энергию, запасенную в очень сильном магнитном поле (можно также говорить об энергии мощных электрических токов, текущих в коре нейтронной звезды и создающих магнитное поле). Во время гигантских вспышек светимость магнитара может превосходить полное энерговыделение всех звезд галактики вместе взятых. Магнитары были открыты в 1979 г., в первую очередь благодаря работе группы Евгения Мазеца в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе.

Нейтронные звезды были теоретически предсказаны в работах Вальтера Бааде и Фрица Цвикки (Fritz Zwicky), а также Льва Ландау еще в 1930-е гг., однако вплоть до настоящего времени в физике нейтронных звезд существует ряд принципиальных нерешенных вопросов. Внутреннее строение этих компактных объектов остается проблемой, что вызвано недостаточным пониманием свойств вещества при плотности, в несколько раз превосходящей ядерную.

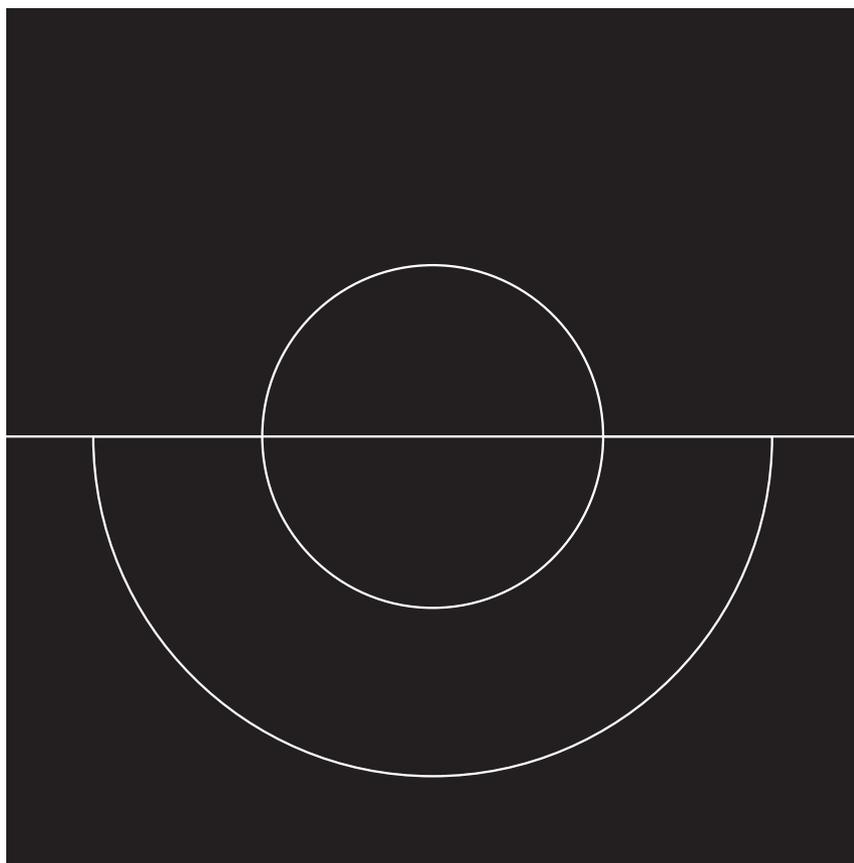
В ранних моделях предполагалось, что компактные звезды в основном (до 90% по массе) должны состоять из нейтронов — отсюда и историческое название, которое часто применяется ко всему классу объектов. Последующие исследования показали, что существует много различных возможностей для внутреннего строения компактных объектов. Несмотря на существенные усилия теоретиков и наблюдателей, до сих пор не известно, какая из них реализуется в природе.

В структуре нейтронной звезды выделяют кору (внутреннюю и внешнюю) и ядро (внутреннее и внешнее). Внешняя кора имеет толщину порядка нескольких сотен метров и состоит в основном из ионов элементов группы железа и вырожденных электронов. Кроме самых наружных слоев, внешняя кора твердая, поскольку ионы благодаря сильному электростатическому взаимодействию между заряженными частицами формируют так называемую кулоновскую решетку. Во внутренней коре (толщиной около километра), где возможно существование сильно обогащенных нейтронами ядер элементов, начинается процесс формирования так называемых нейтронных капель. При столь высокой плотности свободные (не входящие в ядра) нейтроны оказываются устойчивыми. Доля свободных нейтронов растет с увеличением плотности вглубь коры. Нейтроны во внутренней коре могут находиться в сверхтекучем состоянии.

Свойства внутреннего ядра нейтронных звезд известны крайне плохо. Существует ряд гипотез о поведении вещества при сверхвысокой плотности, например такого как кварковое вещество.

Внешнее ядро имеет размер несколько километров. Его свойства относительно хорошо понятны. Плотность составляет от 0,5 до 2 ядерных плотностей (ядерная плотность — около 3×10^{14} г/см³). Вещество в основном состоит из нейтронов, протонов, электронов и мюонов. Протоны там могут находиться в сверхтекучем (сверхпроводящем) состоянии.

Свойства вещества во внутреннем ядре известны крайне плохо. Плотность там в несколько раз превосходит ядерную. Основные обсуждаемые гипотезы включают в себя появление гиперонов, образование пионного или каонного конденсата, появление кварковой материи.



Глава 7

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

7.1	Природа черных дыр. Коллапс	163
7.2	Кандидаты в черные дыры в тесных двойных системах	167
7.3	Сверхмассивные черные дыры	170
7.4	Первичные черные дыры и испарение Хокинга	175

Формально черные дыры пока еще остаются гипотетическими объектами. Однако в настоящее время получено множество научных данных по самым разным астрономическим источникам (в первую очередь речь идет о массивных объектах в центрах галактик, а также об аккрецирующих компактных объектах в двойных системах), которые объясняются только в рамках этой модели. Поэтому с астрофизической точки зрения можно считать, что черные дыры существуют, хотя ряд вопросов о деталях их физических свойств остается открытым.

Массы известных кандидатов в черные дыры лежат в широком диапазоне: от 3–5 масс Солнца (объекты в тесных двойных системах) до десятков миллиардов масс Солнца (сверхмассивные объекты в галактических центрах).

Большое количество самых разнообразных данных (от радио- до гамма-диапазона) по этим объектам недавно было дополнено обнаружением гравитационно-волновых всплесков от слияний черных дыр звездных масс.

7.1

Природа черных дыр. Коллапс

Фундаментальные свойства черных дыр делают их самыми загадочными объектами в природе. Черную дыру можно определить как область, которую из-за сильного искривления пространства-времени не может покинуть никакой сигнал. Границу черной дыры называют *горизонтом*. Упрощая, можно сказать, что это поверхность невозврата, даже световые лучи, попав под горизонт, не могут выйти наружу. Такое понимание черных дыр возникло около 100 лет назад после появления общей теории относительности.

Общая теория относительности создана Альбертом Эйнштейном в 1915 г. Математические аспекты теории были одновременно и независимо разработаны Давидом Гильбертом.

В XVIII в. Джон Мичелл (John Michell) и Пьер-Симон Лаплас обсуждали возможность существования тел, на поверхности которых вторая космическая скорость начинает превосходить скорость света, и поэтому они «будут черными». Однако такая наивная концепция далека от современного понимания природы черных дыр, которое начало формироваться благодаря работам Карла Шварцшильда (Karl Schwarzschild) непосредственно после создания общей теории относительности. Затем развитие представлений о черных дырах продолжилось уже в конце 1950-х — начале 1960-х гг., в первую очередь после работы Давида Финкельштейна (David Finkelstein), в которой была рассмотрена природа горизонта событий. Открытие квазаров, нейтронных звезд, а затем и первых кандидатов в черные дыры придало дополнительную мотивацию теоретическим работам.

Термин «черная дыра», по всей видимости, первой использовала Энн Эвинг (Ann Ewing) еще в 1964 г., через несколько лет это словосочетание стало популярным благодаря Джону Уилеру (John Wheeler), а в начале 1970-х гг. термин стал общепринятым.

В природе черные дыры в первую очередь должны образовываться в результате коллапса звезд (этот процесс идет и в наши дни). Неизбежность коллапса была продемонстрирована в 1939 г. в работе Роберта Оппенгеймера (Robert Oppenheimer) и Георгия Волкова (George Volkoff) на основе статей Ричарда Толмена (Richard Tolman) и Льва Ландау. Первую реалистичную модель коллапса

пылевого облака рассчитали в 1939 г. Роберт Оппенгеймер и Гартланд Снайдер (Hartland Snider).

Джон Мичелл (1783) и Пьер-Симон Лаплас (1796) независимо друг от друга высказали идею о существовании плотных массивных объектов, которые будут черными, поскольку свет не сможет их покинуть.

Для устойчивости объекта (например, ядра звезды) необходимо, чтобы гравитация (которая стремится сжать объект) уравновешивалась давлением. В течение жизни звезды давление в основном поддерживается за счет термоядерных реакций в ядре. После окончания цикла реакций (см. главу 4 «Звезды и их эволюция») звезда превращается в один из трех типов компактных объектов: белый карлик, нейтронную звезду (см. главу 6 «Компактные объекты: белые карлики и нейтронные звезды») или черную дыру.

Верхний предел на массу нейтронной звезды называется пределом Оппенгеймера — Волкова. При большей массе происходит коллапс в черную дыру.

Черная дыра может образоваться в результате прямого коллапса ядра массивной звезды. В этом случае, по-видимому, не происходит яркой вспышки сверхновой (недавно появились первые наблюдательные свидетельства в пользу такого сценария). Также коллапс может сначала привести к образованию протонейтронной звезды, а затем вследствие аккреции дополнительной массы или замедления вращения происходит окончательный коллапс с образованием горизонта (см. ниже). Наконец, черная дыра может возникнуть, если нейтронная звезда (например, в тесной двойной системе) наберет массу больше критической.

Черная дыра описывается всего лишь тремя параметрами: массой, моментом импульса и электрическим зарядом (это так называемая «теорема об отсутствии волос»¹). Визуально наиболее ярким образом является исчезновение магнитного поля при коллапсе. Наблюдательная проверка «теоремы об отсутствии волос» связана с поиском отклонений от метрики Керра (см. ниже), описывающей вращающиеся незаряженные черные дыры в общей теории относительности. Пока таких отклонений не обнаружено.

¹ Название теоремы взято из фразы Джона Уилера «У черной дыры нет волос», в которой «волосы» — это метафора любых наблюдаемых снаружи от горизонта черной дыры характеристик, кроме массы, момента импульса и электрического заряда. Сам Уилер в более поздних интервью отдает авторство этой метафоры Якову Бекенштейну (Jacob Bekenstein).

Описание свойств черной дыры ведется в терминах метрики (математической конструкции, определяющей свойства пространства-времени), поскольку необходим учет эффектов ОТО (или какого-то варианта расширения этой теории). Общим свойством всех решений является существование внутри черной дыры специальной области — сингулярности, где, например, значение плотности формально становится бесконечным. В зависимости от свойств черной дыры сингулярность может иметь разные свойства, в том числе и форму. Согласно гипотезе о космической цензуре, все сингулярности находятся внутри горизонтов (т. е. не существует так называемых голых сингулярностей, они скрыты от наблюдателей горизонтами черных дыр).

Быстрое вращение нейтронной звезды может предотвратить коллапс, даже если ее масса больше предельной, рассчитанной для невращающегося объекта.

Самой простой является невращающаяся незаряженная черная дыра, которая описывается метрикой Шварцшильда. В ряде случаев это является хорошим приближением для описания свойств наблюдаемых кандидатов в черные дыры: в реальных условиях заряд легко компенсируется притоком частиц с противоположным знаком заряда, а вращение становится существенным лишь при приближении к предельному значению (которое примерно соответствует вращению со скоростью света на горизонте черной дыры).

Однако нередко аккреция вещества или слияние двух черных дыр приводят к быстрому вращению. В таких случаях для описания подобных астрофизических объектов необходимо применять метрику, которую впервые определил в 1963 г. Рой Керр (Roy Kerr) для вращающейся незаряженной черной дыры. Наблюдения показывают, что внешние области некоторых кандидатов в черные дыры соответствуют такому случаю.

В случае метрики Керра возникает интересный эффект увлечения системы отсчета. Объект, попавший в окрестности вращающейся черной дыры², будет вовлечен во вращение из-за свойств

² Многие эффекты, предсказанные ОТО, не связаны с какими-то особыми свойствами черных дыр, а проявляются в самых разных ситуациях. В случае черных дыр эти эффекты лишь могут достигать больших значений благодаря большой компактности этих объектов (отношение массы к радиусу), а поэтому в некоторых случаях их проще наблюдать именно там. Данный эффект не исключение, он существует в окрестности любого массивного вращающегося тела. В частности, он был экспериментально проверен и подтвержден на орбите Земли с помощью искусственных спутников LAGEOS, LAGEOS II (2004 г.) и Gravity Probe B (2011 г.).

пространства-времени, в котором он оказался, — это так называемый эффект Лензе — Тирринга.

Метрика невращающейся заряженной черной дыры носит имена Рейснера и Нордстрёма, а метрика вращающейся и заряженной — Керра и Ньюмена. Однако в приложении к наблюдаемым объектам они малоприменимы, хотя существуют попытки объяснения экзотических астрономических источников моделями с участием заряженных черных дыр.

Метрика в современных теориях гравитации определяет свойства пространства-времени.

Две главные особенности черных дыр — горизонт событий и сингулярность. Горизонт событий иногда представляют как мембрану, проникаемую лишь в одну сторону. С точки зрения удаленного наблюдателя, падающему предмету для достижения горизонта требуется бесконечное время. Кроме того, по мере приближения к нему все заметнее становится эффект гравитационного красного смещения. Однако, с точки зрения падающего наблюдателя, все происходит за конечное время, причем локальными экспериментами он никак не может установить момент пересечения горизонта — сам горизонт является не физической, а лишь координатной особенностью.

Размер горизонта в метрике Шварцшильда определяется простой формулой, является сферически симметричным и зависит (линейно) только от массы. В более сложных метриках (для вращающихся и/или заряженных черных дыр) возникает несколько критических радиусов.

А вот сингулярность является в ОТО истинной особенностью. Роджер Пенроуз (Roger Penrose) и Стивен Хокинг (Stephen Hawking) доказали неизбежность формирования сингулярностей в рамках ОТО. Любой объект, попавший под горизонт событий, попадает в сингулярность, и расчет его дальнейшей судьбы пока невозможен. В решении Шварцшильда (невращающейся незаряженной черной дыры) сингулярность является точечной, а в случае вращающихся черных дыр — кольцом. В некоторых, пока неподтвержденных, теориях (например, петлевой квантовой гравитации) удается избавиться от сингулярностей. В других моделях сингулярности приобретают интересные дополнительные свойства.

В астрофизике выделяют несколько типов черных дыр. Это, во-первых, первичные черные дыры — гипотетические объекты, возникающие в ранней Вселенной. Во-вторых, черные дыры звездных масс, являющиеся продуктами эволюции массивных звезд (существуют десятки кандидатов в такие объекты). В-третьих, сверхмассивные черные дыры. Наконец, выделяют также класс черных дыр

промежуточных масс (между звездными и сверхмассивными), которые были придуманы в качестве гипотезы, объясняющей свойства так называемых ультрамощных рентгеновских источников.

Радиус Шварцшильда — это радиус горизонта событий для невращающейся незаряженной черной дыры.

Черные дыры удается наблюдать благодаря аккреции, гравитационным эффектам (от простого вращения объектов вокруг черных дыр до гравитационного линзирования), а также за счет испускания гравитационных волн двойными черными дырами.

Согласно гипотезе о космической цензуре, все образующиеся сингулярности должны быть закрыты горизонтом.

В нашей Галактике должно существовать около 100 млн черных дыр звездных масс (соответственно, ближайшая одиночная черная дыра должна находиться на расстоянии порядка 100 световых лет от нас). Большую часть этих объектов крайне трудно наблюдать. В настоящее время есть несколько случаев наблюдения гравитационного микролинзирования, которые можно объяснить линзированием на черных дырах, а также несколько десятков надежных кандидатов в черные дыры в тесных двойных системах.

7.2

Кандидаты в черные дыры в тесных двойных системах

В настоящее время основные кандидаты в черные дыры звездных масс находятся в тесных двойных системах. Это связано с тем, что наличие близкого компонента делает возможным как появление яркого (обычно рентгеновского) источника за счет аккреции, так и определение параметров компактного объекта, дающее возможность идентифицировать его в качестве кандидата в черные дыры.

Выпадение вещества на черную дыру может происходить как без выделения энергии (аккреция пыли), так и с выделением большого

количества энергии, достигающей 42% от максимально возможного значения, равного mc^2 (такое происходит при аннигиляции). Поэтому аккреция на максимально вращающуюся черную дыру является вторым по эффективности механизмом выделения энергии в природе и уступает лишь аннигиляции. Учитывая, что количество антивещества крайне ограничено, аккреция на черные дыры является самым эффективным способом выделения энергии среди широко распространенных.

Аккреция — процесс выпадения вещества на массивный объект, происходящий в основном за счет гравитационного притяжения.

Если падающее на черную дыру вещество образует так называемый аккреционный диск, за счет вязкости оно разогревается до высоких температур, что приводит к выделению большого количества энергии. Теория дисковой аккреции начала активно развиваться в начале 1970-х гг. в классических работах Николая Шакуры, Рашида Сюняева, Игоря Новикова и Кипа Торна.

Полость Роша — область вокруг звезды, в которой ее гравитация контролирует движение легких тел.

Большой поток вещества может быть обеспечен в тесных двойных системах. На определенном этапе эволюции черная дыра может иметь в качестве компаньона звезду, заполнившую свою полость Роша (см. раздел 4.4 «Двойные и кратные звезды. Аккреция»). Вещество начинает активно перетекать на черную дыру через так называемую внутреннюю точку Лагранжа, в результате формируется аккреционный диск и появляется яркий рентгеновский источник.

Светимость аккрецирующего источника имеет верхний предел, называемый эддингтоновской светимостью. Его появление связано с давлением света: поток излучения может стать настолько велик, что остановит падающее вещество. Этот предел зависит от массы аккрецирующего объекта и свойств падающего вещества, в случае реалистичных двойных систем с черными дырами он составляет около миллиона светимостей Солнца для черной дыры массой около 25–30 солнечных. Предел линейно растет с ростом массы, поэтому для объяснения источников со светимостями порядка нескольких миллионов или десятков миллионов светимостей Солнца были предложены черные дыры промежуточных масс, имеющие более высокий предел.

В двойных системах возможно достаточно надежное определение масс компонент. Наличие яркого рентгеновского источника позволяет заподозрить присутствие в системе компактного объекта — нейтронной звезды или черной дыры. Отсутствие регулярных

пульсаций излучения, а также некоторые спектральные особенности могут дать косвенные аргументы в пользу черной дыры, окончательный вывод делается по измерению массы. Для нейтронных звезд существует верхний предел массы (предел Оппенгеймера — Волкова), который составляет примерно 2–3 массы Солнца. Если наблюдения показывают, что масса компактного объекта превосходит три солнечных, то он становится хорошим кандидатом в черные дыры (типичные измеренные массы черных дыр в двойных системах составляют 5–10 солнечных).

Внутренняя точка Лагранжа — место соединения полостей Роша в двойной системе.

Первый хороший кандидат в черные дыры был открыт в начале 1970-х гг. Это рентгеновская двойная система Лебедь X-1, в которой спутником компактного объекта является яркая звезда-гигант. Оценки массы компактного объекта показали, что она, вероятнее всего, превосходит три солнечных. Сейчас известно несколько десятков кандидатов в черные дыры в рентгеновских двойных системах, в большинстве из них спутником компактного объекта является маломассивная нормальная звезда. Значительную часть времени такие системы проводят в так называемом спокойном состоянии, когда рентгеновская светимость становится крайне низкой. Это свойство является косвенным аргументом в пользу гипотезы о черной дыре, поскольку в системах с нейтронными звездами энерговыделение не падает до таких низких уровней.

Модель дисковой аккреции была создана в работах Николая Шакуры, Рашида Сюняева, Игоря Новикова и Кипа Торна в начале 1970-х гг.

Формально существование черных дыр остается гипотезой. Доказать отсутствие поверхности и наличие горизонта у астрофизического объекта — сложная задача. Однако существует ряд хороших косвенных аргументов в пользу черных дыр. Один из них связан с отсутствием феномена рентгеновских барстеров в системах с кандидатами в черные дыры: накопление гелия на поверхности аккрецирующей нейтронной звезды приводит к термоядерному взрыву, наблюдаемому как мощная рентгеновская вспышка, а в аналогичных системах с кандидатами в черные дыры такие вспышки не наблюдаются. Самое простое объяснение состоит в том, что накопления вещества не происходит из-за отсутствия поверхности. К сожалению, это лишь косвенный аргумент, и он не может служить окончательным доказательством существования черных дыр.

В настоящее время наиболее надежными свидетельствами в пользу существования черных дыр являются наблюдения гравитационно-волновых всплесков. Первое такое событие было зарегистрировано установками LIGO в сентябре 2015 г., когда наблюдалось слияние двух компактных объектов с массами около 35 и 30 масс Солнца. Весь комплекс наблюдательных данных прекрасно объясняется в рамках модели слияния двух черных дыр.

7.3

Сверхмассивные черные дыры

Известные нам сверхмассивные черные дыры располагаются в центрах галактик. В основном речь идет о галактиках, обладающих выраженной сферической составляющей — так называемым балджем (см. раздел 10.3 «Сверхмассивные черные дыры и активные ядра»). Поэтому, скажем, небольшие иррегулярные галактики, а также дисковые галактики без балджа, по всей видимости, не содержат сверхмассивных черных дыр. Обычно чем больше масса балджа, тем больше масса черной дыры, хотя есть много примеров отклонений от этой простой зависимости.

Квazarы и блазары — сверхмассивные черные дыры, которые находятся в центрах крупных галактик и могут проявлять высокую активность.

Самым надежным способом идентификации сверхмассивной черной дыры и определения ее массы является наблюдение вращения объектов на близком расстоянии вокруг нее. Это могут быть звезды (как в случае нашей Галактики), газ или мазерные источники³. В последнем случае удастся с высокой точностью определять массы дыр в галактиках, расположенных в десятках миллионов световых лет от нас. Кроме того, есть несколько косвенных способов оценки массы черной дыры, в том числе основанных на известных корреляциях массы дыры с какими-нибудь параметрами галактики или

³ Мазер — источник когерентного излучения в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн. В астрономии мазерные источники могут возникать в атмосферах звезд-гигантов и в молекулярных облаках в межзвездной среде. Излучение связано с переходами между молекулярными уровнями с инверсной заселенностью.

принимаемого излучения. Наконец, заподозрить существование сверхмассивной черной дыры мы можем по наблюдениям активности в галактическом ядре.

Сама идея о существовании сверхмассивных черных дыр появилась после обнаружения квазаров — точечных источников радиоизлучения. Некоторые из них были идентифицированы и в оптическом диапазоне как квазизвездные (точечные) объекты. Однако объяснить их спектры не удавалось, пока это в 1963 г. не сделал Мартин Шмидт (Maarten Schmidt). Спектральные линии были идентифицированы после учета их значительного красного смещения, и космологическая интерпретация смещения делала квазары самыми далекими из известных на тот момент источников. Расстояние до них исчисляется миллиардами световых лет (при этом первые исследованные квазары оказались самыми близкими к нам!). Соответственно, светимость объектов оказывалась крайне высокой.

В 1963 г. Мартин Шмидт объяснил сдвиг линий в спектрах квазаров космологическим красным смещением. Это дало возможность измерять расстояния до них.

Кроме того, была обнаружена переменность блеска квазаров в оптическом диапазоне (для самого близкого и первого идентифицированного квазара, 3C 273, это сделали в 1963 г. Александр Шаров и Юрий Ефремов, используя данные «стеклянной библиотеки» — хранилища фотопластинок — ГАИШ). Быстрая переменность говорит о небольших размерах источника. В случае квазаров размер оказывался сравнимым с масштабом Солнечной системы, притом что светимость превосходила таковую у некоторых крупных галактик. Это требовало нового необычного источника энергии.

Гипотеза, которую предложили Яков Зельдович и Эдвин Солпитер (Edwin Salpeter), позволяет решить эти проблемы. Сверхмассивная черная дыра при массе около 50 млн солнечных имеет радиус, примерно равный 1 а. е. Газ, притягиваемый черной дырой, из-за большого момента импульса формирует аккреционный диск, эффективность энерговыделения в котором может составлять десятки процентов. При достаточном количестве падающего вещества такая черная дыра может иметь светимость вплоть до триллиона светимостей Солнца, что многократно превосходит полную светимость нашей Галактики.

В настоящее время достаточно точно измерены массы десятков сверхмассивных черных дыр. Самые тяжелые из них достигают 10 млрд масс Солнца, а самые легкие — нескольких тысяч солнечных масс (при меньших значениях дыра не сможет удержаться в центре

даже небольшой галактики). Но масса черной дыры всегда существенно меньше массы галактики, в которой она расположена.

Источник, переменный на характерном масштабе времени T , не может иметь размеры излучающей области более чем $L = cT$, где c — скорость света.

Одной из самых хорошо изученных является черная дыра в центре нашей Галактики — объект Sgr A* (Стрелец A*) с массой около 4 млн солнечных. Расстояние до нее около 25 000 световых лет, вокруг нее удастся наблюдать движение звезд, что и дает точное определение массы. Низкая эффективность аккреции на Sgr A* подтверждает его идентификацию в качестве черной дыры (вещество не контактирует с поверхностью, а уходит под горизонт, не успевая высветить свою энергию). В апреле 2017 г. были проведены наблюдения Sgr A* с помощью трансконтинентальной системы радиотелескопов Event Horizon Telescope («Телескоп горизонта событий»). Эти наблюдения призваны продемонстрировать наличие эффектов, характерных именно для черных дыр, а также определить параметры центрального массивного объекта.

Эффект гравитационного красного смещения приводит к тому, что свет, исходящий из области с большей гравитацией, выглядит для наблюдателя покрасневшим.

Кроме того, наблюдения аккрецирующих черных дыр (и сверхмассивных, и звездных масс) могут позволить измерить темп их вращения. Это связано с тем, что аккреционный диск не может подойти прямо к горизонту. В ОТО существует понятие «последняя устойчивая орбита», на более близких расстояниях устойчивое орбитальное движение невозможно, поскольку падающее вещество по спирали очень быстро попадает под горизонт. Для невращающейся черной дыры последняя устойчивая орбита располагается на трех шварцшильдовских радиусах, а для вращающейся — зависит от параметра вращения черной дыры (и от направления вращения вещества). Чаще всего вещество вращается в ту же сторону, что и черная дыра, в этом случае радиус последней устойчивой орбиты может быть меньше, чем в шварцшильдовском случае.

Во внутренних частях аккреционного диска энерговыделение происходит наиболее эффективно, но при приближении к черной дыре становится все более существенным гравитационное красное смещение. Если излучение диска содержит какую-либо спектральную деталь (часто это линия сильно ионизованного железа с энергией 6,4 кэВ),

то ее вид (профиль) будет деформирован: появится так называемое «красное плечо», связанное с излучением внутренних частей диска, для которого велико гравитационное красное смещение. По степени «покраснения» этого излучения можно определить, насколько близко диск подходит к черной дыре.

В вопросе происхождения и эволюции сверхмассивных черных дыр есть еще много неясностей. Наверняка реализуется механизм, в котором все начинается с массивных звезд населения III (самые первые звезды во Вселенной). Благодаря особенностям химического состава (практически полное отсутствие элементов тяжелее гелия) они могли достигать масс в сотни солнечных, а в конце своей жизни превращались в черные дыры с массой около 200 солнечных. Затем в процессе иерархического скучивания эти черные дыры попадали в формирующиеся галактики и довольно быстро, будучи массивными объектами, оседали в их центральных частях, где за счет аккреции (и иногда слияния с другими черными дырами) их масса постепенно росла. Постепенно росла и масса центральной сферической составляющей галактики (это объясняет корреляцию массы черных дыр с массами балджей). Таким путем можно к настоящему времени нарастить массу до миллиардов масс Солнца.

Масса черной дыры в центре нашей Галактики (около 4 млн масс Солнца) определена с помощью непосредственного наблюдения движения звезд вокруг нее.

Однако такой механизм не объясняет существования массивных черных дыр спустя всего лишь сотни миллионов лет после начала формирования звезд и галактик. Такие объекты известны, например, благодаря наблюдениям очень далеких мощных квазаров. Для их объяснения нужны большие начальные массы «затравочных» черных дыр. Это возможно, если происходит коллапс достаточно больших газовых облаков, дающих в итоге черные дыры с массами в тысячи и десятки тысяч солнечных. Такие объекты, попав в центральные части галактик, могут достаточно быстро (за сотни миллионов лет) нарастить массы до миллиарда солнечных, объяснив тем самым существование активных ядер высокой светимости в первый миллиард лет жизни Вселенной.

Наконец, существует сценарий, в котором массивные черные дыры формируются за счет эволюции плотных скоплений звезд в ядрах галактик. После достижения некоторой критической плотности в центре скопления звезды начинают активно сливаться друг с другом, что в итоге приводит к появлению черной дыры.

Сверхмассивные черные дыры поглощают не только окружающий газ, но и звезды, планеты и другие объекты. Некоторые из них могут быть разорваны приливными силами при приближении к горизонту (если только объект не является очень прочным, как, например, нейтронная звезда или белый карлик, а дыра — слишком массивной; хотя даже очень плотные объекты будут разорваны приливными силами внутри черной дыры при приближении к сингулярности, но это пройдет незамеченным для внешнего наблюдателя — внутри горизонта). Такие события наблюдаются как рентгеновские вспышки, они могут длиться месяцами или годами, по мере того как вещество разрушенной звезды образует диск вокруг черной дыры и постепенно аккрецирует на нее. Отсутствие мощного излучения, связанного с контактом падающего вещества и поверхности, является дополнительным аргументом в пользу наличия горизонта у сверхмассивных объектов в галактических центрах.

При слиянии двух черных дыр получившаяся черная дыра может приобрести скорость в сотни километров в секунду. Это так называемый эффект гравитационно-волновой ракеты.

Начиная с конца 1960-х — начала 1970-х гг., с работ Дональда Линден-Белла (Donald Lynden-Bell), астрономы полагают, что в центре каждой галактики с достаточно крупным балджем должна находиться сверхмассивная черная дыра. Наблюдения в целом подтверждают эту картину.

Однако в редких случаях сверхмассивные черные дыры могут покидать центральные части галактик. В результате слияния двух черных дыр происходит излучение гравитационных волн, которые уносят энергию и импульс из системы. Если массы дыр не равны, этот процесс не будет симметричным. После слияния получившаяся дыра приобретает импульс (выполнение закона сохранения импульса достигается тем, что равный и противоположно направленный импульс унесен гравитационными волнами). Такой эффект гравитационно-волновой ракеты может разогнать объект до скоростей в сотни километров в секунду, что достаточно для покидания центральной части галактики. А если масса галактики невелика, то объект может полностью ее покинуть.

Две черные дыры могут оказаться в центре галактики в результате слияния двух звездных систем, каждая из которых имела по сверхмассивной черной дыре. На определенном этапе эволюции это достаточно частый процесс, и в настоящее время известны наблюдаемые кандидаты в двойные сверхмассивные черные дыры. По мере сближения эти объекты испускают гравитационные волны, а в момент

слияния происходит мощный гравитационно-волновой всплеск. Для обнаружения таких событий планируется создать космический эксперимент eLISA, подобный наземным установкам LIGO и Virgo (назван в честь созвездия Девы). Также свой вклад в поиск длинноволнового гравитационного излучения от пар сверхмассивных черных дыр могут внести астрометрические наблюдения и тайминг миллисекундных радиопульсаров.

Исследование непосредственных окрестностей сверхмассивных черных дыр сопряжено с большими трудностями. Два наиболее исследованных объекта — это черная дыра в центре нашей Галактики (сверхмассивная и самая близкая, поэтому ее угловой размер достаточно велик), а также черная дыра в галактике M87 (сочетает очень большую массу с относительно небольшим расстоянием от нас).

Черная дыра в центре галактики M87 имеет массу 4–5 млрд масс Солнца. До этой галактики примерно 50–55 млн световых лет.

Изучение окрестностей черных дыр возможно в радиодиапазоне методами интерферометрии. С этой целью создан проект Event Horizon Telescope, объединяющий несколько инструментов, разбросанных по всему земному шару. Наблюдения в миллиметровом диапазоне с помощью этой системы телескопов позволяют изучать ближайшие (несколько радиусов черных дыр) окрестности Sgr A* и M87. Свой вклад смогут внести и космические проекты, в которых один из радиотелескопов, составляющих интерферометрическую систему, находится на расстоянии в сотни тысяч километров от Земли.

Первым успешным проектом такого типа является «Радио-астрон», основой которого является российский спутник «Спектр-Р».

7.4

Первичные черные дыры и испарение Хокинга

В настоящий момент в астрономических наблюдениях мы не можем непосредственно исследовать области, прилегающие к горизонту событий. Кроме того, современные физические теории не позволяют с достаточной точностью и надежностью одновременно

учитывать эффекты квантовой физики и сильного искривления пространства-времени. Это приводит к тому, что в физике черных дыр остается много неясного, и разные теоретические подходы предлагают очень разные ответы. В еще большей степени это применимо к недрам черных дыр, откуда информация принципиально не может попасть во внешний мир. Существуют разные модели объектов, которые мы объединяем под общим термином «черные дыры» и которые с астрофизической точки зрения выглядят как классические черные дыры ОТО.

Наиболее важные результаты по физике черных дыр сейчас получают с помощью гравитационно-волновых детекторов. Значительные надежды можно связывать и с интерферометрическими наблюдениями окрестностей сверхмассивных черных дыр большого углового размера. В перспективе можно ожидать, что будет обнаружен крайне интересный эффект испарения черных дыр. Это позволит существенно продвинуться и в понимании физики этих объектов, и в понимании природы гравитации и квантовых процессов.

Гипотеза об испарении черных дыр была развита в статье Стивена Хокинга (1975). Эта работа во многом основана на обсуждении (с Яковом Зельдовичем и Александром Старобинским) квантовых эффектов вблизи черных дыр во время визита Хокинга в Москву в 1973 г.

Процесс испарения черных дыр — квантовый эффект. Рождение частиц и излучения происходит *снаружи* горизонта, т. е. частицы и излучение не пересекают горизонт. Для рождения частиц необходима энергия, которая черпается из массы черной дыры, так что по мере генерации частиц размер и масса компактного объекта уменьшаются.

Температура излучения черной дыры зависит от ее массы: чем больше масса, тем ниже температура. В абсолютной пустоте все черные дыры испарялись бы, однако на самом деле космос не пуст: он заполнен не только веществом, но и излучением. Наибольший вклад в его плотность энергии дает реликтовое излучение с температурой (в настоящее время) около 2,7 К. Соответственно, черные дыры с меньшей температурой в наши дни будут расти за счет поглощения реликтового излучения. В реалистичных условиях только черные дыры с массой меньше массы крупного астероида (их размеры — порядка размеров атомов и атомных ядер) должны постепенно испаряться (если у них нет другого источника массы, например связанного с аккрецией вещества из окружающей среды).

Испарение черных дыр — это достаточно медленный процесс (кроме финальных стадий). Тем не менее за время жизни Вселенной первичные черные дыры с массами менее 10^{15} г должны были испариться. Соответственно, если первичные черные дыры существуют и гипотеза о хокинговском испарении является верной, то в настоящее время черные дыры с первоначальной массой порядка 10^{15} г заканчивают свое существование. Этот процесс должен сопровождаться

достаточно мощной вспышкой, видимой с расстояния в несколько сотен световых лет.

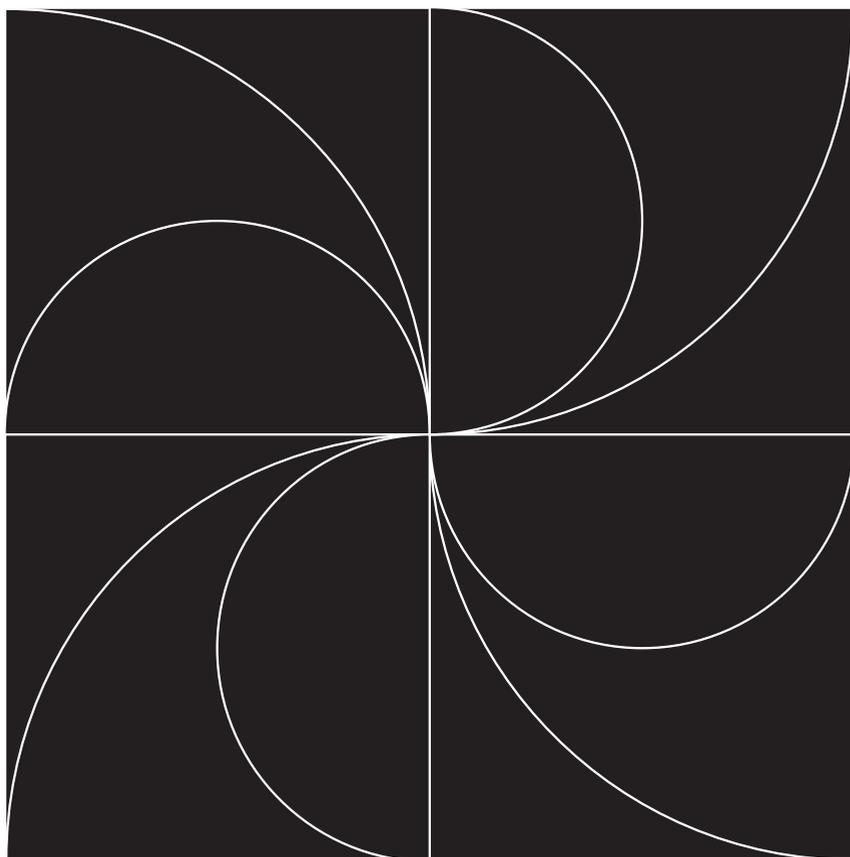
Черные дыры таких небольших масс могли рождаться в ранней Вселенной в первые доли секунды после начала расширения. Когда средняя плотность вещества была очень велика, флуктуации плотности могли достигать значений, требуемых для образования черных дыр. Количество первичных черных дыр и их распределение по массам остаются предметом дискуссий. Любые конкретные данные по первичным черным дырам расскажут нам многое об условиях в ранней (возможно, сразу после окончания стадии инфляции) Вселенной.

Поиски испаряющихся черных дыр ведутся в двух основных направлениях. Первое — это поиски собственно вспышек, которые могут наблюдаться не только в гамма-диапазоне, но и, например, в радиодиапазоне. Так, одной из гипотез для объяснения так называемых *быстрых радиовсплесков* было именно испарение черных дыр (эта гипотеза не подтвердилась и была отвергнута). Пока, к сожалению, не выявлено каких-либо событий, которые могут считаться надежными кандидатами во всплески испаряющихся черных дыр.

Второе направление поиска связано с поиском дополнительного вклада частиц, рождаемых в результате испарения. Идея состоит в том, что при испарении дыр рождаются частицы и античастицы. Антивещества во Вселенной крайне мало, поэтому существенный дополнительный вклад (например, в количество позитронов или антипротонов) можно было бы заметить. Анализ данных о составе космических лучей не позволяет пока говорить о том, что такой ожидаемый дополнительный вклад в количество античастиц обнаружен.

Наконец, различные астрофизические методы используются для поисков первичных черных дыр по их гравитационному действию. Например, первичные черные дыры могут выступать в роли гравитационных линз. Поиски таких объектов также не дали результата.

В вопросе о финальных стадиях испарения черных дыр есть много неясного. Например, в рамках теории петлевой квантовой гравитации финальные стадии испарения проходят не так, как в модели Хокинга. Поэтому обнаружение этого явления и изучение его свойств были бы крайне важными для фундаментальной физики.



Глава 8

НАША ГАЛАКТИКА

8.1	Структура Галактики	181
8.2	Наше место в Галактике и структура наших окрестностей	185
8.3	Природа спиральных рукавов	188
8.4	Рассеянные и шаровые скопления	191
8.5	Сверхмассивная черная дыра — Sgr A*	195
8.6	Спутники Галактики. Местная группа	197

Наша Галактика (Млечный Путь) — крупная система, состоящая из темного вещества, звезд, газа и пыли. Мы не можем видеть Галактику снаружи, поэтому не знаем многих деталей ее строения, однако нам известно, что это дисковая спиральная галактика. В центральной части находится балдж — сфероидальный компонент Галактики размером несколько тысяч световых лет, а в самом центре расположена сверхмассивная черная дыра массой около 4 млн солнечных. Поперечник звездного диска Галактики составляет около 100 000 световых лет, толщина его в десятки раз меньше диаметра. Наша звезда находится вблизи плоскости диска — примерно в 25 000–27 000 световых лет от его центра, поэтому на небе мы видим красивую полосу Млечного Пути — это основная масса звезд Галактики (всего их в ней несколько сотен миллиардов). Масса звезд составляет примерно 100 млрд масс Солнца, но основная (90% по массе) составляющая Галактики нам не видна: диск погружен в сфероидальное гало размером около миллиона световых лет, состоящее в основном из темного вещества.

Галактике около 13 млрд лет, так что в ней есть очень старые звезды. Однако в диске присутствует много газа и пыли, поэтому и сейчас там продолжается процесс звездообразования. Благодаря этому раз в несколько десятков лет вспыхивают сверхновые, обогащая межзвездную среду тяжелыми элементами.

Наша Галактика не одинока: у нее есть десятки карликовых спутников и пара больших соседей — туманность Андромеды и галактика в Треугольнике. Вместе они формируют Местную группу галактик.

8.1

Структура Галактики

Основными структурными компонентами Галактики являются диск, балдж и гало. В центральной части Галактики также выделяют так называемый бар, или переемычку. Полная масса Галактики составляет около триллиона масс Солнца, бóльшая ее часть приходится на гало, состоящее в основном из темного вещества. Масса звезд составляет около 100 млрд солнечных, и это в основном звезды диска. Характерный размер (диаметр) диска составляет около 100 000 световых лет, а средняя толщина — несколько тысяч. Балдж находится в центральной части Галактики, имеет округлую форму, размеры в несколько тысяч световых лет и в несколько раз легче диска. Гало размером в сотни тысяч световых лет охватывает всю Галактику.

Основные компоненты Галактики: диск, балдж и гало.

Звезды на ночном небе — объекты нашей Галактики. Полоса Млечного Пути, содержащая миллиарды звезд, — это ее основная часть, диск (наша Галактика относится именно к дисковым галактикам). Кроме того, в диске много газа и пыли, и именно поэтому Млечный Путь не выглядит ровной «небесной дорогой», а кажется местами «клочковатым»: сами звезды распределены достаточно равномерно, но газопылевые облака поглощают свет звезд, и в Млечном Пути появляются прожилки и провалы.

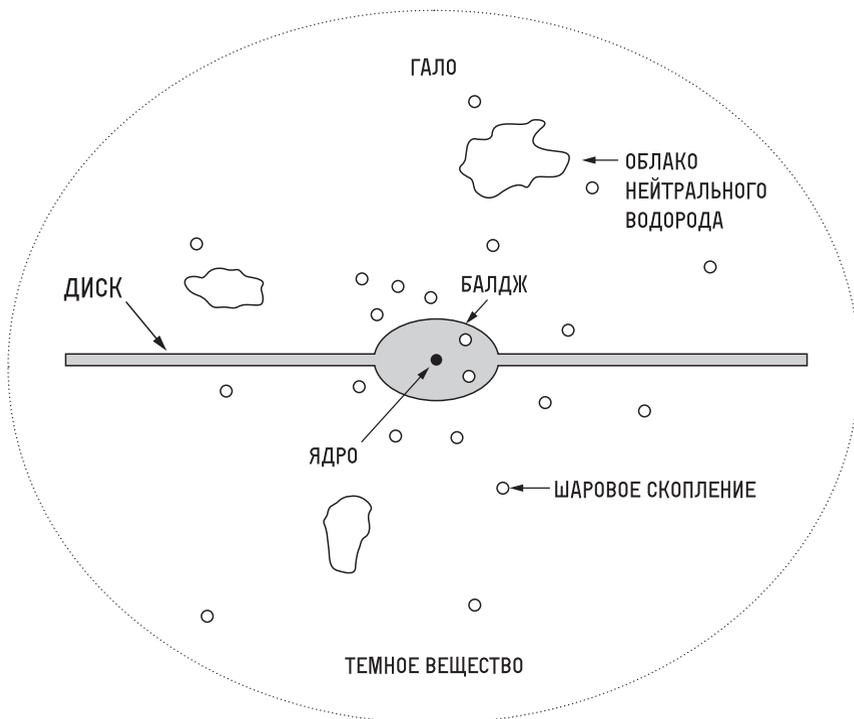
Спиральные рукава выделяются, потому что в них идет звездообразование и присутствует много массивных ярких звезд.

Из-за наличия большого количества газа и пыли в плоскости диска огромное количество звезд Галактики оказывается скрытым от нас. Однако наличие плотной межзвездной среды приводит к формированию новых поколений светил, так что звездный диск содержит много молодых объектов. Поэтому там присутствуют и массивные звезды высокой светимости, обладающие коротким временем жизни. Именно они очерчивают спиральный узор галактик, поскольку, как правило, именно в спиральных рукавах наиболее активно идет звездообразование. Между тем есть в диске и старые звезды, родившиеся в нем, некоторым из которых, как Солнцу, несколько миллиардов

лет. А самые старые — ровесники Галактики — могли попадать в него в результате динамической звездной эволюции или поглощения галактик-спутников.

Для определения деталей структуры Галактики необходимо достаточно точно измерять расстояния до разных объектов, прежде всего звезд. Однако пока точные расстояния, в первую очередь благодаря работе спутника Hipparcos, доступны лишь для нескольких десятков тысяч звезд в пределах примерно тысячи световых лет от нас. В ближайшие годы станут доступны полные данные наблюдений космического телескопа Gaia. Это даст измерения расстояний для сотен миллионов звезд вплоть до десятков тысяч световых лет. Тогда станет возможным построить карту распределения и движения звезд примерно половины нашей Галактики. Пока же в вопросе ее строения есть существенные неясности.

Если бы мы могли посмотреть на нашу Галактику со стороны, то в первую очередь увидели бы диск, испускающий около 80% всего света Галактики. Это связано как с тем, что в диске сосредоточена большая часть звезд, так и с тем, что среди них много ярких объектов, поскольку там идет процесс звездообразования.



© ANTON GUTSUNAIEV / WIKIMEDIA COMMONS

Схематическое изображение нашей Галактики с диском, балджем и звездным гало. Вся Галактика погружена в огромное гало темного вещества.

Хотя диск не имеет резкой границы, можно говорить о его характерном размере. Он тянется до расстояний в несколько десятков тысяч световых лет от центра Галактики, постепенно становясь все более разреженным. В нем выделяют две составляющие: тонкий и толстый диски. Тонкий диск доминирует с точки зрения испускаемого излучения: именно там сосредоточено основное количество звезд, и там формируются спиральные рукава. Детали спиральной структуры нашей Галактике остаются до конца неясными.

Диск — самая заметная часть Галактики, в нем сосредоточена большая часть звезд.

Тонкий диск имеет характерную полутолщину около 1000 световых лет, а толстый примерно втрое толще. Этот компонент Галактики выделили относительно недавно, лишь в 1983 г., он состоит из более старых звезд, чем тонкий диск, с меньшим содержанием тяжелых элементов. Кинематика звезд в нем отличается по своим характеристикам от звезд тонкого диска, поверхностная яркость толстого диска в несколько раз меньше. Толстый диск должен был сформироваться довольно быстро (менее чем за миллиард лет), когда Галактика была еще молодой.

В центральной части Галактики находится звездный балдж — «вздутие». Его масса превосходит 10 млрд солнечных. Для размеров и массы нашего диска балдж не очень крупный, а в остальном наша Галактика довольно типична (если сравнить ее с другими гигантскими спиральными галактиками).

Балдж — одна из самых старых частей Галактики, возраст основной массы звезд в нем превышает 10 млрд лет. Там мало газа, а потому мало молодых звезд. Размеры балджа составляют несколько тысяч световых лет.

Также в центральной области можно выделить так называемый бар — перемычку (иногда говорят даже о двух барах). Хотя «географически» бар находится внутри балджа, он является элементом диска. Это динамическая звездная структура, имеющая вытянутую форму, возможно, играющая важную роль в формировании спиральных рукавов.

Балдж — одна из самых старых структур Галактики.

Самая протяженная часть Галактики — ее гало, состоящее в основном из темного вещества, хотя там есть и газ, и звезды. Их движение не похоже на поведение звезд диска, которые вращаются в одной плоскости и в одну сторону вокруг центра. Звезды гало

движутся по вытянутым орбитам, пересекая диск под разными углами, а в целом гало вращается медленно. Самые далекие звезды гало находятся на расстоянии более полумиллиона световых лет от центра Галактики.

Когда мы говорим о больших размерах гало, речь идет в первую очередь о темном веществе. Половина массы гало сосредоточена внутри радиуса около полумиллиона световых лет. Звездное гало гораздо компактнее (характерный размер — десятки тысяч световых лет). Выделяют внутреннее гало (по-видимому, формировалось быстро, вместе с балджем, на ранних стадиях эволюции Галактики за счет коллапса протогалактического газа) и внешнее гало (формировалось позже, в основном за счет поглощения карликовых галактик-спутников). Также к гало относят систему шаровых звездных скоплений.

Гало темного вещества — самая большая и массивная часть Галактики.

Звезды гало имеют очень малое содержание тяжелых элементов. К счастью, некоторые из них можно изучать достаточно детально, поскольку они пролетают и вблизи Солнца. Примерно одна звезда из 1000 в солнечных окрестностях относится к гало. Такие объекты можно выделять по их движению: они пересекают галактический диск под большим углом и с большой скоростью.

Основная масса звезд сформировалась в первые несколько миллиардов лет жизни Галактики.

Изучать гало других галактик сложно, поскольку все они состоят из относительно небольшого количества старых звезд, плохо видимых с большого расстояния. Лишь для туманности Андромеды (М31) и галактики в Треугольнике (М33) у нас имеются достаточно подробные данные по их звездным гало. В будущем введение в строй новых телескопов большого диаметра позволит детально исследовать эти структуры в более далеких галактиках.

Поскольку гало, особенно внешнее, формировалось в процессе сгущивания в эпоху, когда происходило интенсивное поглощение галактик-спутников, там может находиться довольно много массивных черных дыр с массами от сотен до десятков тысяч солнечных, связанных с разрушенными спутниками. Однако пока наблюдать их не удастся.

В истории формирования Галактики существует много вопросов. По-видимому, первыми возникли балдж и внутреннее гало, что известно по содержанию элементов в звездах этих компонентов. Современные модели показывают, что половина звездной массы сформировалась за первые 4 млрд лет эволюции. Затем темп формирования

звезд существенно упал примерно на миллиард лет, а после небольшой паузы слегка возрос и оставался примерно неизменным до наших дней. Самые старые звезды Галактики находятся в шаровых скоплениях и внутренней части балджа, самые молодые — в тонком диске Галактики. Последняя составляющая образовалась позже всех, особенно ее внешние части, которые росли по мере натекания газа с большим орбитальным моментом. На первых этапах истории Галактики слияния с другими крупными звездными системами могли играть заметную роль, но последние 10 млрд лет событий такого типа не происходило — поглощались лишь мелкие спутники, неспособные существенно изменить структуру Галактики. Следы влияния карликовых галактик мы видим в разных частях нашей Галактики. Например, к ним относятся звездные потоки — остатки разрушенных спутников, которые наблюдаются в галактическом гало. Также существуют теоретические модели, показывающие, что прохождение небольших галактик-спутников через диск может влиять на структуру спиральных рукавов.

8.2

Наше место в Галактике и структура наших окрестностей

Солнце находится на расстоянии около 25 000–27 000 световых лет от центра Галактики почти точно в плоскости ее диска, между двумя крупными спиральными рукавами (рукавом Персея и рукавом Стрельца-Киля). Сейчас Солнце находится в так называемом местном рукаве (рукаве Ориона) — относительно небольшом образовании (иногда его даже называют «отростком» — *spur*), с которым генетически связаны некоторые яркие массивные звезды в наших окрестностях. Само же Солнце с этим рукавом непосредственно не связано — наша звезда имеет возраст почти 5 млрд лет и совершила уже много оборотов вокруг центра Галактики.

Солнце вращается вокруг центра Галактики с линейной скоростью около 220 км/с. Типичные скорости относительно близких звезд диска, также участвующих в этом вращении, 10–30 км/с. Звездная плотность в наших окрестностях составляет примерно одну звезду на 250 кубических световых лет (или 0,14 звезды на кубический парсек).

Согласно многим оценкам, Солнце находится вблизи так называемой зоны *коротации*, где скорость вращения звезд равна скорости движения спирального узора¹. Поэтому наша звезда относительно редко оказывается внутри крупных спиральных рукавов, где встречается больше облаков газа и пыли, а также чаще вспыхивают сверхновые и выше интенсивность космических лучей. Некоторые ученые полагают, что это благоприятное обстоятельство может играть существенную роль в долговременной эволюции жизни на Земле.

Солнце находится вблизи зоны коротации.

В солнечной окрестности выделяются две важные структуры. Первая связана со свойствами межзвездной среды и называется Местным пузырем (Local Bubble), а вторая — с распределением ассоциаций молодых звезд (это пояс Гулда).

Пояс Гулда был идентифицирован наблюдателями несколько столетий назад. Было замечено, что распределение ярких звезд на небе не совпадает с плоскостью Млечного Пути, а может быть объяснено существованием другой плоскости, наклоненной к галактической примерно на 20 градусов. Свое название пояс получил по имени Бенджамина Гулда (Benjamin Gould), хотя он был не первооткрывателем (видимо, первым о необычном распределении ярких звезд заговорил Джон Гершель (John Herschel) в 1834 г.), но первым детально исследовал этот вопрос в 1870-е гг.

Пояс Гулда образован ассоциациями молодых звезд.

Пояс представляет собой вытянутый тор размером 1000–2500 световых лет, центр которого лежит примерно в 400–500 световых годах от нас. Эта структура образована несколькими десятками ассоциаций молодых звезд, ее возраст составляет несколько десятков миллионов лет, так что Солнце оказалось внутри него совершенно случайно. Полная масса пояса составляет около миллиона солнечных масс, бóльшая ее часть приходится на межзвездный газ.

Относительно небольшой возраст пояса приводит к тому, что в нем присутствует довольно много массивных звезд. Благодаря этому темп вспышек сверхновых в нашей окрестности оказывается примерно втрое выше среднего на аналогичном расстоянии от центра Галактики (вне спиральных рукавов). Примерно две трети сверхновых в окрестности 1000–2000 световых лет в последние миллионы лет

¹ Заметим, что разные подсистемы рукавов в Галактике могут иметь разную угловую скорость. Поэтому можно говорить о нескольких зонах коротации. Соответственно, Солнце может находиться вблизи лишь одной из них.

связаны с поясом Гулда. Это, в свою очередь, ведет к повышенному содержанию молодых нейтронных звезд в наших окрестностях. В абсолютных значениях это небольшая величина (десятки объектов), но присутствие в ближайшем солнечном окружении (примерно до тысячи световых лет) нескольких молодых горячих нейтронных звезд (так называемая «Великолепная семерка») связывают именно с поясом Гулда.

Причины возникновения такой структуры до конца не ясны. Наиболее вероятной считается модель, в которой пояс возник в результате падения крупного молекулярного облака на галактический диск. Наблюдения показывают, что в Галактике может быть много подобных образований.

Местный пузырь — локальная область пониженной плотности межзвездной среды, заполненная горячим газом.

Местный пузырь — это компактная несимметричная область в межзвездной среде, практически свободная от поглощающего вещества. Плотность межзвездного газа там понижена, она составляет около 1 атома водорода в 20 см^3 — примерно на порядок меньше, чем в среднем на солнечном расстоянии от центра Галактики. Плотность вещества внутри пузыря неравномерна: например, вблизи Солнца находится так называемое Местное межзвездное облако, плотность в котором в несколько раз выше, чем в среднем в пузыре (есть и другие неоднородности).

Эта область пониженной плотности размером несколько сотен световых лет была впервые идентифицирована в конце 1960-х гг. Согласно современным моделям пузырь формировался на протяжении миллионов лет за счет ветров массивных звезд и вспышек сверхновых. Последняя сверхновая должна была взорваться менее миллиона лет назад, так что наше положение вблизи центра этой структуры является случайным.

Пузырь частично заполнен горячей плазмой (с температурой до миллиона градусов), излучение которой наблюдается в рентгеновском диапазоне.

8.3

Природа спиральных рукавов

Большая часть массивных галактик вне крупных скоплений являются спиральными. Мощные спиральные рукава (иногда их еще называют ветвями) галактик, подобных нашей, содержат большое количество массивных звезд с большой светимостью, крупные комплексы ионизованного водорода, а также массивные молекулярные облака. Все вместе указывает на то, что такие рукава — это области активного звездообразования².

Хотя по фотографиям может показаться, что в рукавах плотность звезд существенно выше, на самом деле это не так. Плотность там обычно повышена лишь очень незначительно. Дело именно в наличии очень ярких, как правило, короткоживущих объектов, что связано с повышенной плотностью газа. Наличие спиралей обычно существенно не повышает полный темп формирования звезд в галактике, но локализует его именно в рукавах.

Спиральные рукава — области активного формирования звезд.

Выделяют несколько типов спиральных галактик. При классификации их форм существенными являются разнообразные морфологические детали. Во-первых, важно, есть ли у галактики бар — центральная перемика, возникающая во внутренней части диска из-за перестройки орбит звезд. Во-вторых, насколько сильно закручены спирали. В-третьих, структура самих спиральных ветвей может быть различной. Например, существуют галактики с большим количеством мелких (флоккулентных) рукавов (как NGC 2841), многорукавные галактики (как M33) и, наконец, галактики с парой мощных рукавов (*grand design*, которые еще иногда называют упорядоченными), охватывающих весь диск (как M51). Наличие более мощных и протяженных рукавов может сочетаться с присутствием менее заметных и протяженных (как это, видимо, происходит в нашей Галактике). Разные типы рукавов имеют разное происхождение.

² Диска галактик, содержащие очень мало холодного газа, а следовательно, и молодых звезд, тоже иногда имеют спиральную структуру. Она связана с уплотнением старое звездного населения диска и всегда более размыта и слабо контрастна по причине отсутствия областей звездообразования.

Рассматривают три механизма: волны плотности, локальные неустойчивости и возмущения³, приливные воздействия (сюда же можно отнести не только влияние соседних галактик, но и воздействие бара или неосесимметричного (трехосного) балджа или гало темного вещества). Эти механизмы не исключают друг друга. Однако обычно локальные возмущения и неустойчивости связаны с флоккулентными спиралями, а упорядоченные спирали — с приливным воздействием или влиянием галактического бара, и они описываются теорией волн плотности.

Спиральные структуры галактик могут по-разному выглядеть в разных диапазонах спектра. При этом происхождение (механизм генерации) спиралей, видимых в разных диапазонах, может быть разным. Различные типы рукавов могут обладать и разными кинематическими свойствами.

Существует несколько типов спиральных рукавов и механизмов их формирования.

Спиральный узор вращается в ту же сторону, что и звезды диска, но их угловые скорости могут не совпадать. Обычно спирали являются отстающими — движение звезд диска направлено в ту же сторону, куда обращена выпуклость спирали (а внешние концы спиралей направлены назад). Примером исключений из этого правила является галактика NGC 4622, внешние спирали которой направлены внешними концами по ходу вращения диска (у этой галактики есть также внутренний рукав, ориентированный обычным образом относительно движения звезд диска). Ближе к центру галактики (внутри радиуса коротации — расстояния, на котором угловые скорости спирального узора и звезд совпадают) скорость вращения звезд диска превышает скорость движения рукавов. Соответственно, звезды и газ обычно входят в рукав с внутренней (вогнутой) стороны. Снаружи от радиуса коротации наблюдается обратная картина.

Наблюдения не могут показать динамику (изменения) спирального узора, поскольку характерные времена этого процесса очень велики. Поэтому модели генерации и эволюции спиралей в основном изучаются сейчас методами компьютерного моделирования. Однако итоги сравнения результатов этого моделирования с наблюдениями галактических структур довольно противоречивы.

Большинство механизмов возникновения рукавов так или иначе связано с волнами плотности. В соответствии с этой гипотезой

³ Иными словами, образование локальных неоднородностей (например, связанных с локальными неустойчивостями диска), которые растягиваются в спиралевидные отрезки дифференциальным вращением.

спиральные ветви представляют собой уплотнения в межзвездной среде и распределении звезд. В результате тех или иных причин возникает область спиральной формы, обладающая более сильным гравитационным потенциалом, притягивающая звезды и газ. Она распространяется по диску галактики, сохраняя свою форму, а в ее поддержании в разные моменты времени участвуют разные звезды (подобно тому как в движении волн по воде участвуют разные молекулы, не перемещающиеся вместе с волной). Повышенная плотность среды приводит к тому, что в рукавах чаще происходят столкновения молекулярных облаков. Также облака с большей вероятностью становятся нестабильными относительно формирования звезд именно в рукавах. Таким образом, ключевым результатом действия многих механизмов образования спиральной структуры является соби́рание газа в рукава.

Наблюдения взаимодействующих галактик показывают, что приливное взаимодействие между ними приводит к генерации рукавов как непосредственно в дисках, так и в виде перемычек, соединяющих галактики, приливных хвостов и других внешних деталей. При слияниях самые внешние рукава могут действительно представлять собой сильные уплотнения в распределении звезд и газа, которые были сформированы приливными силами. Такие образования могут сохраняться миллиарды лет. Однако рукава во внутренних областях дисков, возникающие при взаимодействии галактик, по всей видимости, являются волнами плотности. Расчеты показывают, что после мощных взаимодействий спирали могут жить более миллиарда лет.

В отличие от упорядоченных спиралей, флоккулентные рукава, по всей видимости, обычно представляют собой локальные явления, связанные с неустойчивостями или взаимодействиями в межзвездной среде. Мелкие спиралевидные образования непрерывно рождаются и исчезают за десятки миллионов лет. Для возникновения таких рукавов наличие внешних возмущений (слияния, наличие бара и т. п.), как правило, не является существенным.

Яркость спиралей объясняется наличием массивных звезд высокой светимости.

Наблюдения показывают, что упорядоченные рукава намного чаще возникают у галактик с баром или крупными спутниками, а также у галактик в скоплениях и плотных группах. При этом в галактиках могут работать разные механизмы формирования спирального узора. Даже в случае галактик с баром, по всей видимости, не существует единого механизма, приводящего к появлению спиральных ветвей.

Также могут возникать так называемые динамические рукава (их также иногда называют материальными). В этом случае речь не идет о волнах плотности, и скорость рукава не отличается от скорости

вращения звезд галактики. В таком рукаве повышена плотность вещества (в первую очередь звезд), соответственно, под действием гравитации туда собирается газ, в результате чего создаются благоприятные условия для рождения нового поколения звезд. Если газа мало, то такой рукав будет представлять собой просто уплотнение в звездном распределении. Подобные рукава могут быть очень долгоживущими.

Часто спирали возникают в результате взаимодействия с галактиками-спутниками или из-за центральной перемычки (бара).

Характеристики спирального узора нашей Галактики известны недостаточно хорошо. По всей видимости, в ней есть как упорядоченные спирали, так и флоккулентные рукава, Солнце расположено внутри одного из флоккулентных рукавов между двумя мощными рукавами. Полное число спиральных рукавов разных типов пока не известно. В наиболее общепринятых моделях присутствуют четыре больших рукава (полное число ответвлений и флоккулентных деталей установить невозможно), из которых по крайней мере два имеют волновую природу. Однако новые данные (в первую очередь полученные космическим телескопом Gaia) могут изменить эту точку зрения.

8.4 Рассеянные и шаровые скопления

Звезды в основном образуются группами. Некоторые из таких групп оказываются достаточно плотными и массивными, чтобы существовать продолжительное время, другие слишком малы и быстро распадаются под влиянием внешних воздействий и собственной динамики.

Звезды в основном рождаются группами из молекулярных облаков.

Выделяют несколько типов групп звезд. Основные из них — это шаровые скопления (обычно наиболее массивные и старые), открытые (или иначе — рассеянные) скопления и звездные ассоциации (самые легкие и молодые).

Шаровые скопления получили свое название в 1789 г. от Уильяма Гершеля. В нашей Галактике известно более 150 шаровых скоплений. Полное их число может быть на несколько десятков больше. Это старые образования с типичным возрастом около 10 млрд лет и более. Их размер составляет до нескольких десятков световых лет. Они движутся по вытянутым орбитам под разным наклоном к диску, иногда уходя от центра Галактики на сотни тысяч световых лет.

Шаровые скопления — одни из самых старых образований в Галактике.

Массы шаровых скоплений обычно составляют около 100 000 масс Солнца, а самые тяжелые из них достигают нескольких миллионов солнечных. Вся эта масса в основном определяется звездами, газа и темного вещества в скоплениях немного. Отсутствие большого количества газа приводит к тому, что новые поколения звезд не возникают, все звезды в скоплениях старые, а значит — маломассивные. А поскольку шаровые скопления формировались давно, когда содержание тяжелых элементов в газе было меньше, они имеют низкую металличность.

Существует несколько сценариев образования шаровых скоплений. Основной предполагает коллапс крупного молекулярного облака, способного быстро породить много звезд без существенной потери газа. Условия для этого существовали в прошлом, когда галактики активно росли за счет слияний и поглощений, на красных смещениях $z = 2-3$ (около 10–12 млрд лет назад). К сожалению, пока мы не можем непосредственно наблюдать процесс формирования шаровых скоплений в столь далеком прошлом, в нашей Галактике такие процессы не идут уже более 8–10 млрд лет. Однако процесс образования молодых массивных скоплений, сходных по своим характеристикам с шаровыми, можно наблюдать в некоторых сливающихся галактиках, где в настоящее время реализуются типичные для эпохи с $z = 2-3$ условия.

В шаровых скоплениях за счет взаимодействия звезд образуется много рентгеновских двойных систем.

Часть шаровых скоплений нашей Галактики образовалась в ее спутниках, а потом была захвачена вместе со своими галактиками. Кроме того, некоторые скопления сами могли быть небольшими галактиками или центральными звездными скоплениями галактик, но с тех пор были не только захвачены нашей, но и существенно «ободраны». Разумеется, чем массивнее галактика и чем больше

спутников она поглотила, тем больше у нее шаровых скоплений. В случае центральных галактик (как М87) счет может идти на многие тысячи массивных скоплений.

Шаровые скопления могут насчитывать до нескольких миллионов звезд.

Массивное, но недостаточно плотное скопление может быть быстро разрушено вскоре после образования, в первую очередь приливными силами гигантских молекулярных облаков. Чтобы выжить, скопление должно образоваться вне диска, а затем быстро уйти на высокие орбиты, и условия для этого вновь обеспечиваются при слиянии галактик. Кроме того, не выживают изначально легкие и разреженные скопления, что приводит к нижнему пределу на начальную массу этих объектов порядка нескольких десятков тысяч масс Солнца.

Шаровые скопления в основном образовались около 10–12 млрд лет назад ($z = 2-3$), когда был велик темп слияния галактик и формирования звезд.

Из-за высокой концентрации звезды в шаровых скоплениях активно взаимодействуют друг с другом. Это приводит к нескольким важным эффектам. Во-первых, эволюционирует скопление в целом: выделяется более плотное ядро, куда оседают массивные звезды и их остатки (когда-то была популярной идея о существовании массивных черных дыр в центрах скоплений, однако теперь ясно, что это не так: по крайней мере, если черные дыры и встречаются в шаровых скоплениях, то происходит это достаточно редко), а двойные системы с массивными звездами «разогревают» население скопления (т. е. не позволяют звездам приобрести совсем малую энергию), не давая сформировать единый массивный объект. Во-вторых, тесные сближения приводят к образованию двойных звезд или обмену компонентами систем, благодаря чему мы видим в шаровых скоплениях много рентгеновских источников, являющихся двойными системами с аккрецирующими компактными объектами.

Рассеянные (или так называемые открытые) скопления — это более молодые объекты, возникающие и в настоящее время. Одним из самых известных рассеянных скоплений являются Плеяды, хорошо видимые на нашем небе невооруженным глазом. Возраст Плеяд — 120–130 млн лет, а расстояние до них — около 400 световых лет.

Главное отличие открытых скоплений от ассоциаций состоит в том, что скопления изначально являются гравитационно связанными объектами, но за сотни миллионов или миллиарды лет постепенно разрушаются, поскольку возникают в диске галактики, где много внешних

воздействий. И скопления, и ассоциации возникают в результате формирования звезд в крупном молекулярном облаке. В скоплениях концентрация звезд обычно составляет несколько штук в кубическом парсеке, что при размере в несколько парсек приводит к полной численности до 100 000 звезд (хотя обычно в скоплениях лишь несколько тысяч объектов). В ассоциациях концентрация на порядок меньше, а размеры — больше. Соответственно, эти образования из десятков или сотен звезд изначально не связаны гравитационно, и после рассеяния газа сами быстро распадаются на масштабе времени порядка десятков миллионов лет. Типичный возраст рассеянных скоплений составляет порядка 100 млн лет, но есть и долгожители с возрастом несколько миллиардов.

Рассеянные скопления и ассоциации возникают в диске Галактики и в настоящее время.

Открытые скопления в основном возникают в спиральных рукавах, и их используют для отслеживания структуры спирального узора нашей Галактики. Все звезды рассеянного скопления или ассоциации имеют примерно один возраст и химический состав. А вот в шаровых скоплениях наблюдается много примеров звезд с разным составом, для объяснения чего придумано несколько моделей. Также существуют шаровые скопления, где звездное население различается и по возрасту (возможно, это как раз «ободренные» карликовые галактики).

Звездные ассоциации не связаны гравитационно и быстро распадаются.

Наблюдать рассеянные скопления, особенно на больших расстояниях, непросто. Известно несколько тысяч таких скоплений в радиусе до 6000 световых лет от Солнца. Их поверхностная плотность составляет около 100 на квадратный килопарсек, что дает оценку полного числа таких скоплений в Галактике — около 100 000. Количество звезд в ассоциациях еще меньше, поэтому наблюдать их еще сложнее, и сейчас в солнечной окрестности (примерно 6000–7000 световых лет) известно около сотни таких образований. По всей видимости, данные космического телескопа Gaia помогут существенно продвинуться в вопросе изучения скоплений и ассоциаций.

8.5

Сверхмассивная черная дыра — Sgr A*

В центре нашей Галактики находится сверхмассивная черная дыра, масса которой составляет около 4 млн солнечных. Соответствующий ей источник излучения обозначают Sgr A* (Стрелец A*). Это самый близкий к нам пример сверхмассивной черной дыры, поэтому данный объект активно исследуется в разных диапазонах спектра.

Sgr A* — сверхмассивная черная дыра в центре нашей Галактики.

Благодаря наблюдениям движения звезд вокруг черной дыры под действием ее притяжения удалось определить ее массу с высокой точностью. Однако в масштабах Галактики масса этой черной дыры мала, а поэтому она оказывает влияние на звездную динамику лишь в своих ближайших окрестностях.

Масса черной дыры в центре нашей Галактики — около 4 млн масс Солнца. Размер горизонта (радиус Шварцшильда) должен составлять чуть менее 0,1 а. е.

Радиоастрономические наблюдения позволяют оценить размер источника. В настоящее время удалось «подобраться» к черной дыре на расстояние всего лишь в несколько ее диаметров. Работа системы телескопов Event Horizon Telescope должна позволить пронаблюдать область непосредственно вблизи горизонта событий.

Sgr A* является относительно слабым источником.

Несмотря на большую массу, источник является относительно слабым. В спокойном состоянии полная светимость Sgr A* во всех диапазонах всего лишь раз в сто превосходит солнечную. Напомним, что при массе 4 млн масс Солнца предельная (эддингтоновская) светимость (см. раздел 7.2 «Кандидаты в черные дыры в тесных двойных системах») составляет примерно 100 млрд светимостей Солнца. Низкая светимость связана как с низким темпом аккреции (около одной стомиллионной массы Солнца в год), так

и с низкой эффективностью выделения энергии (энергия уносится под горизонт черной дыры).

Иногда Sgr A* демонстрирует вспышки, наблюдаемые в разных диапазонах. В рентгеновских лучах вспышки происходят примерно раз в день (частота их появления меняется со временем). В период сильных всплесков полная светимость может возрасти на пару порядков. Наблюдались единичные примеры вспышек, когда светимость достигала почти миллиона светимостей Солнца.

Однако в прошлом активность нашей сверхмассивной черной дыры могла быть значительно выше. Первым аргументом в пользу этого стало открытие Михаилом Ревнивцевым с соавторами в 2004 г. рентгеновского излучения от молекулярного облака Sgr B2, находящегося в 400 световых годах от Sgr A*. общепринятое объяснение этого излучения состоит в том, что примерно 400 лет назад (без учета того, что свет от центра Галактики до нас идет примерно 25 000–27 000 лет) сверхмассивная черная дыра была существенно более мощным источником рентгеновского излучения. Это излучение добралось до облака Sgr B2 и накалило его энергией, которую облако постепенно высвечивает.

Другим открытием, связанным с прошлой активностью Sgr A*, стало обнаружение в 2010 г. с помощью наблюдений космической гамма-обсерваторией Fermi («Ферми») гигантских пузырей в центре Галактики — так называемых пузырей Ферми (Fermi Bubbles). Размер пузырей, тянущихся в обе стороны от плоскости Галактики, сопоставим с расстоянием от Солнца до Sgr A*. Считается, что они могли быть сформированы мощным энерговыделением центральной черной дыры, произошедшим несколько миллионов лет назад.

Активность Sgr A* иногда существенно возрастает.

Пока не существует прямого подтверждения, что Sgr A* — это именно черная дыра. Однако аргументы против всех предложенных альтернатив достаточно сильны. Например, природу центрального источника нельзя объяснить скоплением отдельных слабосветящихся тел вроде старых нейтронных звезд или белых карликов. Анализ показал, что любая столь массивная и компактная система достаточно быстро сколлапсирует в черную дыру.

Важным аргументом в пользу интерпретации природы источника Sgr A* как черной дыры служит тот факт, что мы не видим излучения от контакта с гипотетической поверхностью. Все наблюдаемое излучение, судя по его спектральным свойствам, возникает в падающем потоке. Излучение от контакта с поверхностью должно было бы превосходить излучение потока для всех известных типов объектов, кроме черных дыр, но его не видно.

В ближайшем будущем с помощью наблюдений со сверхдлинной базой (VLBI) в радиодиапазоне на высоких частотах (субмиллиметровый диапазон) можно будет проверить важное предсказание — «тень черной дыры». Расчеты показали, что вращающаяся черная дыра с источником излучения вокруг нее будет иметь характерный вид. Чтобы это увидеть, необходимо достичь углового разрешения, позволяющего рассмотреть детали с размерами порядка радиуса горизонта. Параметры системы Event Horizon Telescope позволяют надеяться на регистрацию этого эффекта в ближайшее время. Более детальные данные по свойствам «тени» позволят проверять теории гравитации и альтернативы черным дырам.

8.6

Спутники Галактики. Местная группа

Сценарии образования галактик в стандартной космологической модели с холодным темным веществом и космологической постоянной (так называемая Λ CDM-модель, см. раздел 11.5 «Состав Вселенной. Темное вещество») предсказывают, что многие галактики типа нашей являются членами групп и окружены десятками карликовых спутников. В самом деле, со времен Хаббла, предложившего название Местная группа, известно, что наша Галактика, туманность Андромеды (M31), галактика в Треугольнике (M33), Магеллановы Облака и множество карликовых галактик образуют связанную систему.

Наша Галактика и туманность Андромеды, а также около сотни более мелких галактик образуют гравитационно связанную систему — Местную группу.

Сейчас мы знаем, что ее размеры составляют около 10 млн световых лет и она находится в области повышенной пространственной концентрации галактик, центром которой является скопление в созвездии Девы. Масса Местной группы составляет $(2 - 3) \times 10^{12}$ масс Солнца. Самые массивные компоненты — это M31 (примерно $1,5 \times 10^{12}$ масс Солнца) и наша Галактика ($\sim 10^{12}$ масс Солнца), при этом масса в основном обеспечивается темным веществом.

Число карликовых галактик Местной группы велико, сейчас их известно несколько десятков, и постоянно обнаруживают новые слабые объекты с малой поверхностной яркостью. Так, например, крупная галактика (половина излучения приходит из области радиусом более 1 килопарсек), уступающая по размерам только Магеллановым Облакам и карликовой галактике в Стрельце, из-за своей низкой поверхностной яркости была открыта на расстоянии всего 120 килопарсек от Солнца лишь в 2016 г. Кроме того, в Местной группе должно быть множество (многие десятки) относительно небольших гало темного вещества, которые так и не стали галактиками, поскольку там не начался процесс активного звездообразования.

Размер Местной группы — 10 млн световых лет.

Еще недавно считалось, что большое количество таких объектов (гало из темного вещества с небольшим количеством газа, которые по массе примерно соответствуют карликовым галактикам), предсказываемое расчетами, является огромной проблемой для Λ CDM-модели, поскольку число известных карликовых галактик было на порядок меньше. Однако количество известных галактик малой массы и размера выросло, а расчеты с учетом роли барионного вещества показали, что лишь небольшая часть темных гало на самом деле проявляет себя как галактики. Более того, асимметрия в распределении галактик, полученная в расчетах, подтверждается данными наблюдений. Это связано с тем, что барионы в больших масштабах распределены в волокнах. Сейчас весь этот комплекс данных единым образом неплохо воспроизводится в таких компьютерных моделях, как проекты Illustris и EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) (см. раздел 15.3 «Численный эксперимент и моделирование»).

Карликовые галактики постепенно поглощаются более крупными.

Наша Местная группа не является исключением. Более того, она в меру типична, и в ее окрестности есть подобные образования: например, группа в Центавре на расстоянии около 4 мегапарсек, включающая в себя галактики M83 и Cen A.

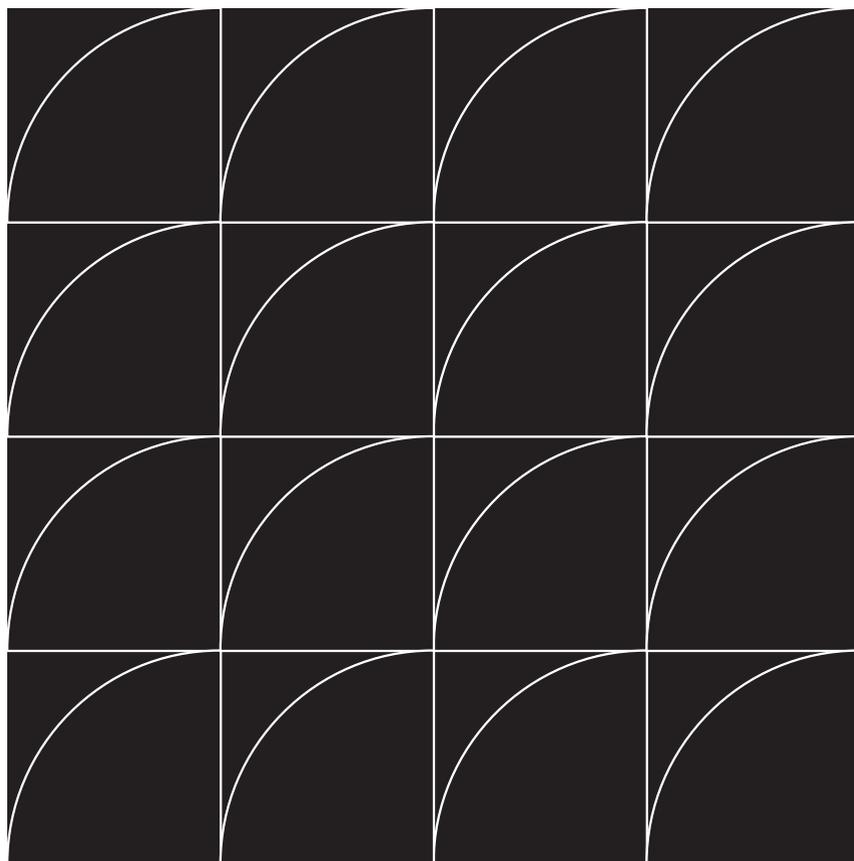
Итогом эволюции Местной группы будет слияние практически всех объектов, входящих в нее.

Эволюция Местной группы продолжается и сейчас. Карликовые спутники, постепенно рассеиваясь, поглощаются крупными галактиками.

Это приводит к тому, что в гало (например, нашей Галактики) от таких спутников остаются шлейфы (подобно тому как метеорные потоки остаются на орбитах комет, разрушаемых Солнцем). Первый крупный шлейф в гало был обнаружен в 1998 г., он связан с известной карликовой галактикой в Стрельце.

Возможность детального изучения гравитационного потенциала Галактики с помощью наблюдения шлейфов обсуждается давно. В настоящее время анализ этих остатков карликовых галактик позволяет восстановить форму гало и распределение вещества в нем в масштабе, превышающем 100 000 световых лет.

Поглощение мелких галактик крупными — не единственный эволюционный процесс в нашей группе галактик. На масштабе миллиардов лет будут тесно взаимодействовать и самые крупные члены Местной группы. Сейчас туманность Андромеды приближается к нам. В 2012 г. впервые удалось достаточно точно измерить ее трехмерный вектор скорости, и это позволило рассчитывать подробные сценарии эволюции Местной группы. Примерно через 4 млрд лет наша Галактика и МЗ1 пройдут очень близко друг от друга и начнется процесс слияния, который займет около 3 млрд лет, впоследствии к ним присоединится и МЗ3. Детали исхода слияния не ясны, но, очевидно, все три галактики сольются воедино, породив новую галактику, которая уже получила собственное имя — Милкомада (Milky way + Andromeda). Солнце к этому моменту уже превратится в белый карлик, который, вероятнее всего, будет находиться на окраинах Милкомеды. По истечении примерно 150 млрд лет в Местной группе сольются практически все объекты, остающиеся в ней, а небольшая часть карликовых галактик, наоборот, покинет ее в результате взаимодействий с крупными членами группы.



Глава 9

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

9.1	Межзвездный газ и пыль. Состав среды	203
9.2	Поглощение света	206
9.3	Круговорот вещества в межзвездной среде	208
9.4	Межзвездные магнитные поля	210

Основные компоненты межзвездной среды — газ, пыль, магнитные поля и космические лучи. Газ и пыль служат материалом для новых поколений звезд. В свою очередь звезды, закончив свой жизненный цикл, сбрасывают часть вещества обратно в межзвездную среду, обогащая ее наработанными в ходе реакций тяжелыми элементами.

Впервые надежные данные о существовании значительных масс вещества между звездами (там, где даже не было заметно ни светлых, ни темных туманностей) были получены в 1904 г. Иоганном Гартманом (Johannes Hartmann), который продемонстрировал поглощение света в линиях кальция, исследуя спектр звезды дельта Ориона.

Мы видим проявления межзвездной среды даже невооруженным глазом: клочковатая структура Млечного Пути объясняется темными облаками холодного газа и пыли, поглощающими свет звезд. Именно наблюдения межзвездного поглощения света позволили в начале XX в. доказать наличие значительных масс вещества в межзвездном пространстве.

9.1

Межзвездный газ и пыль.

Состав среды

Межзвездная среда в нашей Галактике на 70% (по массе) состоит из водорода и на 28% — из гелия (на остальные элементы приходится примерно 2%). Вещество может находиться в разных состояниях. В первом приближении можно выделить две главные составляющие: газ и пыль.

Основные составляющие межзвездной среды — газ, пыль, магнитные поля и космические лучи.

Газа в Галактике больше, чем пыли, его полная масса составляет около 10 млрд масс Солнца. Он может находиться в разных состояниях в зависимости от его плотности и температуры и в основном сосредоточен в галактическом диске (если не указано иное, далее рассматривается именно этот газ).

Основная масса молекулярного газа сосредоточена в плотных облаках, занимающих 1–2% объема.

Основной объем галактического газа — ионизованный водород, который имеет относительно высокую температуру. При этом его плотность невелика, так что по массе доля ионизованного газа составляет лишь четверть (остальное приходится на молекулярный и нейтральный газ). Значительная масса сосредоточена в плотных холодных облаках молекулярного газа, занимающих лишь несколько процентов от полного объема.

Фаза (состояние) межзвездной среды определяется комбинацией температуры и плотности межзвездного газа, в зависимости от этих параметров газ может быть молекулярным, нейтральным или ионизованным. Вне молекулярных облаков, где плотность превосходит 100 атомов водорода в кубическом сантиметре, выделяют четыре основных состояния (фазы) газа (исключая области непосредственно вблизи звезд, а также некоторые другие случаи, соответствующие в целом небольшому относительному объему). Первое состояние — это холодная нейтральная среда с температурой около 100 К и плотностью десятки атомов в кубическом сантиметре. Второе состояние — это

теплая нейтральная среда с температурой 6000–10 000 К, где на один атом приходится несколько кубических сантиметров. Третье состояние — теплая ионизованная среда, которая по своим параметрам похожа на теплую нейтральную. Ее особенно много вдали от плоскости диска, и основной объем ионизованного газа приходится именно на нее. Наконец, четвертое состояние — горячая ионизованная среда с температурой около 1 000 000 К, где на один атом приходится примерно 100 см³. Это, конечно, довольно упрощенная схема деления на фазы, реальная картина гораздо сложнее, в первую очередь из-за турбулентности, перемешивающей межзвездную среду.

Масса газа примерно в 100 раз превосходит массу пыли.

Количество газа меняется в зависимости от расстояния от центра Галактики и от галактической плоскости. Разные составляющие при этом ведут себя по-разному (хотя наблюдается общий тренд уменьшения плотности при удалении от центра и от плоскости). Так, молекулярного газа много внутри радиуса 500 парсек от центра Галактики — это так называемая *центральная молекулярная зона*. Затем его содержание падает вплоть до 3–4 килопарсек, а между 4 и 6 килопарсек молекулярного газа снова много — это так называемое *молекулярное кольцо*, после которого начинается стабильное экспоненциальное спадание концентрации. Эта составляющая межзвездной среды крайне важна, поскольку именно с ней связано звездообразование в Галактике.

В среднем концентрация межзвездной среды падает с удалением от центра Галактики и галактической плоскости.

Наблюдается большое количество газовых туманностей разного типа. Некоторые из них возникают в результате сброса вещества звездами (например, остатки сверхновых, планетарные туманности). Другие связаны с газом, уже находившимся в межзвездной среде. Излучение туманностей может возникать из-за действий нескольких механизмов. Например, вблизи горячих звезд возникают области ионизованного водорода — это эмиссионные туманности, хорошо видимые в оптическом диапазоне. Вблизи холодных звезд, чье излучение не может ионизовать значительное количество газа, возникают отражательные туманности. Некоторые туманности могут наблюдаться в радиодиапазоне из-за излучения атомов и молекул в линиях. Область очень горячего газа (например, нагретого ударными волнами) будет испускать рентгеновское излучение. А в ИК-диапазоне межзвездная среда может становиться видимой благодаря тепловому излучению пыли.

Пыль в межзвездной среде в первую очередь проявляет себя через покраснение света звезд (подобно тому, как краснеет Солнце или Луна на восходе или закате). Это было наглядно продемонстрировано Робертом Трюмплером (Robert Trumpler) в 1930 г. Пыль поглощает и рассеивает фотоны с длиной волны меньше размера пылинок, поэтому синяя область спектра рассеивается в первую очередь, а красная — пропускается практически беспрепятственно. Соответственно, данные наблюдений показывают, что размеры пылинок меньше микрометра и мелких пылинок гораздо больше, чем крупных.

Средняя температура пыли в Галактике составляет около 20 К, поэтому она должна являться источником инфракрасных волн. Когда появились приборы для наблюдений в ИК-диапазоне, возникла возможность непосредственно наблюдать излучение пыли, а не только ее поглощающий эффект. Несмотря на то что пыль составляет лишь около 1% от массы межзвездной среды, она играет большую роль как с точки зрения физических и химических (!) процессов, так и с точки зрения наблюдений.

Пыль постоянно поставляется в межзвездную среду, в первую очередь благодаря звездам-гигантам.

Пыль постоянно поставляется в межзвездную среду, в первую очередь благодаря ее производству в истекающих оболочках звезд-гигантов и планетарных туманностях, а также в оболочках сверхновых. Пылинки крайне важны с точки зрения химии межзвездной среды, поскольку многие реакции, в которых создаются сложные молекулы, возможны только на поверхности пылинок.

Пылинки могут ориентироваться в магнитном поле, что приводит к поляризации излучения. Это, в частности, помогает исследовать структуру магнитного поля Галактики. Магнитные поля могут играть большую роль в динамике межзвездной среды: среда частично ионизована, и газу проще двигаться вдоль, а не поперек поля, а кроме того, магнитное поле в некоторых случаях может быть достаточно велико, чтобы вносить существенный вклад в давление (например, в молекулярных облаках).

Особенно сильно магнитные поля влияют на частицы космических лучей — последней составляющей межзвездной среды. Эти частицы имеют большие энергии, многократно превосходящие их массы покоя, в основном они являются атомными ядрами (в первую очередь протонами). В Галактике ускорение частиц до больших энергий происходит в основном в остатках сверхновых. Кроме того, полагают, что частицы самых высоких энергий (недостижимых пока на земных ускорителях) ускоряются в пока неизвестных внегалактических источниках. Плотность энергии космических лучей по порядку

величины сравнима с плотностью тепловой энергии в межзвездной среде, поэтому космические лучи играют в ней заметную роль, нагревая и ионизируя вещество.

9.2

Поглощение света

С точки зрения астронома-наблюдателя, главная роль межзвездной среды связана с поглощением или рассеянием излучения далеких источников. В различных диапазонах электромагнитного спектра работают разные механизмы, связанные с теми или иными компонентами межзвездной среды.

Присутствие пыли приводит к поглощению и покраснению света звезд.

Начнем с оптического диапазона. В 1904 г. Иоганн Гартман обнаружил поглощение света звезды в линиях межзвездного кальция, а в 1930 г. Роберт Трюмплер продемонстрировал, что покраснение света звезд объясняется поглощением межзвездными пылинками излучения в синей части спектра. Действительно, для видимого света (а также для ближнего ИК- и УФ-диапазонов) главным является поглощение света пылинками, поглощенное излучение нагревает пыль, а затем переизлучается на более длинных волнах.

Пыль эффективно поглощает свет с длиной волны меньше размера пылинок, поэтому появляется существенная зависимость интенсивности поглощения от длины волны. Для ультрафиолетового излучения также важно рассеяние излучения очень мелкой пылью.

Кроме непрерывного поглощения излучения пылью существует также поглощение на определенных длинах волн или в относительно узких диапазонах. Это может быть связано и с пылью (тогда полосы поглощения достаточно широкие: например, известны диапазоны поглощения, связанные с ледяными и силикатными пылинками), и с газом. В газе поглощение происходит как в линиях элементов, так и в линиях молекул. В последнем случае могут возникать спектральные полосы, в том числе довольно широкие. Например, присутствие в межзвездной среде полициклических ароматических углеводородов (эти вещества могут встречаться как в виде отдельных молекул, так и в составе пылинок) приводит к поглощению

излучения в ИК- и УФ-диапазонах спектра (хотя обычно такие молекулы наблюдаются не в поглощении, а в эмиссии).

В рентгеновском диапазоне ослабление излучения связано в основном с ионизацией атомов.

В жестком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах ситуация иная. Там поглощение в первую очередь связано с тем, что фотоны могут ионизовать нейтральные атомы, при этом вся энергия фотона передается электрону. Соответственно, основной вклад в поглощение вносит не пыль, а нейтральный водород (хотя в детальных современных моделях учитывается и вклад пыли, и вклад молекул).

Наконец, для жесткого рентгеновского излучения важной оказывается ионизованная межзвездная среда, поскольку основным процессом становится комптоновское рассеяние на свободных электронах: фотон теряет свою энергию, передавая ее электрону при взаимодействии, в итоге рентгеновский поток ослабляется.

В радиодиапазоне взаимодействие со свободными электронами приводит к «расплыванию» сигнала.

А вот в радиодиапазоне поглощение практически несущественно, зато возникает другой эффект — дисперсия сигнала. Из-за наличия свободных электронов в ионизованной среде электромагнитные волны разной длины распространяются с разной скоростью, и сигнал на более коротких волнах приходит чуть раньше. Если источник испустил короткий импульс в широкой спектральной полосе радиоволн, то детектор, работающий в том же диапазоне, зарегистрирует уже «расплывшийся» по времени импульс. В случае сильной дисперсии импульс может настолько изменить временной профиль, что не будет достаточно выделяться на фоне шума и потому не будет зафиксирован приборами. Кроме того, наличие магнитных полей в среде приводит к повороту плоскости поляризации электромагнитной волны, что также наблюдается.

Рассеяние на свободных электронах (томсоновское рассеяние) не играет большой роли в ослаблении излучения в межзвездной среде, поскольку ее плотность недостаточно велика.

Однако в молодой Вселенной (до эпохи рекомбинации) короткая длина пробега фотонов объяснялась именно этим процессом.

Взаимодействие излучения с межзвездной средой зависит от ее плотности (плотности разных компонент — пыли, нейтрального газа, свободных электронов — в зависимости от диапазона длин волн). Поэтому все эффекты усиливаются в направлении на центральную часть Галактики, а также в плоскости Млечного Пути. Это приводит

к тому, что многие обзоры внегалактических источников проводят не на всех участках неба: возникает «полоса избегания» вблизи плоскости галактического диска.

Все виды воздействия межзвездной среды на излучение заметнее в плоскости Галактики.

Различные компоненты межзвездной среды являются также и источниками излучения. С одной стороны, это приводит к появлению нежелательного фона в ряде исследований (например, при изучении реликтового излучения), а с другой — к существованию красивых туманностей разного типа.

9.3 Круговорот вещества в межзвездной среде

Звезды образуются из межзвездного газа, они возникают в недрах молекулярных облаков, состоящих в основном из молекулярного водорода (H_2) и атомарного гелия с примесью пыли. Таким образом, химический состав среды определяет начальный химический состав звезд, и от этого зависят многие характеристики дальнейших процессов в звезде, в первую очередь это прозрачность ее вещества. В процессе своей жизни звезды превращают легкие элементы в тяжелые. Время жизни звезд с массой больше чем примерно 0,8 солнечных меньше времени, прошедшего с момента образования Галактики. Достигнув последних стадий своей эволюции, звезды тем или иным способом (звездный ветер, сброс оболочек, взрыв) возвращают часть вещества в межзвездную среду, обогащая ее тяжелыми элементами. После перемешивания (за счет турбулентности и других процессов) это вещество может войти в состав нового поколения звезд. Так происходит круговорот вещества в Галактике.

В Галактике между звездами и межзвездной средой постоянно происходит круговорот вещества.

Почему же весь газ в Галактике не может быстро превратиться в звезды? Дело в том, что для звездообразования газ должен

быть плотным и холодным. Однако, как только появляются первые массивные звезды, они почти сразу становятся источниками мощного излучения и ветров, воздействующих на молекулярное облако, в котором они родились. Кроме того, время жизни самых массивных звезд достаточно мало — пара миллионов лет, после чего они взрываются как сверхновые, отдавая часть энергии в молекулярное облако, нагревая и разрушая его. Все эти процессы приводят к довольно низкой эффективности переработки газа в звезды: облако с массой под миллион солнечных может дать в итоге звездное скопление массой, исчисляемой лишь десятками тысяч солнечных масс. Так что круговорот вещества отчасти регулирует скорость и эффективность звездообразования, растягивая его во времени.

Масса газа в Галактике составляет около 10 млрд масс Солнца, а современный темп формирования звезд — несколько масс Солнца в год. Конечно, не весь газ находится в форме, пригодной для запуска процесса звездообразования, тем не менее с учетом возврата газа в межзвездную среду (возвращается порядка 10% массы за счет сверхновых и ветров массивных звезд) на финальных стадиях эволюции звезд формирование новых поколений может продолжаться в нашей Галактике еще в течение миллиардов лет. Однако часть вещества остается связанной в компактных остатках (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры), а также входит в состав очень долгоживущих маломассивных звезд, бурых карликов и планет. Кроме того, часть газа переходит в горячее состояние с низкой плотностью, и не весь этот газ в будущем сможет охладиться и войти в состав молекулярных облаков, чтобы стать сырьем для рождения звезд.

В межзвездную среду попадает газ, обогащенный тяжелыми элементами за счет термоядерных реакций в звездах.

Сверхновые и мощные звездные ветра играют большую роль в генерации турбулентности, важной для динамики межзвездной среды. В частности, турбулентность хорошо перемешивает газ, что приводит к выравниванию химического состава межзвездной среды в Галактике.

Звездные ветра и сверхновые оказывают динамическое воздействие на межзвездную среду.

В то же время в галактический диск может поступать газ с низким содержанием тяжелых элементов. Это связано с аккрецией газа, и с поглощением карликовых спутников. Такой процесс был особенно важен в течение первых миллиардов лет жизни Галактики.

Наблюдения достоверно показывают, что химический состав звезд Галактики, родившихся в разные периоды ее жизни, различен. Чем раньше в истории Галактики сформировалась популяция объектов, тем ниже в них содержание тяжелых элементов. Например, звезды гало содержат гораздо меньше элементов тяжелее гелия, чем звезды диска. Это однозначно свидетельствует о постоянном круговороте вещества с обогащением тяжелыми элементами за счет реакций в звездах, а также вспышек сверхновых и слияний нейтронных звезд.

Часть вещества в ходе круговорота остается связанной в компактных остатках, легких объектах и горячем газе низкой плотности.

Разные химические элементы создаются в разных реакциях и в разных процессах, а иногда и различными объектами. Кроме того, важно, как именно элементы поставляются в межзвездную среду. Например, железо попадает в межзвездный газ в основном в результате вспышек сверхновых типа Ia — термоядерных взрывов сверхкритических белых карликов, а этот процесс начинает идти лишь спустя продолжительное время после появления звезд, так как прародители белых карликов живут достаточно долго. А вот вспышки сверхновых с коллапсом ядра происходят намного быстрее после начала звездообразования, а они отвечают, в частности, за такие элементы, как O, Mg, Si, Ca, Ti. Причем кислород и магний, попадающие в межзвездную среду, производятся массивными звездами до взрыва, а кремний, кальций и титан — во время взрыва. Вдобавок звезды разных масс формируют элементы в разных пропорциях, поэтому анализ относительного содержания разных элементов позволяет получать более детальную информацию о свойствах звездных популяций, участвующих в круговороте вещества: можно определять распределение звезд по начальным массам, а также восстанавливать историю звездообразования.

9.4

Межзвездные магнитные поля

В самом конце 1940-х гг. Вильям Хилтнер (William Hiltner) и Джон Холл (John Hall) обнаружили, что свет звезд является поляризованным. Немного позднее этот факт был объяснен наличием

межзвездного магнитного поля. Детальное изучение магнитного поля Галактики началось лишь во второй половине XX в.

Активное изучение межзвездных магнитных полей началось только во второй половине XX в.

В настоящее время существует несколько методов изучения этой составляющей межзвездной среды. В основе первого метода лежит зеемановское расщепление линий: в магнитном поле меняются орбиты электронов в атоме, что приводит к характерному расщеплению спектральных линий. Вторым методом используется влияние магнитного поля на ориентацию пылинок в межзвездной среде: свет звезд, проходя через заполненные такой пылью области, поляризуется, и измерения поляризации позволяют судить о параметрах магнитного поля. Третий метод изучает собственное инфракрасное излучение пыли: соориентированность пылинок в магнитном поле приводит к его поляризации. Четвертый метод измеряет интенсивность синхротронного излучения, которое испускают движущиеся в магнитном поле электроны. И, наконец, пятый метод изучает вращение плоскости поляризации, возникающее при распространении линейно поляризованного излучения через область, в которой есть упорядоченное магнитное поле (так называемое фарадеевское вращение). Радиопульсары являются хорошими источниками линейно поляризованного излучения, и их наблюдения позволяют определить распределение магнитного поля в Галактике.

В настоящее время идут дискуссии о происхождении начального (затравочного) магнитного поля Галактики. Но нет сомнений в том, что на протяжении истории нашей Галактики это поле усиливалось с помощью динамо-механизма, в котором механическая энергия (движение газа) перекачивается в энергию магнитного поля. Аналогичное утверждение верно и для магнитных полей, наблюдаемых в других галактиках. Магнито-гидродинамические процессы в турбулизованной среде весьма сложны, поэтому существует много неясностей относительно деталей механизма усиления поля. В настоящее время множество научных групп в мире, в том числе и в России, работает над компьютерным моделированием эволюции магнитных полей галактик.

Крупномасштабное поле Галактики усиливалось динамо-механизмом.

Можно говорить о крупномасштабном магнитном поле в Галактике (речь идет о масштабах в тысячи световых лет) и о мелкомасштабном поле (например, внутри какого-нибудь уплотнения в молекулярном облаке). Крупномасштабное поле имеет структуру, отражающую глобальные свойства Галактики, а мелкомасштабное

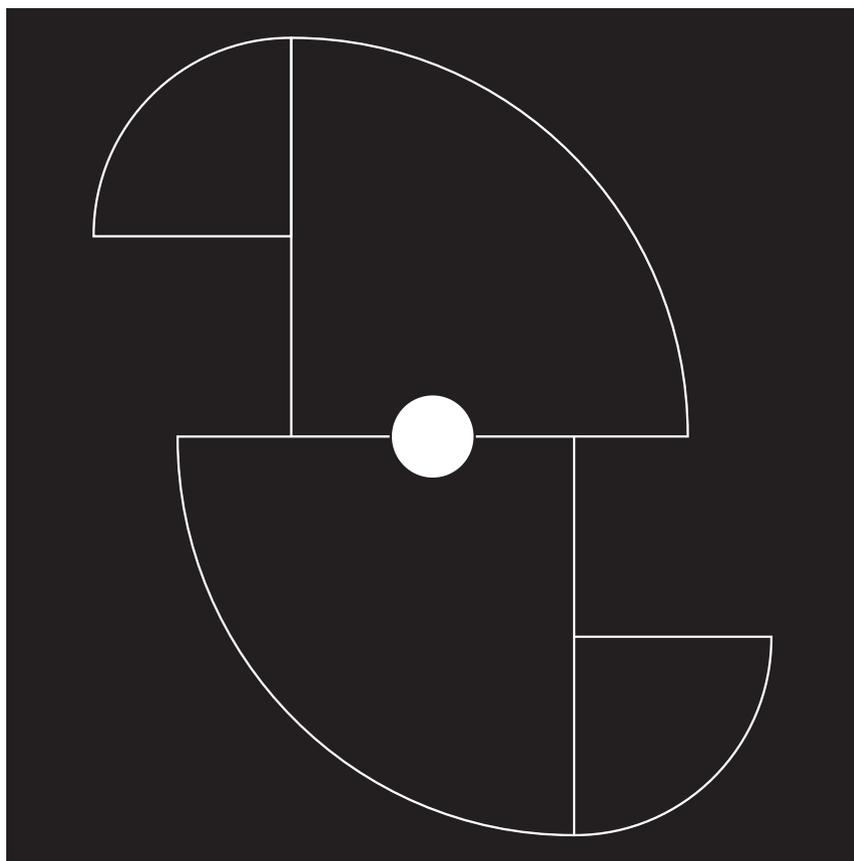
может иметь разную величину и топологию в разных местах. Крупномасштабное поле в диске имеет типичную величину порядка нескольких десятимиллиардных долей тесла (несколько микрогаусс). Несмотря на кажущуюся малую величину, поле существенно влияет на поведение ионизованного газа, поскольку давление магнитного поля по порядку величины сравнимо с давлением в межзвездной среде.

Как и в случае изучения спирального узора, определять направления крупномасштабного магнитного поля Галактики, находясь в ее плоскости, очень непросто. У нас нет полной четкой картины его структуры, однако очевидно, что она связана со структурой спиральных рукавов.

Магнитное поле достаточно велико, чтобы влиять на поведение межзвездного газа.

Магнитное поле присутствует и в гало Галактики, где оно несколько слабее, чем в диске, и имеет существенную составляющую в вертикальном (перпендикулярном диску) направлении. Поле в гало уменьшается при удалении от галактической плоскости с характерным масштабом 5–6 килопарсек.

Мелкомасштабное поле может быть усилено и запутано из-за сжатия области (с сохранением магнитного потока), межзвездной турбулентности, взрыва близкой сверхновой и других процессов. В частности, магнитное поле может достигать большой величины (сотни микрогаусс) в плотных молекулярных облаках (поле растет примерно как квадратный корень из плотности газа). В результате поле вносит существенный вклад в давление в облаке и тем самым влияет на процесс звездообразования в нем.



Глава 10

МИР ГАЛАКТИК

10.1	Типы галактик	217
10.2	Образование и взаимодействие галактик	222
10.3	Сверхмассивные черные дыры и активные ядра	226
10.4	Скопления галактик и крупномасштабная структура	231

Мир галактик в полной мере предстал перед нами менее 100 лет назад. Еще в 1920 г. прошел так называемый Великий диспут между Хебером Кертисом (Heber Curtis) и Харлоу Шепли о природе туманностей. Кертис отстаивал точку зрения, что это гигантские звездные системы, подобные нашей Галактике, а Шепли защищал взгляд, что это небольшие образования, расположенные внутри нашей Галактики. Найти истину удалось не в споре, а в результате астрономических наблюдений. Спустя несколько лет трудами ряда астрономов удалось разными способами определить расстояния до некоторых из спиральных туманностей. Результаты показали, что это гигантские звездные острова, находящиеся в миллионах световых лет от нас. Так началась эпоха внегалактической астрономии.

10.1

Типы галактик

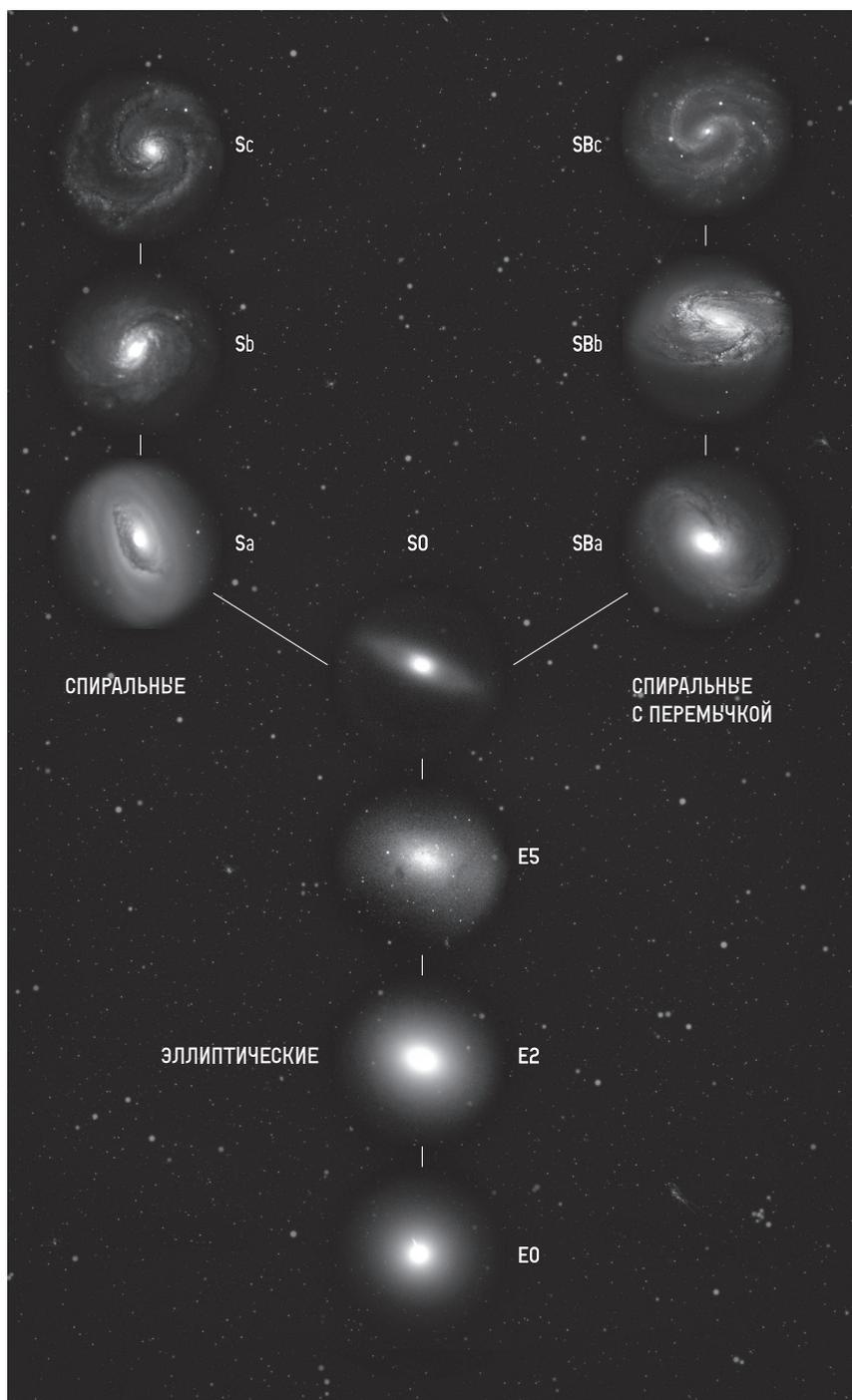
Фотографии галактик являются одними из самых узнаваемых астрономических изображений. Выделяют четыре основных типа галактик: эллиптические, линзовидные, спиральные и неправильные (иррегулярные). Структура каждой галактики отражает историю ее формирования и эволюции. Если говорить о нашем окружении (и не принимать во внимание карликовые галактики самой низкой светимости), то эллиптические галактики составляют лишь 13%, линзовидные — 20%, а спиральные и неправильные — оставшиеся 67%. Однако если взглянуть на население скоплений галактик, то картина будет иной: исключив неправильные галактики, получим, что около 50–60% составляют линзовидные, 30% — эллиптические, а на спиральные приходится лишь 15–20%, причем они, как и карликовые галактики всех типов (включая эллиптические), располагаются в основном на периферии скоплений.

Галактики принято делить на эллиптические, линзовидные, спиральные и неправильные.

Эта грубая классификация — лишь вершина айсберга, если говорить о сложной разветвленной системе ранжирования галактик по их морфологическим признакам, которую используют занимающиеся этой областью профессиональные астрономы. С ростом наблюдательных возможностей в галактиках обнаруживаются различные структуры и их сочетания, что делает классификацию довольно сложной и неоднозначной. Кроме того, для многих наблюдаемых структур не идентифицирован механизм возникновения, что также усложняет задачи систематизации.

Природа галактик была надежно установлена в 1920-е гг., когда были измерены расстояния до них.

Галактики — далекие объекты. Наша Галактика вместе с туманностью Андромеды, галактикой в Треугольнике (M33), Магеллановыми Облаками и еще несколькими десятками карликовых спутников образуют так называемую Местную группу, диаметр которой составляет около 10 млн световых лет. Типичные расстояния до хорошо известных галактик за пределами Местной группы превосходят эту величину,



Камертон Хаббла показывает основные типы галактик: эллиптические (E), линзовидные (S0), спиральные (S) и спиральные с перемычкой (баром) (SB).

поэтому для детального изучения их структуры необходимы достаточно крупные телескопы. Первые хорошие зарисовки «туманностей», как их тогда называли, появились в середине XIX в. благодаря работам Вильяма Парсонса (William Parsons), лорда Росса. В частности, известен рисунок галактики Водоворот (M51) с хорошо видимой спиральной структурой. С ростом наблюдательных возможностей становятся доступными более детальные исследования структурных особенностей в галактиках разных типов.

Довольно давно часть астрономов подозревала, что многие «туманности», особенно имеющие спиральную структуру и наблюдающиеся вне плоскости Млечного Пути, являются далекими звездными системами (т. е. галактиками), подобными нашей. Однако тогда однозначно определить природу этих «туманностей» (а тем более правильно отделить действительно газово-пылевые туманности в нашей Галактике от далеких звездных систем) было еще невозможно, и окончательная ясность в этом вопросе появилась только в 1920-е гг. В это время Эдвин Хаббл и другие ученые смогли идентифицировать достаточное количество переменных звезд — цефеид — в близких галактиках и определить расстояния до них. В настоящее время существует несколько методов определения расстояний до галактик (так называемая лестница расстояний), позволяющих, начав с цефеид в относительно близких галактиках, переходя от метода к методу, достаточно точно измерять расстояния и до далеких объектов, находящихся от нас в миллиардах световых лет.

Галактики могут сильно различаться по размерам и массе. Основной (по массе) составляющей галактики является темное вещество: все галактики погружены в большие, как правило, довольно округлой формы гало темного вещества. Размеры таких гало у крупных галактик могут составлять сотни тысяч световых лет, а массы в экстремальных случаях превосходят 10^{14} масс Солнца. Масса звезд в галактиках обычно в несколько раз меньше массы темного вещества (однако внутри видимых границ галактик эти величины сопоставимы), а масса газа и пыли — еще меньше. Галактика типа нашей имеет массу 10^{12} масс Солнца, из них лишь около 3% приходится на звезды, а газа в ней примерно раз в 10 меньше. Самые легкие галактики имеют массу менее миллиона масс Солнца.

Основную массу галактики составляет темное вещество.

Видимые размеры самых крупных галактик составляют сотни тысяч световых лет. Размеры самых компактных галактик (так называемых ультракомпактных карликов) составляют несколько тысяч световых лет. По всей видимости, эти галактики когда-то были больше

и массивнее, но сильное взаимодействие с более крупными соседями привело к обдиранию их внешних частей, и в результате мы видим то, что когда-то было компактной центральной частью галактики.

Эллиптические галактики в подавляющем большинстве не содержат холодного газа и пыли, которые могли бы превращаться в звезды. Поэтому они населены старыми маломассивными звездами и имеют желтовато-красноватый цвет, свойственный этим объектам. Такие галактики могут быть как легкими, так и тяжелыми. Самые массивные галактики — это гигантские эллиптические системы, находящиеся в центрах крупных скоплений галактик. Как правило, они формировались в результате многократных слияний и поглощений, а также аккреции большого количества газа, а в центрах таких галактик находятся очень массивные черные дыры. Звезды в эллиптических галактиках вращаются по вытянутым орбитам, ориентированным под разными углами друг к другу, а как целое эллиптические галактики вращаются медленно.

Эллиптические галактики населены в основном старыми маломассивными звездами.

Многие галактики в процессе своего формирования приобретают диск. Появление такой структуры означает, что когда-то в галактику так или иначе попало большое количество газа со значительным моментом импульса (иногда используют термин «угловой момент»), который затем частично превращается в звезды. В результате возникает сильно уплощенная вращающаяся структура из звезд, газа и пыли.

Линзовидные галактики, как и спиральные, имеют диск, но в нем уже недостаточно газа для активного звездообразования. Такие диски не имеют заметных спиралей, в которых велик темп формирования звезд. Линзовидные галактики достаточно многочисленны, особенно в скоплениях. В классическом варианте классификации, предложенном Хабблом (так называемый камертон Хаббла), они занимают промежуточное положение между эллиптическими и спиральными.

Наиболее известны спиральные галактики. В их дисках достаточно газа для образования новых поколений звезд, именно в спиральных рукавах идет наиболее активное звездообразование — там возникает большое количество ярких голубых массивных звезд с коротким временем жизни, которые и очерчивают спиральный узор, придавая ему бело-голубоватый цвет. Существует несколько механизмов образования спиралей: связанные с воздействием близкой галактики или бара внутри самой галактики, процессами звездообразования и др. В 1964 г. Цзя-цзяо Линь (Chia-Chiao Lin) и Фрэнк Шу (Frank Shu) заложили основы теории волн плотности, которая затем была использована для объяснения появления спирального узора. В этой

модели спирали связаны с уплотнением звезд, которое в масштабах галактики имеет характер волны, движущейся по диску с постоянной угловой скоростью. Это уплотнение звезд приводит, в свою очередь, к уплотнению газа за счет формирования области с более глубоким гравитационным потенциалом.

Важно понимать, что звездная плотность между спиральными рукавами лишь ненамного меньше, чем в рукавах. Разница состоит в звездном населении: массивные яркие звезды имеют небольшую продолжительность жизни, и поскольку они в основном рождаются в рукавах, то между ветвями их мало. Спиральный узор вращается, но его скорость на разных расстояниях от центра галактики отличается от скорости вращения звезд (кроме узкой зоны коротации, вблизи которой, возможно, находится и Солнце). Как правило, скорость спирального узора меньше скорости вращения звезд, так что долгоживущие звезды диска, совершающие за время своей жизни много оборотов вокруг центра галактики, периодически догоняют спиральные рукава и проходят сквозь них.

Кроме дисков со спиральной структурой, где формируются новые поколения звезд, у большинства спиральных (и линзовидных) галактик также есть балджи. Это центральные образования примерно сферической формы размером до нескольких тысяч световых лет, состоящие в основном из старых маломассивных звезд. Звездообразование в балджах линзовидных галактик практически не идет из-за отсутствия необходимого для этого газа, хотя небольшое его количество нередко все же наблюдается вблизи центров таких галактик. В спиральных галактиках газ и молодые звезды могут присутствовать на любом расстоянии от центра, в том числе и внутри балджа, но за редким исключением только вблизи плоскости звездного диска.

Среди спиральных и линзовидных галактик отдельно выделяют подклассы объектов, содержащих звездную или звездно-газовую перемычку — так называемый *бар*. Одним из наиболее известных примеров таких галактик является NGC 1300. Считается, что и наша Галактика имеет в центре бар.

Галактики часто имеют иррегулярную структуру из-за взаимодействия с другими (обычно более массивными) галактиками.

Спиральные галактики могут обладать богатой морфологией и имеют разнообразные параметры. Так, например, известны галактики с кольцами — красивыми образованиями, происхождение которых в ряде случаев остается неясным. Иногда в отдельный подкласс выделяют так называемые анемичные спиральные галактики, в которых мало газа. Отсутствие активного образования массивных

звезд приводит к появлению спиральных галактик, отличающихся более красным цветом.

Некоторые маломассивные галактики не имеют четко выраженной структуры, при этом они классифицируются как неправильные (иррегулярные). Часто иррегулярная структура связана не только с малой массой, но и с взаимодействием с другими галактиками (в нашей стране большой вклад в изучение взаимодействующих галактик внес Борис Воронцов-Вельяминов, составивший первый большой атлас и каталог таких объектов) или с активным звездообразованием. Например, подробный анализ кинематики звезд Большого Магелланового Облака (нашего спутника) показал, что его структура была существенно видоизменена при взаимодействии с нашей Галактикой. До этой метаморфозы, придавшей Облаку иррегулярный вид, оно, возможно, было небольшой спиральной галактикой с баром. Примером неправильной галактики с высоким темпом звездообразования может служить М82 в созвездии Большой Медведицы (детальные исследования показали наличие у нее спиралей и бара).

10.2

Образование и взаимодействие галактик

Первые галактики начинают формироваться примерно спустя пару сотен миллионов лет после Большого взрыва из уже сложившихся к тому времени «строительных блоков», содержащих темное вещество, газ, первые звезды и их остатки. Процесс образования галактик первые 2–3 млрд лет идет очень бурно, а затем постепенно сходит на нет.

Процесс бурного формирования галактик занимает несколько миллиардов лет.

Вероятный сценарий формирования галактик, базирующийся на численных моделях поведения материи в расширяющейся Вселенной, в общих чертах выглядит следующим образом. В ранней Вселенной возникают флуктуации в распределении плотности вещества, с некоторого момента эти флуктуации начинают расти, контраст плотности между ними и окружающей средой увеличивается. Вначале этот рост

обеспечивает только темное вещество, поскольку обычное (барионное) вещество еще связано с излучением, препятствующим росту плотности. Затем, после эпохи рекомбинации, к росту флуктуаций подключаются и барионы. Изначально флуктуации плотности возникают на всех масштабах, но мелкие при этом растут быстрее. В какой-то момент они становятся примерно вдвое плотнее, чем окружающие области такого же размера, и расширение Вселенной перестает влиять на них, а рост плотности в них продолжается. Более крупные флуктуации достигнут этой стадии позже, когда расширение Вселенной уже существенно понизит среднюю плотность вещества. Поэтому более мелкие объекты (например, гало темного вещества с массой около миллиона масс Солнца, в которых зарождаются первые звезды) возникают первыми и имеют большую среднюю плотность, а самые крупные (в настоящее время ими являются самые большие скопления галактик) формируются позже (к красному смещению около $z \approx 2$, что соответствует 3–4 млрд лет после начала расширения) и продолжают расти в нашу эпоху. О формировании достаточно крупных галактик можно говорить примерно с эпохи, соответствующей $z \approx 10$ (около полумиллиарда лет после Большого взрыва), когда возникают гало с массами в десятки миллионов масс Солнца, способные удержать своей гравитацией газ после первой вспышки звездообразования.

Для формирования первых звезд и галактик существенно, что обычное вещество (газ) может остывать, теряя энергию, и сваливаться в центральные части обособившихся гало темного вещества. На красных смещениях $1 < z < 3$ крупные галактики аккрецируют из окружающей среды большое количество (до 100 масс Солнца в год) холодного газа, который затем активно перерабатывается в звезды. Появление большого количества массивных звезд, в свою очередь, может за счет взрывов сверхновых и мощных ветров оказать влияние на звездообразование вплоть до полной его остановки и выметания газа из основной части галактики. Все это происходит на фоне объединения относительно небольших гало в более крупные объекты под действием взаимного гравитационного притяжения. Таким образом, звездные населения галактик находятся глубоко внутри обширных (и массивных) гало темной материи.

Галактики формируются в процессе иерархического скучивания и аккреции газа.

История формирования определяет тип галактики. Начиная с 1990-х гг. благодаря космическому телескопу Hubble и самым крупным наземным инструментам, сравнивая галактики, находящиеся на разных расстояниях от нас, мы имеем возможность изучать изменение морфологии галактик на протяжении их эволюции начиная с первого миллиарда лет их существования. Молодые галактики

в среднем существенно отличаются от тех, что мы наблюдаем сейчас в нашей окрестности, линейный размер их звездной составляющей в среднем меньше, в них меньше тяжелых элементов, а содержание газа и количество массивных звезд выше. Это связано в первую очередь с тем, что в прошлом чаще происходили взаимодействия между галактиками, был выше темп формирования звезд, чей максимум приходится на $z = 2$ (три с лишним миллиарда лет после начала расширения).

Большую роль в формировании и эволюции галактик играют слияния.

Крупные галактики завершают пертурбационный период примерно к $z = 1$ (т. е. за несколько миллиардов лет), позднее лишь редкие слияния со столь же крупными объектами могут сильно повлиять на их структуру. Более мелкие галактики обычно медленнее расходуют свои запасы газа, а кроме того, они продолжают участвовать в слияниях и потому претерпевают заметные изменения вплоть до наших дней. В настоящее время существуют численные методы (проекты Illustris, EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) и др.), позволяющие проследить эволюцию галактик от неоднородностей плотности на $z > 100$ (миллионы лет после Большого взрыва) до наших дней, причем уровень детализации моделирования соответствует современным возможностям наблюдений. В результатах численных расчетов можно найти галактику, похожую на интересующую вас современную (например, нашу), и проследить, как она формировалась на протяжении 13 с лишним миллиардов лет. Однако многие аспекты эволюции галактик все еще остаются неясными.

Галактики на больших красных смещениях z трудно наблюдать, поскольку они выглядят очень слабыми: поверхностная яркость (без учета эволюции) падает как $(z + 1)^{-4}$. Однако галактики в молодой Вселенной не выглядят маленькими. Это связано с понятием углового (или так называемого угломерного) расстояния, которое формально определяется по простой тригонометрической формуле: по известному линейному размеру и видимому угловому мы можем определить расстояние до объекта. Дело в том, что на момент испускания света, который мы сейчас видим, галактика находилась гораздо ближе к нам. Соответственно, она может иметь значительный угловой размер (порядка одной угловой минуты, если галактика крупная). В нашей Вселенной минимум углового размера (если считать галактики имеющими в среднем одинаковый линейный размер в разные эпохи) соответствует $z \approx (1 - 2)$, а для более далеких галактик он растёт. Это потенциально позволяет рассмотреть крупнейшие морфологические детали у галактик на $z \approx 6$ (чуть менее миллиарда лет после начала

расширения) и даже дальше. Развитие техники наблюдений должно позволить увидеть эпоху начала формирования галактик, которая соответствует красному смещению z около 10.

Компьютерное моделирование позволяет в деталях проследить эволюцию галактик.

Галактики растут в процессе иерархического сгущивания, когда более мелкие блоки (включая объемы газа) и галактики объединяются в более крупные. Процесс взаимодействия галактик приводит к перестройке их структуры и интенсификации процесса звездообразования. В частности, поглощение мелких спутников даже на красных смещениях $z < 0,5$ иногда позволяет крупным (по массе) галактикам заметно увеличить свои видимые размеры к настоящему времени. Самые мощные вспышки звездообразования, охватывающие всю галактику (так называемые ультрамощные инфракрасные галактики) связаны именно со слияниями. А взаимное приливное влияние на ранних стадиях формирования (когда основная масса газа еще не перешла в звезды) может приводить к появлению у галактик значительного момента импульса, что потом позволяет им стать дисковыми.

Активность и рост сверхмассивной черной дыры в центре галактики зависит от ее эволюции, а также, в свою очередь, может влиять на звездообразование в галактике.

Кроме того, в результате взаимодействия может усиливаться активность центральной сверхмассивной черной дыры, поскольку на нее начинает активнее течь газ. Это, как и слияния со сверхмассивными черными дырами поглощенных галактик, приводит к росту массы центральных объектов. Активность сверхмассивных черных дыр, особенно в самых крупных галактиках, может существенно влиять на звездообразование в них. Сейчас наблюдаются примеры, когда очень высокая активность центральной черной дыры приводила к мощным потокам вещества от центра, которые выметали существенную долю газа из галактик и останавливали активное звездообразование в них. Такой механизм может объяснять появление массивных эллиптических галактик на больших красных смещениях.

10.3

Сверхмассивные черные дыры и активные ядра

Галактики являются яркими объектами, потому что состоят из огромного числа звезд. Но иногда в самом центре (ядре) галактики находится источник, который по своему энерговыделению превосходит десятки миллиардов (или даже десятки тысяч миллиардов) звезд типа Солнца. Тогда мы говорим об активном ядре галактики, «сердцем» которого является сверхмассивная черная дыра.

Энерговыделение активного ядра в экстремальных случаях может превосходить суммарную светимость всех звезд этой галактики.

Первые галактики с активными ядрами были идентифицированы Карлом Сейфертом (Carl Seyfert) по наблюдениям спектральных линий в 1943 г. Однако активное изучение подобных объектов началось уже в 1950-е гг. — с развитием радиоастрономии. Ключевым моментом стало определение Мартином Шмидтом в 1963 г. расстояний до квазаров, после чего проблема объяснения существования внегалактических очень компактных (менее миллиарда километров) и очень мощных источников излучения стала весьма актуальной.

В течение нескольких лет рассматривалось несколько вариантов объяснения активности галактических ядер: большое количество сверхновых, очень массивные звездоподобные объекты, плотное скопление звезд в ядре галактики и т. д. Наконец, в 1964 г. Яков Зельдович, Игорь Новиков и Эдвин Солпитер предположили, что мощное энерговыделение в квазарах и родственных им объектах можно объяснить аккрецией большого количества газа на сверхмассивную черную дыру массой от десятков миллионов до миллиарда масс Солнца.

Активное исследование ядер галактик началось в 1950-е гг. с развитием радиоастрономии.

В 1969 г. Дональд Линден-Белл предположил, что неактивные сверхмассивные черные дыры в центрах галактик могут быть часто встречающимися объектами, поскольку время активности квазара

намного меньше времени жизни галактики. Это открывало путь к поиску таких спокойных сверхмассивных черных дыр и определению их свойств.

В 1964 г. Зельдович, Новиков и Солпитер предложили модель аккреции на сверхмассивную черную дыру.

Существует сверхмассивная черная дыра и в центре нашей Галактики. Ее масса составляет около 4 млн масс Солнца, и она наблюдается как слабый источник в разных диапазонах спектра. Изредка происходят короткие вспышки, связанные с повышением активности, но даже тогда светимость не превосходит светимости ярких звезд. Однако исследования показали, что не всегда активность этой черной дыры была низкой.

Массу черной дыры в центре нашей Галактики удалось очень точно определить с помощью наблюдения вращения звезд вокруг нее (вообще, самые точные оценки масс черных дыр можно получить, изучая вращение объектов на небольшом расстоянии от них). В других галактиках мы можем наблюдать движение газа в окрестности черной дыры или вращение мазерных источников вокруг нее (см. раздел 7.3 «Сверхмассивные черные дыры»), что также дает очень точные оценки. Существует еще ряд методов, позволяющих с большей или меньшей точностью определять массы сверхмассивных черных дыр.

В центре нашей Галактики находится черная дыра с массой около 4 млн солнечных.

Сейчас мы знаем, что практически все галактики с заметным балджем (центральной сферической составляющей) имеют сверхмассивные черные дыры. Массы известных объектов этого типа простираются от нескольких сотен до пары десятков миллиардов масс Солнца. Существует заметная корреляция массы черной дыры с массой балджа (но не полной массой галактики!). Как правило, черные дыры как минимум в сотни и тысячи раз легче своих галактик.

В конце 1960-х гг. было обнаружено рентгеновское излучение активных ядер. Оказалось, что некоторые квазары излучают в рентгеновском диапазоне столько же энергии, сколько и в оптическом (как показали наблюдения на спутниках Chandra («Чандра», назван в честь Субраманьяна Чандрасекара) и XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission, Рентгеновский многозеркальный телескоп), большая часть рентгеновского фонового излучения связана с далекими активными ядрами галактик). Это послужило дополнительным аргументом в пользу объяснения их активности с помощью сверхмассивных черных дыр. Позже было

обнаружено и гамма-излучение активных ядер, и сейчас эти источники активно изучаются во всех диапазонах электромагнитного спектра. В ряде моделей с ними связывают рождение космических лучей высоких энергий и высокоэнергичных нейтрино, происхождение которых пока окончательно не установлено.

Чем массивнее балдж галактики, тем массивнее черная дыра в ее центре.

Существует много типов активных ядер галактик, имеющих разные наблюдательные проявления: радиогалактики, квазары, блазары, лайнеры, сейфертовские галактики и др. Значительную долю источников удастся объяснить в рамках «единой модели», в которой разные проявления активности объясняются разной ориентацией системы активного ядра относительно наблюдателя. Аккрецирующая черная дыра окружена диском (кажется невероятным, но современные методы позволяют изучать структуру дисков вокруг далеких сверхмассивных черных дыр), а также газопылевым тором. Из внутренней части этой системы перпендикулярно плоскости диска может бить струя (джет), вещество в которой движется с околосветовой скоростью, причем протяженность некоторых струй достигает миллиона световых лет! Если мы смотрим вдоль струи, то видим очень активное и быстропеременное ядро — блазар. Если же мы смотрим с ребра, то сам центральный источник закрыт от нас тором, но мы можем видеть активность, связанную с внешними частями струи (разумеется, возможен и ряд промежуточных случаев).

Мы наблюдаем активные ядра галактик во всех диапазонах спектра.

Мы наблюдаем активность черной дыры, пока существует достаточно мощный приток газа. Однако иногда происходят спорадические вспышки, связанные с приливным разрушением отдельных звезд: если звезда пролетает слишком близко от черной дыры, то мощные приливные силы могут разорвать ее, превратив в плотное облако газа. Такое облако создаст на какое-то время аналог диска вокруг черной дыры — возникает яркий источник. Такие источники стали открывать в 1990-е гг., когда благодаря работе спутника ROSAT (ROentgen SATellite, Рентгеновский спутник) появилась возможность постоянного мониторинга большого числа объектов в рентгеновском диапазоне. Источники, связанные с приливным разрывом звезд, удастся надежно идентифицировать не только по их положению в центрах галактик, но и по характерной спадающей кривой блеска.

Активность центральной черной дыры может быть стимулирована слиянием галактик — в этом случае мощные потоки газа могут направиться в центральную область, питая активное ядро. Однако важно помнить, что если сливаются две крупные галактики, то в центре каждой из них должна быть сверхмассивная черная дыра, и со временем обе черные дыры окажутся в центре объединенной галактики, образовав тесную пару (такие объекты наблюдаются). Затем под действием гравитационного излучения и взаимодействия с объектами в центральной части галактики дыры будут постепенно сближаться, пока не сольются, породив мощный всплеск гравитационного излучения. Косвенно такие всплески, вероятнее всего, можно будет зарегистрировать по высокоточным наблюдениям коррелированных сбоев периодов миллисекундных пульсаров или по астрометрическим наблюдениям в рамках проекта Gaia, а в будущем непосредственная регистрация станет возможной благодаря созданию космической гравитационно-волновой антенны eLISA.

В результате слияний галактик происходят слияния сверхмассивных черных дыр.

После слияния получившаяся черная дыра может получить значительную скорость — до сотен километров в секунду. Это может позволить ей вылететь из центра небольшой галактики или же существенно сместиться из самого центра крупной (последнее, возможно, наблюдается в нескольких галактиках). Вылет должен приводить к существованию заметного количества тяжелых черных дыр в гало галактик и в межгалактическом пространстве. Такие объекты могли выбрасываться на ранних стадиях формирования галактик, когда масса их гало была не слишком большой и сами черные дыры еще не успели набрать очень большую массу.

Сверхмассивные черные дыры успевают возникнуть в течение первого миллиарда лет жизни Вселенной.

Существует несколько вариантов появления сверхмассивных черных дыр, и, по всей видимости, все они могут реализовываться в природе. Самый консервативный механизм связан с самыми первыми звездами, которые могли быть весьма массивными и в конце своей короткой жизни порождали черные дыры с массами около 100–200 масс Солнца. В процессе иерархического сгущивания эти черные дыры (чьи массы могли немного увеличиться за счет аккреции) попадали в центры формирующихся структур, где за счет слияний и дальнейшей аккреции постепенно увеличивали свою массу. За многие миллиарды лет они могли вырасти до массы в миллиарды масс Солнца.

Однако наблюдения показывают, что уже на красных смещениях $z \approx 5 - 10$, спустя всего лишь сотни миллионов лет после образования первых звезд, существуют массивные черные дыры с массами в десятки миллионов солнечных. От момента формирования «зародышевых» черных дыр прошло менее миллиарда лет, и, начав с массы 100–200 солнечных, невозможно так быстро вырасти до десятков или сотен миллионов. Поэтому первые звезды здесь уже не помогут, необходимы сценарии, в которых черные дыры рождаются с массами в несколько тысяч или даже десятков тысяч масс Солнца.

Поэтому были придуманы еще два сценария. В одном из них происходит прямой коллапс массивного облака газа в черную дыру — это теоретически позволяет формировать самые массивные зародыши сверхмассивных черных дыр с массами до сотен тысяч масс Солнца. В другом сценарии к формированию черной дыры приводит эволюция плотного скопления звезд в ядре молодой галактики — такие скопления реально наблюдаются во многих галактиках, в том числе и в нашей. Подходящие для формирования черных дыр скопления звезд могут возникать в гало с массой около 100 млн масс Солнца уже на $z = 15$. Затем часть звезд скопления довольно быстро может образовать в его центральной части очень массивную звезду с массой более 1000 солнечных, а такой объект очень быстро должен сколлапсировать в черную дыру. Иногда, как показывают расчеты, масса такой черной дыры может достигать нескольких тысяч масс Солнца. В обоих сценариях можно получить достаточно массивные объекты, которые потом, активно аккрецируя газ и сливаясь с другими черными дырами, могут за несколько сотен миллионов лет превратиться в настоящих монстров.

Массы черных дыр растут в результате аккреции газа и слияний.

Итак, слияния черных дыр и аккреция на них газа могут позволить за время эволюции нарастить массу до пары десятков миллиардов масс Солнца — больше, чем у небольшой галактики. Неудивительно, что самые массивные черные дыры находятся в центрах массивных галактик, расположенных обычно в центрах крупнейших скоплений.

10.4

Скопления галактик и крупномасштабная структура

На масштабе, превосходящем примерно 400–500 млн световых лет, вещество во Вселенной распределено достаточно равномерно. Однако на меньшем масштабе можно увидеть скопления и сверхскопления галактик. Совокупность скоплений, сверхскоплений и гигантских пустот между ними (так называемых войдов) формирует крупномасштабную структуру Вселенной, имеющую ячеисто-волоконистый вид.

На масштабе в сотни миллионов световых лет и больше Вселенная имеет ячеисто-волоконистую структуру.

Скопления галактик имеют массу порядка 10^{14} – 10^{15} масс Солнца (в основном это темное вещество). Именно исследования скоплений позволили Фрицу Цвикки в 1933 г. прийти к выводу о необходимости существования большой скрытой (невидимой) массы для объяснения скоростей галактик в этих образованиях. Барийонное вещество в скоплениях в основном содержится в виде горячего (десятки миллионов градусов) межгалактического газа, а на звезды приходится масса, в среднем в десять раз меньшая.

Размеры скоплений обычно составляют примерно 10–30 млн световых лет, в них входят от сотни до тысяч крупных галактик. Тенденцию туманностей «собираться в группы» (тогда еще не знали о том, что это галактики) заметили более 200 лет назад. Но достоверное знание о существовании скоплений из сотен галактик появилось менее 100 лет назад — в 1920–1930-е гг.

Скопления галактик имеют размеры около 10–30 млн световых лет и обычно включают сотни крупных галактик.

Крупные скопления галактик в настоящий момент являются наиболее массивными и протяженными гравитационно связанными структурами во Вселенной. Если темная энергия (см. раздел 11.6 «Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной») объясняется космологической постоянной, то скопления

галактик сохраняются и в далеком будущем, однако будут удаляться друг от друга. Другие варианты эволюции темной энергии могут привести к иным сценариям дальнейшей эволюции крупномасштабной структуры.

Массивные скопления галактик в основном сформировались на красных смещениях $z < 2$, т. е. примерно 10 млрд лет назад, однако процесс эволюции скоплений продолжается и в наши дни. На больших красных смещениях мы не видим собственно скоплений — там наблюдаются сгущения, называемые протоскоплениями галактик, и мы видим их такими, какими они были спустя пару миллиардов лет после Большого взрыва. В настоящий момент они, конечно, превратились в скопления, но наблюдать их современное состояние мы уже не сможем — они находятся за нашим горизонтом событий (см. раздел 11.2 «Горизонт частиц и горизонт событий. Возраст Вселенной»). В 2012 г. группа японских астрофизиков — Дзюн Тошикава (Jun Toshikawa) и его коллеги — заявила об обнаружении протоскопления на красном смещении $z \sim 6$, что соответствует примерно миллиарду лет после начала расширения.

Согласно современным моделям существование крупномасштабной структуры и ее элементов обязано своим происхождением первичным флуктуациям плотности, возникающим на стадии инфляции. В основном структура сформирована темным веществом, которое по массе превосходит обычное вещество примерно в пять раз. Неоднородности в распределении темного вещества начинают расти еще в ранней Вселенной, а по окончании эпохи рекомбинации начинается и рост флуктуаций обычного (барионного) вещества. Первыми успевают сколлапсировать небольшие неоднородности, поэтому в начале во Вселенной появляются звезды, потом галактики и лишь потом скопления. Еще более крупные образования — сверхскопления — к настоящему времени не успели сколлапсировать.

Эволюция скоплений и сверхскоплений сильно зависит от свойств темной энергии.

Сверхскопления галактик появились в обиходе астрофизиков в 1958 г., когда Джордж Эйбелл (George Ogden Abell) представил свой каталог скоплений галактик, выделив в нем «скопления второго уровня». Сверхскопления являются протяженными структурами размером до полумиллиарда световых лет, включающими в себя множество отдельных скоплений галактик. Например, скопление галактик в созвездии Девы, к которому относится и наша Галактика, входит в состав сверхскопления Ланиакеа, которое было идентифицировано в 2014 г. по кинематике галактик. К гигантской Ланиакее относится и Великий Аттрактор, открытый в 1988 Линден-Беллом, — крупнейшая аномалия в распределении вещества в наших космологических окрестностях.

Судьба сверхскоплений зависит от природы темной энергии: вероятнее всего, многие сверхскопления будут растягиваться в ходе дальнейшего расширения Вселенной и так и не станут связанными объектами.

Характерный размер элементов крупномасштабной структуры — 400–500 млн световых лет.

Сверхскопления связаны с филаментарной (волокнуистой) структурой Вселенной. Гигантские филаменты, в которых в основном сконцентрировано вещество, текущее в направлении скоплений и сверхскоплений, которые находятся на пересечении волокон, имеют размеры до миллиардов световых лет. Мы знаем о филаментарной структуре по наблюдениям галактик и горячего межгалактического газа, однако в 2012 г. Йорг Дитрих (Jörg P. Dietrich) с соавторами заявил о первой идентификации волокна крупномасштабной структуры, состоящего из темного вещества. Это удалось сделать благодаря использованию метода слабого гравитационного линзирования: было показано, что между скоплениями галактик Abell 222 и Abell 223 сосредоточена большая масса, но при этом там не наблюдается достаточного количества галактик или газа для ее объяснения. Размер этого волокна составляет более 10 млн световых лет, а его масса достигает примерно 10^{14} солнечных масс, что сопоставимо с массами скоплений галактик. Совсем недавно, в 2017 г., статистический анализ большого количества пар массивных галактик, отмечающих положение богатых групп, позволил получить надежные аргументы в пользу существования волокон темного вещества и между такими объектами.

Скопления галактик образуются в основном на $z \approx 2$ и продолжают расти в наши дни.

Филаменты очерчивают гигантские пустоты — войды. Они были идентифицированы в 1978 г. трудами нескольких групп астрофизиков — Гуидо Кинкарини (Guido Chincarini), Стефана Грегори (Stephen Gregory) и Лэрда Томпсона (Laird Thompson), а также эстонских астрофизиков под руководством Яана Эйнасто (Jan Einasto). Войды имеют характерные размеры до 500 млн световых лет, что связано с так называемыми барийно-акустическими осцилляциями в ранней Вселенной незадолго до эпохи рекомбинации. Эти осцилляции связаны с флуктуациями плотности, существовавшими уже на момент рекомбинации, затем они росли, растягивались из-за расширения пространства и стали основой для формирования структуры Вселенной, задав характерный масштаб неоднородности в распределении галактик.

На $z < 1$ эволюция филаментов практически останавливается, а скопления продолжают эволюционировать, хотя и их рост замедляется

из-за начала доминирования темной энергии. Формирование скоплений очень чувствительно к космологическим параметрам, поскольку они находятся на границе между уже сформировавшимися гравитационно-связанными структурами и теми, которые никогда не сколлапсируют из-за темной энергии.

Изучение формирования крупномасштабной структуры — существенная часть современных астрономических исследований, объединяющая несколько областей физики и астрофизики. Первой важной работой в этом направлении стала статья Евгения Лифшица, опубликованная в 1946 г. и посвященная росту возмущения плотности на протяжении космической истории. Изучение крупномасштабной структуры активно развивалось в нашей стране, в частности в научной школе Якова Зельдовича. С появлением компьютеров основные результаты по эволюции крупномасштабной структуры получают численно. Сравнение данных расчетов с наблюдениями позволяет получать и уточнять многие параметры, важные для разных областей астрофизики.

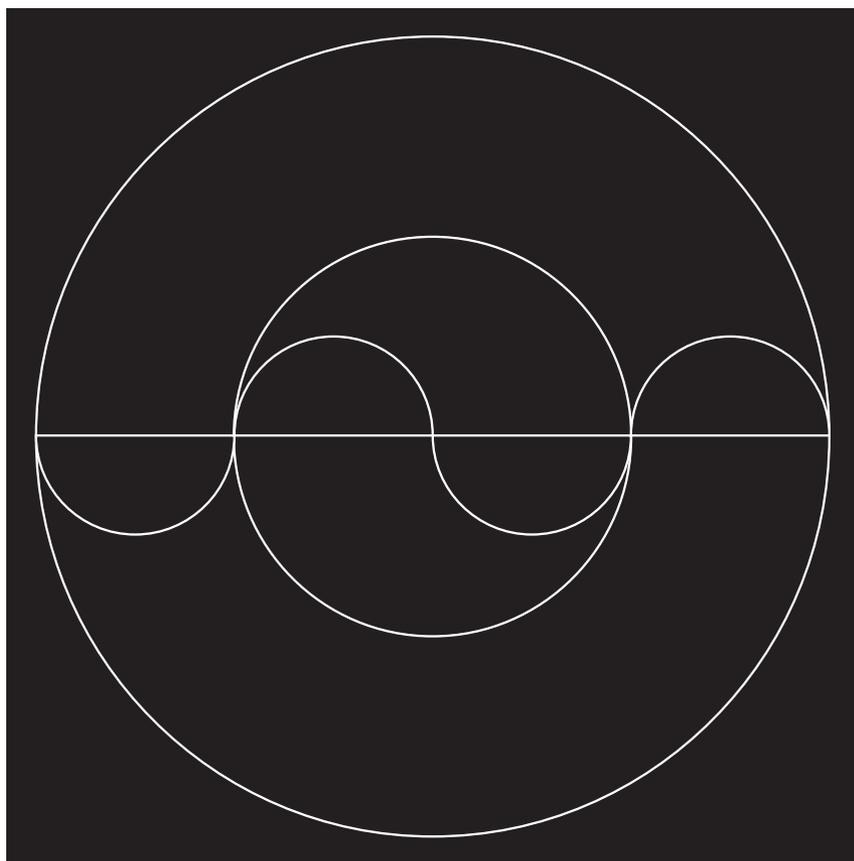
Скопления заполнены горячим газом с температурой в десятки миллионов градусов.

Также скопления галактик важны для исследований в области фундаментальной физики: изучение динамики скоплений помогает проводить тесты различных теорий гравитации. На данный момент наилучшего согласия удастся добиться в рамках общей теории относительности (с учетом темного вещества).

Рентгеновские наблюдения позволяют изучать свойства горячего газа в скоплениях галактик, что дает возможность определять параметры скоплений и исследовать их историю. Газ в формирующихся скоплениях остывает, течет в центр и образует гигантскую центральную галактику, однако затем сверхмассивная черная дыра, находящаяся в центральной массивной галактике скопления, своей активностью разогревает газ. Анализ структур в газе позволяет определить и историю активности черной дыры. Предполагается, что запуск спутника «Спектр-Рентген-Гамма» позволит обнаружить до 100 000 скоплений галактик по рентгеновскому излучению горячего газа в них (это все крупные скопления в видимой части Вселенной). Вместе с наблюдениями эффекта Сюняева — Зельдовича (рассеяния фотонов реликтового излучения на электронах горячего газа скоплений) в миллиметровом диапазоне рентгеновские данные позволят существенно продвинуться в уточнении базовых космологических параметров, в том числе касающихся свойств темной энергии.

Начиная с 1990-х гг. в арсенале астрофизиков появился очень мощный метод для изучения скоплений галактик, разработанный Энтони Тайсоном (Anthony Tyson). Наблюдая сквозь скопления

существенно более далекие галактики, мы видим их искаженными, причиной искажений является искривление пространства массой скопления. Фактически это гравитационное линзирование, только эффект очень невелик, поэтому данный метод называют *слабым линзированием*. Обработка и анализ искаженных изображений большого числа галактик позволяет измерить распределение масс в скоплении галактик, выступающем в роли линзы, вне зависимости от того, чем определяется масса: звездами, газом или темным веществом. Исследование некоторых скоплений галактик таким способом дает самые надежные аргументы в пользу существования темного вещества.



Глава 11

РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

11.1	Разбегание галактик. Закон Хаббла	239
11.2	Горизонт частиц и горизонт событий. Возраст Вселенной	242
11.3	Космологическое красное смещение	244
11.4	Геометрия Вселенной	246
11.5	Состав Вселенной. Темное вещество	249
11.6	Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной	253
11.7	Стадия инфляции	257
11.8	Ранняя Вселенная	260

Наряду с биологической эволюцией на Земле расширение Вселенной представляет собой один из самых грандиозных процессов, происходящих в природе. Наблюдения однозначно говорят нам, что в настоящее время расстояния между достаточно далекими галактиками увеличиваются, причем последние несколько миллиардов лет это происходит все быстрее и быстрее. Плотность вещества снижается, а температура заполняющего Вселенную излучения уменьшается, а это значит, что когда-то мир был заполнен горячим плотным веществом. Тогда не могло существовать не только звезд и галактик, не только атомов и молекул, но даже привычные нам частицы — электроны, протоны, нейтроны — не могли стабильно существовать из-за экстремально больших значений плотности и температуры.

Расширение началось почти 14 млрд лет назад. Спустя десятки миллионов лет появились первые звезды, затем галактики, вплоть до настоящего времени формируются скопления и сверхскопления галактик. На протяжении космической истории менялся химический состав Вселенной: водорода становилось все меньше, а количество тяжелых элементов увеличивалось.

Современная космология начала свою историю около 100 лет назад, когда появилась общая теория относительности и когда астрономы научились измерять расстояния до далеких галактик и их скорости. Многого мы пока не знаем: что было в самом начале, что будет со Вселенной в далеком будущем. Но новые важные открытия приближают нас к разгадкам этих тайн, поэтому космология столь интересна и привлекательна.

11.1

Разбегание галактик. Закон Хаббла

Теоретические работы, положившие начало современной космологии, появились немного раньше ключевых наблюдений в этой области. Первую космологическую модель в рамках общей теории относительности рассмотрел сам Эйнштейн в 1917 г. В этом же году появилась и статья Виллема де Ситтера (Willem de Sitter), в которой обсуждалась возможность роста скорости с расстоянием. Однако в своем построении Эйнштейн исходил из идеи о стационарности Вселенной, для достижения которой ему пришлось добавить так называемую космологическую постоянную. Первые реалистичные модели в рамках ОТО были рассчитаны Александром Фридманом в 1922 г., который получил решения для расширяющейся или сжимающейся Вселенной. Следующий важный шаг был сделан Жоржем Леметром (Georges Lemaitre) в 1927 г.; в своих последующих работах в начале 1930-х гг. он дал исчерпывающее объяснение данным наблюдений Хаббла, а также рассмотрел ряд моделей, в том числе и с космологической постоянной, с разными законами изменения масштабного фактора. К числу последних относится и современная модель, в которой первые несколько миллиардов лет расширение Вселенной замедляется, а затем — ускоряется. Однако теория оставалась лишь теорией, пока не появились новые данные наблюдений.

Первые реалистичные нестационарные космологические модели были построены Александром Фридманом в 1922 г.

Традиционно историю открытия расширения Вселенной начинают с работ Весто Слайфера (Vesto Slipher). В 1914 г. он обнаружил, что несколько галактик удаляются от нас (а не приближаются, как, например, туманность Андромеды). Однако пока это были лишь разрозненные данные, на основе которых не было сделано решающего вывода, хотя такие попытки предпринимались (например, Артуром Эддингтоном в 1923 г.). Ключевой стала работа Эдвина Хаббла, который в 1929 г. опубликовал статью с достаточно точно измеренными расстояниями¹ до более чем

¹ Систематическая ошибка в определении расстояний не помешала верно определить общий характер зависимости скорости удаления галактики от расстояния до нее.

двух десятков галактик и их скоростями, расположенными на одном графике. Так возникло знаменитое соотношение, которое мы теперь знаем как закон Хаббла — скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию: $v = Hd$, где v — скорость галактики, d — расстояние до нее, а H — коэффициент, называемый постоянной Хаббла.

Согласно закону Хаббла, скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее.

К этому моменту благодаря работам Фридмана и Леметра уже была в общих чертах готова теория, объясняющая такое положение дел. В ОТО существует понятие метрики, которая описывает свойства пространства-времени, т. е. соотношение между временными и пространственными координатами. В космологии наиболее известна метрика Фридмана — Робертсона — Уокера, содержащая так называемый масштабный фактор, который показывает, как меняется расстояние между удаленными друг от друга объектами со временем. Расстояние между далекими объектами (между которыми уже нет заметных сил) растет со временем, и постоянная Хаббла характеризует, с какой скоростью это происходит в данный момент.

В процессе космологического расширения галактики не движутся сквозь окружающее пространство.

По модулю постоянная Хаббла равна скорости изменения масштабного фактора, поделенной на сам фактор. Ее можно определить из наблюдений, и современные данные показывают, что она равна примерно 70 км/с на мегапарсек: галактика, находящаяся в 100 мегапарсек от нас, удаляется со скоростью около 7000 км/с, а галактика на расстоянии 200 мегапарсек — со скоростью 14000 км/с. Постоянная Хаббла меняется со временем, но в каждый данный момент она одинакова в разных частях Вселенной².

У космологического расширения нет центра, который мы могли бы указать.

Расширение Вселенной иногда удобно представлять себе как «раздувание пространства». Скорость удаления галактик из-за расширения Вселенной не является скоростью движения сквозь пространство. Кроме того, важно понимать, что мы не находимся в центре этого расширения (хотя и видим, что все далекие галактики удаляются от нас,

2 При условии однородности и изотропии Вселенной, что верно для больших масштабов, превышающих примерно миллиард световых лет.

и это происходит равномерно во всех направлениях, но астроном в любой другой галактике видел бы аналогичную картину). Более того, центра расширения в нашей Вселенной вообще нет! И совершенно неверно представлять себе, что Вселенная когда-то «была сжата в одну точку», местоположение которой мы можем указать.

Существует много независимых аргументов в пользу того, что мы имеем дело именно с расширением Вселенной (т. е. физическим изменением расстояния между галактиками). Мы можем разными способами измерять расстояния до объектов и сравнивать их. У нас есть данные о том, как меняется структура галактик и их скоплений. Астрономы могут изучать химический состав газа и звезд на разных расстояниях от нас. Наконец, есть несколько специальных тестов (корреляций или соотношений между наблюдаемыми величинами, например определенными параметрами галактик), позволяющих сделать вывод о том, что расширение Вселенной — единственное удовлетворительное объяснение данным наблюдений.

Расширение Вселенной приводит к появлению космологического красного смещения. Исторически скорости галактик были измерены (Слайфером, Хабблом и др.) именно по смещению линий в спектрах галактик в сторону более длинных волн. Скорости определялись в соответствии с формулой для эффекта Доплера, однако, как было показано позднее, природа красного смещения в данном случае иная.

Космологическая скорость удаления галактики может превышать скорость света (заметим, что в космологии возможно несколько разных определений скоростей, но чаще всего говорят о скорости изменения так называемого собственного расстояния по часам наблюдателя). Расстояние, на котором это происходит, легко определить исходя из закона Хаббла. Поверхность, на которой галактики сейчас имеют скорость удаления, равную световой, называют сферой Хаббла. Мы можем наблюдать галактики, чья скорость относительно нас в момент излучения (и/или сейчас) превосходит скорость света, поскольку скорость расширения менялась со временем. Испущенный галактикой свет мог в начале удаляться от нас, а затем начал приближаться, когда темп расширения снизился. В итоге свет достигает нас, хотя сама галактика всегда удалялась и сейчас находится далеко за сферой Хаббла. Это рассуждение подводит нас к понятию горизонтов во Вселенной.

11.2

Горизонт частиц и горизонт событий. Возраст Вселенной

Мы живем в расширяющейся Вселенной, а это значит, когда-то расстояния между всеми объектами были меньше. Продолжая эту экстраполяцию, можно прийти к тому, что какое-то время назад все наблюдаемые нами объекты были сжаты в очень маленьком объеме, т. е. расширение имело начало. Сейчас мы знаем этот момент с достаточной точностью: 13,7–13,8 млрд лет назад. Это результат многочисленных исследований, использовавших самые разные данные. С другой стороны, нет никаких наблюдаемых фактов, которые не вписывались бы в эту картину.

Вселенная имеет конечный возраст, примерно равный 13,7 млрд лет.

С помощью радиоактивных элементов мы достаточно хорошо знаем возраст Солнечной системы — он составляет чуть менее 5 млрд лет. Модели звездной эволюции позволяют оценить максимальный возраст известных звезд, в пределах допустимых погрешностей он не превосходит 13–14 млрд лет. Модели химической эволюции Вселенной также согласуются с этой оценкой. Наконец, исследование динамики Вселенной и формирования структур в ней также указывает на возраст чуть менее 14 млрд лет. Поэтому конечный возраст «мира, как мы его знаем» можно считать твердо установленным фактом.

Темнота ночного неба объясняется конечным возрастом Вселенной и конечностью скорости света.

Конечный возраст Вселенной позволяет решить несколько парадоксов. Одним из самых известных среди них является парадокс Ольберса, названный в честь немецкого врача и астронома Вильгельма Ольберса (Wilhelm Olbers), первооткрывателя астероидов Паллада и Веста. Парадокс Ольберса заключается в следующем: если Вселенная однородна и изотропна и везде заполнена звездами, то на линии любого нашего луча зрения всегда находилась бы какая-то (пусть и очень далекая) звезда — но тем не менее ночное небо темное! Обсуждать этот парадокс начали за сотни лет до рождения самого

Ольберса, но объяснение было найдено лишь в рамках современной космологической модели.

Возраст Вселенной конечен, как и скорость света, и за время жизни Вселенной свет не мог пройти бесконечное расстояние. Глядя на далекие галактики, мы смотрим в прошлое, однако 14 млрд лет назад никаких галактик еще не существовало. Поэтому для наблюдений нам доступна лишь конечная область пространства, и потенциально мы можем видеть лишь конечное число звезд (и галактик). Это и есть объяснение парадокса Ольберса (свой вклад также вносит и космологическое красное смещение, уменьшающее энергию принимаемых фотонов и, соответственно, поверхностную яркость далеких галактик). Мы не знаем, бесконечна Вселенная или нет, но мы знаем, что она больше области, доступной нам для наблюдений.

Горизонт частиц соответствует расстоянию до самого далекого из потенциально наблюдаемых сейчас объектов.

Из-за конечности скорости света и постоянного расширения Вселенной в космологии возникает несколько понятий расстояния, которые нужны для понимания размеров наблюдаемой области. Когда-то давно вся наблюдаемая нами сейчас область была сжата в крохотном объеме и все потенциально наблюдаемые объекты находились близко от «нас». Но Вселенная очень быстро расширялась, и если бы частица, находившаяся спустя три года после начала расширения на расстоянии 100 000 световых лет от нас, послала в нашу сторону со скоростью света сигнал (который бы не поглощался по мере распространения), то мы бы все еще не могли его видеть, поскольку источник сигнала находится за горизонтом — так называемым горизонтом частиц.

Горизонт событий соответствует расстоянию до самого далекого объекта, до которого может прийти посланный сейчас световой сигнал.

Если бы мы могли видеть источники, излучавшие спустя короткое время после Большого взрыва, то свет от них шел бы к нам 13,7 млрд лет, т. е. прошел бы путь 13,7 млрд световых лет. Но все это время Вселенная расширяется, поэтому сейчас такой источник находится на расстоянии около 46 млрд световых лет от нас. Это соответствует нашему горизонту частиц, и более далекие объекты мы видеть не можем. Однако первые десятки миллионов лет не было ни звезд, ни галактик, и самый далекий источник электромагнитных волн — это так называемая поверхность последнего рассеяния, с которой связано реликтовое излучение. Электроны, рассеивавшие

принимаемое нами реликтовое излучение, находятся теперь на расстоянии более 45 млрд световых лет от нас. Самые первые звезды, которые мы сможем увидеть (точнее, то, что от них осталось), сейчас находятся на расстоянии чуть менее 40 млрд световых лет. Самые далекие галактики, которые мы наблюдаем, сейчас удалены на 30 с лишним миллиардов световых лет.

В эти далекие галактики мы не можем уже послать никакого сообщения — они находятся за нашим горизонтом событий. Вселенная сейчас расширяется с ускорением, и галактики, находящиеся в настоящий момент в 16–17 млрд световых лет от нас, удаляются достаточно быстро (они находятся за сферой Хаббла), чтобы сигнал не смог до них дойти. Обратное тоже верно: мы не сможем увидеть события, происходящие сейчас в этих галактиках (отсюда и название — горизонт событий).

11.3

Космологическое красное смещение

Одним из ключевых понятий в современной космологии является красное смещение. Технически эта величина показывает, насколько сдвинуты спектральные детали (линии и т. п.) и сам спектр в целом. Существует несколько причин такого сдвига, но космологическая стоит особняком.

Спектры далеких галактик смещены в красную сторону из-за расширения Вселенной.

Известно, что гудок приближающегося поезда имеет более высокий тон, чем удаляющегося. Этот эффект называют эффектом Доплера: если источник волнового сигнала приближается к нам, то мы регистрируем более короткую длину волны, чем испускает источник, а если удаляется — более длинную. Он верен не только для звуковых, но и для электромагнитных волн, включая свет (и вообще для любого периодического процесса).

Кроме того, существует гравитационное красное смещение сигнала, который идет из области с более сильной гравитацией в область с более слабой. Его природа состоит в том, что часы идут

по-разному в разном гравитационном поле (в более сильном время течет медленнее). Соответственно, фотон, пришедший к нам из области сильного поля, кажется нам «покрасневшим».

Однако космологическое красное смещение нельзя простым способом свести ни к доплеровскому, ни к гравитационному сдвигу. Оно связано именно с расширением Вселенной. Величина космологического смещения зависит от изменения масштабного фактора во время распространения сигнала.

Красное смещение обозначают буквой z . Его легко рассчитать по измеренному сдвигу длин волн: $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, где λ — наблюдаемая нами длина волны, а λ_0 — длина волны источника в точке испускания. Если красное смещение равно 1, это означает, что длина волны удвоилась. Это соответствует расширению Вселенной вдвое за время движения фотона. При этом не имеет значения, какой была скорость источника в момент излучения или приема сигнала, — важно, что происходило во время распространения.

Космологическое красное смещение обозначают символом z . Величина $(z + 1)$ показывает, во сколько раз растянулась Вселенная с момента излучения сигнала.

Наблюдатели, проводившие первые измерения скоростей галактик, исходили из доплеровской природы красного смещения. Что интересно, такая интерпретация на относительно небольших расстояниях (менее пары миллиардов световых лет) не приводит к заметной ошибке, и скорость при этом можно оценить по доплеровской формуле: $v = cz$ (в первую очередь это объясняется тем, что близкие источники мы видим такими, какими они были относительно недавно, и за это время постоянная Хаббла не успела существенно измениться). Однако для больших расстояний это уже не так.

На наблюдаемое красное смещение могут накладываться доплеровское и гравитационное. Первый эффект особенно важен, когда мы говорим о близких галактиках. Галактики могут иметь заметную скорость (сотни километров в секунду) относительно своего окружения, такие скорости называют пекулярными. Они связаны в первую очередь с взаимным влиянием галактик (например, с движением галактики внутри скопления). Поэтому на расстояниях менее 20–30 млн световых лет могут наблюдаться очень сильные отклонения от закона Хаббла.

Процессы на больших красных смещениях выглядят для нас как бы растянутыми во времени.

Красное смещение соответствует изменению не только длины, но и частоты волны, так что можно говорить об изменении

относительного хода времени. Если бы мы наблюдали в галактике на $z = 1$ часы, то увидели бы, что они идут в два раза медленнее наших. И такие часы имеются: в качестве таковых могут выступать далекие сверхновые, для некоторых из них мы умеем восстанавливать их истинные кривые блеска. Если без учета эффекта красного смещения блеск близкой сверхновой спадает, скажем, с характерным масштабом две недели, то на $z = 0,5$ мы будем наблюдать спад, замедленный в $(1 + z)$ раз (т. е. в полтора раза больше — три недели). Это же верно для любого характерного временного процесса: на красном смещении z он кажется нам в $(1 + z)$ раз более медленным³.

Начиная с 1930-х гг. в течение нескольких десятилетий рассматривались альтернативные варианты интерпретации космологического красного смещения. Однако их пришлось отбросить после сравнения предсказаний этих моделей с данными наблюдений. Например, мы знаем, что величина красного смещения не зависит от длины волны (в 2016 г. точность таких наблюдений была доведена до одной миллионной), что противоречит ряду альтернативных сценариев.

Были придуманы специальные критерии (например, тест Толмена, связывающий поверхностную яркость галактик с их красным смещением), предназначенные для проверки предсказаний разных моделей. Оказалось, что поверхностная яркость галактик спадает в строгом соответствии с предсказаниями стандартной космологической модели (в 1930 г., когда был предложен тест, она еще не была таковой).

11.4

Геометрия Вселенной

Для наблюдений нам доступна лишь конечная область — часть большой Вселенной. Астрономические данные свидетельствуют в пользу того, что наблюдаемая часть пространства в больших масштабах однородна и изотропна. Это является основой наших представлений о геометрии Вселенной. При этом все выводы о параметрах большой Вселенной являются экстраполяцией.

³ Можно эквивалентно описать это и через увеличение расстояния между, скажем, фотонами, соответствующими началу и концу вспышки, по мере распространения сигнала в расширяющейся Вселенной. Это расстояние растёт так же, как длина волны, т. е. как $(1 + z)$.

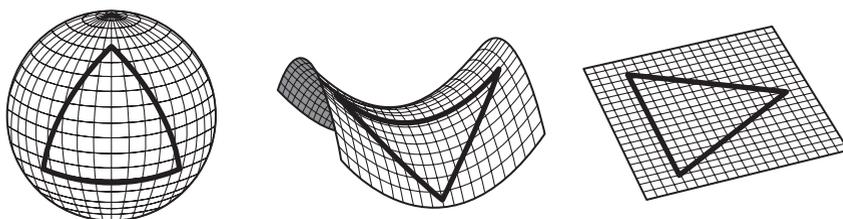
Вселенная может быть конечной или бесконечной (ее объем может быть конечным или бесконечным), при этом конечность Вселенной не подразумевает наличия какой-либо границы. Современное понимание этой ситуации восходит к работам Бернхарда Римана (Georg Friedrich Bernhard Riemann), который впервые описал конечное, но безграничное пространство положительной кривизны. В любом случае у нас нет однозначных данных в пользу какой-то из этих двух альтернатив.

Наша Вселенная выглядит однородной, изотропной и плоской.

Геометрия Вселенной характеризуется еще несколькими параметрами. Изучать топологию (форму) Вселенной довольно сложно, поскольку нам доступна для наблюдений лишь малая ее часть. А вот кривизна пространства Вселенной — гораздо более перспективный предмет исследований.

Мы не видим никаких свидетельств в пользу конечности Вселенной или ее нетривиальной топологии.

Пространство может иметь положительную кривизну, нулевую (плоское пространство) и отрицательную. В пространстве положительной кривизны через точку, не лежащую на данной прямой, нельзя провести ни одной прямой, не пересекающейся с данной (вспомните, как сходятся меридианы на сфере), а суммы углов треугольников (на космологических масштабах) будут больше 180° . В пространстве нулевой кривизны (евклидова геометрия) через точку вне прямой можно провести только одну прямую, не пересекающуюся с данной, и сумма углов треугольника равна 180° . В пространстве отрицательной кривизны (геометрия Лобачевского) мы можем провести



Три варианта геометрии вселенной: с положительной кривизной, с отрицательной и нулевой кривизной (плоская вселенная). Наша Вселенная с достаточной точностью является плоской.

через точку сколько угодно прямых, которые никогда не пересекутся с данной, а сумма углов большого треугольника будет меньше 180° . В космологии эти три случая можно связать с величиной средней плотности Вселенной, плоскому пространству соответствует определенная критическая плотность.

Наилучшие на сегодняшний день измерения геометрии Вселенной проведены с помощью наблюдения реликтового излучения (см. главу 12 «Реликтовое излучение»). Из этих наблюдений можно с высокой точностью определить отношение размера «звукового горизонта» (горизонта для распространяющихся колебаний в среде) на момент последнего рассеяния к расстоянию до источника реликтовых фотонов на момент их излучения, плюс нам известно значение красного смещения, соответствующее эпохе рекомбинации ($z = 1100$). Во вселенных разной кривизны линейный размер, соответствующий звуковому горизонту на $z = 1100$, имел бы на небесной сфере разные угловые масштабы. Данные показали, что в пределах ошибок (с точностью лучше процента) геометрия Вселенной — плоская. Конечно, наша Вселенная трехмерна, и, говоря о том, что она «плоская», мы имеем в виду применимость евклидовой геометрии для Вселенной в большом масштабе.

Наилучшие данные по кривизне и топологии Вселенной получены по наблюдениям реликтового фона.

Вселенная может обладать интересной и потенциально обнаружимой нетривиальной топологией. Причем это возможно для вселенной с любой кривизной: вспомните, что плоский лист бумаги можно свернуть в цилиндр, а можно сделать лист Мебиуса. Трехмерная вселенная может иметь сложную топологию, даже оставаясь плоской. Скажем, одна из возможностей состоит в том, что при небольшом размере вселенной за время ее существования свет мог обогнуть ее и мы видели бы копии («призраки» или «духи») далеких объектов или структур. Другая возможность связана с тем, что топология вселенной могла повлиять на анизотропию реликтового излучения. Поиск подобных особенностей проводился по каталогам квазаров, по картам реликтового излучения и другими методами. Однако ничего достоверного обнаружено не было.

Поэтому в настоящее время мы можем сказать, что наша Вселенная на космологических масштабах с высокой точностью:

- плоская;
- однородная;
- изотропная;
- имеет значительно большие размеры, чем потенциально доступная нам для наблюдений область.

11.5

Состав Вселенной. Темное вещество

Говоря о составе вещества, непосредственно окружающего нас, мы обычно подразумеваем атомы и молекулы. Элементы периодической системы Менделеева, соединяясь друг с другом, формируют все многообразие веществ и материалов в нашей жизни. На более базовом уровне атомы и молекулы сформированы из трех видов частиц: протонов и нейтронов (их называют барионами), а также электронов, которые примерно в 1000 раз легче протонов и нейтронов. Еще на один шаг глубже — протоны и нейтроны состоят из кварков двух типов. Этих кварков и электронов уже достаточно, чтобы объяснить состав планет, звезд, туманностей, галактик — всего того, что мы наблюдаем в телескопы, но недостаточно для того, чтобы объяснить, как все работает. У нас есть Стандартная модель физики элементарных частиц, состоящая из шести типов (ароматов) кварков, трех лептонов (электрона, мюона и тау-лептона), трех сортов нейтрино, соответствующих античастиц для всего перечисленного, переносчиков взаимодействий — бозонов (фотона, глюонов, Z- и W-бозонов) и бозона Хиггса. Но оказывается, что Вселенная в основном состоит не из этого!

Астрономические наблюдения показывают, что основной вклад в среднюю плотность Вселенной вносят темное вещество и темная энергия, а на барионы приходится лишь около 5% от полной плотности. В отличие от темной энергии, везде имеющей одинаковую плотность, темное вещество способно к сгущиванию (термины «темное вещество» и «темная материя» являются синонимами, в книге используются оба). Это означает, что темное вещество является каким-то видом частиц, однако это не могут быть частицы Стандартной модели. Частицы темного вещества слабо взаимодействуют с обычным веществом и друг с другом, а также практически не взаимодействуют (а в некоторых моделях и совсем не взаимодействуют) с электромагнитными волнами.

Барионное вещество составляет менее 5% массы Вселенной.

Темное вещество пока не обнаружено непосредственно (т. е. в лабораторных экспериментах). Имеются лишь астрономические свидетельства в пользу существования темного вещества, связанные

с его гравитационным воздействием. Это далеко не первый случай, когда астрономы обнаруживают объекты, которые проявляют себя лишь гравитационно: вспомним открытие Нептуна и обнаружение невидимого спутника Сириуса (оказавшегося впоследствии белым карликом). Но ранее это всегда были объекты, состоящие из обычного вещества, просто по тем или иным причинам их нельзя было увидеть непосредственно (как астрономические источники они были слишком слабы).

Темное вещество должно состоять из слабовзаимодействующих частиц, не входящих в Стандартную модель.

История того, что мы сейчас называем темным веществом, началась в 1933 г. благодаря работам Фрица Цвикки. Исследуя скопления галактик, он обратил внимание на большие скорости составляющих их объектов. Оценки масс скоплений, основанные на звездной массе галактик, не позволяли объяснить столь высокие скорости при условии стабильности скоплений. Тогда Цвикки предположил, что в скоплениях есть какое-то *темное вещество*, гравитация которого и удерживает галактики вместе.

Пока имеются лишь астрономические свидетельства в пользу существования темного вещества.

Затем, уже в 1970-е гг., появился ряд работ разных авторов (Вера Рубин (Vera Rubin) и др.) по исследованию скоростей вращения галактик (зادолго до этого, еще в 1930-е гг., анализ вращения туманности Андромеды указывал на наличие дополнительной массы, но астрономы полагали, что все можно объяснить слабыми звездами, газом и пылью, а затем эти исследования были продолжены в 1950-е гг.). Оказалось, что даже на окраинах галактик звезды имеют большие скорости, как будто их движением управляет большая масса, «размазанная» по галактике. В середине 1970-х гг. благодаря работам Яана Эйнасто с соавторами, а также Джереми Острикера (Jeremiah Ostriker) и его коллег стало ясно, что галактики в самом деле обладают массивными гало, превосходящими по размеру и массе их видимые («звездные») размеры.

Современная история темного вещества начинается с работы Цвикки в 1933 г.

В настоящее время кроме данных по вращению галактик и скоростям галактик в скоплениях существуют и другие подтверждения существования темного вещества: динамика пар и групп галактик,

наблюдение горячего газа в скоплениях и так называемое слабое гравитационное линзирование. Помимо этого данные по росту крупномасштабной структуры Вселенной и по реликтовому излучению также свидетельствуют в пользу наличия массы вещества, примерно в пять раз превышающей массу барионов.

В 1970-е гг. было обнаружено, что для объяснения параметров вращения галактик нужна дополнительная масса.

Одним из лучших наблюдательных примеров, подтверждающих присутствие темного вещества, является скопление Пуля (Bullet cluster). Это два столкнувшихся скопления галактик, которые прошли сквозь друг друга. Горячий газ, покинувший скопления в результате столкновения, оказался между ними и наблюдается в рентгеновском диапазоне. В то же время наблюдения гравитационного линзирования показывают, что скопления по-прежнему обладают большой распределенной массой, которую нельзя объяснить звездами или газом в галактиках.

Темное вещество не может быть барионным.

В конце 1960-х — начале 1970-х гг. исследования первичного нуклеосинтеза, проведенные Робертом Вагнером (Robert Wagoner), Хубером Ривзом (Hubert Reeves) и их коллегами, показали, что количество синтезированного гелия, дейтерия и лития очень сильно зависит от плотности барионов, которая не может превышать 10% от критического значения (соответствующего плоской Вселенной). Согласно этим расчетам, современное количество барионов не позволяет объяснить массивные гало галактик или «лишнюю» массу в скоплениях. Так начала формироваться концепция небарионной темной материи.

Рост флуктуаций плотности темного вещества привел к образованию галактик и их скоплений.

Первыми кандидатами в частицы темного вещества были нейтрино. До 1990-х гг. не удавалось достаточно точно оценить массы этих частиц, а мы знаем, что Вселенная заполнена реликтовыми нейтрино (в каждом кубическом сантиметре их более сотни). Однако в итоге выяснилось, что нейтрино вносят лишь очень небольшой вклад в темное вещество из-за своей низкой массы, а также из-за слабой способности к сгущиванию (т. е. к образованию областей более высокой плотности, таких как гало галактик). Теоретикам потребовалось предложить кандидатов с необходимыми свойствами.

Темное вещество сыграло большую роль в истории Вселенной. Дело в том, что до эпохи рекомбинации (см. раздел 11.8 «Ранняя Вселенная») возмущения плотности в обычном веществе не могли эффективно расти. Начав с неоднородностей на уровне 0,00001 (что наблюдается по реликтовому излучению), области повышенной плотности не успели бы превратиться в галактики и их скопления к нашему времени. Положение спасло темное вещество: неоднородности в распределении этой составляющей Вселенной могли начать расти под действием гравитации гораздо раньше. Именно по этой причине стало возможным появление первых звезд, которые произвели тяжелые элементы. Если бы в нашей Вселенной не было бы темного вещества, темная энергия успела бы растащить барионное вещество до того, как оно начало складываться в галактики.

Частицы темного вещества слишком слабо взаимодействуют друг с другом, и это не позволяет ему образовывать очень компактные структуры, такие как звезды и галактики. Темное вещество может быть распределено только в виде достаточно рыхлых структур, зато его много, поэтому оно «указывает» барионному веществу, куда двигаться. А затем барионное вещество может формировать плотные объекты внутри облаков темного вещества (во внутренних частях и дисках галактик уже барионное вещество «управляет» движением темной материи, поскольку в этих областях превосходит его по массе).

В ряде экспериментов ученые пытаются поймать частицы темного вещества в лабораториях.

В настоящее время существует несколько предложенных теоретиками хороших кандидатов на роль частиц темного вещества. Обычно их объединяют под аббревиатурой WIMP (Weakly Interacting Massive Particles — слабо взаимодействующие массивные частицы), самые известные из них — нейтралитино и гравитино. Многие из обсуждаемых кандидатов связаны с понятием суперсимметрии в физике частиц. Хорошими кандидатами являются также аксионы.

Существуют экзотические сценарии, в которых не используется концепция темного вещества (в первую очередь речь идет о так называемой модифицированной ньютоновской динамике — MOND). Однако на сегодняшний день они представляются крайне маловероятными, хотя исследования в этом направлении продолжают.

Активно идут поиски прямых астрономических сигналов от частиц темного вещества — в первую очередь это гамма-излучение, возникающее при возможной аннигиляции частиц темного вещества со своими античастицами. Для прямого детектирования частиц темного вещества ведется ряд экспериментов, в основном в подземных лабораториях (чтобы свести к минимуму влияние частиц космических

лучей). Есть также некоторые надежды, что частицы темного вещества могут быть обнаружены в экспериментах на крупных ускорителях.

Современная космологическая модель включает не только обычное вещество, излучение и холодную⁴ темную материю, но и еще одну составляющую — *темную энергию*. Это так называемая Λ CDM-модель, где греческой буквой лямбда (Λ) обозначают одну из возможных форм темной энергии — космологическую составляющую, а CDM расшифровывается как «холодная темная материя» (Cold Dark Matter). Эта модель была сформулирована в статье Джереми Острайкера и Пола Стейнхарда (Paul Steihardt) в 1995 г., но общепринятой стала после обнаружения ускоренного расширения Вселенной.

За исключением периода в первые десятки тысяч лет в динамике Вселенной доминируют холодное темное вещество и темная энергия — это так называемая Λ CDM-модель Вселенной.

11.6

Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной

Достаточно давно ученые поняли, что крайне важно измерить с помощью наблюдений, как менялся темп расширения Вселенной (т. е. как эволюционировал масштабный фактор). Для этого нужен надежный способ определения расстояний до далеких объектов, независимый от измерения красного смещения.

Измерение расстояний в космологии — непростая задача. Однако в конце 1970-х — 1980-х гг. появились важные результаты по изучению целого класса астрономических источников, который мог бы помочь решить эту проблему, — это сверхновые типа Ia. С точки зрения наблюдений они характеризуются отсутствием линий водорода и наличием сильных линий кремния в спектре.

⁴ Холодной ее называют потому, что еще на ранних стадиях расширения Вселенной частицы в этой модели стали двигаться относительно медленно — со скоростью, гораздо меньшей световой.

Сверхновые типа Ia — это термоядерные взрывы белых карликов, а поскольку в среднем белые карлики взрываются при сходных значениях массы, то такие сверхновые имеют похожие кривые блеска и максимальную светимость⁵. По этой причине такие вспышки называют *стандартными свечами*. В результате почти двух десятилетий исследований (начиная с работы Юрия Псковского в 1977 г.) астрономы научились по изменению блеска и по спектру определять максимальную светимость сверхновых Ia. Знание светимости в максимуме блеска позволяет из наблюдений получить независимую оценку расстояния до них (а значит, и до галактик, в которых они находятся).

Сверхновые типа Ia — это термоядерные взрывы белых карликов.

На протяжении 1990-х гг. несколько групп ученых работали над использованием сверхновых Ia в космологии в качестве стандартных свечей. В итоге в 1997–1999 гг. были получены результаты, позволившие открыть ускорение расширения Вселенной. Наблюдения показали, что сверхновые на красном смещении больше 0,5 находятся дальше (выглядят слабее), чем это следовало бы из стандартной на тот момент модели, в которой Вселенная все время замедляет свое расширение. Чтобы сверхновые оказались на более далеком расстоянии, необходимо, чтобы Вселенная последние несколько миллиардов лет расширялась все быстрее и быстрее. За эти работы Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter), Адам Рис (Adam Riess) и Брайан Шмидт (Brian Schmidt) в 2011 г. получили Нобелевскую премию по физике.

Ускоренное расширение Вселенной было открыто в 1997–1999 гг. по результатам наблюдений сверхновых типа Ia.

Темп расширения удобно характеризовать тем, как растет масштабный фактор. Напомним, что эта величина характеризует изменения так называемого собственного расстояния в космологии, т. е. физического расстояния между объектами в заданный момент времени. Собственное расстояние между галактиками в данный момент времени, t_1 , настолько больше расстояния между ними в какой-то прошлый момент t_2 , насколько вырос масштабный фактор: $d(t_1)/d(t_2) = a(t_1)/a(t_2)$, где d — расстояние, а величина a — масштабный фактор. Оказалось, что первые примерно 7 млрд лет своего существования Вселенная (это

⁵ Отметим, что сверхновые Ia не являются «близнецами», поскольку в результате слияния белых карликов масса объекта может превзойти критическую на разную величину. Это приводит к отличиям в мощности вспышки и поведении кривой блеска.

примерно соответствует $z = 0,75$) расширялась с замедлением (масштабный фактор рос все медленнее и медленнее), после чего перешла к ускоренному расширению. Сейчас этот результат подтвержден несколькими независимыми методами и поэтому является надежно установленным фактом.

Расширение Вселенной ускоряется последние 6–7 млрд лет.

Такой поворот событий не был полной неожиданностью. Еще в 1917 г. Эйнштейн в своей работе ввел в уравнения дополнительное слагаемое, эффективно работающее как «антигравитация». Такое явление возникает в общей теории относительности, если соответствующая среда имеет отрицательное давление («средой» в данном случае может быть и физический вакуум). Слагаемое, обозначенное греческой буквой лямбда (Λ), получило наименование «космологическая постоянная». Важной особенностью космологической постоянной является то, что плотность ее энергии (а значит, и ее отрицательное давление) не изменяется при расширении (или сжатии) Вселенной.

Жорж Леметр рассмотрел в 1927 г. ряд космологических моделей с учетом Λ , в том числе и такую, которая очень близка к современной (ускорение Вселенной сначала замедляется, а потом ускоряется). Кроме того, начиная примерно с середины 1980-х гг. появлялись различные аргументы в пользу существования космологической постоянной (или ее аналога). Тем не менее обнаружение ускоренного расширения Вселенной можно считать главным астрономическим открытием конца XX в.

Возможность ускоренного расширения Вселенной рассматривалась теоретиками уже давно.

Причина ускоренного расширения доподлинно не известна. Стандартным подходом к его объяснению является гипотеза так называемой *темной энергии*, расширяющая понятие *космологической постоянной*. В описывающее расширение Вселенной уравнение Фридмана добавляется слагаемое, соответствующее среде с положительной плотностью, но отрицательным давлением. Физически появление такой «среды» может быть связано со свойствами вакуума (космологическая постоянная) или же это может быть результатом присутствия какого-то физического поля (в последнем случае темная энергия может эволюционировать со временем).

В первую половину жизни Вселенной, исключая несколько десятков тысяч лет в самом начале, в ее плотности доминировало вещество (темное плюс барионное). Однако по мере расширения

плотность вещества падала, а плотность темной энергии оставалась неизменной (здесь мы рассматриваем простой случай космологической постоянной). Поэтому относительный вклад темной энергии в динамику расширения рос. В какой-то момент «антигравитация», связанная с темной энергией, стала доминировать. В этот момент Вселенная перешла к ускоренному расширению.

В настоящий момент Вселенная расширяется ускоренно, однако локально (если плотность вещества в данном месте велика) расширение может быть преодолено гравитацией. Поэтому сейчас продолжается формирование скоплений и сверхскоплений галактик (таких, например, как Ланиакеа). Будущее Вселенной зависит от свойств темной энергии.

Современное описание истории Вселенной принято начинать со стадии инфляции (см. ниже). После нее выделяют три основные эпохи. Первая — радиационно-доминированная, в это время наибольший вклад в динамику вносит излучение, а Вселенная расширяется с замедлением. Окончание этой эпохи наступает примерно через 50 000 лет после Большого взрыва, незадолго до эпохи рекомбинации. Во время второй эпохи основной вклад вносит вещество (темное плюс барионное). На этой стадии также происходит замедляющееся расширение. Наконец, примерно 6–7 млрд лет назад началась эпоха доминирования темной энергии, и расширение стало ускоренным.

Если темная энергия — это космологическая постоянная, то ее вклад будет расти по мере разлета вещества. Однако гравитационно связанные структуры (планетные системы, галактики, скопления галактик, сверхскопления) такими и останутся.

Если же темная энергия связана с каким-то неизвестным физическим полем и может иметь нетривиальную эволюцию, то возможно несколько радикально отличающихся вариантов. Например, поле, отвечающее за темную энергию, может со временем распасться, и тогда вклад темной энергии будет уменьшаться (это похоже на окончание стадии инфляции). В таком случае ускоренное расширение может смениться замедленным.

Будущее Вселенной зависит от эволюции темной энергии.

Другой вариант предусматривает возможность неограниченного роста роли темной энергии (так называемая модель «большого разрыва»), в этом случае постепенно будут разрушаться все связанные структуры. Впрочем, в настоящее время этот вариант считается самым маловероятным.

На данный момент нам неизвестны природа темной энергии и ее эволюция. Ее вклад заметен только на космологических масштабах,

поэтому локальные эксперименты пока невозможны. Астрономические наблюдения позволяют установить возможную эволюцию темной энергии в прошлом, а в ближайшие годы начнут работу несколько наблюдательных проектов, которые смогут сделать это еще точнее.

Во многих смыслах современная эпоха доминирования темной энергии похожа на гипотетическую стадию инфляции в ранней Вселенной.

11.7

Стадия инфляции

В наиболее популярной современной космологической модели стадии горячей плотной Вселенной предшествует период инфляции. В течение этой очень короткой ($< 10^{-30}$ секунды) эпохи происходит экспоненциальный рост масштабного фактора — Вселенная раздувается. Первую модель инфляции рассмотрел Алексей Старобинский в 1979 г., а в 1981 г. Алан Гус (Alan Guth) показал, что стадия инфляции позволяет решить ряд ключевых проблем в космологии. Наконец, в 1980-е гг. Андрей Линде представил несколько моделей, заложивших основы современной инфляционной космологии. В настоящее время существует множество вариантов инфляционных сценариев (в том числе и основанных на теории струн). Многие из таких сценариев естественным образом приводят к одной из форм мультиверса (мультивселенной, т. е. множеству параллельно существующих вселенных, в одной из которых мы живем).

Алан Гус показал, что наличие эпохи быстрого раздувания (инфляции) позволяет решить следующие проблемы:

- проблему горизонта;
- проблему однородности и изотропии Вселенной;
- проблему критической плотности;
- проблему отсутствия магнитных монополей;
- проблему первичных неоднородностей.

Проблема горизонта состоит в следующем. Если бы стадия инфляции отсутствовала, было бы трудно объяснить однородность температуры реликтового излучения по небу (отклонения менее 0,0001 от среднего значения), поскольку разные участки неба (размером более градуса) соответствуют областям, которые из-за быстрого расширения не могли успеть обменяться сигналами, позволяющими

выравнивать температуру. В сценарии без инфляции горизонт в ранней Вселенной всегда растет быстрее, чем растет масштабный фактор, и под горизонт постоянно попадают области пространства, с которыми ранее не было никакого контакта. В этом случае сейчас на небе должны были быть видны десятки тысяч таких областей с разной температурой, а этого на самом деле не наблюдается. Наличие эпохи быстрого раздувания решает эту проблему, поскольку вся наблюдаемая часть Вселенной когда-то была заключена в крохотном объеме, разные части которого успели приобрести согласованные параметры (в частности, температуру).

На стадии инфляции менее чем за 10^{-30} секунд размеры области возрастают более чем в 10^{20} раз.

Проблема критической плотности (она же проблема плоскостности Вселенной) состоит в том, что современная плотность Вселенной очень близка к критической (т. е. Вселенная с высокой степенью точности является плоской). Быстрое раздувание, на протяжении которого масштабный фактор возрастает более чем в 10^{20} раз (а в некоторых вариантах гораздо больше), естественным образом объясняет это, поскольку при столь сильном увеличении объема все неоднородности выравниваются. Это также объясняет **однородность и изотропию Вселенной**.

Отсутствие магнитных монополей (и других экзотических частиц, которые могли бы возникать в ранней Вселенной) снова объясняется катастрофическим ростом объема. Если на ранней стадии Вселенная претерпела период очень быстрого раздувания, то теперь эти частицы разнесены на огромные расстояния, и их пространственная плотность крайне мала.

Теория инфляция позволяет решить ряд проблем в космологии.

Наконец, квантовые флуктуации на стадии инфляции позволяют естественным образом сгенерировать **первичные возмущения плотности** с нужными параметрами. В деталях эта проблема была решена Геннадием Чибисовым и Вячеславом Мухановым в начале 1980-х гг. Инфляция позволяет получить практически плоский (масштабно-инвариантный) спектр возмущений плотности, называемый спектром Харрисона — Зельдовича (впервые он был рассмотрен Эдвардом Харрисоном (Edward Harrison) и Яковом Зельдовичем в начале 1970-х гг.). Уже в XXI в. благодаря измерениям спутника Planck («Планк») были обнаружены небольшие отклонения от плоского спектра, предсказанные ранее Чибисовым и Мухановым. Это считается большим успехом инфляционного сценария.

Экспоненциальное раздувание на стадии инфляции усиливает вакуумные флуктуации всех полей, включая гравитационное. Тензорные флуктуации (флуктуации метрики), возникшие на стадии инфляции, в итоге (когда оказываются под горизонтом) предстают перед нами как гравитационные волны, которые называют «реликтовыми». Предсказание достаточно сильных тензорных возмущений с почти плоским спектром — практически уникальное свойство инфляции, и оно может быть использовано для проверки этой модели. Наиболее перспективными представляются поиски так называемой В-моды поляризации реликтового излучения.

Раздувание происходит за счет эволюции скалярного поля, называемого инфлатоном, которое характеризуется отрицательным давлением. Согласно уравнениям общей теории относительности, Вселенная, заполненная таким полем, экспоненциально расширяется — говорят, что Вселенная находится в вакуумоподобном состоянии. Иногда его называют состоянием *ложного вакуума*, поскольку это не истинное вакуумное состояние с минимальной возможной энергией. Во Вселенной нет частиц, но плотность энергии крайне высока. При расширении плотность вакуума практически не изменяется, что и вызывает экспоненциальный рост масштабного фактора.

Окончание инфляции связано с осцилляциями инфлатона. Энергия поля тратится на рождение частиц, а момент окончания инфляции можно считать Большим взрывом. В этот момент Вселенная заполняется горячим плотным веществом, в некоторых моделях температура может достигать 10^{29} К. При этом на стадии инфляции и после нее не происходит генерации энергии, поскольку при раздувании Вселенная приобретает большую отрицательную энергию, связанную с гравитацией. Поэтому полная энергия (энергия вещества после Большого взрыва плюс отрицательная гравитационная энергия) может быть крайне мала или даже может быть равна нулю. Иногда этот сценарий называют *рождением Вселенной из ничего*.

Модель инфляции остается неподтвержденной. Ключевой проверкой является поиск первичных гравитационных волн.

Модель инфляции хорошо согласуется с наблюдательными данными, однако пока она остается гипотезой. Ожидается, что в ближайшее время наиболее прямой проверкой этой модели станет косвенная регистрация первичных гравитационных волн, порожденных на стадии инфляции.

11.8

Ранняя Вселенная

В современных моделях по окончании стадии инфляции расширяющаяся Вселенная заполняется горячим плотным веществом и излучением (в различных сценариях плотности и температуры могут быть разными). Поскольку стадия инфляции крайне короткая (не более 10^{-30} секунд), мы можем принять этот момент за ноль и назвать его Большим взрывом.

После этого Вселенная продолжает расширяться, и за короткое время в ней происходит множество важных и интересных процессов в быстро меняющихся физических условиях. Плотность и температура падают, и в какой-то очень ранний момент происходит важный процесс — бариогенезис (объединение кварков и глюонов в адроны, в том числе барионы), в течение которого возникла барионная асимметрия Вселенной (преобладание вещества над антивеществом). Как именно это происходит, пока не ясно, хотя есть общее понимание необходимых для этого условий. Впервые их в 1967 г. сформулировал Андрей Сахаров:

1. Несохранение барионного числа.
2. Нарушение C- и CP-инвариантности.
3. Отсутствие теплового равновесия.

Первое условие означает, что может меняться разность полного числа барионов и их античастиц. Второе соответствует асимметрии законов взаимодействия частиц при изменении знаков их электрических зарядов и при одновременном изменении знаков зарядов и еще одного параметра, называемого четностью (изменение четности соответствует зеркальному изменению системы).

В ранней Вселенной возникает асимметрия вещества и антивещества.

Возникающая асимметрия крайне невелика: на несколько миллиардов пар кварк — антикварк приходится один «лишний» кварк, при этом кварки и антикварки могут аннигилировать друг с другом, превращаясь в фотоны. В результате на каждый кварк приходится несколько миллиардов фотонов, и в плотности Вселенной доминирует излучение (и другие релятивистские на тот момент частицы). Поэтому эту стадию называют *радиационно-*

доминированной. На ней масштабный фактор растет как квадратный корень из времени.

Стремительное расширение приводит к тому, что температура и плотность очень быстро падают. На этой стадии трудно расставлять четкие временные метки, поскольку все превращения, связанные в первую очередь с уменьшением температуры, имеют некоторую длительность, сравнимую с текущим быстро меняющимся возрастом Вселенной.

При температуре около 3×10^{15} К в стандартных моделях ранней Вселенной бозон Хиггса приобретает массу. В результате Z- и W-бозоны становятся массивными, и электрослабое взаимодействие разделяется на электромагнитное и слабое ядерное. С момента расширения прошло примерно 10^{-11} секунды.

Первые несколько десятков тысяч лет в плотности Вселенной доминирует излучение.

Из-за высокой температуры и плотности кварки не могут объединяться в адроны. В частности, не могут стабильно существовать барионы (в том числе протоны и нейтроны), а Вселенная заполнена кварк-глюонной плазмой. С момента начала расширения прошло менее нескольких десятков микросекунд, и когда температура падает примерно до триллионов градусов, начинают формироваться адроны — возникают протоны и нейтроны. Однако существование более сложных структур — атомных ядер — пока невозможно.

С момента Большого взрыва прошло менее секунды, и при температуре около 10 млрд градусов нейтрино становятся свободными — Вселенная для них теперь практически прозрачна. В настоящее время эти реликтовые нейтрино заполняют Вселенную, в каждом кубическом сантиметре их более сотни. Их температура сейчас составляет около 2 К.

Спустя примерно 10 секунд, когда температура падает до нескольких миллиардов градусов, аннигилируют электроны и позитроны, оставляя избыток электронов. Но температура пока слишком велика, чтобы электроны и протоны могли образовывать нейтральный водород.

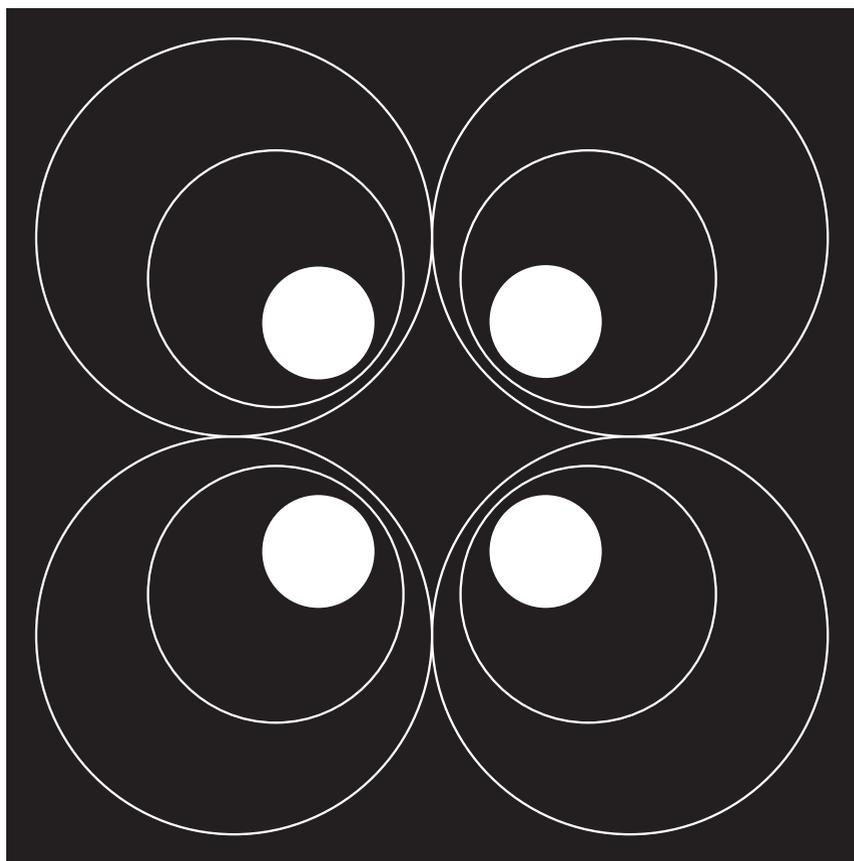
Число протонов не равно числу нейтронов, поскольку эти частицы имеют разные массы (нейтроны тяжелее, поэтому их меньше). Когда Вселенная остывает примерно до миллиарда градусов, начинают идти ядерные реакции: протоны и нейтроны объединяются, формируя ядра атомов. Первым спустя несколько секунд после начала расширения образуется дейтерий. Затем образуются гелий, литий и бериллий. Основной нуклеосинтез происходит примерно между 1-й и 5-й минутами с начала расширения.

Поскольку число протонов в несколько раз больше числа нейтронов, основным элементом является водород, на втором месте находится гелий. Дейтерий в основном «сгорает» в реакциях синтеза гелия, а образование более тяжелых элементов не успевает произойти, поскольку стабильных ядер из пяти или восьми частиц не существует (небольшое количество ${}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}$ формируется при соединении ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$). Спустя пару тысяч секунд температура и плотность падают настолько, что дальнейшие ядерные реакции становятся невозможными.

Первичный нуклеосинтез начинается примерно спустя минуту после Большого взрыва и длится несколько минут.

Динамика Вселенной по-прежнему определяется излучением, и эта эпоха длится примерно 50 000–60 000 лет. После этого начинает доминировать вещество, в основном темное, так как его в несколько раз больше по массе. Поскольку мы пока не знаем, из каких частиц оно состоит, сложно точно указать время его появления, но это должно происходить достаточно рано в истории Вселенной.

Масштабный фактор на стадии доминирования вещества начинает расти быстрее — пропорционально времени в степени $2/3$. Следующий важный эпизод — рекомбинация: вещество остывает настолько, что электроны могут удержаться вокруг протонов и ядер гелия, и в результате Вселенная становится прозрачной для собственного излучения, которое раньше взаимодействовало со свободными электронами. Этот момент (примерно 380 000 лет после Большого взрыва) соответствует красному смещению около 1100 (т. е. с тех пор масштабный фактор вырос примерно в 1100 раз). На этом рассказ о ранней Вселенной можно закончить — с этого момента могут расти неоднородности в распределении обычного вещества. Через десятки (или малые сотни) миллионов лет из них возникнут первые звезды, а затем спустя сотни миллионов лет — галактики.



Глава 12

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

12.1	Модель горячего Большого взрыва	267
12.2	Космологические данные по наблюдению реликта	269
12.3	Измерение температуры реликта в разные эпохи	272
12.4	Спектр первичных возмущений	273

Важнейшим подтверждением модели горячего Большого взрыва стало открытие реликтового излучения. Оставшееся от эпохи горячей Вселенной, оно заполняет всю Вселенную, имеет чернотельный спектр и температуру чуть менее 3 К.

Несмотря на предсказания теоретиков, реликтовое излучение было обнаружено в 1965 г. случайно. Сейчас это один из главных инструментов исследования в космологии, поэтому существует большое количество наземных инструментов, предназначенных специально для наблюдений реликтового излучения. Кроме того, в космос было запущено несколько специализированных научных спутников, с помощью которых удалось построить карты распределения температуры реликтового излучения по всему небу.

12.1

Модель горячего Большого взрыва

Еще до Второй мировой войны идея расширяющейся Вселенной стала практически стандартной космологической моделью. Она хорошо укладывалась в рамки общей теории относительности и поддерживалась наблюдениями (хотя существовали проблемы с точным измерением постоянной Хаббла, а значит, и с определением возраста Вселенной). Тем не менее существовали и конкурирующие теории, поскольку оставался ряд нерешенных вопросов. В модели с расширением все начинается с вещества при очень высокой плотности. Но важна ли тут температура (и излучение)? Во второй половине 1940-х гг. появилось то, что позднее стали называть моделью горячего Большого взрыва. Окончательное подтверждение этой модели произошло в середине 1960-х гг., когда было открыто реликтовое излучение, и сейчас оно лежит в основе наших представлений о ранней Вселенной.

Впервые идея горячего Большого взрыва появилась в 1948 г. в публикациях Георгия Гамова, Ральфа Альфера и Роберта Хермана (основой для них послужила статья Гамова 1946 г.). Эти работы в основном были посвящены синтезу элементов в ранней Вселенной.

Модель горячего Большого взрыва появилась в работах Альфера, Гамова и Хермана.

Что же происходило в ранней Вселенной? С момента начала расширения прошло несколько секунд, плотность вещества велика, а Вселенная расширяется достаточно медленно, так что фотоны заполняющего ее излучения успевают прийти в тепловое равновесие с веществом. Поэтому пока Вселенная непрозрачна, а излучение имеет тепловой спектр.

Температура Вселенной постепенно падает, при возрасте Вселенной около 380 000 лет (на самом деле стадия рекомбинации растянута на десятки тысяч лет, когда постепенно падает доля ионизованных атомов), она достигает значения около 3000–4000 К. При этой температуре начинается рекомбинация водорода: электроны присоединяются к протонам, формируя нейтральные атомы. Энергии излучения и столкновений уже недостаточно для того, чтобы вновь ионизовать атомы. Фотоны излучения, заполняющего пространство,

взаимодействуют в основном с электронами, и, когда последние оказываются в составе атомов, Вселенная становится прозрачной для собственного излучения.

По мере продолжения расширения Вселенной температура реликтового излучения уменьшается в соответствии с ростом масштабного фактора (длина волны фотонов «растягивается», при этом уменьшается их энергия). Реликтовому излучению соответствует $z = 1100$, поэтому 3000 К превратились примерно в 2,7 К — современную температуру реликтового излучения.

Излучение отделяется от вещества после рекомбинации спустя примерно 380 000 лет после начала расширения.

Количество реликтовых фотонов очень велико: на каждый барион (протон или нейтрон) приходится несколько миллиардов таких фотонов, в настоящее время в каждом кубическом сантиметре содержится более 400 фотонов из «молодой Вселенной». Сейчас на реликтовое излучение приходится всего лишь около 0,006% плотности Вселенной, но в прошлом температура реликтового излучения была выше. Поэтому первые примерно 50 000 лет истории Вселенной именно излучение доминировало и определяло динамику расширения. С тех пор число фотонов на один барион не изменилось, но барионы остались прежними, а температура реликтового излучения падала.

Современная температура реликтового излучения — 2,7 К.

Несмотря на то что Альфер, Гамов и Херман еще в конце 1940-х гг. предсказали существование фонового излучения (позже с легкой руки Иосифа Шкловского оно получило название реликтового, по-русски часто говорят просто «реликт»), идентифицировать его удалось лишь в 1965 г.

Впрочем, еще до этого несколько ученых в разных экспериментах наблюдали связанные с реликтовым излучением эффекты, но не смогли правильно распознать их природу. Эндрю МакКеллар (Andrew McKellar) в 1940 г. и Уолтер Адамс (Walter Adams) в 1941 г. заявили о наличии в спектре звезды дзета Змееносца линий молекул CN и CH. Что-то (возможно, излучение с температурой менее 3 К) должно было возбуждать эти молекулы, чтобы они могли излучать в характерных линиях. Но эти работы остались незамеченными теми, кто позже мог бы связать их с фоновым излучением Большого взрыва.

Затем настал черед радиоастрономов. При температуре около 3 К максимум в спектре реликтового излучения приходится

на миллиметровую область. Заметный фон должен наблюдаться и на сантиметровых радиоволнах, где его проще обнаружить при наземных наблюдениях. Радионаблюдения должны были выявить его, и в 1955 г. Эмиль ле Ру (*Émile Le Roux*) в Нанси, а затем в 1957 г. Тигран Шамонов в Пулково наблюдали космический фон, соответствующий низкой температуре, но снова не смогли найти верное объяснение или привлечь внимание экспертов к проблеме.

Число реликтовых фотонов в миллиарды раз превосходит число барионов.

Между тем теоретики продолжали настаивать на своих предсказаниях: в 1961 г. Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков снова указали, что должно существовать фоновое излучение с температурой в несколько кельвин, и даже предложили поискать его в данных радиообзора, проведенного в 1961 г. Эдвардом Омом (*Edward Ohm*). Роберт Дикке (*Robert Dicke*) и его соавторы в Принстоне уже планировали начать поиск реликтового излучения, однако его обнаружили независимо от этих предложений.

Реликтовое излучение было открыто в 1965 г. Пензиасом и Вильсоном.

Это сделали Арно Пензиас (*Arno Penzias*) и Роберт Вильсон (*Robert Wilson*) в 1965 г., причем с использованием той же антенны, которую использовал для своих наблюдений Ом за несколько лет до этого. Дикке с коллегами правильно интерпретировали эти данные, а Пензиас и Вильсон за свое открытие получили в 1978 г. Нобелевскую премию по физике.

12.2 Космологические данные по наблюдению реликта

Реликтовое излучение обычно характеризуют его температурой, ее усредненное по всему небу значение составляет около 2,7 К, и отклонения от него очень невелики. Это само по себе интересно, поскольку разные области, соответствующие разным «пятнам» на небе

размером в пару лунных дисков, не успели бы обменяться информацией и выравнять свою температуру, если бы в очень раннюю эпоху жизни Вселенной не происходили особые процессы (см. раздел 11.7 «Стадия инфляции»). Однако измерения температуры в разных точках неба дают лишь незначительно (на малые доли процента) различающиеся результаты. Эта анизотропия температуры реликтового излучения позволяет определять ряд космологических параметров.

Распределение анизотропии температуры реликтового излучения по небу имеет довольно сложный характер. Его можно рассчитать в рамках заданной космологической модели, при этом различные детали распределения определяются разными космологическими параметрами. Соответственно, практически всю космологию можно восстановить из данных по реликту (конечно, использование дополнительных данных повышает точность и достоверность), но для этого надо проводить очень точные наблюдения, ставшие возможными только в XXI в.

Анизотропия реликтового излучения позволяет определять космологические параметры.

Наблюдать реликтовое излучение с Земли достаточно сложно из-за поглощения в атмосфере. Кроме того, для получения полной информации нужен обзор всего неба. Поэтому основные данные о реликтовом излучении были получены с помощью космических аппаратов COBE (Cosmic Background Explorer, Исследователь космического фона, 1989–1992), WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Датчик микроволновой анизотропии, 2001–2010) и Planck (2009–2013). Обработка данных занимает много времени (в частности, важно учесть «лишнее» излучение, порождаемое внегалактическими источниками и пылью в нашей Галактике), поэтому на момент написания (август 2017 г.) книги обработка данных спутника Planck все еще продолжается, хотя уже было представлено много важных результатов, полученных этим аппаратом (в том числе и чисто космологических).

Основные данные по реликтовому излучению получают с помощью специализированных космических аппаратов.

Наблюдения также можно проводить в верхней атмосфере, запуская научную аппаратуру на высотных аэростатах. Наконец, есть несколько мест на Земле (Антарктида, сухие высокогорья), где аппаратура может работать и на поверхности. Недостатком этих подходов является то, что не удастся наблюдать всю небесную сферу.

Тем не менее такие проекты также вносят большой вклад в исследование реликта.

Наблюдения реликтового излучения позволяют определить геометрию Вселенной, которая оказалась плоской (см. раздел 11.4 «Геометрия Вселенной»). Это измерение возможно благодаря так называемому доплеровскому пику в распределении неоднородностей реликта по угловым масштабам. В ранней Вселенной вещество и излучение были достаточно тесно связаны, так что колебания и флуктуации плотности вещества сказывались на поведении излучения. Колебания в веществе распространялись со скоростью звука, которая тогда была очень велика, однако и для них существовал свой горизонт — звуковой. Нам важен размер звукового горизонта в эпоху последнего рассеяния, когда реликтовое излучение отделилось от вещества. В этом излучении отпечатались колебания вещества, и мы можем их наблюдать, изучая распределение температуры реликта по небу. В каких-то местах вещество двигалось к нам, в каких-то от нас, где-то вещества было больше, где-то меньше. Это движение и флуктуации привели к неоднородности в распределении температуры реликтового излучения: где-то она на тысячную долю процента больше, где-то меньше. Самые большие неоднородности (пятна, раскиданные по всему небу) соответствуют угловому масштабу около $0,6^\circ$, и связаны они именно с размером звукового горизонта. Во вселенных с разной кривизной мы бы видели разные картины анизотропии реликта. Тщательный анализ показал, что наша Вселенная — плоская, т. е. имеет нулевую (на современном уровне точности измерений) кривизну, и мы видим эти флуктуации температуры без существенных искажений, связанных с кривизной Вселенной.

Наблюдения реликта показали, что геометрия Вселенной близка к плоской.

Некоторые параметры распределения температуры реликта по небесной сфере сильно зависят от полной плотности вещества (темное + барионное), другие — именно от доли барионов. Благодаря работе космических аппаратов WMAP и Planck, а также ряда наземных установок у нас есть возможность определять эти параметры по наблюдениям реликтового микроволнового фона (как правило, важно лишь дополнительно измерить постоянную Хаббла в настоящее время на основе других наблюдательных данных).

Мы наблюдаем реликтовое излучение, прошедшее через всю видимую Вселенную. Соответственно, в характеристиках реликта отпечатались вся история и даже космография. В истории Вселенной был период, когда рекомбинировавшее было вещество снова реионизовалось ультрафиолетовым излучением первых звезд и квазаров.

Это произошло на красном смещении около 10, т. е. спустя 400 с лишним миллионов лет после начала расширения, и мы видим это в данных по реликту. Далее реликтовое излучение линзируется на разнообразных структурах по пути к нам, и мы можем изучить статистические свойства этих структур. Наконец, реликтовые фотоны взаимодействуют с горячим газом в скоплениях галактик (эффект Сюняева — Зельдовича), что позволяет определить ряд интересных параметров.

12.3

Измерение температуры реликта в разные эпохи

Предсказание темпа изменения температуры реликтового излучения по мере расширения Вселенной (т. е. по мере роста масштабного фактора) является важным элементом космологической модели. Интересно, что оно может быть проверено, поскольку излучение взаимодействует с веществом, и мы можем наблюдать последствия этого.

Есть два основных метода, позволяющих измерить температуру реликтового излучения в разные эпохи: возбуждение атомных и молекулярных уровней и эффект Сюняева — Зельдовича.

Существуют две основные методики, благодаря которым мы можем измерить температуру реликтового фона на разных красных смещениях. Еще в 1940-е гг. было обнаружено, что молекулы CN в нашей Галактике находятся в возбужденном состоянии, как будто их «подсвечивает» излучение с температурой около 3 К. Это было первое свидетельство в пользу существования реликтового излучения, но тогда его «не узнали». Однако позднее, уже после 1965 г., астрономы сообразили, что реликтовое излучение должно возбуждать различные энергетические уровни в атомах и молекулах, и это можно наблюдать, причем не только в нашей непосредственной окрестности, но и на очень больших расстояниях.

В настоящее время, используя данные по наблюдениям излучения разных атомов и молекул (углерод, молекулярный водород,

СО и др.), астрономы смогли проследить изменение температуры реликта на протяжении большей части истории Вселенной — начиная с первых миллиардов лет.

Измерения позволяют определить, как менялась температура реликта начиная с первых миллиардов лет.

Второй метод связан с эффектом Сюняева — Зельдовича. Фотоны реликтового излучения рассеиваются на электронах в горячем газе, находящемся в скоплениях галактик, и отбирают энергию у электронов (обратный эффект Комптона). В итоге в направлении на скопление будет наблюдаться небольшой, но вполне измеримый недостаток фотонов реликта с длиной волны более 2 мм и избыток фотонов с более короткими волнами. Поскольку мы можем определить свойства скопления, единственным неизвестным будет начальная температура поля фотонов, т. е. температура реликтового излучения, попадающего в скопления. Анализ позволяет определить ее с достаточной точностью, а сравнение данных измерений с предсказаниями теории показывает, что они находятся в согласии. Температура реликтового излучения растет в прошлое как $T \sim (1 + z)$, и это является еще одним независимым аргументом в пользу современной модели расширяющейся Вселенной.

12.4 Спектр первичных возмущений

Со времен Ньютона мы знаем, что если в распределенном по пространству веществе есть отдельные сгущения, то со временем из-за действия гравитации они могут начать расти (т. е. уплотняться, сжиматься). В результате постепенно возникает эволюционирующая структура в распределении вещества. Подобный сценарий реализовался в молодой Вселенной. Начальные флуктуации плотности, если они были достаточно велики, с определенного момента стали увеличиваться. В итоге мы видим галактики, скопления галактик, сверхскопления, волокна и войды — крупномасштабную структуру Вселенной и ее отдельные элементы.

При этом статистические свойства (как говорят, спектр) первичных флуктуаций можно установить, изучая данные по анизотропии реликтового излучения.

Сами флуктуации плотности определяются поведением темного вещества. Основная причина этого в том, что количество темного вещества в несколько раз больше, чем барионного (этот фактор является определяющим начиная с эпохи рекомбинации). Но в более раннюю эпоху была еще одна причина: дело в том, что неоднородности в распределении темного вещества начинают расти рано, а обычное барионное вещество до рекомбинации связано с фотонами, и поэтому (до определенного момента) неоднородности в распределении барионов расти не могут.

Для образования структуры во Вселенной необходимы первичные неоднородности плотности.

Когда барионы начинают «натекать» в созданные темным веществом потенциальные ямы, туда попадают и фотоны. Но рост плотности барионов в какой-то момент останавливается из-за давления фотонов, начинается расширение этой области. Происходят акустические осцилляции в барионном веществе. Фотоны, попавшие в потенциальные ямы, выходя из них, «покраснеют» (станут более «холодными»). Кроме того, работает эффект Доплера: если излучающее вещество движется в нашу сторону, то фотоны получают сдвиг в синюю сторону спектра (если от нас — то в красную). Наконец, рост плотности барионов соответствует и росту плотности фотонов, что приведет к эффективному повышению температуры в этой области. Соответственно, в результате сложения трех эффектов возникают сложные флуктуации температуры реликтовых фотонов.

Фотонные флуктуации мы можем обнаруживать на угловых масштабах менее одного градуса, исследуя микроволновое реликтовое излучение. Самая мощная деталь, так называемый *доплеровский пик*, в спектре мощности реликтового излучения соответствует угловому размеру чуть менее градуса. Это размер звукового горизонта на момент рекомбинации — более крупные области не успевают совершить ни одного полуколебания. На меньших масштабах видны более слабые детали, называемые акустическими пиками, они связаны с акустическими осцилляциями в барионном веществе в эпоху рекомбинации.

Первичные неоднородности в распределении плотности вещества можно изучать по их следам в реликтовом фоне.

Наблюдения показывают, что неоднородности температуры по отношению к ее среднему значению составляют примерно 0,00001,

это соответствует уровню флуктуаций плотности на момент рекомбинации. Высота акустических пиков в спектре мощности реликтового излучения сильно зависит от доли барионов в полной плотности, а положение пиков — от кривизны пространства. Наблюдения позволяют определить, что наша Вселенная с высокой (меньше 1%) степенью точности описывается евклидовой геометрией, а доля барионов в полной плотности составляет 4–5%.

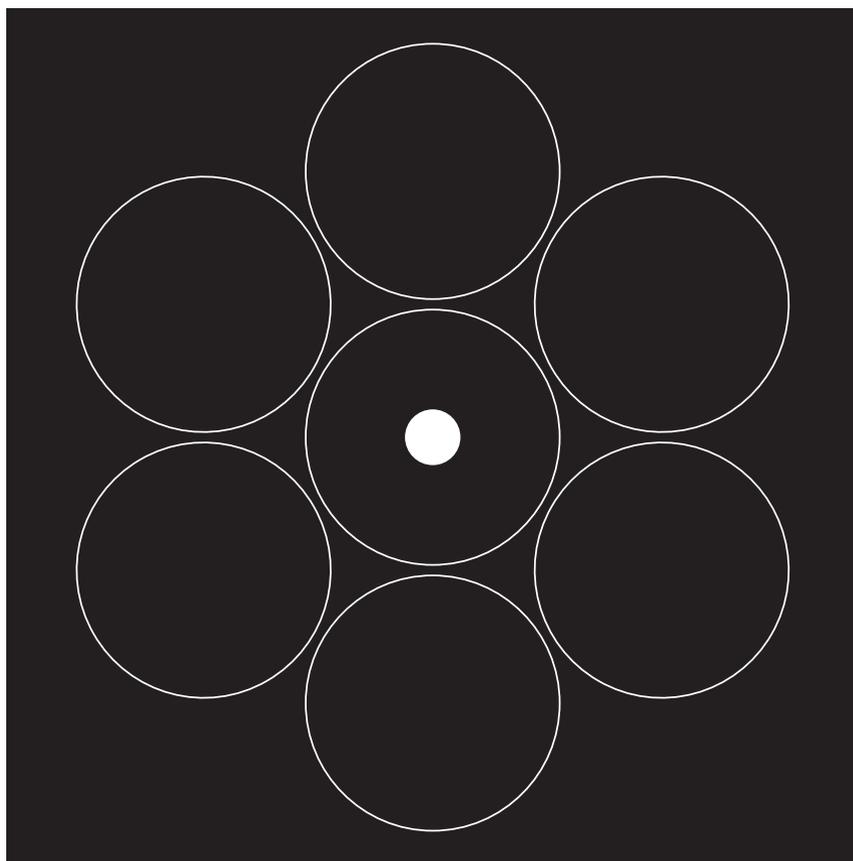
В современной стандартной космологической модели (которая еще нуждается в непосредственном подтверждении) первичные флуктуации плотности связаны со стадией инфляции в ранней Вселенной. По своей природе они квантовые, флуктуирует само поле, отвечающее за инфляцию, — инфлатон. Экспоненциальное раздувание (очень быстрое расширение), которое происходит на стадии инфляции, усиливает вакуумные флуктуации всех полей. Пока колебания поля малы, они просто осциллируют, но, когда расширение растягивает их до масштабов горизонта, они «замерзают», застывают. Впоследствии они становятся зародышами флуктуаций плотности, из которых и начнет расти наблюдаемая сегодня структура Вселенной.

Теория инфляции предсказывает, что начальные возмущения должны быть максимально случайными (гауссовыми) и что у них нет выделенного масштаба. Именно это и подтверждается в настоящее время по данным наблюдений реликтового фона.

Первичные возмущения плотности возникают на стадии инфляции за счет квантовых флуктуаций.

Флуктуации плотности, «замерзшие» на разных стадиях, имеют различный масштаб. Из-за расширения Вселенной этот масштаб растягивается, но это происходит медленнее, чем растет возраст (масштабный фактор растет как корень из возраста на радиационно-доминированной стадии и как возраст в степени $2/3$ на стадии доминирования вещества). А размер горизонта линейно зависит от времени (растет как время в первой степени). Поэтому постепенно флуктуации, имеющие размер больше горизонта (такие флуктуации уже не растут), оказываются внутри горизонта, и может начаться их дальнейший рост.

Кроме так называемых скалярных флуктуаций, приводящих в итоге к неоднородности распределения плотности вещества, на стадии инфляции возникают и тензорные флуктуации. Когда они оказываются под горизонтом, то могут наблюдаться как первичные гравитационные волны. Есть надежда обнаружить их существование, изучая особые неоднородности в распределении поляризации реликтового излучения.



Глава 13

ТЕЛЕСКОПЫ

13.1	Принцип работы телескопа	279
13.2	Рефракторы и рефлекторы	283
13.3	Современные оптические телескопы и проекты ближайшего будущего	286
13.4	Радиотелескопы	290
13.5	Рентгеновские телескопы	294
13.6	Гамма-телескопы на Земле и в космосе	299
13.7	Детекторы нейтрино	303
13.8	Детекторы космических лучей	308
13.9	Детекторы гравитационных волн	313

Астрономия — наблюдательная наука. Прямой эксперимент в ней невозможен (за редкими случаями изучения тел Солнечной системы). Поэтому практически вся информация в астрономии основана на наблюдениях. Для этого необходимы приборы, которые помогали бы наблюдать слабые объекты и мелкие детали, невидимые невооруженным глазом, а также позволяли бы фиксировать данные для дальнейшего анализа.

Современная астрономия располагает инструментами для наблюдений во всех диапазонах электромагнитного спектра, а также детекторами нейтрино, космических лучей и гравитационных волн. Постоянное совершенствование средств наблюдения, рост их размеров, чувствительности и возможностей позволяют делать все новые и новые открытия, помогающие лучше понять устройство Вселенной.

13.1

Принцип работы телескопа

Телескоп имеет две основные задачи: собрать как можно больше излучения и дать возможность рассмотреть более мелкие детали. Это относится к инструментам, работающим в разных диапазонах спектра (а также с поправками на особенности не только к телескопам, но и к другим типам наблюдательных инструментов в астрономии). Разумеется, многие детали и принципы работы радиотелескопов существенно отличаются от таковых для гамма-обсерваторий, поэтому различия будут рассмотрены отдельно. Однако многие общие положения верны для широкого диапазона электромагнитных волн, и их удобно рассмотреть на примере оптических телескопов.

У телескопа имеются две основные задачи: собрать больше света и рассмотреть более мелкие детали.

Невооруженным глазом на всем небе можно увидеть около 6000 звезд (из сотен миллиардов) нашей Галактики, всего лишь три галактики (туманность Андромеды, Большое и Малое Магеллановы Облака) и пять планет, да и то в идеальных условиях (скажем, в космосе, вдали от крупных тел, где нет влияния атмосферы и для обзора доступна вся небесная сфера). Другие звезды, галактики и планеты слишком слабы для того, чтобы наши глаза смогли рассмотреть их. Интенсивность потока света от источника падает обратно пропорционально квадрату пройденного расстояния, и от далеких объектов в наш зрачок попадает слишком мало фотонов, чтобы сетчатка смогла их отчетливо зафиксировать. Значит, необходим прибор для сбора фотонов.

Диаметр объектива — главный параметр телескопа.

Условно говоря, телескоп можно представить как водосборник, большую воронку. Подобно тому как дождь собирается со всей крыши и направляется мощным потоком в водосток, объектив телескопа — его основная деталь — собирает свет с большой площади (пропорциональной квадрату диаметра объектива) и направляет его через окуляр на регистрирующий прибор (например, глаз наблюдателя), в результате чего видимый блеск (т. е. поток видимого излучения) источников возрастает. Даже небольшие, дающие не слишком

качественные изображения, первые телескопы Галилея и других наблюдателей начала XVII в. позволили увидеть множество объектов и деталей, которые ранее были недоступны для наблюдений из-за их слабого блеска (звезды в Млечном Пути и пр.).

В телескопах для видимого диапазона спектра используется два основных типа объективов — линзовые и зеркальные (возможны также комбинации оптических элементов в зеркально-линзовых объективах). Поскольку астрономические источники находятся крайне далеко, можно считать, что их излучение приходит к нам в виде параллельного пучка лучей, который можно сфокусировать (собрать в фокусе) с помощью собирающей линзы или параболического зеркала. Расстояние, на котором зеркало или линза объектива строит изображение бесконечно удаленного объекта (в случае параллельного пучка лучей собирает их в точку), называется фокусным расстоянием. Если диаметр объектива составляет всего лишь 8 см, то он собирает в 100 раз больше света (фотонов), чем зрачок глаза с максимальным диаметром около 8 мм. Пренебрегая фоном ночного неба, потерями света и возможным размытием изображения, с помощью такого инструмента мы сможем увидеть в 100 раз более слабые звезды, чем невооруженным глазом. При одинаковой светимости это соответствует десятикратному увеличению расстояния до объектов. Скажем, глазом мы можем увидеть звезду, подобную Солнцу, с расстояния чуть больше 50 световых лет, а в небольшой телескоп — с расстояния более чем 500 световых лет.

Вторая задача телескопа — позволить рассмотреть более мелкие детали. Например, глазом мы прекрасно видим Луну — яркий объект с угловым диаметром на небе около половины градуса (около 30 угловых минут). Наш глаз различает детали с угловым размером более одной угловой минуты (1'). Реальный диаметр Луны чуть менее 3500 км, поэтому глазом мы можем различать детали лунного диска лишь размером более 100 км. Чтобы рассмотреть менее крупные образования, необходимы оптические приборы.

Предельное угловое разрешение зависит от диаметра телескопа и длины волны излучения.

Объектив создает изображение наблюдаемого объекта в фокальной плоскости. Мы можем непосредственно зафиксировать его (например, с помощью фотоматериалов или электронных приемников излучения) или рассматривать с помощью окуляра. Окуляр собирает расходящиеся лучи за фокусом телескопа и снова превращает их в параллельные пучки. Однако если мы наблюдаем, например, двойную звезду, то после прохождения окуляра угол между пучками, соответствующими изображениям двух звезд, будет больше: если на небе этот угол составлял доли угловой минуты и звезды сливались

в одну, то с помощью телескопа можно четко видеть две отдельные звезды. Именно такой эффект позволил открыть крупнейшие спутники Юпитера, которые имеют достаточный для невооруженного глаза блеск, но находятся слишком близко к яркой планете-гиганту и поэтому неразличимы без телескопа.

Коэффициент увеличения угла между двумя близкими источниками при наблюдении в телескоп называют *угловым увеличением* (кратностью), оно равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра. Способность телескопа различать близко находящиеся объекты называется *угловым разрешением*. Даже в идеальных условиях, когда нам не мешает атмосфера и все элементы телескопа работают без потерь, существует предел на угловое разрешение, определяемый волновой природой света.

С точки зрения земного наблюдателя, далекая звезда — это точечный источник. Но все фотоны от звезды, попавшие в телескоп, невозможно собрать в одну точку, поскольку свет является волной. Из-за дифракции изображение звезды представляет собой набор концентрических колец вокруг центрального яркого диска, и для двух близких на небе звезд такие наборы колец будут накладываться друг на друга, так что, начиная с некоторого углового расстояния, мы не сможем различить их. Чем больше диаметр объектива телескопа D и чем меньше длина волны принимаемого излучения λ , тем ниже (т. е. лучше — изображения четче) предел углового разрешения (он пропорционален λ/D — отношению длины волны к диаметру объектива).

Для крупных телескопов предельное угловое разрешение определяется влиянием атмосферы.

Если не использовать окуляр, а фиксировать изображение в фокальной плоскости, то нам важен его масштаб: какой угол приходится на единицу длины. Важность этого можно понять, представив себе электронный приемник (матрицу), состоящий из пикселей (отдельных светочувствительных элементов). Размер пикселя задает предел разрешения: сколько ни увеличивай изображение, внутри отдельного пикселя невозможно рассмотреть никаких новых деталей. Увеличивая фокусное расстояние телескопа, мы можем менять масштаб: на один пиксель приходится все меньший угловой размер. Угловое разрешение растет, но при этом падает яркость изображения, поскольку мы распределяем его по большей площади. А яркость изображения зависит от того, сколько собрано света, т. е. от диаметра объектива. Именно поэтому для получения одновременно яркого изображения в фокальной плоскости и хорошего углового разрешения необходимо использовать телескоп не только с большим фокусным расстоянием, но и с большим диаметром объектива.

В реальности для телескопов диаметром несколько десятков сантиметров и более, работающих в видимом спектре, предельное угловое разрешение определяется не столько параметрами оптики, сколько влиянием атмосферы. Поэтому для многих типов наблюдений предпочтительнее наблюдения из космоса, хотя в видимом диапазоне земная атмосфера прозрачна (в отличие от ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-, а также части инфракрасного диапазонов). Космический телескоп Hubble диаметром 2,4 м (в 3–4 раза менее размеров крупнейших наземных инструментов) получает изображения более высокого качества. Относительно небольшой телескоп на борту космического аппарата Kepler стал самым эффективным средством обнаружения экзопланет, намного опередив в этом наземные установки. Причина такой высокой эффективности в том, что изображения звезд, получаемых Kepler, не мерцают, что позволяет измерять их блеск с высокой точностью в течение длительного времени.

Собираемое телескопом излучение можно не только наблюдать визуально, но и фиксировать с помощью приборов для более детального изучения. Тем более что основную информацию астрономы сейчас получают не из изображений астрономических объектов, а путем изучения спектров и другими способами анализа излучения. Поэтому эффективность телескопов для научных исследований во многом определяется не только их размером, но и качеством установленного оборудования. Тем не менее увеличение размеров телескопа позволяет изучать более слабые объекты, что крайне важно для всех областей астрономии.

Научная эффективность телескопа зависит от установленных на нем детекторов излучения.

По сравнению с визуальными наблюдениями детекторы также обладают тем преимуществом, что могут накапливать свет в течение долгого времени, что позволяет видеть еще более слабые источники. Наконец, оцифровка получаемых данных дает возможность применять сложные алгоритмы анализа, существенно повышающие эффективность исследований.

13.2

Рефракторы и рефлекторы

Оптические телескопы можно разделить на два основных типа. Инструменты, в которых фокусировка света осуществляется системой линз, называются рефракторами, а те, в которых свет фокусируется зеркалами, — рефлекторами.

История рефракторов началась в 1608 г., и именно с помощью таких инструментов были сделаны все первые важные открытия, включая результаты, полученные Галилеем. Рефлекторы разных типов были изобретены также в XVII в. (один из самых первых был сконструирован Исааком Ньютоном в 1667 г.). Однако до второй половины XVIII в. они не играли важной роли в астрономических исследованиях, а начиная с XX столетия все крупные инструменты — это телескопы-рефлекторы.

В телескопах-рефракторах объектив состоит из линз.

Объективы первых рефракторов состояли из одной собирающей линзы. Однако столь простая оптическая схема создает заметно искаженное изображение (дефекты изображения называют аберрациями). Например, коэффициент преломления зависит от длины волны света, поэтому линза не может собрать лучи разного цвета в одну точку — такой эффект называется хроматической аберрацией. Чтобы избавиться от нее (и других типов аберраций), были разработаны более сложные системы из нескольких линз. Благодаря быстрому прогрессу начиная с середины XVIII в. качество оптических телескопов с диаметрами объективов вплоть до нескольких десятков сантиметров было достаточно высоким.

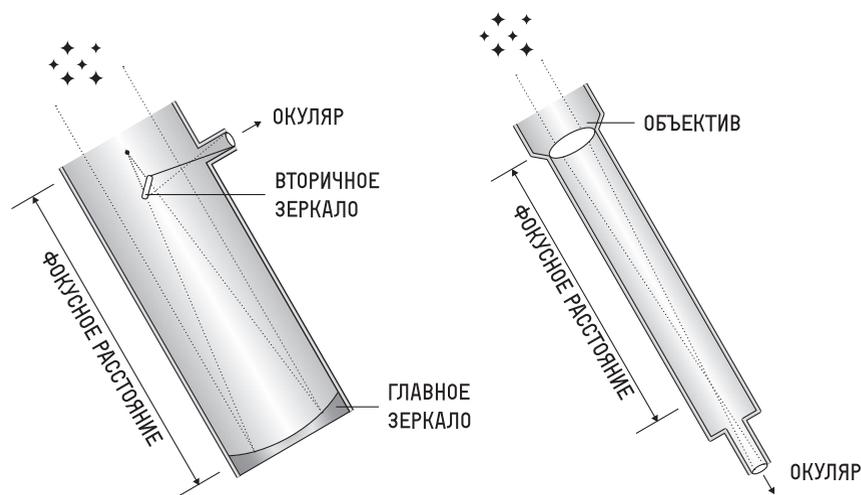
До начала XX в. в астрономии доминировали рефракторы.

При изготовлении линз требования к точности формы поверхности не столь велики, как требования к точности поверхности зеркал рефлекторов. Вдобавок поверхность линзы сферическая, что упрощает ее полировку. Кроме того, в течение долгого времени не удавалось сделать зеркала с достаточно высоким коэффициентом отражения, поэтому в рефлекторах терялось много света. Требования многих астрономических наблюдений XVII–XVIII вв. и даже первой

половины XIX в. (астрометрические наблюдения, визуальные наблюдения планет и т. п.) хорошо удовлетворялись телескопами-рефракторами. Поэтому именно они главенствовали вплоть до начала XX в.

Основным недостатком рефракторов, из-за которого они в итоге уступили рефлекторам, является невозможность создания большого объектива. Линза становится слишком тяжелой и деформируется под действием собственного веса (интересно, что при малых диаметрах линзы, как правило, менее подвержены деформациям, чем зеркала). Большие телескопы-рефлекторы, в которых фокусирующим элементом является вогнутое зеркало, лишены этого недостатка, поскольку даже тяжелое зеркало можно поддерживать сзади по всей площади, что позволяет избежать прогиба. Кроме того, у рефлекторов отсутствует хроматическая aberrация. Эти достоинства позволили рефлекторам на короткий период в конце XVIII — начале XIX в., во время работы Уильяма Гершеля, стать основными поставщиками новых открытий.

Однако долгое время не удавалось достичь достаточно высокой точности обработки поверхности крупных зеркал. Для достижения необходимого качества изображения отклонения от точной формы не должны превышать $1/8$ от длины волны используемого излучения. Поверхность зеркала должна быть не сферической, а более сложной в изготовлении параболической (именно такие зеркала использовались первые 200 лет после изобретения рефлектора), поэтому создать высококачественный рефлектор очень непросто. Кроме того, первые зеркала были металлическими и достаточно быстро туснели, так что их приходилось заново полировать. Чтобы рефлекторы вышли



Две основные принципиальные схемы оптических телескопов: зеркальный (рефлектор) и линзовый (рефрактор).

на первый план, понадобилось разработать технологию изготовления стеклянных зеркал с покрытием поверхности серебром (а позднее и более устойчивым алюминием), что произошло только во второй половине XIX в.

К концу XIX в. рефракторы достигли предельного размера (чуть более одного метра), и последние сто с лишним лет все крупные телескопы являются рефлекторами. Развитие технологий позволило создавать тонкие составные зеркала малого удельного (на единицу площади) веса, что открыло дорогу к созданию многометровых инструментов. На сегодняшний день крупнейшие наземные телескопы имеют диаметр основного зеркала около 10 м.

В рефлекторах объективом является вогнутое зеркало.

Зеркала рефлекторов имеют параболическую (системы Ньютона и Кассегрена: часто используются, особенно в небольших инструментах), гиперболическую (системы Ричи — Кретьена: например, космический телескоп Hubble, а также большинство крупных наземных инструментов) или сферическую (системы Шмидта) форму поверхности. Фокус основного зеркала оказывается внутри телескопа, поэтому только на очень крупных инструментах регистрирующие приборы могут быть расположены прямо в основном фокусе. Обычно используются дополнительные оптические элементы, которые отводят свет в сторону или в отверстие в основном зеркале (дополнительные элементы могут также корректировать изображения, позволяя уменьшить влияние аберраций). Существует много схем телескопов-рефлекторов, каждая из них имеет различные преимущества, и это используется при проектировании и эксплуатации.

За счет многократного прохождения света по трубе телескопа, а также из-за отсутствия хроматической аберрации телескопы-рефлекторы могут быть достаточно компактными и светосильными. Яркость получаемого с помощью телескопа изображения тем выше, чем больше относительное отверстие — отношение диаметра объектива телескопа к его фокусному расстоянию¹. Для телескопов-рефракторов типичными значениями являются 1/10–1/15 (часто относительное отверстие обозначается как диаметр объектива в долях фокусного расстояния, например $f/10$), такие телескопы имеют довольно большую длину, что усложняет их эксплуатацию. Для рефлекторов характерны гораздо большие относительные отверстия — 1/3–1/5 (а иногда даже 1/2), такие инструменты довольно компактны, и это немаловажный фактор для обсерваторий, если

¹ Иногда эту величину называют светосилой, хотя формально это неправильно. Светосила равна квадрату относительного отверстия, т. е. $(D/f)^2$.

задуматься о размерах полноповоротного купола для телескопа с диаметром объектива в несколько метров.

Все современные крупные телескопы являются рефлекторами из-за невозможности создать достаточно крупную недеформируемую линзу.

В то же время для любительских наблюдений рефракторы продолжают оставаться вполне конкурентоспособными. Для многих первым телескопом становится недорогой рефрактор с диаметром объектива 5–10 см (или даже крупный бинокль, который также можно отнести к рефракторам).

13.3

Современные оптические телескопы и проекты ближайшего будущего

В настоящее время крупнейшие наземные телескопы, работающие в оптическом диапазоне, — рефлекторы с диаметрами объективов 8–10 м. Рефлекторами также являются космический телескоп Hubble Space Telescope с диаметром зеркала 2,4 м, а также будущий космический телескоп James Webb Space Telescope (JWST, Космический телескоп «Джеймс Уэбб») с составным зеркалом диаметром 6,5 м.

Крупнейшие наземные телескопы наших дней имеют диаметр главного зеркала 8–10 м.

Звание самого крупного телескопа достаточно условно, поскольку размеры самых больших объективов достаточно близки, и поэтому научная результативность зависит от других параметров (тип телескопа, количество и качество регистрирующего оборудования, эффективность использования). Формально на момент написания книги (август 2017 г.) самым большим телескопом является Gran Telescopio Canarias (Большой Канарский телескоп) с диаметром зеркала 10,4 м, однако существует еще более десятка инструментов с диаметром свыше 8 м. Среди них такие продуктивные, как два десятиметровых

телескопа обсерватории Кека (W.M. Keck Observatory, Мауна-Кеа, Гавайи), четыре входящих в комплекс VLT (Very Large Telescope) 8,2-метровых телескопа Европейской южной обсерватории (European South Observatory) в Чили, а также 8,2-метровый телескоп Subaru («Субару», Мауна-Кеа, Гавайи), превосходящие канарский по ряду параметров.

Самые крупные зеркала состоят из сегментов.

Самые крупные монолитные зеркала установлены на 8,4-метровом Large Binocular Telescope (Большом Бинокулярном телескопе, Международная обсерватория Маунт-Грэм, Аризона). Subaru и VLT также оснащены монолитными зеркалами, а вот все более крупные инструменты имеют сегментированные зеркала (состоящие из нескольких сегментов).

Сегментированные зеркала состоят из набора отдельных отражающих элементов (обычно шестиугольных), такая конструкция позволяет решить целый ряд проблем. Монолитное зеркало является очень дорогим в изготовлении (даже транспортировка крупного монолитного зеркала представляет собой сложную техническую задачу, поскольку это легко повреждаемый негабаритный груз, который обычно необходимо доставить высоко в горы). Кроме того, независимое управление отдельными сегментами позволяет корректировать форму зеркала при поворотах телескопа и изменении внешних условий (активная оптика).

Важнейшим свойством современных крупных наземных телескопов является использование активной и адаптивной оптики. Активная оптика, разработанная в 1980-х гг., позволяет исправлять изменения формы зеркала, связанные с деформацией при поворотах телескопа, изменениях температуры и ветра. Поскольку современные крупные зеркала являются или сегментированными, или достаточно тонкими, их формой можно управлять, или манипулируя отдельными сегментами, или оказывая воздействие сзади на основное зеркало. Таким способом удастся исправлять «медленные» (с характерными временами больше секунды) деформации.

Система адаптивной оптики является более сложной, и ее начали использовать лишь в самом конце XX в. Прогресс адаптивной оптики во многом был связан с ростом вычислительных мощностей современных компьютеров. Эта система предназначена для компенсации искажений волнового фронта, возникающих в первую очередь из-за влияния атмосфер.

Турбулентность в земной атмосфере приводит к тому, что на зеркало телескопа от далекого точечного источника (например, звезды) приходит не плоский волновой фронт, а искаженный. Характерный

масштаб неоднородностей в атмосфере составляет 10–30 см, из-за чего изображение точечного источника начинает состоять из отдельных ярких элементов — спеклов, которые за время экспозиции сливаются в сплошной диск размером около или чуть менее одной угловой секунды. При этом дифракционный предел на угловое разрешение телескопа может составлять сотые доли секунды, и для приближения к этому пределу в оптический тракт телескопа (обычно в фокус) вводится дополнительное специальное деформируемое зеркало (или несколько). Система управления сравнивает изображение эталонного источника (это либо яркая звезда, либо чаще «искусственная звезда» — возбужденное лазером свечение верхних слоев атмосферы) с идеальной картиной, на основании чего вырабатывается управляющий сигнал, подаваемый на деформируемое зеркало. Форма зеркала меняется так, чтобы максимально восстановить волновой фронт (т. е. компенсировать искажения, внесенные атмосферной турбулентностью) в отраженном потоке. Коррекцию можно проводить сотни раз в секунду, что позволяет практически полностью убрать влияние атмосферной турбулентности.

Современные телескопы оборудованы системой адаптивной оптики, позволяющей улучшить угловое разрешение за счет компенсации атмосферных искажений.

В пятерке крупнейших телескопов есть два инструмента нестандартной конструкции. Это 10-метровый Hobby-Eberly Telescope (Хобби — Эберли, Обсерватория Макдональда, Техас) и 9,2-метровый Southern African Large Telescope (Большой Южноафриканский телескоп, ЮАР). Главные зеркала этих телескопов не могут наводиться в любую точку неба, они вращаются лишь по азимуту, зато простота монтажа (опорно-поворотного устройства телескопа) делает эти конструкции намного дешевле. Тем не менее движение узлов крепления вторичных зеркал позволяет наблюдать около 70% доступной части неба. Правда, длительность экспозиции (непрерывной съемки) ограничена, а поле зрения невелико, и одновременно использовать полностью всю площадь светособирающей поверхности невозможно. Зеркала этих телескопов сегментированные и имеют сферическую форму, что также резко уменьшает их стоимость. По многим характеристикам такие инструменты уступают телескопам вроде Subaru или VLT, однако низкая стоимость (\$ 10–20 млн против \$ 200–300 млн) делает такие системы привлекательными. Они применяются в основном для спектральных исследований отдельных астрономических источников.

Ввиду большой стоимости крупнейших телескопов и длительности их разработки и создания большое внимание уделяется модернизации и замене детекторов, используемых на них, а также

совершенствованию алгоритмов обработки информации и составлению актуальных программ исследования. Суммарная стоимость детекторов различного типа (спектрографы, поляриметры и др.), используемых на крупных инструментах, может быть сравнима со стоимостью самого телескопа. Однако именно разработка новых детекторов и их регулярная модернизация помогают в течение десятилетий эффективно использовать большие инструменты.

Совершенно особое место в наблюдательной астрономии занимает Hubble Space Telescope («Хаббл»). Этот 2,4-метровый телескоп системы Ричи — Кретъена был выведен на орбиту шаттлом Discovery («Дискавери») в 1990 г. С тех пор оборудование на нем несколько раз обновляли, что позволило в течение десятилетий поддерживать работоспособность и научную конкурентоспособность инструмента. Благодаря работе телескопа вне пределов атмосферы на нем можно не только получать изображения высокой четкости, но и работать в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Существуют планы по созданию еще более крупных инструментов: следующее поколение наземных оптических телескопов будет иметь диаметр главного зеркала 25–40 м. Сейчас детально проработано три проекта, два из них находятся в стадии активного строительства. Эти большие телескопы должны начать научные наблюдения в 2020-е гг.

Первым новым крупным наземным инструментом, вероятно, станет Giant Magellan Telescope (GMT, Гигантский Магелланов телескоп). Его зеркало будет состоять из семи сегментов, каждый размером по 8,4 м. GMT будет установлен в Чили, в обсерватории Лас-Кампанас, и по плану войдет в строй в первой половине 2020-х гг.

Самый крупный инструмент следующего поколения — European Extremely Large Telescope (E-ELT, Экстремально Большой Европейский телескоп) Европейской южной обсерватории, который будет построен рядом с обсерваторией Паранал в Чили и введен в строй в середине 2020-х гг. Его сегментированное почти 40-метровое зеркало будет состоять из сотен отдельных управляемых элементов.

В 2020-е гг. будут введены в строй несколько телескопов диаметром 25–40 м.

Наконец, существует проект Thirty Meters Telescope (TMT, Тридцатиметровый телескоп), который планируется установить в 2020-х гг. в обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях. Стоимость телескопов нового поколения составит около \$ 1 млрд (за каждый).

Следующим большим космическим проектом должен стать James Webb Space Telescope (JWST). Его запуск намечен на 2019 г. JWST имеет раскладывающееся сегментированное зеркало диаметром 6,5 м и в первую очередь предназначен для работы в красной части

видимого спектра и ИК-диапазоне. Стоимость таких космических проектов, как телескопы Hubble и James Webb, очень велика (с учетом многолетней эксплуатации — порядка \$ 10 млрд), однако их научная отдача оправдывает вложенные средства.

Все эти новые инструменты позволят решить ряд важных вопросов, включая происхождение первых галактик и определение состава атмосфер экзопланет земной массы.

13.4

Радиотелескопы

Астрономические объекты являются источниками радиоизлучения. В космосе существует множество процессов, приводящих к испусканию радиоволн: движение электронов в магнитном поле (циклотронное и синхротронное излучение), рассеяние электронов на ионах в плазме (тормозное излучение), переходы электронов в атомах и молекулах на более низкие уровни энергии (излучение в спектральных линиях), испускание электромагнитных волн холодными объектами (излучение пыли и пр.). Кроме того, в радиодиапазон из-за космологического красного смещения попадает субмиллиметровое и инфракрасное излучение очень далеких объектов.

Астрономические радионаблюдения начались в 1930-е гг., а бурное развитие этой области — после Второй мировой войны.

Попытки наблюдать небесные источники с помощью радиоволн проводились с начала XX в. Впервые обнаружить радиоизлучение от астрономического объекта удалось Карлу Янскому (Karl Jansky) еще в 1931 г. Он зарегистрировал постоянный радиосигнал, приходящий от центральных частей нашей Галактики. В 1930-е гг. проводились и другие работы в этом направлении, однако активное развитие радиоастрономии началось только после Второй мировой войны.

Наблюдения в радиодиапазоне позволили получить такие важные результаты, как обнаружение реликтового излучения (1965 г.), открытие квазаров (конец 1950-х гг.) и пульсаров (1967 г.), обнаружение радиоизлучения нейтрального водорода, а также сложных органических молекул и воды в межзвездной среде (1960–1970-е гг.), и многие другие.

Астрономические радионаблюдения проводятся в диапазонах длин волн от долей миллиметра (более короткие волны поглощаются молекулами воды и азота в атмосфере) до 30 м (для более длинных волн ионосфера Земли непрозрачна)². Это так называемое окно прозрачности атмосферы Земли в радиодиапазоне.

Радионаблюдения проводятся на длинах волн от примерно 0,3 мм до 30 м.

Наблюдения в радиодиапазоне имеют свою специфику, связанную с низкой энергией и большой длиной волны. В результате доминируют не квантовые, а волновые свойства принимаемого излучения.

Радиотелескопы можно разделить на два основных типа. Первый тип по своему принципу работы является аналогом оптических телескопов-рефлекторов: поверхность антенны имеет параболическую или сферическую форму для фокусировки радиоизлучения. Второй тип антенн не фокусирует сигнал, а вместо этого использует очень большое количество отдельных принимающих элементов. Кстати, в быту мы используем оба этих типа антенн: «тарелки» для приема программ спутниковых телепрограмм и разнообразные вибраторные антенны (примером которых являются «рожки» у приемников и телевизионные антенны на крышах).

Астрономические радиоисточники обычно очень слабые, поэтому для их регистрации требуется создание установок с большой собирающей площадью. Размеры современных радиотелескопов поражают: в течение долгого времени самую большую фокусирующую поверхность в радиоастрономии (да и в астрономии вообще) имел 305-метровый телескоп в Аресибо, а теперь рекорд принадлежит 500-метровому телескопу FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope, Сферический телескоп с пятисотметровой апертурой) в Китае³. Эти гигантские антенны не поворачиваются, но перемещение вторичных узлов (где расположены вторичные отражатели или приемники сигналов) установки позволяет наблюдать различные небесные объекты. Самые большие полноповоротные антенны имеют

2 В описании астрономических радионаблюдений вместо длин волн часто используют частоту. Эти величины связаны между собой простой формулой $\nu = c/\lambda$, где ν — частота, λ — длина волны, а c — скорость света. Например, частота 300 МГц соответствует длине волны 1 м. А известная длина волны излучения нейтрального водорода 21 см соответствует частоте 1,4 ГГц.

3 Формально радиотелескоп РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (станция Зеленчукская, Карачаево-Черкесия) имеет больший размер (его диаметр 576 м), однако он является кольцевым рефлектором (отражатель имеет форму узкого кольца).

размер около 100 м, примерами являются телескоп в Эффелсберге (Германия) и телескоп в Грин-Бэнк (США).

Радиотелескопы, не фокусирующие излучение, могут состоять из огромного числа отдельных элементов. Так, установка БСА в Пушино под Москвой состоит из 16 000 диполей, покрывающих площадь более 7 га. А телескоп УТР-2 под Харьковом (Украина), являющийся крупнейшей установкой для приема декаметровых волн, имеет собирающую площадь 150 000 м².

Одной из важных проблем наблюдений в радиодиапазоне является низкое угловое разрешение отдельной антенны. Предельное угловое разрешение прямо пропорционально длине волны и обратно пропорционально размеру антенны ($\sim \lambda/D$, где λ — длина волны, D — диаметр антенны), в результате даже 100-метровый телескоп, работающий на волне 21 см, имеет угловое разрешение в несколько раз хуже человеческого глаза. Поэтому в радиоастрономии активно применяется метод интерферометрических наблюдений, позволяющий многократно улучшить угловое разрешение.

Идея интерферометрии состоит в том, что совместная обработка сигналов с двух радиотелескопов, разнесенных на расстояние r (так называемая база интерферометра), приводит к угловому разрешению, которое обратно пропорционально этому расстоянию, т. е. вся система работает как телескоп размера r (с пределом углового разрешения $\sim \lambda/r$). Для эффективного применения лучше, если одновременно будет работать несколько антенн (причем расположенных не на одной прямой), поскольку разрешение интерферометра из двух телескопов максимально в направлении отрезка, соединяющем инструменты, и к тому же по мере увеличения количества антенн повышается чувствительность и может расширяться общая диаграмма направленности. Поэтому в мире существует несколько радиотелескопов, состоящих из большого числа антенн, разделенных расстояниями от десятков и сотен метров до километров. Современными примерами таких инструментов являются установки VLA (Very Large Array, Очень большая антенная решетка) американской Национальной радиоастрономической обсерватории в Нью-Мексико и ALMA, международный научный проект в пустыне Атакама в Чили.

Для повышения углового разрешения проводятся интерферометрические наблюдения.

Угловое разрешение интерферометра можно увеличить еще больше, если использовать в единой сети несколько фокусирующих антенн, разделенных расстояниями в сотни и тысячи километров, — такой метод называется интерферометрией со сверхдлинной базой. Примерами таких систем являются американская VLBA (Very Long Baseline Array, Антенная решетка со сверхдлинными базами)

и международный проект Event Horizon Telescope. С последним ученые связывают надежды на наиболее детальные исследования непосредственных окрестностей сверхмассивных черных дыр в центре нашей Галактики и галактики M87.

Размер наземных интерферометров со сверхдлинной базой ограничен диаметром нашей планеты. Но можно добиться еще большего углового разрешения, если размещать аппараты в космосе. Правда, с этим связано много проблем. Во-первых, космическая антенна не может быть очень большой, поэтому чувствительность интерферометра будет ограничена размером космического телескопа. Во-вторых, высокое угловое разрешение достигается преимущественно в направлении линии, соединяющей инструменты. Соответственно, если лишь одна из антенн в системе находится в космосе, то трудно за короткое время покрыть наблюдениями с высоким разрешением большую площадь. В-третьих, угловое разрешение зависит и от длины волны, а реализовать интерферометр в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах с участием космического телескопа крайне трудно.

Наибольшее угловое разрешение в астрономии достигается при использовании радиоинтерферометров со сверхдлинной базой.

На сегодняшний день было предпринято несколько попыток создания космических радиоинтерферометров, все они работали на длинах волн более 1 см: японский проект VSOP (1997–2003 гг.) с 8-метровой антенной и российский проект «Радиоастрон» (спутник «Спектр-Р» запущен в 2011 г. и продолжает работать и в настоящее время) с 10-метровой антенной. На сегодняшний день «Радиоастрону» принадлежит рекорд углового разрешения среди всех астрономических приборов, работающих в разных диапазонах спектра. На своих рабочих частотах «Радиоастрон» достиг рекордного углового разрешения, недоступного наземным интерферометрам.

При радионаблюдениях невозможно быстро строить детальные изображения источников, поскольку обычно на поле зрения телескопа приходится очень мало чувствительных элементов приемника. Поэтому для получения изображений необходимо или много наблюдений одной области, или использование сложных методик (например, метод апертурного синтеза).

Другой проблемой радиоастрономии традиционно считалось небольшое поле зрения инструментов. Это затрудняет поиск вспыхивающих и быстропеременных источников без триггеров в других диапазонах спектра (если они не наблюдаются одновременно вне радиодиапазона). В последние годы технический прогресс позволил существенно продвинуться в направлении быстрых обзоров неба

с достаточной чувствительностью, особенно на низких частотах. Примером является проект LOFAR (LOw Frequency ARray, Низкочастотная [антенная] решетка), созданный в начале XXI в. в Европе. Установка состоит из множества станций, раскиданных по всему континенту. Обработка данных с них проводится на суперкомпьютере и позволяет выполнять быстрые обзоры неба в диапазоне 10–240 МГц.

SKA станет крупнейшим радиоастрономическим инструментом в истории.

В настоящее время начинается реализация проекта SKA (Square Kilometer Array, Антенная решетка площадью в квадратный километр). Это самая большая и амбициозная радиоастрономическая установка, когда-либо создававшаяся человечеством. Часть антенн будет установлена в Южной Африке, а часть — в Австралии. Суммарная собирающая площадь составит один квадратный километр, что обеспечит невиданную ранее чувствительность к слабым источникам. Поскольку элементы установки размещены на огромной территории, будет достигнуто очень высокое угловое разрешение. Наконец, установка обладает довольно большим по радиоастрономическим меркам полем зрения. Планируется, что наблюдения на первой очереди установки начнутся в начале 2020-х гг., а вторая (окончательная) очередь заработает в конце 2020-х гг. Полная стоимость этого проекта превышает \$ 2 млрд.

Радиоастрономия — одно из немногих направлений исследований, где возможны не только пассивные (наблюдения), но и активные методы, такие как радиолокация. В 1960-е гг. активно начала развиваться радиолокация планет Солнечной системы, что позволило получить уникальные данные о рельефе Венеры, а также о строении подповерхностных слоев на Марсе и Меркурии. Особое место занимают радиолокационные исследования астероидов, позволяющие в ряде случаев определить форму этих тел.

13.5

Рентгеновские телескопы

Атмосфера Земли не пропускает рентгеновские лучи, поэтому наблюдения в этом диапазоне (на энергиях квантов примерно от 100 эВ до 100 кэВ, что соответствует длинам волн от 0,01 до 10 нм)

возможны только из космоса (или самой верхней атмосферы для самых больших энергий). Рентгеновское излучение солнечной короны было впервые зарегистрировано в конце 1940-х гг., причем детектор был установлен на трофейной ракете V-2 («Фау-2»), совершившей суборбитальный полет. Первый источник вне Солнечной системы — двойная система с аккрецирующей нейтронной звездой — тоже был открыт в результате запуска детекторов на ракете. Это произошло в 1962 г. в эксперименте, проводившемся Риккардо Джиаккони с коллегами. За свой вклад в развитие рентгеновской астрономии в 2002 г. Джиаккони получил Нобелевскую премию по физике. Наблюдения в рентгеновском диапазоне проводились также с помощью приборов на высотных аэростатах, однако для них доступным является лишь диапазон энергий выше 35 кэВ, поэтому основные открытия были сделаны с помощью космических аппаратов.

Рентгеновские наблюдения возможны только из космоса.

Рентгеновская астрономия занимает очень важное место в исследовании Вселенной, поскольку фотоны высокой энергии испускаются веществом в экстремальном состоянии. Это может быть тепловое излучение очень горячей плазмы с температурой в миллионы градусов и выше. Такая ситуация реализуется, например, в аккреционных дисках вокруг черных дыр и в скоплениях галактик. Именно рентгеновское излучение позволяет нам в прямом смысле видеть поверхность нейтронных звезд. Также источником рентгеновского излучения являются электроны высоких энергий при движении в магнитном поле, что происходит, например, в магнитосферах пульсаров и магнитаров. Наконец, существуют спектральные линии в рентгеновском диапазоне: например, известная К-линия железа на энергии 6,4 кэВ. Изучение таких линий в дисках вокруг черных дыр позволяет определять темп вращения этих объектов.

Рентгеновский диапазон — это излучение с длиной волны от 0,01 до 10 нм.

Поскольку фотоны рентгеновского излучения имеют большую энергию, детектирование существенно отличается от применяемого в оптической или радиоастрономии. В рентгеновском диапазоне доминируют квантовые свойства излучения, а не волновые. Рентгеновские лучи очень трудно фокусировать, поскольку коэффициент преломления большинства материалов для этого диапазона очень близок к единице, кроме того, рентгеновские лучи очень сильно поглощаются в веществе. Поэтому первые детекторы имели довольно низкую чувствительность и очень плохое угловое разрешение.

Самый простой тип детекторов рентгеновских лучей, применявшихся в астрономии, — это счетчики Гейгера и пропорциональные счетчики, основанные на производимой рентгеновскими фотонами ионизации газа. Для достижения хотя бы минимально разумного углового разрешения перед детектором устанавливались коллиматоры, пропускавшие излучение лишь с небольшого участка неба площадью несколько квадратных градусов. Инструменты на первой рентгеновской орбитальной обсерватории Uhuru («Ухуру») позволяли добиться разрешения около половины градуса. Однако каталог Uhuru включал всего лишь около трех сотен объектов, многие из которых удалось связать с источниками в других диапазонах. Поэтому даже небольшое угловое разрешение позволило начать активное изучение астрономических объектов в рентгеновском диапазоне.

Первый рентгеновский источник вне Солнечной системы открыт в 1962 г.

Другой тип приборов, которые используются для детектирования рентгеновских фотонов, называется сцинтилляционными детекторами. Рабочим телом в них являются, например, кристаллы йодида натрия (NaI) или йодида цезия (CsI). При попадании рентгеновского фотона в вещество детектора происходит ионизация, энергия образующихся электронов тем или иным способом возбуждает атомы или молекулы (механизм зависит от типа детектора), которые затем переизлучают в оптическом или УФ-диапазоне. Эти вспышки можно зарегистрировать с помощью обычных фотодетекторов.

Рентгеновские детекторы обычно регистрируют отдельные кванты.

Также в научных приборах применяются твердотельные полупроводниковые детекторы на основе германия или теллура и кадмия. Рентгеновские фотоны, попадая в полупроводник, порождают электронно-дырочные пары, которые можно зарегистрировать. Такие детекторы установлены, например, на европейском спутнике INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, Международная астрофизическая гамма-обсерватория, «Интеграл»), где для достижения хорошего углового разрешения используют кодирующую апертуру. Перед детектором устанавливается маска, состоящая из прозрачных и непрозрачных элементов, а анализ сложной теневой картины позволяет с высокой (для жесткого рентгеновского диапазона) точностью восстановить карту распределения источников в поле зрения.

Угловое разрешение в рентгеновском диапазоне даже с помощью простых приборов заметно выше, чем в гамма-диапазоне.

В частности, это позволило в конце 1990-х гг. решить загадку космических гамма-всплесков. Одновременная регистрация события в гамма- и рентгеновских лучах позволила получить достаточно точные координаты, которые были использованы для оптических наблюдений. Благодаря этому была идентифицирована галактика, в которой произошел всплеск, и тем самым подтверждена космологическая природа этого явления.

Зеркальные фокусирующие системы позволяют улучшить чувствительность и угловое разрешение рентгеновских телескопов.

Наконец, существует возможность использования фокусирующей оптики. Ее разработки начиная с 1960-х гг. проводили Риккардо Джиаккони и Бруно Росси (Bruno Rossi). В крупном масштабе она была впервые применена на спутнике HEAO-2 (High Energy Astrophysics Observatory, Высокоэнергетическая астрофизическая обсерватория, или Обсерватория «Эйнштейн»), запущенном в 1978 г. (до этого несколько небольших прототипов для солнечных наблюдений летали на спутниках и на борту орбитальной станции Skylab). Рентгеновские лучи не только плохо преломляются, но и плохо отражаются, поэтому используются зеркала косо́го падения — набор вложенных друг в друга конусообразных зеркал с металлическим напылением. Лучи, падающие под малым углом к зеркалу (практически параллельно его поверхности), могут отражаться и тем самым фокусироваться. Это позволяет достичь и высокой чувствительности, и высокого углового разрешения.

Начиная с 1970-х гг. рентгеновская астрономия активно развивалась в США и Европе, а также в СССР (России) и Японии, сейчас к исследованиям активно подключаются Индия и Китай. На текущий момент наиболее совершенными рентгеновскими обсерваториями являются американский спутник Chandra и европейский XMM-Newton (оба аппарата запущены в 1999 г.), где в качестве детекторов используются ПЗС-матрицы, работающие в рентгеновском диапазоне. Chandra является рекордсменом по угловому разрешению, а XMM-Newton — по собирающей поверхности.

В настоящее время разрабатываются новые подходы к созданию зеркал для рентгеновских наблюдений, поскольку существующая технология крайне дорогая, а рентгеновские зеркала являются очень тяжелыми: стоимость спутника Chandra превосходит \$ 1,5 млрд, а его масса составляет чуть менее 5 т.

Для использования фокусирующей оптики на более высоких энергиях понадобится система с большим фокусным расстоянием. Предполагается, что будущий космический телескоп будет состоять

из двух аппаратов, на одном из которых установлен блок оптики, а на втором — детекторы. Прототипом такой установки является находящийся на орбите спутник NASA NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope ARray, Массив ядерных спектроскопических телескопов), в котором две части соединены раздвижной фермой. Реализация двухаппаратной концепции в случае свободного полета потребует решения ряда сложных технических проблем.

Рентгеновские наблюдения позволяют достаточно быстро покрывать большую площадь неба (если речь не идет о наблюдениях с фокусирующей оптикой), что способствует проведению обзорных наблюдений и поиску транзитных (вспыхивающих) объектов. К числу недавних важных открытий следует отнести обнаружение приливного разрушения звезд сверхмассивными черными дырами и регистрацию рентгеновских вспышек при выходе ударной волны сверхновой из оболочки звезды.

Рентгеновские наблюдения будут использованы для космической навигации.

В рентгеновском диапазоне наблюдают не только далекие объекты, но и тела Солнечной системы. Поверхность Луны переизлучает солнечные рентгеновские лучи за счет флуоресценции. Также благодаря флуоресценции рентгеновскими источниками являются Марс и Венера. Кометы испускают рентгеновские фотоны в процессе так называемой перезарядки, когда электрон перескакивает от нейтрального атома к иону солнечного ветра. Юпитер своим мощным магнитным полем может удерживать частицы достаточно высоких энергий, являющихся источниками рентгеновских фотонов.

Сейчас рентгеновская астрономия начинает приобретать практическое значение. Во всех ведущих космических агентствах мира идут активные разработки систем ориентации и навигации спутников по наблюдениям пульсаров в рентгеновском диапазоне. Для проверки этой технологии на орбиту уже запущен китайский спутник XPNAV-1, а на борту МКС (Международной космической станции) установлена система SEXTANT (Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology, Прибор для исследования технологии навигации с использованием рентгеновского излучения пульсаров) в составе инструмента NICER (Neutron star Interior Composition Explorer, Прибор для исследования внутреннего состава нейтронных звезд). Такой подход позволит аппаратам, совершающим полеты к другим телам Солнечной системы, проводить точное определение своего положения и скорости без связи с Землей.

К числу ближайших приоритетных задач для рентгеновской астрономии можно отнести исследования черных дыр и нейтронных звезд, а также изучение скоплений галактик.

13.6

Гамма-телескопы на Земле и в космосе

К гамма-диапазону относят электромагнитное излучение с энергией квантов выше 100 кэВ. Энергия гамма-квантов слишком велика, чтобы они могли рождаться в тепловых процессах. Однако во Вселенной происходит много явлений, сопровождающихся гамма-излучением: в частности, это могут быть процессы перехода ядер атомов из возбужденных состояний и аннигиляция частиц, а также процессы с большим выделением энергии, ударными волнами и релятивистскими движениями, примером чего могут служить космические гамма-всплески.

Гамма-лучи имеют энергию квантов выше 100 кэВ.

Астрономические исследования в этой области спектра можно разделить на две группы: непосредственная регистрация гамма-лучей с помощью приборов, установленных на космических аппаратах, и наземная регистрация путем детектирования вторичного излучения или вторичных частиц. Поскольку количество гамма-квантов уменьшается с ростом энергии, космические проекты с прямой регистрацией позволяют регистрировать гамма-излучение более низких энергий (до сотен гигаэлектронвольт), а излучение более высоких энергий регистрируется косвенными методами с помощью наземных установок.

На космических аппаратах применяют разные типы детекторов. Детекторы гамма-квантов низких энергий аналогичны применяющимся в рентгеновской астрономии. Например, прибор IBIS на борту обсерватории INTEGRAL работает в диапазоне от 15 кэВ (рентген) до 10 МэВ (гамма). Этот детектор состоит из кадмий-теллуровых элементов, а для повышения углового разрешения используется метод кодирующей апертуры с маской из вольфрама. В экспериментах «Конус» по изучению гамма-всплесков (эти исследования начались еще в 1970-х гг. с приборов на межпланетных станциях «Венера 11–14») используются сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов NaI.

При более высоких энергиях начинают применяться другие методы. Гамма-квант высокой энергии, провзаимодействовав со слоем фольги (например, вольфрамовой), порождает электрон-позитронную пару. Дальнейшая регистрация основана на отслеживании трека этих

частиц и измерения их энергии. Например, в детекторе LAT на борту космической обсерватории Fermi электроны и позитроны проходят через слои кремния, что позволяет определить направление исходного фотона, а затем поглощаются кристаллом CsI, что дает возможность измерить энергию фотона. Угловое разрешение таких приборов сильно зависит от энергии фотона; в случае LAT для фотонов с энергией 100 ГэВ угловое разрешение может достигать 0,04 градуса, а на энергиях 100 МэВ оно составляет лишь 3 градуса.

Гамма-излучение можно регистрировать напрямую с помощью приборов на борту космических аппаратов.

В различных экспериментах использовались и другие типы детекторов. Они определяются не только рабочей энергией, но и массой аппарата, стоимостью, энергопотреблением и другими факторами. В будущем на спутниках планируют устанавливать время-проекционные камеры (проекты AdEPT, HARPO). Такие приборы используют в ускорительных экспериментах, таких как ALICE на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

Наземные установки регистрируют атмосферное черенковское излучение или вторичные частицы, порожденные гамма-квантами.

Фотоны с энергией порядка тераэлектронвольт регистрируются с помощью наземных установок. Попадая в земную атмосферу, фотон высокой энергии порождает поток вторичных частиц, в частности электронов и позитронов. Они, в свою очередь, двигаясь со скоростью, превышающей скорость света в воздухе, испускают черенковское излучение в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах. Именно оно и регистрируется телескопами.

Для регистрации оптических вспышек используют специализированные телескопы-рефлекторы и их системы с зеркалами (обычно сегментированными) размерами около 10 м. Поскольку для таких наблюдений не нужно высокое угловое разрешение и хорошее качество изображения, эти телескопы устроены гораздо проще аналогичных установок для оптической астрономии (соответственно, при том же диаметре зеркала они намного дешевле). Примерами подобных наземных крупных установок для гамма-астрономии являются MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes, Большой атмосферный черенковский гамма-телескоп, Канарские острова), H. E. S. S. (High Energy Stereoscopic System, Стереоскопическая система для регистрации [частиц] высоких энергий, Намибия) и VERITAS (Very

Energetic Radiation Imaging Telescope Array System, Массив телескопов для регистрации радиации очень высоких энергий, Аризона, США).

Наземные гамма-телескопы позволяют достигать хорошего (по меркам астрономии высоких энергий) углового разрешения в доли градуса. Однако для регистрации астрономических источников необходимо длительное время наблюдений. При малом поле зрения (около 5 градусов) и возможности проводить полноценные наблюдения лишь в очень темные безлунные ночи (около 10% времени) для обзорных наблюдений требуется очень много времени. Тем не менее за несколько лет обзор галактической плоскости с помощью телескопа H. E. S. S. позволил обнаружить десятки источников: в первую очередь пульсарные туманности, остатки сверхновых и двойные системы (несколько десятков источников еще остаются неидентифицированными).

Однако наблюдать фотоны самых высоких энергий (десятки тераэлектронвольт и выше) оказывается затруднительно (их просто крайне мало). Так, например, за 24 часа чистого времени наблюдений Крабовидной туманности (яркого источника!) установка H. E. S. S. регистрирует лишь несколько фотонов с энергиями выше 30 ТэВ. Поэтому для ультравысоких энергий пытаются применять другую методику наблюдения атмосферного черенковского излучения. Этот способ не позволяет напрямую получать изображения, однако с помощью обработки сигнала можно определить направление на источник. Метод состоит в том, что на большой площади (десятки или в будущем даже сотни квадратных километров) размещаются чувствительные фотоумножители, регистрирующие атмосферное черенковское излучение. Именно так работает, например, установка «Тунка-HiSCORE» (Hundred Square-km Cosmic ORigin Explorer, Прибор для исследования частиц космического происхождения площадью в сто квадратных километров), расположенная в Тункинской долине вблизи озера Байкал.

Известно более сотни источников на энергиях выше 1 ТэВ.

Другой тип наземных установок регистрирует сами вторичные частицы, порожденные гамма-квантами в атмосфере. Водяные черенковские детекторы представляют собой цистерны, заполненные водой. При попадании в них электроны испускают черенковское излучение, регистрируемое фотоумножителями. Угловое разрешение таких установок невелико, зато они могут работать практически постоянно и получают данные о фотонах очень высоких энергий.

Обсерватория HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory, Высокогорная водная черенковская обсерватория, Мексика) состоит из нескольких сотен емкостей, каждая из которых содержит по 188 т воды. Она позволяет регистрировать фотоны с энергиями

до 100 ТэВ (почти в миллион миллиардов раз выше энергии красных фотонов видимой части спектра).

Существуют и другие методики регистрации вторичных частиц. Например, сцинтилляционные детекторы установки Tibet-III или счетчики с резистивными платами (resistive plate counters) установки ARGO-YBJ (Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing, Наземная обсерватория астрофизической радиации в Янбацзине). Однако пока они менее эффективны.

Отдельное место в гамма-астрономии занимают космические гамма-всплески. Они были открыты в 1967 г. с помощью американских спутников-разведчиков Vela (название происходит от испанского *vela* — нести дозор), предназначенных для слежения за ядерными испытаниями. Из-за плохого углового разрешения в гамма-диапазоне до 1997 г. не удавалось даже определить, на каких расстояниях они происходят. Одновременная регистрация гамма- и рентгеновского излучения от одного из всплесков приборами, установленными на борту итало-голландского спутника BeppoSAX (Beppo — в честь итальянского физика Джузеппе Оккиалини (Giuseppe Occhialini), Satellite per Astronomia a raggi X — Спутник для рентгеновской астрономии), позволила определить достаточно точные координаты события. В результате удалось провести оптические наблюдения на крупных телескопах, был открыт транзиентный оптический источник в далекой галактике, и подтвердилась гипотеза космологического происхождения гамма-всплесков.

Космические гамма-всплески связаны со слияниями нейтронных звезд и со вспышками особого типа сверхновых.

Гамма-всплески делят на два типа. Короткие (обычно короче нескольких секунд) связывают со слияниями нейтронных звезд, а длинные (до нескольких часов) — со взрывами массивных звезд с быстро вращающимися ядрами. В год наблюдается несколько сотен гамма-всплесков, это одни из самых мощных взрывных процессов, происходящих в настоящее время во Вселенной.

Поиск аннигиляции частиц темного вещества — перспективная задача гамма-астрономии.

Хотя обычно основная энергия всплеска приходится на диапазон энергий до 1 МэВ, для некоторых всплесков были получены данные и на гораздо больших энергиях — вплоть до нескольких гигаэлектронвольт. Детали механизма излучения гамма-всплесков остаются неясными, поэтому здесь необходимы новые наблюдения, в том числе и на очень высоких энергиях.

Количество известных гамма-источников (не считая космических гамма-всплесков и солнечных вспышек) составляет сейчас несколько тысяч. Однако в основном они обнаружены спутником Fermi на энергиях ниже 300 ГэВ. С ростом энергии число известных источников уменьшается, среди них много неидентифицированных объектов. Большинство идентифицированных гамма-источников относится или к пульсарам, или к активным ядрам галактик, и дальнейшие наблюдения помогают лучше понять эти типы источников и механизмы генерации излучения в них. Возможно, самой перспективной задачей гамма-астрономии является обнаружение аннигиляционного сигнала от темного вещества. Во многих моделях предсказывается, что частицы, составляющие темную материю, могут аннигилировать друг с другом, порождая гамма-кванты. Обнаружение аннигиляционного гамма-сигнала было бы прямым доказательством существования этой составляющей нашей Вселенной.

13.7

Детекторы нейтрино

Нейтрино — это легкие незаряженные частицы, относящиеся к лептонам. Известно три типа нейтрино: электронные, мюонные и тау, все типы нейтрино имеют античастицы. Эти частицы относятся к самым фундаментальным — они входят в Стандартную модель элементарных частиц. С другой стороны, обнаружение массы у нейтрино и открытие нейтринных осцилляций (в некотором смысле превращение одного типа нейтрино в другой) является важнейшим доказательством неполноты Стандартной модели.

Нейтрино — фундаментальные элементарные частицы, участвующие в слабом взаимодействии.

Нейтрино очень плохо взаимодействуют с веществом, потому что не имеют электрического заряда, а также не участвуют в сильном ядерном взаимодействии. С одной стороны, это делает частицу трудноуловимой, с другой — позволяет ей беспрепятственно покидать области с высокой плотностью вещества или находящиеся внутри массивных объектов. Нейтрино в большом количестве возникают в термоядерных реакциях в недрах звезд (в том числе Солнца) и при вспышках сверхновых. Именно для регистрации таких нейтрино и создавались

первые детекторы. Обе задачи — регистрация солнечных нейтрино и нейтрино от сверхновых — были успешно решены.

Нейтрино рождаются в термоядерных реакциях в недрах звезд и при вспышках сверхновых.

Впервые нейтрино были зарегистрированы в 1956 г. (впоследствии это было отмечено Нобелевской премией) в экспериментах на ядерном реакторе. Однако было ясно, что протекание термоядерных реакций в недрах Солнца делает его довольно мощным источником нейтрино. Рэй Дэвис, Джон Бакал (John Bahcall) и их коллеги, используя в качестве основы идею Бруно Понтекорво, создали первый детектор астрофизических нейтрино в 1968 г. За эту работу Рэй Дэвис как руководитель эксперимента в 2002 г. получил Нобелевскую премию по физике.

Идея детектора основана на реакции, в которой хлор-37 (^{37}Cl) захватывает электронное нейтрино. В результате бета-распада один из нейтронов в его ядре превращается в протон с испусканием электрона, и хлор-37 превращается в аргон-37 (^{37}Ar) — радиоактивный изотоп с периодом полураспада 35 дней. Для эксперимента берется большой объем хлорсодержащего вещества (в эксперименте Дэвиса это был перхлорэтилен), а спустя некоторое время из него извлекается аргон-37, количество которого соответствует прошедшим в объеме детектора взаимодействиям нейтрино с хлором. Чтобы избежать нежелательных фоновых событий, приводящих к появлению изотопа аргона-37, необходимо изолировать детектор от влияния космических лучей, для чего его устанавливают в глубокой шахте.

Эксперимент Дэвиса удался — в детекторе был обнаружен аргон-37. Однако его количество оказалось примерно втрое ниже ожиданий, основанных на модели Солнца, что породило *проблему солнечных нейтрино*. Эта проблема была решена через несколько десятков лет благодаря открытию процесса нейтринных осцилляций, в ходе которого нейтрино одного сорта (например, электронные), можно сказать, превращаются в другие сорта — мюонные и тау-нейтрино (подробнее о нейтринных осцилляциях см. раздел 1.2 «Реакции в Солнце. Нейтрино»).

Солнечные нейтрино были зарегистрированы в 1968 г.

Успех регистрации солнечных нейтрино и появление интереснейшей загадки их дефицита стимулировали создание нескольких установок для регистрации этих частиц. Основным циклом реакций синтеза гелия в Солнце является протон-протонная цепочка (pp-цикл), состоящая из нескольких реакций, некоторые из которых

идут с испусканием нейтрино. Эксперимент Дэвиса был чувствителен в первую очередь к нейтрино с самой высокой энергией — несколько мегаэлектронвольт (так называемым борным, см. раздел 1.2 «Реакции в Солнце. Нейтрино»). Новые эксперименты чувствительны и к нейтрино меньших энергий, однако лишь в 2014 г. на установке Borexino («Борексина») были зарегистрированы солнечные нейтрино с самыми низкими энергиями, возникающие в самой первой реакции рр-цикла — взаимодействии двух протонов.

Существует несколько методов регистрации астрофизических нейтрино. Основными являются радиохимический, сцинтилляционный, черенковский, а также эффект Аскарьяна.

Borexino — подземный детектор, расположенный в национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии. Его рабочий объем заполнен жидким органическим сцинтиллятором. Электронные нейтрино упруго рассеиваются на электронах, передавая им часть энергии, а движение электронов в сцинтилляторе приводит к излучению фотонов, которые можно зарегистрировать. Взаимодействие антинейтрино с протонами в ядрах может привести к обратному бета-распаду и рождению позитрона, который также регистрируется сцинтилляционным детектором. Есть и другие способы регистрации быстро движущихся заряженных частиц, которые применяются в различных нейтринных детекторах.

В детекторе Super-Kamiokande рабочим телом является вода, заполняющая огромную цистерну. Рассеиваясь на электронах, нейтрино передает им энергию, а электроны, двигаясь быстрее скорости света в воде, испускают черенковское излучение, которое регистрируется фотоумножителями, покрывающими стенки цистерны. По черенковскому излучению Super-Kamiokande может регистрировать и мюоны, порожденные взаимодействием мюонных нейтрино с веществом Земли (кстати, за открытие мюонных нейтрино в свое время также была присуждена Нобелевская премия). Это важно, например, для регистрации так называемых атмосферных нейтрино, возникающих при взаимодействии частиц космических лучей с нашей воздушной оболочкой, и изучения нейтринных осцилляций.

Super-Kamiokande может установить и направление прихода нейтрино, что дает возможность точно определить, что их источник — Солнце (источником мог бы быть и какой-то другой объект, например вспышка сверхновой в нашей Галактике или какие-то другие источники).

Правда, пока единственным (кроме Солнца) зарегистрированным астрофизическим источником нейтрино стала сверхновая SN 1987A, вспыхнувшая в 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке.

Несколько нейтрино от этого события были зарегистрированы с помощью установок Kamiokande II («Камиоканде II», предшественник Super-Kamiokande), другого водного черенковского детектора IMB (Irvine Michigan Brookhaven, США) и детектора SAGE (Soviet-American Gallium Experiment, Советско-американский эксперимент с галлием) Баксанской нейтринной обсерватории на Северном Кавказе (также на несколько часов раньше сработал сцинтилляционный детектор под Монбланом, однако до сих пор продолжаются дискуссии о природе этого «лишнего» нейтринного всплеска).

В 1987 г. были зарегистрированы нейтрино от вспышки сверхновой в Большом Магеллановом Облаке.

Баксанский детектор, как и эксперимент Дэвиса, использует радиохимический метод регистрации нейтрино, но рабочим элементом является не хлор, а галлий (^{71}Ga). Взаимодействуя с нейтрино, галлий-71 превращается в радиоактивный германий-71 (^{71}Ge), этот метод позволяет регистрировать нейтрино более низких энергий, чем в экспериментах с хлором. Германий можно выделить из рабочего тела химическими методами, и его распад позволяет точно измерить количество атомов, синтезированных в реакциях с нейтрино.

Нейтрино слабо взаимодействуют с веществом, поэтому для их регистрации нужны детекторы больших размеров, особенно если речь идет о регистрации нейтрино высоких энергий (таких частиц мало). Самым перспективным подходом считается использование черенковских детекторов с рабочим телом в виде естественного объема воды. В рамках этого подхода, предусматривающего создание детектора объемом 1 км^3 , развиваются три направления: морские детекторы, пресноводные детекторы и детекторы в Антарктическом ледяном щите.

Для регистрации нейтрино высоких энергий создаются гигантские водные черенковские детекторы.

Пресноводный детектор реализуется в озере Байкал: на множестве тросов, опускаемых в воду, располагаются оптические модули с фотоумножителями, которые регистрируют вспышки черенковского излучения заряженных частиц. Этот принцип регистрации аналогичен другим водным черенковским детекторам (таким, например, как Super-Kamiokande). Преимуществом озерной пресной воды является низкий световой фон из-за небольшого количества микроорганизмов (биолюминисценция) и радиоактивности растворенных солей, а также более спокойная обстановка (отсутствие сильного волнения). Тем не менее установки можно строить и в морях: европейские ученые

развивают несколько проектов, целью которых является создание километрового детектора в водах Средиземного моря.

В настоящее время крупнейший нейтринный детектор — IceCube («Ледовый куб»), работающий в Антарктиде. Он является развитием проекта AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array, Антарктический массив мюонных и нейтринных детекторов), и его объем составляет примерно кубический километр. В 2013 г. было объявлено о первой регистрации нескольких десятков событий, и, несмотря на то что установка IceCube позволяет определять направления прихода зарегистрированных нейтрино, происхождение этих частиц остается неясным.

Крупнейший нейтринный детектор IceCube зарегистрировал несколько десятков событий, связанных с нейтрино высоких энергий. Происхождение этих частиц остается загадкой.

Принцип работы IceCube аналогичен водным черенковским детекторам. Нейтрино взаимодействуют с молекулами воды, что приводит к появлению заряженных частиц (электронов, мюонов или тау-лептонов), движущихся с высокой скоростью и испускающих черенковское излучение (мюоны могут порождаться нейтрино и не в воде, а при взаимодействии частиц с Землей, но они тоже будут зарегистрированы). Для работы установки существенно, что при высоком давлении, достигаемом на глубине более километра, лед достаточно прозрачен для света. Сеть фотоумножителей, размещенных на кабелях, опускается в скважины во льду на глубину до 2,5 км. Детектор состоит из 86 таких кабелей, на каждом из которых размещено по 60 оптических модулей с фотоумножителями, расстояние между кабелями составляет 125 м, в результате просматривается объем порядка кубического километра.

Существует модификация водного черенковского детектора, чувствительная к нейтрино всех типов. Обсерватория Sudbury в Канаде использует детектор, содержащий около 1000 т тяжелой воды D₂O (стоимость воды составила около трети миллиарда канадских долларов). Эта установка помогла не только окончательно решить проблему дефицита солнечных нейтрино, но и внесла ключевой вклад в изучение нейтринных осцилляций.

Наконец, существует еще один способ регистрации нейтрино высоких энергий, основанный на эффекте Аскарьяна, предложенном в 1962 г. и проверенном в самом конце XX в. в ускорительных экспериментах. Нейтрино, распространяясь с высокой скоростью в среде, порождают каскад частиц, которые становятся источниками излучения, подобного черенковскому. Только в случае нейтрино и, скажем, льда

в качестве среды распространения испускаются в основном радиоволны. На этом принципе основано несколько установок по поиску нейтрино. Антенны детектора RICE (Radio Ice Cherenkov Experiment, Черенковский ледовый радиоэксперимент) были установлены над установкой AMANDA, планируется установка новых антенн на детекторе IceCube. А в случае детектора ANITA (Antarctic Impulsive Transient Antenna, Антарктическая импульсная антенна) антенны были расположены на аэростате, летавшем над Антарктикой. Такие детекторы чувствительны к нейтрино самых высоких энергий (выше 10^{15} эВ), однако пока они не зарегистрировали ни одного события.

Нейтринные установки позволили решить несколько задач в астрофизике и фундаментальной физике, а также поставили новые. Во-первых, благодаря регистрации солнечных нейтрино было подтверждено, что источником энергии Солнца являются именно термоядерные реакции. Более того, после решения проблемы солнечных нейтрино путем обнаружения существования нейтринных осцилляций (с помощью тех же нейтринных детекторов) и после регистрации нейтрино от pp-реакции мы имеем возможность напрямую изучать темп различных реакций в недрах Солнца. Во-вторых, регистрация нейтрино от сверхновой SN 1987A подтвердила модель коллапса ядра для объяснения этого явления. В-третьих, теперь мы знаем, что существуют космические нейтрино сверхвысоких энергий (хотя пока не знаем, что же является их источниками).

13.8

Детекторы космических лучей

Космические лучи — это потоки частиц (электронов, протонов и более тяжелых ядер, а также их античастиц), распространяющихся в космическом пространстве. Обычно к космическим лучам не относят частицы солнечного происхождения, нейтрино и фотоны высоких энергий. Частицы с энергиями до примерно 10^{16} эВ, вероятнее всего, ускоряются в остатках сверхновых нашей Галактики, а частицы более высоких энергий (это уже исключительно протоны, другие ядра и их антипартнеры) не могут долгое время удерживаться магнитным полем Галактики, а потому должны иметь по большей части внегалактическое происхождение.

Поток космических лучей довольно велик (они даже играют важную роль в динамике межзвездной среды и в происхождении

некоторых легких элементов), однако с ростом энергии количество частиц быстро уменьшается. Если на относительно низких энергиях порядка нескольких гигаэлектронвольт космический детектор AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer, Магнитный альфа-спектрометр), установленный на борту Международной космической станции, регистрирует по миллиарду частиц в месяц, то частицы самых высоких энергий регистрируются единицами в год на площади в сотню квадратных километров. Правда, и энергии у таких частиц гигантские, в сотни миллионов раз превосходящие достигнутые на Большом адронном коллайдере (это уже вполне макроскопические величины — такую энергию имеет летящий теннисный мяч, пущенный профессиональным спортсменом!). Поэтому частицы с энергиями до сотен гигаэлектронвольт (иногда даже до десятков тераэлектронвольт) можно изучать непосредственно с помощью космических аппаратов или в баллонных экспериментах (т. е. с помощью приборов, установленных на борту аэростатов), а на больших энергиях работают лишь косвенные методы наземной регистрации вторичных частиц и излучения. Многие методы регистрации космических лучей родственны применяемым для исследования гамма-лучей.

Космические лучи — потоки заряженных частиц, в основном протонов.

Для регистрации различных характеристик космических лучей (энергия, направление, заряд, масса) используют различные методы, многие из которых были изначально опробованы в физике элементарных частиц. Собственно, изначально именно исследования космических лучей были основным способом изучения элементарных частиц (и позитроны, и мюоны были открыты именно в результате таких наблюдений).

Максимальная энергия зарегистрированных частиц превышает 10^{20} эВ.

Первичные (космические) заряженные частицы практически не достигают поверхности Земли, поэтому для их прямой регистрации необходимо поднять приборы над плотными слоями атмосферы. Именно так, по итогам наблюдений с воздушного шара, Виктор Гесс (Victor Hess) и открыл в 1912 г. космические лучи, заметив, что по мере подъема поток частиц возрастает.

Космические (и баллонные) эксперименты имеют существенные ограничения по массам и размерам, зато они позволяют определять параметры частиц напрямую непосредственно в детекторе. Для измерения энергии частиц обычно используют сцинтилляторы: частица

поглощается слоем вещества, а вся ее энергия переходит в оптическую вспышку, регистрируемую фотодетектором.

Частицы с энергией до 10^{14} эВ исследуют из космоса.

Для измерения заряда и массы лучше устанавливать постоянные магниты, как это сделано в экспериментах PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics, Нагрузка по исследованию антивещества и астрофизики легких ядер) на борту спутника «Ресурс-ДК» и AMS-02 на МКС. Заряженные частицы отклоняются магнитным полем: положительно заряженные — в одну сторону, отрицательно заряженные — в другую, кривизна трека (траектории) при этом зависит от массы частицы и величины заряда.

Измерения позволяют определить энергию, заряд и массу частицы, а также направление движения.

Для определения направления движения частиц разработано множество методов. В космических экспериментах используются детекторы, состоящие из большого количества слоев (решеток), реагирующих на пролет частицы элементов. Зная, какие элементы сработали и в каком порядке, можно восстановить траекторию движения частицы.

Частицы высоких энергий достаточно редки, и для их регистрации потребовались бы слишком большие космические аппараты. Поэтому их регистрируют иначе: рабочим телом детектора в этом случае является атмосфера Земли.

При попадании высокоэнергичного протона (или более тяжелого ядра) возникает каскад частиц, который называют *широким атмосферным ливнем*. Влетая в атмосферу, протон сталкивается с молекулами газов, в результате их взаимодействия в первую очередь рождаются нейтральные пионы — так называемые пи-мезоны (также рождаются К-мезоны — каоны, которые быстро распадаются на пионы). Они распадаются, давая рождение фотонам высоких энергий, которые, в свою очередь, рожают электрон-позитронные пары. Электроны и позитроны, взаимодействуя с заряженными частицами, испускают фотоны высоких энергий, кроме того, идет процесс ионизации атомов, что поставляет дополнительные электроны. В результате всех этих процессов возникает так называемый электромагнитный каскад, его фотонную составляющую можно наблюдать с помощью наземных детекторов.

Детекторами излучения могут быть как фокусирующие зеркала, так и просто фотоумножители. Кроме прямого черенковского излучения каскада существует «воздушная флуоресценция», хотя точнее было бы называть это люминесценцией. Это явление состоит

в том, что частицы возбуждают молекулы азота, которые высвечивают энергию возбуждения, это излучение также регистрируется наземными установками и позволяет изучать частицы самых высоких энергий.

Наземные наблюдения сводятся к регистрации вторичных частиц и излучения.

В результате столкновения частиц высокой энергии с атмосферными частицами также рождаются заряженные пионы, которые в основном распадаются на мюоны и нейтрино, достигающие поверхности Земли. Детектирование вторичных мюонов с помощью сцинтилляционных или водных черенковских детекторов часто используется для исследования космических лучей.

Более экзотический способ, пока не получивший широкого распространения, состоит в регистрации радиоволн от широких атмосферных ливней. Это низкочастотное (десятки мегагерц) излучение возникает при распространении электромагнитного каскада (электронов и позитронов) в магнитном поле Земли. Его существование было предсказано и продемонстрировано еще в середине 1960-х гг., однако лишь в последнее время начались серьезные попытки использовать этот метод в качестве существенного дополнения более традиционных подходов (наблюдение черенковского излучения и «воздушной флуоресценции», а также регистрация вторичных мюонов).

Преимущества косвенной регистрации состоят в том, что можно регистрировать очень редкие частицы сверхвысоких энергий — до 10^{21} эВ. Чтобы набрать большую статистику, необходимо охватывать по возможности большую площадь. В настоящее время наиболее крупным проектом является обсерватория имени Пьера Оже (Pierre Auger) в Аргентине с площадью установки около 3000 км^2 . В обсерватории используется гибридная система регистрации: по всей территории расположено около 1600 черенковских водных детекторов для регистрации мюонов, и всю эту площадь осматривают 24 телескопа, сгруппированные в четыре наблюдательные станции и регистрирующие черенковское излучение и атмосферную флуоресценцию.

Именно благодаря обсерватории Оже удалось получить достаточно большую статистику частиц с энергиями выше 10^{19} эВ, чтобы подтвердить их внегалактическое происхождение. Однако источник этих частиц до сих пор остается неясным, хотя рассматриваются возможности ускорения частиц в космических гамма-всплесках, активных ядрах галактик и в ударных волнах в скоплениях галактик.

Одной из проблем определения природы этих «космических ускорителей» является невозможность узнать точное направление на источник. Это связано не со сложностями детектирования частиц, а с особенностями их распространения. Дело в том, что заряженные

частицы испытывают влияние со стороны магнитного поля, и траектории частиц с энергиями до 10^{15} – 10^{17} эВ оказываются сильно запутанными уже галактическими магнитными полями (поэтому они проводят долгое время внутри нашей Галактики). При бóльших энергиях частицы лишь слабо отклоняются полем Галактики, но, распространяясь в течение миллионов или даже миллиардов лет в межгалактической среде, испытывают отклоняющее воздействие слабых межгалактических полей. В итоге зарегистрированное направление может отличаться от исходного на несколько градусов, что исключает точную локализацию.

Обсерватория Оже — крупнейшая современная установка для изучения космических лучей.

Другой проблемой изучения частиц самых высоких энергий является невозможность точного измерения энергии и определения природы частицы. Регистрация широкого атмосферного ливня не позволяет надежно определить, был ли он вызван протоном, ядром гелия, кислорода или даже железа. Определение энергии основывается на использовании компьютерных моделей, которые позволяют связать свойства детектируемых вторичных частиц или излучения с энергией материнской частицы, но точность этого не очень велика (особенно при наблюдении «воздушной флуоресценции»). Поэтому для изучения стараются одновременно использовать разные методы (оптика, регистрация мюонов, радиоволны).

Частицы с энергией выше 10^{16} – 10^{17} эВ в основном имеют внегалактическое происхождение.

В астрофизике космических лучей существует еще много нерешенных проблем. Кроме вопросов происхождения частиц сверхвысоких энергий и точного измерения их свойств сюда можно отнести проблему происхождения избытка позитронов, обнаруженного установкой PAMELA, многие вопросы, связанные с ускорением частиц в галактических источниках, а также гипотетическую возможность регистрации частиц странного (кваркового) вещества.

Для решения проблем планируется создание новых установок — и космических проектов (в том числе на МКС), и наземных обсерваторий. Крупной наземной установкой по оптическому наблюдению широких атмосферных ливней должен стать проект Cherenkov Telescope Array (СТА, Сеть черенковских телескопов), в первую очередь предназначенный для гамма-астрономии. В рамках этого проекта планируется построить две обсерватории в северном и южном полушариях, чтобы охватить все небо. В настоящее время в северном

полушарии, в штате Юта, работает установка Telescope Array (ТА, Сеть телескопов) площадью 700 км², которая является аналогом обсерватории Оже. В ней также использована гибридная система регистрации: 500 наземных сцинтилляционных детекторов и три станции для оптических наблюдений черенковского излучения и «воздушной флуоресценции». В России планируется запуск спутника «Гамма-400», а также идут работы по развитию проекта «Тунка» вблизи озера Байкал.

Существуют проекты регистрации оптического излучения широких атмосферных ливней из космоса. В этом случае можно будет просматривать колоссальную площадь (десятки процентов площади Земли), что позволило бы регистрировать редкие частицы еще бóльших энергий (если они существуют).

13.9

Детекторы гравитационных волн

Гравитационные волны — это распространяющиеся колебания гравитационного поля, предсказанные Эйнштейном в двух работах 1916 и 1918 гг. Поскольку общая теория относительности — это геометрическая теория гравитации, то часто говорят, что гравитационные волны — это волны пространства-времени.

Гравитационные волны испускаются ускоренно движущимися объектами. Однако для этого подходят не все виды движения: скажем, вращающийся идеальный шар не будет источником гравитационных волн, как и цилиндр, вращающийся вокруг своей оси, а вот вращающееся вытянутое тело вроде мяча для регби (при вращении вокруг одной из своих коротких осей) генерирует гравитационные волны. Гравитационные волны могут также излучаться и при пульсационных изменениях формы тела (но она опять же не должна быть идеально симметричной).

Скорость гравитационных волн в общей теории относительности равна световой. Как и другие волны, гравитационные обладают частотой и длиной волны (эти величины, как и у любых волн, связаны между собой). Частота волн связана с характеристиками источника (например, с частотой вращения или пульсаций).

В астрофизике существует несколько потенциальных достаточно мощных источников гравитационных волн. Самые длинные

волны связаны с процессами в ранней Вселенной на стадии инфляции. Их максимальная длина волны по порядку величины соответствует размеру видимой части Вселенной, а минимальная частота обратна ее возрасту. Далее заметный фон гравитационного излучения могут составлять двойные звезды в нашей Галактике, а также пары сверхмассивных черных дыр в центрах далеких галактик. Слияния сверхмассивных черных дыр должны порождать гравитационно-волновые всплески, длина волны при этом будет составлять примерно от долей (1 а. е. = 150 млн км) до сотни, а частота — от нескольких до долей миллигерц в зависимости от масс сливающихся дыр.

Сильными астрофизическими источниками гравитационных волн в первую очередь являются сливающиеся черные дыры и нейтронные звезды.

Черные дыры звездных масс при слиянии дают всплески на частоте от десятков до сотен герц. Чем больше масса, тем ниже частота, поскольку у черных дыр размер прямо пропорционален массе, а значит, с ростом массы растут периоды обращения прямо перед слиянием и длина испускаемой волны. Сливающиеся нейтронные звезды должны давать основной сигнал на частоте около 1 кГц. Именно под такие события — слияния компактных объектов звездных масс — проектировались наземные лазерные интерферометры LIGO и Virgo (и именно такие сигналы удалось уловить в сентябре 2015 г. и позже). Наконец, взрывы сверхновых могут давать сигнал на частоте в несколько килогерц.

Регистрация гравитационных волн разной длины требует разных подходов. Сейчас разработано шесть методов для наблюдения гравитационных волн, три из них являются непосредственными, а три — косвенными. Однако, прежде чем перейти к методам обнаружения, напомним, откуда взялась уверенность в самом существовании гравитационных волн.

Первые детекторы гравитационных волн начали строить в 1960-е гг. Это были резонансные антенны.

В 1975 г. Рассел Халс (Russel Hulse) и Джозеф Тейлор (Joseph Taylor) открыли необычный радиопульсар, входящий в состав двойной системы, состоящей из двух нейтронных звезд. По мере обращения вокруг общего центра масс такая система за счет излучения гравитационных волн теряет довольно много энергии. Поймать эти волны сложно, но зато можно увидеть последствия их излучения: ведь волны уносят импульс и энергию, и поэтому орбитальный период системы сокращается. Анализ результатов наблюдений этой системы

показал, что ее поведение прекрасно описывается в рамках ОТО (за эти работы Халс и Тейлор были удостоены Нобелевской премии по физике). Это является подтверждением того, что система испускает гравитационные волны.

На самом деле поиски гравитационных волн начались еще раньше, в 1960-х гг., когда Джозеф Вебер (Joseph Weber) начал строить первые детекторы — так называемые резонансные антенны. Гравитационная волна оказывает на тело или систему тел действие, соответствующее приливному. Если у нас есть, например, кусок металла, то под действием волны он начнет вибрировать, и на некоторой (резонансной) частоте это вызовет достаточно сильный эффект, который можно измерить (недостатком резонансных детекторов является то, что они имеют хорошую чувствительность лишь в узкой полосе вблизи резонансной частоты, обычно превосходящей 1 кГц). Вебер для этого применял пьезодатчики, его первый достаточно чувствительный детектор начал сбор данных в 1965 г., а с 1967 г. он неоднократно заявлял о регистрации сигналов. Впоследствии никто не смог воспроизвести этот результат, поэтому выводы Вебера считаются неверными, однако он положил начало активным поискам гравитационных волн.

Действие гравитационной волны на тело или систему тел является приливным.

Начиная с 1970-х гг. и до конца XX в. в строй было введено несколько десятков резонансных детекторов, в том числе и в СССР (в России). По мере развития технологии они становились все более сложными и чувствительными. Чтобы повысить чувствительность и избавиться от шумов в установке, последние большие детекторы такого типа, построенные в Италии, охлаждали до сверхнизких температур. Проводился совместный анализ данных нескольких детекторов, чтобы по совпадению сигналов выявить реальное событие. Если бы произошел мощный гравитационно-волновой всплеск (скажем, слияние нейтронных звезд в нашей Галактике или близкая сверхновая), то можно было надеяться уловить сигнал с помощью этих установок. Однако ученым не повезло, даже во время вспышки сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке не работал ни один ультракриогенный детектор. Эра таких установок завершилась с окончанием XX в., наступил черед других детекторов.

В 1960-е гг. была выдвинута идея использования для регистрации гравитационных волн лазерных интерферометров, подобных интерферометру Майкельсона. Принцип метода состоит в том, что гравитационная волна вызывает в установке прилив, при этом одно плечо интерферометра будет растягиваться, а другое — сжиматься (меняются расстояния между свободно подвешенными зеркалами, между

которыми «бегают» лазерные лучи). Этот эффект приведет к изменению интерференционного сигнала на детекторе, и его можно зарегистрировать. Основная проблема состоит в том, что гравитация — самое слабое из четырех фундаментальных взаимодействий, а потому воздействие сигнала на детектор будет очень слабым. Мощность (светимость) гравитационно-волнового всплеска может приближаться к предельной величине, называемой планковской светимостью и выражаемой простым соотношением c^5/G (где c — скорость света, а G — ньютоновская гравитационная постоянная), эта величина эквивалентна примерно 10^{26} светимостям Солнца. Однако, несмотря на столь колоссальную мощность, зарегистрировать гравитационно-волновой всплеск очень сложно: при размере интерферометра порядка нескольких километров изменение длин плеч составит лишь долю размера протона! Тем не менее проблему чувствительности удалось решить.

Современные чувствительные детекторы гравитационных волн являются лазерными интерферометрами.

На протяжении пары десятков лет разрабатывались технологии и создавались прототипы и установки небольшого размера, чувствительные к событиям на небольшом расстоянии от нас. Окончательной целью было создание интерферометров, рассчитанных на гарантированный результат. Используя астрофизические данные, можно вычислить темп слияния нейтронных звезд и черных дыр звездных масс. Соответственно, можно оценить расстояние от нас, ближе которого слияния происходят достаточно часто (скажем, чаще чем раз в месяц). Далее рассчитываются параметры установки, которая способна регистрировать сигнал с такого расстояния (для слияний нейтронных звезд это примерно 200 мегапарсек, а для черных дыр звездных масс оно еще больше — более миллиарда световых лет).

Было начато два проекта, рассчитанных на регистрацию таких сигналов: LIGO и Virgo. Американский проект LIGO включает две установки (для надежной регистрации необходимо, чтобы сигнал увидели хотя бы два детектора), построенные в разных концах США (на юго-востоке и северо-западе). Европейская Virgo установлена в Италии недалеко от Пизы.

Осенью 2015 г. после очередного запланированного обновления установок LIGO с целью повышения чувствительности установки заработали, и к январю 2016 г. удалось зарегистрировать три сигнала от слияния черных дыр звездных масс. Началась эра гравитационно-волновой астрономии.

Чтобы регистрировать слияния сверхмассивных черных дыр, нужны детекторы большого размера, поскольку длина гравитационных

волн в этом случае крайне велика (она соответствует суммарному размеру сливающихся объектов). Для этого разрабатываются проекты космических лазерных интерферометров. В общих чертах идея метода регистрации похожа на используемые в установках LIGO и Virgo, но теперь интерферометр имеет размеры в миллионы километров и вращается вокруг Солнца. Интерференция лазерных лучей позволяет измерить изменение расстояния между тремя космическими аппаратами (одиночный прототип такого аппарата, европейский спутник LISA Pathfinder, в конце 2015 г. был успешно выведен на орбиту для отработки и проверки некоторых технологий). Такой проект одобрен Европейским космическим агентством, запуск его предварительно назначен на 2034 г.

Гравитационные волны были открыты осенью 2015 г., когда на установках LIGO обнаружили первые слияния черных дыр.

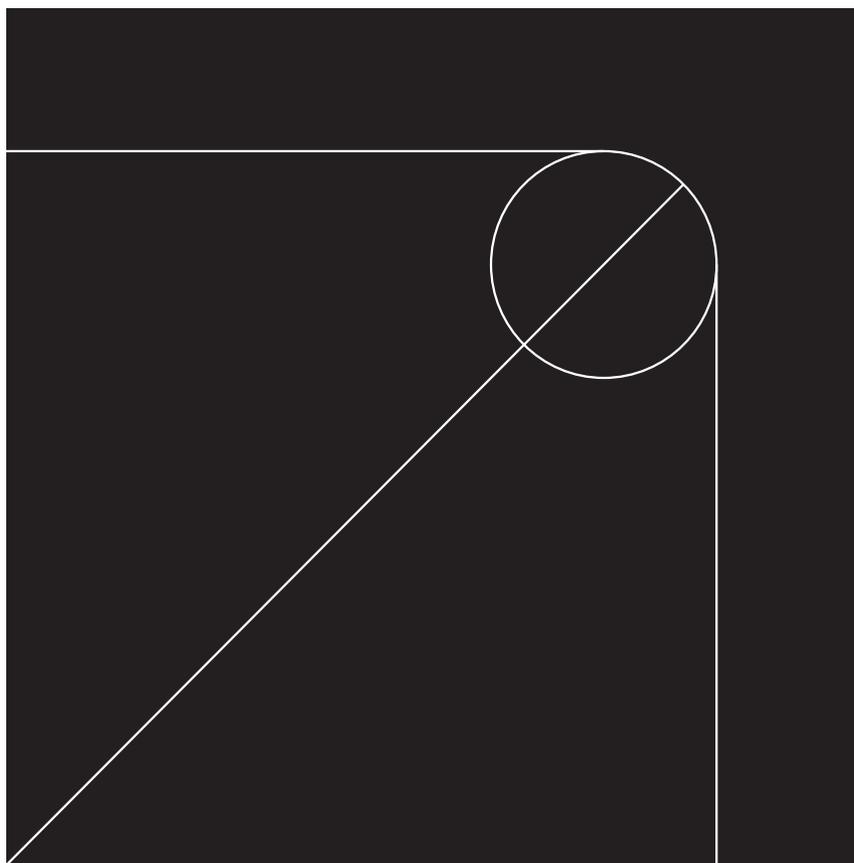
Для косвенной регистрации гравитационных волн от сверхмассивных черных дыр был разработан косвенный астрофизический метод, предложенный в 1978 г. Михаилом Сажиним. Этот метод основан на мониторинге нескольких радиопульсаров: если гравитационная волна проходит в месте наблюдения, то сразу для всех наблюдаемых пульсаров будет зарегистрировано отклонение во времени прихода импульсов (которое в случае миллисекундных радиопульсаров измеряется с точностью, сравнимой с точностью лучших атомных часов). Сейчас существуют три проекта по поиску таких сбоев: европейский EPTA (European Pulsar Timing Array, Европейский проект по наблюдению массива [миллисекундных] пульсаров), австралийский PPTA (Parkes Pulsar Timing Array, Проект по наблюдению массива [миллисекундных] пульсаров с помощью радиотелескопа Паркс) и американский NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, Североамериканская наногерцевая обсерватория для обнаружения гравитационных волн). Ввод в эксплуатацию новых крупных радиотелескопов (FAST, SKA) позволит сделать этот метод еще более точным и эффективным.

Для регистрации гравитационных волн от пар сверхмассивных черных дыр, а также космологических гравитационных волн используются косвенные астрофизические методы.

Второй косвенный метод, предложенный в 1990 г. Владимиром Брагинским и его коллегами, связан с высокоточными астрометрическими наблюдениями большого числа звезд. При прохождении через наблюдателя гравитационной волны (речь идет о периодах от недель

до месяцев, т. е. источниками таких волн должны быть в основном сверхмассивные черные дыры, как и в случае мониторинга пульсаров) измеряемые положения звезд на небе будут определенным образом изменяться на крайне небольшую величину. Современный анализ показывает, что полных данных космического телескопа Gaia может быть достаточно для обнаружения сигнала.

Наконец, для поисков космологических (первичных) гравитационных волн применяется совсем другой подход. Единственная надежда хотя бы косвенно узнать что-то об этом феномене в ближайшем будущем — это зарегистрировать определенные отклонения в картах поляризации реликтового излучения. Первичные гравитационные волны воздействовали на вещество в ранней Вселенной, и это воздействие «отпечаталось» в свойствах реликтового излучения, испущенного в эпоху рекомбинации — примерно спустя 380 000 лет после начала расширения. Анализ результатов, полученных с помощью приборов спутника Planck, не позволил обнаружить этот сигнал. Сейчас надежды возлагаются на ряд наземных проектов (в основном наблюдения проводятся из Антарктиды с помощью установок BICEP3, Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization — Прибор для измерения поляризации космического реликтового излучения, Keck Array — Массив радиотелескопов Кека, South Pole Telescope — Радиотелескоп на Южном полюсе), которые изучают поляризацию реликтового микроволнового фона. Некоторые инфляционные космологические модели предсказывают, что сигнал может быть достаточно сильным, чтобы быть зарегистрированным уже в ближайшие годы.



Глава 14

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

14.1	Наблюдения из космоса. Космические телескопы	323
14.2	Полеты к телам Солнечной системы	329
14.3	Изучение Земли из космоса и исследования околоземного пространства	334
14.4	Пилотируемая космонавтика	337

Освоение космоса человеком открыло новую страницу в исследовании Вселенной. Во-первых, появилась возможность наблюдения в диапазонах, для которых земная атмосфера непрозрачна. Во-вторых, стало реальным непосредственно изучать тела Солнечной системы и условия в ней с помощью космических аппаратов, а иногда даже возвращать на Землю образцы для более детального анализа в лабораториях. Пилотируемая космонавтика также внесла свой вклад в космические исследования: это и ремонт космического телескопа Hubble, и исследования Луны, и создание больших долгосрочных космических станций с хорошим энергообеспечением и относительно низкой стоимостью вывода аппаратуры на орбиту, и исследования Земли из космоса. Кроме прикладных задач в ходе такой работы решаются и фундаментальные (в том числе имеющие отношение к астрофизике).

14.1

Наблюдения из космоса. Космические телескопы

Есть несколько важных причин, делающих необходимыми астрономические наблюдения из космоса, несмотря на их высокую стоимость и связанные с этим риски. Первая состоит в том, что земная атмосфера непрозрачна для жесткой коротковолновой части спектра (гамма-лучи, рентгеновское излучение и жесткий ультрафиолет), а также для части инфракрасного и микроволнового диапазонов. Кстати, сюда же можно отнести наблюдения космических лучей из космоса, от которых до поверхности доходят лишь или вторичные частицы, или излучение широких атмосферных ливней. Вторая причина связана с тем, что земная атмосфера «портит картинку» (даже в той части спектра, для которой она прозрачна): за счет атмосферной турбулентности изображение «дрожит» (что не позволяет добиться высокого углового разрешения) и «мерцает» (что ограничивает точность фотометрических измерений). Наконец, третья причина связана с созданием установок, для которых на Земле просто недостаточно места: это могут быть радиointерферометры с очень большой базой («Радиоастрон») или гравитационно-волновые детекторы, предназначенные для регистрации волн большой длины (eLISA).

Наблюдения в некоторых диапазонах спектра возможны только за пределами атмосферы.

Формально эра астрономических наблюдений из космоса началась 5 августа 1948 г., когда на трофейной ракете V-2 был запущен рентгеновский детектор, зафиксировавший излучение Солнца. С помощью детекторов на ракетах было сделано еще несколько важных открытий, включая обнаружение источника Скорпион X-1 (Sco X-1) — двойной системы с аккрецирующей нейтронной звездой. Однако поток научных результатов резко возрос с появлением астрономических спутников, позволяющих проводить длительные многократные наблюдения.

Уже в апреле 1961 г. на борту спутника Explorer 11 был запущен первый гамма-телескоп. Более серьезный инструмент, работающий в самом жестком диапазоне спектра, был выведен на орбиту в 1967 г. на спутнике OSO-3 (Orbiting Solar Observatory, Орбитальная

солнечная обсерватория), и с его помощью удалось идентифицировать первые индивидуальные гамма-источники. Кроме того, рентгеновский детектор на его борту стал первым рентгеновским телескопом, установленным на спутнике, и с помощью этого инструмента впервые удалось наблюдать излучение источника Sco X-1 в течение достаточно долгого времени. Следующим большим шагом вперед в космической гамма-астрономии стал спутник Cos-B, который был разработан Европейским космическим агентством и запущен в 1975 г.

Внеатмосферные наблюдения позволяют получать более высокое качество оптических изображений.

Среди множества гамма-спутников второй половины XX в. выделяется гамма-обсерватория Compton Gamma Ray Observatory, CGRO («Комптон»), выведенная на орбиту в 1991 г. При массе в 17 т это самый тяжелый астрофизический спутник в истории, и этот рекорд, по всей видимости, продержится очень долго.

Рентгеновские наблюдения позволили открыть аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры.

Ввиду важности наблюдений в гамма-диапазоне в космосе постоянно работает несколько соответствующих инструментов. Иногда это небольшие детекторы, выполняющие роль дополнительной нагрузки (как приборы эксперимента «Конус» на спутнике Wind («Ветер», поскольку аппарат изучает солнечный ветер)), иногда — большие установки на специализированных спутниках (таких как Fermi и Swift («Быстрый», поскольку аппарат способен быстро разворачиваться в сторону гамма-всплесков)). Также продолжают развиваться разработки новых инструментов.

Процессы, приводящие к генерации гамма-излучения, не являются тепловыми. Они связаны или с существованием частиц, ускоренных до высоких энергий, или с ядерными процессами. А вот рентгеновское излучение может быть и тепловым, и нетепловым. В природе реализуется очень много сценариев, приводящих к испусканию рентгеновских лучей, поэтому неудивительно, что рентгеновские источники весьма многочисленны, и развитие этой ветви наблюдательной астрономии принесло (и продолжает приносить) много новой информации, востребованной как астрономами, так и физиками.

Первой специализированной рентгеновской обсерваторией стал запущенный в декабре 1970 г. аппарат Uhuru. К настоящему моменту на орбите побывало огромное количество аппаратов, проводивших наблюдения в этом диапазоне, — как крупные спутники, созданные

ведущими космическими агентствами, так и небольшие приборы, разработанные и созданные в Японии, Индии и Китае, выведенные на орбиты с помощью собственных носителей со своих космодромов. Относительная доступность работы в этом диапазоне отчасти объясняется востребованностью мониторинга отдельных источников или участков неба значительной площади даже с помощью небольших инструментов.

Космические гамма-всплески около 30 лет оставались самой жгучей загадкой в астрофизике.

Важными этапами в развитии рентгеновской астрономии становилось появление новых спутников, позволяющих проводить обзоры неба на новом, значительно более высоком уровне чувствительности, или рентгеновских телескопов с рекордными характеристиками для изучения отдельных источников. К обзорным спутникам, сыгравшим большую роль, следует отнести ROSAT, который в 1990-е гг. представил полный обзор неба в мягком рентгеновском диапазоне, и RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer, Обсерватория для изучения временных характеристик рентгеновских источников им. Росси), проводивший в течение 15 лет мониторинг рентгеновских источников по всему небу, измеряя их временные и спектральные характеристики.

Особо стоит выделить инструменты, которые были установлены на орбитальных космических станциях. С одной стороны, использование комплекса станции является достоинством: ниже стоимость вывода на орбиту, снижаются риски, есть возможность использовать энергетические ресурсы и средства связи станции. С другой стороны, трудно проводить высокоточные наблюдения, поскольку станции трудно или невозможно с достаточной точностью стабилизировать (на них работают люди, функционируют системы жизнеобеспечения и другое оборудование). Оптические, рентгеновские и ультрафиолетовые телескопы (в основном предназначенные для наблюдения за Солнцем) присутствовали уже на станции Skylab, а позднее важным шагом стал запуск астрофизического модуля «Квант», пристыкованного к станции «Мир» в 1987 г. Модуль содержал несколько инструментов, позволивших, в частности, получить рентгеновские спектры сверхновой SN 1987A. Сейчас на Международной космической станции работает рентгеновский детектор MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image), созданный японским космическим агентством (JAXA), а недавно там начал свою работу прибор NICER, в основном предназначенный для изучения нейтронных звезд.

Наблюдения в ультрафиолете с поверхности Земли также невозможны. Первым крупным проектом (не предназначенным для изучения Солнца) стал спутник IUE (International Ultraviolet Explorer,

Международный телескоп УФ-диапазона), выведенный на орбиту в 1978 г. и проработавший почти 20 лет. Хотя это был всего лишь 45-сантиметровый телескоп (небольшой по земным меркам), он впервые смог получить огромное количество ультрафиолетовых спектров самых разных небесных объектов в хорошем разрешении; среди прочего были получены важные результаты по звездным ветрам и межзвездной среде.

Примером эффективной миссии с четкой задачей является ультрафиолетовый спутник GALEX (Galaxy Evolution Explorer, Аппарат для изучения эволюции галактик) с телескопом диаметром 50 см, предназначенный для изучения звездообразования в галактиках. За почти 10 лет работы были получены данные по сотням тысяч галактик, что оказалось крайне востребовано во внегалактической астрономии.

Земная атмосфера непрозрачна и с другой стороны видимой части спектра — в инфракрасном диапазоне. Это излучение характерно для относительно холодных объектов: молодых звезд, молекулярного газа, пыли, протопланетных дисков, так что изучение неба в инфракрасных лучах нужно прежде всего для изучения звездообразования.

В 1983 г. на орбиту была выведена орбитальная обсерватория IRAS (InfraRed Astronomical Satellite, Международный инфракрасный астрономический спутник), задачей которой стало создание первого полного инфракрасного обзора неба. Для этого аппарат был укомплектован 60-сантиметровым телескопом и запасом жидкого гелия (особенностью работы в ИК-диапазоне является необходимость охладить детекторы, а иногда и само зеркало до криогенных температур). Именно запас хладагента обычно является лимитирующим фактором для продолжительности подобных миссий. IRAS проработал около года, но долгое время именно его обзор был лучшим в своей области.

Инфракрасные наблюдения позволяют изучать рождение звезд и планет.

В 2010 г. спутник WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Аппарат для обзорных съемок в ИК-диапазоне) провел обзор неба в ИК-диапазоне на новом уровне. Хотя он также был оснащен небольшим телескопом диаметром 40 см, однако развитие технологий позволило выйти на совершенно другой уровень результатов без увеличения размеров, массы или стоимости аппарата.

Для изучения отдельных источников в инфракрасном диапазоне уже в XXI в. в космос были выведены космические телескопы Spitzer («Спитцер») и Herschel («Гершель»), которые существенно обогатили наше понимание того, как образуются звезды и планеты. Herschel оснащен цельным зеркалом рекордного (для астрономических

космических зеркал) диаметра 3,5 м. Этот рекорд, видимо, будет побит с запуском телескопа James Webb, зеркало которого, впрочем, будет составным, т. е. многосегментным (и раскладным).

Качество изображений, получаемых телескопом Hubble, недоступно наземным инструментам.

Наблюдения из космоса актуальны и для оптического диапазона, поскольку отсутствие атмосферы позволяет получать изображения очень высокого качества. Идеальным примером этого утверждения является работа космического телескопа Hubble. Этот инструмент оснащен 2,4-метровым зеркалом, совсем небольшим по земным меркам, однако по целому ряду параметров телескоп существенно превосходит наземные 10-метровые гиганты. Кроме того, Hubble проводит наблюдения в ближнем УФ- и ближнем ИК-диапазонах, что расширяет его возможности. Возможность отремонтировать и модернизировать инструмент во время специализированных миссий шаттлов позволила достичь очень большой продолжительности научной программы телескопа, что сделало Hubble одним из самых эффективных телескопов в истории. Правда, и самым дорогим (причем с большим отрывом).

Астрометрический спутник Gaia впервые позволит построить трехмерную карту половины нашей Галактики.

Качество изображений важно и для решения астрометрических задач — определения точного положения звезд и их изменений. Первым астрометрическим спутником был Hipparcos который позволил с помощью параллактического метода точно измерить расстояния до большого числа звезд в пределах примерно 1000 световых лет от Солнца. Новый космический аппарат Gaia должен решить эту задачу уже для половины Галактики — вплоть до расстояний почти 30 000 световых лет.

Массовое открытие экзопланет стало возможным благодаря работе спутника Kepler.

Отсутствие атмосферных мерцаний позволяет очень точно измерять блеск звезд и его вариации. Это стало ключевым моментом для обнаружения транзитных экзопланет и астросейсмологических исследований. Первым специализированным аппаратом для этих целей был европейский CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits — Конвекция, вращение и транзиты планет), а еще более эффективным

является космический телескоп Kepler, который совершил настоящий прорыв, открыв более 1000 экзопланет и представив около 20000 кандидатов для дальнейшего подтверждения и изучения.

Для решения некоторых задач требуется относительно быстрый доступ сразу ко всему небу. Хорошим примером такой задачи является изучение реликтового излучения: при наземных наблюдениях доступным оказывается лишь относительно небольшой участок неба, а для проведения полноценного анализа необходимо получить данные со всей небесной сферы. Поэтому именно серия спутников — COBE (Cosmic Background Explorer), WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) и Planck — позволила получить важнейшие для космологии результаты.

Наконец, существуют типы установок, которым на Земле просто не хватит места, в первую очередь это актуально для инструментов, работающих в радиодиапазоне. Первой попыткой в этой области был японский проект VSOP (VLBI Space Observatory Programme), в котором спутник с радиотелескопом на борту находился на относительно низкой орбите, работая «в связке» с наземными инструментами. Вторым стал российский проект «Радиоастрон», в котором удалось создать интерферометр с базой более 300 000 км, достигнув рекордного углового разрешения.

Большие установки потребуются и для регистрации гравитационных волн низкой частоты. На 2032–2034 гг. намечен запуск европейской миссии eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) — это космический лазерный интерферометр (подобный LIGO или Virgo, см. раздел 13.9 «Детекторы гравитационных волн»), расстояние между спутниками которого составит около миллиона километров. В частности, этот проект позволит зарегистрировать гравитационное излучение от двойных сверхмассивных черных дыр¹.

Вывод аппаратов в космос позволяет создавать астрономические установки больших размеров.

Астрономические наблюдения из космоса, как правило, очень дороги. Стоимость даже небольших аппаратов обычно превосходит \$ 100 млн, а крупнейшие проекты обходятся в миллиарды долларов. Примером таких проектов являются так называемые великие обсерватории (Great Observatories) NASA, к которым относятся Hubble, Compton, Spitzer и Chandra — самые совершенные космические телескопы для четырех основных диапазонов (видимый, гамма-,

¹ Гравитационные волны от таких источников имеют очень большую длину (миллионы и даже сотни миллионов километров), поэтому наземные установки слишком малы для регистрации таких волн.

ИК- и рентгеновский). Однако при тщательном подходе к выбору методов, наблюдательных программ, а также при качественной обработке данных (включая предоставление открытого доступа к архивам и жесткий конкурс на наблюдательное время) удается получать очень большой научный выход, что с лихвой оправдывает высокие затраты. Кроме того, в ходе создания таких проектов разрабатываются новые технологии, которые затем коммерциализируются (в том числе позволяя в дальнейшем создавать менее дорогие, но очень эффективные космические миссии).

Стоит отметить, что огромный вклад в астрономию внесли не только (а часто и не столько) очень большие космические обсерватории, но и небольшие и относительно недорогие проекты, такие как спутники серии Explorer, к которым относятся GALEX, Swift, Uhuru, WMAP, COBE, RXTE и NuSTAR, или такие проекты, как CoRoT и совсем небольшой (53 кг) канадский аппарат MOST (Microvariability and Oscillations of Stars, Микровариативность и колебания звезд).

14.2

Полеты к телам Солнечной системы

Тела Солнечной системы выделяются среди других астрономических объектов возможностью их непосредственного изучения с помощью космических аппаратов. Это может быть дистанционное исследование с орбитальных или пролетных траекторий; использование стационарных посадочных модулей; применение самоходных аппаратов, перемещающихся по поверхности; наконец, возврат на Землю образцов космических тел. За 60 лет космической эры все эти способы были применены на практике.

Первой межпланетной станцией стала запущенная в январе 1959 г. «Луна-1». С того времени разными странами было реализовано огромное количество проектов межпланетных автоматических станций, поэтому здесь мы лишь кратко рассмотрим несколько отдельных примеров, охватывающих все основные типы исследований и все типы объектов Солнечной системы.

Самым простым типом исследования планет и других объектов Солнечной системы является их изучение с орбитальных или пролетных траекторий. Таким способом были изучены Луна (например,

в 1959 г. «Луна-3» впервые получила изображения обратной стороны), все планеты и многие из их спутников, некоторые кометы и астероиды. Рекордсменом в своем роде является аппарат Voyager 2 («Вояджер-2»), запущенный в августе 1977 г.

С помощью космических аппаратов были исследованы все планеты Солнечной системы.

Первой целью Voyager 2 (и его «близнеца» Voyager 1) стал Юпитер, которого космический аппарат достиг в 1979 г., было получено множество высококачественных изображений планеты-гиганта и его спутников. Данные с обоих аппаратов Voyager привели к открытию вулканизма на спутнике Ио, кроме того, благодаря высокому качеству снимков было обнаружено несколько новых спутников и колец Юпитера. Помимо камер аппараты несли множество других инструментов для получения информации о магнитных полях планет, свойствах плазмы и космических лучей.

В 1981 г. Voyager 2 приблизился к Сатурну, где с помощью радиоаппаратуры провел исследование верхней атмосферы этой планеты, а также получил много качественных снимков колец и спутников. После гравитационного маневра аппарат был направлен к Урану.

В 1986 г. Voyager 2 стал первым пролетевшим вблизи Урана аппаратом, который подробно исследовал эту планету и систему ее колец, а также открыл более 10 новых спутников и изучил уже известные. Были получены важные результаты о необычной структуре магнитного поля Урана. До настоящего времени никакие другие аппараты не посещали Уран и его систему.

Межпланетные станции позволяют не только получать изображения в высоком качестве, но и проводить непосредственные измерения и эксперименты в окрестности и на поверхности тел Солнечной системы.

В 1989 г. Voyager 2 сблизился с Нептуном, это также было первым (и единственным на сегодняшний день) прохождением космического аппарата вблизи данной планеты. После этого траектория аппарата снова была существенно изменена, и он был направлен к границам гелиосферы. В настоящий момент часть аппаратуры Voyager 2 (как и Voyager 1) продолжает работать. Оба аппарата передают уникальную информацию с рекордного (более 115 а. е. в случае Voyager 2 и около 140 а. е. в случае Voyager 1) расстояния, удаляясь от Солнца примерно на 500 млн км (более 3 а. е.) в год.

Среди множества космических аппаратов, изучавших планеты

с пролетных или орбитальных (т. е. с выходом на орбиту планеты) траекторий, стоит отметить межпланетную станцию New Horizons. Она стала первым космическим аппаратом, достигшим Плутона, с ее помощью удалось получить уникальные изображения этой карликовой планеты, а также ее спутников. Путешествие заняло почти 10 лет: запуск произошел в январе 2006 г., а аппарат пролетел на минимальном расстоянии от Плутона в июле 2015 г. По пути с помощью аппарата были получены изображения Юпитера и его спутников, а в дальнейшем New Horizons планируется использовать для изучения нескольких небольших объектов в поясе Койпера.

Самые далекие космические аппараты находятся на расстоянии более 100 а. е. от Солнца.

Может показаться странным, но, несмотря на относительную близость Меркурия к нам, изучать его сложнее, чем Юпитер. Поэтому к этой планете было не так много полетов, и не было ни одной посадки. На сегодняшний день наиболее детальные данные по этой планете получены с помощью спутника MESSENGER (Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging — Поверхность, космическое окружение, геохимия и картография Меркурия), который был запущен в 2004 г. и вышел на орбиту искусственного спутника Меркурия в 2011 г. В 2015 г. программа была полностью завершена, в частности построены самые подробные карты Меркурия, и межпланетная станция была сведена с орбиты.

Наконец, упомянем межпланетную станцию Cassini, которая была запущена в 1997 г., а в 2004-м достигла своей цели — системы Сатурна. Станция несла спускаемый аппарат Huygens, который совершил посадку на спутник Сатурна Титан, обладающий плотной азотной атмосферой. В результате были получены уникальные данные об этом спутнике, позволившие даже заподозрить существование на нем экзотических форм жизни (см. раздел 16.1 «Жизнь в Солнечной системе»). Cassini в течение 13 лет успешно исследовал систему Сатурна, получив красивейшие изображения этой планеты и сделав ряд важных открытий. Например, были обнаружены криовулканы Энцелада — спутника Сатурна, — фонтанирующие водой подледного океана. 15 сентября 2017 г. аппарат Cassini был сведен с орбиты и вошел в атмосферу Сатурна.

Посадка на поверхность — сложная операция для межпланетной станции. Первая мягкая посадка на Луну удалась только в 1966 г. («Луна-9»). Многие попытки мягкой посадки на Марс и Венеру были неудачными. В случае Венеры это во многом было связано с экстремальными условиями на планете, что впервые выяснилось с помощью аппаратов серии «Венера».

Запущенная в 1967 г. «Венера-4» передавала информацию на Землю во время спуска в атмосфере, но была разрушена колоссальным давлением. Последующие аппараты создавались с учетом этих данных, и в итоге «Венера-7» в конце 1970 г. смогла совершить посадку и передать информацию с поверхности планеты. «Венера-9» и «Венера-10» в 1975 г. отправили на Землю первые изображения поверхности, а «Венера-13» и «Венера-14» — первые цветные изображения (а также провели анализ грунта).

Использование роботизированных мобильных исследовательских лабораторий позволяет получать важную научную информацию без необходимости пилотируемых экспедиций.

Еще более сложной задачей является посадка на малые тела — кометы и астероиды. В 2014 г. спускаемому аппарату Philae («Филы»), запущенному на борту космического аппарата Rosetta, удалось совершить посадку на поверхность кометы 67P/Чурюмова — Герасименко и передать оттуда данные. Потенциально такие исследования важны для понимания процессов формирования и эволюции Солнечной системы.

Биохимические лаборатории работали на поверхности Марса.

Основной задачей межпланетных станций является получение новой научной информации о свойствах изучаемых объектов, что может быть достигнуто отправкой сложного лабораторного оборудования. Например, на аппаратах Viking 1 и Viking 2 («Викинг-1, 2»), совершивших посадку на поверхность Марса в 1976 г., была установлена аппаратура для биологических экспериментов и обнаружения живых микроорганизмов на Марсе (результаты оказались отрицательными).

Другой способ существенно расширить информацию о телах Солнечной системы — отправка мобильных установок, способных перемещаться по достаточно большой территории и проводить анализы в разных местах поверхности. Первыми такими аппаратами были «Луноходы» (1970 и 1973 гг.). Среди современных подобных устройств одним из самых успешных является марсоход Opportunity («Благоприятная возможность»). Изначально его программа, начатая в 2004 г., была рассчитана на 90 марсианских дней, однако аппарат продолжает свою работу и в 2017 г. С помощью Opportunity были обнаружены следы существования больших объемов жидкой воды на поверхности Марса в прошлом.

Разумеется, невозможно отправить на космическом аппарате столь же совершенную научную аппаратуру, как установленную в земных лабораториях. Поэтому для решения многих задач идеальным является возврат образцов на Землю. Впервые это удалось сделать в результате пилотируемых полетов на Луну в рамках программы Apollo («Аполлон»). Однако в 1970 г. лунный грунт попал на Землю благодаря работе автоматической станции «Луна-16», а позднее эту операцию повторили «Луна-20» (1972 г.) и «Луна-24» (1976 г.). Получение образцов из разных точек Луны с разными геологическими свойствами позволяет точнее восстановить историю формирования нашего естественного спутника, а также разобраться в его эволюции. В образцах, доставленных на Землю «Лунной-24», было обнаружено присутствие воды.

Проводились посадки аппаратов на кометы и астероиды.

Уникальным сочетанием посадки на малое тело (астероид) и возврата образцов стала работа японской миссии Haabusa, запущенной в 2003 г. Несмотря на многочисленные технические сложности, проведя в 2005 г. исследования астероида 25143 Итокава, аппарат совершил посадку на его поверхность. Были собраны образцы грунта, которые в 2010 г., хотя и не без проблем, но были доставлены на Землю, где их удалось изучить в лабораториях.

Ответ на вопрос о существовании жизни в Солнечной системе (вне Земли) должны дать автоматические межпланетные станции.

Благодаря работе ряда автоматических межпланетных станций удастся проводить непосредственное изучение многих тел Солнечной системы на уровне, отчасти сравнимом с данными геофизических исследований (достаточно долговременный мониторинг и зондирование, анализы образцов «на месте» и их доставка в земные лаборатории). Это позволяет, во-первых, лучше понять условия во внешних слоях и недрах планет и других космических тел, благодаря чему можно говорить о возникновении сравнительной планетологии. Многие аспекты формирования деталей рельефа, эволюции климата и др. основаны на сходных физических процессах: скажем, парниковый эффект в атмосферах Земли и Венеры, формирование деталей рельефа на Марсе и Титане. Во-вторых, исследования проливают свет на формирование и эволюцию Солнечной системы в целом. В-третьих, детальное изучение разнообразных планет вблизи нас позволяет с большой уверенностью подходить к вопросам изучения еще более

разнообразного «зоопарка» экзопланет, о которых у нас есть лишь весьма ограниченные данные. Поэтому многие выводы о свойствах планет вокруг других звезд основаны на нашем понимании устройства планет Солнечной системы.

Разумеется, остается ряд важных нерешенных проблем. Например, такой важный вопрос, как возможность существования простейших форм жизни на телах Солнечной системы в настоящее время (Европа, Энцелад) или в прошлом (Марс). Ответ на него можно будет получить с помощью будущих межпланетных аппаратов, которые сейчас разрабатывают ведущие космические агентства. В дальнейшем это может позволить разобраться в вопросах происхождения жизни и ее распространенности во Вселенной.

14.3

Изучение Земли из космоса и исследования околоземного пространства

С самого начала космической эры началось изучение Земли с помощью космических аппаратов. Период с июля 1957-го по декабрь 1958 г. был объявлен Международным геофизическим годом, в это время проводился ряд скоординированных программ по изучению нашей планеты: в частности, с использованием ракет и спутников. В октябре 1957 г. был запущен первый искусственный спутник, а уже в 1958 г. с помощью спутников Explorer 1 и Explorer 3 было достоверно подтверждено существование радиационных поясов в магнитосфере Земли (так называемого пояса Ван Аллена). В мае 1958 г. в СССР был запущен тяжелый «Спутник-3» с большим количеством научной аппаратуры на борту, с помощью которой изучалась атмосфера Земли, ее магнитное поле, а также космические лучи.

Изучение Земли из космоса объединяет в себе фундаментальную науку и чисто прикладные задачи.

С течением времени появились специализированные спутники для изучения Земли из космоса. Эта тематика считается крайне важной, поэтому на нее затрачиваются значительные ресурсы. Так,

в NASA в 2015–2016 гг. исследования Земли из космоса имели более высокий бюджет (почти \$ 2 млрд в год), чем каждый из трех других научных разделов (астрофизика, планетные исследования, гелиофизика). Очень интенсивно эта область исследований развивается в Европе, которая сейчас лидирует в этом направлении. И даже небольшие страны, не имеющие крупных космических программ, стремятся создавать собственные спутники, предназначенные для решения каких-то локальных прикладных задач, связанных с наблюдениями из космоса, или сотрудничать с большими агентствами.

Исследования Земли из космоса объединяют как ряд фундаментальных научных, так и множество прикладных проблем. Сейчас выделяют такие приоритетные направления, как изучение загрязнения окружающей среды, различные аспекты здравоохранения (например, исследования, связанные с распространением малярии в заболоченных местностях, или роль разрушения озонового слоя в росте заболеваемости раком кожи), исследования экосистем и биоразнообразия, изучение земной коры (сюда входит и прогнозирование землетрясений, и поиск полезных ископаемых, и изучение вулканов), наблюдение за изменениями климата, мониторинг и прогнозирование погоды, изучение водных ресурсов (включая изучение ледяного покрова).

Проблема глобального изменения климата требует постоянного космического мониторинга.

Среди конкретных актуальных вопросов выделяются прогноз ближайших серьезных климатических изменений (например, связанных с таянием льдов), поведение океанических экосистем (исчерпание рыбных ресурсов), динамика количества разрушительных тропических циклонов, распространение болезней.

Кроме пассивных наблюдений используется активное зондирование поверхности и атмосферы с помощью радаров и лазеров.

Для изучения параметров оболочек Земли и их динамики используется обширное разнообразие инструментов. Кроме получения изображений в разных спектральных диапазонах используются и активные методы зондирования, в основном с помощью радаров и лидаров (лазерных радаров, принимающих отраженное или рассеянное лазерное излучение). Это позволяет изучать состав земной атмосферы на разных высотах, а также решать множество других задач, например строить точные карты высот рельефа, что, в частности, дает возможность предсказывать крупные оползни. Также дистанционные измерения позволяют с высокой точностью измерять

уровень водных пространств — как морей и океанов, так и озер, что имеет огромное прикладное значение из-за угрозы затопления прибрежных районов при повышении уровня Мирового океана, угрозы наводнений или засухи.

Важной задачей, имеющей отношение к климату и погоде, является измерение солнечной постоянной — количества энергии, приходящей от Солнца. Для этого также необходимы спутниковые измерения. Хотя формально это относится к физике Солнца, тем не менее из-за важности этого параметра для моделирования земного климата подобные измерения традиционно включаются и в программы геофизических исследований.

Только глобальные спутниковые наблюдения позволяют с высокой точностью изучать гравитационное поле Земли и его вариации: эта задача решалась в рамках проектов GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment, Эксперимент по изучению гравитационного поля и климата, запущен в 2002 г.) и GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, Аппарат для изучения гравитационного поля и постоянных океанических течений, 2009 г.). Измерения гравитационного поля важны для изучения целого ряда вопросов, таких как построение карт океанских течений, исследование таяния ледников, а также изучение последствий землетрясений.

Прогноз погоды базируется на спутниковых данных.

Особенностью геофизических исследований является необходимость длительного мониторинга, поскольку многие корреляции (например, изменение числа ураганов в зависимости от средней температуры) значимо проявляются только на больших масштабах времени. Поэтому требуются постоянные наблюдения, для чего необходимо поддерживать орбитальные группировки спутников, оснащенных соответствующими приборами. Сейчас на орбите постоянно работает несколько десятков спутников для изучения Земли, созданных разными странами. Лидерами в этой области являются Европейское космическое агентство и NASA.

В настоящее время для исследования Земли из космоса постоянно работают несколько десятков спутников.

Говоря о современных исследованиях Земли из космоса в России, можно выделить серию геостационарных спутников «Электро-Л», предназначенных для комплексных исследований в области климатологии, экологии, мониторинга погоды, изучения магнитного поля и решения некоторых других смежных задач.

Во многих случаях для получения необходимой научной информации нужны не только космические наблюдения, но и работа метеостанций на поверхности, а также исследования с помощью геофизических ракет, самолетов и баллонов (аэростатов) в атмосфере (часть нагрузки космических аппаратов со временем должны взять на себя более дешевые беспилотные летательные аппараты). Это необходимо и для калибровки измерений, и для получения дополняющих данных и требует координации исследовательских программ, осуществляемых зачастую разными ведомствами в разных странах. Кроме того, часто космические данные нужны для использования в компьютерных моделях (прогноз погоды, изменение климата, поведение экосистем и др.). Поэтому необходимо согласовывать требования аналитиков с подходами разработчиков спутников и программ наблюдения, а данные мониторинга после первичной обработки должны попадать в открытый доступ.

Мониторинг природных катастроф — одна из задач спутниковых наблюдений.

Стоит особо подчеркнуть, что исследования Земли из космоса связаны со многими глобальными проблемами, имеющими отношение к большой политике. В первую очередь это вопросы глобального изменения климата, для регулирования которых нужны международные соглашения. Для их достижения необходимы надежные модели и прогнозы, которые можно составить только при наличии регулярного всестороннего мониторинга Земли из космоса.

14.4

Пилотируемая космонавтика

История пилотируемых космических полетов прекрасно описана во множестве книг и статей. Можно выделить несколько этапов освоения космоса человеком. Во-первых, это относительно короткие полеты на околоземные орбиты, начиная с исторического старта первого космонавта 12 апреля 1961 г.; в разные периоды три страны (СССР, США и Китай) уже прошли эту первую стадию развития пилотируемой космонавтики. Во-вторых, американские лунные экспедиции, реализованные в конце 1960-х — начале 1970-х гг. В-третьих, создание космических станций (Skylab, «Салюты», «Мир», «Тяньгун», МКС) и долговременное пребывание на них — этот этап успешно

продолжается и в наши дни. Наконец, отдельно следует выделить программу Space Shuttle — космических челноков, позволившую реализовать множество интересных и важных проектов, в том числе и в астрономии, однако закрытую из-за аварий и высокой стоимости.

Для развития астрономии и астрофизики первый этап внес небольшой вклад, поскольку в его основную задачу входило в первую очередь решение технических и медико-физиологических проблем. А вот в ходе реализации лунной программы было получено много новых сведений о нашем естественном спутнике: на Землю было привезено 382 кг образцов лунных пород. Впоследствии во многих лабораториях мира ученые получили возможность работы с ними, что привело к уточнениям датировки появления лунных кратеров и химического состава Луны. Итогом стала ударная модель формирования нашего спутника.

Кроме сбора образцов, получения фотографий и бурения астронавты установили на Луне более 2 т научного оборудования. Были проведены сейсмологические исследования и измерения гравитационного поля Луны, получены магнитометрические данные. Вдобавок были установлены угольковые отражатели, которые затем позволили проводить лазерную локацию Луны, что важно и для решения задач фундаментальной физики, а именно для проверок теорий гравитации. В результате всей этой активности в рамках программы Apollo накоплено огромное количество научных данных, которые легли в основу около 3000 научных публикаций.

В ходе лунной программы Apollo было получено много важных научных результатов.

Наибольший вклад пилотируемой космонавтики в астрофизику связан с работой космических станций. Первым по-настоящему успешным (с точки зрения астрофизических результатов) проектом стала станция Skylab, запущенная в 1973 г. Хотя там побывали экипажи всего лишь трех кораблей Apollo, тем не менее на станции были проведены важные астрономические наблюдения. В первую очередь это касается исследований Солнца, для чего были использованы ультрафиолетовые и рентгеновские детекторы. Именно наблюдения с борта Skylab позволили окончательно подтвердить существование корональных дыр. Кроме того, с помощью 15-сантиметрового телескопа с объективной призмой проводились ультрафиолетовые наблюдения звезд, с помощью рентгеновского детектора велись исследования галактических источников, также проводилось изучение зодиакального света, комет и космических лучей.

Отметим, что еще в 1971 г. на космической станции «Салют-1» был установлен ультрафиолетовый телескоп «Орион-1». Однако

из-за технических проблем, которые привели к сокращению срока эксплуатации станции, с его помощью было получено очень мало важных научных результатов. На запущенной в конце 1974 г. станции «Салют-4» с помощью приборов «Филин» и РТ-4 удалось измерить рентгеновские спектры нескольких галактических источников в двойных системах с аккрецирующими нейтронными звездами и черными дырами. На станциях «Салют-6» и «Салют-7» также проводились астрономические исследования в разных диапазонах спектра. Однако важный шаг был сделан с запуском на орбиту станции нового поколения — «Мир».

Астрономические наблюдения на космических станциях начались в 1970-х гг.

К станции «Мир» были пристыкованы модули «Квант» и «Квант-2» с астрофизическим оборудованием. Особенно интересные результаты были получены с помощью обсерватории «РЕНТГЕН» на борту модуля «Квант»: с ее помощью удалось исследовать рентгеновское излучение сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом облаке, также был исследован ряд галактических источников с нейтронными звездами и черными дырами. Следует отметить, что в состав обсерватории «РЕНТГЕН» входило несколько инструментов, включая разработанные в Германии, Великобритании, Дании и Нидерландах, так что это была в полном смысле слова международная обсерватория.

В разное время на орбитальных станциях проводились наблюдения во всех диапазонах электромагнитного спектра.

Сейчас астрофизические исследования проводятся на Международной космической станции, где работает детектор космических лучей AMS-02, японский рентгеновский детектор MAXI, а также установлен рентгеновский телескоп NICER для исследования нейтронных звезд в двойных системах и отработки системы навигации по рентгеновским пульсарам (и еще несколько астрономических проектов для установки на МКС, в том числе российских, находятся в стадии разработки).

Наиболее важные результаты были получены в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах.

Преимущества космических станций связаны с более дешевой доставкой оборудования, которое затем можно настраивать, дополнять и ремонтировать. Кроме того, станция позволяет иметь более высокое

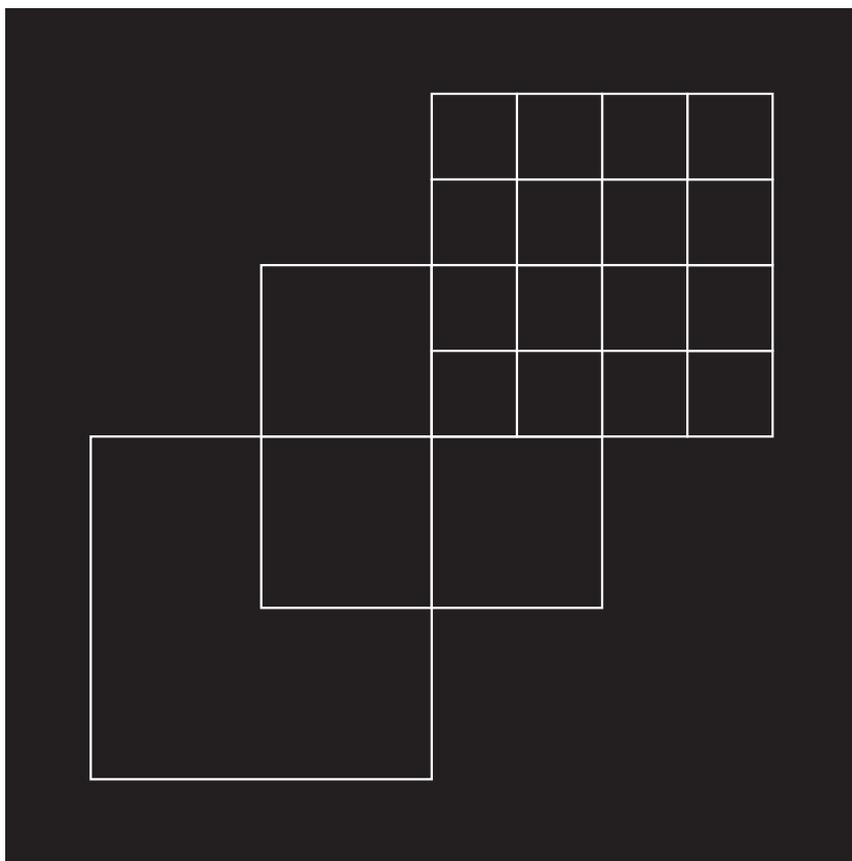
энергопотребление и дает еще некоторые технические преимущества. Впрочем, у расположения на борту космических станций есть и недостатки. Среда вокруг станции в достаточной степени загрязнена, что вредно для оборудования (например, зеркал телескопов). Из-за присутствия экипажа станции не слишком стабильны, что не позволяет очень точно и в течение долго времени позиционировать телескопы, существуют ограничения по наведению телескопов на нужные объекты и по длительности экспозиции. Наконец, станции находятся на низкой околоземной орбите, где возможны не все наблюдения. Тем не менее космические станции были и остаются местом, где успешно проводятся многие астрофизические исследования.

Космические челноки (шаттлы) программы Space Shuttle неоднократно использовались для запуска астрономических спутников (Chandra, Compton и многих других). Самым известным вкладом шаттлов в астрономию является запуск, ремонт и модернизация космического телескопа Hubble.

Космический телескоп Hubble был выведен на орбиту в 1990 г. челноком Discovery. Из-за технических просчетов, допущенных при создании инструмента, потребовался его ремонт, для чего в 1993 г. к телескопу отправился шаттл Endeavour («Стремление»). Его экипаж успешно провел обслуживание телескопа, в ходе которого в конструкцию были установлены дополнительные оптические элементы. Затем еще четыре раза (в 1997, 1999, 2002 и 2009 гг.) к телескопу отправляли астронавтов на борту шаттлов для модернизации оборудования. Это позволило Hubble в течение более чем четверти века оставаться едва ли не лучшим телескопом, работающим в оптическом диапазоне (он также ведет наблюдения в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах, что существенно расширяет его возможности).

Использование шаттлов позволило не только отремонтировать Hubble, но и в течение ряда лет проводить его модернизацию, что увеличило длительность работы и эффективность инструмента.

В настоящее время обсуждаются различные проекты создания постоянной обитаемой лунной базы, где также может быть размещено и астрономическое оборудование. По всей видимости, одной из наиболее разумных идей о проведении астрономических наблюдений на Луне является возможность размещения радиотелескопов на обратной стороне нашего естественного спутника, где минимально влияние помех, связанных как с магнитосферой Земли, так и с искусственными источниками шумов.



Глава 15

КОМПЬЮТЕРЫ В АСТРОНОМИИ

15.1	Управление инструментами, телескопы-роботы	345
15.2	Обработка данных. Big data	348
15.3	Численный эксперимент и моделирование	353
15.4	Виртуальная обсерватория	358

Большую часть своего времени астроном проводит не у телескопа, а у компьютера. Во-первых, наблюдения на крупных инструментах обычно не требуют присутствия у телескопа собственно самого ученого (а в случае наблюдений с помощью космических инструментов это попросту невозможно). Во-вторых, многие наблюдательные системы функционируют в автономном режиме (телескопы-роботы). В-третьих, основная часть работ ученого-наблюдателя сводится к обработке данных, что требует большого количества времени, сложных численных методов и высоких вычислительных мощностей. Да и теоретики часто проводят много времени за компьютерами, поскольку прямые эксперименты в астрофизике обычно невозможны, но можно проводить численные эксперименты, моделируя объекты и процессы на компьютере.

В современной астрономии существует несколько важных тенденций. Во-первых, это большой объем получаемых данных (big data). Во-вторых, открытость научной информации и ее распространение через интернет. И, в-третьих, создание единых баз данных, а в перспективе — виртуальной обсерватории, которая объединила бы в себе все доступные данные (за всю историю астрономических наблюдений) в едином формате, что позволит сразу получать информацию об объектах во всех диапазонах на больших временных интервалах и сравнивать ее с новыми данными.

Астрономия — очень интернациональная наука. Поэтому и для научного общения необходимы компьютеры и сети.

15.1

Управление инструментами, телескопы-роботы

Образ астронома у телескопа в башне на крыше, куда он поднимается по винтовой лестнице, уходит в прошлое. Конечно, такие места еще сохранились, многие из них стали музеями или используются для преподавания и экскурсий, хотя иногда там проводятся и настоящие научные наблюдения. Тем не менее последние десятилетия рабочее место астронома-наблюдателя все чаще выглядит совсем по-другому.

Развитие техники привело к тому, что автоматика быстрее и точнее наводит телескоп в нужную точку неба, чем наблюдатель способен сделать это вручную. Программа наблюдений может быть заранее записана в память компьютера, данные также записываются для дальнейшего изучения, и работа наблюдателя становится гораздо более творческой: постановка задач, обработка данных и их анализ.

Управление телескопом часто можно проводить удаленно.

Контроль за ходом наблюдений можно проводить дистанционно. Это тем более актуально, что наблюдатели, как правило, используют инструменты, расположенные в разных частях света: в Южной Америке и Австралии, на Гавайях и в Антарктиде, в Аризоне и на Канарских островах. Часто непосредственно рядом с телескопом нет даже команды инженеров и техников, поскольку при надежной работе техники нет необходимости в постоянном присутствии человека (хотя, конечно, необходим периодический осмотр). Это открыло возможность создания телескопов-роботов.

Все большее распространение получают телескопы-роботы. Как правило, это небольшие инструменты, работающие автономно.

При упоминании автономно работающих научных инструментов первое, что приходит в голову, — это космические исследования. В самом деле, наблюдатель может находиться рядом только в том случае, если инструмент установлен на обитаемой космической станции. Однако чаще всего телескопы все-таки устанавливают

на автономных спутниках, так что их наблюдения проходят в основном в автоматическом режиме. На земле компьютерное управление начали опробовать на новых крупных инструментах в конце 1970-х гг., поскольку стоимость таких систем была весьма высока. В итоге, первым большим телескопом с компьютерным управлением стал введенный в строй в 1974 г. четырехметровый Anglo-Australian Telescope, ААТ (Англо-Австралийский телескоп). Однако технический прогресс привел к значительному удешевлению надежных роботизированных систем и систем дистанционного управления, так что сейчас существует множество наземных инструментов с объективами диаметром от нескольких сантиметров до нескольких метров, работающих в режиме телескопов-роботов.

Известным примером является двухметровый Liverpool Telescope, LT (Ливерпульский телескоп), установленный на Канарских островах. Он входит в британскую систему RoboNet, включающую еще два двухметровых телескопа, так называемые телескопы Фолкса — северный Faulkes Telescope North на острове Мауи (Гавайи) и южный Faulkes Telescope South в Австралии (они активно использовались также для образовательных целей). Достоинством телескопов-роботов является их способность быстро реагировать на новые задания, что чрезвычайно важно при наблюдении транзитных (вспыхивающих) источников. Например, если космический аппарат открывает новый гамма-всплеск, сигнал с него может непосредственно поступить в систему управления телескопа-робота, который наводится в нужную точку неба, а участие человека в этой процедуре лишь замедлило бы ее. Сейчас разработаны специальные системы (например, SkyAlert, «Небесное оповещение»), подписчики которых (а ими могут быть и автоматические системы) получают уведомления о транзитных событиях в реальном времени, и на основе полученного сообщения робот может сам принять решение о прерывании текущей программы для наблюдений нового источника.

Поиски оптических вспышек источников гамма-всплесков и потенциально опасных астероидов мотивировали развитие сетей небольших роботизированных телескопов.

Поиск оптических сигналов от космических гамма-всплесков мотивировал создание нескольких сетей из небольших роботизированных телескопов (или телескопов удаленного доступа). Примером может служить система RAPTOR (RAPid Telescopes for Optical Response). В России таким проектом является сеть МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов), располагающая несколькими инструментами как у нас в стране, так и за ее пределами (включая

южное полушарие). Наличие нескольких инструментов в разных точках земного шара позволяет, во-первых, избежать невозможности наблюдений из-за дневного времени или плохой погоды, а во-вторых, проводить при необходимости непрерывный мониторинг астрономического источника. Разумеется, выполняя задачи по поиску оптических транзиентов от гамма-всплесков, инструменты попутно могут решать множество других задач, поскольку обычно это инструменты с широким полем зрения и в их «сети» попадает множество различных источников.

Телескопы-роботы успешно используются для обзорных программ. В частности, для поиска и изучения астероидов, включая потенциально опасные, существует несколько проектов, таких как LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research, Исследования околоземных астероидов в лаборатории им. Линкольна), Catalina, Spacewatch («Космический дозор»), Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, Система телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования). Наблюдения в рамках каждого проекта ведутся на нескольких автоматизированных инструментах с типичными размерами от 0,5 до 1,5 м, оборудованных хорошими цифровыми камерами, позволяющими эффективно обнаруживать и изучать небольшие быстро движущиеся объекты.

Роботизированные инструменты также вносят большой вклад в изучение переменных звезд, поиск событий микролинзирования, построение кривых блеска сверхновых и обнаружение комет. С ростом размеров телескопов будет расширяться спектр решаемых задач, в частности в него могут войти спектроскопические исследования. Также мониторинг и поиск оптических транзиентов становятся более актуальными в связи с началом наблюдений гравитационно-волновых всплесков и с будущим вводом в строй таких инструментов, как системы радиотелескопов SKA и гамма-телескопов CTA (Cherenkov Telescope Array, Массив черенковских телескопов). В частности, в рамках программы RoboNet планируется постройка четырехметрового аналога Ливерпульского телескопа. Современные технологии позволяют даже таким гигантам начать наблюдения новой цели спустя всего лишь десятки секунд после получения сигнала (время реагирования небольших инструментов исчисляется секундами даже при перенаведении в противоположную точку неба).

Существенно, что робот-телескоп должен не только выполнять программу наблюдений, но и следить за погодой, условиями в башне (температура, турбулентность и т. п.) и принимать соответствующие решения. Например, переход к другой части программы, если нужный объект закрыт облачностью, или окончание наблюдений и закрытие башни, если надвигается дождь.

Развитие автоматизации небольших инструментов оказало большое влияние на любительскую астрономию. Существует большое

количество телескопов-роботов и телескопов удаленного доступа, наблюдения на которых проводят любители. Это могут быть научные и образовательные наблюдения или же просто форма интеллектуального и высокотехнологичного досуга. Существуют коммерческие системы, которые предоставляют разные услуги: от коротких наблюдений до установки телескопов под ключ на специально оборудованных площадках в местах с хорошим астроклиматом.

15.2

Обработка данных. Big data

Особенность астрономии состоит в том, что всю информацию об изучаемых объектах (если исключить некоторые тела Солнечной системы, к которым можно послать космические аппараты для изучения на месте или для забора и возврата образцов на Землю) мы получаем с помощью излучения. Поэтому обработка данных наблюдений играет очень важную роль. Чтобы узнать что-то новое о физике небесных тел, приходится применять очень сложные методы анализа наблюдений. К счастью, последние десятилетия все данные сразу же регистрируются в цифровом виде, что облегчает работу и дает возможность использовать самые современные численные методы.

Многие красивые астрономические изображения, которые публикуются в популярной литературе, являются результатом сложного процесса работы с исходными данными. Но самое главное — изощренная обработка нужна для получения научных результатов, поскольку многие открытия совершаются буквально «на пределе возможного».

Астрономические данные подвергаются сложной обработке и анализу с использованием передовых численных методов.

Обработка данных на пути к окончательному научному результату может состоять из многих этапов. Сначала нужно по возможности отфильтровать различные шумы, связанные со свойствами как наблюдаемых объектов, так и детектора, т. е. выделить собственно сигнал, который мы хотим анализировать. Сигнал может быть не просто слабым, он может быть ниже уровня шумов, но тем не менее в ряде случаев работа с данными позволяет его идентифицировать и отделить от паразитного сигнала. Далее сам анализ может быть

связан со сложной обработкой: поиском периодичности, или поиском сигнала определенной формы (если мы говорим о временных рядах), или идентификацией спектральных линий на фоне априори неизвестных влияний (эффект Доплера, гравитационное смещение, эффект Зеемана и многое другое). Наконец, когда получены научные данные, освобожденные от фоновых шумов, и получены параметры астрономических источников, сложный анализ может понадобиться для поиска корреляций между свойствами разных объектов, для сопоставления данных наблюдений с теоретическими предсказаниями и компьютерными моделями. В частности, отдельную проблему представляет автоматическая классификация объектов и событий при обработке обзоров неба. В настоящее время для этого все чаще используют нейронные сети — обучаемые компьютерные системы, пригодные для решения ряда задач (в частности, для распознавания образов).

Для автоматической классификации астрономических источников применяют нейронные сети.

Астрономия постепенно меняется. Все бóльшую роль играют крупные проекты, генерирующие огромное количество информации в ходе обзорных наблюдений. При этом астрономы зачастую не только не сидят у телескопов, но даже не занимаются первичной обработкой огромных потоков данных — это выполняется специальными программами (pipeline). Например, в проекте SDSS (Sloan Digital Sky Survey, Слоановский цифровой обзор неба) за одну ночь наблюдений генерируется около 200 гигабайт информации. Проекты следующего поколения будут давать уже много терабайт данных в день, так что астрофизика становится наукой, имеющей дело с «большими данными» (big data).

В проектах современных инструментов, таких как SKA, стоимость обеспечивающих работу (включая первичную обработку данных) суперкомпьютеров становится заметной частью полной сметы. У телескопов в удаленных местах, таких как Гавайские острова, возникают проблемы с передачей данных: между островами и материком нет широкополосных оптоволоконных каналов с большой пропускной способностью, а спутниковая передача не может обеспечить поток данных, соответствующий производительности будущих телескопов. При создании некоторых проектов на спутниках обсуждается установка фильтров, которые будут отсекают часть спектра (т. е. искусственно уменьшать до нуля чувствительность в некотором диапазоне длин волн), поскольку всю получаемую на детекторе информацию невозможно будет передать на Землю. Это ставит совершенно новые задачи перед астрономическим сообществом.

Многие открытия совершаются не благодаря новым наблюдениям, а благодаря более тщательному и изощренному анализу данных (data mining). А в новых наблюдательных проектах часть открытий совершается уже не людьми, а компьютерами (например, обнаружение астероидов в больших обзорах неба вроде Pan-STARRS). Это означает, что важными становятся не только технологии создания телескопов, но и технологии работы с данными (в том числе уже собранными). Появился даже новый термин — *астроинформатика*.

Без современной компьютерной обработки данных многие астрономические открытия никогда не были бы сделаны.

Современной тенденцией является открытый доступ к данным (постепенно это даже становится требованием). В некоторых случаях, например при обзорных наблюдениях на спутниках, данные могут сразу попадать в открытый доступ. Но обычно группам исследователей (скажем, авторам заявки на наблюдения конкретной области неба) предоставляется некоторый период времени, в течение которого данные находятся в эксклюзивном распоряжении. Однако по истечении некоторого срока (чаще всего это один год) данные попадут в открытый доступ вне зависимости от того, успели ли авторы заявки обработать и опубликовать данные, что подстегивает работу и позволяет полнее использовать полученную информацию. Все это приводит к тому, что с течением времени все астрономические данные становятся общедоступными. Например, проект SDSS является, по многим оценкам, самым продуктивным в истории астрономии именно благодаря открытому доступу к его данным. В астрономии данные часто делят на три основных уровня.

Первый — это «сырые данные» (raw data): то, что напрямую считывается с детекторов (в случае большого количества таких данных они чаще всего не хранятся). Такая информация содержит множество артефактов, связанных с деталями устройства инструмента (поврежденные пиксели на матрице, известные виды шума или паразитного сигнала, изменение чувствительности приборов со временем). Работать с такой информацией, как правило, могут только специалисты, посвятившие достаточное время обработке данных с конкретного инструмента и знающие его особенности.

Сложные методы анализа позволяют выделять слабые сигналы на фоне шумов.

Следующий уровень — это «полуфабрикаты» (data products): информация, которая уже прошла первичную обработку. Во многих

современных (особенно крупных) проектах это делается автоматически. Такая информация доступна для использования уже более широкому кругу исследователей, потому что она переведена в какой-то достаточно распространенный и хорошо описанный формат (например, FITS — Flexible Image Transport System, Гибкая система передачи изображений). Эти данные имеет смысл хранить для дальнейшего использования (в том числе в отдаленном будущем).

Наконец, третий уровень — это научные данные: полученные (и обычно опубликованные) научные результаты. Однако информация может быть использована и дальше для различных целей. Как правило, здесь для работы с данными уже не требуются специфические навыки и программы.

Астрономические данные необходимо хранить как можно дольше.

Особенность астрономических данных состоит в том, что они имеют ценность в течение весьма продолжительного времени. Это разительно отличается от ситуации в других областях физики, где всегда возможно провести новые, более точные эксперименты (на более качественном оборудовании, по новым методикам и т. д.). Поэтому прямые данные физических экспериментов, проведенных десятки лет назад, имеют обычно лишь историческую ценность — самые важные результаты этих опытов так или иначе опубликованы в научных статьях. В астрономии это не так. Астрономические данные надо хранить как можно дольше, поскольку для нас могут быть интересны даже данные тысячелетней давности из каких-нибудь китайских хроник. Поэтому во многих обсерваториях десятилетиями собирались для дальнейшего использования «стеклянные библиотеки» — снимки на фотографических пластинках. Скажем, именно стеклянная библиотека ГАИШ (Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга) МГУ позволила в середине 1960-х гг. сразу же выявить переменность первого идентифицированного квазара 3C273.

Полный объем имеющихся астрономических данных в настоящее время оценивается в петабайты, а в ближайшие годы (благодаря появлению новых больших наблюдательных проектов) он превысит несколько десятков (или даже сотен!) петабайт. Сейчас объем данных удваивается примерно за год-два, что во многом связано с совершенствованием матриц (теперь счет идет на гигапиксели).

Идеальным примером «больших данных» (big data) в науке является Большой адронный коллайдер в ЦЕРН, поток данных с которого составляет более 10 петабайт в год. В астрономии первым проектом, столкнувшимся с действительно очень большим потоком данных в рамках единой наблюдательной программы, стали

гравитационно-волновые детекторы LIGO (см. раздел 13.9 «Детекторы гравитационных волн»): после модернизации за год наблюдений накапливается примерно петабайт данных. Ожидается, что этот поток данных будет превзойден проектами SKA (см. раздел 13.4 «Радиотелескопы») и LSST. Последний станет крупнейшим обзорным телескопом в истории астрономии — с зеркалом диаметром более 8 м и ультрасовременной камерой с 3,2-гигапиксельной матрицей (тоже самой большой в истории). Пиковый поток сырых данных с камеры этого инструмента будет в ходе наблюдений достигать примерно 3 гигабайт в секунду, в то время как на SKA будет достигать порядка десятка терабайт в секунду!

Поток новых астрономических данных в ближайшем будущем составит более нескольких десятков петабайт в год.

Данные могут храниться в виде файлов (например, снимок какой-то области неба) или в виде баз данных (простейший пример — каталог объектов). Эти подходы довольно сильно отличаются: в первом случае это аналогично хранению отсканированной страницы текста в виде растрового изображения, а во втором — хранению уже распознанного текста, по которому возможен поиск. Второй способ существенно удобнее для пользователей, поскольку позволяет проводить быстрый поиск нужной информации и сопоставлять ее с другими данными. Поэтому важной задачей является хранение максимально возможного количества информации именно в виде баз.

Компьютерное моделирование также является источником больших объемов информации.

Еще одним источником больших данных в астрономии является компьютерное моделирование, в первую очередь больших космологических процессов. В них расчеты начинаются на красном смещении около $z = 30$ (примерно 100 млн лет после начала расширения), а детализация доходит до расчетов параметров отдельных галактик в нашу эпоху. При этом получаемые в расчетах изображения вполне сравнимы с реально наблюдаемой картиной. Учитывая, что обсчитываются большие объемы пространства с большим количеством галактик, такие компьютерные модели порождают огромные объемы информации. Результаты подобных расчетов востребованы исследовательскими группами по всему миру, причем речь идет не о финальных интегральных данных, а о полном доступе: такие крупные проекты выступают в роли «искусственных вселенных», элементы которых ученые могут сравнивать с наблюдениями реальных объектов в поисках

новых корреляций и закономерностей. В ходе некоторых компьютерных экспериментов специально воспроизводят «искусственные обзоры», аналогичные по своим свойствам реальным, рассчитывая наблюдаемые параметры модельных объектов.

При работе с большими данными в астрономии возникает также интересная проблема их визуализации. Это касается и данных наблюдений (например, огромные каталоги с сотнями миллионов астрономических источников), и данных компьютерного моделирования (например, визуализация эволюции крупного скопления галактик). С ростом объемов информации острота этой проблемы только возрастает. Поэтому в астрономии разрабатываются специальные пакеты программ, позволяющие эффективно работать с большими объемами данных в графическом режиме.

15.3

Численный эксперимент и моделирование

В астрономии из-за колоссальной удаленности изучаемых объектов, а также из-за их собственных масштабов невозможно проведение прямых экспериментов и измерений (исключая некоторые объекты Солнечной системы). Кроме того, многие процессы происходят на очень длинной шкале времени, из-за чего мы фактически видим лишь статичные фрагменты эволюционных последовательностей. Поэтому совершенно особое место в астрофизике занимает численное моделирование изучаемых процессов.

Из-за невозможности прямого эксперимента в астрофизике большое распространение получило компьютерное моделирование.

Примеры ситуаций, когда в астрофизике применяется компьютерное моделирование, многочисленны и разнообразны. Поскольку наиболее распространенным состоянием вещества в астрономических объектах является плазма, часто используются магнитогидродинамические численные модели. Однако они могут быть дополнены необходимостью учета ядерных и термоядерных реакций, а также экзотических состояний вещества (например, при расчетах взрывов сверхновых).

В астрофизических магнитогидродинамических расчетах зачастую необходимо учитывать свойства турбулентности, наличие ударных волн и других сложных для расчета структур. В итоге многие важные задачи до сих пор остаются не до конца решенными, несмотря на использование крупнейших суперкомпьютеров и передовых алгоритмов. К их числу относятся модели взрывов сверхновых, образование первых звезд и многое другое.

Спецификой астрофизического моделирования является изучение популяций большого числа связанных силами гравитации объектов, каждый из которых в первом приближении может считаться материальной точкой. Известно, что уже задача трех тел без дополнительных упрощений не имеет аналитического решения в виде конечного выражения. В астрономии могут встречаться ситуации, когда необходимо рассчитать поведение ансамбля из миллионов взаимодействующих друг с другом тел. Например, это может быть расчет эволюции шарового скопления или поведение звездного населения галактик при их взаимодействии.

Спецификой астрофизики является взаимодействие многих тел посредством гравитации, а также действие эффектов ОТО в сильном поле.

Моделирование движения многих тел под действием гравитации (n-body) играет столь важную роль в астрономии, что для решения подобных задач даже разработаны специальные аппаратные средства (так называемые Gravity Pipe — GRAPE), которые существенно ускоряют расчеты поведения галактик и других объектов.

Расчеты взрывов сверхновых, слияний черных дыр и формирования крупномасштабной структуры Вселенной являются яркими примерами интересных задач для компьютерного моделирования в астрофизике.

Специфичными являются и задачи, связанные с необходимостью детального учета эффектов общей теории относительности в сильном поле (предельным случаем является расчет слияния черных дыр). Развитие методов численного решения уравнений ОТО было (и является) мотивировано в первую очередь запросами астрофизиков. Так, например, для нужд гравитационно-волновых антенн было рассчитано несколько сотен тысяч вариантов слияний нейтронных звезд и черных дыр, чтобы получить формы ожидаемого сигнала. Это потребовало нескольких лет работы ряда научных групп в разных странах и стало интереснейшей вычислительной задачей в современной астрофизике.

Поскольку в астрономии в качестве источника информации мы можем использовать лишь излучение небесных объектов, важным элементом многих задач моделирования становится расчет излучательных свойств источников: спектры, параметры поляризации и др. Зачастую такие расчеты осложнены необходимостью учета множества деталей (например, огромного числа спектральных линий), а также физическими условиями, которые никогда не исследовались в лабораторном режиме из-за экстремальности тех или иных параметров. Библиотеки рассчитанных спектров являются чрезвычайно востребованными, и их, в частности, используют как входные данные для разнообразных компьютерных моделей.

Интересным методом численного моделирования, который активно применяется для исследования астрофизических задач, является так называемый *популяционный синтез*. Различают два варианта этого метода. Первый используется для моделирования интегральных характеристик больших звездных популяций, и с помощью такого подхода, например, рассчитывают интегральные спектры галактик, что важно для интерпретации наблюдательных данных. Второй — более разнообразный и распространенный — применяется для моделирования эволюции и наблюдательных проявлений популяций астрономических объектов, таких как радиопульсары или тесные двойные системы. Рассмотрим его несколько подробнее.

Важной задачей для численного моделирования является исследование эволюции и наблюдательных проявлений популяций источников — популяционный синтез.

Практически любой компьютерный эксперимент в астрофизике решает одну из двух задач. Во-первых, это предсказание свойств каких-то объектов для последующих наблюдений с использованием новых методов и приборов. Во-вторых, это проверка нашего понимания природы уже наблюдаемых объектов или их популяций. Например, при разработке телескопов всегда возникает необходимость оценить, сколько новых источников разных типов сможет обнаружить установка. Это типичная задача для популяционного синтеза. Мы закладываем в модель начальные параметры объектов, темп их рождения, эволюционные законы и на каждой стадии рассчитываем наблюдательные свойства источников. В итоге, совмещая (или, как говорят, сворачивая) результаты моделирования с параметрами чувствительности детектора, получим предсказание для конкретного инструмента.

Возможна и обратная ситуация: у нас есть данные наблюдений, и мы используем их для проверки адекватности нашего понимания

начальных параметров объектов, их эволюции или наблюдательных проявлений. Например, в популяционном синтезе мы можем сравнивать модели с разными начальными условиями или эволюционными законами на предмет соответствия данным наблюдений, проверяя тем самым гипотезы о параметрах, наблюдать которые непосредственно невозможно.

Задачи компьютерного эксперимента: проверка начальных условий и законов эволюции путем сопоставления расчетов с наблюдениями, а также прогнозирование для будущих наблюдений.

Например, с одной стороны, мы можем использовать набор предположений для того, чтобы методом популяционного синтеза рассчитать количество (и статистические свойства) радиопульсаров разных типов, которые сможет в будущем обнаружить установка SKA. Добавив в модель эволюцию двойных систем, мы можем рассчитать, сколько пульсаров в паре с черными дырами будет обнаружено. С другой стороны, можно использовать современные данные о пульсарах (с учетом чувствительности разных обзоров), чтобы попробовать выяснить, уменьшается ли магнитное поле этих нейтронных звезд в процессе их эволюции. Для этого можно провести расчеты с помощью популяционного синтеза, изменяя параметры эволюции магнитного поля и добиваясь наилучшего согласия с наблюдениями.

Для популяционного синтеза, как и для многих других видов компьютерного моделирования в астрофизике, существует много общедоступных программ с открытым кодом. Это, к счастью, довольно распространенная тенденция. Существуют депозитарии, в которых находятся сотни исходных кодов для решения различных астрофизических задач (например, сайт ascl.net — Astrophysics Source Code Library, ASCL). Разумеется, и результаты расчетов во многих случаях делаются общедоступными. Особенно это актуально в случае большого космологического моделирования.

Компьютерное моделирование медленно, но верно движется к реализации «вселенной в компьютере». Недавно важные новые результаты были получены в подходе «сверху вниз»: моделирование начинается в относительно молодой вселенной (спустя десятки миллионов лет после начала расширения), задается состояние вещества во вселенной (доли темного вещества, темной энергии, обычного вещества, излучения, динамика расширения и т. д.), неоднородности в распределении материи и другие параметры, которые в данном случае рассматриваются как начальные (их получение само может основываться на численном моделировании более ранней истории вселенной), а после этого изучается возникновение и эволюция крупномасштабной

структуры вселенной. Первые такие расчеты начались около полувека назад, однако новые технические возможности позволяют добиться огромного прогресса в точности и детализации.

Задачей-максимум является создание «вселенной в компьютере» — от Большого взрыва до отдельных галактик.

Примером недавних расчетов, начинающихся с первичных неоднородностей плотности и заканчивающихся детализацией на уровне структурных элементов карликовых галактик, является проект Illustris и его развитие IllustrisTNG (The Next Generation), а также другие аналогичные проекты, как, например, EAGLE. Результаты Illustris можно сравнивать с наблюдениями как на уровне параметров крупномасштабной структуры, так и на масштабе групп галактик (например, Местной группы) и даже на масштабе отдельных галактик. Можно найти в расчетах галактику, похожую на наблюдаемую, и отследить ее историю, изучив формирование тех или иных структур. Разумеется, компьютерные модели не могут воспроизвести все многообразие реальных процессов, происходящих на разных масштабах. Однако совершенствование моделей позволяет решать все более широкий круг проблем, сопоставляя с наблюдениями результаты расчетов.

Разумеется, в космологических расчетах с высокой степенью детализации не происходит реального моделирования каждого отдельного элемента структуры. Иными словами, когда расчеты доходят до свойств отдельных галактик, не происходит моделирования звездообразования в ней, начиная с неоднородностей межзвездной среды. Вместо этого в большом моделировании используются данные детальных расчетов звездообразования, на основе которых сформулированы определенные закономерности, представленные в аналитическом или табличном виде. Происходит слияние подхода «сверху вниз» (от космологии к галактикам) с подходом «снизу вверх» (от свойств межзвездной среды к галактике). Кроме того, эти данные можно объединять с популяционными расчетами, в результате чего мы постепенно приближаемся к «реалистичной вселенной в компьютере».

15.4

Виртуальная обсерватория

Оценки показывают, что полный объем имеющихся астрономических данных измеряется петабайтами. А в ближайшем будущем с вводом в строй таких установок, как SKA, LSST, CTA и др., темп получения данных составит десятки петабайт в год! Это не только прямые данные наблюдений, но и результаты крупных численных экспериментов, расчеты различных параметров (например, спектральных) и многое другое. В связи с этим возникает несколько проблем.

Поток разнородных астрономических данных постоянно растет.

Во-первых, данных просто много. Организация их хранения, доступа к ним и систем поиска — очень нетривиальная задача как с точки зрения технических решений, так и с точки зрения финансов. Во-вторых, важно иметь возможность быстро сопоставлять данные, полученные разными установками в разное время. Для этого нужна некая единая система, где данные можно было бы преобразовывать в общепринятые форматы. В эту систему должны быть инкорпорированы (или прямо в ней разработаны) программные инструменты для научного анализа, нужна поддержка разработчиков программного обеспечения и конечных пользователей. Все это планируется объединить в проекте Международной виртуальной обсерватории — www.ivoa.net.

Формально работа над проектом началась в 2002 г., когда был создан Международный альянс Виртуальной обсерватории (International Virtual Observatory Alliance, IVOA). Сейчас в него входит более 20 национальных виртуальных обсерваторий, а также объединенный европейский проект и Европейское космическое агентство. Наиболее активно работа идет в рамках американской Виртуальной обсерватории, где соответствующая деятельность началась в 2000 г. Но не отстает и Европа (тем более что одним из крупнейших депозитариев астрономических данных является центр в Страсбурге — Centre de Données astronomiques de Strasbourg, CDS), где благодаря усилиям Европейской южной обсерватории, британского проекта AstroGrid и других групп ученых также разрабатывались и разрабатываются системы хранения, обработки и доступа, которые в итоге должны стать частью единой сети. Многие новые крупные астрономические проекты разрабатывают

свои будущие форматы данных и работы с ними уже с учетом идей Виртуальной обсерватории.

Виртуальная обсерватория должна создать единое поле для работы с астрономическими данными.

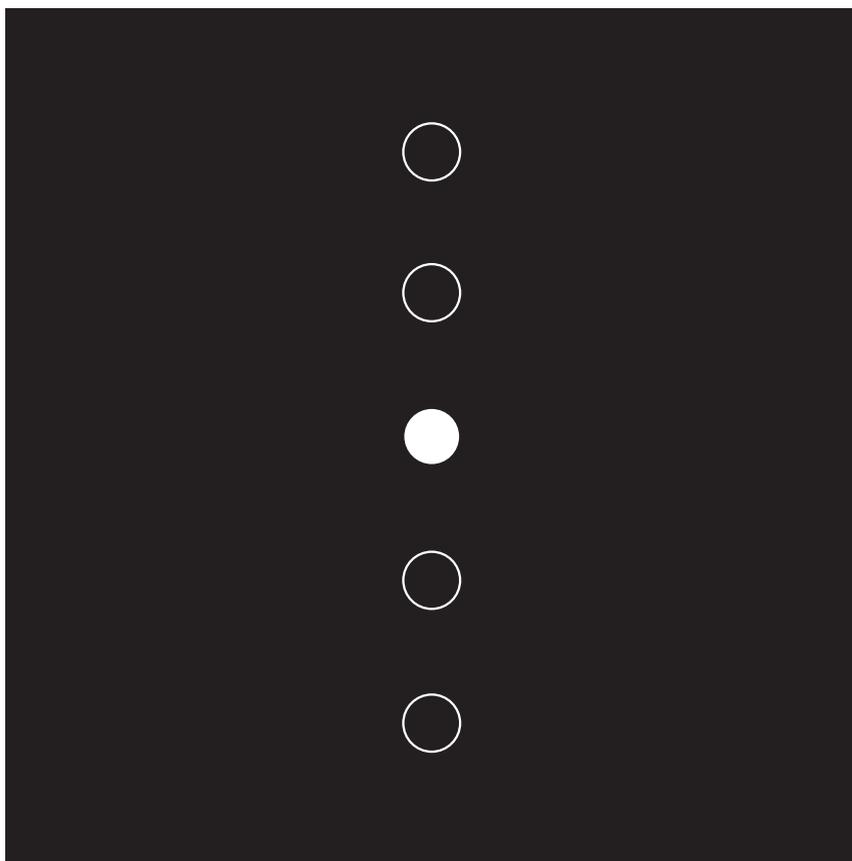
Основная цель этого проекта — сделать работу с астрономическими данными максимально эффективной. Это требует обеспечения открытого доступа к максимальному количеству данных в максимально удобной (для конечного пользователя — ученого) форме. Самая важная составляющая работы группы по созданию Виртуальной обсерватории — это разработка единого представления данных. Опыт показал, что нельзя просто «сверху» ввести какой-то общий протокол и надеяться, что все начнут ему следовать. Поэтому в настоящее время идет довольно сложная работа по процедурам, которые позволят преобразовывать уже имеющиеся данные таким образом, чтобы их использование было максимально удобно пользователям, применяющим популярные в астрономии программные средства.

Сайт Виртуальной обсерватории — ivoa.net.

Разработчики Виртуальной обсерватории выделяют еще несколько важных задач. Это создание инфраструктуры, разработка научных приложений, мониторинг существующих сетей и проектов на предмет их соответствия используемым стандартам, разработка средств для установления и поддержания такого соответствия и, наконец, поддержка конечных пользователей.

Сейчас функционирует уже довольно много программных инструментов, доступных для удаленных пользователей через интернет, позволяющих работать с огромными объемами информации, полученной на разных телескопах в рамках различных проектов. Например, введя имя объекта или его координаты, можно получить весь набор данных, уже индексируемых Виртуальной обсерваторией. Сейчас многие научные публикации уже основываются на работе с инструментами обсерватории.

В настоящее время ведущие научные журналы выдвигают требования, чтобы данные, на основе которых написаны статьи, находились в открытом доступе. Виртуальная обсерватория должна стать идеальным средством для этого в астрофизике и смежных дисциплинах.



Глава 16

ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ

16.1	Жизнь в Солнечной системе	363
16.2	Жизнь на экзопланетах	367
16.3	Двойники Земли. Зона обитаемости. Биомаркеры	371
16.4	Другие формы жизни	377
16.5	SETI	380

С древних времен людей интересовал вопрос, есть ли жизнь за пределами Земли. С началом космической эры во второй половине XX в. стали возможными запуски исследовательских аппаратов к телам Солнечной системы и появились надежды на скорое обнаружение хотя бы следов простейшей жизни. Но вскоре оказалось, что надежды эти были преждевременными. Тем не менее у нас остается шанс найти живые организмы или следы их существования на планетах и спутниках. Кроме того, в ближайшие годы реальным станет изучение состава атмосфер землеподобных экзопланет, что откроет новые возможности по поиску жизни во Вселенной.

Для работ в рамках программы по поиску жизни ученые NASA сформулировали такое определение: «Жизнь — это самоподдерживающаяся химическая система, способная к дарвиновской эволюции». Дарвиновская эволюция подразумевает наличие таких процессов и явлений, как размножение, мутации, записанная в дискретном виде наследственность, отбор. Таким образом, потенциально жизнь может заметно отличаться от земной. Однако достаточно четкие критерии для поиска у нас в первую очередь существуют для жизни земного типа.

16.1

Жизнь в Солнечной системе

До настоящего времени в Солнечной системе жизнь не обнаружена нигде, кроме Земли. Более того, не было выявлено даже следов существования жизни на других телах. Однако надежда на обнаружение жизни все еще остается. Можно выделить три основных направления поиска кандидатов. Первое — это Марс, где, возможно, в далеком прошлом существовали простейшие формы жизни (и не исключено, что они сохранились там и сейчас). Второе — это крупные ледяные спутники планет-гигантов, такие как спутники Юпитера Европа, Каллисто и Ганимед, а также спутник Сатурна Энцелад. На перечисленных кандидатах рассчитывают найти жизнь (или следы ее прошлого существования), основанную на воде, а вот третье направление не ограничивается земными формами жизни — на спутнике Сатурна Титане может существовать жизнь, основанная на углеводородах.

Жизнь или ее следы рассчитывают найти на Марсе и крупных спутниках планет-гигантов.

Обсуждая в 1998 г. возможную опасность доставки на Землю образцов с различных объектов Солнечной системы, специалисты NASA также включили в число потенциально опасных объектов астероиды типов P и D¹. Сделано это было в первую очередь потому, что об этих телах известно недостаточно, чтобы исключить их из списка объектов, где в «спящей» форме могут сохраняться простейшие формы жизни. Впрочем, сейчас мало кто включает подобные тела в ряд наиболее вероятных носителей жизни в Солнечной системе.

Молодые Венера и Марс могли быть обитаемыми планетами.

На Венере в прошлом могли существовать климатические условия, пригодные для зарождения и существования жизни. Одна из моделей климата этой планеты, разработанная в 2016 г., показывает, что в первые два миллиарда лет на поверхности Венеры могли

¹ Это темные (с низким альбедо) астероиды красноватого оттенка, которые, возможно, состоят из богатых органическими соединениями силикатов с включениями водяного льда.

существовать достаточно большие запасы жидкой воды. Отчасти это связано с тем, что в то время светимость Солнца составляла лишь 70–75% от современной. Однако в наши дни Венера, безусловно, является мертвым миром.

Климатическую историю Марса делят на три основных периода. Последние три миллиарда лет относят к так называемой амазонийской эре, на протяжении которой климат аналогичен современному и непригоден для жизни. Однако на протяжении первых двух эпох — нойской (3,5–4,1 млрд лет назад) и гесперийской (3–3,5 млрд лет назад) — климат мог быть пригоден для зарождения и развития простейших форм жизни. Геологические данные, полученные с помощью марсоходов и других исследовательских аппаратов, свидетельствуют о том, что в прошлом на поверхности Марса в больших объемах существовала жидкая вода. Кроме того, в первые сотни миллионов лет своего существования Красная планета, по-видимому, имела достаточно мощную магнитосферу, чтобы предотвратить быструю потерю атмосферных газов. Это также помогает объяснить наличие в те времена пригодных для жизни климатических условий.

На Марсе отсутствует аналог земного дрейфа континентов (тектоники плит), поэтому современный вид внешних слоев вполне аналогичен тому, который существовал 3–4 млрд лет назад, что также помогает восстанавливать древний климат планеты. К сожалению, мы пока не можем установить, были ли периоды относительно мягкого и влажного климата длительными (сотни миллионов лет) или же это были лишь короткие эпизоды (в этом случае появление жизни становится менее вероятным).

На Марсе могут быть обнаружены следы прошлой жизни или простейшие формы (бактерии) глубоко под поверхностью.

Однако, если жизнь однажды смогла возникнуть, существуют некоторые надежды обнаружить ее и в наши дни. На Земле есть бактерии, обитающие в коре на глубинах более километра. Если их аналоги появились на Марсе в первый миллиард лет его существования, то дальнейшее изменение климата не должно было бы существенно сказаться на них. А вот на Венере высокая температура достаточно прогревает внешние слои грунта, чтобы уничтожить даже такую устойчивую форму жизни.

Интересно, что некоторые ученые рассматривают даже возможность того, что жизнь возникла на Марсе, а затем была занесена на Землю вместе с марсианским веществом, выброшенным в результате падения на Красную планету массивных метеоритов (на Земле было найдено несколько метеоритов марсианского происхождения). Впрочем, это довольно экзотическая гипотеза.

Спутник Юпитера Европа на протяжении десятилетий (как минимум со времени полета космических аппаратов Voyager 1 и Voyager 2) считается потенциально обитаемым объектом, поскольку там существует глобальный водный океан. Современные данные показывают, что глубина его может составлять многие десятки километров. Снаружи этот океан покрыт ледяной корой толщиной от 2–3 до 20–30 км.

В 2014 г. с помощью космического телескопа Hubble были получены данные о том, что вода может выбрасываться из океанов Европы наружу — возможно, из-за разломов ледяной коры под действием приливных сил Юпитера. В 2016–2017 гг. в пользу этой гипотезы появились новые аргументы, однако полной ясности на настоящий момент нет. Для получения достоверных данных может потребоваться отправка специального исследовательского аппарата. Планируется, что в 2022 г. для исследования ледяных спутников Юпитера будет запущена европейская межпланетная станция JUICE (JUUpiter ICy moons Explorer, Исследователь ледяных лун Юпитера).

На Европе жизнь может существовать в глубоком подледном океане.

Сейчас активно разрабатываются проекты специальных миссий к Европе, направленные на изучение ее океана и поиск жизни. Наличие выбросов может упростить эту задачу до исследований с орбиты, хотя, конечно, более перспективной была бы посадка аппарата на поверхность: изучив места недавних выбросов, можно было бы детально исследовать вещество, поступившее из недр. Помимо этого, посадочный модуль позволит изучать океан Европы, используя дециметровое радиоизлучение Юпитера, «просвечивающее» внешние слои спутника и отражающееся от поверхности океана.

Ганимед, как и Европа, разогревается юпитерианскими приливами (свой вклад в нагрев недр вносит и распад радиоактивных элементов), так что под ледяной корой Ганимеда тоже должен существовать водный океан. С большой вероятностью такой океан есть и на Каллисто, поэтому эти два галилеевых спутника Юпитера также относят к потенциально обитаемым.

На спутнике Сатурна Энцеладе наблюдаются мощные водяные выбросы.

Если с водяными выбросами на Европе пока нет окончательной ясности, то на спутнике Сатурна Энцеладе такие выбросы были обнаружены в 2006 г. с помощью автоматической межпланетной станции Cassini. Недра Энцелада, как и в случае галилеевых

спутников Юпитера, разогреваются приливами и радиоактивным распадом. В результате там выполняется три основных условия для возникновения жизни: наличие жидкой воды, наличие энергии и наличие органических соединений (их присутствие установлено спектральным анализом выброшенного вещества). Однако на данный момент нет уверенности в том, что подледный океан Энцелада существует непрерывно на протяжении достаточно долгого времени. Возможно, он появляется лишь на десятки миллионов лет во время увеличения выделения энергии в недрах, и в таком случае вероятность возникновения жизни уменьшается.

На многих телах Солнечной системы встречаются органические соединения. По большей части они должны иметь небиологическое происхождение, однако необходимы детальные исследования. Анализ изотопного состава, относительного количества стереоизомеров (например, у аминокислот и сахаров), распределения молекул (например, парафинов) по числу атомов углерода в цепи и другие подобные данные могут предоставить серьезные аргументы в пользу биологического или небиологического происхождения обнаруженных органических соединений. Пока серьезных указаний на биологическое происхождение не обнаружено.

Такой подход может работать и для форм жизни, отличающихся от земной. В этом плане самым интересным объектом в Солнечной системе является Титан. Этот крупный спутник, уступающий по размерам и массе лишь Ганимеду, имеет плотную азотную атмосферу, а на его поверхности с помощью зонда Huygens и станции Cassini были обнаружены озера из жидких углеводородов. Некоторые ученые полагают, что жидкие углеводороды могут стать основой для других форм жизни, заменив воду. Так ли это, могут показать лишь специальные исследования на поверхности Титана.

Ключевой задачей может стать доставка образцов вещества с потенциально обитаемых объектов на Землю для детального анализа.

Кроме отправки биохимических лабораторий на борту автоматических посадочных модулей важнейшей задачей является доставка образцов на Землю для более детальных исследований. К настоящему времени уже доставлялись образцы вещества комет, астероидов и межпланетной пыли (а также, разумеется, большое количество лунного грунта). В ближайшем будущем планируется доставка марсианского грунта (миссия Mars Sample Return Mission, Миссия по доставке образцов марсианского грунта), а в более отдаленных планах стоит доставка вещества с ледяных спутников планет-гигантов.

16.2

Жизнь на экзопланетах

Одной из важнейших и интереснейших задач современной астрофизики является обнаружение жизни в других планетных системах. Сложность решения этой задачи связана в первую очередь с тем, что мы крайне ограничены в средствах наблюдений, а о полетах к другим звездам можем лишь мечтать.

Вторая сложность состоит в том, что нам известен лишь один пример биосферы — земной. Соответственно, мы (очень приблизительно) представляем себе условия зарождения и развития жизни, химические процессы и их продукты только для условий земной биосферы. Это позволяет примерно сформулировать ожидаемые астрономические макропараметры экзопланет или их спутников, где потенциально возможно существование такой жизни. Для других типов биосфер мы не можем сформулировать четкие критерии для ведения сколько-нибудь результативных поисков с помощью дистанционных (телескопических) наблюдений.

Единственные известные нам формы жизни — земные.

Наконец, следует отметить, что даже в земном случае мы недостаточно точно представляем себе критически важные условия для зарождения жизни и последующей эволюции. Наши знания не хватает для детального моделирования климатических систем, тем более на больших отрезках времени. Все это усложняет постановку астрономической задачи по поиску обитаемых (или хотя бы потенциально обитаемых) экзопланет или их спутников.

На появление и развитие жизни может влиять множество различных факторов, совместный учет которых представляет собой очень сложную задачу. Отбрасывая неизвестные науке экзотические формы жизни, можно прийти к выводу, что ключевым фактором является наличие жидкой воды. По всей видимости, для появления и существования простейших форм жизни можно сформулировать более мягкие условия (например, подповерхностное существование воды, как на Европе или Энцеладе). Но поскольку для дистанционного поиска жизни будет применяться в первую очередь спектральный анализ атмосфер, то следует говорить о возможности существования жидкой воды (и жизни) на поверхности тела (в дальнейшем мы будем рассматривать в основном этот вариант).

Для существования воды на поверхности необходима железно-каменная планета типа Земли. Это задает достаточно узкий диапазон масс: от 0,1 массы Земли (массы наиболее крупных планетезималей) до 10 земных масс. Более тяжелые планеты будут успевать аккрецировать из протопланетного диска достаточно толстые атмосферы, в этих случаях парниковый эффект чаще всего будет приводить к испарению воды с поверхности.

На появление и развитие жизни влияет множество факторов, всю совокупность которых мы пока не можем учесть.

Далее необходимо сформулировать параметры звезд, важные для существования жизни. В первую очередь следует отбросить звезды тяжелее нескольких солнечных масс, поскольку время их жизни недостаточно велико для развития биосферы. Также следует исключить из рассмотрения наиболее старые звезды, так как в туманностях, из которых они образовывались, доля элементов тяжелее гелия была невелика, и там ниже вероятность появления как пригодных для жизни планет, так и самой жизни.

Ключевым фактором для зарождения и развития жизни, подобной земной, является жидкая вода.

Маловероятно наличие жизни на планетах вокруг самых легких звезд. Как мы увидим в дальнейшем, зоны обитаемости у таких светил располагаются на небольшом расстоянии. В итоге на планеты действуют мощные приливные силы, приводящие к синхронизации собственного и орбитального вращения, в результате чего планета все время повернута к звезде одной стороной (отсутствует смена дня и ночи), а кроме того, ось собственного вращения становится перпендикулярной плоскости орбиты (отсутствие смен времен года). Все это может сделать невозможным появление или развитие жизни. Близость звезды также отрицательно сказывается на планете из-за потока звездного ветра и ультрафиолетового излучения, которые не только отрицательно влияют на различные формы жизни, но и способствуют потере планетой атмосферы (в частности, воды).

Для защиты планеты от звездного ветра необходимо магнитное поле, для которого, в свою очередь, требуется наличие у планеты жидкого железного ядра. Кроме того, медленное вращение планеты после синхронизации собственного и орбитального периодов может исключить формирование сильного магнитного поля даже при наличии жидкого ядра. По всей видимости, это налагает дополнительные ограничения на возможные массы и другие параметры обитаемых планет.

Жизни на планете могут угрожать внешние отрицательные воздействия, такие как вспышки близких сверхновых или пролет планетной системы через плотные межзвездные облака. Поэтому можно утверждать, что в Галактике есть области, где длительное стабильное развитие жизни более вероятно, а есть те, где оно менее вероятно. Так, например, на расстоянии менее 1–2 килопарсек от центра прошлая активность сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики могла быть губительной для жизни. Положение Солнца соответствует нашим представлениям о том, где находятся наиболее благоприятные области для долгоживущих биосфер с развитыми формами жизни.

Условия существования жизни налагают ряд ограничений на возможные параметры звезд и планет.

Также следует отметить, что не все этапы развития Вселенной одинаково благоприятны для существования жизни земного типа. Скорее всего, ранние этапы эволюции Вселенной, равно как и отдаленные от нас периоды будущего, не слишком благоприятны для появления биосфер, подобных нашей (например, в далеком будущем, когда темп звездообразования существенно упадет из-за истощения пригодного для этого газа, недра новых землеподобных планет будут меньше разогреваться распадом радиоактивных элементов, что может сказаться на их обитаемости). Но при обсуждении современных обитаемых планет это является слабым ограничивающим фактором.

Оценки показывают, что для нескольких процентов звезд типа Солнца перечисленные условия должны быть выполнены. Это означает, что только в нашей Галактике могут существовать сотни миллионов звезд с планетами, потенциально пригодными для жизни. Впрочем, это слишком оптимистичный взгляд: как было сказано выше, мы недостаточно хорошо понимаем весь набор важных факторов и не можем утверждать, что число потенциально обитаемых планет столь велико.

Детали строения планетной системы и наличие у планеты крупного спутника могут играть важную роль в долговременном развитии жизни.

Для длительной эволюции необходима стабильность внешних условий. В частности, орбита планеты должна иметь низкий эксцентриситет и быть достаточно устойчивой. В настоящее время данные наблюдений показывают, что аналоги Солнечной системы, в которой орбиты крупных планет и Земли являются практически круговыми, встречаются относительно редко. Численные расчеты эволюции

планетных орбит на масштабах миллиардов лет требуют большого количества компьютерного времени, поэтому провести детальный анализ для каждой потенциально обитаемой планеты невозможно. Кроме того, мы можем не знать всех особенностей строения системы, так что не исключена ситуация, когда по данным имеющихся наблюдений планета отвечает всем основным требованиям к потенциально обитаемым планетам, но ее эволюция на большом масштабе времени исключает развитие сложных форм жизни.

Простейшие формы жизни, не формирующие глобальную биосферу, которая влияет на параметры атмосферы планеты, могут встречаться намного чаще. Но у нас пока нет способов для их обнаружения.

Важным может быть и наличие такого необычно крупного спутника, как Луна. Кроме ряда довольно экзотических гипотез о роли Луны в эволюции земной жизни (например, «непредсказуемость» величины приливов из-за одновременного влияния Солнца и Луны, что могло способствовать выходу жизни на сушу) есть и более определенные небесно-механические аргументы. Согласно некоторым моделям, наличие Луны стабилизирует ориентацию земной оси по отношению к эклиптике. Без этого фактора на больших временных масштабах могли бы происходить катастрофические климатические изменения, препятствующие развитию жизни².

Данные показывают, что на ранних этапах своего существования Земля была практически безводной планетой. Это связано и с особенностями ее формирования в той области протопланетного диска, где доля воды мала, и с процессами на первых этапах существования планеты. Вода была привнесена на Землю извне. По всей видимости, это произошло в период так называемой поздней тяжелой бомбардировки, когда на Землю выпадало большое количество комет, астероидов (в частности, углистых хондритов) и, возможно, других тел, богатых водой. Такая ситуация может быть достаточно редкой среди планетных систем Галактики, поскольку требуется сочетание ряда условий (количество планет-гигантов и характер их миграции, наличие в области влияния этих планет большого количества малых тел с высоким содержанием водяного льда и др.). Столь сложная комбинация условий выделяет эволюцию нашей планеты среди других подобных тел.

Таким образом, существование развитых форм жизни требует сочетания многих факторов, что может приводить к относительной редкости биосфер, подобных современной земной.

² Заметим, что существуют новые расчеты, согласно которым стабилизирующее влияние Луны может быть существенно меньше, чем полагали ранее.

В заключение отметим, что крупные спутники планет также могут быть обитаемыми. Однако если мы исключим примитивные формы жизни в подледных океанах, то речь может идти лишь о крупных объектах, сравнимых с Марсом. Такие спутники должны быть относительно редкими (например, в Солнечной системе их нет). Зато близость крупной планеты может, во-первых, давать дополнительный источник энергии в виде приливов, а во-вторых, магнитное поле планеты-гиганта может защитить близкий спутник от вредоносного влияния звездного ветра. Однако попадание планеты-гиганта в зону обитаемости требует миграции в протопланетном диске, при этом спутники планеты могут быть потеряны. Пока мы не знаем ни одной экзолуны, но в будущем поиски жизни распространятся и на эти объекты, если они будут удовлетворять базовым требованиям к потенциальной обитаемости.

Крупные спутники экзопланет (экзолуны) также могут быть обитаемыми.

16.3

Двойники Земли. Зона обитаемости. Биомаркеры

Даже жизнь земного типа может существовать в крайне экзотических условиях: глубоко под поверхностью планеты, в глубине океанов (не говоря уже о том, что жизнь может принципиально отличаться от земной). Однако, обсуждая потенциально обитаемые планеты, приходится ограничиваться достаточно развитыми формами жизни земного типа, поскольку лишь для них можно сформулировать достаточно понятные критерии поиска с помощью дистанционных методов (если же жизнь основана на существенно иных принципах, то сделать это пока невозможно).

Мы рассчитываем найти жизнь земного типа.

Современная концепция поиска жизни на экзопланетах базируется на трех основных идеях:

1. Идентификация землеподобных планет.
2. Нахождение планет в зоне обитаемости.
3. Поиск биомаркеров в атмосферах планет, соответствующих условиям 1 и 2.

Обнаружение двойников Земли является технически сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, это небольшие легкие планеты, так что для любого метода наблюдения поиск таких планет требует высокой чувствительности (см. раздел 3.1 «Способы обнаружения и изучения экзопланет»). Например, для обнаружения двойника Земли методом лучевых скоростей около звезды, являющейся двойником Солнца, требуется точность выше 10 см/с, а такие показатели пока не достигнуты. А для транзитного метода ослабление блеска двойника Солнца при прохождении по его диску двойника Земли составляет 0,0084% — на пределе чувствительности космического телескопа Kepler.

Во-первых, требуется найти планеты, похожие на Землю.

Во-вторых, для надежного установления факта подобия планеты Земле необходимо измерить сразу и массу, и радиус планеты. Это непросто, поскольку обычно метод лучевых скоростей позволяет измерить лишь массу (к тому же есть неопределенность, связанная с неизвестной ориентацией орбиты планеты по отношению к лучу зрения), а метод транзитов — в первую очередь радиус планеты.

Тем не менее на сегодняшний день известны десятки планет, которые с высокой вероятностью имеют массы и радиусы, примерно равные земным. Однако стоит учесть, что по другим параметрам (детали состава, величина магнитного поля, период вращения, наличие тектоники плит, наличие крупных спутников, подобных Луне, и т. д.) эти «двойники Земли» могут существенно отличаться от нашей планеты.

Легкие небольшие планеты проще обнаруживать вокруг более легких, чем Солнце, звезд — с меньшим размером, массой и светимостью: падение блеска при прохождении планеты по диску звезды (транзит) и изменение лучевой скорости звезды в этом случае оказываются больше. Также планеты легче обнаружить, если они находятся ближе к звезде. Но все же не слишком близко, чтобы на поверхности была не слишком высокая температура: это важно для потенциально обитаемых планет. Планета должна попадать в так называемую *зону обитаемости*.

Во-вторых, планета должна находиться в зоне обитаемости.

Термин «околозвездная зона обитаемости» (circumstellar habitable zone) был введен в 1993 г. в работе Джеймса Кастинга (James Kasting) и его коллег. До этого Харлоу Шэпли (Harlow Shapley)

и Юбертус Страгхолд (Hubertus Strughold) в 1953 г. с разных точек зрения обсуждали, на каком расстоянии от Солнца на поверхности планеты может существовать жидкая вода. В 1959 Су-Шу Хуанг (Su-Shu Huang) впервые использовал термин «зона обитаемости» (habitable zone). Однако проблема предельных расстояний от звезды, на которых планета еще может быть обитаемой, обсуждалась еще в XIX в. Современные подходы к расчетам границ области, в которой возможно длительное существование жидкой воды на поверхности планеты, начали применяться в 1970-е гг. в работах Майкла Харта (Michael Hart) и его коллег.

В самой простой форме расчет границ зоны обитаемости может провести даже школьник. Предположим, что единственным источником тепла является свет звезды. В рамках «нулевого приближения» можно пренебречь влиянием атмосферы и установить граничные условия: на внутренней границе зоны обитаемости температура поверхности планеты, нагреваемой звездой, равна $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (373 K), а на внешней — $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273 K). Затем надо учесть, что температура поверхности планеты в такой модели спадает как квадратный корень из расстояния от звезды, температура поверхности которой известна. Для Солнца она составляет приблизительно 5800 K , и если мы примем для простоты, что Земля поглощает всю падающую солнечную энергию, то в результате получим, что такой упрощенной зоне обитаемости соответствуют расстояния примерно от 1 до 2 а. е. Однако в реальности необходим учет многих других эффектов (в первую очередь атмосферных), чтобы точнее рассчитать температуру на планете и, соответственно, точнее определить границы зоны обитаемости.

На сегодняшний день планеты с массой менее нескольких масс Земли и/или радиусом менее двух земных, находящиеся в зоне обитаемости, относят к потенциально обитаемым.

Внутренняя граница зоны обитаемости определяется запуском неудержимого (runaway) парникового эффекта, который приводит к росту температуры. А это, в свою очередь, — к испарению всей воды с поверхности в атмосферу. Затем под действием ультрафиолетового излучения от молекул воды отрывается водород, который теряется атмосферой планеты. Расчеты показывают, что для Солнечной системы внутренняя граница зоны обитаемости близка к орбите Земли и составляет около $0,86\text{--}0,99$ а. е. Необходимо отметить, что эти расчеты пока не учитывают многие особенности реального земного климата, поэтому не стоит особенно опасаться того, что Земля близка к внутренней границе зоны. Однако со временем это станет важным, поскольку из-за постепенного роста светимости Солнца

через несколько сотен миллионов лет наша планета окажется вне зоны обитаемости, и условия на ней начнут быстро меняться в сторону тех, которые мы сейчас наблюдаем на Венере: парниковый эффект быстро увеличит температуру поверхности на десятки градусов.

Зона обитаемости определяется из условия существования жидкой воды на поверхности планеты.

Внешняя граница зоны обитаемости определяется тем, что даже совместный парниковый эффект, создаваемый углекислым газом (CO_2) и водяным паром (H_2O), не может обеспечить достаточно теплый климат с удалением планеты от Солнца. Современные расчеты дают для этого критического расстояния величину, примерно равную 1,4–2 а. е.

В молодой Солнечной системе, когда светимость Солнца составляла лишь 70–75% от современной, Венера могла находиться в зоне обитаемости. А Марс, возможно, всегда находился и будет оставаться в ней практически до начала превращения Солнца в красного гиганта.

Для рассмотрения разнообразных вариантов, которые могут встретиться в случае разных звезд и планет, понадобится учет множества дополнительных факторов. Кроме деталей состава атмосферы важными будут период вращения планеты и ее масса, эксцентриситет орбиты, наклон оси, величина магнитного поля. Для звезд важно учитывать не только их полную светимость, но и особенности спектра, поскольку лучи разных длин волн будут по-разному взаимодействовать с атмосферами планет, а также уровень активности (количество вспышек, их энергетику и т. п.).

Самыми многочисленными звездами являются красные карлики. Вокруг них открыто множество экзопланет, некоторые из которых формально попадают в зону обитаемости. Известными примерами небольших планет в зонах обитаемости вокруг красных карликов являются Проксима Центавра b и несколько планет системы TRAPPIST-1. Однако у красных карликов низкая светимость, так что и внутренняя, и внешняя границы зоны расположены близко к звезде, и планета, находящаяся в этой зоне, с высокой степенью вероятности будет иметь период собственного вращения, равный орбитальному (наступит приливная синхронизация). Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах условий на поверхности, и чаще всего такие планеты не смогут сохранять воду в жидком состоянии.

Как уже было отмечено выше, Земля со временем окажется вне зоны обитаемости из-за роста светимости Солнца. Такая ситуация свойственна всем системам, так как энерговыделение звезд меняется даже на стадии Главной последовательности. Поэтому расчет зоны обитаемости вокруг конкретной звезды привязан к определенному моменту

в ее жизни. А с точки зрения развития жизни вплоть до появления достаточно сложных форм, обитающих на поверхности, важно, чтобы планета находилась внутри зоны обитаемости в течение продолжительного времени. Важно это и на коротком отрезке времени, поэтому планеты на эксцентричных орбитах, проводящие лишь небольшую часть времени в зоне обитаемости, являются плохими кандидатами при поиске жизни.

Сейчас известны экзопланеты в двойных системах, обращающиеся или вокруг одного из компаньонов, или же вокруг всей двойной звезды. В этих случаях также можно рассчитать зоны обитаемости, однако важно при этом иметь в виду, что нередко орбиты планет в двойных системах могут претерпевать вековые изменения, что будет приводить к их выходу из зоны обитаемости.

Галактическая зона обитаемости определяет область, где жизни меньше угрожают такие катаклизмы, как, например, взрывы сверхновых.

Менее строгим является понятие *галактической зоны обитаемости*. В этом случае речь идет о возможности длительного существования и развития жизни, которым могут угрожать такие внешние воздействия, как взрывы сверхновых, близкие пролеты звезд, попадание в плотные молекулярные облака. В некоторых областях галактик такие события более вероятны, в некоторых — менее. Выделенной считается *зона коротации*, в которой скорость движения звезды диска вокруг центра галактики примерно равна скорости спирального узора. Тогда звезда и ее планеты реже оказываются вблизи рукавов, где опасные воздействия более вероятны. Именно такое положение, согласно многим моделям, занимает наше Солнце.

Третьим пунктом на пути установления потенциальной обитаемости планеты является обнаружение биомаркеров в ее атмосфере.

Обнаружив планету земного типа на устойчивой примерно круговой орбите в зоне обитаемости у звезды Главной последовательности с подходящим возрастом, мы относим ее к потенциально обитаемым. Следующим шагом должно стать изучение характеристик атмосферы такой планеты. Ученые пытаются выделить набор веществ, присутствие которых в атмосфере должно гарантировать существование на планете жизни земного типа. При этом спектральные линии соответствующих молекул должны быть обнаружимы современными средствами или хотя бы инструментами, которые могут быть созданы в ближайшем будущем. Такие вещества называют биомаркерами.

Для земной жизни важны разные вещества. Кроме воды и кислорода важную роль в биохимии играют, например, сера и фосфор, однако следы присутствия соединений с этими элементами будет трудно обнаружить в атмосферах потенциально обитаемых планет. Кроме того, важно выбирать такие вещества и их комбинации, которые трудно объяснить естественными небиологическими (абиогенными) процессами. Так, например, сосуществование в земной атмосфере кислорода (O_2) с метаном (CH_4) и закисью азота (N_2O) требует биологических процессов.

К основным биомаркерам относят молекулы O_2 , O_3 , H_2O , CH_4 , CO_2 , N_2O (некоторые вещества должны присутствовать в значительных количествах, как, например, кислород, поскольку малые его количества могут быть абиогенными). Иногда в список включают также аммиак (NH_3) и некоторые другие соединения. По отдельности эти вещества могут иметь абиогенное происхождение, но наличие их всех вместе с высокой вероятностью указывает на проявление жизни, подобной нашей.

К основным биомаркерам относят молекулярный кислород, озон, воду, метан, углекислый газ и закись азота («веселящий газ»).

Обнаружение присутствия линий биомаркеров в спектрах землеподобных планет — очень трудная задача. Во-первых, речь идет об очень слабых объектах, поэтому необходимы крупные инструменты. Во-вторых, основные линии находятся в инфракрасной части спектра, где земная атмосфера недостаточно прозрачна. По этим причинам основные результаты, по-видимому, будут получать в рамках специальных космических проектов, подобных Darwin («Дарвин») и TPF (Terrestrial Planet Finder), которые, к сожалению, не были включены в реализующиеся космические программы. На сегодняшний день основные надежды связаны со следующим поколением крупных наземных телескопов с диаметрами зеркал 30–40 м и с космическим телескопом James Webb.

По всей видимости, поиск спектральных линий H_2O , CH_4 , CO_2 нужно будет вести из космоса, так как они лежат в основном на длинах волн более 5 мкм, а в этом диапазоне наша атмосфера почти непрозрачна. Для наземных телескопов ближайшей задачей будет обнаружение кислорода в спектрах транзитных планет. К сожалению, чтобы накопить достаточный сигнал, придется наблюдать много прохождений планеты по диску звезды, поэтому результат может быть получен лишь за довольно длительное время. Расчеты показывают, что для этого лучше всего подходят транзитные планеты в зонах обитаемости вокруг красных карликов. К сожалению, как уже было отмечено выше, это не лучшие кандидаты в двойники Земли, в том

числе и по той причине, что сильное ультрафиолетовое излучение, возникающее при мощных вспышках на маломассивных звездах, разрушает молекулы ДНК.

Для обнаружения линий всех основных биомаркеров понадобятся специальные космические проекты.

Также нужно помнить, что обитаемая планета — это не обязательно точная копия современной Земли. Свойства атмосферы нашей планеты 1–2 млрд лет назад заметно отличались от сегодняшних, хотя Земля в то время уже была обитаемой. Расчеты учитывают и это: моделируется изменение спектра земной атмосферы с течением времени, и, возможно, это поможет в поисках. Гораздо труднее будет доказать существование жизни, не похожей на земную.

16.4 Другие формы жизни

Определение жизни («самоподдерживающаяся химическая система, способная к дарвиновской эволюции») оставляет в стороне существование (и, возможно, недарвиновскую эволюцию) технических систем или компьютерных программ, а также развитие цивилизации, освоившей генную инженерию (исключающую естественный отбор из биологической эволюции). Такой подход оправдан, поскольку для появления самозволюционирующих роботов или компьютерных кодов, равно как и высокоразвитой цивилизации, необходим предшествующий этап эволюции химических систем под действием естественного отбора.

Синтетическая биология показала возможность модификации молекул ДНК.

Земная жизнь использует воду как растворитель и основана на углеродных соединениях, а окислителем является кислород, также большую роль в биохимии играет фосфор. Возможны ли иные варианты, при которых основой существования жизни являются другие вещества? Пока у нас есть лишь гипотезы на этот счет, но некоторые из них обсуждаются достаточно серьезно.

Лабораторные эксперименты продемонстрировали возможность существования ДНК, использующих другие азотистые основания (или

же их количество может отличаться от того, что используют все существа на Земле). Кроме того, нет сомнений в том, что можно менять и расширять список аминокислот, используемых живыми организмами, поэтому, безусловно, возможно существование жизни, основанной на углероде и воде, но использующей другой «биохимический набор».

Альтернативными растворителями могут быть, например, аммиак, метанол, формамид, а также, возможно, метан.

Кроме того, вода не является единственно возможным растворителем для обеспечения существования жизни. Безусловно, в некотором диапазоне температур вода — лучший вариант, особенно для углеродной жизни (кроме того, вода и углерод более распространены, чем возможные альтернативы). Однако есть и другие жидкости, которые могут выполнять эту роль. Важно, чтобы это был так называемый полярный растворитель, к числу которых помимо воды относятся спирты, аммиак, формамид (амид муравьиной кислоты) и некоторые другие жидкости. В экзотических условиях растворителем могут быть жидкие сероводород (H_2S) и углекислый газ (CO_2). Некоторые исследователи рассматривают в качестве подходящего вещества даже серную, плавиковую и синильную кислоты! Разумеется, если мы меняем растворитель, то меняется вся биохимия, в том числе придется заменить молекулу ДНК на другой молекулярный носитель генетической информации.

Замена растворителя приводит к изменению всей биохимии.

Аммиак является одним из лучших кандидатов на роль растворителя. Во многом он похож на воду, и довольно легко представить некоторые основы биохимии с аммиаком в качестве растворителя. Разумеется, биомолекулы претерпят изменения: например, во многих случаях двойная связь углерод — кислород заменится на углерод — азот. Оставаясь жидким при более низких температурах, чем вода, аммиак мог бы служить основой жизни на холодных телах. Однако некоторые особенности этой жидкости (например, аммиачный лед тяжелее жидкой фазы, поэтому океан, скажем, может легко промерзнуть целиком) могут помешать развитию жизни более высокого уровня, чем бактериальный.

Хорошим вариантом является смесь воды и аммиака, поскольку она может оставаться жидкой при низких температурах, по той же причине в качестве альтернативы рассматривается и смесь воды с перекисью водорода, еще одним хорошим кандидатом в растворители в холодных

мирах является метанол. А вот метан является неполярным растворителем и хуже подходит на роль «жидкости жизни». Кроме того, жидкий метан требует низких температур, при которых все химические процессы протекают медленно, так что формирование сложных структур, необходимых для появления жизни, может быть невозможным. Тем не менее некоторые ученые полагают, что даже метан может стать средой, пригодной для зарождения и существования жизни (например, на Титане).

Некоторые потенциально хорошие растворители (скажем, формамид) являются слишком редкими, чтобы серьезно рассматривать их в качестве основы для биосферы. Однако в некоторых (тоже редких) условиях они могут прекрасно подойти на эту роль.

Рассматриваются и совсем экзотические варианты жидких растворителей, существующих при экстремальных условиях. Например, это жидкий молекулярный водород (H_2) в недрах планет-гигантов, или жидкий азот, который может существовать на поверхности спутника Нептуна — Тритона. Жидкий азот рассматривали и как растворитель для жизни, основанной на кремнии (вместо углерода).

Рассматривается возможность жизни, основанной на кремнии, а не на углероде.

Жизнь, основанная на кремнии, давно прижилась в качестве элемента научной фантастики. Однако некоторые исследователи сохраняют надежду, что и в реальной жизни биохимические полимеры могут в качестве основного элемента использовать кремний (Si). Понимается, речь должна идти об условиях, в которых углеродная жизнь совершенно невозможна, поскольку в противном случае углерод будет иметь серьезные преимущества с точки зрения химии, а также с точки зрения обилия его соединений в природе (например, в межзвездной среде обнаружены многие десятки молекул с участием углерода, в том числе довольно сложные, и лишь несколько молекул с атомами кремния). Такими условиями могут быть очень высокие или низкие температуры, а также высокое давление.

Согласно некоторым оценкам, жизнь на основе кремневодородов (так называемых силанов — аналогов углеводородов) могла бы возникнуть в бескислородной атмосфере, в безводной среде, при низкой температуре и высоком давлении и при дефиците углерода. Понадобится подходящий растворитель, которым мог бы быть метанол (менее вероятно, что подойдет метан). Однако среди известных небесных тел нет подходящих кандидатов с подобными условиями.

Другие типы кремниевой жизни (например, основанные на силиконе или силикатах) сейчас не рассматриваются как реалистичные. Во многом это связано с отсутствием подходящих растворителей для тех условий, в которых такие формы теоретически могли бы существовать.

Кремний может заменять углерод не полностью, а лишь частично: биохимия может быть построена и на углероде, и на кремнии одновременно. Эксперименты показывают, что в некоторых биологически важных молекулах часть атомов углерода может быть заменена на кремний. Но поскольку связь углерод — углерод сильнее, атомы углерода чаще будут связываться друг с другом, чем с кремнием. Разумеется, кремний играет важную роль в существовании земных организмов, и легко представить себе существа или растения, где его вклад еще больше.

Кремниевая жизнь могла бы существовать в очень экзотических условиях.

Кроме кремния обсуждались и другие элементы, которые могли бы потенциально заменить углерод, — бор, азот, фосфор, сера, германий. Однако анализ показывает, что при этом возникают сложности, которые кажутся непреодолимыми.

Для поиска «другой» жизни необходимы другие биомаркеры.

Лабораторные эксперименты, особенно в области синтетической биологии, могут пролить свет на возможность существования жизни, основанной на других биохимических наборах. Если такая жизнь возможна, исследования помогут сформулировать набор биомаркеров для ее дистанционного поиска.

16.5 SETI

Обнаружение хотя бы следов существования внеземных цивилизаций было бы грандиозным событием для всего человечества (что уж говорить об установлении контакта!). Однако, несмотря на серьезные усилия, прилагаемые в течение более чем полувека для обнаружения сигналов внеземных цивилизаций, такой поиск пока дал только отрицательные результаты.

Исторически первым появился термин SETI (Communication with ExtraTerrestrial Intelligence, Коммуникация с внеземным разумом), предложенный в 1965 г. Рудольфом Пешekom (Rudolf Pesek).

Однако довольно быстро стало понятно, что связь (контакт) — это дело отдаленного будущего, а пока речь идет только о поиске (search), поэтому термин CETI был заменен на SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence, Поиск внеземного разума). Именно эта аббревиатура сейчас является общеупотребительной для обозначения широкого круга вопросов, связанных с изучением проблемы поиска и существования внеземных цивилизаций.

Несмотря на более чем полувековые усилия, никаких значимых следов существования внеземного разума не обнаружено.

Безусловно, вопросы обитаемости других миров давно занимали умы ученых, писателей и философов. Однако до середины XX в. это в основном были отдельные отрывочные теоретические изыскания, часто связанные с обсуждением вопросов существования жизни на Марсе и связи с тамошними обитателями. Современная история проблемы внеземных цивилизаций и SETI начинается в 1959 г., когда Филип Моррисон (Philip Morrison) и Джузеппе Коккони (Giuseppe Cocconi) опубликовали свою работу в журнале *Nature*, где обсудили перспективы поиска сигналов внеземных цивилизаций в радиодиапазоне.

Современная история SETI начинается со статьи Моррисона и Коккони (1959 г.).

Независимо от этой работы в 1960 г. Фрэнк Дрейк (Frank Drake) начал поиски таких сигналов на 26-метровом телескопе в Грин-Бэнк (Green Bank) в Западной Виргинии. В рамках этого проекта, получившего название Ozma («Озма» — в честь принцессы страны Оз из книги Ф. Баума), наблюдались звезды эпсилон Эридана и тау Кита. С тех пор во всем мире было осуществлено около сотни проектов по поиску искусственных радиосигналов внеземного происхождения на различных радиотелескопах, включая наиболее крупные (Arecibo («Аресибо»), РАТАН-600, Parkes («Паркс») и др.).

Уже в 1960 г. начались поиски сигналов внеземных цивилизаций в радиодиапазоне.

Поиск был рассчитан на разные виды сигналов. Это может быть собственно «сообщение» — специальный сигнал, призванный привлечь внимание к внеземной цивилизации и, возможно, несущий информацию о ней. Но это может быть и «шум», связанный с работой разнообразных установок (например, Земля неплохо «видна» с ближайших звезд в радиодиапазоне из-за работы телевизионных станций

и радаров). Наконец, может быть перехвачен сигнал, не предназначенный для нас: например, сигнал мощных радаров.

Хотя многократные дискуссии обычно заканчиваются выводом, что именно радиодиапазон наиболее пригоден для поисков сигналов внеземных цивилизаций, тем не менее обсуждались и другие подходы. Наибольшее развитие получила концепция *оптического SETI*, предложенная в 1961 г. Робертом Шварцем (Robert Shwartz) и Чарльзом Таунсом (Charles Townes), изобретателем лазера. Именно возможность посылать очень узкие световые пучки с помощью лазера позволяет использовать оптический канал связи. Было осуществлено несколько проектов по поиску оптических сигналов внеземных цивилизаций (в СССР такими работами занимались Викторий Шварцман в Специальной астрофизической обсерватории и его ученики). Разрабатываются подобные программы наблюдений, а также оборудование для них и в наши дни. Многие полагают, что такой вид связи предпочтительнее для передачи информации после установления контакта, когда ясно, куда точно нужно посылать сигнал.

Обсуждался также ряд экзотических подходов по поиску искусственных сигналов, основанных на использовании рентгеновского, гамма- и даже нейтринного и гравитационно-волнового излучений. Однако очевидно, что радиосвязь и оптическая связь имеют неоспоримые преимущества.

Кроме радио для поисков внеземных цивилизаций также используются оптические наблюдения.

Особняком стоит концепция поиска «космических чудес», предложенная в середине 1960-х гг. Николаем Кардашевым. Его идея состоит в том, что результат деятельности развитой технической цивилизации может выглядеть как труднообъяснимый искусственный источник. Попытки обнаружить такие «астроинженерные» конструкции (например, сферы Дайсона³) продолжаются и сейчас. Периодически появляются публикации, когда тот или иной необычный источник, для поведения которого не удастся придумать хорошего естественного объяснения, становится предметом обсуждения в контексте «космических чудес», как было, например, со звездой КIC 8462852.

Кроме пассивных поисков сигнала обсуждалась и проводилась деятельность по отправке посланий с Земли. Она получила наименование METI (Messaging to ExtraTerrestrial Intelligence). В первую

3 Сфера Дайсона — гипотетическая астроинженерная конструкция, предложенная американским физиком-теоретиком Фрименом Дайсоном. Она представляет собой гигантскую сферическую оболочку (с радиусом порядка радиуса орбит планет) вокруг звезды для максимального использования энергии последней.

очередь это радиопослания, но информация о Земле и ее обитателях была также размещена на космических аппаратах Pioneer 10 («Пионер-10»), Pioneer 11 («Пионер-11»), Voyager 1 и Voyager 2. В этом вопросе особенно интересен гуманитарный аспект, связанный с отбором посылаемой информации (включая изображения и звук).

Результат деятельности развитой внеземной цивилизации может выглядеть как необъяснимый астрономический источник — «космическое чудо».

1960-е гг. были временем активных дискуссий и поисков сигналов внеземных цивилизаций. Проводился ряд встреч и конференций (в нашей стране первое совещание по проблемам SETI прошло в 1964 г. в Бюраканской астрофизической обсерватории). Практически к середине 1970-х гг. все основные идеи в области SETI были уже сформулированы. Большой вклад в развитие проблематики поисков внеземных цивилизаций внесли Иосиф Шкловский в СССР и Карл Саган в США. Книги и статьи этих авторов существенно повлияли на развитие всего направления по исследованию вопросов, связанных с внеземной жизнью.

За полвека в рамках SETI было реализовано около 100 проектов, продолжают создаваться новые проекты.

Среди крупных проектов по поиску внеземных цивилизаций можно упомянуть Phoenix («Феникс») и SERENDIP (Search for Extra-Terrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations, Поиск внеземных радиоизлучений от близких развитых цивилизаций). Для наблюдений использовались различные инструменты, в том числе 300-метровая антенна в Аресибо. В настоящее время создается проект Allen Telescope Array (Массив телескопов Аллена), который будет состоять из 350 антенн, предназначенных для поиска радиосигналов (42 из них уже работают). Большую популярность получил проект SETI@home, в рамках которого все желающие могут использовать свои домашние компьютеры для распределенной обработки данных, полученных в рамках проекта SERENDIP, с целью поиска в гигантском массиве радиоданных необычных по своим характеристикам радиосигналов. В 2015 г. Юрий Мильнер объявил о начале программы Breakthrough Listen, задачей которой является поиск сигналов внеземных цивилизаций в радио- и оптическом диапазонах. В будущем для нужд SETI будет использоваться и система антенн SKA (см. раздел 13.4 «Радиотелескопы»).

К сожалению, у нас до сих пор не хватает данных для хотя бы примерных оценок распространенности цивилизаций, с которыми мы могли бы установить контакт. На настоящий момент время жизни

нашей цивилизации на стадии существования радиосвязи составляет всего лишь чуть более 100 лет, а история радиоастрономии насчитывает и того меньше. Учитывая, что возраст Галактики в сто миллионов раз больше и в ней находится несколько сотен миллиардов звезд, можно было бы предположить наличие огромного числа внеземных цивилизаций, уровень развития которых на миллиарды лет опережает наш. Здесь мы имеем дело с «парадоксом Ферми», который сводится к простому вопросу: «Где же они все?» В самом деле, столкнувшись с «великим молчанием Вселенной», мы оказываемся перед непростой проблемой — объяснить, почему технические цивилизации, подобные нашей и более развитые, столь редки. Это может быть связано, например, с исключительными свойствами Земли, с редкостью появления разумной жизни или с недостаточной длительностью стадии, на которой цивилизация способна на межзвездный контакт и заинтересована в нем.

Для оценки числа внеземных цивилизаций, способных к контакту, в 1961 г. была предложена знаменитая формула (она же уравнение) Дрейка. Она обсуждалась на первой серьезной встрече (мини-конференции) в Грин-Бэнк по проблеме поисков и контактов с внеземными цивилизациями. Дрейк записал простое уравнение, где ожидаемое количество цивилизаций, способных в настоящий момент к контакту (в первую очередь посредством радиосвязи), оценивалось как произведение семи сомножителей: темп звездообразования в Галактике; доля звезд, имеющих планеты, потенциально пригодные для жизни (землеподобные планеты в зонах обитаемости); число таких планет в системе; доля планет, на которых появилась жизнь; доля обитаемых планет с разумной жизнью; доля цивилизаций, достигших соответствующего уровня технологии; продолжительность существования цивилизации на технологической стадии, когда возможен контакт.

В 1961 г. была предложена формула Дрейка для оценки числа внеземных цивилизаций, способных к контакту. К сожалению, пока половина коэффициентов в этом уравнении известна плохо.

Первый сомножитель известен достаточно хорошо: в Галактике образуется несколько звезд в год. В настоящее время благодаря исследованиям экзопланет мы неплохо знаем долю звезд, имеющих планеты (в том числе землеподобные в зоне обитаемости), и типичное число таких планет в системе. Произведение этих трех величин по порядку величины равно 1/год. В ближайшие годы или десятилетия, видимо, удастся надежно оценить долю обитаемых планет среди потенциально пригодных для жизни. Что касается появления разумной жизни, развития технологий и времени существования технических цивилизаций, то здесь существует полная неопределенность — ситуация

мало изменилась с 1961 г. Поэтому пока невозможно провести сколько-нибудь надежную оценку с помощью формулы Дрейка.

По всей видимости, если когда-нибудь мы обнаружим внеземные цивилизации или получим важные результаты в этой области (скажем, сможем получить хорошие оценки для множителей в уравнении Дрейка), то это произойдет не в результате специализированных поисков в рамках программы SETI, а в результате астрономических изысканий, прежде всего обзоров неба в разных диапазонах и изучения экзопланет.