

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1989/1

ЗЕМЛЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

1/1989

Издается ежемесячно с 1971 г.

ЗЕМЛЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Сборник статей

В приложении этого номера:
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ



Издательство «Знание» Москва 1989

ББК 39.6
Е 92

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Строение и эволюция Вселенной	4
Шкала расстояний в астрономии	4
Однородность видимой Вселенной	7
Расширение Вселенной	9
Распространенность химических элементов	10
Реликтовое излучение	10
Горячая модель Вселенной	11
Антропный принцип	13
Галактики	14
Звездные скопления	24
Звезды	27
Солнечная система	39
Строение Земли	54
Земная кора	57
Ядро Земли	58
Атмосфера	60
Заключение	62
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ	63

- Ефремов Ю. Н., Розгачева И. К., Рукин М. Д.**
Е 92 Земля во Вселенной. — М.: Знание, 1989. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 1).
15 к.

В брошюре в популярной форме рассказывается о строении и эволюции Вселенной и ее структурных образований — звезд, галактик, скоплений галактик, о месте нашей планеты в иерархии космоса.

Сборник рассчитан на лекторов и слушателей народных университетов.

3500000000

ББК 39.6

ISBN 5—07—000425—5

© Издательство «Знание», 1989 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Публикация этой брошюры может на первый взгляд вызвать у нашего постоянного подписчика некоторое недоумение. Зачем, казалось бы, в серии, приобретшей известность публикациями самых современных результатов космонавтики и астрономии, издавать брошюру, являющуюся, по существу, популярной лекцией на тему «Строение Вселенной»? Попробуем объяснить... Как и другие серии естественнонаучного цикла, серия «Космонавтика и астрономия» предназначена в основном не для специалистов, а для лекторов, среди которых она имеет стабильную клиентуру. Интересы же коллектива лекторов-естественников общества «Знание» формируются не только планами подготовки лекций, но в первую очередь запросами аудитории. И тут ни от какой темы отказываться нельзя.

Опыт нашей лекторской корпорации показывает, что астрономическая «классика» (имеются в виду лекции типа «Строение Вселенной», «Наша Солнечная система», «Кометы и метеоры» и т. д.) остается и сейчас «вечнозеленой».

Предлагаемая читателю брошюра написана авторами, каждый из которых является специалистом в своей области. Космолог обсуждает ранние стадии развития Вселенной, специалист по галактикам вводит читателя в многообразный мир этих замечательных образований, а заканчивает изложение геолог, рассказывающий о формировании нашей планеты. Ее происхождение и строение нельзя понять в отрыве от истории нашей звездной системы и всей Вселенной — в этом главная мысль предлагаемой читателю брошюры.

Заместитель председателя
научно-методического совета
Общества «Знание» РСФСР,
доктор физико-математических наук
П. В. Щеглов

Ю. Н. Ефремов,

доктор физико-математических наук,

И. К. Розгачева,

кандидат физико-математических наук

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Без участия воображения все наши сведения о природе ограничились бы классификацией фактов.

Д. Тиндаль

Вселенную как целое изучает космология. Ее теоретический фундамент составляют основные физические теории — теория тяготения, теория электромагнетизма, теория элементарных частиц и др.; эмпирические сведения предоставляет ей астрономия. Современная космология базируется на четырех фундаментальных фактах: однородность и изотропия распределения видимого вещества в больших пространственных масштабах; расширение Вселенной; данные о распространенности химических элементов; существование реликтового излучения.

Шкала расстояний в астрономии

В основе наших знаний о пространственном распределении вещества во Вселенной лежит определение расстояний до астрономических объектов. За единицу расстояния принято среднее расстояние Земли от Солнца, она называется астрономической единицей: $1 \text{ а. е.} = (149\,597\,870 \pm 2) \text{ км}$.

Расстояния до астрономических объектов, находящихся далеко за пределами Солнечной системы, определяют с помощью различных методов. Наиболее надежные из них — метод тригонометрических параллаксов и фотометрический. Используются также кинематический метод и метод определения расстояния по красному смещению.

Тригонометрические параллаксы служат для определения расстояний до ближайших звезд. В основе метода лежит знание астрономической единицы. Известно, что направление луча зрения на звезду изменяется из-

за годичного движения Земли. За полгода изменение направления составит угол — годичный параллакс, — под которым виден диаметр орбиты Земли с данной звезды. Зная этот угол и астрономическую единицу, из элементарных тригонометрических соотношений можно определить расстояние до звезды. Из-за огромных расстояний до звезд точно измерить параллактическое смещение нелегко. До 1838 г. в распоряжении астрономов не было инструментов, обеспечивающих необходимую точность. В 1838 г. Бессель в Германии измерил параллакс звезды 61 Лебеда. За единицу расстояния до звезд принимают один парсек (пк), равный расстоянию, с которого большая ось земной орбиты видна под углом в $1'' : 1 \text{ пак} = 206\,265 \text{ а. е.}$ Ближайшая к Солнцу звезда — Проксима Кентавра, расстояние до нее 1,3 пак.

С помощью годичных параллакссов можно измерять расстояния до 100 пак. Для определения расстояний до более удаленных объектов вводят вековой параллакс — видимое угловое смещение звезды за год, вызванное движением Солнца в Галактике. Поскольку у всех звезд есть случайные движения, то вековые параллаксы определяют только статистически, по достаточно большой группе звезд.

Кинематические методы основаны на сравнении скорости видимого перемещения (собственного движения) астрономического объекта (или его деталей) по небесной сфере и лучевой скорости после учета движения Солнца. Лучевую скорость определяют, используя эффект Доплера: спектральные линии в спектре движущегося источника излучения смещаются в красную сторону (длинные волны), если источник удаляется от наблюдателя, и в синюю (короткие волны), если источник приближается к наблюдателю. Величина смещения зависит от абсолютного значения скорости по лучу зрения. Предположив равенство лучевой скорости (измеряемой в км/с) и собственного движения (измеряемого в секундах дуги в год) и зная направление вектора скорости, можно оценить групповой параллакс ближайших скоплений звезд, в первую очередь скопления Гиады, на котором основана вся шкала расстояний во Вселенной. Скопление Гиады содержит около 100 звезд в радиусе 5 пак. Расстояние до него 40 пак.

Для измерения еще больших расстояний наиболее эффективен фотометрический метод. Суть его в следую-

щем. Одинаковые по мощности источники света создают освещенность, обратно пропорциональную квадратам расстояний до них. Поэтому видимый блеск звезд с известной светимостью может служить мерой расстояний. Исследования показали, что светимости звезд и особенности их спектров связаны между собой. Изучив спектр звезды, можно оценить ее светимость, а сравнив последнюю с видимым блеском, оценить расстояние. С помощью фотометрического метода определяют расстояния в десятки и сотни тысяч парсек.

В начале нашего века было накоплено достаточно сведений о периодических переменных звездах типа δ Цефея. Американские астрономы Г. Ливитт и Х. Шепли, исследовав несколько десятков переменных звезд в Магеллановых Облаках, установили связь периода изменения блеска этих звезд с их светимостью: чем больше период, тем больше светимость звезды. Таким образом, зная период изменения блеска, можно оценить светимость звезды и, сравнив ее с видимым блеском, оценить расстояние. Цефеиды используются как «стандартные свечи», светимость которых известна. Они в тысячи раз ярче Солнца, с их помощью определяют расстояния до 5 Мпк, т. е. расстояния до ближайших галактик.

В системах, где не удастся обнаружить цефеиды, ищут еще более яркие звезды — сверхгиганты. Они обнаружены в нескольких сотнях галактик в радиусе до 10 Мпк вокруг нашей Галактики.

В качестве индикаторов расстояния используют также новые и сверхновые звезды, шаровые скопления, ярчайшие газовые туманности.

Расстояния в сотни миллионов парсек оценивают по ярчайшим галактикам в скоплениях галактик. Светимость этих ярчайших галактик примерно одинакова и в 10 раз превышает светимость нашей Галактики. Основная трудность фотометрического метода связана с тем, что блеск звезды зависит не только от расстояния до нее, но и от межзвездной среды, поглощающей свет; учет этого поглощения — очень трудная задача.

Открытие расширения Вселенной позволило грубо оценивать расстояния до тысяч миллионов парсек, используя красное смещение линий в спектрах далеких галактик.

Однородность видимой Вселенной

Структуру распределения вещества во Вселенной характеризуют контрастом плотности вещества в заданном пространственном масштабе. Экваториальный радиус Земли равен 6378 км, средняя плотность — $5,5 \text{ г/см}^3$. Среди известных планет самая крупная — Юпитер — его диаметр в 11 раз больше земного, а средняя плотность в 4 раза меньше земной. Все большие и малые планеты, их спутники, кометы обращаются вокруг Солнца и вместе с ним образуют структурную единицу — Солнечную систему. Самая далекая известная планета — Плутон — удалена от Солнца на расстояние 40 а. е.

Солнце — ближайшая к нам звезда. Диаметр Солнца в 109 раз больше земного, а средняя плотность солнечного вещества равна $1,41 \text{ г/см}^3$.

Кроме отдельных звезд и их скоплений (размеры последних от 1 до 20 пк), астрономы наблюдают газопылевые туманности. Размеры их достигают десятков парсек, а плотность около 10^{-14} г/см^3 .

Наше Солнце, другие звезды, скопления звезд, газопылевые туманности образуют огромную структурную единицу — Галактику. За пределами нашей Галактики на расстояниях, превышающих миллионы парсек, находятся другие галактики. Большинство из них имеют размеры порядка 10 кпк и состоят из миллиардов звезд. Средняя плотность светящегося вещества галактик порядка 10^{-24} г/см^3 .

Галактики распределены в пространстве неравномерно. Большая часть их входит в состав скоплений, масштабы которых около 10 Мпк. Различают правильные и неправильные скопления. Правильные обладают сферической формой и состоят из десятков тысяч галактик. Правильным является скопление галактик в созвездии Волосы Вероники, находящееся от нас на расстоянии около 100 Мпк и содержащее более 30 тыс. галактик. Большинство из этих галактик эллиптические. Самое далекое скопление находится от нас на расстоянии около 3000 Мпк.

Неправильные скопления состоят всего из нескольких десятков и сотен галактик. Они несимметричны по форме и в десятки раз меньше правильных скоплений. Ближайшее к нам неправильное и довольно богатое

скопление находится в созвездии Девы, расстояние до него 20 Мпк. В составе этого скопления около 200 галактик, треть из них эллиптические, остальные — спиральные. Размеры скопления около 5 Мпк. Сейчас известно 7000 скоплений галактик.

Наша Галактика и Туманность Андромеды входят в Местную группу, в ней они самые яркие и массивные. Каждая из них имеет по богатому семейству спутников. В семейство нашей Галактики входят 14 карликовых эллиптических галактик, несколько внегалактических шаровых скоплений звезд и неправильные галактики, среди которых крупнейшие — Магеллановы Облака. Местная группа галактик входит в сверхскопление галактик, в центре которого находится неправильное скопление в созвездии Девы. Общее число галактик нашего Сверхскопления около 20 тыс., диаметр его порядка 60 Мпк. С ним соседствует сверхскопление в созвездии Льва, расстояние до которого около 140 Мпк. Пока выявлено 50 сверхскоплений.

Подсчеты числа галактик в разных направлениях на небесной сфере показали, что самые крупные пространственные неоднородности в распределении галактик носят характер цепочек или волокон. Это как бы пересечения стенок ячеек. Внутри каждой ячейки галактик мало, а в волокнах много. Размеры пустот около 100 Мпк, толщина волокон около 10 Мпк. Большие скопления галактик находятся на пересечении волокон. Отдельные фрагменты ячеистой структуры называют сверхскоплениями. Средняя плотность вещества в волокнах порядка 10^{-27} г/см³.

Крупномасштабная структура в виде волокон и стенок ячеек не собирается в более крупные системы, а равномерно в среднем заполняет пространство наблюдаемой Вселенной. Средняя плотность светящегося вещества в масштабах больше 300 Мпк равна $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Это и есть среднее значение плотности светящегося вещества во всей наблюдаемой части Вселенной.

Таким образом, в больших масштабах Вселенная в среднем однородна. Это ее фундаментальное свойство и загадка. Действительно существует поразительное несоответствие между однородностью Вселенной в больших масштабах, включающих много скоплений галактик, и сильной неоднородностью (контрасты плотности вели-

ки) на малых масштабах, характерных для отдельных галактик, звезд и планет.

Отметим, что однородность распределения вещества во Вселенной подтверждается подсчетами далеких радиосточников (они равномерно заполняют пространство), малостью случайных скоростей галактик, не входящих в группы и скопления, изотропией рентгеновского излучения от множества дискретных источников.

Расширение Вселенной

Нестационарность Вселенной была обнаружена по «разбеганию от нас» галактик. Первым измерил лучевые скорости галактик американец В. Слайфер. В 1910—1920 гг. он обнаружил, что большинство галактик (36 из 41, которые он наблюдал) удаляются от нас. Разбегание галактик тщательно и на более обширном материале исследовал Э. Хаббл, впервые определивший расстояние до них. В 1929 г. он обнаружил важную закономерность: скорости удаления галактик прямо пропорциональны расстоянию до них. Это было открытием расширения Вселенной. Коэффициент пропорциональности между скоростью и расстоянием теперь называют постоянной Хаббла. Она зависит только от времени и ее современное значение находится в пределах $H=50\text{—}100$ км/с/Мпк. Исследование расширения Вселенной — одна из важнейших задач современной наблюдательной космологии.

Галактики, находящиеся от нас на расстоянии порядка миллиона парсек, удаляются со скоростью около 20 км/с, причем это расширение изотропно. Конечно, галактики разбегаются не от нас. Увеличивается расстояние между любой парой галактик, и из любой точки расширение Вселенной выглядит как разбегание от этой точки.

Открытие расширения Вселенной — крупнейшее достижение естествознания XX века. Необходимо отметить, что предсказание нестационарности Вселенной на основе теории тяготения А. Эйнштейна было сделано до открытия Э. Хаббла советским физиком А. А. Фридманом в 1922—1924 гг. Мир, в котором действуют силы тяготения (эти силы определяют взаимодействие масс на больших расстояниях), должен быть нестационарным. Существующая теория гравитации предсказывает неста-

дионарность Вселенной, но не отвечает на вопрос, почему Вселенная расширяется, т. е. почему в прошлом в веществе существовало начальное распределение скоростей, соответствующее разлету. Чтобы найти ответ на этот вопрос, необходимо дальнейшее изучение физических свойств пространства и времени.

Распространенность химических элементов

Распространенностью (обилием) химического элемента называют его относительное содержание в космическом веществе. Ее определяют на основе изучения совокупности всех данных космохимии: спектров Солнца и звезд, областей ионизованного водорода, межзвездных эмиссионных туманностей, состава первичных космических лучей, химического анализа метеоритов, лунного грунта, а также данных геохимии. Обилие элемента характеризуют его количеством в одном грамме космического вещества. Согласно современным наблюдениям самый распространенный элемент — водород, за ним следует гелий; обилие других химических элементов мало. Удивительно, что распространенность гелия очень «однородна»: почти одинаковое обилие в различных астрономических объектах. По-видимому, этот факт связан с существованием некоторого универсального процесса синтеза гелия во Вселенной. Обилие более тяжелых элементов в различных наблюдаемых объектах различно и определяется их локальным синтезом в ходе эволюции звезд.

Среднее обилие химических элементов во Вселенной таково: водород — 0,774; гелий — 0,208; углерод — $4 \cdot 10^{-3}$; азот — $9 \cdot 10^{-4}$; кислород — $9 \cdot 10^{-3}$; натрий — $4 \cdot 10^{-5}$; кремний — $8 \cdot 10^{-4}$; железо — $1,4 \cdot 10^{-3}$.

Реликтовое излучение

Во Вселенной наблюдается изотропный тепловой фон электромагнитного излучения. Этот фон был открыт случайно в 1965 г. Английские инженеры А. Пензиас и Р. Вилсон при отладке рупорной радиоантенны обнаружили аномальный избыток шумов радиотелескопа на длине волны 7,35 см. Этот шум соответствовал температуре около 3К и фиксировался при любом направлении антенны. Тщательная проверка показала, что из-

лучение, соответствующее избыточному шуму, приходит из космоса со всех сторон с одинаковой интенсивностью. Впоследствии И. С. Шкловский назвал это излучение реликтовым. За открытие реликтового излучения (РИ) А. Пензиасу и Р. Вилсону была присуждена в 1978 г. Нобелевская премия.

Сейчас наблюдения РИ охватывают диапазон длин волн от 0,6 мм до 50 см. Накопленные данные свидетельствуют о том, что это равновесное тепловое излучение. Его температура равна 2,7 К. Средняя энергия фотонов РИ в 3000 раз меньше энергии видимого света, но число фотонов РИ очень велико. На каждый атом во Вселенной приходится порядка миллиарда фотонов РИ.

Расчеты, впервые выполненные в СССР А. Г. Дорошкевичем и И. Д. Новиковым еще до открытия РИ, показали, что ни звезды, ни радиогалактики, ни горячий межгалактический газ, ни переизлучение света звезд межзвездной пылью не могут дать излучения, похожего по своим свойствам на РИ: суммарная энергия РИ слишком велика, а его спектр не похож ни на спектр звезд, ни на спектр радиоисточников. Все это и изотропия РИ свидетельствуют о том, что РИ заполняет всю наблюдаемую Вселенную и имеет космологическую природу.

Отметим, что РИ изотропно только в системе отсчета, связанной с «разбегающимися» галактиками, т. е. расширяющейся вместе со Вселенной. В системе отсчета, связанной с движущейся Землей, интенсивность излучения из-за эффекта Доплера зависит от направления наблюдения. Точность наблюдений РИ позволяет фиксировать движение Земли вокруг Солнца со скоростью 80 км/с, движение Солнца в Галактике со скоростью 250 км/с и движение Галактики относительно РИ со скоростью 600 км/с в направлении к скоплению галактик в созвездии Девы.

Горячая модель Вселенной

Свойства видимой Вселенной: однородность распределения и изотропия расширения вещества в масштабах 100 Мпк, одинаковость соотношения между обилием водорода и гелия в наблюдаемых объектах, существование РИ являются наблюдательной основой горячей мо-

дели Вселенной, которая в настоящее время наиболее хорошо развита.

Теория однородной и изотропной расширяющейся Вселенной была создана А. А. Фридманом. Эта теория описывает механику горячей модели. В прошлом, около 20 млрд. лет назад, свойства расширяющейся Вселенной сильно отличались от наблюдаемых сегодня: не существовало ни звезд, ни галактик, плотность вещества была на много порядков выше ядерной. В ходе расширения плотность материи уменьшалась. Начиная с момента, когда плотность вещества уменьшилась до значения 10^{15} г/см³, можно применять твердо установленные законы физики. Анализ показал, что наблюдаемое обилие гелия и существование РИ естественно объясняются, если предположить, что в прошлом Вселенная была не только очень плотной, но и горячей. Эта модель впервые предложена Г. Гамовым в конце 40-х годов.

Горячая Вселенная при температурах порядка 10^{12} К (время, прошедшее с момента начала расширения, порядка 10^{-5} с) заполнена различными элементарными частицами, находящимися в термодинамическом равновесии. В эту эпоху происходят процессы рождения и уничтожения (аннигиляция) элементарных частиц и их античастиц. В ходе расширения температура падает, и процессы аннигиляции с образованием фотонов становятся преобладающими. Сначала аннигилируют более тяжелые частицы, последними аннигилируют пары нейтрино и антинейтрино, электрон-позитронные пары. Эпоха аннигиляции заканчивается при температурах около 10^{10} К (время около 3 с). К этому моменту образуются фотоны реликтового излучения; они находятся в термодинамическом равновесии с оставшимся после аннигиляции избытком протонов, нейтронов и электронов, причем на каждый протон приходится примерно 1 млрд. фотонов. Последнее число взято из наблюдаемых свойств РИ и закладывается в классическую горячую модель «руками», т. е. горячая модель не объясняет это число. С момента, когда температура падает до 10^9 К, начинается эпоха термоядерного синтеза. Нейтроны соединяются с протонами, образуя ядра дейтерия. Энергии тепловых фотонов уже не хватает для расщепления ядер дейтерия, поэтому, могут протекать дальнейшие реакции синтеза ядер гелия. Скорость термоядерного синтеза такова, что к моменту, когда от

начала расширения прошло 5 мин, при температурах порядка 1 млрд. градусов синтез заканчивается. Дозвездное вещество состоит на 75—78% из ядер водорода, на 25—22% — из ядер гелия и заметно меньших количеств ядер дейтерия, изотопов гелия и лития.

После периода ядерных реакций ионизованные водород и гелий еще долго находились в равновесии с излучением. Лишь после падения температуры до 4 000 К произошла рекомбинация электронов и протонов, образовались атомы нейтральных водорода и гелия. После рекомбинации водорода Вселенная стала прозрачной для излучения, которое мы сейчас и наблюдаем как реликтовый остаток горячей стадии ее эволюции.

В период падения температуры излучения от 4000 К до нескольких десятков градусов Вселенная была заполнена практически однородным нейтральным газом, фотонами и нейтрино. В эпоху, уже близкую к нашему времени, рост первичных неоднородностей плотности, обусловленный преобладанием сил гравитации над силами давления вещества, привел к образованию крупномасштабной структуры Вселенной, скоплений галактик, звезд, планет. Сложные процессы образования структуры начались, когда возраст Вселенной был порядка сотен миллионов лет. Наблюдаемая картина Вселенной, заполненной звездами и галактиками, возникла и развивается уже более 15 млрд. лет.

Антропный принцип

Сущность этого принципа в том, что жизнь является неотъемлемой частью Вселенной, естественным следствием ее эволюции. Почему из бесконечной области всевозможных значений фундаментальных физических постоянных, характеризующих физические взаимодействия, и бесконечного разнообразия начальных условий, которые могли существовать в очень ранней Вселенной, реализуются величины и условия, приводящие к вполне конкретному набору особенностей, наблюдаемых нами? Например, мы живем в пространстве трех измерений. Случайно это или закономерно? В пространстве N измерений точечные источники взаимодействуют с силой $F \sim \frac{1}{r^{N-1}}$, где r — расстояние между источниками.

Можно показать, что устойчивые движения двух тел,

взаимодействующих по такому закону, отсутствуют при $N > 3$, а при $N \leq 2$ движение происходит в ограниченной области. Только при $N = 3$ возможны как связанные, так и несвязанные движения, что как раз и реализуется в наблюдаемой Вселенной. Трехмерное пространство представляется выделенным, только в нем существуют атомы (электромагнитное взаимодействие) и планетные системы (гравитационное взаимодействие).

Наша Вселенная удивительно приспособлена к развитию в ней жизни. Другие вселенные с другими константами физических взаимодействий развиваются, как отметил советский космолог А. Л. Зельманов, «без свидетелей».

ГАЛАКТИКИ

Классификация галактик. Галактиками называют гравитационно связанные звездные системы, содержащие сотни миллиардов звезд.

Развитие внегалактической астрономии началось в 20-х годах нашего столетия. Именно тогда было установлено, что объекты типа туманных пятнышек, часто со спиральной структурой, находятся за пределами нашей Галактики и являются самостоятельными звездными системами. Изучение свойств галактик имеет решающее значение для понимания эволюционных процессов в наблюдаемой Вселенной, так как именно галактики и их скопления — основные элементы ее структуры.

Галактики различаются прежде всего своим внешним видом. В 1925 г. Э. Хаббл предложил морфологическую классификацию галактик, которая в несколько модифицированном виде используется и поныне. Введены следующие основные классы галактик: эллиптические E, линзообразные SO, спиральные S, спиральные с перемычкой SB, неправильные Ir.

Эллиптические галактики в картинной плоскости выглядят как круги или эллипсы. Они, по-видимому, обладают осью симметрии и являются сфероидами. Звезды вращаются вокруг центра такой системы в разных плоскостях. Как целое эллиптические галактики вращаются очень медленно. Характерные параметры этих галактик охватывают широкий диапазон: диаметры 5—50 клк, массы — от 10^6 до 10^{13} масс Солнца, свети-

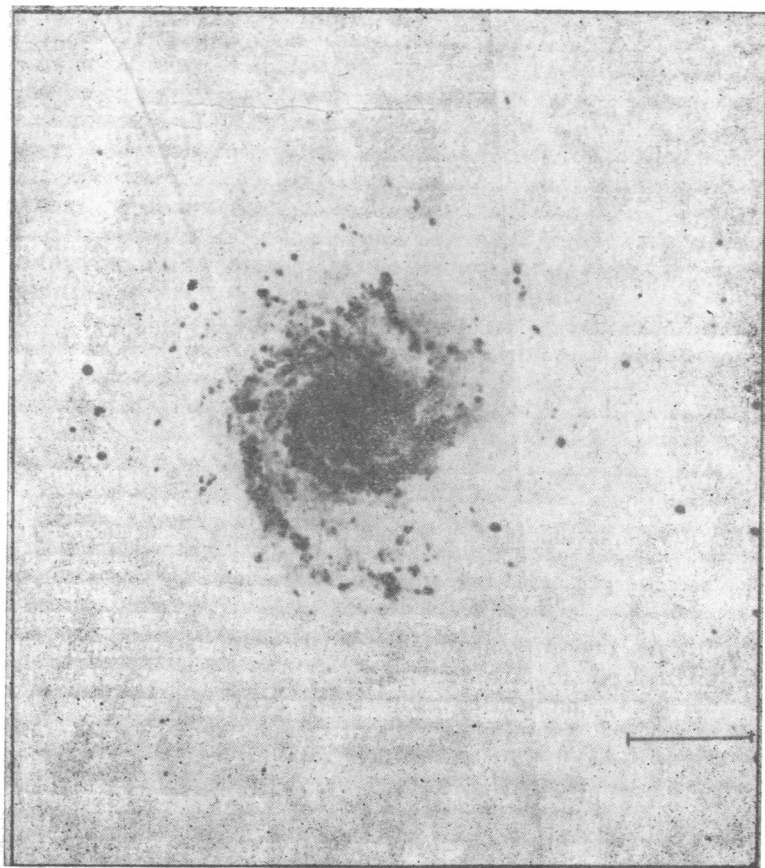


Рис. 1. Спиральная галактика М74 (негатив) — изображение в синем диапазоне спектра, в котором излучают в основном молодые звезды

мости — от 10^6 до 10^{12} светимостей Солнца. Только в самых близких эллиптических галактиках (спутники Туманности Андромеды) удастся выделить отдельные звезды. Поэтому звездный состав эллиптических галактик определяют из анализа суммарного излучения звезд. Оказывается, что эллиптические галактики содержат только желтые и красные звезды, в них практически нет газа. По-видимому, в этих системах рано прекратились процессы звездообразования, и их звездный состав от-

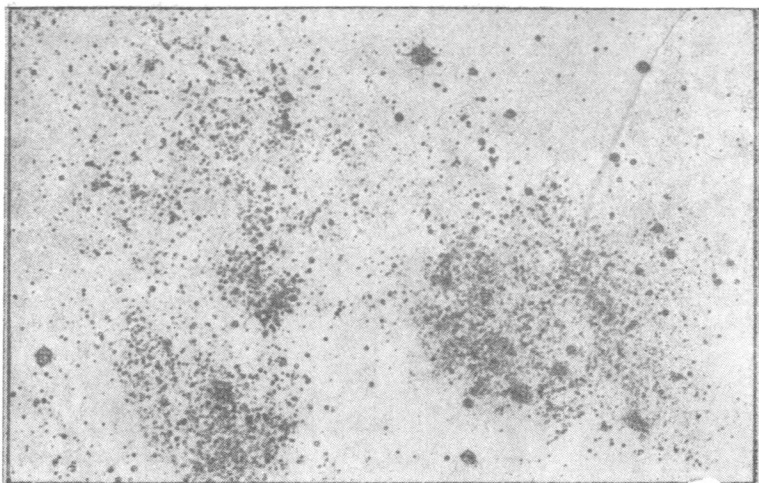


Рис. 2. Участок спирального рукава ближайшей спиральной галактики в Андромеде (М 31), разрешенный на голубые молодые горячие звезды высокой светимости, которые концентрируются в спиральных ветвях всех галактик

носится к первому поколению звезд, образовавшихся из первичных водорода и гелия.

Спиральные галактики — это сильно сплюснутые системы с центральным, почти сферическим ядром. Часто они имеют две или более клочковатые спиральные ветви. В спиральных ветвях галактик сосредоточены их самые яркие и молодые звезды, светящиеся туманности (области ионизованного водорода), молодые скопления и ассоциации звезд. Именно поэтому спиральный узор отчетливо виден в очень удаленных галактиках, хотя на долю спиральных ветвей приходится не больше нескольких процентов массы каждой галактики. Основная масса звезд образует «сплошной» диск галактик. В состав галактического ядра входят звезды и газ. В ядре заключена примерно сотая доля всей массы галактики. Спиральные галактики с перемычками имеют вытянутое ядро, образующее перемычку между спиральными ветвями.

Линзообразные галактики похожи на спиральные, они сильно сплюснуты, но не имеют спиральной структуры. У таких галактик различают ядро, линзу-диск и слабый ореол — гало. В наружных частях линзы иног-

да видны зачатки спиральных рукавов, перемычки и наружное светлое кольцо.

Диски спиральных галактик состоят из звезд и их скоплений не старше нескольких миллиардов лет, облаков водорода. Звезды диска имеют близкий к солнечному химический состав. Они вращаются вокруг центра галактики по орбитам, лежащим в плоскости диска.

Гало спиральных галактик состоит из звезд, которые содержат мало тяжелых элементов ($0,1-0,001\%$), имеют сфероидальное пространственное распределение, концентрируясь к центру галактики. Это наиболее старые звезды, их возраст около $10-15$ млрд. лет.

Сильно сплюснутые и быстро вращающиеся (скорость вращения на расстоянии около 10 кпк от ядра достигает 300 км/с) системы SO, S и SB должны быть неустойчивы: если наблюдаемое распределение вещества в диске подвергнется случайному возмущению, диск не вернется к своей первоначальной форме и к прежнему распределению вещества. Однако неустойчивость будет подавлена, если галактика окружена достаточно массивными и почти сферическими коронами. Предположение о существовании корон возникло также и в связи с необходимостью объяснить данные о динамике галактик в их группах и скоплениях и о зависимости скорости вращения вещества галактик от расстояния до их ядер. Короны галактик пока не обнаружены. Возможно, они образованы уже угасшими звездами или маломассивными звездами низкой светимости, не способными создать достаточно высокую поверхностную яркость, которую можно было бы заметить. Не исключено, что в коронах галактик присутствуют в большом количестве достаточно долгоживущие и массивные элементарные частицы, взаимодействующие между собой и с видимым веществом лишь гравитационно и поэтому трудно регистрируемые. Наблюдения галактик в рентгеновском диапазоне указывают на возможность присутствия в межгалактическом пространстве газа низкой плотности, но очень высокой температуры (до 10^6 К). Этот газ также может входить в состав корон галактик.

К неправильным галактикам относятся те, у которых не наблюдается четко выраженного ядра и вращательной симметрии. Но в действительности распределение массы в них симметричнее видимой яркости, создаваемой звездами высокой светимости и областями иони-

зованного водорода. Это плоские системы, причем оптические, и радионаблюдения указывают на их правильное, хотя и медленное, вращение. Некоторые из этих галактик несколько напоминают спирали с перемычкой, в которых почему-то не возникли спиральные ветви.

Массы и светимости спиральных и неправильных галактик заключены в узких диапазонах: массы (без учета неизвестных масс корон) 10^9 — 10^{12} масс Солнца, светимости 10^8 — 10^{11} светимостей Солнца.

Существуют также так называемые пекулярные галактики (каждая имеет уникальную форму), взаимодействующие галактики — двойные системы, между которыми наблюдаются перемычки светлой материи. Некоторые галактики, квалифицируемые как спиральные или эллиптические, имеют активные ядра, в которых наблюдаются бурные процессы. Галактики с наиболее активными ядрами видны на очень больших расстояниях. Это квазары — самые далекие из наблюдаемых объектов. Они очень компактны и их оптическая светимость на порядок больше, чем у самых ярких обычных галактик.

Наиболее распространены эллиптические, линзообразные и спиральные галактики. Небольшую часть составляют неправильные галактики. Доля квазаров и галактик с активными ядрами не превышает 1%.

Наша Галактика. Наша Галактика — гигантская звездная система, состоящая из сотни миллиардов звезд, в число которых входит Солнце.

Звезды Галактики образуют плоский диск с шарообразным утолщением в центре. Поперечник диска около 30 кпк, утолщения около 4 кпк. Диск окружен звездным сферическим гало, радиус которого не менее 20 кпк. От центральной области к периферии диска отходят спиральные ветви, в которых преимущественно концентрируются газ и наиболее яркие звезды. В соответствии с этой структурой Галактику относят к классу спиральных. Предположительно она окружена обширной и массивной короной. Масса Галактики в пределах объема радиусом 15 кпк — около $15 \cdot 10^{10}$ масс Солнца, масса короны, по-видимому, порядка 10^{12} масс Солнца.

Солнечная система находится далеко (около 10 кпк) от центра Галактики, ближе к краю диска, на расстоянии примерно 20 пк над его плоскостью симметрии. Земной наблюдатель видит диск «с ребра», и ог-

ромное количество удаленных звезд сливается для него в одну светящуюся полосу, которая наблюдается на ночном небе как Млечный Путь. Отсюда и название «галактика»: galaktikos (молочный, млечный). Пространственная концентрация звезд в галактической окрестности Солнца соответствует примерно одной звезде на десять кубических парсек. В центральной области галактики эта концентрация в миллион раз больше.

Звездный состав Галактики очень разнообразен. Отдельные группы звезд сильно отличаются друг от друга возрастом, химическим составом, характером орбит. В основных подсистемах — диске и гало — выделяют несколько населений звезд, т. е. группы звезд, имеющих близкий возраст, сходные физические и кинематические характеристики. К населению диска относится большая часть наблюдаемых объектов Галактики: звезды с нормальным содержанием химических элементов, большая часть звезд-гигантов, белые карлики, планетарные туманности. Возраст этих объектов порядка нескольких миллиардов лет. Более молодое население диска (сотни тысяч лет), часто связанное со спиральными ветвями, выделяют в плоскую подсистему. Это молодые горячие звезды, их скопления и ассоциации, долгопериодические цефеиды (периоды изменения блеска составляют десятки дней), новые и сверхновые звезды, газ, пыль, зоны ионизованного водорода, пульсары, многие галактические источники гамма-, рентгеновского и инфракрасного излучения.

Диск Галактики вращается с большой скоростью; на расстоянии 10 кпк от ядра скорость вращения около 250 м/с. Дисперсия скоростей звезд диска не превышает нескольких десятков километров в секунду, причем более старое население имеет большую дисперсию скоростей.

Население гало включает шаровые звездные скопления, субкарлики, переменные звезды типа RR Лиры с дефицитом тяжелых элементов. Это старое население Галактики, его возраст порядка 15 млрд. лет. Гало вращается очень медленно, а дисперсия скоростей звезд в нем достигает сотен километров в секунду.

В центре Галактики обнаружены потоки плотного горячего газа, расширяющегося со скоростью около 200 км/с. Это свидетельствует об активности ядра Галактики, которое имеет размеры 15×20 пк. Ядро окру-

жено газовым диском, диаметр которого около 1600 пк, а в середине ядра прослеживается уплотнение диаметром около 1 пк — ядрышко. В самом центре ядрышка находится звездообразный объект, мощный источник радиоизлучения — Стрелец А. Природа ядра Галактики еще окончательно не выяснена.

Особый интерес представляет изучение спиральной структуры Галактики. В спиральных ветвях сосредоточены почти все горячие звезды высокой светимости. Возраст этих звезд не превышает 100 млн. лет, и они еще не успели заметно удалиться от мест своего рождения, поэтому ветви можно считать местом образования звезд.

Какова природа спиральной структуры? По-видимому, она связана с возможностью существования волн плотности спиральной формы во вращающихся плоских дисках. Волна создает уплотнение в распределении частиц, но не «тащит» их за собой, а переходит от одних частиц к другим, создавая уплотнение в новом месте из новых частиц. При этом под частицами понимают и собственно частицы межзвездной среды, и целые звезды, уже имеющиеся или возникающие в диске Галактики.

Главное свойство спирального узора — его вращение с постоянной скоростью. Сам же диск Галактики вращается дифференциально — угловая скорость вращения убывает с удалением от центра Галактики. Спиральный узор сохраняет на всем протяжении диска полную регулярность, никак не искажаемую дифференциальным вращением. Газ вращается вокруг центра Галактики быстрее, чем спиральный узор, и поэтому возникает явление, которое называется галактической ударной волной: на внутренней кромке ветви образуется полоса повышенной плотности межзвездного газа, в которой могут рождаться звезды. Чтобы ветви четко очерчивались яркими молодыми звездами, требуется высокая скорость превращения газа в звезды (звездообразование) и не слишком большая длительность эволюции звезд на начальной стадии, на которой светимость достаточно высока. И то и другое, по-видимому, выполняется в реальных физических условиях спиральных ветвей. Продолжительность начальной фазы эволюции массивных звезд меньше времени, за которое волна плотности заметно сместится при своем вращении.

В Галактике есть зона, где скорости вращения газа и спирального узора совпадают, — так называемая зона коротации. Она представляет собой узкий тор с радиусом около 250 пк и центром на расстоянии около 10 кпк от центра Галактики. Солнечная система находится, по-видимому, как раз в зоне коротации между рукавами Персея и Стрельца и движется по направлению к рукаву Персея. Время жизни Солнечной системы (около 4,6 млрд. лет) по порядку величины равно времени, которое она проводит между рукавами (7,8 млрд. лет). В спиральных ветвях происходят вспышки сверхновых звезд, так что «спокойная жизнь» Солнца и планет началась в то время, когда наша звезда покинула место своего рождения (рукав Стрельца) и вышла в пространство между спиральными рукавами.

Теория спиральной структуры хорошо объясняет ряд астрофизических явлений, однако пока остается нерешенным вопрос о «генераторе» спиральной волны, т. е. вопрос о том, где и как возбуждается эта волна.

Исследование межзвездной поляризации света привело к открытию магнитного поля Галактики, силовые линии которого параллельны плоскости диска и направлены вдоль спиральных ветвей. Магнитное поле играет большую роль в физике межзвездной среды, в процессах звездообразования. Напряженность магнитного поля в диске Галактики составляет $3 \cdot 10^{-5}$ Э, что в сотни тысяч раз меньше напряженности магнитного поля Земли.

Вблизи Земли наблюдаются заряженные частицы очень высоких энергий (до 10^{21} эВ) — космические лучи. В них впервые были обнаружены позитроны, мезоны, гипероны — элементарные частицы, играющие важную роль в ядерной физике. Космические лучи приходят к Земле примерно в одинаковых количествах (одна частица на $1 \text{ см}^2/\text{с}$) со всех направлений. По-видимому, вся Галактика заполнена космическими лучами, основная доля энергии которых приходится на протоны и электроны. Анализ наблюдательных данных показал, что космические лучи имеют галактическую природу: они генерируются в ядре Галактики и при вспышках сверхновых звезд, а удерживаются в Галактике ее магнитным полем.

Обнаружено радиоизлучение Галактики. В радио-

диапазоне излучают облака ионизованного водорода (длины волн от сантиметров до метров), нейтральный водород (длина волны 21 см), молекулы гидроксила OH (длина волны 18 см), молекулы воды, окиси углерода и другие более сложные молекулы. Методы радиоастрономии оказываются наиболее эффективными при изучении межзвездной среды. Дело в том, что мы находимся в диске Галактики и смотрим на него изнутри. В диске сосредоточено много газа и космической пыли, которые непрозрачны в оптическом диапазоне излучения. Наблюдения диска Галактики в оптическом диапазоне с достаточной полнотой возможны только в области с радиусом около 3—4 кпк, а радиоволны сантиметрового и миллиметрового диапазонов свободно распространяются в диске, практически не поглощаясь в облаках газа и пыли. Радионаблюдениями установлено существование в межзвездной среде более полусотни молекул.

Распределение молекул, или, вернее, облаков среды, богатой молекулами, не повторяет распределения атомарного нейтрального водорода в диске Галактики. Облака H_2 , регистрируемые по излучению содержащихся в них молекул окиси углерода, сосредоточены главным образом в пределах кольца вокруг центра Галактики, внешняя граница которого приближается к орбите Солнца, а внутренняя граница имеет радиус около 3 кпк.

Эволюция галактик. Детально разработанной теории возникновения и эволюции галактик пока нет. Однако основные представления об этом процессе вырисовываются все отчетливее.

Образование галактик рассматривают как естественный этап эволюции горячей Вселенной. По-видимому, более 15 млрд. лет назад в первичном веществе благодаря гравитационной неустойчивости началось образование протоскоплений с характерными массами порядка 10^{16} масс Солнца. В протоскоплениях в ходе разнообразных динамических процессов происходило выделение групп протогалактик. Дальнейшая эволюция протогалактик определялась их собственным гравитационным полем и гравитационным потенциалом протоскопления. Многообразие форм галактик связано с разнообразием начальных условий образования протогалактик. Например, если галактика возникла из быстро вращающейся протогалактики, то быть ей спираль-

ной, если из медленно вращающейся — то эллиптической.

Сжатие протогалактики длится около 3 млрд. лет. За это время происходит превращение газового облака в звездную систему. Дальнейшая эволюция галактики определяется комплексом процессов: эволюция звезд, химическая эволюция, структурно-динамическая эволюция звездной системы. Звезды образуются путем гравитационного сжатия облаков газа. Когда в центре облака достигаются плотности и температуры, достаточные для эффективного протекания термоядерных реакций горения водорода, рождается звезда. В недрах массивных звезд происходит термоядерный синтез химических элементов тяжелее гелия. Эти элементы попадают в первичную водородно-гелиевую среду при взрывах звезд или при спокойном истечении вещества со звезд (звездный ветер). Элементы тяжелее железа образуются при грандиозных взрывах сверхновых звезд. Таким образом звезды первого поколения обогащают первичный газ тяжелыми металлами. Эти звезды наиболее старые и состоят из водорода, гелия и очень небольшой примеси тяжелых элементов. В звездах второго поколения примесь тяжелых элементов более заметна, так как они образуются из уже обогащенного тяжелыми элементами первичного газа. Этот процесс идет при продолжающемся сжатии протогалактики, поэтому формирование звезд происходит все ближе к центру системы, и чем ближе к центру, тем больше должно быть в звездах тяжелых элементов. Этот вывод хорошо согласуется с данными о содержании тяжелых элементов в звездах гало нашей Галактики и эллиптических галактик. Во вращающейся протогалактике звезды будущего гало образуются на более ранней стадии сжатия, когда вращение еще не повлияло на общую форму протогалактики. Реликтами этой эпохи (15 млрд. лет назад) в нашей Галактике являются шаровые звездные скопления. Своим положением они как бы очерчивают первоначальную почти сферически-симметричную форму молодой Галактики.

Масса газа, не вошедшая в образовавшиеся звезды, а также выброшенная в ходе эволюции этих звезд, имела некоторый орбитальный момент и под влиянием тяготения системы опускалась к плоскости симметрии, образуя диск. Здесь в самых плотных фрагментах газа

зарождалось новое поколение звезд. Около 5 млрд. лет назад прекратилось сжатие протогалактики: в это время кинетическая энергия образовавшихся звезд диска равна энергии их коллективного гравитационного взаимодействия. В ту эпоху, по-видимому, создаются условия для образования спиральной структуры, а рождение звезд происходит уже в спиральных ветвях, где газ достаточно плотный. Это звезды третьего поколения, их возраст сейчас — от 1 до 5 млрд. лет. К ним относится наше Солнце.

Значительная часть вещества в процессе звездообразования превращается в долгоживущие звезды малой массы. Звезда с массой в одну солнечную превращается в белый карлик, а более массивная — в нейтронную звезду. Эти объекты уже не участвуют в эволюции галактик. Запасы межзвездного газа постепенно истощаются, рождение звезд становится менее интенсивным. Через несколько миллиардов лет, когда будут исчерпаны все запасы газа, спиральная галактика превратится в линзообразную, состоящую из слабых красных звезд. Эллиптические галактики уже находятся на этой стадии: весь газ в них израсходован 10—15 млрд. лет назад.

Звездные скопления

Звездными скоплениями называют гравитационно связанные группы звезд, содержащие от нескольких десятков до миллиона звезд, например Гиады и Плеяды. Пять из семи звезд, образующих фигуру ковша созвездия Большой Медведицы, входят в состав ядра ближайшего к нам звездного скопления. Периферийные члены этого скопления разбросаны по всему небосводу, к ним относится и самая яркая звезда на небе — Сириус. Звездные скопления делят на рассеянные и шаровые в соответствии с их внешним видом, составом и пространственным распределением в Галактике.

Рассеянные звездные скопления. Рассеянные звездные скопления насчитывают от нескольких десятков (бедные скопления) до нескольких тысяч (богатые скопления) звезд. Плотность звезд в них в десятки раз больше, чем в окружающем звездном поле, но концентрация звезд скопления к его центру слабая, отсюда и название «рассеянные». Возраст этих скоплений, опре-

деляемый по самым ярким входящим в них звездам (чем больше возраст, тем слабее в скоплении ярчайшие звезды), может быть от 1 млн. до 5 млрд. лет. Диаметры рассеянных звездных скоплений — от 1,5 до 30 пк, массы — от 100 до 3000 масс Солнца. В пределах 2 кпк от Солнца известно более тысячи рассеянных скоплений, всего их в Галактике, по-видимому, около 20 тыс. Содержание химических элементов в звездах рассеянных скоплений близко к солнечному, причем доля тяжелых элементов уменьшается с увеличением расстояния от центра Галактики и от плоскости диска. Рассеянные скопления редко встречаются за пределами полосы Млечного Пути. Известны двойные и кратные скопления.

Самые разреженные и молодые рассеянные скопления носят название звездных ассоциаций. На фотографических пластинках обычно их невозможно выделить на фоне других звезд Млечного Пути, и только спектральные исследования позволяют установить, что пространственная плотность звезд определенного типа в ассоциации больше, чем вне занимаемого ею объема.

Помимо ассоциаций и рассеянных скоплений, выделяют еще и звездные комплексы. Это огромные звездные группировки поперечником до 500—1000 пк и с массами 10^5 — 10^7 масс Солнца. В них входят звезды высокой светимости и рассеянные скопления, имеющие возраст до 100 млн. лет. Обычно скопления, входящие в один и тот же комплекс, имеют сходные характеристики. Комплекс включает несколько гигантских молекулярных облаков, ассоциаций и рассеянных скоплений. В настоящее время в Галактике в окрестностях Солнца известно около 40 комплексов, все они располагаются вдоль спиральных ветвей.

Наше Солнце находится внутри одного из комплексов, в так называемой Местной системе звезд, но не является его членом, поскольку возраст Солнца значительно больше возраста комплекса, и Солнце имеет другую кинематику. Оно попало в комплекс при своем движении в Галактике. Диаметр Местной системы порядка 800 пк.

Шаровые звездные скопления. Шаровыми звездными скоплениями называют гравитационно связанные массивные сферические (редко эллиптические) системы с

сильной концентрацией звезд и полным их числом около миллиона. Светимости шаровых скоплений обычно в сотни и тысячи раз больше, чем рассеянных скоплений, поскольку в последних количество звезд заметно меньше. Линейные размеры шаровых скоплений от 15 до 200 пк. Сейчас в Галактике известно 130 шаровых скоплений, их возраст 10—15 млрд. лет. Невооруженным глазом можно наблюдать два шаровых скопления в южных созвездиях Кентавра и Тукана.

Крупномасштабное звездообразование в Галактике. Звездообразование всегда связано с облаками молекулярного водорода H_2 , массы которых порядка 100—1000 масс Солнца. Молекулярные облака, как правило, образуют гигантские комплексы со средней массой $5 \cdot 10^5$ масс Солнца и поперечником около 50 пк. В пределах кольца молекулярных облаков нашей Галактики, ограниченного расстояниями в 4 и 8 кпк от центра, должно быть около 4000 таких комплексов. В них сосредоточено до 90% массы межзвездного вещества. Эти молекулярные комплексы образуют наиболее плоскую составляющую из всех населений Галактики: полуширина их распределения вокруг галактической плоскости всего 60 пк, что вдвое меньше, чем у распределения атомарного водорода. Гигантские молекулярные облака (комплексы) находятся, как правило, внутри сверхгигантских облаков атомарного водорода, обладающих массами в 10^7 — 10^8 солнечных и размерами в сотни парсек. Эта крупномасштабная неоднородность в распределении газа и объясняет существование звездных комплексов, поскольку именно в молекулярных облаках сосредоточены очаги звездообразования.

Наблюдаемые крупномасштабные группировки звезд — это остатки первичной фрагментации протогалактики. Изучение скоплений звезд помогает восстановить этапы эволюции Галактики. Этап звездообразования начинался с выделения отдельных фрагментов (сверхоблаков) газа в формирующейся Галактике. В ходе фрагментации выделяются те случайно возникшие неоднородности плотности, пространственные масштабы которых превышают масштабы тепловых процессов в газе. Такие неоднородности сжимаются под действием собственного тяготения. Последовательная фрагментация должна приводить к образованию фрагментов, соответствующих массам протозвезд. Расчеты показывают,

что максимальная масса молодых звезд не превышает нескольких десятков солнечных масс.

Звезды

Изучение звезд — одна из старейших и вместе с тем важнейших задач астрономии. Анализ истории жизни звезд позволяет строить теорию эволюции нашего Солнца.

Данные наблюдений. Основные характеристики звезд — это светимость, масса, радиус, химический состав.

Светимостью звезды называют полное количество энергии, излучаемое звездой за одну секунду. Светимости звезд удобно сравнивать со светимостью Солнца, характеристики которого хорошо известны. Каждую секунду квадратный сантиметр земной поверхности получает от Солнца $1,37 \cdot 10^6$ эрг, это соответствует светимости $4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. Чтобы оценить светимость звезды, надо знать ее видимую светимость (звездную величину) и расстояние до нее; необходимо также учитывать влияние межзвездной среды, поглощающей излучение звезд. Есть звезды-сверхгиганты, светимости которых в сотни тысяч раз больше солнечной (например, звезды Ригель и Бетельгейзе в созвездии Ориона), есть и множество очень слабых (карликовых) звезд — их светимости в десятки тысяч раз меньше солнечной.

Основную информацию о звездах получают, изучая их спектры. Введены спектральные классы звезд О, В, А, F, G, K, M, каждый из которых подразделяется на десять подклассов. Спектры звезд зависят от температуры их поверхностных слоев, откуда к нам приходит излучение. Температуры звезд сильно различаются — от 50 000 К у звезд спектрального класса О до 3 000 К у звезд класса М. В соответствии с этим основная часть излучения звезд классов О и В приходится на ультрафиолетовую часть спектра, и они имеют голубой цвет. Звезды, сходные с нашим Солнцем (спектральный класс G2), имеют желтый цвет, а звезды классов K, M — красные.

В звездных спектрах наблюдают большое количество линий поглощения, принадлежащих различным химическим элементам. Чем больше температура наружных слоев звезды, тем более высоким состояниям возбужде-

ния атомов соответствуют линии спектра. Различия спектров звезд определяются главным образом различиями в температуре. Химический же состав атмосфер большинства звезд, как показал спектральный анализ, почти одинаков. Наружные слои звезд состоят из водородно-гелиевой плазмы с очень малой примесью более тяжелых элементов.

Существуют звезды с нетипичным химическим составом, например, с аномально высоким содержанием углерода, лития. Обнаружены звезды, в спектрах которых наблюдаются линии технеция. Этот элемент не существует на Земле в естественном состоянии. Наконец, известна звезда, в атмосфере которой представлен редчайший на Земле изотоп гелия He^3 . Подобные особенности обусловлены, по-видимому, специфическими процессами в наружных и внутренних слоях этих звезд.

Массы звезд непосредственно можно оценить только из наблюдений двойных звезд, используя законы Кеплера. Встречаются звезды в 50 раз массивнее Солнца, есть и маломассивные звезды — их массы в 10 раз меньше солнечной.

Из-за большой удаленности радиусы звезд определить трудно. Для большинства звезд их радиусы оценивают по светимостям и температурам в предположении, что вещество звезды находится в термодинамическом равновесии. Разработаны методы определения угловых размеров звезд по интерференционной картине, возникающей при перекрытии изображений звезды, построенных одновременно двумя объективами. Используется также покрытие звезд Луной: от углового размера звезды зависит характер дифракционной картины на краю лунного диска. Оба метода применимы только для достаточно ярких звезд. Кроме того, надо знать расстояние до звезды, чтобы по ее угловому размеру определить радиус. Точность таких измерений невелика. Оценки радиусов звезд, входящих в тесные двойные системы, можно получить из анализа кривых блеска. Звезды могут иметь размеры, сравнимые с диаметром Солнечной системы (звезда Бетельгейзе в созвездии Ориона), но есть и звезды с радиусом в несколько десятков километров.

Оказывается, существуют зависимости между основными характеристиками звезд. Например, светимость по своему физическому смыслу должна определяться

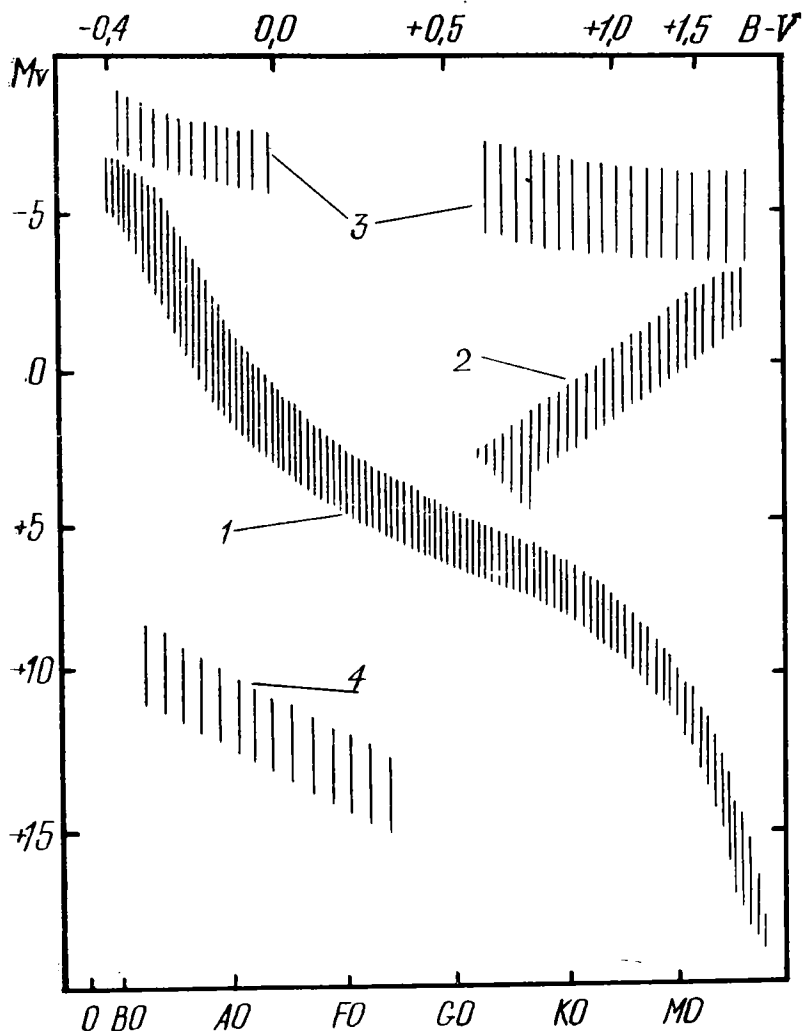


Рис. 3. Схема диаграммы Герцшпрунга — Рассела для звезд галактического поля. На нижней шкале указаны спектральные классы звезд, на верхней — показатель цвета, т. е. разность звездных величин в синем (B) и желтом (V) участках спектра. По оси ординат отложена светимость звезды (количество излучаемой ею энергии) в желтом участке спектра. По определению $M = V + 5 - 5 \lg r$, где r — расстояние в парсеках. Цифрами указаны: 1 — главная последовательность; 2 — гиганты; 3 — сверхгиганты; 4 — белые карлики

через температуру и размер звезды. Есть и нетривиальные зависимости. Из наблюдений наиболее надежно оценивают светимости и спектральные классы звезд. Между этими двумя характеристиками существует связь, которую в начале нашего столетия установили (независимо) датчанин Герцшпрунг и американец Рессел.

Большинство звезд сосредоточено вдоль узкой полосы — главной последовательности (на ней находится и Солнце). Группа белых карликов включает звезды, светимости которых в сотню раз меньше солнечной, а цвет у них белый (отсюда и название). Последовательность гигантов объединяет звезды высокой светимости, поверхностные температуры которых малы. Это означает, что радиусы гигантов в десятки раз больше солнечного. Объекты наибольшей светимости, принадлежащие к этой группе, называются сверхгигантами.

Конечно, указанные последовательности не исчерпывают всего многообразия звезд. В Галактике существуют переменные звезды, светимости которых меняются. Среди них особый интерес представляют периодические пульсирующие звезды — меняются их светимости, радиусы и температуры. К ним относятся цефеиды: периоды изменения блеска от дня до десятков суток.

Среди нестационарных звезд наиболее многочисленны звезды типа UV Кита. Их светимости в сотни раз меньше солнечной, а температура около 3000 К. Они характеризуются крайне быстрыми изменениями блеска: менее чем за одну минуту блеск звезды возрастает в десятки раз и за 10—15 минут спадает до первоначального. По общей энергии вспышки звезд этого типа на один-два порядка превосходят сильные вспышки на Солнце.

Имеется группа взрывающихся звезд — новых и сверхновых. Во время вспышки у новых звезд блеск увеличивается в тысячи и даже миллионы раз. Начальный период вспышки — до того, как блеск достигает максимума, — продолжается несколько суток. Спад блеска до первоначального значения длится годами и столетиями. Обычно через несколько лет после максимума блеска вокруг новой звезды наблюдается расширяющаяся газовая оболочка. Практически все бывшие новые звезды входят в состав тесных двойных систем, причем один из компонентов — белый карлик. Феномен новых звезд

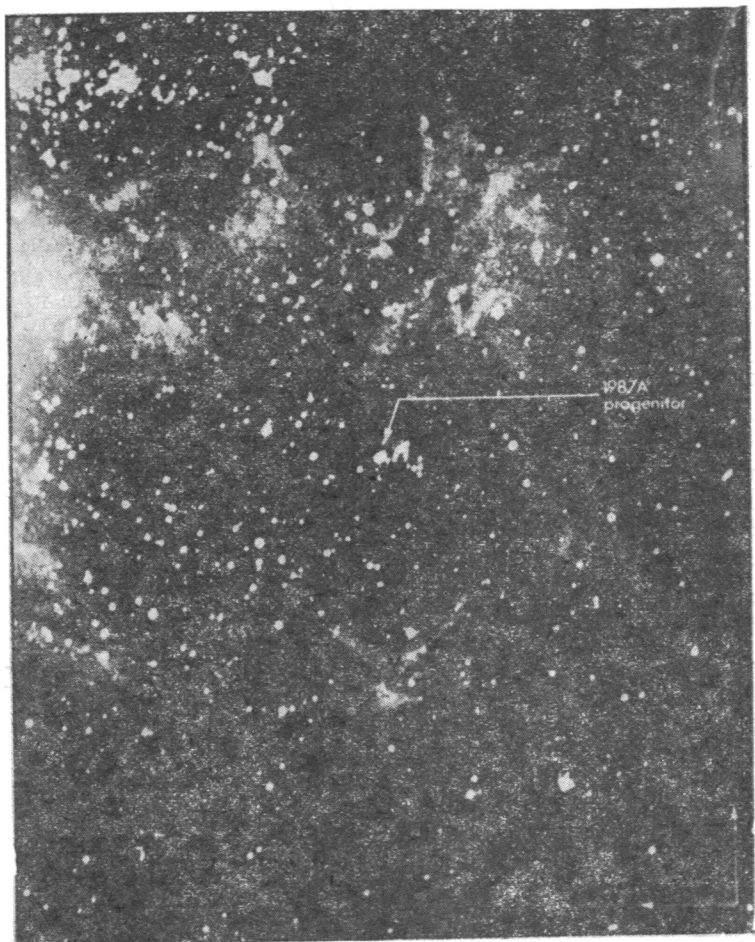
связан с характером эволюции тесных двойных систем — обменом вещества между компонентами. В одной и той же системе вспышки могут повторяться. Интервалы между вспышками составляют от 10 до 1000 лет. Энергия, выделяемая за время вспышки, достигает 10^{43} эрг.

Вспышки сверхновых звезд происходят очень редко и сопровождаются катастрофическими изменениями структуры звезды. В максимуме блеска сверхновая сравнима по яркости со всей звездной системой, в которой она вспыхнула. Мощность излучения во время вспышки превышает 10^{41} эрг/с. Начальный период вспышки продолжается около 15—20 сут. Длительность наблюдений отдельных сверхновых достигает 350 сут; за это время выделяется до 10^{50} эрг. При взрыве сверхновой сбрасывается оболочка, масса которой может достигать нескольких масс Солнца. Взаимодействие этой оболочки с окружающей межзвездной средой приводит к образованию так называемых остатков вспышек сверхновых звезд. Изучая свойства остатков, можно определить важные характеристики взрыва. В ряде случаев удалось обнаружить звездные остатки вспышек — нейтронные звезды. Например, Крабовидная туманность и содержащийся в ней пульсар возникли в нашей Галактике при вспышке Сверхновой звезды в 1054 г. Наблюдения Сверхновой, вспыхнувшей в 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке, подтвердили правильность основных выводов теории — как Сверхновая, взорвался массивный голубой сверхгигант.

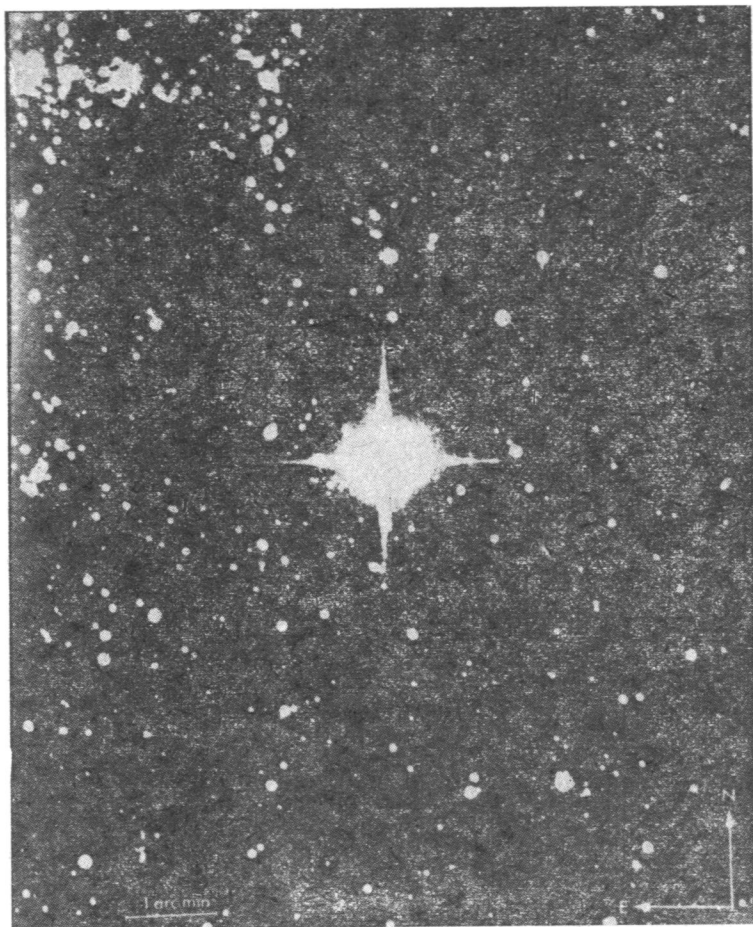
Кроме зависимости спектр—светимость, существует зависимость масса—светимость: с увеличением массы растет светимость звезд. Эту зависимость удобнее всего исследовать, изучая звездные скопления. Возраст и химический состав звезд данного скопления одинаковы, так как они образовались из одного и того же газопылевого облака. Поэтому все разнообразие светимостей звезд скопления определяется различием их масс, от которых зависят скорости эволюции звезд.

Эволюция звезд. Современная теория эволюции звезд объясняет общий ход их развития: рождение, изменение основных наблюдаемых характеристик, конечные состояния.

Звезда — это самосветящийся газовый шар, который находится в динамическом равновесии: собственное



a



6

Рис. 4. Участок Большого Магелланова Облака с молодым звездным скоплением NGC 2044, на южной окраине которого вспыхнула Сверхновая 1987 А: а) снимок до вспышки Сверхновой; голубой сверхгигант, которому предстоит вспыхнуть, указан стрелкой: б) та же область в марте 1987 г.

тяготение массы газа уравновешено давлением газа, а потери энергии на излучение компенсируются внутренней генерацией энергии. При неизменных массе, химическом составе, а также вращении и магнитном поле это равновесие устойчиво. Однако в ходе эволюции характеристики звезды изменяются, равновесие может стать неустойчивым. Тогда звезда должна либо перейти в равновесное состояние, либо испытать катастрофические изменения, приводящие к ее гибели.

Характерное время эволюции звезд слишком велико для того, чтобы непосредственно проследить всю эволюцию. Поэтому основным методом исследования эволюции звезд является построение моделей, описывающих изменения внутреннего строения и химического состава со временем. Выводы затем сравниваются с результатами наблюдений, например, с диаграммой Герцшпрунга—Рессела, суммирующей наблюдения большого числа звезд, находящихся на разных стадиях эволюции. По диаграммам Герцшпрунга—Рессела скоплений различного возраста удалось установить направление эволюции звезд.

Согласно современным представлениям звезды образуются в результате гравитационной конденсации вещества межзвездной среды. Процесс рождения происходит следующим образом. В газопылевом облаке случайно или под воздействием внешних причин (магнитное поле, тепловая неустойчивость, галактическая ударная волна) возникают гравитационно неустойчивые фрагменты, которые начинают сжиматься. Если масса фрагмента достаточно велика, то происходит дальнейшая фрагментация. Такая картина каскадной фрагментации подтверждается наблюдениями: звезды рождаются группами.

Сжимающиеся объекты звездной массы называют протозвездами. Сжатие происходит быстрее там, где плотность выше, поэтому протозвезда разделяется на компактное ядро и протяженную оболочку. При гравитационном сжатии газ в ядре разогревается. Вещество оболочки падает на ядро, увеличивает его массу и температуру. Ядро излучает свою тепловую энергию. Когда давление излучения ядра становится достаточно большим, «выпадение» вещества из оболочки прекращается. Давление излучения ограничивает массу будущих звезд величиной порядка 50 масс Солнца. Протозвезда, со-

стоящая из ядра и оболочки, наблюдается как источник инфракрасного излучения (оптическое излучение ядра перерабатывается в оболочке). Если в оболочке имеются уплотнения газа, то переработка излучения ядра может приводить к возникновению ОН- и H_2O -мазеров.

Вращение протозвезд играет важную роль в их эволюции. Теоретический анализ показал, что если протозвезда обладает заметным вращением, то на некотором этапе центробежные силы могут остановить сжатие и привести к фрагментации протозвезды. В результате образуется двойная или кратная система звезд. Одиночные звезды образуются из медленно вращающихся фрагментов. Если же существует механизм отвода момента вращения от ядра быстро вращающейся протозвезды (например, через магнитное поле), то вокруг ядра может сформироваться протяженный газопылевой диск, из которого потом образуется планетная система.

Когда оболочка становится прозрачной, протозвезда начинает наблюдаться как звездообразный объект с нерегулярно изменяющейся светимостью (звезды типа Тельца). Ядро еще сжимается, а энергия в нем путем конвекции переносится от горячих внутренних областей наружу. Сжатие прекращается, когда температура в центре ядра достигает 10^6 К и «загорается» водород: энергии, выделяющейся при синтезе водорода в гелий, достаточно для компенсации потерь на излучение. Момент начала термоядерных реакций есть момент рождения звезды. В зависимости от массы звезда вступает в то или иное место главной последовательности. Если масса протозвезды меньше 0,08 массы Солнца, то в процессе гравитационного сжатия она никогда не достигнет температуры, необходимой для начала термоядерных реакций. Такая протозвезда может существовать миллионы лет, постепенно сжимаясь. В итоге все ее вещество перейдет в состояние вырождения: давление вещества определяется давлением вырожденного электронного газа. Тяготение уравнивается давлением, и сжатие прекратится. Радиус этого объекта будет порядка сотен километров. Давление вырожденного газа не зависит от температуры, поэтому, высветив всю свою тепловую энергию, эти звездообразные объекты превращаются в черные карлики — безжизненные и несветящиеся. В принципе такие объекты могут существовать в равновесном состоянии очень долгое время — миллиар-

ды миллиардов лет. По-видимому, только очень медленный процесс распада протонов (если он будет обнаружен) в конце концов может привести к нарушению равновесия: масса черного карлика уменьшится, соответственно ослабнет его тяготение, и он будет разорван внутренним давлением.

Если масса протозвезды заключена в интервале 0,08—0,3 массы Солнца, то при сжатии в ее недрах достигаются температуры, достаточные для переработки водорода только в изотоп He^3 , а He^4 не синтезируется. Это красные карлики, находящиеся в состоянии конвективного перемешивания. К ним относят звезды типа UV Кита. Время жизни красных карликов превышает 100 млрд. лет, а конечное состояние — уже описанный черный карлик.

Жизнь более массивных звезд гораздо богаче событиями. Запасы водорода в их недрах велики. Темп расхода этого горючего и, значит, скорость эволюции зависят от массы звезды. Звезда с массой, вдвое меньшей массы Солнца, проводит на главной последовательности почти 100 млрд. лет, а звезда, в 10 раз массивнее Солнца, — 10 млн. лет. Для Солнца это время порядка 1 млрд. лет. Пока весь водород в центральной области звезды не будет переработан в He^4 , свойства звезды почти не меняются.

После выгорания водорода в центральной зоне звезды образуется горячее гелиевое ядро. Температура ядра еще недостаточна для «возгорания» гелия (10^8 К). Звезда сходит с главной последовательности. Излучение энергии звездой уже не будет компенсироваться термоядерными реакциями, и она начнет сжиматься. Это приведет к росту температуры ядра, что, в свою очередь, повысит температуру в оставшейся водородной оболочке звезды. Здесь опять загорится водород. Оболочка расширится и охладится. Светимость звезды возрастет, а температура упадет. Такая звезда в зависимости от массы станет гигантом или сверхгигантом. Время перестройки звезды на два порядка меньше времени выгорания водорода, поэтому на диаграмме Герцшпрунга—Рессела между полосой главной последовательности и областью сверхгигантов — в полосе неустойчивости — мало звезд. Оказывается, в оболочках гигантов, находящихся в этой полосе, могут создаваться такие условия ионизационного равновесия атомов гелия, при которых

звезда будет совершать регулярные пульсации типа пульсаций цефеид, или звезд типа RR Лиры. Давление теплового излучения гелиевого ядра на вещество в холодных протяженных оболочках гигантов приводит к непрерывному истечению вещества. Развитие различных неустойчивостей в оболочке может приводить к выбросу одной или нескольких оболочек.

Эволюция гелиевого ядра зависит от его массы. Если масса порядка 0,5 масс Солнца, то при сжатии не достигаются температуры, достаточные для возгорания гелия. Такое ядро переходит в состояние вырождения и затем, достигнув равновесного состояния, постепенно высвечивает свою тепловую энергию, превращаясь в конце концов в черный карлик.

Если масса ядра больше 0,5 массы Солнца, то при сжатии достигаются температуры порядка 10^8 К. В этих условиях загорается гелий. Соответствующее энерговыделение еще более разогревает ядро, и возросшее в нем давление останавливает сжатие. Стадия горения гелия на порядок короче по времени стадии горения водорода. В ряде случаев, когда гелиевое ядро находится в состоянии частичного вырождения, возгорание гелия сопровождается резким выделением энергии — происходит гелиевая вспышка. При этом звезда теряет оболочку — ее наружные слои отделяются от ядра и расширяются, образуя планетарную туманность. Пока звезда достаточно горяча, она наблюдается как ядро планетарной туманности.

После исчерпания гелиевых источников в центральной области звезды образуется углеродное ядро. При массе этого ядра меньше 1,2 массы Солнца гравитационное сжатие приводит к образованию белого карлика, не имеющего термоядерных источников энергии. Собственное тяготение белого карлика уравновешено давлением вырожденного электронного газа. За миллиард лет белый карлик превращается в черный.

Нечто подобное ожидает, по-видимому, наше Солнце. Через 8 млрд. лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым, а потом — черным карликом размером с Землю.

Если масса углеродородного ядра больше 1,2 массы Солнца, то его сжатие приведет к возгоранию углерода с образованием ядер кислорода (горение углерода длится около тысячи лет). Затем может повториться сцена-

рий, подобный сценарию с гелиевым ядром. Если же масса кислородного ядра велика, то при гравитационном сжатии загорается кислород, образуя ядра неона, и т. д. вплоть до атомных ядер элементов группы железа. При этом смена горючего происходит через годы, сутки и даже часы. Плотность железного ядра достигает 10^9 г/см³. При таких плотностях появляются ядерные реакции, поглощающие много энергии. Звезда охлаждается и начинает резко сжиматься. Внутренние слои обрушиваются к центру звезды. Возникает ударная волна, движущаяся от центра. Наружные слои звезды выбрасываются с огромной скоростью. Масса этих слоев не должна быть очень большой, иначе ударная волна «погасится». Подобное явление, по-видимому, наблюдается как вспышка сверхновой звезды. Под давлением падающих масс внутреннее железное ядро будет сжато до размеров порядка 10 км и плотностей 10^{15} г/см³. Если масса ядра не превышает двух масс Солнца, то оно превращается в нейтронную звезду. В таких звездах гравитационному сжатию противодействует давление вырожденного нейтронного газа. Нейтронные звезды быстро вращаются и обладают сильным магнитным полем. Они наблюдаются, возможно, как пульсары. За миллиарды лет нейтронная звезда высвечивает свою тепловую энергию и превращается в черный карлик.

Взрыв сверхновой может происходить и без образования звездного остатка, тогда происходит полное разрушение звезды-предсверхновой.

Если масса железного ядра больше двух масс Солнца, то оно превращается, по-видимому, в черную дыру. Сейчас не известны такие состояния вещества, в которых давление могло бы противодействовать гравитационному сжатию столь массивных звезд. При образовании черной дыры вещество проходит очень высокую степень сжатия, при которой становятся существенными квантовые свойства пространства и времени. Наблюдать черные дыры можно только косвенно.

Многообразие свойств наблюдаемых звезд определяется не только их массой. Важное значение имеют химический состав, вращение, магнитное поле и т. д. В двойных системах эволюция звезд происходит более сложно. Однако конечные состояния эволюции — белый карлик, нейтронная звезда, черная дыра — определяются только массой звезды.

Солнечная система

Солнечная система состоит из звезды — Солнца — и окружающих ее спутников: планет, астероидов, комет, метеоритов и мелких метеорных частиц и пылинок. Девять планет являются главными спутниками Солнца, их суммарная масса в 743 раза меньше массы Солнца. Все планеты движутся по почти круговым орбитам в ту сторону, в которую вращается вокруг своей оси Солнце. Орбиты лежат почти в одной плоскости. Вращательный момент, связанный с орбитальным движением планет, составляет 98% всего момента вращения Солнечной системы. На собственное вращение Солнца приходится только 2% общего момента системы.

Солнце. В Галактике миллиарды звезд, подобных Солнцу: у него типичные для большинства звезд размер, масса, температура и светимость. Но Солнце — ближайшая к нам звезда, мы можем исследовать тонкую структуру ее поверхности, солнечные вспышки, солнечный ветер, магнитное поле.

Солнце целиком состоит из газа, поэтому его поверхность не имеет резких границ. Диаметр видимого диска Солнца составляет $32'$, это соответствует линейному размеру 1400 тыс. км. Солнечное вещество состоит на 71% из водорода, на 26% — из гелия, на 3% — из других элементов. Солнце вращается, причем экваториальная зона вращается быстрее, чем высокоширотные зоны. Средний период обращения Солнца около 25 сут. Линейная скорость движения экваториальной точки солнечной поверхности составляет 2 км/с. Эффективная температура поверхности Солнца равна 5770 К. Солнце обладает магнитным полем, которое имеет две составляющие: полоидальную (вдоль меридиана Солнца) и тороидальную (вдоль его параллелей). Полоидальное поле сосредоточено главным образом в полярных областях до гелиографических широт $\pm 55^\circ$. Его средняя напряженность не превышает 2 Гс. Тороидальное поле располагается по обе стороны от экватора на более низких широтах. Его средняя напряженность составляет десятки гаусс, а в отдельных областях достигает 150 Гс. Оказалось, что полярность магнитного поля Солнца может меняться.

Современные представления о внутреннем строении

Солнца базируются на данных наблюдений солнечной атмосферы.

Зона термоядерных реакций занимает почти весь объем Солнца, ее радиус 500 тыс. км. Здесь плотность равна 160 г/см^3 , давление — 40 млрд. атм, температура — 10—15 млн. градусов. Вырабатываемая энергия переносится к солнечной поверхности в виде излучения. Фотоны на своем пути много раз поглощаются и переизлучаются и доходят до поверхности примерно за миллион лет. Гамма-кванты последовательно превращаются в рентгеновские, ультрафиолетовые и, наконец, в оптические. Граница этой зоны определяется резким падением температуры до 1 млн. градусов.

На глубине 100—200 тыс. км находится конвективная зона. Здесь плотность равна 10^{-2} г/см^3 , давление — 10^6 атм, а температура резко падает от 10^6 К до 10^4 К . В таких условиях энергия переносится элементами вещества, более горячими по сравнению с окружающей средой. Конвективная зона играет для Солнца очень важную роль, она служит источником разнообразных видов движений в фотосфере.

Фотосфера расположена над конвективной зоной, ее толщина порядка 400 км, плотность — $2 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3$, давление — 0,1 атм, температура — 6000 К. Из фотосферы выходит большая часть излучаемой Солнцем энергии. Максимум этого излучения приходится на видимую область спектра. Спектр фотосферы — непрерывный, на который налагаются линии поглощения. По характеристикам этих линий можно судить о химическом составе и физических условиях в фотосфере. Солнечная фотосфера имеет зернистую структуру. Светлые зерна на темном фоне называют гранулами. Размеры гранул колеблются от 150 до 1500 км. Температура их на несколько сотен градусов выше, чем в соседних темных участках. Среднее время жизни гранул составляет 9 мин. Фотосферная грануляция характеризуется преимущественно вертикальными движениями со скоростью 1—2 км/с и является порождением конвективной зоны.

Над фотосферой простирается хромосфера Солнца, ее толщина около 1500 км, плотность — 10^{-12} г/см^3 . Температура в хромосфере с высотой не убывает, а растет от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч градусов. Такое резкое повышение температуры, согласно современным представлениям, обусловлено волнами,

возникающими еще в конвективной зоне и проникающими через толщину фотосферы в хромосферу. Естественно, что в распространении этих волн большую роль играет магнитное поле. Хромосфера наблюдается в оптическом диапазоне (линии водорода, гелия, кальция), в ультрафиолетовом и отчасти в рентгеновском диапазоне, а также в радиодиапазоне с длиной волны меньше 15 см. Удивительна исключительная неоднородность солнечной хромосферы, особенно в распределении температуры и скоростей движения вещества. Она проявляется в существовании крупномасштабных ячеек, средний размер которых составляет примерно 30 тыс. км. Эти ячейки называют супергранулами. Их наблюдают в линиях водорода и кальция. Супергранулы связаны с распределением магнитного поля. В красной линии водорода над солнечным диском можно наблюдать мелкие вертикальные выступы. Это спикеры. В среднем их диаметр составляет 1000 км, длина — 6 тыс. км, температура — 15 тыс. градусов. По-видимому, спикеры выбрасываются из нижней хромосферы со скоростью около 25 км/с. Спикеры располагаются на границах супергранул.

Выше хромосферы простирается корона Солнца. Корона излучает в видимой (линии сильно ионизованных атомов железа и никеля), ультрафиолетовой и рентгеновской областях, а также в дециметровых и метровых длинах волн радиодиапазона. Для нее характерна большая неоднородность плотности: миллиард частиц в кубическом сантиметре у нижней границы; $5 \cdot 10^5$ частиц в кубическом сантиметре на расстоянии трех солнечных радиусов от поверхности Солнца. Температура в короне достигает $2 \cdot 10^6$ К. Корона Солнца нестационарна и расширяется: наблюдается истечение потоков частиц, называемое солнечным ветром. Концентрация частиц в солнечном ветре в окрестностях Земли составляет 100 частиц/см³. Наблюдения в рентгеновском диапазоне показали, что корона очень неоднородна: в ней наблюдаются корональные конденсации с повышенной концентрацией частиц и корональные дыры, в которых концентрация частиц меньше, чем в окружающей короне. Эти неоднородности связаны с локальной структурой магнитного поля, в частности, корональные дыры всегда существуют в полярных областях Солнца.

Наблюдения свидетельствуют о том, что в атмосфе-

ре Солнца происходят бурные процессы — как хаотические, так и упорядоченные во времени. Упорядоченные явления, которые охватывают большие (поперечником не менее нескольких тысяч километров) области и отличаются заметными изменениями физических характеристик, называют солнечной активностью.

Активность Солнца с древнейших времен связывалась с солнечными пятнами: большие пятна видны невооруженным глазом. Солнечные пятна представляют собой относительно холодные места фотосферы Солнца. Температура их на 1500 К ниже температуры окружающей среды, поэтому они кажутся темными. Пятна имеют тарелкообразную форму с «дном» на глубине 700—1000 км. Размеры пятен колеблются от тысячи до десятков тысяч километров. Главная характеристика пятна — его магнитное поле, которое может достигать 5000 Гс в центре пятна и уменьшается до 50 Гс на окраине. Магнитное поле растет с ростом пятна и становится максимальным, когда пятно также достигает максимальных размеров. После разрушения пятна поле существует еще некоторое время. В области пятен магнитное поле подавляет конвективный перенос энергии в подфотосферных слоях. Таким образом в них создается дефицит выходящей лучистой энергии и понижается температура. Обычно пятна появляются группами; в каждой группе выделяют ведущее и хвостовое пятна. Первое из них расположено в западной части группы, второе — в восточной, причем ведущее пятно ближе к экватору, чем хвостовое. Ведущее и хвостовое пятна группы обладают магнитными полями противоположной полярности. Мелкие пятна живут от нескольких часов до нескольких суток, большие же — около месяца, иногда несколько месяцев.

Группы пятен появляются не по всему диску Солнца, а только в зонах, расположенных на расстоянии примерно до 40° по обе стороны от солнечного экватора. Вблизи самого экватора до широт $\pm 5^\circ$ пятна встречаются очень редко.

Важные элементы солнечной активности — факелы и флоккулы. Это проявления одного и того же процесса в разных слоях атмосферы Солнца: факелы — в фотосфере, а флоккулы — в хромосфере. В центрах активности вначале возникают флоккулы и только через некоторое время пятна. Исчезают флоккулы позднее, чем

пятна. Иногда они существуют после исчезновения пятен в течение нескольких оборотов Солнца. Флоккулы и факелы за время своего существования изменяются по форме, площади и яркости.

Удивительное явление в солнечной короне — протуберанцы. Это сравнительно холодные и плотные облака, простирающиеся в длину до $\frac{1}{3}$ радиуса Солнца. Они имеют различные формы, движения вещества в них очень сложные. По изменчивости во времени и характеру движения протуберанцы делят на три класса: спокойные, активные и эруптивные. Наиболее распространены спокойные протуберанцы, которые не изменяют своей формы, развиваются очень медленно и существуют в течение нескольких месяцев, а иногда и года. Они имеют вид арок с основаниями на границах супергранул. Исчезновение спокойных протуберанцев связано с медленным рассасыванием, стеканием вниз, в хромосферу. Активные протуберанцы выделяются по сравнительно небольшим упорядоченным движениям и существуют не более нескольких часов. Характерные скорости активных протуберанцев вдоль силовых линий магнитного поля порядка 100 км/с. Наиболее типичны петлеобразные структуры. Для эруптивных протуберанцев характерны бурные и внезапные изменения всех свойств. Они редко живут более нескольких минут. Строение всех типов протуберанцев крайне неоднородно. Об этом свидетельствует то обстоятельство, что в линиях различных химических элементов видны различные части протуберанцев.

В процессе развития активной области иногда возникают ситуации, в которых возможна быстрая перестройка локальных магнитных полей. Эта перестройка вызывает вспышки, которые являются самым мощным проявлением солнечной активности. Энергия большой вспышки достигает 10^{32} эрг. Эта гигантская энергия выделяется за несколько минут. Основная часть энергии вспышки приходится на кинетическую энергию выбрасываемого вещества, движущегося в короне и межпланетном пространстве со скоростями до 100 км/с, на энергию жесткого рентгеновского излучения и энергию потоков быстрых частиц (протонов, электронов). Вспышка — это корональный процесс; как правило, бывает несколько вспышек в день. Сильные вспышки очень редки.

Хронология центра активности следующая. Вначале в месте будущего центра образуется локальное усиление магнитного поля. Затем возникают яркие области — факелы и флоккулы и наконец пятна. По истечении нескольких дней произойдут вспышки и появятся протуберанцы. Наступает максимум во всех проявлениях активности, после которого центр активности начинает распадаться. Пятна постепенно исчезают, вспышки возникают реже, а протуберанцы становятся спокойными. Флоккулы и факелы в течение нескольких дней не изменяются. После исчезновения пятен вспышки больше не наблюдаются, хотя факелы и флоккулы еще видны. Затем и они ослабевают. Позже всех исчезает магнитное поле.

В основе рождения и эволюции активной области лежат магнитные поля и конвективные движения солнечного вещества. Например, пятна формируются, по-видимому, супергрануляцией, которая концентрирует магнитное поле в вершинах супергранул. Активные области отождествляются с местами усиления магнитного поля. Нижнее основание активной области — факелы и пятна (фотосфера). Верхняя часть проявляется как флоккулы (хромосфера) и протуберанцы (корона).

Наблюдения показывают, что число активных областей, их положение на диске изменяются со временем. В середине прошлого века Швабе и Вольф установили, что эти изменения происходят со средним периодом около 11 лет. Интенсивность 11-летнего цикла довольно тесно связана с его длительностью: чем мощнее по энергии цикл, тем меньше его продолжительность. В начале 11-летнего цикла пятна появляются довольно далеко от солнечного экватора на широтах $\pm 40^\circ$. В течение цикла зона пятен опускается до широт $\pm 5^\circ$. Оказывается, что полярность ведущих пятен меняется от цикла к циклу так, что цикл ее смены порядка 22 лет.

Относительная интенсивность 11-летних циклов, по-видимому, меняется с периодом около 90 лет. Есть также указания на существование 600-летнего цикла. Исследования показывают, что если рассматривать времена, короче, чем 11-летний промежуток, то проявления активности Солнца носят хаотический характер и могут заметно отклоняться от предсказываемого хода 11-летнего цикла.

Природа цикличности солнечной активности пока

полностью не выяснена. По-видимому, она является следствием дифференциального вращения Солнца и существования конвективной зоны в его внутренних слоях.

Планеты. Десять больших планет Солнечной системы делят на две основные группы: планеты земной группы (Земля, Меркурий, Венера, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон по своим размерам и свойствам ближе к спутникам планет-гигантов.

У всех планет, кроме Венеры и Меркурия, есть спутники. Наиболее крупные из них имеют сферическую форму, остальные по форме ближе к астероидам.

В расположении планет подмечена закономерность, известная как правило Тициуса—Боде. Согласно этому правилу, если n есть номер планеты, то большая полуось ее орбиты есть $a = 0,1(3 \cdot 2^n + 4)$. Причем для Меркурия $n = -\infty$, для Венеры $n = 0$, для Земли $n = 1$. При $n = 3$ это соотношение дает положение пояса астероидов, занимающего обширную кольцевую область пространства между орбитами Марса и Юпитера. Правило Тициуса—Боде не выполняется на больших расстояниях от Солнца и не применимо к орбите Плутона.

Оказывается, что движения планет и их спутников синхронизированы. Например, Луна постоянно обращена к Земле одной стороной, т. е. у Луны периоды обращения по орбите вокруг Земли и вращения вокруг оси совпадают. Другие примеры: синхронизация периодов вращения и обращения вокруг Солнца у Меркурия (длительность солнечных суток на Меркурии равна двум меркурианским годам), синхронизация вращения Венеры относительно Земли, синхронизация движений спутников Марса — Фобоса и Деймоса, соизмеримость орбитальных движений Плутона и Нептуна, Юпитера и Сатурна, галилеевых спутников Юпитера, четырех спутников Урана. Все эти закономерности связаны с приливным взаимодействием Солнца, планет, спутников.

Все планеты земной группы имеют твердые оболочки. Венера, Земля и Марс обладают газовой атмосферой, Меркурий практически ее лишен. Только Земля имеет жидкую оболочку из воды — гидросферу, а также биосферу. Аналогом гидросферы на Марсе является криосфера — лед в полярных шапках и в грунте. Одна из загадок Солнечной системы — дефицит воды на Ве-

нере. Жидкой воды там нет из-за высокой температуры, а количество водяного пара в атмосфере эквивалентно слою жидкости толщиной около одного сантиметра. Меркурий, Венера и Земля имеют в центральных областях жидкие ядра, у Марса его, по-видимому, нет. Однако тепловой поток из недр этих планет пренебрежимо мал по сравнению с поступающим от Солнца потоком энергии, поэтому нагрев поверхности определяется потоком солнечного тепла. В полдень на Меркурии температура достигает 750 К, а в полночь — 100 К. Средняя температура поверхности Венеры, обладающей мощной атмосферой (давление у поверхности около 90 атм), равна 735 К, Земли — 288 К. В полдень на Марсе температура достигает 300 К, а в полночь — 147 К (давление у поверхности около 0,006 атм).

Наиболее обильные элементы в твердых оболочках планет земной группы — железо, кислород, кремний и магний; в них очень мало водорода и инертных газов.

На Венере и Марсе основные компоненты атмосферы — азот и двуокись углерода, на Земле — кислород и азот. Атмосферы планет нагреваются солнечным излучением. Благодаря теплопроводности тепловая энергия атмосферы поступает к поверхности планеты. Если же имеются молекулы, излучающие в инфракрасном диапазоне, то часть энергии переизлучается в космическое пространство. Такой молекулой является двуокись углерода, которой много на Марсе и Венере, поэтому термосферы этих планет более холодные, чем у поверхности Земли.

Планеты земной группы обладают слабыми магнитными полями. Магнитное поле Земли имеет дипольную структуру, его напряженность в области полюсов достигает 0,68 Гс. Магнитное поле Меркурия в 100 раз, Венеры — в 10^5 раз меньше земного. Столь слабое поле Венеры, по-видимому, связано с медленным ее вращением — магнитное поле практически не генерируется в жидком ядре планеты. Магнитное поле Марса в 10^4 раз слабее земного, хотя теория внутреннего строения планет предсказывает более сильное поле.

Поверхностный рельеф планет земной группы формируется под воздействием внутренних (тектоника, вулканизм, различные эрозии) и внешних (переработка поверхности в результате падения метеоритов) причин. Внутренние процессы наиболее активны на Земле, по-

этому на ней мало следов метеорных тел. Наиболее крупномасштабные элементы рельефа — континентальные блоки и океанические впадины — имеются на Земле, Марсе и Венере. Метеорные кратеры — самая распространенная форма рельефа Меркурия, Марса, есть они и на Венере. На Марсе обнаружены образования, связанные с водной эрозией, — извилистые долины, возможно, русла рек, свидетельствующие о том, что несколько миллиардов лет назад Марс имел более плотную атмосферу и гидросферу.

Климат планет определяется потоком солнечной энергии, эллиптичностью орбиты, составом атмосферы, отражательными свойствами поверхности. Сезонные вариации температуры возникают при достаточно большом наклоне плоскости экватора планеты к плоскости ее орбиты. Они заметны на Земле и Марсе, практически отсутствуют на Венере. На Меркурии сезонные вариации связаны с эллиптичностью орбиты: в ближайшей к Солнцу точке орбиты Меркурий получает в 2 раза больше тепла, чем при максимальном удалении от Солнца. Небольшие вариации факторов, определяющих климат, могут существенно его изменить. Например, вариации наклона плоскости экватора Земли являются наиболее вероятной причиной ледниковых периодов, многократно имевших место на Земле.

Меркурий и Венера не имеют спутников, у Марса есть два спутника, характеристики которых близки к характеристикам астероидов.

Из спутников планет земной группы наибольший интерес представляет Луна. Масса Луны всего в 81 раз меньше массы Земли. Есть основания (в частности, сходный возраст) рассматривать систему Земля—Луна как двойную планету. Средняя плотность лунного вещества равна $1,62 \text{ г/см}^3$, радиус Луны — 1738 км. Луна обращается вокруг Земли с периодом 27,32 сут. Из-за годичного движения Луны вместе с Землей вокруг Солнца лунные сутки (29,52 сут) немного превышают период вращения вокруг оси. Лунный день и лунная ночь длятся около 15 сут. В лунный полдень температура поверхности порядка 403 К, а в полночь — 103 К. Форма Луны близка к шару. Центр Луны смещен относительно геометрического центра на 3 км по направлению к Земле. Причиной сдвига является неоднородность структуры лунных недр, которая впервые была обнаружена по

неоднородностям гравитационного поля Луны. Внутреннее строение Луны изучено по записям лунотрясений от ударов метеоритов, зафиксированных доставленными на Луну сейсмографами. Наш спутник имеет центральное ядро — железное либо сернисто-железное, радиус его — порядка 250 км. Ядро окружено астеносферой толщиной 430 км и температурой около 1800 К. Выше располагается мантия, толщина которой около 1000 км, а над ней расположен слой коры толщиной около 60 км. Поверхностный слой толщиной около 10 м состоит из реголита — мелкообломочного материала. Доля метеоритного вещества в реголите не превышает 1%. Дробление лунных пород происходит в основном из-за резких перепадов температуры и микрометеоритной бомбардировки. Реголит обладает очень низкой теплопроводностью, поэтому уже на глубине порядка 1 м практически не ощутимы колебания температуры. Из лунных недр иногда происходят слабые газовые извержения.

Наиболее обильные элементы в лунном реголите — кремний, магний, кальций, алюминий, фтор. Интересно, что благодаря бомбардировке лунной поверхности солнечными космическими лучами в лунном грунте должно накопиться около миллиона тонн He^3 (на Земле полное количество этого редкого изотопа не превышает 500 кг).

Луна лишена атмосферы, поэтому на ее поверхности много метеоритных кратеров. В рельефе Луны выделяют материки и «моря». Материки возвышаются на 1—2 км над уровнем моря. Лунные «моря» представляют собой равнины, заполненные застывшей базальтовой лавой. Они в основном сосредоточены на обращенной к Земле стороне Луны.

У Луны нет глобального магнитного поля, хотя обнаружены локальные участки с заметной намагниченностью, что связано с аномальным содержанием намагниченных или хорошо проводящих пород.

Приливное гравитационное воздействие Земли вызывает на Луне лунотрясения. Как оказалось, для биосферы Земли большое значение имеет обратное воздействие Луны на Землю — лунные приливы: ритм жизнедеятельности многих растений и животных не только согласуется со сменой дня и ночи, но также коррелирует с ритмом лунных приливов.

Современные представления о строении планет-гигантов основаны на данных о структуре их гравитаци-

онного поля. Все они имеют небольшие каменные ядра, температура которых порядка нескольких десятков тысяч градусов, а давление достигает миллионов атмосфер. У Юпитера и Сатурна ядра небольшие, их относительная масса не превышает 4 и 25% соответственно. Массы же ядер Урана и Нептуна достигают, по-видимому, 90% полной массы планет. Непосредственно к ядрам примыкают ледяные оболочки, состоящие из воды, метана и аммиака. Запасы водяного льда на Юпитере достигают трех масс Земли. Наиболее мощные ледяные мантии на Уране и Нептуне. У этих планет непосредственно над мантией располагаются самые внешние слои — газо-жидкие оболочки, состоящие из водорода, гелия, метана и аммиака. Строение Сатурна и Юпитера более сложное. Ледяные мантии окружены мощными оболочками из жидкого водорода, находящегося в металлическом состоянии (один из двух электронов молекулы H_2 при высоком давлении обобществляется между всеми атомами, как это имеет место в металлах). Выше располагаются зоны жидкого молекулярного водорода. Внешние слои этих планет образованы газовыми оболочками, состоящими из водорода и гелия, присутствуют также различные аэрозоли.

Тепловой поток из недр Юпитера и Сатурна примерно равен по величине потоку, получаемому ими от Солнца. Перенос тепла осуществляется конвекцией. Своеобразные структуры в верхних частях оболочек этих планет (Большое Красное Пятно Юпитера и др.) есть результат конвективного перемешивания быстро и дифференциально вращающейся среды.

Химический состав планет-гигантов близок к солнечному. В недрах Урана и Нептуна тяжелых элементов, по-видимому, больше.

У Юпитера, Сатурна и Урана обнаружены магнитные поля. Из всех планет Солнечной системы Юпитер обладает самым большим магнитным полем, формирование которого связано, по-видимому, не только с вращением центральных областей, но и с конвективной зоной планеты. Поле имеет дипольный характер. Максимальная напряженность его достигает 14 Гс. Длинноволновое радиоизлучение Юпитера, имеющее характер вспышек, связано с его мощной магнитосферой. Интересно, что галилеевы спутники движутся внутри магнитосферы Юпитера. Вулканическая активность спутника

Ио, скорее всего, тесно связана с магнитосферой Юпитера. Вулканы Ио выбрасывают вещество (соединения серы) со скоростью около 1 км/с на высоты в сотни километров. Это во много раз превышает скорость и высоту выбросов при извержении вулканов на Земле. Магнитное поле Сатурна тоже имеет дипольный характер, его максимальная напряженность достигает 0,56 Гс. Магнитное поле Урана слабее, его напряженность порядка напряженности магнитного поля Земли. Интересно, что если у Юпитера и Сатурна угол между осью дипольной составляющей магнитного поля и осью вращения не превышает 2° , то этот угол для Урана равен 60° . Слабое магнитное поле есть, возможно, и у Нептуна, но оно пока не обнаружено.

Последняя планета Солнечной системы — Плутон представляет собой маленькое тело размером в несколько тысяч километров, но с очень близко расположенным (около 20 тыс. км) спутником Хароном соизмеримых размеров. О магнитных полях Плутона и Харона пока ничего не известно.

У всех планет-гигантов, кроме Нептуна, обнаружены кольца. Они образованы совокупностью небольших тел, размеры которых оцениваются в пределах от нескольких микрометров до нескольких метров. Кольцо Юпитера, как и все его спутники, расположено в экваториальной плоскости на расстоянии 55 тыс. км от видимой верхней границы облаков, что составляет $\frac{3}{4}$ радиуса планеты. Ширина кольца 6 тыс. км, а толщина около нескольких метров. По-видимому, кольцо представляет собой несформировавшийся из-за разрушающего действия приливных сил спутник. Кольца Сатурна более протяженные. Самое близкое кольцо находится всего в 7 тыс. км от границы облачного слоя. Суммарная ширина кольца не превышает 60 тыс. км, толщина отдельных колец колеблется от десятков сантиметров до нескольких метров. Полная масса вещества колец — около миллионной доли массы Сатурна. Кольца Урана гораздо «слабее» колец Юпитера и Сатурна. Они находятся на расстоянии от 42 до 51 тыс. км от центра планеты. Оказалось, что ширина колец Урана может быть переменной. Это связано, по-видимому, с тем, что плоскости колец Урана слегка наклонены друг к другу и к плоскости экватора планеты. Имеет значение и то, что ось вращения Урана лежит в плоскости его орбиты.

Наиболее интересным из многочисленных спутников планет-гигантов является спутник Сатурна — Титан. Он обладает мощной атмосферой, давление которой у поверхности порядка 1,6 атм. Атмосфера состоит на 90% из азота, 9% — аргона и около 1% — метана, есть также немного аммиака, цианистого водорода, этана. Облака Титана состоят из капелек жидкого метана. У Титана обнаружено слабое магнитное поле, наведенное плазменными потоками радиационных поясов Сатурна.

К населению Солнечной системы относятся кометы — малые тела, движущиеся по сильно вытянутым орбитам. Находясь вдали от Солнца, они выглядят как туманные, слабо светящиеся объекты. С приближением к Солнцу у них образуется «хвост», чаще всего направленный в противоположную от Солнца сторону. Яркие кометы могут иметь несколько хвостов разной длины и цвета. Когда ядро кометы, напоминающее ком льда, загрязненного мелкой пылью, приближается к Солнцу на расстояние меньше 5 а. е., то оно нагревается и начинает выделять газы и пылевые частицы. Давление света и солнечного ветра отбрасывают газы кометы в сторону от Солнца — так появляется хвост. Поперечник ядра кометы может быть от 0,5 до 20 км, средняя плотность порядка 1 г/см³. Длина хвоста иногда достигает десятков миллионов километров. Ядра комет состоят в основном из водяного льда, льда СО и СО₂, имеются и каменные примеси, включающие различные химические элементы. Размеры орбит комет в тысячи раз больше поперечника планетной системы. Большую часть времени кометы находятся далеко от Солнца вблизи афелиев своих орбит, поэтому на далеких окраинах Солнечной системы существует облако комет — так называемое облако Оорта. Оно содержит, по-видимому, около 10¹¹ кометных ядер. Известно около 100 короткопериодических комет с периодами обращения вокруг Солнца меньше 100 лет. Орбиты комет пересекают планетные орбиты, поэтому изредка должны происходить столкновения комет с планетами. Часть кратеров на Луне, Меркурии, Марсе образовалась в результате таких столкновений.

Эволюция Солнечной системы. Происхождение и эволюцию Солнечной системы изучает космогония. Современная космогония объясняет распределение вещества в Солнечной системе, распределение момента вращения,

химических элементов, особенности движения планет и их спутников, устанавливает связь крупномасштабных процессов в планетной системе с эволюцией Солнца и его движением в Галактике.

Рассмотренные выше закономерности в системе планет и спутников определенно указывают на единый процесс их образования. Солнце и планетная система сформировались в ходе эволюции газопылевого облака — фрагмента газопылевого комплекса. При быстром вращении фрагмента в его центральной области образуется сгущение — протосолнце. Оставшаяся масса образует протопланетный диск. Такие диски действительно наблюдаются вокруг ряда молодых звезд. Неравномерный нагрев диска, турбулентность, а также магнитное поле приводят к перераспределению момента вращения во всей системе: вращение диска ускоряется, а протосолнца — замедляется. Численные расчеты эволюции протопланетного диска показали, что в диске образуются «рыхлые» сгустки, медленно сжимающиеся под действием собственного тяготения.

Приливное взаимодействие фрагментов обеспечивает их коллективную эволюцию, т. е. распределение масс и орбит будущих планет зависит от эволюции всего диска и должно подчиняться единому закону типа правила Тициуса—Боде.

Приливное взаимодействие протопланетных сгустков ответственно за обратное вращение Венеры, синхронизацию этого вращения относительно Земли. На современном этапе подобная синхронизация уже была бы невозможна. В эволюции протопланетных сгустков важную роль играет аккреция на них вещества диска. По-видимому, особенность вращения Урана связана с прямыми ударами астероидов на завершающей стадии аккреции. Астероиды и метеориты образуются в ходе охлаждения вещества диска. В современную эпоху их рассматривают как реликтовые остатки протопланетного вещества. Интересно, что основная масса астероидоподобных тел и метеоритов должна образовывать пояс за орбитой Нептуна. Из-за гравитационного взаимодействия внутри поясов могла происходить быстрая и сильная трансформация орбит астероидов, их миграция во внутренние области планетной системы. Такой механизм, который, вероятно, действовал наиболее эффективно в течение первого миллиарда существования Сол-

нечной системы, позволяет достаточно просто объяснить своеобразие орбит Плутона и Харона, а также выпадение крупных метеоритов на поверхности планет земной группы на поздней стадии их формирования. Сегодня внешний пояс астероидов и метеоритов является источником комет.

Процессы образования планет земной группы (аккумуляция) заняли около 100 млн. лет. Образование системы Земля—Луна связано со спецификой начальных характеристик их протопланетного фрагмента, которые и определили движение и последовательное объединение «промежуточных» частиц в два массивных тела.

Аккумуляция планет-гигантов происходила в два этапа. Сначала образовались массивные твердые ядра. Для Юпитера этот процесс длился 30 млн. лет, для Сатурна — 200 млн. лет, для Урана и Нептуна — около 1 млрд. лет. После образования ядра с массой около двух масс Земли начинается аккреция газа, которая длится не менее 1 млн. лет.

При аккумуляции механическая энергия метеоритоподобных тел превращается в тепло, поэтому протопланетный фрагмент разогревается, происходит выделение газов (например, внутренние области Земли к концу ее образования были нагреты до 1500 К). Последующее гравитационное сжатие поднимает температуру в недрах до температуры плавления железа. С этого момента начинается отделение и уход вниз тяжелых компонентов. Энергия, выделявшаяся при расслоении Земли, путем конвекции переносится к поверхности. Наиболее легкие вещества всплывают на поверхность, постепенно слагая наружный слой земного шара — земную кору. Это был длительный процесс (несколько миллиардов лет), который в разных местах земного шара протекал по-разному, что привело к образованию участков с толстой корой (материков) и с тонкой (океанских впадин). Разогревание Земли сопровождалось выделением газов и водяных паров. Водяные пары конденсировались в воду морей и океанов, а газы образовали атмосферу, состав которой первоначально существенно отличался от современного. Состав современной земной атмосферы обусловлен существованием на Земле биосферы. В расплавленных недрах Земли генерируется ее магнитное поле.

Особенности распределения химических элементов в

Солнечной системе связаны с активностью молодого Солнца. Интенсивное коротковолновое излучение и солнечный ветер «выдули» легкие газы (водород и гелий) во внешние части протопланетного диска. При аккумуляции планет-гигантов происходил частичный захват этого газа. Уран и Нептун образовались к моменту, когда большая часть газа уже покинула Солнечную систему. Силикатный состав спутников Юпитера объясняется тем же механизмом «выдувания»: на стадии аккреции температура наружных слоев Юпитера достигала тысяч градусов, и прогрев окружающего вещества привел к потере газа.

На современном этапе Солнечная система является динамически устойчивой структурой.

При движении в Галактике Солнечная система может попадать в молекулярные облака. В эти эпохи (которые повторяются не чаще, чем 1 раз в 30 млн. лет) на Солнце и планеты происходит интенсивное выпадение космического вещества — метеоритов, кометоподобных тел и т. д. Все последствия подобного взаимодействия с Галактикой пока полностью не изучены. Возможно, что само рождение жизни на Земле связано с выпадением на ее поверхность органических соединений, которые имеются во всех известных молекулярных облаках. Эволюция этих соединений в поверхностных слоях молодой Земли могла привести к появлению самовоспроизводящихся биологических структур.

М. Д. Рукин,

кандидат геолого-минералогических наук

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

В этом разделе будут кратко изложены те современные представления о внутреннем строении Земли, которые к сегодняшнему времени считаются доказанными и устоявшимися. Наша Земля — это большой шар, чуть сплюснутый у полюсов за счет вращения вокруг своей оси, поэтому по форме приближающийся к эллипсоиду вращения. Выводы о сплюснутости Земли впервые были высказаны И. Ньютоном, а затем подтверждены работами многих ученых. Приплюснутость Земли у полю-

сов оказалась неодинаковой: северный полюс примерно на 30 м поднят выше южного, и это при среднем радиусе Земли, равном 6374 км. Много это или мало?

Относительно общих размеров Земли эта величина представляется ничтожно малой, но, оказывается, и эта малость держит Землю в постоянном внутреннем напряжении. Более точные измерения, проведенные с помощью современной космической аппаратуры, показали, что величина сплюснутости Земли определяется отношением $1/298,25$, что дает разницу диаметров экватора и полярного в 42,77 м.

С открытием закона всемирного тяготения была определена и масса нашей планеты — примерно $6 \cdot 10^{21}$ т. В 1600 г. впервые было показано, что Земля — это огромный магнит, создающий собственное магнитное поле. Палеомагнитные измерения, отнесенные к прошлым временам, доказали, что за последние сотни миллионов лет континенты совершали (и совершают в настоящее время) дрейф по земному шару; Америка и Евразия за это время «отъехали» друг от друга на тысячи километров. Исследование дрейфа континентов заставило ученых построить карты положения северного и южного магнитных полюсов в палеозоохи. Оказалось, что за исторически обозримый промежуток времени происходила неоднократная смена положений северного и южного магнитных полюсов на прямо противоположные (примерно 1 раз в миллион лет).

Магнитное поле Земли и его изменения во времени ставили перед учеными загадки одну за другой. Почему изменяется (уменьшается) напряженность магнитного поля? Как связан глубинный магнетизм Земли с вращением планеты? С чем связан «дрейф» магнитного поля Земли? Чтобы ответить на эти и ряд других вопросов, необходимо было выяснить источник магнитного поля Земли, что невозможно без изучения внутреннего ее строения.

Эти вопросы решает сейсмология — наука о прохождении сейсмических волн через слои земных недр к ее центру. Сейсмологи установили, что Земля имеет жидкое ядро, а в нем — другое — более плотное, видимо, металлическое. Это внутреннее ядро диаметром около 2500 км «плавает» внутри жидкого ядра, в результате перемещается магнитный центр, и магнитные полюса «блуждают» по поверхности Земли. Сопоставив пла-

вающее магнитное ядро Земли и ее вращение с работой гигантской динамо-машины, ученые пришли к выводу о наличии внутри Земли огромных «электрических» вихрей. А далее уже было нетрудно перейти к объяснению причин возникновения магнитного поля.

Разобравшись в природе земных электрических токов и магнитного поля Земли, удалось создать схему внутреннего строения земных недр, вплоть до ее центра. Было установлено, что земной шар состоит из оболочек, которые подразделяются на внешние и внутренние. К внешним, верхним оболочкам Земли относятся гидросфера, атмосфера, биосфера и выделенная в последнее время так называемая ноосфера, или сфера разума. Атмосфера Земли постепенно переходит в космическое пространство. Земная твердь состоит из трех главных оболочек: земной коры, мантии и ядра. Каждая оболочка твердой Земли отличается друг от друга как физическими свойствами, так и химическим составом.

Поверхность твердой земной коры покрыта чрезвычайно неровным рельефом — горными хребтами и равнинами на материках и крупными межконтинентальными впадинами, заполненными водой, — морями и океанами.

Твердая земная кора, условно обозначаемая буквой *A*, простирается на глубины до 33 км, характеризуется интервалом плотностей от 2,7 до 3,0 г/см³; от общего объема Земли она составляет примерно 1,6%, а от общей массы Земли всего 0,8% (примерно $5 \cdot 10^{19}$ т).

Мантия условно подразделяется на верхнюю (слой *B*) — от 33 до 400 км, переходную (слой *C*) — от 400 до 1000 км и нижнюю (слой *D*) — от 1000 до 2900 км.

Земное ядро подразделяется на внешнее (слой *E*) — от 2900 до 5000 км, границу между внешним и внутренним ядром (слой *F*) — от 5000 до 5100 км и внутреннее (слой *G*) — от 5100 до 6374 км.

Для всех слоев — внутренних оболочек Земли наблюдается повышение плотности и температуры с глубиной.

Земная кора

Земная кора — продукт геологического развития нашей планеты, динамически наиболее активный слой верхней части твердого тела Земли. Это арена деятельности геологических процессов с прямым и косвенным участием живого вещества планеты.

И. Вернадский

Под земной корой исследователи подразумевают верхний слой твердой Земли, находящийся между ее внешней поверхностью и границей, на которой отмечается резкий скачок скоростей сейсмических волн. Это граница была впервые обнаружена в 1909 г. югославским геофизиком Мохоровичичем и названа его именем — поверхностью Мохоровичича (поверхностью Мохо). Скорости продольных сейсмических волн на этой границе изменяются от 6,5—7,6 км/с до 8—8,3 км/с, поперечных — от 3,6—4,2 км/с до 4,4—4,7 км/с. Земная кора подразделяется на океаническую и континентальную. Это подразделение связывается с составом слагающих ее горных пород. Океаническая кора представлена обычно осадочными и базальтовыми породами, максимальная мощность ее 10 км; континентальная кора состоит из трех видов пород: осадочных, гранитных и базальтовых, максимальная мощность ее до 70 км.

В осевых зонах срединно-океанических хребтов, протягивающихся по дну океана и опоясывающих весь земной шар, океаническая кора наиболее близко приближается к поверхности. Это так называемые области молодой океанической коры. Процессы образования океанической коры в этих зонах продолжаются и в настоящее время. В качестве примера можно привести район Красного моря, по дну которого проходит рифтовая трещина. По этой трещине и сегодня происходит подъем базальтовых лав, «откладывание» их по бортам трещины и раздвижение дна Красного моря со скоростью примерно 1,5 см/год. Пройдет 20 млн. лет, и Красное море расширится на 300 км. Изучение образцов лав, поднятых в 1980 г. со дна Красного моря советской океано-логической экспедицией, показало, что это самые современные базальтовые породы мантийного вещества,

что процесс рождения нового океана и новой океанической коры продолжается и в настоящее время.

Таким образом, земная кора образовалась в результате частичного всплывания вещества из мантии и состоит в основном из магматических горных пород — базальтов и гранитов, которые кристаллизуются из алюмосиликатного расплава. При «излиянии» этого расплава на поверхность образуются эффузивные породы коры — базальты, при застывании на глубине — граниты и некоторые разновидности интрузивных пород. Изверженные породы под действием высоких температур и давления претерпевают структурные и механические изменения и образуют метаморфические горные породы, сложенные гнейсами и кристаллическими сланцами. Верхняя часть земной коры представлена прерывистым осадочным слоем — продуктами разрушения метаморфических и изверженных пород под воздействием экзогенных факторов.

По химическому составу земная кора (океаническая и континентальная) состоит преимущественно из оксидов кремния (примерно 55% общего веса), алюминия (примерно 15%), кальция (около 8%), железа (около 6%), магния (около 5%), на оксиды других элементов приходится около 11% общего веса коры. Таким образом, основную массу коры составляют всего 8 элементов (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, K), а самым главным элементом является кислород, составляющий почти половину всей ее массы. В звездах на все эти элементы приходится от 0,1 до 4% массы (причем, что очень важно, в тех же пропорциях), остальное — водород и гелий.

Кроме океанической и континентальной коры, выделяются переходные зоны земной коры соответственно с промежуточными свойствами. В земной коре происходят тектонические движения и изменения, обусловленные действием эндогенных и экзогенных факторов.

Ядро Земли

Внешний (жидкий) слой ядра расположен на глубинах от 2900 до 5000 км. Объем его составляет около 15,2%, а масса около 30% объема и массы Земли, плотности вещества колеблются от 10,2 до 12,0 г/см³, давление достигает величин от $1,5 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^6$ атм. Этот слой пропускает только продольные сейсмические вол-

ны, поэтому предполагают, что он находится в расплавленном состоянии. В целом для Земли характерны повышенные значения приливных колебаний поверхности (ежесуточные колебания земной оси), колебания полюсов относительно центра Земли с периодом 1,2 года и другие явления, не свойственные абсолютно твердому телу в форме шара, вращающегося вокруг неподвижной оси. Современные методы исследования внутреннего строения Земли не могут пока дать однозначную оценку состава и физической природы ядра, все высказанные выше соображения требуют дополнительного обоснования. Сейсмические данные косвенно подтверждают гипотезы о жидком состоянии внешнего ядра. Давление на границе ядра, как отмечено выше, достигает свыше миллиона атмосфер. Привлекая современные данные физики высоких давлений, космохимии, геофизики и геологии, вполне можно допустить, что внешнее ядро Земли сложено преимущественно жидким железом с примесями никеля и должно содержать до 15% легких элементов. Взяв эти данные за начальные условия, можно попытаться объяснить наблюдаемые экспериментально и получаемые теоретически физические свойства земного ядра. При образовании планеты первично однородное ее вещество, состоящее из железного расплава, за счет радиоактивного распада элементов и ряда других факторов эволюционного развития разогревалось до высоких температур, обогащалось серой и «стекло» к центру Земли под действием сил гравитации за счет высокой плотности и низкой вязкости. Таким образом, возможно, образовалось внешнее железо-сернистое ядро.

Переходный слой ядра расположен на глубинах от 5000 до 5140 км, масса его равна $7 \cdot 10^{19}$ т, плотности вещества колеблются от 12,5 до 13 г/см³, давление достигает $3,2 \cdot 10^6$ атм, скорости продольных сейсмических волн — от 10 до 11 км/с.

Внутренний слой ядра расположен на глубинах от 5140 до 6370 км, масса его равна $12 \cdot 10^{19}$ т (около 1,0% массы всей Земли), объем — около 0,7% объема Земли, плотности вещества колеблются от 13 до 13,5 г/см³, давление достигает $3,6 \cdot 10^6$ атм, скорость прохождения продольных сейсмических волн — от 11,1 до 11,4 км/с. Через внутреннее ядро проходят и поперечные волны со скоростью 3,6 км/с, что является кос-

венным свидетельством твердого состояния внутреннего слоя ядра, близкого к состоянию плавления.

Температура в центральной части ядра Земли достигает 6000 К, давление — 3,65 Мбар; на границе ядра и нижней мантии температура — 4300 К, давление — примерно 1,4 Мбар.

Атмосфера

Атмосфера — воздушная оболочка Земли — простирается до высот свыше 2000 км над поверхностью планеты. Ее разделяют на четыре самостоятельные (в смысле физических свойств) газовые оболочки:

а) Тропосфера — нижняя часть атмосферы, прилегающая к земной поверхности. Ее толщина — до 16—17 км на экваторе, до 10—11 км — в средних широтах и до 7—8 км — на полюсах. По массе она составляет примерно $\frac{3}{4}$ всей воздушной массы атмосферы и содержит практически весь водяной пар. Температурный режим тропосферы определяется температурой поверхности Земли, при этом формируются основные процессы, связанные с изменением климата. В верхних слоях тропосферы температура понижается до -60°C . В слое тропосферы активно происходят вертикальные и горизонтальные течения масс воздуха.

б) Стратосфера (гомосфера) — слой от верхней границы тропосферы до высот 80—85 км. Температура с подъемом сначала падает (примерно до -80°), затем повышается до $+50^{\circ}$ — 75° на высотах 55—60 км, а далее опять понижается до -50° — 75° у верхней границы стратосферы. Этот слой содержит большое количество озона, поглощающего ультрафиолетовую и длинноволновую части солнечной радиации. Именно этому свойству обязана современная высокоразвитая жизнь на Земле и им же объясняется повышение температуры на уровне озонового слоя до $+75^{\circ}$.

в) Ионосфера (термосфера) — слой от верхней границы стратосферы до высоты 800 км. Этот слой характеризуется повышенным содержанием ионов и свободных электронов, что, в свою очередь, объясняет особенности распространения радиоволн в ней. Образование ионов на высотах от 80—85 км до 400 км происходит под действием ультрафиолетовой, рентгеновской и кор-

пускулярной радиации Солнца. При усилении излучения Солнца заряженные частицы, попадающие в магнитное поле Земли, отклоняются в сторону высоких широт и вызывают полярные сияния — свечение газов атмосферы. Температура в ионосфере с подъемом вверх повышается и на высоте около 120 км равна примерно +150°C.

г) Экзосфера — слой от верхней границы ионосферы до 2000 км. Температуры в этом слое достигают 2000—3000°C, но газ настолько разрежен, что «почувствовать» столь высокие температуры практически невозможно.

Слои ионосферы и экзосферы объединяют иногда общим названием «гетеросфера».

Несколько слов о происхождении атмосферы. По представлениям ученых, она образовалась в результате выделения газов из лавовых потоков, «выливавшихся» на земную поверхность из верхней мантии Земли: водяных паров, углекислого газа, аммиака и др.

В момент формирования Земли из протопланетного облака все элементы будущей атмосферы находились в связанном виде в составе твердых веществ — в гидроксидах, нитридах и нитратах, в оксидах металлов, в графитах и карбонатах. Первичная атмосфера состояла, видимо, из небольших количеств азота, аммиака и инертных газов.

Остальные газы за счет высоких температур и соответственно скоростей их молекул рассеивались в космическое пространство еще на стадии образования планеты. В это время солнечные ультрафиолетовые лучи свободно достигали поверхности Земли. Под их воздействием происходило разложение воды и углекислого газа и образование свободных водорода и кислорода. Легкий водород улетучивался из атмосферы, а углерод вступал в химические соединения с горными породами земной коры. Развитие жизни на Земле и биогенные процессы способствовали образованию избытка кислорода, создавалась своеобразная кислородная подушка, препятствующая проникновению ультрафиолетовых лучей ниже озонового слоя.

Главные составляющие современной атмосферы: азот (78%), кислород (21%), аргон (0,9%), углекислый газ (0,03%) и пары воды (менее 0,1%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если считать, что с момента начала расширения Вселенной прошел всего один год (для этого масштаб времени надо уменьшить в 20 млрд. раз), то «календарь» памятных событий во Вселенной будет выглядеть так:

Начало года	Большой взрыв
Июнь	Возникновение галактик
Сентябрь	Возникновение Солнечной системы и образование Земли
Октябрь	Первые микроорганизмы
Ноябрь	Микробиотопы, производящие кислород. Фотосинтез
Начало декабря	Образование кислородной атмосферы
Середина декабря	Первые многоклеточные организмы
20.12	Возникновение беспозвоночных
26.12	Первые динозавры
27.12	Первые млекопитающие
28.12	Первые птицы
29.12	Вымирание динозавров
30.12	Первые приматы
31.12 около 14 ч	Появление рамапитека
около 22 ч 30 мин	Первые люди
около 23 ч 59 мин	Первые города
около 24 ч	Евклидова геометрия, архимедова физика
Новый год	
00 ч 00 мин 01 с	Введение нуля и десятичного счета
00 ч 00 мин 02 с	Эпоха Возрождения
00 ч 00 мин 03 с	Сегодня

В один из первых осенних «дней» Вселенной на окраине рядовой галактики, ничем не выделяющейся среди миллионов других, возник крохотный шарик, от наступающей «зимы» завернувшийся в тоненькую шубку живого и «осознавший» себя всего за полчаса до Нового года.

Песчинка в мировом пространстве — и огромный шар, удивительно сложно устроенный, динамичный «жи-

вой» организм. Четыре с половиной миллиарда лет плавают хрупкая и уникальная планета в необозримой Вселенной. Впереди — примерно столько же, если мы сэкономим нашу космическую колыбель. Сохранить ее — главная задача человечества.

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

Ненадежный спутник

У недавно открытого (в 1986 г.) вращающегося пульсара (нейтронной звезды), получившего наименование PSR 1957 + 20, обнаружен спутник. Дело в том, что сигнал от пульсара регулярно (через каждые 9 ч) на некоторое время исчезает. Естественное объяснение — вокруг него обращается некий «объект», периодически «затмеваящий» нейтронную звезду. Зная продолжительность этих затмений, массу пульсара (а по современным теориям массы пульсаров не превышают 1,4 массы Солнца), можно приблизительно определить размеры «спутника». Оказалось, что его диаметр в 1,5 раза больше солнечного, масса же спутника — порядка 3% массы Солнца.

Но, обладая столь малой массой, этот объект не может быть звездой, поскольку в нем не могут протекать термоядерные реакции. С другой стороны, планетой он тоже быть не должен — слишком он велик. Но быть может, нынешнее его состояние — это лишь этап эволюции, которую он прошел, начиная ... с чего?

Расстояние между центрами пульсара и спутника очень невелико — всего лишь примерно 2,4 диаметра Солнца. Такая близость спутника к нейтронной звезде «опасна» для него: внешние слои спутника постепенно «стягиваются» с него пульсаром. Механизм «раздевания» прост: пульсар своим излучением «разогревает» внешние слои соседа. Расширяясь, они уходят в межзвездное пространство, обнажая внутренние слои, которые, в свою очередь, постигает та же участь. В итоге масса спутника постепенно уменьшалась.

Чтобы решить, что же представлял собой этот объект первоначально, «нераздетый», надо установить природу газа, «утекающего» со спутника. Если он вначале был звездой малой массы (или массивной планетой), то этот газ должен состоять в основном из водорода. Если же он представлял собой массивную звезду, то в этом газе должны в заметном количестве присутствовать тяжелые элементы, поскольку водород уже успел «выгореть».

И хотя механизм нагрева спутника своим соседом еще требует объяснения (электромагнитное излучение, энергично испускаемое пульсаром, здесь «не проходит», так как оно в большой степени должно отражаться спутником), судьба спутника предreshена — через миллиард лет он «испарится» до конца, и пульсар останется в гордом одиночестве.

Пыль кометы Галлея

Знаменитая гипотеза так называемой панспермии Ф. Хойла и Ч. Викрамасинга не подтверждается результатами исследований частиц пыли кометы Галлея. С помощью масс-спектрометра, изготовленного в ФРГ и установленного на АМС «Вега-1», был изучен состав пылевых частиц, сталкивавшихся со специальной металлической мишенью на «Веге». Всего в «пыли» было обнаружено 17 химических элементов — от водорода до железа, кремния и магния.

«Обилие» большинства из них (13 и 17) оказалось таким же, как и в углистых хондритах — метеоритах, чей возраст сравним с возрастом Солнечной системы. Но содержание водорода, углерода, азота и кислорода в комете Галлея больше, чем в метеоритах, и распределение этих элементов по разным частицам пыли довольно разнообразно — одни из них были практически «водородными», другие состояли в основном из углерода, третьи — из кислорода. Никаких бактерий и вирусов в замороженном состоянии, которые должны находиться в пылинках согласно гипотезе панспермии, не обнаружено.

Комета Галлея — современник Солнечной системы. Поскольку комета (вернее, ее ядро) образовалась путем конденсации частиц межзвездной пыли и происходило это далеко от Солнца (соответственно и температура там была очень низкой), эти пылинки дожили до встречи с «Вегой», по существу, не изменившись. Практически из этих протопланетных частиц и образовалась наша Земля.

По материалам иностранных журналов и ТАСС.

Научно-популярное издание

ЗЕМЛЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Сборник

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *И. Г. Вирко*

Мл. редактор *С. С. Патрикеева*

Обложка художника *К. С. Гуреева*

Худож. редактор *К. А. Вечерин*

Технический редактор *Н. В. Клецкая*

Корректор *Л. В. Иванова*

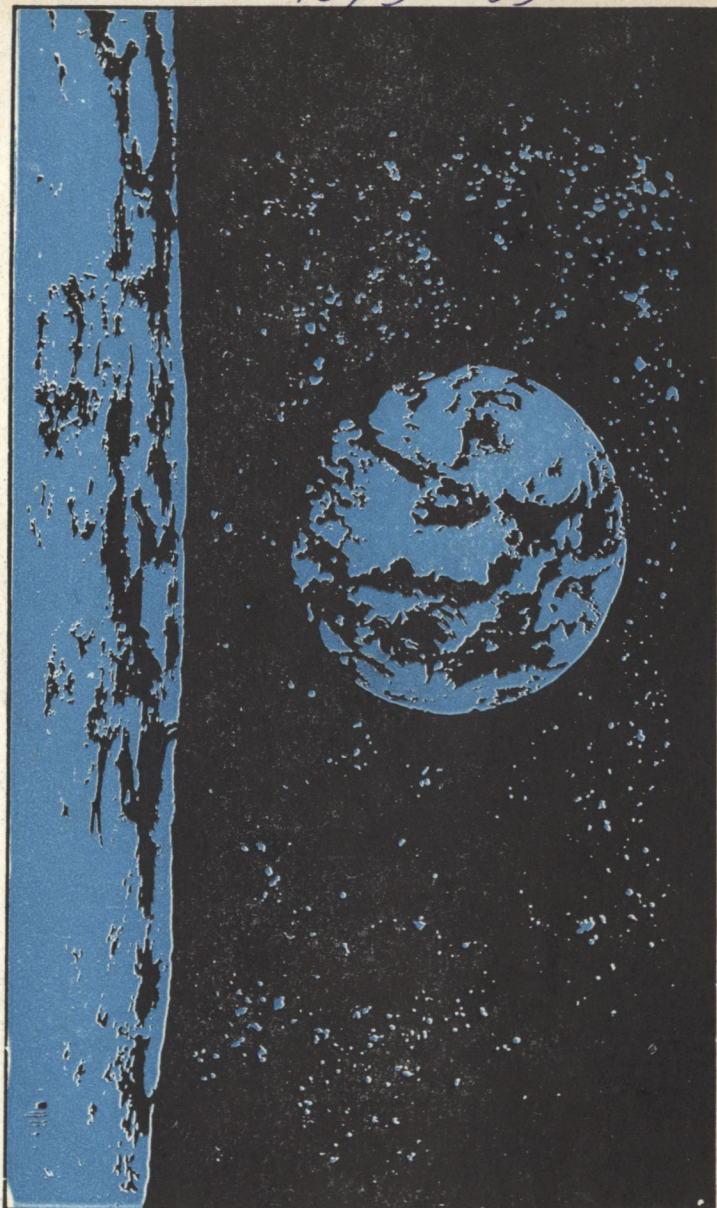
ИБ № 10069

Сдано в набор 14.10.88. Подписано к печати 12.12.88. Т 21590. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,49. Тираж 26 786 экз. Заказ 2007. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894201. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

15 коп.

15/3 - 189

Индекс 70101



СЕРИЯ

**КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**