Министерство просвещения РСФСР
ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П. И. ЛЕБЕДЕВА-ПОЛЯНСКОГО

Е. П. РАЗБИТНАЯ

ЛЕКЦИИ ПО АСТРОНОМИИ

(ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПЕДИНСТИТУТА)

ВЛАДИМИР
1968

ГЛАВА IV.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

I. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ

Главной задачей изучения планет является выяснение физических условий на них (температура, химический состав атмосферы, давление и др.). При исследовании планет используются различные методы: спектроскопия, фотометрия, поляриметрия, радиоастрономический и радиолокационный методы, непосредственное изучение с космических ракет (фотографирование, измерение магнитного поля и др.).

§ 38. Разделение планет на две группы

Приступая к характеристике физических свойств и особенностей тел нашей планетной системы, мы прежде всего рассмотрим еще одну закономерность солнечной системы (см. § 23) — разделение планет на две группы.

Большие планеты солнечной системы по целому ряду характеристик можно разделить на две группы: планеты земного типа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Сведения о Плутоне пока что недостаточны, чтобы уверенно отнести его к той или другой группе планет или выделить в особую группу.

Группы планет отличаются друг от друга размерами и массами (таблица 6, § 21; таблица 13, § 35), средними плотностями вещества (таблица 15), наличием и протяженностью атмосфер, скоростью вращения (таблица 7, § 23), числом спутников (таблица 15).

Планеты первой группы характеризуются малыми размерами и массами. Среди планет этой группы самой

большой ($d=12756$ *км*) и самой массивной ($m_з=5{,}9\cdot 10^{27}$ *г*) является Земля, затем идет Венера, которую можно назвать двойником Земли ($d=12240$ *км*, $m=0{,}81\ m_з$). Самая маленькая планета — Меркурий ($d=4840$ *км*). Для планет земной группы характерны большие значения средней плотности ρ вещества, которая определяется путем деления массы на ее объем $\rho=\frac{m}{V}$

Таблица 15

Планета	Средняя плотность (*г/см*³)	Число спутников
Меркурий	5,1	—
Венера	4,9	—
Земля	5,5	1
Марс	3,9	2
Юпитер	1,3	12
Сатурн	0,7	10
Уран	1,1	5
Нептун	2,3	2

У планет земного типа очень разреженные атмосферы, только у Венеры газовая оболочка настолько плотная, что сквозь нее совершенно не видна поверхность планеты. Особенностью планет земного типа является их очень медленное вращение вокруг своих осей. Из общего числа спутников солнечной системы (32) только три принадлежит планетам земной группы.

У планет-гигантов все названные характеристики имеют противоположные значения. Планеты этой группы отличаются большими размерами и массами (самая большая, $d=143600$ *км*, и самая массивная, $m=318{,}4\ m_з$, планета — Юпитер), малыми плотностями ($\rho<2{,}5$ *г/см*³), мощными атмосферами (наличием протяженных газовых оболочек объясняется малая плотность этих планет), быстрым вращением, большим числом спутников.

Разделение планет солнечной системы на две ярко выраженные группы является одной из важнейших космогонических характеристик и должно найти объяснение в любой гипотезе об образовании солнечной системы.

§ 39. Планета Земля

Мы живем на Земле и поэтому знаем о Земле намного больше, чем о других планетах, хотя и о Земле нам многое еще неизвестно.

Наша Земля как бы состоит из нескольких концентрических оболочек: *атмосферы* — газовой оболочки, *гидросферы* — жидкой оболочки (покрывает Землю неполностью) и *литосферы* — твердой оболочки. Атмосфера и литосфера в свою очередь делятся на ряд оболочек (сфер).

1. Литосфера (понятие о внутреннем строении Земли)

Исследованием внутреннего строения Земли (твердой части планеты) занимается целый ряд наук. Сейсмология — наука о землетрясениях — дает сведения о геометрическом строении Земли, геохимия — о химическом составе земных оболочек, тектоника — о влиянии недр на движения земной коры и др.

На основе изучения продольных и поперечных упругих волн (*сейсмических*), распространяющихся в теле Земли от очагов землетрясений, уже в 30-ые годы XX в. сложилось представление о четырехслойном строении Земли. Земля состоит как бы из четырех оболочек. Поверхностный слой до глубин порядка 40 *км* образует *кору* земного шара, далее идет промежуточная оболочка — *мантия*, нижняя граница которой проходит на глубине 2900 *км*. Внутренняя часть Земли называется *ядром*. Ядро делится на две области: внутреннее ядро (радиус около 1300 *км*) и внешнее ядро (радиус примерно 3400 *км*). Основные границы раздела земных оболочек (геосфер) находятся на глубине около 40 *км* — поверхность Мохоровичича[1] и на глубине 2900 *км* (рис. 64).

Каждая оболочка Земли в свою очередь имеет слоистое строение. Так, кора состоит из «гранитного» и «базальтового» слоев. «Гранитный» слой, лежащий под слоем осадочных пород или выходящий на поверхность, может быть исследован непосредственно, он действительно состоит в основном из гранитов. Название «базальтовый» более глубокому слою коры дано потому,

[1] Андрей Мохоровичич (1857—1936) — хорватский (Югославия) ученый.

что скорости сейсмических волн в нем близки к скоростям в базальте, определенным в лаборатории.

Установлено что земная кора имеет различную толщину (*мощность*) под океанами и на материках. Мощность континентальной коры составляет в среднем 35—40 *км*; кора океанического типа имеет значительно меньшую мощность (5—7 *км* в глубоководных частях океана) и частично или полностью лишена гранитного слоя.

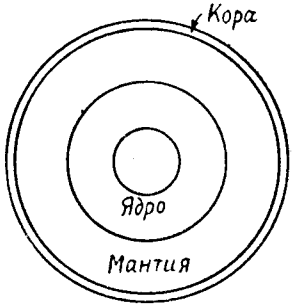

Рис. 64. Строение литосферы.

Сведений о мантии значительно меньше, чем о коре. В верхней мантии существует слой с пониженными скоростями распространения сейсмических волн — *волновод*. Этот слой лежит на глубинах около 50 *км* под океанами и 100—200 *км* под материками. Изучение этого слоя имеет важное значение, так как возможно, что с ним связаны тектонические и магматические процессы. Другие методы исследования (магнитно-теллурический метод, наблюдение над земными приливами, земным магнетизмом, геотермический метод и др.) подтверждают наличие в верхней мантии неоднородного и сложного по строению слоя и свидетельствуют о том, что все процессы на поверхности Земли (тектонические движения, землетрясения, вулканическая деятельность) являются отражением процессов, которые происходит в глубоких земных недрах.

По поводу нижней мантии имеется предположение, что она более или менее однородна по физическим свойствам.

Земное ядро начинается на глубине 2900 *км*. Предполагается, что внешнее ядро находится в жидком или очень пластичном состоянии; внутреннее ядро, лежащее глубже 5000 *км*, твердое. С земным ядром тесно связано проявление земного магнетизма. Вероятнее всего, что земной магнетизм обусловлен возникающими в жидкой оболочке ядра конвекционными течениями и вихревыми кольцеобразными движениями электронов.

Такие характеристики вещества внутри Земли, как: плотность, давление, температура и другие, — к сожале-

нию, могут быть получены лишь косвенными методами. Решение этих задач сопряжено с большими трудностями, однако имеются вполне уверенные представления о физических свойствах земных недр.

Средняя плотность вещества Земли составляет 5,5 *г/см*^{3}, а плотность поверхностных пород меньше 3 *г/см*^{3}. Это свидетельствует о возрастании плотности вещества с глубиной. Результаты сейсмических наблюдений и расчеты приводят к следующим выводам.

Плотность мантии с глубиной возрастает, достигая у границы ядра 5,2 *г/см*^{3}, здесь она скачком увеличивается до 9,4 *г/см*^{3}, а в центральной части ядра значение плотности должно находиться в пределах от 14,5 *г/см*^{3} до 18 *г/см*^{3}.

Расчеты давления внутри Земли на разных глубинах приводят к значениям порядка миллионов атмосфер в ядре. Так, на границе нижней мантии и ядра давление достигает 1300000 *атм*.

При спуске в шахты имеет место повышение температуры примерно на 20° на километр, но это изменение температуры относится к очень тонкому поверхностному слою коры мощностью в 5—6 *км*. Существование горячих источников (гейзеров) и извержение вулканов свидетельствуют о наличии высокой температуры внутри Земли порядка 1300° С. Считается однако, что такую температуру имеют лишь местные очаги в мантии, разогревающиеся под действием радиоактивного распада, так как мантия в целом находится в твердом состоянии. Можно считать, что у нижней границы мантии температура достигает 5000° К, а в центре ядра не превышает 10000° К.

Исключительный интерес представляет вопрос о химическом составе Земли. Непосредственно может быть определен химический состав поверхностных слоев и образцов вещества, выброшенных при вулканических извержениях. Эти исследования указывают на различие в химическом составе поверхностных и более глубоких слоев.

О химическом составе глубинных областей Земли существует два предположения. Согласно первому, различные слои Земли имеют разный химический состав. В соответствии с этой точкой зрения ядро должно состоять главным образом из железа и никеля как наиболее тяжелых элементов. Согласно второму предположению, химический состав Земли везде одинаков, но под действием возрастающих в центру Земли давлений его плотность и физические свойства изменяются. В настоящее время ни одной из этих точек зрения не отдается предпочтения.

Таким образом, наши знания даже о наиболее доступной для исследования оболочке Земли — земной коре — в настоящее время еще крайне недостаточны. Поэтому проблема внутреннего строения земного шара по предложению советских ученых в 1960 г. превратилась в интернациональную проблему, которая изучается сейчас почти 50 странами по общей программе под названием «Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры». В рамках этого проекта в числе прочих методов исследования четыре страны (СССР, США, Канада, Япония) выдвинули планы бурения скважин с целью изучения состава и строения земной коры на разной глубине и достижения верхней мантии.

Самая глубокая из существующих в настоящее время шахт имеет глубину 3670 *м* (южная Африка), из нее добывают золото. Самая глубокая скважина была пробурена в США в 1958 г. Ее глубина 7724 *м*. В СССР глубина бурения превысила 6 тыс. метров. Специалисты считают, что современное оборудование позволит достигнуть глубин 8—10 тыс. метров. Для *сверхглубокого* бурения (более 10 тыс. метров) необходимо создать новое оборудование. В настоящее время существует два проекта сверхглубокого бурения — советский и американский.

Советский проект предусматривает бурение на материке для выяснения состава гранитного и отчасти базальтового слоев земной коры (а возможно, скважина достигнет и верхней мантии) в два этапа. На первом этапе намечено пробурить несколько скважин глубиной в 7 тыс. метров. Первая такая скважина была заложена в 1961 году в центральной части Прикаспийской низменности близ озера Арал — Сор, а вторая скважина — в 1964 г. близ Баку. Ее глубина в середине 1966 г. достигала уже 5 тыс. метров. На втором этапе предполагается достигнуть глубины в 15 тыс. метров. Строительство такой скважины выдвигает массу сложнейших задач технического характера.

В США проект вскрытия верхней мантии получил название «Проект Мохол». Этим проектом предусматривается пробурить земную кору под дном океана и выяснить ее основные свойства и состав вещества. Первые скважины были пробурены в 1961 г. в Тихом океане в районе островов Клиппертон и Гваделупа у побережья Калифорнии при глубине воды в 940 *м* и 3500 *м*. Достигли горных пород на глубине 320 *м* ниже дна океана. Исследование поднятых на поверхность образцов базальтов изменило некоторые представления о строении земной коры. В настоящее время ведется подготовка к осуществению второй фазы «Проекта Мохол».

2. Атмосфера

Все планеты солнечной системы, за исключением Меркурия, у которого атмосфера практически отсутствует, имеют газовые оболочки, поэтому изучение земной атмосферы способствует исследованию вопроса об атмосферах других планет. Большое количество сведений о земной атмосфере, особенно ее верхних слоях и прилегающем межпланетном пространстве получено за последнее десятилетие с помощью ракет и искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Атмосфера Земли простирается до высоты примерно в 3000 *км*, но не имеет четко выраженной границы, она постепенно переходит в межпланетное пространство. Общая масса атмосферы оценивается в $5{,}3 \cdot 10^{21}$ *г*, что в миллион раз меньше массы Земли.

По различным физическим свойствам (химический состав, плотность, температура, скорость и направление ветра и т. д.) земная атмосфера неоднородна. Так, плотность нижних слоев настолько больше плотности верхних слоев, что в прилегающем к поверхности Земли пятикилометровом слое сосредоточена половина массы всей атмосферы. На разных высотах различная температура. В соответствии с изменением температуры при увеличении высоты атмосфера разделяется на ряд оболочек (таблица 16).

Тропосфера, самый нижний слой атмосферы, процессы в котором определяют погоду на Земле, обладает совершенно особенными физическими свойствами, отличающими ее от других слоев: в ней сосредоточено больше половины всей массы атмосферы и почти весь водяной пар. Температура в тропосфере понижается с высотой в среднем на 6 *град/км*. Быстрое падение температуры в тропосфере объясняется тем, что тропосфера нагревается за счет инфракрасного излучения земной поверхности, которое сильно поглощается водяным паром. В тропосфере имеет место и конвективный перенос тепла от поверхности Земли.

Таблица 16

Название оболочки	Высота нижней границы (*км*)	Высота верхней границы (*км*)	Название переходного слоя между оболочками	Характер изменения температуры
Тропосфера	Поверхность Земли	8—17	Тропопауза	Понижается
Стратосфера	Тропопауза	50—60	Стратопауза	Возрастает от 220°К до 270°К
Мезосфера	50—60	80	Мезопауза	Понижается до 200—180°К
Термосфера	80	700—800	Термопауза	Повышается до 1500°К на высоте около 400 *км*, далее не меняется
Экзосфера	800	2000		Повышается незначительно

Стратосфера бедна водяным паром, поэтому инфракрасное излучение, идущее от земной поверхности, практически не поглощается в ней. В результате в нижних частях стратосферы температура не меняется ($T = 220°$ К), а начиная с высоты 20—25 *км* медленно повышается за счет выделения тепла в экзотермической фотохимической реакции разложения озона $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ под действием поглощения ультрафиолетового излучения Солнца, достигая на высоте 50—60 *км* значения в 270° К. Последние исследования показывают, что в стратосфере происходит интенсивная циркуляция воздушных масс как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

В *мезосфере* температура понижается до 200—180° К на высоте около 80 *км*.

В *термосфере*, начиная с высоты 80—110 *км*, имеет место разогрев атмосферы, который продолжается до высоты 400 *км*, где достигается температура около 1500° К. Выше атмосфера изотермична. Разогрев на высотах 80—110 *км* обусловлен выделением тепла в фотохимических реакциях разложения кислорода под действием коротковолнового излучения Солнца ($O_2 + h\nu \to O + O$), для больших высот этот механизм разогрева оказывается уже недостаточным. Возможно, одной из причин разогрева являются электроны из радиационных поясов Земли.

Для верхних слоев атмосферы характерна интенсивная циркуляция вещества, о которой многое еще неизвестно.

Наиболее интересной особенностью атмосферы, начиная с высоты в 60 *км*, т. е. с мезосферы, является ионизация ее частиц, которая происходит под действием коротковолнового и корпускулярного излучения Солнца. Другими словами, начиная с мезосферы атмосфера представляет собою ионизованный газ — плазму (*ионосфера*).

Выше 800 *км* находится самый внешний слой земной атмосферы, который постепенно переходит в *геокорону*, простирающуюся на расстояние до 20 000 *км*.

Химический состав атмосферы изучен достаточно хорошо. Близ поверхности основными компонентами являются молекулярный азот N_2 (78%), молекулярный кислород O_2 (21%), углекислый газ CO_2 (0,03%), аргон (0,93%). Присутствуют также неон, гелий, криптон, ксенон, метан. Важной составляющей атмосферы является водяной пар H_2O, количество которого изменяется в пределах до 2%.

С ростом высоты состав атмосферы меняется. На высотах 400—500 *км* атмосфера состоит уже в основном из кислорода, а на высоте в 1000 *км* вместо азотно-кислородной становится водородно-гелиевой, геокорона имеет водородный состав. С высотой значительно изменяется концентрация частиц. Так, на уровне моря концентрация молекул составляет $2 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$, на высоте 700—800 *км* концентрация положительных ионов кислорода и азота — $1{,}6 \cdot 10^5$ *см*$^{-3}$, а в геокороне: на высоте 2000—15 000 *км* ионная концентрация — 10^3 *см*$^{-3}$, на высоте 20 000 *км* она уже меньше 10^2 *см*$^{-3}$.

3. Плазма и ее взаимодействие с магнитными полями

Здесь нам придется сделать небольшое отступление, чтобы рассказать о взаимодействии плазмы с магнитными полями.

Многие небесные тела: Солнце, звезды, некоторые планеты — обладают магнитными полями; протяженные магнитные поля существуют в Галактике и Метагалактике.

В космосе в большинстве случаев вещество находится в состоянии плазмы (Солнце, звезды, верхняя атмосфера и радиационные пояса Земли).

Взаимодействие плазмы с магнитными полями составляет предмет исследования космической электродинамики, одной из основных задач которой является объяснение солнечной активности (§ 54), проявляющейся, в частности, во влиянии Солнца на Землю.

Плазма, представляющая собой газ в состоянии частичной или полной ионизации, который в целом нейтрален, характеризуется высокой электропроводностью. При наличии электрического поля напряженности $\vec{E}$ ионы плазмы с зарядом e испытывают действие силы $e\vec{E}$, в плазме возникает электрический ток.

В магнитном поле напряженности $\vec{H}$ на заряженную частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$, действует сила

$$\vec{F}_1 = \frac{e}{c}[\vec{v} \times \vec{H}],$$

которая в каждой точке перпендикулярна направлению движения иона и напряженности поля (рис. 65*а*). На этом рисунке показано направление силы для положительного иона. Если заряд иона отрицательный, то сила имеет противоположное направление. Численное значение этой силы равно

$$F_1 = \frac{e}{c} vH \sin(\widehat{\vec{v}\vec{H}}).$$

Другими словами, при движении иона вдоль поля сила, действующая на него, равна нулю, а при движении

иона поперек поля она достигает наибольшего значения. В последнем случае в однородном магнитном поле ион движется по окружности радиуса r

$$r = \frac{m_i v c}{e\mathrm{H}},$$

где m_i — масса иона.

Если вектор скорости $\vec{v}$ иона не направлен вдоль поля $\vec{\mathrm{H}}$, то его можно разложить на две составляющие:

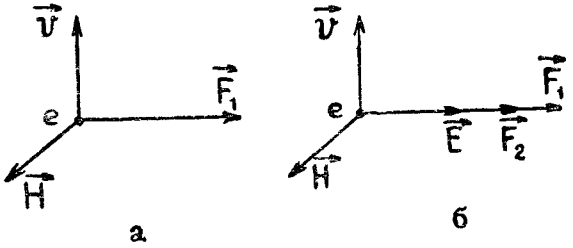

Рис. 65. Направление силы, действующей на ион e в магнитном поле (a). Направление сил, действующих на ион в магнитном и электрическом полях, когда $\vec{v} \perp \vec{\mathrm{H}}$ и $\vec{\mathrm{E}} \perp \vec{\mathrm{H}}$ (b).

вдоль поля $\vec{v}_{\mathrm{H}}$ и поперек поля $\vec{v}_{\perp}$. В этом случае в однородном магнитном поле ион движется по окружности радиуса $\frac{mv_{\perp}c}{e\mathrm{H}}$ и одновременно равномерно перемещается вдоль силовой линии со скоростью v_{H}, т. е. описывает винтовую линию, осью которой является силовая линия магнитного поля.

Если к действию магнитного поля добавляется действие электрического поля, то движение иона изменяется. При $\vec{\mathrm{E}} \uparrow\uparrow \vec{\mathrm{H}}$, $v_{\perp}$ остается постоянной, а v_{H} растет: ион навивается на магнитную силовую линию по винтовой линии с увеличивающимся шагом.

Так как магнитное поле не изменяет скорости v_{H}, то можно рассматривать только $v_{\perp}$, т. е. считать, что $\vec{v} \perp \vec{\mathrm{H}}$. В этом случае для $\vec{\mathrm{E}} \perp \vec{\mathrm{H}}$ (рис. 65*б*) ион описывает окружность в плоскости, перпендикулярной к направлению $\vec{\mathrm{H}}$,

и одновременно перемещается в этой плоскости (движется по циклоиде). Движение иона, вызванное в данном случае электрическим полем и происходящее в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению действующей силы ($\vec{\mathrm{F}}_2 = e\vec{\mathrm{E}}$), называется *дрейфом*. Скорость $\vec{u}$ дрейфа иона определяется формулой

$$\vec{u} = \frac{c}{\mathrm{H}^2}[\vec{\mathrm{E}} \times \vec{\mathrm{H}}]$$

и для любых ионов одна и та же (не зависит от заряда и массы ионов). Поэтому в случае разреженной плазмы (ионы совершают достаточное число оборотов по окружностям за время свободного пробега) все частицы ее будут двигаться в среднем с одной скоростью $\vec{u}$ (скорости движения ионов по окружностям зависят от их массы), и электрического тока в ней ($\vec{\mathrm{E}} \perp \vec{\mathrm{H}}$) не возникнет.

Дрейф ионов в магнитном поле возникает и тогда, когда на ионы действует не только электрическая сила ($e\vec{\mathrm{E}}$), а любая другая сила $\vec{f}$, например, сила тяжести, сила давления (лишь бы она не была направлена вдоль магнитного поля), но в этом случае скорости дрейфа разных ионов будут различны и по величине, и по направлению

$$\vec{u} = \frac{c}{\mathrm{H}^2 e_i}[\vec{f} \times \vec{\mathrm{H}}].$$

Дрейф частиц и электрический ток возникают в плазме с неоднородным магнитным полем.

В переменном магнитном поле индуцируется электродвижущая сила, которая приводит к появлению электрического тока в плазме. Последний в свою очередь вызывает противодействующее магнитное поле.

Выделим в космической плазме замкнутый контур L, связанный с частицами плазмы, по которому циркулирует ток, создающий напряженность $\vec{\mathrm{E}}$. Тогда на основании уравнения Максвелла (закона индукции): циркуляция вектора электрической напряженности E по замкнутому контуру L пропорциональна скорости изменения

магнитного потока Φ через поверхность S, опирающуюся на этот контур, — запишем

$$\oint \mathrm{E}\,dl = -\frac{1}{c}\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_{\mathrm{S}} \mathrm{H}_n\,d\mathrm{S},$$

где dl — элемент замкнутого контура, $d\mathrm{S}$ — элемент поверхности, опирающейся на этот контур, H_n — напряженность магнитного поля вдоль нормали n к выбранному элементу поверхности. При возможных перемещениях плазмы выделенный контур деформируется, в результате чего магнитный поток Φ все время изменяется, даже если магнитное поле остается неизменным, что приводит к возникновению тока в контуре. Возникающий ток вызывает свое магнитное поле, которое нейтрализует изменение магнитного потока, вызвавшего появление электрического тока в контуре. Если деформация контура повлечет за собой уменьшение тока в контуре, то ток в нем будет поддержан самоиндукцией. Вследствие больших размеров космических объектов поля в них затухают очень медленно. Все это приводит к тому, что в космических полях магнитный поток через любой замкнутый проводящий контур остается неизменным

$$\frac{d}{dt}\int_{\mathrm{S}} \mathrm{H}_n\,d\mathrm{S} = 0.$$

Это положение в астрофизике называется теоремой о *вмороженности магнитных силовых линий в плазму.* Она означает, что магнитные силовые трубки, представляющие собой пучки магнитных силовых линий, густота которых пропорциональна напряженности H, навсегда связаны с теми частицами плазмы, через которые они проходили в некоторый начальный момент; другими словами, движущаяся плазма переносит с собой магнитное поле.

При движении плазмы в магнитном поле на нее со стороны магнитного поля действует сила. Составляющая этой силы вдоль силовых линий может быть уподоблена силе натяжения, ее значение равно $\frac{\mathrm{H}^2}{4\pi}$ (на 1 *см*^{2}), а составляющая в направлении, перпендикулярном к полю, по действию равноценна силе давления. Давление этой

силы равно плотности энергии магнитного поля $\frac{\mathrm{H}^2}{8\pi}$, оно проявляется при всяком нарушении равномерного распределения силовых линий, т. е. при любом поперечном движении плазмы.

Когда плазма перемещается поперек магнитного поля, магнитные силовые линии или сгущаются, поле усиливается (при сжатии плазмы), или разрежаются, поле ослабевает (при расширении плазмы). При этом со стороны поля на плазму действует сила, препятствующая такому движению: магнитные силовые трубки стремятся выпрямиться (их можно сравнить с натянутыми упругими нитями).

Движение частиц плазмы подчиняется газовым законам. Действие магнитного поля становится эффективным лишь при выполнении следующего условия. Пока плотность энергии магнитного поля $\frac{\mathrm{H}^2}{8\pi}$ меньше кинетической энергии единицы объема вещества плазмы $\frac{1}{2}\rho\bar{v}^2$, где ρ — плотность, а $\bar{v}$ — средняя гидродинамическая скорость плазменного газа, движение плазмы подчиняется газовым законам. При $\frac{\mathrm{H}^2}{8\pi} > \frac{1}{2}\rho\bar{v}^2$ плазма подчиняется законам движения в магнитном поле. Плазма при выполнении этого условия может двигаться только в направлении поля и практически лишена возможности перемещаться поперек поля.

При сложном перемешивании плазменных масс, магнитные силовые линии, вмороженные в них, сильно запутываются, вытягиваются; все это в конце концов приводит к возрастанию напряженности магнитного поля, которое в дальнейшем препятствует таким движениям плазмы и даже способствует «распутыванию» магнитных силовых линий, т. е. уменьшает напряженность поля.

Нарушения плотности плазмы приводят к образованию упругих колебаний в ней и распространению звуковых волн. Скорость звука v_1 в газе определяется условием

$$v_1^2 = \frac{c_\mathrm{p}}{c_\mathrm{V}}\frac{\mathrm{RT}}{\mu},$$

где c_p, c_V — теплоемкости газа, μ — молекулярный вес,

R — универсальная газовая постоянная. Так, для слабо ионизованного водорода

$$v_1 \approx 120\sqrt{T}\ м/сек.$$

Другой вид волн в плазме получил название магнито-гидродинамических (волны Альфвена). Эти волны порождаются боковыми перемещениями магнитных силовых линий. К выводу о существовании таких волн можно придти, в частности, рассматривая магнитные силовые трубки как натянутые упругие нити, в которых возникают поперечные колебания. В однородном магнитном поле H_0 скорость v_A распространения магнитно-гидродинамических волн равна

$$v_A = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho}}.$$

Скорость магнитно-гидродинамических волн значительно меньше скорости v_1 звуковых волн. Только при больших разрежениях вещества и в очень сильных магнитных полях v_A может достигнуть значения звуковой скорости или превзойти ее. Это происходит, когда волны, распространяясь, попадают в менее плотную среду. В этом случае они превращаются в ударные волны (ударными называются волны, скорость которых превосходит скорость звуковых волн) с очень большой диссипацией энергии (энергия волны переходит в другие виды энергии, например, идет на нагревание окружающей среды).

В плазме распространяются электромагнитные волны. По своей физической природе они ничем не отличаются от волн в пустоте, но распространение их в плазме имеет некоторые особенности, в частности, распространение радиоволн. Этот вопрос мы не будем здесь рассматривать[1].

Еще один вид колебаний имеет место в плазме. Это колебания, связанные с разделением электрических зарядов. Электрическое поле, вызванное этим разделением зарядов стремится его уничтожить. При этом возникают колебания плазмы. Причина таких колебаний, возникающих, в частности, в атмосфере Солнца, пока не ясна.

[1] См. В. В. Железняков, Радиоизлучение Солнца и планет, «Наука», М., 1964, стр. 253.

3. Магнитосфера и радиационные пояса

Земля в окружающем пространстве создает магнитное поле, напряженность которого на ее поверхности не превышает 1э.

Еще совсем недавно считали, что магнитное поле Земли можно представить в виде поля воображаемого магнитного диполя, помещенного в центре Земли (рис. 66), хотя последнее и не совсем точно совпадает с полем Земли. Если бы магнитное поле Земли не было подвержено никаким возмущениям, оно простиралось бы далеко от Земли, постепенно ослабевая. Ось магнитного диполя, называемая *геомагнитной,* пересекается с поверхностью Земли в *геомагнитных полюсах.* Координаты северного геомагнитного полюса: $\varphi = 78°,6$, $\lambda = 289°,9$. Действительные магнитные полюса Земли не совпадают с геомагнитными. Так, положение северного магнитного полюса определяется координатами: $\varphi = 70°,5$, $\lambda = 264°,5$. Кроме того, он дрейфует по поверхности со скоростью 5—6 *км* в год.

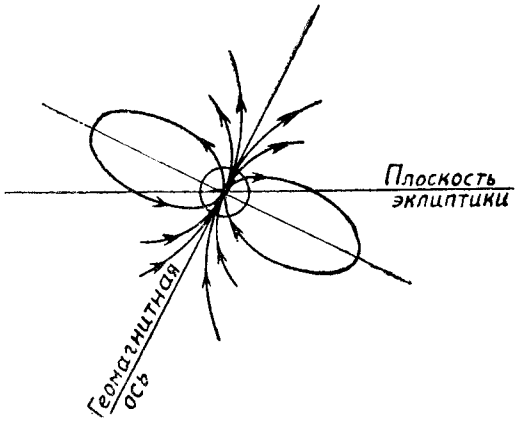

Рис. 66. Невозмущенное магнитное поле Земли.

Непосредственные измерения напряженности магнитного поля в окрестностях Земли, осуществленные с помощью ИСЗ и космических ракет, изменили наши взгляды на магнитное поле Земли. Оказывается, под действи-

ем различных факторов нарисованная выше картина геомагнитного поля искажается. Магнитное поле Земли напоминает вытянутую каплю с длинным хвостом (рис. 67). Другими словами, магнитное поле Земли не имеет бесконечной протяженности, оно занимает ограниченную область пространства, которая называется *магнитосферой*. Граничный слой магнитосферы называется *магни-*

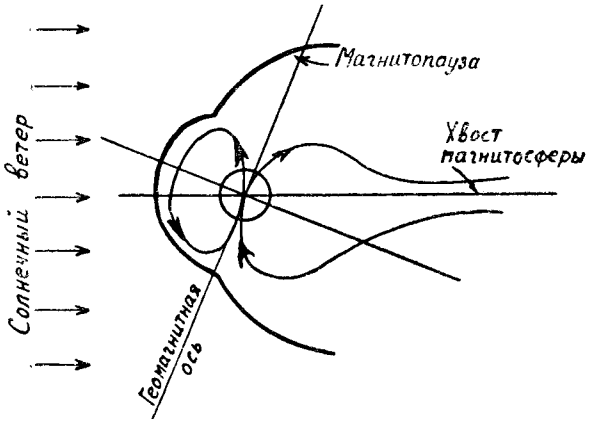

Рис. 67. Магнитосфера.

топаузой. Основным фактором влияющим на магнитное поле Земли является «солнечный ветер», т. е. непрерывный поток заряженных частиц, летящих от Солнца. «Солнечный ветер» сдвигает магнитное поле к Земле на освещенной стороне Земли и наиболее сильно в плоскости эклиптики. На освещенной стороне Земли магнитосфера простирается на расстояние до 10 радиусов Земли, по «бокам» (вблизи утреннего и вечернего меридианов) несколько больше; хвост должен тянуться на расстояние в несколько десятков земных радиусов или даже быть незамкнутым. За пределами магнитосферы имеется слабое межпланетное магнитное поле, возникновение которого обязано «солнечному ветру»: заряженные частицы — солнечная плазма — несут его с собой. Его напряженность составляет 5—10 *гамм* (1 *гамма* $=10^{-5}$ эрстеда). Перед магнитопаузой напряженность поля возрастает примерно до 50 *гамм*.

Геомагнитное поле оказывает сильное влияние на

заряженные частицы, пронизывающие межпланетное пространство близ Земли. Это космические лучи, т. е. электроны, протоны и ядра других элементов, приходящие из Галактики и от Солнца, и частицы солнечных корпускулярных потоков (§ 54, 7). Оказывается, магнитное поле Земли представляет собою как бы ловушку заряженных частиц.

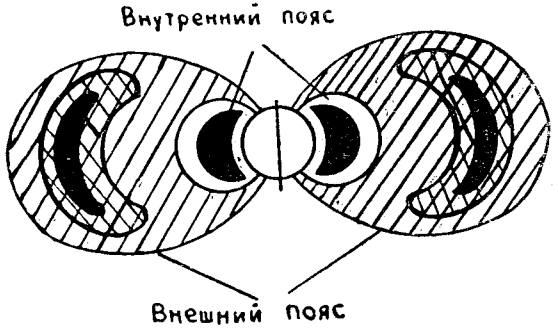

Рис. 68. Схема радиационных поясов Земли.

В 1958 г. с помощью советских и американских спутников были открыты в окрестностях Земли скопления заряженных частиц, которые в виде колец охватывают Землю вокруг геомагнитного экватора. Эти кольца получили название *радиационных поясов*[1]. Различают внутренний и внешний радиационные поясы. Их схематическое расположение показано на рис. 68. Внутренний пояс начинается на высоте 1500—1600 *км* над восточным полушарием Земли и на высоте около 600 *км* над западным полушарием и простирается до 9000 *км*. Он ограничен геомагнитной широтой $\pm 45°$. Состоит в основном из протонов с энергией порядка 10^8 *эв*[2]. Считается, что протоны, захваченные магнитным полем Земли и удерживаемые им в области радиационного пояса, обязаны своим происхождением β-распаду нейтронов, рождающихся в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей.

[1] Честь открытия радиационных поясов принадлежат американскому исследователю Дж. Ван-Аллену и советским ученым С. Н. Вернову, А. Е. Чудакову и др.

[2] 1 *эв* $=1{,}60 \cdot 10^{-12}$ *эрг*.

Нейтрон, так как он не имеет заряда, может свободно двигаться в области магнитного поля Земли, но как только он распадается на протон и электрон (период полураспада нейтрона 12 *мин*), обе эти частицы оказываются «захваченными» Землею, потому что каждая из них может двигаться только по винтовой линии, заключенной между магнитными силовыми линиями, ограничивающими поле, способное удержать частицу данной энергии. В тех местах поля, где силовые линии сходятся, шаг винтовой траектории частицы становится все меньше, наконец, частица отражается от силовых линий и движется в обратном направлении, не имея возможности выбраться из магнитной «ловушки».

Внешний пояс начинается на расстоянии в 20 000 *км* (за геокороной) и тянется до высот порядка 50 000 *км*. Он занимает область над геомагнитным экватором в пределах $\pm 65°$. Состоит из электронов с энергией от десятков килоэлектрон-вольт до миллионов электрон-вольт. Есть основания предполагать, что вокруг Земли симметрично плоскости геомагнитного экватора имеется сплошная область заряженных частиц, которая простирается до расстояний порядка 200 000 *км*, а радиационные пояса являются местами наибольшей концентрации их. Так, электроны с энергией меньше 100 *кэв* встречаются и в пространстве между поясами.

Считается, что электроны и протоны внешнего пояса захватываются магнитным полем Земли из солнечных корпускулярных потоков, когда они прорываются в магнитную ловушку во время магнитной бури. Корпускулярные потоки от Солнца, связанные с хромосферными вспышками, представляют собою быстродвижущуюся плазму. Магнитное поле Земли тормозит движение этой плазмы, в результате чего поток корпускул деформирует магнитное поле, т. е. вызывает его возмущения — магнитные бури. В такие моменты отдельные частицы могут оказаться захваченными магнитным полем Земли и пополнить внешний радиационный пояс. Механизм наполнения внешнего пояса частицами до конца не ясен.

Радиационные пояса могут образоваться только около планеты, обладающей магнитным полем. Поэтому наличие или отсутствие радиационных поясов у какой-либо планеты позволяет сделать заключение об ее магнитном поле. С помощью космических ракет не было обна-

ружено радиационных поясов у Луны. Значит, Луна не обладает магнитным полем и, стало быть, не должна иметь внутри себя плотного ядра. Непосредственные измерения напряженности магнитного поля близ Луны подтвердили его отсутствие. У Марса и у Венеры радиационных поясов тоже нет, так как эти планеты практически не имеют магнитного поля. Более массивные планеты Юпитер и Сатурн окружены магнитными полями, поэтому около них могут быть области заряженных частиц.

Еще очень многие вопросы геофизики остаются неясными. Возможно, отдельные представления изменятся. И все же о Земле мы знаем значительно больше, чем о других планетах. Это очень важно при изучении физической природы планет.

§ 40. Планеты земной группы

1. Меркурий

Меркурий, самая малая планета земной группы, находится в наиболее неблагоприятных для наблюдений условиях, потому что не отходит от Солнца больше, чем на 28°, и бывает в наибольшем удалении непродолжительное время, так как обращается вокруг Солнца всего за 88 дней. До недавнего времени считалось, что период вращения Меркурия равен периоду его обращения. Дело в том, что поверхность Меркурия представляется равномерно яркой и только некоторые исследователи (например, Дж. Скиапарелли, Е. Антониади) различали на ней слабые оттенки яркости, т. е. что-то вроде пятен, на основании чего и сделали вывод о равенстве периодов (о синхронном вращении планеты). Радиолокационное исследование Меркурия (1965 г.) привело к выводу, что его период вращения составляет около 59 средних солнечных суток. После этого были переработаны результаты визуальных наблюдений Меркурия за 1924—1950 гг., которые, как оказалось, удовлетворяют не только значению периода вращения в 88 дней, но и в $(58{,}4 \pm 0{,}4)$ суток, что хорошо согласуется с результатом радиолокационных измерений. Меркурианские сутки, т. е. промежуток времени между двумя восходами Солнца, сос-

тавляют около 200 земных суток. Ось вращения Меркурия, видимо, почти перпендикулярна к плоскости его движения, что значит, что смена времен года на этой планете практически отсутствует.

Среднее значение температуры Меркурия, полученное путем радиометрических измерений инфракрасного излучения планеты, в подсолнечной точке составляет 613° К, а на неосвещенной стороне — 203° К (для среднего расстояния от Солнца). Радиоастрономические наблюдения (прием радиоизлучения планеты) на сантиметровых волнах дали для яркостной температуры в подсолнечной точке диска планеты 600° К (что хорошо согласуется с температурой, определенной по инфракрасному излучению) и на неосвещенной стороне 150° К. При синхронном вращении планеты и при отсутствии около нее атмосферы на неосвещенной стороне устанавливалась бы крайне низкая температура, и интенсивность радиоизлучения была бы очень незначительной, особенно близ нижнего соединения. Не исключено, что достаточно высокая температура на неосвещенной стороне Меркурия объясняется наличием около него атмосферы. Очень долго считалось, что у Меркурия нет атмосферы. В последнее время обнаружено наличие очень незначительной атмосферы, состоящей, видимо, полностью из углекислого газа.

2. Венера

Венера самая близкая к нам (может приближаться к Земле на расстояние до 40 млн. *км*) и самая таинственная из планет. Лишь в последние годы начали выясняться физические условия на ней. Особенно много сведений об этой планете получено в результате спуска на ее поверхность научной лаборатории «Венера —4».

Венера окружена плотной атмосферой, открытой в 1761 г. М. В. Ломоносовым. Атмосфера планеты настолько плотна, что через нее не только не разглядывается что-либо на поверхности, но даже неизвестен радиус твердой части Венеры[1]. Однако в отдельных случаях удается увидеть и сфотографировать слабые

[1] Радиоастрономические наблюдения приводят к значению (6060±55) *км*.

пятна, более темные, чем остальная планета. Так как эти пятна в общем сохраняют свои положения, то есть основания считать их деталями твердой поверхности планеты, скрытой мощным слоем газовых облаков. Кроме газов в верхних слоях атмосферы присутствуют твердые пылевые частицы — аэрозоли.

Отсутствие постоянных деталей на диске Венеры не позволяло уверенно определить ее период вращения. Попытки определить период вращения по спектру также не увенчались успехом. Только радиолокационные измерения дали возможность решить эту задачу (СССР и США). Оказалось, что Венера вращается в обратном направлении за (247±5) земных суток. Ось вращения составляет с плоскостью орбиты угол близкий к 90° (84°±2°, 1964 г.), поэтому ярко выраженной смены времен года на Венере нет. Сутки там продолжаются около 120 наших суток.

Исследования спектра планеты показали, что в атмосфере Венеры содержится в большом количестве углекислый газ, но относительное содержание его не было определено. Попытки обнаружить полосы поглощения кислорода и водяного пара в спектре Венеры долгое время не давали положительных результатов. Кислород был уверенно найден В. К. Прокофьевым и Н. Н. Петровой (Крымская астрофизическая обсерватория), а водяной пар — Дж. Стронгом (США) и О. Дольфюсом (Франция) лишь в 1964 г. Наши представления о химическом составе венерианской атмосферы уточнила межпланетная станция «Венера—4» 18 октября 1967 г. Оказалось, что на высоте 23—26 *км* основной компонентой атмосферы Венеры является углекислый газ, который составляет не меньше 90—95% всего ее состава. Присутствует кислород (0,4%) и водяной пар (вместе с кислородом около 1,6%).

До полета «Венеры —4» предполагалось, что основой атмосферы планеты является азот (по аналогии с земной атмосферой), количество которого оценивалось в 80—90%, хотя азот в спектре отождествлен не был. Анализаторы, установленные на «Венере —4» и имевшие чувствительность 7%, не зарегистрировали присутствия азота.

Температура Венеры неоднократно измерялась как в оптическом, так и в радиодиапазоне. В зависимости

от длины волны, в которой производилось измерение, результаты получались разные. Температуры, измеренные разными методами в инфракрасной области спектра (λ 8—13 *мк*), близки друг к другу и имеют значение от 215 до 250° К как на дневной, так и на ночной стороне планеты. Эти значения температуры относятся к самым верхним облачным слоям атмосферы Венеры[1]. Температуры, измеренные радиоастрономическими методами, заметно отличаются от температуры в инфракрасной области, при этом выявляется зависимость: чем больше длина волны, тем больше температура. Так, яркостная температура на λ8 *мм* составляет около 400° К, а в области от λ3 *см* до λ21 *см* уже возрастает до 600° К. Одно из возможных объяснений этих данных сводится к следующему. Атмосфера Венеры (подобно земной атмосфере) пропускает сантиметровые и дециметровые радиоволны, поэтому их источником можно считать твердую поверхность планеты, тогда температура 600° К является температурой поверхности Венеры. Миллиметровые волны от поверхности планеты могут поглощаться молекулами атмосферы, поэтому радиоизлучение, соответствующее температуре 400° К приходит с некоторой высоты в атмосфере, где температура ниже, чем на поверхности. Выводы о горячей поверхности планеты подтвердили эксперимент, выполненный на «Венере—4». «Венера—4» впервые в истории науки непосредственно измерила температуру и давление не на Земле, а на другом небесном теле. Температура поверхности Венеры оказалась действительно высокой (280° С = 553° К), а давление 15—22 *атм*. Таким образом, физические условия на поверхности Венеры очень суровы: сильная жара и огромное давление.

Высокую температуру поверхности можно объяснить на основе «парникового эффекта» атмосферы. Эта гипотеза предполагает: во-первых, что атмосфера Венеры является прозрачной для солнечного излучения и что излучение, прошедшее через атмосферу, поглощается поверхностью планеты; во-вторых, что нижние слои атмосферы непрозрачны для собственного теплового

[1] Во время пролета американского корабля «Маринер—2» (1962 г.) близ Венеры была измерена интенсивность инфракрасного излучения на λ 8,4 *мк* и λ 10,4 *мк*. Эти измерения тоже дали 240° К с ошибкой ±10%.

излучения планеты с $\lambda > 2{,}5$ *мк*. При таких условиях поглощение солнечного тепла приводит к разогреву поверхности Венеры.

Мы уже отмечали, что Венера не имеет магнитного поля и радиационных поясов. Первые оценки магнитного поля были сделаны с американского космического корабля «Маринер—2» в 1962 г. с расстояния в 34650 *км*. Тогда было установлено, что дипольное магнитное поле Венеры не превышает одной десятой поля Земли. «Венера—4» на расстояниях в несколько сот километров от поверхности Венеры не обнаружила магнитного поля. Или Венера совсем не обладает магнитным полем, или оно очень незначительно. «Венера—4» не показала увеличения концентрации заряженных частиц с приближением к планете, т. е. около Венеры нет радиационных поясов.

3. Марс

Марс — ближайшая к Земле после Венеры планета. Во время великих противостояний расстояние между Марсом и Землей может уменьшаться до 56 млн. *км*

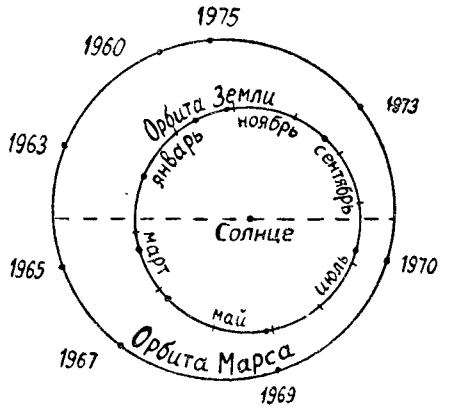

Рис. 69. Противостояния Марса.

(рис. 69). Планета Марс вторая по величине в группе планет земного типа. Ее поперечник составляет примерно половину диаметра Земли, а по массе она в 9 раз меньше нашей планеты.

На поверхности Марса имеется большое количество деталей, которые хорошо изучены. Многим из них даны

специальные названия, составлены карты поверхности Марса. Благодаря этому хрошо известно вращение Марса. Период вращения вокруг оси измерен с большой точностью (24ч 22см 6). Ось Марса наклонена к плоскости его орбиты под углом 65°12′, почти так же, как у Земли. Поэтому на Марсе, как и на Земле, происходит смена времен года, только каждое время года продолжается там почти в два раза дольше, чем у нас: марсианский год содержит 687 земных суток.

Большая часть поверхности Марса занята яркими областями красноватого цвета, которые называются *материками* (континентами). Темные пятна серого или зеленоватого оттенка были названы *морями* (более мелкие темные пятна называются озерами и оазисами). Вокруг полюсов расположены наиболее заметные детали марсианской поверхности — белые полярные шапки.

В 1877 г. итальянский исследователь Джованни Скиапарелли (1835—1910) открыл на Марсе сеть тонких, приблизительно прямых линий, пересекающих поверхность планеты в различных направлениях, и назвал их *каналами*. Обнаружение каналов породило гипотезы о заселенности Марса разумными существами, которым приписывалась постройка каналов как ирригационной системы. Это открытие во многом способствовало усилению изучения Марса.

Красно-оранжевые материки Марса, видимо, представляют собою области, похожие на земные пустыни, т. е. пыльные или песчаные поверхности, хотя относительно природы вещества, покрывающего их, пока нет единой точки зрения. Благодаря тому, что красные пятна занимают большую часть поверхности планеты (около $^5/_6$). Марс представляется нам в виде красноватого светила. Материки не подвержены изменениям яркости и цвета.

Природа темных пятен — морей, озер, оазисов — до сих пор не установлена. Но именно эти области служили и служат источником различных споров. Одна из самых интересных точек зрения, предполагающая, что на Марсе есть растительность, связана с ними.

Особенностью морей является сезонное изменение их размеров и цвета. В том полушарии, где начинается весна, размеры полярной шапки уменьшаются (бывают случаи, когда «шапка» совсем пропадает), а вокруг шапки образуется темная полоса, которая как бы продвигается за отступающей к полюсу шапкой, постепенно увеличиваясь в размерах. Темные пятна вблизи полюса заметно становятся темнее, приобретают коричневый оттенок. Постепенно темнеют и пятна, расположенные ближе к экватору. Летом цвет экваториальных пятен достигает большей яркости, а темные пятна близ полюсов блекнут. Осенью полярная область закрывается дымкой, моря светлеют и становятся менее заметными. Зимой полярная шапка достигает наибольших размеров, а моря делаются наиболее светлыми. Возможно, что сезонное потемнение пятен связано с циркуляцией воды в атмосфере.

В 1947 г. советский астроном Гавриил Андриянович Тихов (1875—1960) начал разрабатывать гипотезу о растительной природе морей. Основным методом исследования было изучение спектральных отражательных свойств растений, произрастающих в различных климатических областях Земли, и сравнение их со свойствами марсианских морей. Работы Г. А. Тихова приобрели широкую известность. В истории исследования Марса было время, когда считалось установленным, что моря — это более влажные области Марса, покрытые растительностью. Если это действительно так, сезонные изменения морей получают простое объяснение.

В спектрах марсианских морей не было обнаружено полос хлорофилла (В. Слайфер, 1924; В. Г. Тихов, 1947), отсутствует также характерное для высших растений увеличение отражательной способности в инфракрасной области (Дж. Койпер), но Г. А. Тихов нашел, что в спектрах отражения растений, живущих в суровых условиях тундры или высокогорий, отражение инфракрасных лучей сильно ослабевает, а низшие растения (мхи, лишайники, грибы) вообще не отражают инфракрасного излучения. В частности, в спектре отражения лишайника имеется характерная полоса поглощения λ 3,43 *мк*. У. Синтон в 1959 г. нашел в спектре морей Марса три полосы поглощения (λ 3,43, 3,56; 3,67 *мк*), которых в спектре материков нет. Долгое время эти полосы (полосы Синтона) считались реальными и служили веским доводом в пользу гипотезы о наличии низших растений в морях Марса. Но в 1963 г. Синтон усомнился в реальности этих полос и отказался от своего

открытия. Необходимы новые исследования спектров Марса, чтобы сделать окончательный вывод о растительности на нем.

В пользу существования растений на Марсе, кроме сезонного изменения вида темных областей, свидетельствуют следующие явления:

1. Способность темных пятен восстанавливать свою форму и цвет после пылевых бурь, которые наблюдаются в атмосфере Марса и после которых пятна иногда совсем исчезают.

2. Синевато-зеленоватые оттенки темных пятен.

3. Сезонные изменения поляризации.

Имеются попытки объяснить особенности марсианских морей и другими путями.

Полярные шапки Марса — самые заметные образования на его поверхности (их увидел впервые Д. Кассини).

Наблюдатель, находящийся далеко за пределами нашей планеты тоже увидел бы подобные шапки. Полярные шапки Земли претерпевают сезонные изменения своих размеров: летом они меньше, зимой больше. Спектральные и поляризационные исследования полярных шапок Марса показывают, что шапки состоят из замерзшей воды в форме инея или снега, причем по толщине слой очень незначительный. Вполне возможно, что над этим слоем в атмосфере взвешен туман из ледяных кристалликов.

Быстрое исчезновение шапок весной скорее всего представляет собою сублимацию, а не таяние. Темная кайма, которая образуется в это время вокруг шапки, видимо, является полосой увлажненного грунта, но не полосой жидкой воды. Как мы уже отмечали, исчезновение шапок тесно связано с потемнением морей.

Перед тем как совсем исчезнуть, полярная шапка обычно распадается на ряд светлых пятен, положение которых остается неизменным. Это можно объяснить неровностями на поверхности планеты в полярных областях: в более возвышенных районах «таяние» задерживается из-за более низкой температуры. Таковы горы Митчелла близ южного полюса Марса на широте —73°.

Относительно природы марсианских каналов велись долгие дискуссии и споры. Дж. Скиапарелли и П. Ловелл видели их прямыми и считали, что если это не искусственные сооружения, то полосы растительности.

Е. Антониади утверждал, что никаких каналов нет, что такое впечатление создается какими-то естественными образованиями в коре Марса, находящимися на пределе видимости.

В июле 1965 г. американский космический корабль «Маринер-4» сфотографировал Марс с расстояния 12000—17000 *км*. На фотографиях «Маринера» ничего, что могло бы быть отождествлено с каналами, не имеется. Однако это не значит, что каналов вообще нет. Область Марса, полученная на снимках, не велика, поэтому на ней просто могли не оказаться цепочки темных пятен, воспринимаемые с Земли в виде прямых линий — каналов.

Поверхность Марса до последнего времени предполагалась достаточно гладкой. С Земли нельзя увидеть какие-либо неровности на Марсе, поэтому высказывались лишь предположения, что неровности (марсианские горы) не больше 1 *км*. Фотографии, полученные межпланетной станцией «Маринер-4», показали, что поверхность Марса очень напоминает поверхность Луны. На ней имеются кольцевые горы и горные области. На снимках обнаружено больше 200 кратеров, причем кратеры одинаково часто встречаются и в морях и на материках. Диаметры кольцевых гор от 3 до 180 *км*. Если допустить, что кратеры имеются на всей поверхности Марса, то общее число их должно достигать 20000, так как «Маринер-4» сфотографировал примерно 1% поверхности планеты. Высота валов над уровнем дна кратеров, по оценкам американских ученых, составляет не больше километра и лишь в одном случае достигает 4 *км*. Валы многих кратеров полуразрушены, у отдельных кратеров отсутствует большая часть их, имеются кратеры совсем без валов — кратеры-ямки. Такие особенности кольцевых гор на Марсе, видимо, можно объяснить процессами, подобными выветриванию на Земле.

Марс окружен заметной, хотя и очень прозрачной, атмосферой, в которой наблюдаются белые и желтые облака. Желтые облака иногда покрывают значительные области поверхности Марса и, вероятно, представляют собою пылевые бури, поднятые ветрами. Белые облака, видимо, состоят из кристаллов льда.

Спектрескопические исследования химического состава марсианской атмосферы увенчались успехом совсем недавно. В 1947 г. Дж. Койпер впервые получил спектры в инфракрасной области и обнаружил углекислый газ. Количество углекислого газа по различным оценкам составляет от 5 до 50%. Кислород O_2 не обнаружен до сих пор. Оценен лишь верхний предел его содержания — меньше 0,001—0,0005 общего количества кислорода O_2 в земной атмосфере. Спектроскопические поиски водяного пара насчитывают более 50 лет. Он был открыт в 1963 г. группой американских исследователей и О. Дольфюсом, но количественные оценки водяного пара, сделанные ими, очень сильно отличаются друг от друга. Большего доверия заслуживает оценка американских ученых, в таком случае количество водяного пара в атмосфере Марса заключено в пределах 0,0010—0,0035 от его количества в земной атмосфере. Таким образом, до настоящего времени не ясно, что является основой марсианской атмосферы. Есть предположения, что это может быть либо азот, либо аргон. Однако после установления «Венерой-4», что в атмосфере Венеры азота нет, вполне возможно, что основой атмосферы Марса тоже является углекислый газ.

Давление на поверхности Марса неоднократно оценивалось наземными методами в предположении о различном содержании в атмосфере углекислого газа и азота или аргона. Из измерений, полученных на «Маринере-4», были сделаны оценки давления, а также температуры близ поверхности Марса в предположении о большом (100% или 80%) содержании углекислого газа. Сопоставление всех имеющихся данных приводит к выводу, что наиболее вероятное значение давления у поверхности составляет 0,01 *атм*.

Большая часть сведений о температуре поверхности Марса была получена путем измерения его инфракрасного излучения в диапазоне λ 8—14 *мк*. Эти измерения показали, что в течение марсианских суток даже на экваторе температура сильно изменяется (таблица 17), хотя днем поднимается выше 20° С.

Таблица 17[1]

Местное время	Июль 1954 г.							
	7ч	8ч	9ч	10ч	11ч	12ч	13ч	14ч
Температура °К	213	235	259	276	289	294	294	285

[1] Таблица взята из книги Дж. Брандта и П. Ходжа Астрофизика солнечной системы, «Мир», М., 1967, стр. 387.

Температура подсолнечной точки в перигелии составляет 300° К, в афелии 273° К. На полюсах температура низкая и равна примерно 200° К. Яркостные температуры, оцененные по радиоизлучению различными исследователями, имеют более низкие значения (примерно 200° К). По-видимому, это излучение исходит от некоторого уровня под поверхностью планеты, где формируется излучение и где температура имеет постоянное значение. Температуры, полученные по результатам «Маринера-4», у поверхности составляют (180 ± 20)° К и (240 ± 20)° К в моменты захода и восхода аппарата при предположении 100-процентного содержания в атмосфере углекислого газа.

«Маринер-4» не обнаружил близ Марса ни магнитного поля, ни радиационных поясов.

У Марса имеется два спутника — Фобос и Деймос. Они были открыты Асафом Холлом в 1877 г. Это самые маленькие спутники в солнечной системе. Особенность Фобоса — его период обращения (7ч39м), который меньше периода вращения планеты. В результате каждые 5ч,5 Фобос восходит на западе и заходит на востоке, хотя является прямым спутником.

§ 41. Планеты-гиганты

Планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) изучены значительно хуже, чем планеты земной группы. Прежде всего это связано с большими расстояниями, на которых находятся эти планеты. Вторая трудность объясняется отсутствием планеты сравнения, так как планеты-гиганты коренным образом отличаются от Земли.

Все планеты-гиганты имеют мощные атмосферы, глубина которых очень велика. Вполне возможно, что толщина газового слоя составляет заметную долю радиуса планеты. Так как все планеты быстро вращаются, то все они заметно сжаты к экватору. Так, у Юпитера экваториальное сжатие составляет $\varepsilon=0{,}06$, что соответствует разнице между экваториальным и полярным радиусами почти в 4000 *км*. Наличие мощных газовых обо-

лочек приводит к зависимости периодов вращения от широты планеты: экваториальные области вращаются быстрее. Например, у Юпитера период вращения на экваторе, $\varphi = \pm 5°$, равен $9^ч50^м$, а в области широт от 10° до 45° — $9^ч45^м$. Объясняется это тем обстоятельством, что все детали, наблюдаемые на диске планеты, принадлежат ее облачным слоям, а не находятся на твердой поверхности.

Спектры планет-гигантов представляют собой отраженный солнечный спектр с наложенными на него полосами поглощения. Некоторые из этих полос поглощения присутствуют в спектрах всех четырех планет, некоторые только в спектре Юпитера. Основным компонентом атмосфер является водород H_2 и метан CH_4. В атмосфере Юпитера содержится также аммиак NH_3 и, видимо, гелий, определенный не по линиям в спектре, а косвенными методами. В спектрах Сатурна, Урана и Нептуна полос аммиака нет, зато полосы метана усиливаются при переходе от Юпитера к более далеким планетам.

1. Юпитер

Юпитер изучен лучше остальных планет этой группы. На его диске имеются темные красноватые полосы. Светлые промежутки между ними называются зонами. Наиболее заметны полосы, параллельные экватору. Полосы несколько изменяются с течением времени, но в общем сохраняются. Они представляют собой облачные образования в атмосфере. Заметной деталью на диске Юпитера является большое овальной формы красноватое пятно, постоянно наблюдающееся. Оно так и называется — Большое Красное пятно. Его размеры 10 000—40 000 *км*. Установлено, что пятно движется по долготе (дрейфует) относительно соседних деталей; это приводит к изменению его периода вращения (в пределах 12^c). До сих пор нет удовлетворительного объяснения всех явлений, связанных с Красным пятном.

В атмосфере Юпитера содержится водород H_2, аммиак NH_3, метан CH_4. Малая средняя плотность Юпитера позволяет считать, что в основном атмосфера этой планеты состоит из водорода и гелия.

Инфракрасная яркостная температура Юпитера, измеренная в окне прозрачности земной атмосферы λ 8—14 *мк*, составляет 130° К. Эта температура относится к верхним слоям атмосферы, расположенным выше слоев аммиака, так как аммиак сильно поглощает инфракрасное излучение. Температура, измеренная по радиоизлучению на λ 3 *см* составляет 160° К, т. е. близка к температуре облачного слоя. Но температура, измеренная на более длинных волнах, оказалось, быстро возрастает с ростом длины волны и составляет на λ 10,3 *см* от 315° К до 640° К, на λ 21 *см* — примерно 3000° К, на λ 31 *см* — 5500° К, а на λ 68 *см* — 50 000° К. Радиоизлучение Юпитера поляризовано до 30%. Кроме того, были проведены оценки угловых размеров радиоисточников. На волне λ 3 *см* размеры радиоисточника совпадают с размерами Юпитера, а на дециметровых волнах источник радиоизлучения больше диска планеты. Он вытянут вдоль плоскости экватора в обе стороны от планеты. Было сделано заключение, что излучение Юпитера в области λ 6—70 *см* не является тепловым [1]. Спокойный характер излучения в дециметровом диапазоне свидетельствует, что это излучение является магнито-тормозным излучением, т. е. радиоизлучением релятивистских электронов, испытывающих торможение в магнитных полях. Возникло представление, что Юпитер обладает радиационными поясами заряженных частиц, которые удерживаются около него магнитным полем.

Юпитер является еще источником декаметрового спорадического излучения, обнаруженного в 1955 г. американскими радиоастрономами. Оказалось, что на частотах меньших 30 *Мгц* ($\lambda > 10$ *м*), Юпитер является самым мощным после Солнца источником этого радиоизлучения. Излучение имеет характер всплесков, которые как бы исходят из двух мощных источников на диске Юпитера. Вопрос о происхождении этого вида радиоизлучения пока окончательно не решен.

2. Сатурн, Уран, Нептун

Сведений об этих планетах очень мало. Все они окружены густыми атмосферами, подобными атмосфере

[1] Самый распространенный механизм радиоизлучения — тепловой. Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны всех длин, в том числе и радиоволны. Обнаруженное радиоизлучение планет и Луны является в основном тепловом радиоизлучением.

Юпитера, но имеющими более низкие температуры. По этой причине в их спектрах отсутствуют полосы поглощения аммиака (изредка они наблюдаются лишь в спектре Сатурна): аммиак весь заморожен.

Инфракрасная температура внешних частей, определяемая в диапазоне λ 8—14 *мк*, измерена лишь для Сатурна и составляет 80—90° К. Для Урана и Нептуна инфракрасную температуру пока не удалось измерить, так как их тепловое излучение ничтожно.

Радиоизлучение Сатурна на λ 1,5—21 *см* дает температуры большие, чем инфракрасные. Но растет температура с ростом длины волны λ медленнее, чем в случае Юпитера. Возможно, Сатурн также является источником нетеплового излучения. Что касается магнитного поля и радиационных поясов около Сатурна, то есть данные, говорящие о поляризации радиоизлучения на некоторых длинах волн, что служит доказательством наличия магнитного поля около планеты.

Для Урана получены значения яркостной температуры на λ 6 *см* 100° К, на λ 11,3 *см* — 128° К. Это высокие температуры, так как теоретические оценки эффективной температуры приводят к значениям около 60° К.

Детали на диске планеты различаются лишь у Сатурна. Они напоминают полосы Юпитера, но только более слабые. Кроме того, время от времени на диске Сатурна появляются светлые и темные пятна. По этим пятнам был определен период вращения Сатурна: для экватора он равен $10^{ч}\,14^{м}$, для средних широт $10^{ч}\,38^{м}$, ближе к полюсам больше $11^{ч}$. Вращение Сатурна легко наблюдается и спектроскопически.

Скорость и направление вращения Урана и Нептуна из-за отсутствия каких-либо деталей на их дисках определяются только фотометрически и спектроскопически.

Уникальной особенностью Сатурна является его кольцо (рис. 70). Оно имеет сложное строение и состоит, по крайней мере, из трех отдельных колец, как бы вложенных одно в другое: внешнее кольцо, среднее кольцо, внутреннее (креповое) кольцо. Самое яркое среднее кольцо, оно отделено от внешнего темным промежутком — щелью Кассини, а от внутреннего — делением Энке. Внутренний край кольца проходит на расстоянии в 11 000 *км* от поверхности Сатурна (его радиус 60 000 *км*), причем вполне возможно, как это видно на

снимках в ультрафиолетовом свете, что оно может простираться до самой планеты. Самая внешняя граница кольца резкая, она имеет радиус 138 000 *км*. Общая ширина кольца составляет 70 000 *км*, а его толщина примерно 20 *км*. Поскольку кольца Сатурна расположены в плоскости его экватора, то иногда мы смотрим на них

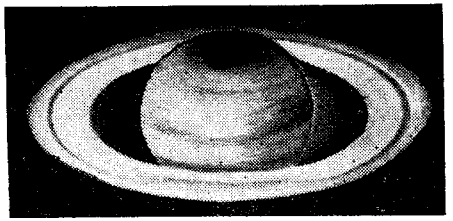

Рис. 70. Сатурн.

с ребра. В это время из-за своей тонкости кольца не наблюдаются.

Кольца Сатурна представляют собой рой отдельных частиц и глыб, каждая из которых движется как самостоятельный спутник в соответствии с законами Кеплера. Это было доказано спектроскопически еще в конце прошлого века (А. А. Белопольский, Дж. Килер, Х. Деландр). Размеры тел, образующих кольца, от нескольких сантиметров (и меньше) до нескольких метров. Спектроскопические исследования приводят к выводу, что они могут быть покрыты снегом.

3. Плутон

О Плутоне мы имеем совсем мало данных. По возмущениям в движении Нептуна и Урана определена его масса, полученное значение близко к значению массы Земли. Радиус, оцененный по наблюдению покрытия Плутоном звезды, оказался $0'',125 \pm 0'',008$, что показывает, что диаметр планеты не превышает (4400 ± 950) *км*. Из этих данных вытекает очень большое значение средней плотности Плутона[1], поэтому можно предположить, что масса Плутона должна быть меньше. Оценки С. В. Козловской приводят к значению в 0,027

[1] Для диаметра 5700—5800 *км*, полученного Дж. Койпером, плотность более 50 *г/см*^{3}!

массы Земли, при этом средняя плотность составляет 3,6 $г/см^3$.

§ 42. Луна

1. Общие сведения

Среди спутников солнечной системы Луна, безусловно, представляет для нас наибольший интерес. Связано это в первую очередь с тем, что Луна, самое близкое к Земле небесное тело.

При исследовании Луны широко применяются всевозможные методы современной науки: визуальные, фотометрические, поляризационные, радиоастрономические, радиолокационные, непосредственное изучение с помощью космических ракет и др.

Как мы уже отмечали (§§ 23, 25), по размерам и массе Луна относится к числу наиболее крупных спутников солнечной системы. Поперечник Луны составляет 3476 *км*, а масса — $^1/_{81,3}$ массы Земли. Ускорение силы тяжести на Луне $g_л = f\frac{m_л}{R_л^2} = 162$ *см/сек*^{2}, что примерно в 6 раз меньше ускорение силы тяжести на Земле. Параболическая скорость (скорость улетучивания) на лунной поверхности равна $v_{пар.л} = \sqrt{\frac{2fm_л}{R_л}} = \sqrt{2g_л R_л} =$ $= 2{,}38$ *км/сек*, т. е. в 4,6 раза меньше, чем параболическая скорость для поверхности Земли. При наличии малой силы тяжести и малой параболической скорости условия посадки и обратного взлета космического корабля на Луне в общем проще, чем, скажем, на более массивном Марсе. Луна характеризуется значительно меньшей средней плотностью (3,3 $г/см^3$), чем Земля (5,5 $г/см^3$). Этот факт свидетельствует об отсутствии у Луны тяжелого центрального ядра, что подтверждается также отсутствием около Луны магнитного поля и радиационных поясов (по измерениям с помощью космических ракет).

Так как период вращения Луны равен периоду ее обращения вокруг Земли, то Луна всегда повернута к

Земле одной и той же стороной. Из-за либрации[1] Луны мы видим несколько больше, чем половину всей ее поверхности (59%), но только благодаря запускам космических ракет человеку теперь известна и обратная сторона Луны. Первые фотографии невидимой с Земли лунной поверхности были получены еще в октябре 1959 г. советской межпланетной станцией «Луна-3». Это, кстати, были вообще первые фотографии, сделанные из космоса. Фотографирование обратной стороны Луны завершила в июле 1965 г. автоматическая станция «Зонд-3». Таким образом, к настоящему времени доступна для обозрения и исследования вся поверхность нашего спутника.

2. Детали поверхности

Видимая с Земли поверхность Луны (рис. 71) хорошо изучена. На картах Луны отмечается огромное количество различных деталей. Даже невооруженным глазом на диске нашего спутника видны темные пятна.

Номенклатура названий различных образований на Луне была введена первыми исследователями ее: Яном Гевелием (1647 г.) и Джованни Риччиоли (1651 г.), составившими и первые карты Луны.

Наиболее заметные детали лунной поверхности — темные пятна были названы *морями* (рис. 72). Моря получили фантастические названия: Океан Бурь, Море Дождей, Ясности, Влажности, Холода, Кризисов, Залив Жаров, Болото Туманов, Озеро Сновидений и т. д. Крупных морей насчитывается примерно два десятка. Они имеют округлую форму с поперечниками 500—700 *км*, а диаметр самого большого Моря Дождей составляет даже 1000 *км*. Моря представляют собой низменные равнины. На видимой стороне Луны они занимают около 40% площади. Обширные светлые части лунной поверхности представляют собою гористые области. Самыми многочисленными и заметными образованиями на

[1] В каждый данный момент с Земли видна ровно половина лунной поверхности, но так как Луна вращается равномерно, а движется вокруг Земли по эллипсу неравномерно, то это позволяет в течение месяца «заглянуть» и за ее восточный, и за ее западный край. Это либрация по долготе.

Либрация по широте позволяет «заглянуть» за северный и южный полюсы Луны. См., например, П. И. Бакулин и др., Курс общей астрономии, «Наука», М., 1966, стр. 173.

Луне являются кольцевые горы — *цирки*, или *кратеры* (рис. 73, 38). Только на видимой стороне Луны насчитывается около 30 000 кратеров диаметром более 1 *км*. Цирк представляет собою большую круглую равнину (дно), окаймленную кольцевым горным хребтом (ва-

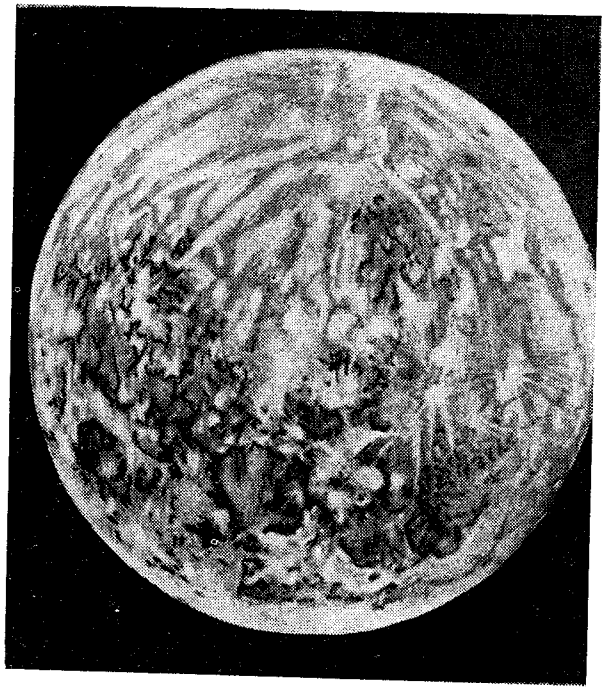

Рис. 71. Луна в полнолуние.

лом). Диаметры крупных цирков составляют 50—200 *км*, а самые большие кратеры (Байи и О. Струве) имеют поперечники вала больше 250 *км*. Высота валов достигает 5 *км*. Некоторые цирки имеют темное дно и в таких случаях в какой-то степени похожи на моря, тем более, что отдельные моря тоже частично окаймлены горами. Как правило, дно цирка расположено ниже окружающей поверхности. Но имеются и другие примеры. Так, цирк Варгентин до краев вала заполнен веществом и поэтому выглядит круглой столовой горой. Не-

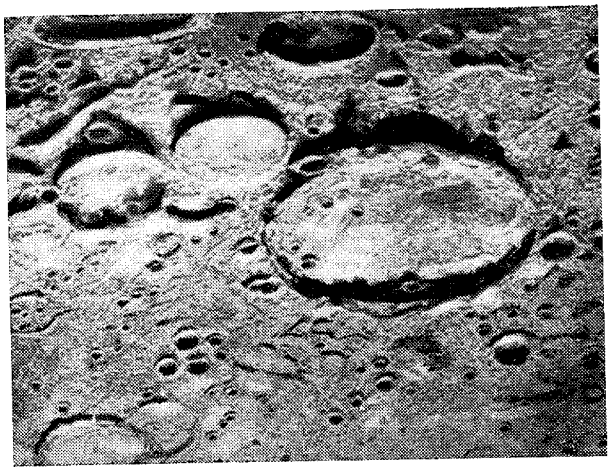

Рис. 73. Цирки Шиккард и Варгентин (заполненный), расположенные близ юго-восточного края видимого диска Луны.

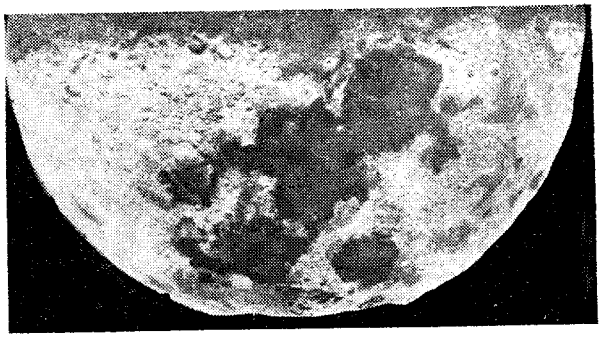

Рис. 72. Темные пятна на Луне — «моря».

которые цирки обладают остроконечной горкой, расположенной в центре кольцевого вала. Чаще всего именно цирки с центральными горками называют кратерами, хотя твердого разделения кольцевых гор на цирки и кратеры нет. Чем меньше поперечник кольцевой горы, тем их больше. Так, крупные цирки с диаметром больше

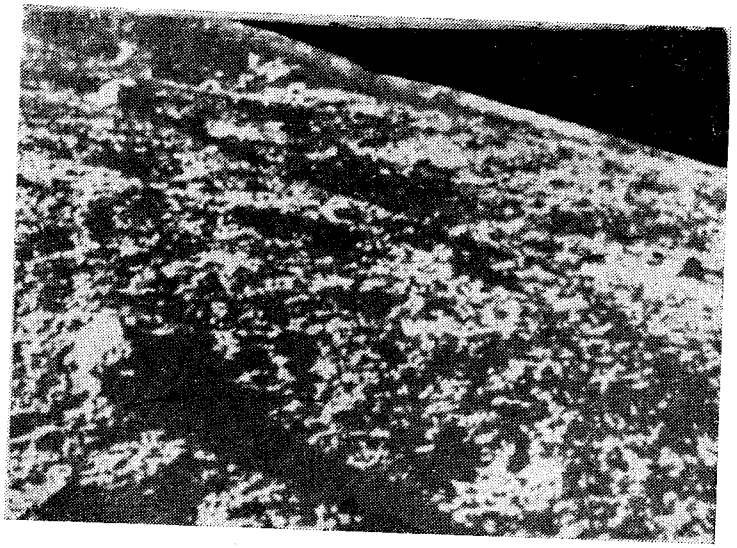

Рис. 74. Фрагмент панорамы лунного ландшафта, переданной советской станцией «Луна—9».

20 *км* исчисляются на видимой стороне Луны сотнями, более мелкие цирки насчитываются уже тысячами, а совсем маленькие, кратерочки или лунки, с поперечниками около 1 *км* и без валов, которые еще могут быть рассмотрены с Земли,— уже сотнями тысяч. Исходя из сказанного, можно было предполагать, что более мелких деталей на лунной поверхности еще больше. Это подтвердилось уже тогда, когда были получены снимки с близкого расстояния (американские автоматические станции серии «Рейнджер», 1964 г.). 3 февраля 1966 г. произошло событие, значение которого трудно переоценить: «Луна — 9» совершила мягкую посадку в Океане Бурь. На фотопанораме лунного ландшафта, переданной станцией «Луна— 9», видны детали размерами в миллиметры (рис. 74). В результате изучения панорамных снимков установили, что для лунной поверхности характерны три типа мелких образований. Самыми многочисленными, как считалось и прежде, являются кратеры-лунки, или воронки, с едва намечающимися валами или совсем без них.

Рис. 75. Фотография обратной стороны Луны.

Цирки и кратеры названы именами ученых. Так, среди цирков в Море Дождей выделяется треугольник: Архимед, Аристилл, Автолик. В Океане Бурь наиболее заметными являются кратеры Коперник и Кеплер.

Кроме кольцевых гор на Луне имеются протяженные *горные цепи* и отдельные *пики*, которые тянутся на сотни километров преимущественно по краям морей. Они носят название земных гор: Апеннины, Альпы, Кавказ и др. Так, Апеннины (рис. 38), окаймляющие юго-западное «побережье» Моря Дождей, имеют протяженность до 700 *км* и насчитывают более 3000 отдельных вершин. Основная масса лунных гор возвышается над своими основаниями на 3000 метров и меньше, но есть горы, достигающие и большей высоты. Самая высокая вершина имеет высоту 9 *км* (в горах Лейбница близ южного полюса), хотя высота 6000 *м* уже встречается редко. Склоны гор чаще всего некрутые. Наибольший угол наклона их к горизонту составляет 30°.

Одним из загадочных образований лунной поверхности являются *трещины* и *борозды* с обрывистыми краями. Их ширина и глубина составляют несколько сотен

метров, а длина достигает 100 *км* и в одном случае доходит до 350 *км*. Замечательным примером может служить трещина Ариадей. Сходны с трещинами долины, ширина которых достигает 10 *км*, а длина больше 100 *км*. Самая большая Альпийская долина тянется на 150 *км*.

На поверхности Луны имеются системы *светлых лучей* (рис. 71), которые исходят из отдельных кратеров и тянутся на огромные расстояния по дугам больших кругов, пересекая встречающиеся на пути моря, цирки, горные хребты, и совершенно не отбрасывают теней. Наиболее интересны системы лучей, исходящих из кратера Тихо (один из них имеет длину 4000 *км*) и кратера Коперник.

Обратная сторона Луны (рис. 75) имеет в основном такие же особенности рельефа, только морей там мало и они небольших размеров (Море Мечты, Москвы, Мирное). Кроме «морей», на обратной стороне были обнаружены мореподобные образования с поперечниками порядка 300 *км*. Они получили название *талассоидов*. Дно талассоида усеяно кратерами. Типичный пример талассоида — талассоид Королев. Подобные образования имеются и на видимой стороне Луны, но раньше на них не обращали внимания. На обратной стороне Луны длинный горный хребет получил название Советский, многочисленные кратеры названы по предложению советских исследователей именами крупнейших ученых: кратеры Ломоносов, Циолковский, Жолио-Кюри, Лобачевский, Максвелл и др. Таким образом, ровные области «морей» занимают на Луне только около 20% всей ее площади, в основном наш спутник имеет гористую поверхность.

3. Физические условия

Луна практически лишена атмосферы. Это подтверждается многочисленными наблюдениями покрытий звезд Луной. Но это не значит, что около Луны не может существовать очень разреженная атмосфера. Поляризационные измерения и фотометрические исследования приводят к выводу, что плотность гипотетической лунной атмосферы не выше 10^{-9} плотности земной атмосферы на уровне моря (около 10^{10} частиц в 1 $см^3$). Радиоастрономические методы приводят к еще меньшему значению (10^{-13}). Такая атмосфера могла бы содержать лишь молекулы тяжелых газов. Можно допустить, что газы, выделяются на поверхности Луны в результате вулканической деятельности или падения метеоритов. Выделение газов из недр Луны удалось наблюдать Н. А. Козыреву и В. И. Езерскому в ноябре 1958 г. Они сфотографировали спектр центральной горки кратера Альфонс. На полученной спектрограмме хорошо видны эмиссионные полосы, в том числе углерода C_2, но удержаться на Луне такие газы из-за малой скорости улетучивания долго не могут, а поиски тяжелых молекул не дали положительных результатов.

Таким образом, Луна ничем не защищена ни от нагревания солнечными лучами днем, ни от охлаждения ночью. Если учесть, что лунные сутки продолжаются 29,5 наших суток, то можно ожидать большой разницы между дневной и ночной температурами, что на самом деле и наблюдается. Измерения в инфракрасной области спектра дали для температуры поверхности: в подсолнечной точке 120° С (393° К), в антисолнечной точке около — 150° С (~120° К). Аналогичные перепады в температуре наблюдаются во время лунных затмений. В это время температура подсолярной точки всего лишь за час с небольшим уменьшается от 370° К до 190° К и так же быстро поднимается. Эти факты говорят о малой теплопроводности лунной поверхности.

Измерения в радиодиапазоне позволяют сделать заключение о температуре под поверхностью Луны на разных глубинах, определяемых несколькими длинами волн принимаемого радиоизлучения. Оказалось, что для λ 10 *см* яркостная температура Луны практически не зависит от фазы. Это значит, что на глубине в несколько десятков сантиметров температура не испытывает изменений. За лунный месяц слои на такой глубине не успевают ни прогреться, ни охладиться.

Количественный анализ радионаблюдений приводит к выводам, что поверхностный слой Луны должен иметь пористое строение, подобное пыли или пемзе. Еще совсем недавно казалось естественным предположить, что поверхность Луны покрыта толстым слоем пыли. Однако этот вывод не подтвердился. Мягкая посадка «Луны-9», а также более поздние посадки «Сервейора-1» и «Луны-13» показали полное отсутствие пыли. Высокое

качество изображения на панорамных снимках свидетельствует, что объективы телесистемы были чистыми, нисколько не запылились. В результате мы теперь знаем, что поверхностный слой Луны как бы сцементирован. Кроме кратеров-лунок, на нем обнаружены линейные структуры, представляющие собою что-то вроде жил, выступающих над общим уровнем, и, видимо, состоящих из более прочных пород, а также большое количество камней.

С целью проверки гипотезы пылевого покрова на «Сервейоре—1» (прилунился 2 июня 1966 г.) был проделан эксперимент с краткосрочным обдувом поверхности струей азота. Место обдува фотографировалось. Ничего, что свидетельствовало бы о наличии пыли, обнаружено не было.

24 декабря 1966 г. достигла поверхности нашего спутника автоматическая станция «Луна — 13». Впервые были проведены непосредственные измерения физико-механических свойств лунного покрова (в числе приборов станции находились штамп-грунтомер, динамограф, радиационный плотномер). Результаты измерений следующие. Верхний слой лунного покрова толщиной в 20—30 *см* имеет примерно такие же механические показатели, что и земные грунты средней плотности. Плотность вещества наружного слоя лунной коры не превышает плотности воды. Телефотоснимки «Луны—13» показали те же самые детали, что и панорама «Луны—9»: многочисленные кратеры-лунки, камни, лежащие без погружения в грунт, и линейные структуры прожилкового характера.

Автоматическая станция «Сервейор—3» в апреле — мае 1967 г. провела эксперимент по копке и перемещению грунта миниатюрным ковшом, который подтвердил данные о том, что сухая зернистая почва Луны напоминает мокрый песок в условиях Земли. Кроме того, появились некоторые доказательства небольшой толщины поверхностного слоя (ковш станции достиг на малой глубине более твердого слоя).

4. Гипотезы о происхождении лунного рельефа

В настоящее время по вопросу о происхождении лунных поверхностных форм существует две гипотезы: эндогенная и экзогенная. Эндогенная предполагает, что все поверхностные детали своим происхождением обязаны внутренней (вулканической и тектонической) деятельности Луны. Сторонники экзогенной гипотезы считают, что все образования на поверхности Луны возникли в результате воздействия внешних факторов—падения метеоритов. Однако, если падения метеоритов на поверхность Луны бесспорны, то никто не может отрицать и вулканической деятельности в прошлом на Луне. Тем более, что последние открытия, связанные с различием в характере видимой и обратной сторон Луны, наверное, могут быть легче объяснены с позиций вулканической гипотезы, при этом должна какую-то роль играть и Земля. Поэтому всего вероятнее, что в образовании лунных поверхностных форм играли роль и внутренние и внешние факторы.

§ 43. О других спутниках

Наши сведения о физических особенностях спутников очень незначительны. По сравнению со своими планетами все спутники, кроме Луны, очень малы (таблица 9, § 23). Только у некоторых из них обнаруживаются маленькие диски, что дает возможность непосредственно вычислить их размеры. К таким спутникам относятся галилеевы спутники Юпитера и Титан. Массы самых крупных спутников очень малы по сравнению с массами своих планет (таблица 14, § 35). Только один спутник в солнечной системе, спутник Сатурна Титан, имеет атмосферу, которая состоит из метана. Есть основания полагать, что поверхности Европы и Ганимеда покрыты снегом.

II. КОМЕТЫ И МЕТЕОРНАЯ МАТЕРИЯ

§ 44. Кометы

1. Спектральные данные

Мы уже говорили (§ 23) об особенностях внешнего вида и общем строении комет. Рассмотрим теперь вопросы, связанные с физической природой этих космических тел.

Проходя поблизости от больших планет, кометы подвергаются сильному гравитационному воздействию с их стороны, но сами кометы явным образом не оказывают никакого возмущающего действия на движение планет. Это свидетельствует об очень малых массах комет. Оценки кометных масс дают значения $10^{-8} — 10^{-9}$ массы Земли в качестве верхнего предела. Так как размеры комет колоссальны (см. § 23), то вещество комет характеризуется очень высокой степенью разрежения.

Спектры комет состоят из непрерывного спектра и эмиссионных линий и полос. Считается, что непрерывный спектр образуется путем отражения солнечного света ядром кометы или пылью, окружающей ядро на очень близких расстояниях. Так, очень удаленные кометы обнаруживают только непрерывный спектр, а так как на больших гелиоцентрических расстояниях кома кометы еще слабо развита, то непрерывный спектр является спектром только ядра и свидетельствует, что ядро кометы состоит из твердых частей. Распад комет на метеорные потоки (см. пункт 3 этого параграфа) приводит к выводу, что ядро кометы представляет собою не одно тело, но совокупность отдельных мелких твердых тел. На основании спектральных данных предполагается, что это скопление мелких твердых тел вдали от Солнца связано в единую глыбу льдами из всякого рода простых соединений водорода, углерода, азота, которые легко испаряются с приближением к Солнцу, после чего обнажаются сами твердые тела и в свою очередь выделяют окклюдированные[1] в них газы и поставляют пыль в оболочку кометы.

Эмиссионный спектр кометы образуется ее газовой составляющей. В спектрах комы редко обнаруживаются линии атомов, эти спектры состоят из множества эмиссионных полос, излучаемых молекулами CN, C_2, C_3, OH, NH, CH, CO_2^+, N_2^+, CO^+. В спектрах хвостов отождествлены полосы CO^+, N_2^+, OH^+, CO_2^+, CH^+. Спектры комет меняются с расстоянием от Солнца. На больших расстояниях в спектрах преобладает непрерывное излучение. При приближении кометы к Солнцу первыми в ее спектре появляются полосы CN (около 3 *а. е.*), на расстоянии, равном примерно 2 *а. е.*, обнаруживаются полосы C_3 и NH_2. Еще ближе к Солнцу ($\sim$ 1,8 *а. е.*) развиваются мощные полосы C_2, затем OH, CH, NH. Если комета очень близко подходит к Солнцу, в ее спектре наблюдается и атомарное свечение газов (линии D_1 и D_2 нейтрального натрия NaI).

В настоящее время считается выясненным механизм свечения комет — это резонансная флуоресценция. Излучение полос в спектре кометы обусловлено переходами молекул с высших энергетических уровней на основные. Молекулы, находящиеся в одном из своих основных вращательных или колебательных уровней, под действием поглощения солнечного излучения, переходят на ближайший более высокий энергетический уровень. При возвращении молекул в основное состояние происходит переизлучение поглощенного фотона почти с той же частотой. Резонансная флуоресценция возможна потому, что в условиях большой разреженности кометных газов, возбуждение определяется не столкновениями молекул, а только поглощением солнечного излучения. Если резонансная частота лежит в недоступной части спектра, то молекула может быть не обнаружена. Такова, видимо, судьба устойчивых молекул H_2O, NH_3, CH_4, C_2N_2, N_2, которые должны быть в кометах, так как именно их распад дает радикалы CN, NH, NH_2, CH, обнаруженные в кометах.

[1] От слова окклюзия — глубинное поглощение газов твердыми телами.

2. Образование кометных форм

Таким образом, в комете светятся газы, а непрерывный спектр образуется в результате отражения пылью и твердым ядром солнечного света.

Проследим, какие изменения происходят с кометой по мере ее приближения к Солнцу. На достаточном расстоянии от Солнца (в общем больше 3 *а. е.*) комета представляет собою только ядро, которое дает мало света, так как имеет очень небольшие размеры (несколько десятков или сотен километров) и низкую отражательную способность. Как мы уже отметили, ядро состоит из совокупности отдельных твердых тел, слепленных в единую глыбу перечисленными выше замороженными соединениями и радикалами. Уже на расстояниях порядка 2 *а. е.* ядро достаточно нагревается солнечными лучами, температура становится выше точки кипения таких газов, как: углекислый газ, метан, аммиак и др., — а соединения CH, CN, NH, NH_2, способные существовать при очень низких температурах, энергично взрываются. При испарении и расплавлении льдов нагреваются солнечными лучами вмороженные в них твердые части ядра, из них выделяются абсорбированные и окклюдированные газы, отделяются пылевые частицы. Все эти газовые молекулы и пылинки окружают ядро газово-пылевой оболочкой, образующей голову кометы. Голова кометы является неустойчивым образованием, так как притяжение малого ядра недостаточно, чтобы удержать около себя частицы оболочки, тем более, что на них очень сильно влияет Солнце, действие которого заключается в гравитационном притяжении и отталкивании. В большинстве случаев отталкивание по природе является световым давлением. Рассматривая движение частицы под действием сил притяжения и отталкивания Солнца, которые обе обратно пропорциональны квадрату расстояния, можно представить, что частица находится под действием некоторого эффективного ускорения μ, направленного по линии Солнце — частица. В результате из головы кометы происходит непрерывное истечение вещества по траекториям, которые определяются значением ускорения μ, и образуются хвосты различной формы.

В соответствии с механической теорией кометных форм, разработанной Федором Александровичем Бредихиным (1831—1904) и развитой другими исследователями (С. В. Орлов и др.), введена классификация кометных хвостов.

У хвостов I типа оттталкивательная сила превосходит силу притяжения Солнца в 10—100 раз и даже больше, поэтому хвосты этого типа направлены почти строго в сторону, противоположную Солнцу, лишь чуть отклоняются назад относительно орбитального движения кометы. Хвосты II типа заметно отклонены, для них отталкивание несколько больше притяжения. Хвосты III типа сильно отклонены назад относительно движения кометы. Наблюдаются также хвосты, направленные к Солнцу, они называются аномальными. Частицы в таких хвостах не испытывают отталкивательного действия со стороны Солнца.

Спектральный анализ показывает, что хвосты I типа являются газовыми, а типов II и III, а также аномальные — пылевыми.

3. Распад комет

Вещество, образовавшее оболочку и хвост кометы, постепенно рассеивается в пространстве и навсегда оставляет комету. Поэтому масса кометы со временем уменьшается, причем это происходит тем быстрее, чем меньше период обращения кометы вокруг Солнца. Многие периодические кометы перестают существовать как кометы после двух — трех сближений с Солнцем. Но есть кометы, которые наблюдаются уже длительное время. Так, комета Энке с периодом 3,3 года была открыта в 1786 г. и с тех пор наблюдалась почти 50 раз. Комета Галлея наблюдается с 466 г. до н. э. Комета Галлея за 31 возвращение к Солнцу не ослабела в блеске, а комета Энке заметно уменьшила свою яркость.

Прекращение существования кометы как кометы не означает ее полного исчезновения: вещество кометы — глыбы, камни, пылинки — продолжают двигаться по прежней орбите. Постепенно они более или менее равномерно распределяются по всей орбите, образуется *метеорный рой*. Если орбита кометы пересекается с земной орбитой в некоторой точке, то ежегодно в момент прохождения Землею этой точки на Земле наблюдаются *метеорные дожди*. Когда вместе с Землею в эту точку при-

ходит основная часть метеорного роя, метеорный дождь бывает особенно сильным.

Наряду с прекращением существования комет ежегодно открываются новые, в том числе и короткопериодические. Эти факты говорят о том, что кометы — молодые образования в солнечной системе и что и в настоящее время идет процесс образования комет.

§ 45. Метеоры

Метеором называется световое явление, возникающее при вторжении в земную атмосферу метеорного тела. Это явление часто называют «падающей звездой», хотя к звездам оно не имеет никакого отношения. Если метеор по блеску превосходит блеск планет ($m \leqslant -5^m$), его называют *болидом*. Метеорное тело, вызвавшее метеор или болид и достигшее земной поверхности, называется *метеоритом*.

Из наблюдений метеоров в различных местах земного шара установлено, что общее число метеорных тел, с которыми встречается Земля в течение суток достигает значения в $2 \cdot 10^{10}$.

Обычно наблюдатель, увидевший метеор, наносит его путь на звездную карту с указанием моментов начала и конца видимости. Сопоставление результатов наблюдений одного метеора из двух пунктов на Земле позволяет найти пространственную траекторию метеора и среднюю его скорость, а также высоту возгорания и угасания. Это дает возможность определить гелиоцентрическую орбиту метеорного тела до встречи с Землей. Точность подобных определений возрастает при фотографировании метеоров.

Метеорное тело вторгается в земную атмосферу со скоростями 10—80 *км/сек*. Если такое тело имеет достаточно большие размеры (от 0,1 *мм* до 10 *см*), то оно в результате столкновений с молекулами воздуха способно передать им часть своей кинетической энергии, что приведет к разогреванию метеорного тела и вызовет испарение атомов и молекул с его поверхности. При этом происходит сильное разогревание метеорного тела с поверхности, в результате чего оно становится светящимся. Вокруг него образуется светящееся газовое облачко, частично ионизованное, которое отстает от самого метеорного тела и располагается вдоль его траектории в виде

светящегося следа, который мы и наблюдаем визуально, фотографически или радиолокационным методом (радиоволна, посланная в виде импульса в атмосферу, принимается приемником после отражения от ионизованного следа метеора).

На каком-то участке траектории метеор достигает максимума в блеске, после чего происходит его дробление и резкое замедление. Очень яркие и быстрые болиды до дробления могут проникнуть близко к поверхности Земли, после этого их движение является простым падением практически без начальной скорости.

Обычно метеоры сгорают тем выше, чем больше их скорость. В зависимости от скорости высота возгорания 120—85 *км*, а высота угасания 95—75 *км*.

По блеску метеора может быть приблизительно оценена его масса. Для метеора с видимой звездной величиной $m=0^m$ минимальная масса породившей его частицы близка к 1 *г* (для скорости около 40 *км/сек*), при $m=5^m$, масса равна 10^{-2} *г*, а для телескопического метеора с $m=10^m$ масса около 10^{-4} *г*. Масса метеорного тела с $m=-5^m$ — 100 *г*, а болида с $m=-10^m$ уже 10 000 *г*.

Общая масса вещества, ежегодно выпадающая на Землю, составляет около 10^5 тонн.

Число метеоров, наблюдаемых за один час, называется *часовым числом*. Среднее часовое число визуально наблюдаемых метеоров может изменяться в течение суток от 6 до 16.

Очень часто наблюдаемые метеоры как бы вылетают из одной точки неба, которая называется *радиантом*. Такие метеоры принадлежат одному метеорному потоку. В пространстве метеорные тела такого потока движутся параллельно друг другу. Обычно поток называется по созвездию, в котором лежит радиант (леониды — радиант в созвездии Льва, дракониды — в созвездии Дракона), или по имени кометы, остатками которой является рой метеорных тел.

Так как обычно метеоры из одного и того же радианта наблюдаются ежегодно в одни и те же даты, то это значит, что метеорный рой, рождающий метеорный поток, движется вокруг Солнца по эллиптической орбите, которая в определенном месте пересекается с орбитой Земли (рис. 76). Если рой не распределен равномерно по всей орбите, а основная масса его сосредоточена в не-

которой части ее и рой имеет период обращения, равный целому числу лет, тогда в определенные годы количество наблюдаемых метеоров будет резко возрастать, будет наблюдаться звездный дождь. Во время звездных дождей часовое число метеоров достигает больших значений (до 50—100). Время от времени наблюдаются особенно эффективные звездные дожди с огромным значением часового числа метеоров. Так было в 1833 г. во время потока леонид, когда часовое число достигло 12 000. Многие метеорные потоки образовались в результате распада комет. Например, поток андромедид связан с разрушением кометы Биэлы, которая в 1845 г. на глазах наблюдателей разделилась на две части и в следующее свое появление в 1952 г. наблюдалась в виде двух слабых комет разделенных расстоянием в 1,5 млн. *км*. Больше комету Биэлы не видели, но в 1872 г. и 1885 г. вместо кометы на Земле наблюдались звездные дожди с часовым числом 7 500. В последующие появления поток андромедид значительно ослабел.

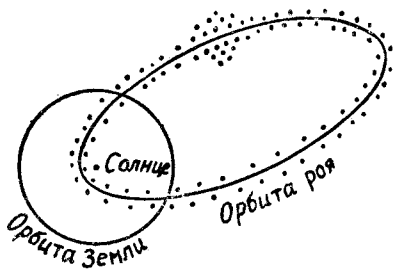

Рис. 76. Орбита метеорного роя.

Распад комет и образование метеорных потоков, распределяющихся со временем по всей орбите кометы или по значительной ее части, происходит таким образом, что метеорные тела покидают ядро кометы с небольшими скоростями около 14—20 *км/сек*. Выброшенные из кометы куски вещества распределяются на больших расстояниях друг от друга. Так, метеорные частицы в потоке андромедид в 1872 и 1885 г. отстояли друг от друга в среднем на 30 *км*. Следует заметить, что образование кометного метеорного роя необязательно связано с полным разрушением кометы. В настоящее время успешно сосуществуют комета Джакобини-Циннера и связанный с нею поток драконид, который находится позади кометы на ее орбите.

Метеорных потоков известно около трех десятков.

Некоторые из них наблюдаются ежегодно — это *постоянные* потоки, некоторые — через определенное число лет — *периодические* потоки. К постоянным относится поток персеид (максимум 12 августа), к периодическим — поток леонид (максимум 16 ноября).

Кроме метеоров из потоков наблюдаются еще спорадические (случайные) метеоры.

§ 46. Метеориты

Большое количество метеорных тел не долетает до поверхности Земли либо долетает до нее в форме очень мелких обломков. Но иногда после пролета через атмосферу тяжелого метеорного тела на Землю выпадает метеорит. В настоящее время известно около 1600 метеоритов, половина из которых была найдена случайно, половина — после наблюдения болида. Найденные метеориты представляют собою исключительную ценность для исследователей, так как являются кусочками «небесного» вещества, которое может быть подвергнуто полному физическому и химическому анализу.

По составу метеориты бывают трех основных видов [1]: железные (*сидериты*) с плотностью около 7,7 $г/см^3$, железокаменные (*сидеролиты*), плотность 5,6—4,7 $г/см^3$ и каменные (*аэролиты*), плотность около 3,5 $г/см^3$. По содержанию радиоактивных веществ в метеорите можно определить его возраст и даже продолжительность пребывания его в разных состояниях: время отвердевания, время дробления материнского тела, время падения, если метеорит был найден случайно. Для различных метеоритов возраст оказывается разным: от нескольких сотен миллионов до нескольких миллиардов лет. Оценки возраста большинства метеоритов в общем близки к значению $4{,}5 \cdot 10^9$ лет. Этот факт расценивается как указание, что возраст солнечной системы не свыше 5 млрд. лет.

Падение крупных метеорных тел, кроме явлений в атмосфере, сопровождается мощными процессами во время удара о земную поверхность. Если скорость падения больше 4—3 *км/сек*, то происходит явление взрыва, сопровождающееся образованием воронки — метеоритного кратера. На Земле известно несколько крупных метеоритных кратеров. Первым из них был обнаружен

[1] Есть еще одна группа метеоритов — тектиты. См., например, Г. Г. Воробьев, Что вы знаете о тектитах?, «Наука», М., 1966.

Аризонский метеоритный кратер — Каньон Дьябло (США). Этот кратер имеет правильную круговую форму, диаметр его 1207 *м*, глубина 174 *м*, высота вала относительно окружающей местности от 40 до 50 *м*. Расчеты показывают, что в этом месте в доисторические времена,

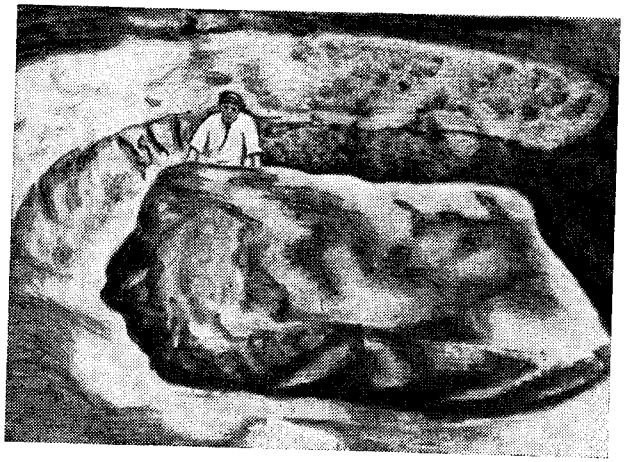

Рис. 77. Метеорит Гоба.

около 50 000 лет назад, упал метеорит с массой от 60 до 200 тысяч тонн и диаметром в 25—40 *м*. На месте падения было найдено около 12 000 тонн метеоритного вещества в виде микроскопических осколков. Возможно, что большая часть массы метеорита распылилась, расплавилась или испарилась при взрыве и теперь лежит где-нибудь в окрестностях кратера.

В последнее время обнаружены крупные кратеры в пустынях Австралии, Аравии, Америки. Одним из них является кратер Дин Бэй диаметром 13,7 *км* в Канаде, сильно деформированный. Рядом с этим кратером имеется два озера с диаметрами 32 и 24 *км*. Их тоже рассматривают как реликтовые кратеры.

Кратеры образуются только при падении очень массивных метеоритов. Железный метеорит Гоба (рис. 77), найденный в 1920 г. в Африке в виде цельной глыбы массой 60 тонн, не образовал воронки. Не могут образовать воронок и метеориты, распадющиеся в воздухе на огромное количество кусков. При их падении взрывов не происходит. Так было при выпадении железного дождя на Дальнем Востоке в 1947 г. (Сихотэ-Алиньский метеорит). Падение этого метеорита наблюдалось многими очевидцами. Основное тело массой в 70 тонн распалось на множество кусков на высоте около 6 *км*, которые выпали, образовав ямы и воронки без взрывов. Здесь было собрано свыше 23 тонн железа, самый крупный кусок весил 1750 *кг*.

Из гигантских падений, которые произошли в наше время, нужно отметить Тунгусский метеорит, упавший 30 июня 1908 г.

Падение этого метеорита сопровождалось оптическими и акустическими явлениями в круге радиусом около 1 *км*. На месте падения был повален и частично сожжен лес на большой площади. Воздушная волна от взрыва обошла земной шар и была зарегистрирована многими обсерваториями мира. После падения отмечалось ночное свечение неба в Сибири и Европе. Энергия взрыва оценивается в 10^{23} *эрг*, что значительно больше энергии взрыва Аризонского метеорита, но на месте падения метеорита кратера не было обнаружено. Тщательное изучение Тунгусского метеорита привело к выводу, что он был небольшой кометой с массой не менее одного миллиона тонн, двигавшейся обратным движением навстречу Земле и взорвавшейся на некоторой высоте над поверхностью перед ударом.

§ 47. Метеорное вещество близ Земли

Межпланетное пространство, как это видно из факта существования метеоров, заполнено метеорной пылью. Источниками ее являются кометы и астероиды.

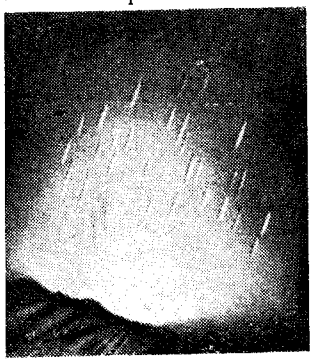

Рис. 78. Зодиакальный свет.

Есть основания полагать, что наша Земля окружена пылевым облаком, расположенным на высоте 100—300 *км*, а также на высоте около 19 *км*. На высоте 2000—3000 *км*, в верхней атмосфере

Земли, газ и пыль содержатся примерно в равных количествах.

Метеорная пыль, расположенная близ границы земной атмосферы и дальше, проявляет себя в явлении, которое называется *зодиакальным светом.* Зодиакальный свет (рис. 78) в виде слабого сияния, имеющего форму треугольника, вытянутого вдоль эклиптики, наблюдается вечером на западе или утром на востоке. Спектр зодиакального света подобен солнечному. Зодиакальный свет возникает в результате рассеяния солнечного света межпланетной метеорной материей, частицы которой сгущаются к плоскости эклиптики.

В точке неба, противоположной Солнцу, на эклиптике наблюдается слабое свечение овальной формы. Оно называется *противосиянием.* Оно тоже объясняется рассеянием солнечного света скоплением метеорной материи.

III. СОЛНЦЕ

§ 48. Общие сведения о Солнце

1. Основные количественные характеристики

Наше Солнце представляет собою типичную звезду. Поэтому изучение этой самой близкой к нам звезды имеет колоссальное значение для понимания физических процессов и явлений, протекающих на других звездах. Кроме того, Солнце, центральное тело нашей планетной системы, не может не оказывать и действительно оказывает колоссальное влияние на все явления, имеющие место в солнечной системе вообще и на Земле, в частности. Самим существованием жизни на Земле мы обязаны Солнцу.

Наблюдателю Солнце всегда представляется в виде круглого диска с резкими краями. Сжатие Солнца равно нулю, поэтому его действительная форма — шар. Радиус Солнца составляет $R_C = 696\,000$ *км*, масса равна $M_C = 1{,}991 \cdot 10^{33}$ *г*, что дает среднюю плотность его вещества $\rho_C = 1{,}4$ *г/см*^{3}. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца $g_C = 2{,}74 \cdot 10^4$ *см/сек*^{2}. Полное излучение (светимость) $L_C = 3{,}86 \cdot 10^{33}$ *эрг/сек.*

2. Фотосфера. Солнечные пятна. Вращение

Самое первое наблюдение Солнца показывает, что его яркость (рис. 79) уменьшается к краям диска. Это свидетельствует о том, что поверхность Солнца не является твердой, а представляет собой слой газа, она называется *фотосферой.* Это тот уровень газообразного Солнца, от которого мы получаем основную долю лучистой энергии, испускаемой Солнцем в целом, в частности,

свет. Фотосфера определяет видимые границы солнечного диска.

Одной из характерных и самых доступных для наблюдения деталей солнечной поверхности — фотосферы являются *солнечные пятна* (рис. 79), которые впервые были открыты Галилеем. Солнечные пятна почти всегда

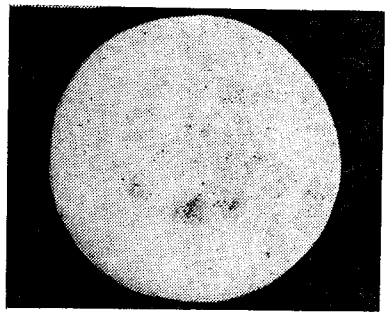

Рис. 79. Общий вид Солнца.

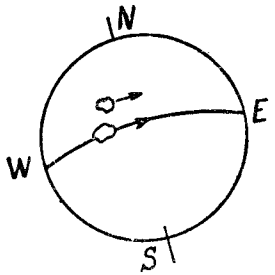

Рис. 80. Вращение Солнца.

присутствуют на Солнце, но в одни годы их бывает много, в другие годы они малочисленны. Основная масса пятен имеет размеры меньше 1′ (около 43000 *км*), но наблюдаются и большие пятна или группы их, видимые даже невооруженным глазом[1]. Самое крупное пятно, зарегистрированное на Солнце, имело размеры больше 4′ (около 180000 *км*).

На краю солнечного диска можно видеть большие светлые образования — *факелы*.

Солнечные пятна перемещаются по солнечному диску с запада на восток (рис. 80). На основании этого уже Галилей заключил, что Солнце вращается вокруг некоторой оси и получил период этого вращения. Исследование движения пятен позволило определить наклон оси вращения Солнца к плоскости эклиптики (угол между ними составляет 82°45′), установить наличие собственных перемещений пятен по поверхности Солнца и обнаружить

[1] Для того, чтобы заметить такие пятна невооруженным глазом, на Солнце надо смотреть через какой-то темный фильтр (закопченное стекло, например, засвеченную фотопленку, очень темные очки).

изменение периода вращения Солнца в зависимости от гелиографической широты (от положения точки относительно солнечного экватора).

Угловая скорость вращения ω (в градусах в сутки) на гелиографической широте φ определяется следующей формулой

$$\omega = 14°{,}4 - 2°{,}7 \sin^2 \varphi. \qquad (34)$$

По формуле (34) определяется скорость солнечного вращения близ экватора. Для определения скорости вращения в более высоких широтах используются другие методы, например, смещение спектральных линий (§ 29, 1).

Определение характеристик вращения Солнца привело к следующим результатам. С наибольшей скоростью вращается экваториальная область Солнца (период вращения и линейная скорость точек экватора $25^д{,}38$ и 2,0 *км/сек* соответственно); чем дальше от экватора, тем вращение медленнее. Например, на широте 75° период вращения уже достигает 32 суток.

3. Спектр Солнца. Химический состав

Большое количество данных о физическом состоянии Солнца получено путем изучения его спектра. Спектр Солнца и определение его химического состава мы рассмотрели в § 28,1.

4. Температура

В таблице 12 (§ 34) мы привели результаты измерения температуры Солнца. Эффективная температура Солнца равна 5800°. Цветовая температура Солнца очень сильно меняется даже при определении ее в соседних областях. В более широких пределах изменяется яркостная температура: от 4500° до миллиона градусов в радиодиапазоне. На основании результатов измерения температуры Солнца можно сделать следующие выводы:

1. Солнце излучает не как абсолютно черное тело. Если бы по характеру излучения Солнце было близко к абсолютно черному телу, значения температур были бы примерно одинаковыми.

2. Температура солнечного вещества на разных глубинах различная. Дело в том, что газы солнечной атмос-

феры неодинаково прозрачны для излучения разных длин волн. Из наиболее глубоких слоев, лежащих близ фотосферы, приходит к нам ультрафиолетовое излучение, температура этих слоев наименьшая, около 4500°. В обе стороны от этого слоя (ниже и выше) температура растет. Радиоизлучение на метровых волнах мы принимаем от верхних слоев короны. Здесь температура достигает миллиона градусов.

3. Вещество на Солнце находится в ионизированном состоянии, т. е. в состоянии плазмы.

5. Солнечная атмосфера

Солнце мы видим до определенной глубины (фотосфера), далее солнечное вещество оказывается непрозрачным. Слои, лежащие над фотосферой, образуют солнечную *атмосферу*, которая разделяется на *хромосферу* и *корону*.

Наши сведения о физическом состоянии солнечной атмосферы основаны на непосредственном ее изучении. Что же касается состояния внутренних слоев, лежащих ниже фотосферы, то здесь на помощь приходит теория.

§ 49. О внутреннем строении Солнца

1. Условия в недрах Солнца

Представление о внутреннем строении Солнца (звезды) можно составить с помощью теоретических рассуждений, основанных на общих физических законах. Если эти представления правильны, то значения основных количественных характеристик Солнца, полученные теоретически, должны совпадать с их наблюдаемыми значениями. К числу таких характеристик Солнца (звезды) относятся масса — M_C, светимость — L_C, радиус — R_C

При построении теоретической модели Солнца для простоты полагают, что оно является невращающейся стационарной звездой, находящейся в состоянии гидростатического равновесия, что означает, что любой элемент объема в недрах Солнца находится в равновесии под действием сил гравитационного притяжения всех

более глубоких слоев и силы давления, направленной наружу.

Учитывая сказанное, можно составить некоторые представления об условиях в недрах Солнца, если предположить, что вещество в нем распределено равномерно ($\bar{\rho}_C = 1{,}4$ *г/см*^{3}). В этом случае можно считать, что свойства такого однородного Солнца будут близки к услови-

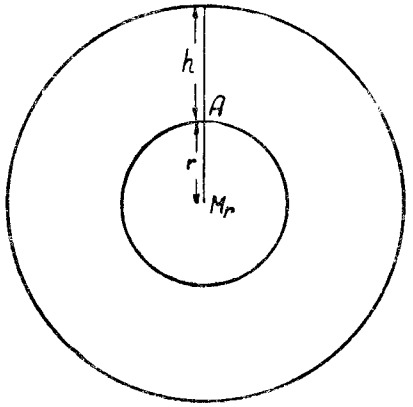

Рис. 81. К расчету давления в недрах Солнца.

ям в реальном Солнце на глубине h, равной половине радиуса $R_C/2$ (рис. 81). Давление в точке A $p = \rho g h = \bar{\rho}_C g_A \frac{R_C}{2}$. Так, как ускорение в этой точке

$$g_A = f\frac{M_r}{r^2} = f\frac{M_C/8}{(R_C/2)^2} = f\frac{M_C}{2R_C^2} = \frac{g_C}{2} = 1{,}37\cdot 10^4 \text{ см/сек}^2,$$

$$p = \frac{\bar{\rho}_C g_C R_C}{4} = \frac{\bar{\rho}_C f M_C}{4R_C} = 6{,}6\cdot 10^{14} \text{ дин/см}^2.$$

Зная плотность и давление и используя основное уравнение состояния идеального газа $pV = \frac{m}{\mu}RT$, можно

найти температуру T, считая, что Солнце состоит из ионизованного водорода $\left(\mu = \frac{1}{2}\right)$

$$T = \frac{\mu p}{R\bar{\rho}_C} = \frac{\mu f M_C}{4RR_C} = k\frac{M_C}{R_C} = 2{,}8 \cdot 10^6\ ^\circ K.$$

Таким образом, при наших предположениях для средних точек в недрах Солнца получается давление в сотни миллионов атмосфер и температура порядка нескольких миллионов градусов. В центре Солнца давление, температура и плотность должны быть еще больше.

Более точные расчеты моделей внутреннего строения Солнца приводят к следующим результатам (таблица 18).

Таблица 18

Расстояние от центра (в радиусах Солнца)	Температура (°K)	Давление (*дин/см²*)	Плотность (*г/см³*)
0	$13 \cdot 10^6$	$2{,}2 \cdot 10^{17}$	134
0,2	$10 \cdot 10^6$	$4{,}6 \cdot 10^{16}$	36
0,5	$3{,}4 \cdot 10^6$	$6{,}1 \cdot 10^{14}$	1,3
0,98	10^5	10^{10}	0,001

В недрах Солнца скорости движения частиц огромны, столкновения их часты. Имеются условия для протекания ядерных реакций. Этим решается проблема солнечной энергии.

2. Источник солнечной энергии

Солнце ежесекундно на каждый грамм своего вещества излучает

$$\varepsilon = \frac{L_C}{M_C} = \frac{3{,}86 \cdot 10^{33}\ эрг/сек}{1{,}99 \cdot 10^{33}\ г} \approx 2\ эрг/г \cdot сек.$$

Такой большой выход энергии могут дать лишь термоядерные реакции.

При всех возможных ядерных превращениях только $^1/_{130}$ часть массы может перейти в излучение, что составляет $7 \cdot 10^{18}$ *эрг* на каждый грамм вещества. Так как не вся масса солнечного вещества участвует в термоядерных реакциях, то можно допустить, что на Солнце идут

термоядерные реакции с выходом энергии $\varepsilon = 20$—30 *эрг/г · сек*. В этом случае при условии, что только половина солнечного вещества принимает участие в термоядерных реакциях, запаса энергии $7 \cdot 10^{18}$ *эрг/г* хватит на $7 \cdot 10^{18} \cdot \frac{1}{2} : 20 \approx 5 \cdot 10^9$ *лет*.

Указанный результат хорошо согласуется с оценками возраста Солнца (несколько миллиардов лет), поэтому в качестве источников солнечной энергии надо взять термоядерные реакции, дающие выход энергии в 20—30 *эрг/сек* на каждый грамм взаимодействующей массы. Такими реакциями являются 1) протон-протонная реакция (*p-p*) и 2) углеродно-азотный цикл (CN). В обоих циклах происходит образование ядра атома гелия ${}_2He^4$ (α-частица) из четырех ядер водорода ${}_1H^1$ (протон), что дает дефект массы $\Delta m = 1{,}0076 \cdot 4 - 4{,}0028 = 0{,}0276$ *а.е.м.* или $\Delta m = 0{,}0276 : 4 : 1{,}0076 = 0{,}0069$ *г* на каждый 1 *г* водорода, что соответствует $6{,}2 \cdot 10^{18}$ *эрг*.

Протон-протонная реакция состоит из следующих этапов.

а) ${}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1D^2 + \beta^+ + \nu$, 1,44 *Мэв*, $8 \cdot 10^9$ *лет*;

б) ${}_1H^1 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma$, 5,49 *Мэв*, 4 *сек*;

в) ${}_2He^3 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + 2{}_1H^1$, 12,85 *Мэв*, $4 \cdot 10^5$ *лет*,

где ${}_1D^2$ — дейтерон, β^+ — позитрон, ν — нейтрино, γ — квант излучения. В каждой строке указаны значения выделяющейся энергии и время, в течение которого реагирующие частицы существуют раздельно (для температуры $T = 15 \cdot 10^6$ *град* и плотности водорода $\rho_H = 100$ *г/см³*).

Реакция а) имеет очень малую вероятность, но так как протонов в недрах Солнца (звезды) много, то такие реакции происходят часто. Образующийся в результате реакции позитрон аннигилирует с электроном. Дейтерон вступает в реакцию с протоном, в результате чего образуется ядро изотопа гелия ${}_2He^3$ и выделяется мощный γ-квант.

Теоретические расчеты возможных дальнейших преобразований ядра гелия ${}_2He^3$ показывают, что в условиях недр такой звезды, как наше Солнце, наиболее успешно идет реакция столкновения двух ядер ${}_2He^3$ (третья строка). При этом образуется одна α-частица (${}_2He^4$)

и два протона с большой энергией. Чтобы подсчитать энергию, выделяющуюся при преобразовании четырех протонов в α-частицу, нужно учесть, что для этапа в) необходимо по две реакции а) и б) и что нейтрино в этапе а) уносит из недр Солнца энергию в 0,26 *Мэв*, которая в дальнейших реакциях участия не принимает. На основании сказанного получаем

$$(1{,}44-0{,}26)\cdot 2+5{,}49\cdot 2+12{,}85=26{,}19\ Мэв=$$
$$=4{,}2\cdot 10^{-5}\ эрг.$$

Полный выход энергии при протон-протонной реакции зависит от условий в недрах Солнца (звезды). Так, при указанных выше $T=15\cdot 10^6$ *град*, $\rho=100$ *г/см*^{3} и при наличии там только одного водорода $\varepsilon_{p-p}=35$ *эрг/г · сек*. С уменьшением температуры продуктивность протон-протонной реакции падает, и при определенных условиях такая реакция вообще уже не идет. Это значит, что внутри Солнца протон-протонная реакция осуществляется лишь в самых центральных его частях до $0{,}3R_C$, где температура еще не меньше $5\cdot 10^6$ °К.

Углеродно-азотный цикл реакций проходит в следующей последовательности.

а) ${}_6C^{12}+{}_1H^1\rightarrow{}_7N^{13}+\gamma$, 1,95 *Мэв*, $1{,}3\cdot 10^7$ *лет*;

б) ${}_7N^{13}\rightarrow{}_6C^{13}+\beta^++\nu$, 2,22*Мэв*, 7 *мин*;

в) ${}_6C^{13}+{}_1H^1\rightarrow{}_7N^{14}+\gamma$, 6,54 *Мэв*, $2{,}7\cdot 10^6$ *лет*;

г) ${}_7N^{14}+{}_1H^1\rightarrow{}_8O^{15}+\gamma$, 7,35 *Мэв*, $3{,}2\cdot 10^8$ *лет*;

д) ${}_8O^{15}\rightarrow{}_7N^{15}+\beta^++\nu$, 2,71 *Мэв*, 82 *сек*;

е) ${}_7N^{15}+{}_1H^1\rightarrow{}_6C^{12}+{}_2He^4$, 4,96 *Мэв*, $1{,}1\cdot 10^5$ *лет*.

Цикл начинается с захвата протона ядром углерода ${}_6C^{12}$, в результате чего образуется неустойчивый изотоп азота ${}_7N^{13}$, который быстро распадается. Продукт распада (${}_6C^{13}$) захватывает второй протон, после чего образуется изотоп азота ${}_7N^{14}$. ${}_7N^{14}$ захватывает третий протон, в результате появляется кислород ${}_8O^{15}$, который быстро распадается. Ядро ${}_7N^{15}$ захватывает четвертый протон. При этом может образоваться кислород: ${}_7N^{15}+{}_1H^1\rightarrow{}_8O^{16}+\gamma$, но в миллион раз более вероятным является образование ядра углерода ${}_6C^{12}$ и ядра гелия ${}_2He^4$ (реакция е). Таким образом, в итоге азотно-углеродного цикла четыре протона преобразуются в ядро гелия, а

углерод только «помогает» протеканию цикла, т. е. является катализатором. Выход энергии во всех реакциях цикла составляет 25,0 *Мэв* или $4{,}0\cdot 10^{-5}$ *эрг*, что лишь немного меньше, чем в протон-протонной реакции.

Полный выход энергии в азотно-углеродном цикле очень сильно зависит от температуры. Так, при $T=15\cdot 10^{6^\circ}$ К, $\rho=100$ *г/см*^{3} и при условии, что ядра атомов углерода и азота составляют примерно 0,005 от общего числа протонов, $\varepsilon_{CN}=9{,}5$ *эрг/г · сек*. Отсюда следует, что в недрах такой звезды, как Солнце, реакции азотно-углеродного цикла идут лишь близ самого центра и не обеспечивают необходимого выхода энергии.

Исходя из всего сказанного, заключаем, что основным источником солнечной энергии является протон-протонная реакция. Центральная область Солнца, где идут термоядерные реакции, называется *зоной ядерных реакций*. Радиус этой зоны составляет около 0,3 радиуса Солнца.

3. Перенос энергии в недрах Солнца

Перенос энергии в недрах Солнца может осуществляться путем *лучеиспускания* и *конвекции*. В более глубоких частях Солнца энергия передается путем лучистого переноса. Гамма-кванты, выделившиеся в процессе термоядерных реакций, поглощаются и переизлучаются отдельными атомами, при этом переизлучение происходит в виде квантов меньшей энергии. Жесткие кванты как бы «дробятся»: сначала возникает рентгеновское излучение, потом ультрафиолетовое и видимое. Слои Солнца, окружающие область ядерных реакций в которых происходит перенос энергии путем лучеиспускания, называются *зоной лучистого равновесия*. Она простирается примерно от $0{,}3R_C$ до $0{,}9R_C$. Выше этого уровня в переносе энергии к поверх-

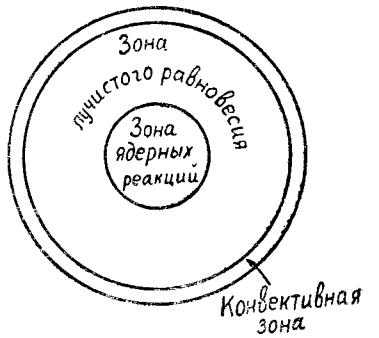

Рис. 82. Схематическое строение солнечных недр.

ности Солнца участвует само вещество — здесь начинается *конвективная зона*. Эта зона очень тонка, не больше 0,10—0,15 радиуса Солнца. Она непосредственно прилегает к фотосфере. На рис. 82 показано схематическое строение солнечных недр.

§ 50. Фотосфера

Фотосфера представляет собой самый глубокий слой Солнца, который доступен наблюдениям и от которого исходит излучение, дающее непрерывный спектр. Потемнение фотосферы к краю свидетельствует о росте температуры в фотосфере с глубиной. Наибольшее излучение некоторого слоя газа происходит с уровня, оптическая толщина которого $\tau \approx 1$[1]. Близ краев солнечного диска оптическая толщина $\tau \approx 1$ достигается во внешних частях фотосферы, где температура меньше, поэтому края и кажутся менее яркими по сравнению с центром солнечного диска (рис. 83).

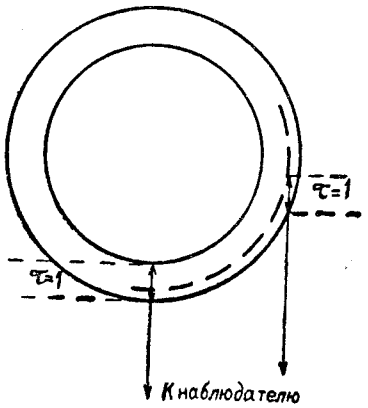

Рис. 83. К объяснению потемнения солнечного диска к краям.

Измерения распределения яркости по диску Солнца дают возможность рассчитать изменение с глубиной таких характеристик фотосферы, как: температура, плотность, давление, — т. е. построить модель фотосферы (таблица 19). В этой таблице геометрические высоты h отсчитываются от некоторого уровня на видимом краю Солнца, для

[1] Оптическая толщина τ некоторого слоя характеризует поглощающие свойства среды и определяется натуральным логарифмом отношения светового потока Φ_0 до прохождения через слой к световому потоку Φ_1, после прохождения через слой $\tau = \ln \Phi_0 \Phi_1$ откуда следует, что световой поток после прохождения слоя ослабляется раз, т. е. $\Phi_1 = \Phi_0 e^{\tau}$ и для силы света $I_1 = I_0 e^{-\tau}$.

Если $\tau = 1$, свет ослабляется в $e = 2{,}718$ раза. При $\tau > 1$ слой становится непрозрачным. При $\tau < 1$ слой оптически тонкий.

Таблица 19

Оптическая глубина τ $\lambda = 5000$Å	Температура (°K)	Глубина h (км)	Газовое давление p (*дин/см²*)	Электронное давление p_e (*дин/см²*)
0,01	4625	+ 50	8 000	0,9
0,1	5090	—200	40 000	6,8
1	6460	—335	125 000	69
7	8260	—450	250 000	2000

которого $\tau = 0{,}0125$, знак «+» указывает направление от центра Солнца.

В центре солнечного диска практически все оптическое излучение фотосферы дает слой с оптической толщиной $\tau \approx 2/3$. Как раз этот слой и имеет температуру, определяемую значением $T_{эфф} = 5800°$ К. Выше расположены более холодные слои фотосферы. Давление p в фотосфере очень невелико[1], толщина фотосферы тоже незначительна, порядка нескольких сотен километров (0,001—0,003 радиуса Солнца). Незначительная толщина фотосферы объясняется высокой непрозрачностью ее вещества, основной причиной которой является отрицательный водородный ион H^- (протон может присоединить к себе два электрона). Быстрое возрастание электронного давления с глубиной (таблица 19) свидетельствует о достаточном количестве свободных электронов, которые здесь образуются за счет ионизации всех химических элементов, кроме водорода. Так как энергия связи электрона с атомом водорода очень невелика ($1{,}2 \times 10^{-12}$ *эрг*), то всякий фотон с энергией $h\nu > 1{,}2 \times 10^{-12}$ *эрг* может быть захвачен отрицательным ионом H^-. Этому условию удовлетворяет излучение с $\lambda < 16650$Å, т. е. ближнее инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое и т. д.

Фотосфера — единственный слой на Солнце, где в условиях самой низкой температуры (около 4500°) имеется нейтральный водород.

Кроме потемнения к краям, фотосфера имеет многочисленные мелкие неоднородности в виде зерен — *гранул*. Это явление называется *грануляцией*. Гранулы, имеющие размеры 1″—1″,5, что соответствует линейным

[1] 1 *атм* = $1{,}013 \cdot 10^6$ *дин/см²*.

расстояниям порядка 700—1000 *км*, — нестойкие образования: просуществовав несколько минут, они незаметно исчезают на однородном фоне фотосферы. Температура гранул примерно на 100° выше температуры окружающей поверхности. Объясняются гранулы конвективными движениями из более горячих областей Солнца (конвективной зоны), при этом в гранулах вещество поднимается, а вокруг них опускается. Скорость этих движений 1—2 *км/сек*.

Конвективная зона значительно протяженнее фотосферы, ее толщина достигает 0,10—0,15 радиуса Солнца. Образование этой зоны обусловлено резким падением температуры Солнца при переходе от центральных областей к внешним. Вглубь фотосферы температура заметно возрастает, а в конвективной зоне это возрастание происходит значительно быстрее: у основания конвективной зоны температура составляет 10^6 градусов. В области конвективной зоны лучистый перенос энергии оказывается недостаточным, чтобы обеспечить наблюдаемое излучение энергии Солнцем в окружающее пространство. В этой области возникает некоторое состояние неустойчивости, которое приводит к тому, что в переносе энергии принимает участие само вещество: возникают восходящие и нисходящие движения вещества. Более горячие небольшие массы вещества как бы всплывают вверх, к поверхности Солнца, менее горячие наружные опускаются вглубь. Эти конвективные движения на поверхности Солнца как раз и проявляются в грануляции.

Фотосфера — это наиболее плотный слой, лежащий в основании солнечной атмосферы. Плотность вещества в фотосфере быстро уменьшается с высотой от значения $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ *г/см*^{3} в глубоких слоях до значения $\sim 0{,}1 \times \times 10^{-7}$ *г/см*^{3} в наиболее высоких. Температура в фотосфере уменьшается с высотой и достигает минимального значения 4500° в верхних слоях ее. Далее температура начинает медленно возрастать до нескольких десятков тысяч градусов. Это нижняя часть солнечной атмосферы — хромосфера.

§ 51. Хромосфера

Во время полных солнечных затмений, когда лунный диск закрывает диск Солнца (фотосферу) в спектре Солнца происходят удивительные превращения: на 1—

1,5 *сек* все фраунгоферовы линии поглощения «вспыхивают», и спектр Солнца превращается в спектр излучения. Получается, что надфотосферный слой, выступающий в это время в виде ободка вокруг диска Луны, когда устранен источник непрерывного спектра дает свой собственный спектр излучения. Когда же через него проходит свет от фотосферы, он поглощает соответствующие длины волн и в спектре фотосферы возникают фраунгоферовы линии.

Визуальные и фотографические наблюдения Солнца во время полного солнечного затмения обнаружили вокруг него яркий ободок розоватого цвета (хромосфера), который поднимается над фотосферой на 10—20″ (до 15000 *км*) и который дальше переходит в обширную серебристо-жемчужную корону, представляющую собой обширную область солнечной атмосферы, простирающуюся иногда на расстояние в несколько солнечных радиусов.

Спектр хромосферы во время затмения получают с помощью призменной камеры[1], для которой хромосфера является как бы серповидной щелью, удаленной на бесконечность. Поэтому линии излучения, даваемые хромосферой, тоже получаются в виде серпов, тем более длинных, чем дальше от фотосферы находится излучающий эту линию химический элемент. Образование спектральных линий, имеющихся в спектре Солнца, начинается уже в самой фотосфере, в ее верхних слоях, где еще имеет место непрерывное поглощение, при этом атомы возбуждаются и переизлучают поглощенную энергию, но так как переизлучение происходит во всех направлениях, в том числе и в направлении к центру Солнца, то в данной линии интенсивность меньше, чем в соседних участках непрерывного спектра. Из сказанного ясно, что линии поглощения образуются в слоях, расположенных выше, чем те, которые дают непрерывный спектр. В слоях, лежащих над фотосферой на высоте 100—200 *км*, оптическая толщина оказывается незначительной для непрерывного спектра (эти слои прозрачны для него) и заметной или даже очень большой для частот спектральных линий. Для линий ионизированного водорода, кальция, гелия (D_3) значительное поглощение сохраняется до

[1] Любой астрограф может быть превращен в призменную камеру, если перед его объективом поместить призму.

больших высот — до 10000 *км*, т. е. указанные линии поглощения образуются на протяжении слоя достаточно большой толщины, который и является хромосферой. В этих линиях до нас доходит излучение из более высоких слоев хромосферы. Так как эти линии очень интен-

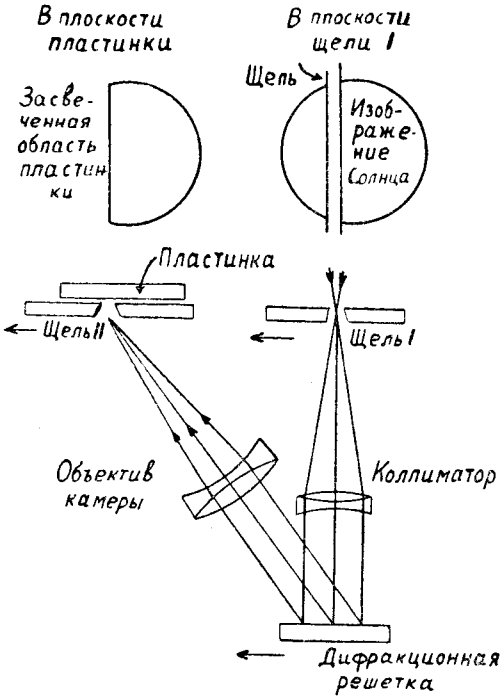

Рис. 84. Схема спектрогелиографа.

сивны, то во время солнечного затмения они определяют цвет хромосферы (самая яркая для глаза красная линия водорода H_α вместе с желтой линией гелия D_3 и др.).

Так как поглощение в указанных спектральных линиях очень велико, особенно в их центральных частях, то это свидетельствует, что излучение в этих линиях исходит с некоторого уровня хромосферы. Чем интенсивнее поглощение, тем на большей высоте над фотосферой образуется такая линия поглощения. Этот факт дает воз-

можность наблюдать и фотографировать хромосферу Солнца на солнечном диске на любой глубине. Для этого с помощью *спектрогелиографа* наблюдается Солнце в узком интервале длин волн, соответствующем центральной части какой-либо линии поглощения (чаще всего используются линии H_α водорода, или K ионизированного кальция).

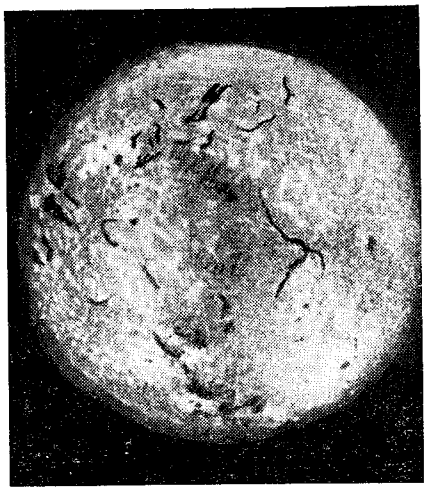

Рис. 85. Спектрогелиограмма Солнца в лучах H_α.

Принцип работы спектрогелиографа состоит в следующем (рис. 84). От щели I, которая пересекает полученное с помощью телескопа действительное изображение Солнца, свет падает на дифракционную решетку или призму; полученный спектр направляется на щель II, которая пропускает на фотопластинку нужную часть спектральной линии, скажем, линии H_α. На фотопластинке получается в лучах H_α изображение полоски диска Солнца, вырезанной щелью I. Так как спектрограф вместе со щелями перемещается, а изображение Солнца и фотопластинка остаются неподвижными, то в щель I попадают все новые полоски солнечного диска, а на фотопластинку каждый раз на новое, соседнее место —

изображение рассматриваемой узкой полоски Солнца в данной спектральной линии. В результате на фотопластинке получается монохроматическое изображение Солнца — *спектрогелиограмма* (рис. 85).

Визуальные монохроматические наблюдения Солнца осуществляются с помощью *спектрогелиоскопа.*

Спектрогелиограмма дает распределение вещества в солнечной атмосфере на некотором уровне. Таким образом, с помощью спектрогелиографа можно изучить слои атмосферы, находящиеся на различной глубине.

Изучение спектрогелиограмм Солнца показывает, что хромосфера неоднородна. В нижних слоях хромосферы имеются кальциевые *факелы* и *факельные поля*, большие светлые образования, подобные факелам фотосферы. В более высоких слоях хромосфера показывает грануляцию, ячейки которой достигают 10″ и которые имеют волокнистое строение. Они называются *флоккулами.* Еще выше появляются темные *волокна.* В лучай H_α, т. е. еще выше, сетка флоккул видна менее отчетливо, а волокна более резко.

На краю солнечного диска хромосферу фотографируют во время солнечных затмений, а также с помощью *внезатменного коронографа*, в котором диск Солнца закрывается. Хорошие фотографии хромосферы, сделанные такими путями, показывают ее волокнистое строение, а также *спикулы*, или струи, яркие образования, которые вытянуты примерно в радиальном направлении. Длина их достигает нескольких тысяч километров. Они недолговечны, «живут» несколько минут. Светлые области и образования в хромосфере (флоккулы, факельные поля, особенно спикулы) указывают на местное повышение температуры на соответствующих уровнях.

Мы уже отмечали, что спектр хромосферы представляет собой спектр излучения, отдельные линии которого очень интенсивны. Кроме того, в спектре хромосферы наблюдаются линии излучения, которые в спектре Солнца не видны (в виде линий поглощения), например, линии гелия. Для того, чтобы атомы излучали некоторые из этих линий, нужны высокие температуры. Например, излучение линии гелия D_3 связано с переходом с очень высокого уровня, для чего необходимы энергии, которыми обладают частицы при температурах порядка 200000° К. Наблюдение линий ионизированных атомов также свидетельствует о высоких температурах в хромосфере. Нижние слои хромосферы более или менее однородны и имеют температуру около 4500—4800° К. Выше 3000—4000 километров появляются спикулы, температура которых до 50000° К. Другими словами, в хромосфере могут сосуществовать холодные и горячие массы газа. Это приводит к бурному перемешиванию вещества, что делает химический состав хромосферы однородным. Наблюдаемые различия в высоте для эмиссионных линий можно объяснить разным количественным содержанием атомов, изменениями в условиях ионизации и возбуждения.

Яркостная температура Солнца, определенная с помощью радиоволн в сантиметровом диапазоне, которые выходят из слоев хромосферы, для хромосферы равна 10000° К. В самых верхних слоях хромосферы (высота около 20000 *км*) наблюдается еще более резкое увеличение температуры — свыше 10^5 градусов. Здесь начинается солнечная корона. Разреженность вещества на этих высотах порядка 10^{-15} *г/см*^{3}.

Причина разогрева верхних слоев солнечной атмосферы связывается с процессами, происходящими в конвективной зоне и фотосфере. Конвективные ячейки — гранулы, поднимаясь, приводят фотосферу в колебательное движение, в результате чего рождаются упругие волны, а также и магнито-гидродинамические. Так как плотность среды с высотой уменьшается, скорость распространения этих волн увеличивается. Когда скорость такой волны превосходит скорость звуковых волн, образуется ударная волна, приводящая к диссипации энергии, за счет чего происходит нагрев масс газа, т. е. увеличиваются скорости теплового движения частиц. В нижних частях хромосферы этот разогрев незначительный, так как большая часть энергии, приносимой волнами, идет на ионизацию водорода. Но с высоты в 3000—4000 километров этот нагрев идет быстро.

§ 52. Солнечная корона

Яркость солнечной короны по сравнению с фотосферой незначительна, поэтому наблюдать ее можно во время полных солнечных затмений, а вне затмений с помощью коронографа.

Корона не имеет правильной формы (рис. 86) и постепенно, уменьшаясь в яркости, сливается с общим фоном неба, простираясь от поверхности Солнца на несколько солнечных радиусов.

В короне много деталей: лучи, перья, арки, шлемы и др. Особенностью ее является лучистое строение. Лучи иногда достигают десятка солнечных радиусов.

Спектр короны состоит из трех составляющих: слабый непрерывный спектр, повторяющий непрерывный спектр Солнца (это К-составляющая спектра короны); яркие эмиссионные линии, интенсивность которых уменьшается с удалением от Солнца (L-составляющая); фраунгоферов спектр (F-составляющая), который хорошо заметен во внешней короне и ничем не отличается от спектра солнечной фотосферы. Излучение короны поляризовано.

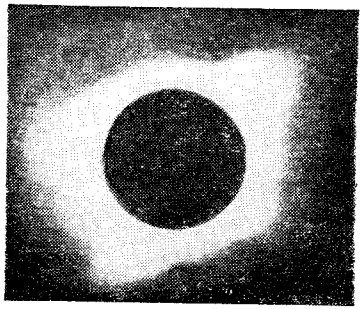

Рис. 86. Солнечная корона.

Непрерывный спектр короны, воспроизводящий непрерывный спектр Солнца, образуется в результате рассеяния солнечного излучения быстро движущимися свободными электронами короны. Рассеяние света свободными электронами сопровождается поляризацией света, что также имеет место в короне. Большие скорости электронов указывают на высокую температуру в короне (порядка 10^6 градусов).

К выводу о высокой температуре короны приводит также анализ эмиссионного спектра. Долгое время корональные линии излучения не находили объяснения, так как в лабораторных условиях они не наблюдаются. Был даже придуман неизвестный на Земле газ «короний», которому приписывали эти линии. Лишь в 40-е годы нашего века шведский физик Бенгт Эдлен расшифровал спектр короны. Оказалось, что эти линии излучаются многократно ионизованными атомами Fe, Ni, Ca, Ar при запрещенных переходах. Так, наиболее интенсивная зеленая линия λ 5303Å испускается ионом железа Fe XIV, лишенным 13 электронов. Такая высокая ионизация вещества требует больших энергий в сотни электрон-вольт (например, потенциал ионизации FeXIV 355 *в*, необходимая для этого температура $2{,}5 \cdot 10^6$ °К). Интенсивность излучения в короне слишком мала, чтобы вызвать такую ионизацию. Причиной ее являются столкновения атомов с быстрыми свободными электронами, движущимися со скоростями, достигающими многих тысяч километров в секунду. Это возможно лишь при условии, что температура короны порядка миллиона градусов. Для появления запрещенных линий нужна очень разреженная среда. Это условие выполняется в короне: на границе с хромосферой концентрация частиц сосавляет 10^9 *см*$^{-3}$, а на расстоянии $3R_C$ — 10^6 см$^{-3}$.

Таким образом, вещество короны представляет собой разреженную горячую плазму.

Фраунгоферовы линии во внешней короне создаются в результате рассеяния света Солнца частицами пыли, движущимися в межпланетном пространстве. F-корона (фраунгоферова корона) бесструктурна и не имеет отношения к солнечной короне.

Причина высокого разогрева короны та же, что хромосферы, это диссипация упругих волн, распространяющихся снизу, которые в менее плотной среде превращаются в ударные волны и нагревают слои хромосферы и нижней короны. Создающийся в этих областях короны запас тепла передается во внешнюю корону путем теплопроводности.

§ 53. Радиоизлучение спокойного Солнца. Сверхкорона

Впервые радиоизлучение Солнца было обнаружено в 1942—43 гг. на метровых волнах.

Радиоизлучение Солнца состоит из двух компонент: постоянной и спорадической. Первая компонента называется *излучением спокойного Солнца*, вторая связана с активными образованиями на Солнце и называется *радиоизлучением возмущенного Солнца*. Радиоизлучение спокойного Солнца по своей природе представляет собой тепловое излучение[1]. Оно, вообще говоря, не

[1] Солнечное радиоизлучение представляет собой излучение, выходящее из высокотемпературной плазмы (хромосфера, корона). Излу-

является постоянным, испытывает некоторые изменения со временем.

Солнце излучает во всем диапазоне принимаемых на Земле радиоволн: от коротких миллиметровых до метровых радиоволн. При этом коротковолновое излучение исходит из больших глубин (вплоть до областей нижней хромосферы), а длинноволновое — из короны, из тем более высоких ее слоев, чем больше длина волны. Этот вывод сделан на основе измерения яркостной температуры Солнца по радиоизлучению: температура зависит от длины волны: на сантиметровых и миллиметровых волнах температура имеет значение порядка 10000° К и мень-

---

чение, даваемое плазмой, считается тепловым, если оно возникает в слое с равновесным распределением частиц. В противном случае излучение называется нетепловым.

Излучение плазмы складывается из следующих элементарных процессов:

1) тормозного излучения при близких соударениях заряженных частиц;

2) магнитно-тормозного излучения при ускоренном винтовом движении заряженных частиц в магнитном поле (такое излучение релятивистских частиц называется также синхротронным);

3) черенковского излучения при движении частиц со скоростью большей фазовой скорости волн в данной среде;

4) переходного излучения при движении частиц в неоднородной среде;

5) излучения при атомных и молекулярных процессах (при переходах свободных электронов на энергетические уровни и при пепереходах атомов и молекул между энергетическими уровнями), а также из излучения, которое возникает при всяком изменении свойств плазмы, имеющем периодический характер (возбуждение электромагнитного излучения при прохождении плазменных волн) или характер «толчка», выходящего плазму из равновесия (излучение, вызываемое возникновением в плазме магнито-гидродинамических и упругих волн).

Основная задача, связанная с объяснением радиоизлучения Солнца, состоит в том, чтобы, исходя из анализа отдельных компонент этого излучения и физического состояния солнечной атмосферы, выбрать из перечисленных механизмов возбуждения радиоволн наиболее подходящие и создать количественную теорию радиоизлучения Солнца, на основе которой можно было бы получить новые данные о физике солнечной атмосферы. Эта задача пока окончательно не решена.

Радиоизлучение спокойного Солнца генерируется в условиях стационарной атмосферы, когда распределение частиц в ней близко к равновесному (максвелловскому), поэтому постоянная составляющая солнечного радиоизлучения (В-компонента) имеет характер теплового излучения. Механизмом этого излучения является тормозное излучение электронов при соударениях их с ионами (свободно-свободные переходы электронов в кулоновском поле ионов).

ше, а на метровых волнах она достигает миллиона градусов.

Солнечная корона, хорошо пропускающая видимое излучение, является почти непрозрачной для радиоволн. Радиоволны в ней сильно поглощаются, а также испытывают сильное преломление. На основании выводов теории о распространении радиоволн в корональной плазме следует, что число электронов в 1 $см^3$ n_e не превосходит во внутренней короне $n_e = 10^8$ $см^{-3}$.

Распределение радиояркости Солнца сложно и меняется в зависимости от длины волны. В метровых волнах радиокорона прослеживается до расстояний в два радиуса Солнца от его центра и еще дальше, на расстояние до нескольких десятков радиусов. Если Солнце при движении по эклиптике надвигается и загораживает короной какой-либо радиоисточник, в таких случаях радиоисточник просвечивает сквозь радиокорону Солнца. Результатом затмения солнечной короной радиоисточника является увеличение угловых размеров этого источника и ослабление радиопотока, идущего от него, вследствие поглощения и преломления в короне. Такие эффекты, в частности, наблюдаются ежегодно при затмениях радиоисточника Крабовидной туманности в Тельце. Обнаруженные этим способом наиболее далекие области солнечной короны (до $20R_C$ и даже до $55R_C$ в экваториальной плоскости Солнца) образуют *сверхкорону*.

§ 54. Проявление солнечной активности

В атмосфере Солнца постоянно существуют местные возмущения: пятна, факелы, флоккулы, хромосферные вспышки, протуберанцы и др. Эти образования тесно связаны между собой и группируются в так называемые центры активности. В некоторые годы центров активности на Солнце очень много, в другие годы их число незначительно. Так как количество различных образований в солнечной атмосфере изменяется периодически, то это позволяет говорить о *циклах солнечной активности*. В годы минимумов активности Солнце можно рассматривать как спокойное, а в годы максимумов — как возмущенное.

Как теперь установлено, общей причиной солнечной активности является магнитное поле Солнца.

1. Магнитные поля на Солнце

Впервые магнитные поля на Солнце были обнаружены в области солнечных пятен (1908 г.). В настоящее время, кроме сильных магнитных полей в области пятен, считается установленным наличие общего магнитного поля Солнца. Современные магнитометры могут обнаруживать на Солнце поля напряженностью до 0,3 *э*.

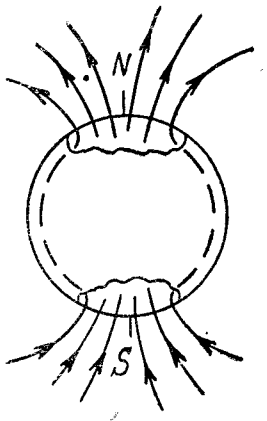

Рис. 87. Модель магнитного поля Солнца.

В высоких гелиографических широтах, где отсутствуют центры активности, общее магнитное поле Солнца, видимо, близко к дипольному. Его напряженность около 1 *э*. В более низких широтах общее магнитное поле маскируется сильными локальными полями активных образований, в частности, пятен. Предполагается, что в этих областях общее магнитное поле заключено в тонком поверхностном слое (рис. 87). Оно вморожено в вещество Солнца [1].

Полярность общего поля Солнца периодически меняется. Так, во время максимума солнечной деятельности в 1957—58 гг. направление магнитного поля Солнца изменилось на противоположное.

Существует ряд предположений для объяснения возникновения поля Солнца, но общепринятой гипотезы пока нет.

2. Солнечные пятна

Солнечные пятна представляют собою наиболее наглядные примеры нестационарных процессов на Солнце. Иногда очень быстро (2—3 дня) на «чистом» месте фотосферы развивается большое пятно или группа пятен.

[1] Наблюдения в Крымской астрофизической обсерватории над тонкой структурой магнитных полей, начатые в 1963 году, приводят к выводу, что магнитное поле Солнца не может быть полем диполя.

Образование пятна начинается с крошечной *поры*, появляющейся между гранулами. Через день пора развивается в круглое темное пятно с резкой границей, диаметр которого постепенно увеличивается (до нескольких десятков тысяч километров). Рост пятна сопровождается увеличением напряженности магнитного поля

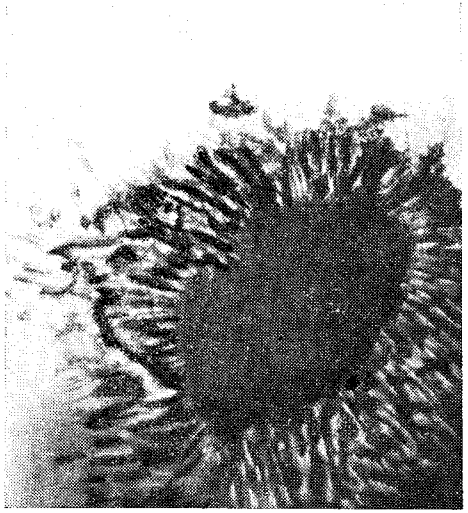

Рис. 88. Тень и полутень пятна.

внутри пятна. Через 1—2 дня после возникновения пятно разделяется на два, одно из которых называется *ведущим*, другое — *ведомым*. Такие два пятна образуют *биполярную* группу, так как их магнитные поля имеют противоположную полярность. Обычно вслед за первой порой появляются другие и развивается целая группа пятен. Группа пятен бывает растянута по широте (до 20° и больше). В группе часто намечаются два самых крупных пятна. Кроме групп, образуются и отдельные пятна (парами или в одиночку).

Развитие больших групп пятен достигает максимума через 2—3 недели. Малые группы и пятна появляются и исчезают в течение недели, крупные могут существовать месяцами.

Хорошо развитое пятно состоит из более темной центральной части, называемой *тенью*, и окружающей тень более светлой части — *полутени* (рис. 88). В области те-

ни, пока пятно еще мало, наблюдается грануляция, которая потом принимает волокнистый вид. По форме пятно представляет собой конусообразную воронку. Спектральные измерения показывают наличие сильных движений (скорость до 3 *км/сек*) в области пятна: растекание вещества в пятне в области полутени и втекание вещества к центру пятна в высоких областях над пятном (в хромосфере). Напряженность магнитного поля в пятнах достигает 1000—2000 *э*. В центре силовые магнитные линии идут по оси пятна вверх или вниз, при приближении к краю пятна наклон силовых линий уменьшается до положения касательной к поверхности. Напряженность поля убывает от максимума в центре пятна почти до нуля на его краях. Измерения температуры в области пятна дают значения $T_{эфф}=4600°$ К. Таким образом, пятно — это более холодный участок фотосферы.

Количество пятен периодически меняется через 11 лет. В течение одного периода (цикла солнечной деятельности), полярности ведущего и ведомого пятен в северном и южном полушарии Солнца противоположны. Так, если для северного полушария ведущее пятно имеет полярность N, а ведомое — S, то в южном полушарии полярность ведущего пятна — S, а ведомого N. В следующем цикле происходит смена полярностей пятен между северным и южным полушарием. Кроме смены магнитной полярности пятен, указанием на конец цикла является рождение пятен нового цикла, которые появляются в больших широтах (до 40—45°), хотя зона основных пятен во время максимума солнечной деятельности заключена между 20° и 5°. В момент появления пятен нового цикла еще наблюдаются последние пятна уходящего цикла близ экватора. По мере развития цикла новые пятна образуются все ближе и ближе к экватору. Если учитывать и магнитные свойства пятен, то период изменения деятельности Солнца составит не 11 лет, а 22 года.

Сильные магнитные поля в области пятен, а также образование самих пятен объясняются наличием общего магнитного поля Солнца. Так как магнитные силовые линии общего поля вморожены в солнечное вещество, то они участвуют во вращательном движении Солнца. Из-за дифференциальности этого вращения (у экватора скорость вращения больше, чем в полярных областях) магнитные силовые линии вытягиваются, что приводит к усилению поля. Еще большее усиление поля (до $H\approx 10^3$ *э*) появляется вследствие скручивания магнитных силовых трубок, которое может быть вызвано, в частности, конвекцией вещества. При определенном значении напряженности H магнитного поля может возникнуть «магнитная всплываемость». В результате на поверхности Солнца появляются сильные местные магнитные поля. Подъем и выход на поверхность петель, образованных скрученными магнитными силовыми трубками (магнитных вихрей), приводит к образованию пятен и вообще активных областей, так как магнитные силовые линии выходят далеко за поверхность Солнца в хромосферу и корону.

Более низкая по сравнению с окружающей фотосферой температура пятен объясняется влиянием магнитного поля на конвекцию. Так как магнитные силовые линии вморожены в солнечное вещество, то движение вещества приводит к их изгибу, что в случае сильного магнитного поля препятствует дальнейшему перемещению вещества. Сильное магнитное поле, таким образом, подавляет движение вещества в конвективной зоне под пятнами, в результате чего уменьшается приток энергии в область пятен.

Если напряженность магнитного поля недостаточно велика, то поле не в состоянии прекратить конвекцию и пятна не образуются.

3. Факелы, флоккулы

Небольшие магнитные поля, которые существуют по краям пятен, способствуют усилению конвекции, в результате чего за счет избыточного потока конвекционного тепла нагреваются области вокруг пятен в фотосфере и выше.

В фотосфере образуются светлые *факелы* — яркие области, окружающие группы пятен или существующие самостоятельно. Температура факелов больше соседней невозмущенной фотосферы на 200—300°. Лучше всего они видны близ края солнечного диска. Факелы — сравнительно устойчивые образования солнечной поверхности, они могут существовать в течение нескольких недель и даже больше.

В хромосфере над факелами образуются кальциевые и водородные *флоккулы* (возмущенная хромосфера). При этом водородные флоккулы теснятся над центральной частью пятна, а кальциевые флоккулы распределяются по большей площади и определяют границу активной области. Повышенную яркость флоккул можно объяснить увеличением плотности вещества в хромосфере в 3—5 раз.

4. Хромосферные вспышки

Самыми мощными и быстро развивающимися проявлениями солнечной активности являются хромосферные вспышки. Во время хромосферной вспышки в течение нескольких минут происходит усиление яркости одного

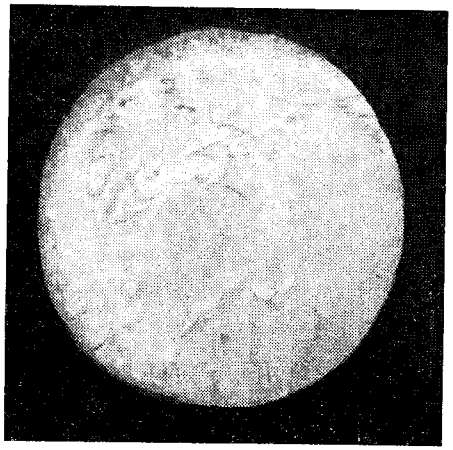

Рис. 89. Хромосферная вспышка.

из светлых мест флоккула во всех спектральных линиях во много раз (рис. 89). Затем вспышка постепенно ослабевает. Чаще всего вспышка наблюдается в свете линии H_α.

Самые сильные хромосферные вспышки (за последнее столетие такие наблюдались 17 раз) бывают видны и в интегральном свете, что свидетельствует о возрастании температуры в области вспышки.

Во время вспышки происходит усиление рентгеновского излучения, появляются всплески радиоизлучения, активизируются спокойные протуберанцы и образуются

протуберанцы-выбросы, излучаются космические лучи. Видимо, вспышка представляет собой кратковременный процесс взрывного характера в небольшой области Солнца.

Вспышки, как и другие проявления солнечной активности, связаны с магнитными полями. Установлено, что вспышки образуются в тех местах, где магнитное поле меняет полярность. Магнитное давление сжимает газ, и близ границы раздела полярности образуется две быстро сходящиеся ударные волны. В месте встречи температура может подняться до миллиона градусов. В таких условиях становится возможным излучение во всех диапазонах частот и даже могут идти термоядерные реакции. Но окружающая хромосфера нагревается при этом незначительно. Радиоволны длиной 4,3 *мм*, исходящие из хромосферы, во время вспышки дали значение яркостной температуры 14000° К (вместо 7000° К в спокойных частях солнечного диска).

5. Проявление солнечной активности в короне

Структура короны тесно связана с проявлением активности в более низких слоях атмосферы. От фазы солнечной деятельности зависят, в частности, размеры и форма короны и протяженность ее лучей. Во время максимума солнечной активности корона имеет хорошо развитые лучи по всем направлениям и в связи с этим более или менее симметричную форму. В периоды низкой активности корональные лучи сосредоточены в основном близ экватора, хотя и могут быть очень протяженными. В это время корона на полюсах похожа на щеточки, которые значительно короче, чем экваториальные лучи.

Активные образования в короне: арки, устойчивые лучи, шлемы и т. д., представляющие собой *корональные конденсации* — уплотнения вещества короны, — обычно располагаются над активными областями фотосферы и хромосферы. Например, наиболее мощные корональные лучи наблюдаются над факелами, протуберанцы, как правило, бывают окружены корональными образованиями, часто встречающиеся в корональных конденсациях петли и арки своими концами располагаются над группами пятен или факелов (они обычно связывают

магнитные области различной полярности в одном центре активности).

С активными областями в короне непосредственно связаны центры усиленной интенсивности радиоизлучения, исследование которого позволяет получить температуру корональных конденсаций в радиодиапазоне. Во время хромосферных вспышек она оказывается высокой (5—10 млн. градусов).

Все корональные образования свидетельствуют о существовании магнитных полей в короне. Корональные лучи и другие структурные формы короны вращаются вместе со всем Солнцем. Это вращение короны может быть обеспечено только наличием магнитных полей в ней, силовые линии которых создают как бы жесткий «каркас» короны. Магнитные поля в короне являются продолжением общего магнитного поля Солнца, выходящего на его поверхность и поднимающегося далеко в атмосферу. Корональные образования, видимо, связаны с особенностями этих магнитных полей.

6. Протуберанцы

Протуберанцы (рис. 90, 91), представляющие собой облака раскаленных газов, подобных по физическим свойствам веществу хромосферы, выступают над хромосферой в корону на высоту в несколько десятков тысяч километров. Их легко наблюдают в лучах H_α и CaII K. Они разделяются на *спокойные* и *активные* (движущиеся).

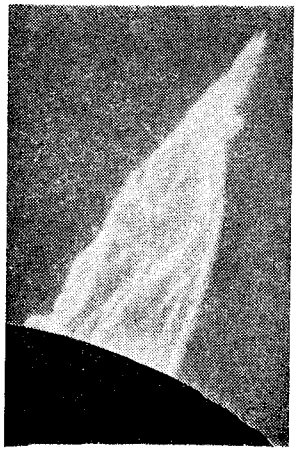

Рис. 90. Протуберанец.

Рис. 91. Этот протуберанец на краю Солнца достиг высоты 225 тыс. км.

Спокойные протуберанцы — очень длинные и плоские образования, расположенные почти перпендикулярно к поверхности Солнца. Их типичные размеры: длина — 200 000 *км*, высота —50 000 *км*, ширина 10 000 *км*. Время видимости спокойных протуберанцев — несколько дней.

На краю солнечного диска спокойные протуберанцы видны в виде ярких выступов, а при проектировании на диск имеют вид темных лент, называемых *волокнами*.

Хотя спокойные протуберанцы и являются принадлежностью невозмущенного Солнца, они часто располагаются вблизи групп солнечных пятен или факелов.

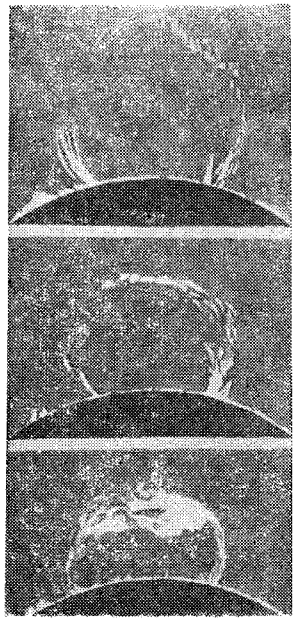

Рис. 92. Ряд последовательных фотографий протуберанца.

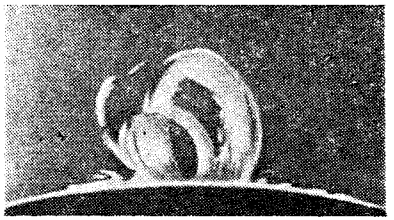

Рис. 93. Гигантский петлеобразный протуберанец.

Протуберанцы представляют собой плотные массы, окруженные корональным веществом. Поддерживаются они магнитными полями.

Активные протуберанцы характеризуются быстрым развитием, существуют недолго и всегда наблюдаются в активных центрах (над зонами пятнообразования, в области вспышек). Для их изучения используется киносъемка (рис. 92).

Меньшая часть активных протуберанцев связана с подъемом в корону хромосферного вещества, большая их часть представляет собой результат конденсации вещест-

ва в короне и спуск его в хромосферу. Движение протуберанцев происходит со скоростями в десятки и даже сотни километров в секунду. Часто протуберанцы втягиваются в солнечное пятно и исчезают, в других случаях в короне создается непрерывно фонтанирующая точка, откуда вещество течет вниз к пятну. В фонтанирующей области короны вещество оказывается уплотненным.

Иногда внезапно взрывается часть спокойного протуберанца, а через некоторое время все возвращается к первоначальному виду, иногда «взрывной» процесс начинается на «пустом» месте. Такие *эруптивные* (взрывные) протуберанцы достигают большой высоты (наблюдался один случай подъема до высоты 1 700 000 *км*). В группе эруптивных протуберанцев выделяют «*протуберанцы солнечных пятен*», которые появляются в хромосфере или короне над группами пятен и характеризуются разнообразием форм: арки, петли, воронки (рис. 93). Такие протуберанцы тесно связаны с корональными конденсациями, т. е. с местами наиболее высокой температуры.

7. Спорадическое радиоизлучение и корпускулярное излучение Солнца

Наряду с тепловым радиоизлучением на дециметровых и метровых волнах Солнце является источником мощного нетеплового радиоизлучения[1], которое имеет характер внезапных усилений или вспышек. Эти вспышки солнечного радиоизлучения принято называть *всплесками,* они составляют спорадическое радиоизлучение Солнца.

Очень часто всплески радиоизлучения удается связать с видимыми активными образованиями в солнечной атмосфере и корональными конденсациями.

С хромосферными вспышками связаны нетепловые радиовсплески на метровых волнах. Они весьма разнообразны по форме, частоте, интенсивности и разделяются на несколько типов. С начальной фазой вспышек совпадают изолированные выбросы радиовсплесков (III тип), которые длятся несколько секунд. Центры таких всплесков распространяются в короне со скоростями до 100 000 *км/сек*.

[1] См. В. В. Железняков, Радиоизлучение Солнца и планет, «Наука», М., 1964.

Максимальный поток радиоизлучения всплесков этого типа примерно в 1000 раз превышает поток спокойного Солнца на метровых волнах.

Другого типа радиовсплески (II тип) длятся минуты и десятки минут, они наблюдаются в большом диапазоне частот от 33 *м* до нескольких миллиметров и дают сильное возрастание радиоизлучения Солнца. Если принять это излучение на λ 10 *м* за тепловое, то соответствующая температура получается в 10^{12} градусов. Для нетеплового радиоизлучения этот результат не имеет физического смысла, но зато он характеризует общую мощность процесса. Эти всплески перемещаются со скоростями до 1000 *км/сек* и исходят из хромосферных вспышек или протуберанцев. Наблюдаются всплески этого типа крайне редко.

Перед концом хромосферной вспышки в короне начинается излучение в виде шумовой бури (I тип), которое состоит из множества коротких всплесков продолжительностью 0,2—0,5 *сек.*, хотя сама буря может длиться часами и сутками. Всплески этого типа связаны с солнечными пятнами, хотя наблюдаются в конце жизни вспышек.

Солнце является источником мягкой составляющей космических лучей (протоны и ядра других элементов) с энергией до 10^{10} *эв*. Еще до использования счетчиков космических частиц, выносимых за пределы земной атмосферы, было известно, что интенсивность вторичных космических лучей (приходящих на поверхность Земли) резко возрастает во время мощных хромосферных вспышек, при этом наблюдается запаздывание начала ливня вторичных космических лучей до 2,5 часов по отношению к началу вспышки. Это заставляет допустить, что образование космических частиц на Солнце происходит в горячих корональных областях под воздействием начавшегося от хромосферной вспышки механизма. Этот механизм дает начало еще одному виду радиовсплесков (IV тип), которые тоже запаздывают по сравнению с началом вспышки до 1,5 часов.

Помимо космических лучей, вспышки сопровождаются выбросом корпускулярных потоков, состоящих из протонов и электронов со скоростями до 1000 *км/сек*.

С корпускулярным излучением вспышек связано также увеличение мощности рентгеновского излучения, ко-

торое фиксируется через несколько минут после вспышки.

Перечисленные явления, так или иначе связанные с хромосферными вспышками, свидетельствуют, что в месте столкновения ударных волн, дающих начало вспышке, образуются частицы двух типов: электроны, движущиеся со скоростями порядка 100 000 *км/сек*, которые, проходя через атмосферу возбуждают плазменные колебания, наблюдаемые в виде радиоизлучения III типа; и медленные протоны и электроны (скорости порядка 1000 *км/сек*), которые возбуждают плазменные колебания II типа. Частоты этих колебаний уменьшаются по мере проникновения потока корпускул в более верхние слои атмосферы.

Рентгеновское излучение порождается в результате торможения быстрых электронов в магнитных полях и в результате столкновения их с частицами вещества хромосферы.

8. Влияние Солнца на Землю

Воздействие Солнца на всевозможные процессы на Земле огромно. Особенно велико энергетическое влияние его, хотя вся Земля получает лишь одну двухмиллиардную долю солнечного излучения.

О некоторых воздействиях солнечной деятельности на геофизические процессы на Земле и близ нее мы уже говорили (§§ 39, 54).

Укажем еще на ряд геофизических явлений, которые наблюдаются во время бурных проявлений солнечной активности, во время хромосферных вспышек:

1. Внезапное прекращение радиосвязи через дневную половину Земли на λ 15—60 *м*.

2. Внезапное усиление атмосферных помех и радиосигналов от далеких радиостанций на длинных волнах ($\lambda > 10$ *км*).

3. Магнитные бури, наступающие примерно через сутки (17—21 *час*) после вспышки.

4. Полярные сияния, как правило, совпадающие с магнитными бурями и другими возмущениями в земной атмосфере.

Первые два эффекта связаны с электромагнитным воздействием Солнца на земную ионосферу, а последние с корпускулярными потоками.

ГЛАВА V

ЗВЕЗДЫ

§ 55. Спектральная классификация звезд

Мы уже отмечали, что спектры звезд пересечены многочисленными фраунгоферовыми линиями, наличие которых свидетельствует об ослаблении излучения звезды по каким-то причинам в определенных длинах волн по сравнению с соседними местами непрерывного спектра. Сам факт существования в спектрах звезд линий поглощения указывает на то, что поверхностные слои звезд представляют собой разреженные атмосферы, в которой происходит поглощение излучения, идущего из более плотных и горячих глубин. Фраунгоферовы линии позволяют судить не только о химическом составе атмосферы звезды, но и о физическом состоянии составляющих ее химических элементов (нейтральные или ионизированные атомы, молекулярные соединения).

Спектры звезд чрезвычайно разнообразны, но, как оказалось, многие звезды имеют сходные спектры. Это дало возможность разделить звезды на группы (*классы*) таким образом, чтобы звезды, отнесенные к одной группе обладали спектрами, сходными в основных чертах. Кроме того, было обнаружено, что спектры этих групп образуют последовательность, в которой соседние спектры мало отличаются друг от друга. Так была создана *спектральная классификация звезд*. Наиболее удачной оказалась гарвардская спектральная классификация звезд, созданная к двадцатым годам нашего столетия. Результаты этой работы составили «Дрэперовский каталог» звездных спектров (сокращенное обозначение HD, поэтому запись HD 187432 обозначает звезду, записанную в этом каталоге под номером 187432). К настоящему времени клас-