

ГЛАВА 9 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ¹⁾

¹⁾ Сейчас уже является общепризнанным, что малая средняя плотность планет-гигантов объясняется тем, что они состоят из плотного ядра, окруженного несравненно менее плотной оболочкой. Нет оснований считать, что состав ядер планет-гигантов отличается от состава Земли, кроме еще большей плотности этих ядер из-за большего навления в глубине».

О. Ю. Шмидт, «Четыре лекции о теории происхождения Земли».

В настоящее время космическая эра «коснулась» и планет-гигантов: 4 декабря 1973 г. впервые космический аппарат «Пионер-10» пролетел мимо Юпитера и перешел на Землю результаты измерений различных физических полей Юпитера и его фотографии. Ровно через год (2 декабря 1974 г.) аппарат «Пионер-11» пролетел на еще более близком расстоянии от планеты, выполнил детальные измерения и, развернутый мощным гравитационным полем Юпитера, направился в сторону Сатурна. Трактория «Пионера-11» такова, что по дороге к Сатурну он выйдет из плоскости эклиптики на полторы астрономические единицы²⁾. Это позволит исследовать космическое пространство вдали от планетных орбит. В 1979 г. «Пионер-11» должен пройти между поверхностью Сатурна и его кольцами и передать научную информацию на Землю. Если Юпитер находится на расстоянии 5,2 а. е. от Солнца, Сатурн — 9,5 а. е., то Уран — следующая после Сатурна большая планета — отстоит от Солнца на расстоянии 19,2 а. е. Не исключено, что «Пионер-11» после Сатурна направит-

¹⁾ Наше изложение основано на работах, выполненных в Институте физики Земли АН СССР им. О. Ю. Шмидта автором совместно с В. П. Трубицыным, А. В. Макалкиным и И. А. Паревским.

²⁾ Астрономическая единица (а. е.) равна среднему расстоянию Земли от Солнца; 1 а. е. = 149,6 млн. км. В плоскости эклиптики расположена орбита Земли, а орбиты всех остальных планет близки к этой плоскости.

ся к Урану. Этот путь займет десятилетие, но, видимо, источников питания аппаратуры будет недостаточно, чтобы исследовать и передать информацию на Землю о третьей большой планете. Последняя большая планета — Нептун, удалена от Солнца на 30 а. е. Все планеты-гиганты обладают спутниковыми системами (см. табл. 13). В планетах группы Юпитера сосредоточена почти вся планетная масса и подавляющая часть момента количества движения Солнечной системы. Поэтому изучение планет-гигантов является ключевым вопросом в проблеме происхождения и эволюции Земли и планет Солнечной системы.

9.1. СОЗДАНИЕ ВОДОРОДНОЙ КОНЦЕПЦИИ ЮПИТЕРА И САТУРНА

Первые работы о моделях Юпитера и Сатурна принадлежат Джеффрису (1923—1924 гг.). Он использовал неравенство

$$\rho_s \leq \frac{5}{2} \frac{I}{MR^2} \cdot \rho \quad (66)$$

для оценки поверхностной плотности планеты ρ_s через ее массу M , средний радиус R , среднюю плотность ρ и средний момент инерции I . Величины M и R были известны из наблюдений, ρ легко вычислить по M и R , а I было вычислено по формуле Радо — Дарвина (64) через J_2 и динамическое сжатие α [формула (63)]. Для Юпитера и Сатурна по наблюдениям за движением ближайших к планетам естественных спутников были определены два первых четных гравитационных момента J_2 и J_4 (см. табл. 13). В результате внешний гравитационный потенциал для обеих планет имеет вид

$$V(r, \theta) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 J_2 P_2(\cos \theta) - \left(\frac{a}{r}\right)^4 J_4 P_4(\cos \theta) - \dots \right\}, \quad (67)$$

т. е. соответствует полю гидростатически равновесной планеты (см. § 2.4). Используя формулу (66), Джеффрис получил $\rho_s < 0,8 \text{ г/см}^3$ для Юпитера и $\rho_s < 0,4 \text{ г/см}^3$ для Сатурна. Джеффрис не придал должного значения этим цифрам, так как в то время не было известно достаточно

распространенных в космосе веществ, которые в твердом состоянии обладали бы такими низкими плотностями. Соответственно первая модель Юпитера была построена так, чтобы обойти трудность с низкой поверхностной плотностью. Предполагалось, что Юпитер состоит из каменистого ядра, мантии из воды и углекислоты в твердом состоянии и очень разреженной, но глубокой атмосферы. В результате атмосфера, не влияя существенно на массу планеты, существенно увеличивала ее радиус, который определялся по общему слою.

Независимо от Джеффриса советский астроном академик В. Г. Фесенков (1924 г.) указал, опираясь на те же соображения, что лишь плотность водорода и гелия может отвечать наружным слоям этих планет. Однако данные о распространенности элементов опять-таки не позволили В. Г. Фесенкову настаивать на своем фундаментальном заключении. Через 10 лет американский астрофизик Вильдт (1934 г.) отметил, что вывод Джеффриса следует понимать буквально, и предложил модель: твердое ядро ($\rho_1 = 5,5 \text{ г/см}^3$ — средняя плотность Земли), оболочка из льда ($\rho_2 = 1,0 \text{ г/см}^3$), наружная оболочка из оторвавшихся водорода и гелия ($\rho_3 = 0,35 \text{ г/см}^3$). Незвестны радиусы двух поверхностей раздела определялись по средней плотности и моменту инерции. Работа Вильдта еще не озаглажена создания водородной концепции планет-гигантов.

Водородная проблема, как мы ее понимаем сейчас, ведет свое начало с работы американских физиков Вилнера и Хантингтона (1935 г.) о металлизации водорода. По существу, с этой же работы начинается проблема фазовых переходов диэлектрик — металл. При обычных условиях и сравнительно небольших давлениях молекулярный водород представляет собой диэлектрик. Однако, как впервые показали Вигнер и Хантингтон, если его сжать до давлений $\sim 10^6 \text{ бар}$, водород из молекулярной фазы перейдет в металлическую, т. е. превратится в простейший одновалентный металл с плотностью $\sim 1 \text{ г/см}^3$.

В 1937 г. норвежский геохимик Гольдшмидт публикует первую таблицу космической распространенности элементов, из которой следовало, что водород наиболее распространенный элемент в Солнечной системе и Вселенной.

После этих работ Вильдт (1938 г.) реинтерпретирует свою модель 1934 г., приняв $\rho_2 = 1,0 \text{ г/см}^3$ (плотность металлического водорода), $\rho_3 = 0,35 \text{ г/см}^3$ (плотность молекулярного водорода). Создание водородной концепции

Юпитера и Сатурна было завершено в 1951 г. в работах В. Г. Фесенкова и А. Г. Масевич в СССР, Рамзев в Англии и Де Маркуса в США.

Юпитер и Сатурн являются водородо-гелиевыми планетами. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно обратиться к рис. 31, на котором приведены кривые массы — радиус для планет, состоящих из чистого водорода и чистого гелия. Мы видим, что как строение Юпитера, так и строение Сатурна хорошо соответствуют водородной кривой. Это обстоятельство, конечно, не случайно. Водород — наиболее распространенный элемент в Солнечной системе, звездах и межзвездной среде, а гравитационное поле планет-гигантов таково, что оно способно удерживать водородную атмосферу в течение времени существования планет.

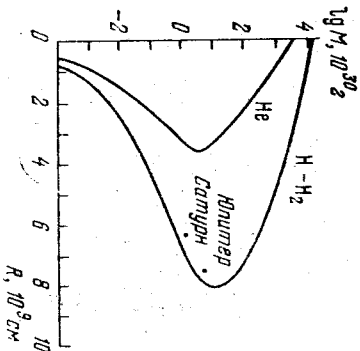


Рис. 31. Диаграмма массы — радиуса для планет, состоящих из водорода и чистого гелия.

Вторым по обилию элементом во Вселенной является гелий. Обилие гелия по числу частиц таково, что отношение $H/He \sim 10$. Обращаясь к рис. 31, мы видим, что планеты Юпитер и Сатурн несколько смещены с водородной кривой в сторону гелиевой кривой. В связи с этим естественно ожидать в обеих планетах существование примеси гелия. Определение концентрации гелия в обеих планетах является важнейшей задачей физики планет и имеет большое значение для космогонии. Искомое отношение устанавливается, если построена модель планеты. Остальные элементы, например, кислород, углерод, азот, кремний, железо и др. встречаются гораздо реже, чем водород и гелий, и их содержание в Юпитере и Сатурне в настоящее время определяется менее уверенно.

Современные исследования внутреннего строения планет-гигантов ведут свое начало с работ, выполненных в 1958 г. учеником Вильяма американским астрофизиком Де Маркусом. Де Маркус воспользовался экспериментальными данными о сжимаемости водорода и гелия до 20 кбар и определил интерполяционные уравнения состояния водорода и гелия так хорошо, что они мало изменились с тех

пор. Кроме того, он привлек к построению моделей Юпитера и Сатурна теорию фигуры жидких вращающихся планет второго приближения. Эта теория в первом приближении была построена Клеро (см. § 2.2), а во втором — английским теоретиком Дарвином в конце прошлого века и усовершенствована в начале нашего столетия голландским астрономом Де Ситтером. Поскольку теория фигуры является основным теоретическим аппаратом, используемым для исследования больших планет, то о ней несколько подробнее мы скажем ниже. Вместо двух условий — сохранения средней плотности ρ и среднего момента инерции I — Де Маркус контролировал распределение плотности в модели по трем условиям: ρ и первым четным гравитационным моментам J_2 и J_4 , которые для Юпитера и Сатурна известны из наблюдений. Раньше для определения I через J_2 использовалась формула Радо — Дарвина (64), которая плохо подходит для планет с сильной центрической впадины к центру. Де Маркус построил первую удовлетворительную модель Юпитера и достаточно хорошую модель наружных слоев Сатурна. Работа Де Маркуса была расширена американским астрофизиком Пиблсом (1964 г.), который использовал ЭВМ и рассмотрел большое число моделей.

9.2. ТЕОРИЯ ФИГУРЫ

Основной задачей теории фигуры является определение формы уровней поверхности планеты. На поверхности планеты постоянна гравитационный потенциал, а в гидростатически равновесной планете на поверхности поверхности постоянны также плотность, давление, температура и т. д. Ось вращения планеты является ее осью симметрии, поэтому уравнение уровней поверхности не зависит от долготы. Ясно также, что форма уровней поверхности не должна зависеть от того, в какую сторону вращается планета. Поэтому при построении теории равновесной фигуры уравнение стандартного сфероида пишется в виде

$$r(s, \theta) = s\{1 + s_2(s)P_2(t) + s_4(s)P_4(t) + s_6(s)P_6(t) + \dots\} + s_8(s)P_8(t) + s_{10}(s)P_{10}(t) + \dots, \quad (68)$$

$t = \cos \theta,$

где θ — полярное расстояние, s — средний радиус (радиус

сферы эквивалентного объема), $P_{2i}(t)$ — четные полиномы Лежандра, зависящие от четных степеней t . Теория фигуры строится последовательными приближениями. Малым параметром теории фигуры является безразмерный квадрат угловой скорости планеты

$$m = \frac{a^2 R^3}{G \cdot M} = \frac{3\omega^2}{4\pi G \rho} = \frac{3\pi}{G \rho^2 a^3}, \quad (69)$$

где ω , t , R , M и ρ — соответственно угловая скорость и период вращения, средний радиус, масса и средняя плотность планеты. Величина m имеет простой физический смысл: она равна отношению центробежного и гравитационного ускорений на экваторе планеты. Если бы планета не вращалась, то система уровней поверхности представляла бы ньютоновские сферы. В формуле (68) этому соответствует равенство нулю всех функций $s_{2i}(s)$ для любого i . Внешнее гравитационное поле такой планеты описывалось бы ньютоновским потенциалом (10) или, можно сказать, что у жидкой невращающейся планеты в выражении (67) все гравитационные моменты равны нулю для любого i . В действительности все планеты вращаются, причем планеты-гиганты вращаются довольно быстро. В теории фигуры первого приближения в формуле (68) удерживается первая функция $s_2(s)$, являющаяся малой величиной порядка m . В этом случае уровнями поверхности являются эллипсоиды вращения. Получается так, что центробежные силы как бы растягивают сферу в эллипсоид вращения. В этом приближении все остальные функции $s_{2i}(s)$ ($i = 2, 3, \dots$) равны нулю. Внешний гравитационный потенциал в первом приближении отличается от ньютоновского потенциала на слагаемое, пропорциональное квадратуральному гравитационному моменту J_2 в формуле (67), причем $J_2 \sim m$. В теории фигуры Дарвина — Де Ситтера в (68) сохраняется следующая функция $s_4(s)$, а уровенные поверхности во втором приближении отклоняются от эллипсоидов вращения. Выражение для потенциала (67) удлиняется, так как в нем появляется член с $J_4 \sim m^2$. Эти расчуждения естественным образом обобщаются на любое приближение. В общем случае функции $s_{2i}(s)$ и гравитационные моменты J_{2i} в (67) имеют следующий порядок малости:

$$s_{2i}(s) \sim m^i, \quad J_{2i} \sim m^i. \quad (70)$$

Величины J_{2i} определяются из наблюдений и дают ин-

тегральные условия для допустимых распределений плотности в планете. Они выражаются через определенные интегралы от плотности $\rho(s)$ и функции $s_{2i}(s)$, которые находятя путем решения системы уравнений теории фигуры. При этом моменты J_{2i} вычисляются последовательными приближениями в виде разложения по степеням m :

$$J_{2i} = \sum_{k=0}^{\infty} J_{2i}(k) m^{i+k}. \quad (71)$$

На практике в ряде (71) удерживается всего несколько членов. В настоящее время автор книги и В. П. Трубинян построили теорию фигуры пятого приближения. Это позволяет в будущем при построении моделей использовать первые пять четных моментов $J_2, J_4, J_6, J_8, J_{10}$. Точность определения моментов J_2 и J_4 Юпитера, достигнутая с помощью космического аппарата «Пионер-10» и «Пионер-11», в настоящее время такова, что при построении модели приходится использовать теорию фигуры четвертого приближения.

9.3. АДИБАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Ниже перечислено пять основных аргументов в пользу того, что Юпитер является газо-жидким телом с адiabатическим распределением температуры внутри планеты. Из этих аргументов вытекает также, что Юпитер находится в конвективном состоянии, т. е. вынос из него тепла осуществляется механизмом конвекции и он находится в состоянии к гидростатически равновесному.

1. Если Юпитер образовался как горячее тело (трудно представить, чтобы такая огромная планета не разорвалась при своем образовании), то за время своего существования $t_n \sim 4,5 \cdot 10^9$ лет он не мог остыть, так как длина его остывания

$$l_{ос} \sim (X \cdot t_n)^{1/2} \quad (72)$$

порядка $5 \cdot 10^2$ км ($X \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ см²/сек — коэффициент теплопроводности молекулярного водорода).

2. Поток тепла из недр планеты по данным широкополосных инфракрасных измерений, подтвержденных данными аппаратов «Пионер-10» и «Пионер-11», оказался равным $\sim 10^4$ эрг · см⁻² · сек⁻¹ (соответственно для Сатурна $\sim 3 \cdot 10^3$ эрг · см⁻² · сек⁻¹), что указывает на конвективное состояние глубокой наружной зоны или всей пла-

неты в целом, так как такой поток более, чем на четыре порядка превышает максимальный вынос тепла за счет механизма молекулярной теплопроводности (т. е. подчиненный по формуле (34); так, для Юпитера и Сатурна имеем $q_0 \leq 0,2 \text{ эрг.см}^{-2}\text{.сек}^{-1}$, $q_c \sim 0,1 \text{ эрг.см}^{-2}\text{.сек}^{-1}$). Интересно отметить, что поток тепла из недра обеих планет равен примерно потоку тепла, который они получают от Солнца.

3. Юпитер обладает собственным магнитным полем, формирующимся в его внутренней металлической водородной оболочке (отстоящей от поверхности на две десятилетия радиуса планеты), которая опытно-таким образом должна быть в конвективном состоянии.

4. Рассматривая эволюцию спутниковых орбит Юпитера, Сатурна и Урана, американские астрофизики Голдрайх и Сотер оценили значения удельной диссипативной функции Q для этих планет (смысл функции Q разъясняется в § 3.2). Оказалось, что $Q_0 \approx 2,5 \cdot 10^4$, $Q_c \approx 1,4 \cdot 10^4$, $Q_s \approx 5 \cdot 10^3$, что на два порядка больше, чем типичные значения для вещества в твердом состоянии. В частности, для обломки Земли и для планет земной группы. Таким образом, эти оценки могут быть истолкованы как указание на жидкое состояние Юпитера, Сатурна и Урана.

5. Измерения гравитационного поля Юпитера аппаратами «Пионер-10» и «Пионер-11» не обнаружили «следов» первого нечетного момента J_3 с точностью до 10^{-6} в гравитационном потенциале планеты, что указывает на близость Юпитера к гидростатически равновесному состоянию. Развязным теперь смысл утверждения «планеты-гиганты — газо-жидкие тела». Критическое давление и критическая температура водорода равны 13 атм и 33°К . При давлении и температуре выше критических не существует границы между газовой и жидкой фазами молекулярного водорода. Юпитер и Сатурн почти сплошь состоят из водорода, а Уран и Нептун покрыты водородными оболочками толщиной примерно в две десятилетия радиуса планеты, причем во всех четырех планетах водород находится в закритической области. В результате утолщаются и впадают в глубь планеты газовая атмосфера уплотняется под давлением лежащих выше слоев и непрерывно переходит в жидкое сравнительно плотное состояние, причем границы между газовой атмосферой и лежащей под ней жидкой планетой не существует. Далее, температура плавления водорода в условиях недра Юпитера и Сатурна в несколько

раз меньше адiabатических температур в этих планетах. Температура плавления воды, — второй по значению компоненте больших планет, — вероятно, меньше, чем адiabатические температуры в большей части Урана и Нептуна. На основании этих аргументов и говорят, что недра всех планет-гигантов находятся в газо-жидком состоянии, исключая, быть может, их небольшие центральные области. Представление о газо-жидком состоянии планет-гигантов было разработано автором и В. П. Трубицыным в СССР и Хаббардом в США.

9.4. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Данные наблюдений, используемые при расчете моделей, сведены в табл. 13. Там же указаны некоторые дополнительные характеристики больших планет. Атмосферы Юпитера и Сатурна находятся в состоянии дифференциального вращения, т. е. угловые скорости вращения различных широтных поясов не совпадают. Поэтому довольно трудно выбрать правильное значение периода вращения планеты т. За период вращения Юпитера как планеты, выбирают период вращения его магнитосферы, так как источники большого собственного магнитного поля расположены в металлической оболочке планеты, отстоящей от облачного слоя на 0,2 радиуса Юпитера. Этот период практически совпадает с периодом вращения среднеширотных и полярных областей облачного слоя планеты. Дифференциальное вращение атмосферы Сатурна заметно больше (до 10%). Отсутствие достаточных данных о собственном магнитном поле Сатурна не позволяет однозначно прояснить выбор периода вращения планеты. По аналогии с Юпитером за период вращения Сатурна берут значение, определяемое для его средних широт.

При построении адiabатических моделей планет-гигантов важное значение имеет выбор граничного давления p_1 и температуры T_1 , которые связаны между собой законом адiabаты. Удобно в качестве граничной выбрать поверхность, на которой $p_1 = 1 \text{ бар}$. Тогда значение T_1 определяют по моделям атмосфер планет. При $p_1 = 1 \text{ бар}$ T_1 для Юпитера по различным оценкам заключено между 130 и 230°К (наиболее вероятно $T_1 = 160 - 190^\circ \text{К}$), а для Сатурна между 90 и 150°К . Для Урана и Нептуна неопределенность в выборе T_1 значительно больше. Для обеих планет разумно предположить T_1 лежащей в интервале

Данные наблюдений для планет группы Юпитера

Параметр	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Масса $M:10^{30}$, ϱ	1,90	0,569	0,0872	0,103
Масса (Земля=1)	317,9	95,2	14,6	17,2
Экваторный радиус a , км,	714 000	56 900	25 400	25 200
J_2	$0,01475 \pm 0,00005$	$0,01667 \pm 0,00002$	0,012 или 0,005 по данным разных авторов	$0,0039 \pm 0,0004$
J_4	$0,00058 \pm 0,00004$	$0,00104 \pm 0,00008$		
τ , часы	9,925	10,41	10,8	15,8
$m(68)$	0,084	0,14	0,07	0,026
Динамическое сжатие, α	0,065	0,098	0,054	0,019
Средняя плотность, $\bar{\rho}$, $г/см^3$	1,3	0,7	1,3	1,7
Ускорение силы тяжести на экваторе, $м/сек^2$	22,9	9,1	7,8	11
Вторая космическая скорость на экваторе, $км/сек$	59,5	35,6	21,2	23,6
Среднее расстояние от Солнца, а. е.	5,2	9,54	19,2	30,1
Количество спутников	13	10	5	2

80—100°К. По тем оценкам T_1 , которые приведены выше, следует, что границная поверхность с P_1 , T_1 расположена во всех четырех планетах глубже облачных слоев, так как по наблюдениям температуры облачного слоя планет-гигантов меньше, чем T_1 .

9.5. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ГРУППЫ КОСМОХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Первая современная сводка космической распространенности химических элементов сыграла важную роль в создании водородной концепции строения Юпитера и Сатурна. Еще большую роль данные о распространенности элементов и предполагаемом химическом составе протопланетного облака будут играть в предстоящие годы при построении детальных моделей планет-гигантов. Наоборот, построение моделей планет-гигантов позволяет получить интегральные соотношения между различными наиболее обильными элементами, которые характеризуют как протопланетное облако, так и протосолнце. Фундаментальные сводки распространенности химических элементов были опубликованы американскими геохимиками Эвсом и Юри (1956 г.) и астрофизиком Алгером (1961 г.). В последнее время опубликовано несколько сводок распространенности элементов. Например, сводка американского геохимика Дьюкса (1972 г.) имеет вид: Н (2,8 · 10⁴), Не (1,8 · 10³), О (16,6), С (10,0), N (2,4), Ne (2,1), Mg (0,85), Si (1,00), Fe (0,80), S (0,46), Ar (0,15), Al (0,07), Ca (0,06), Na (0,043), Ni (0,05), ... Число в скобках за символом химического элемента указывает, сколько атомов данного элемента приходится на один атом кремния. Если бы были точно известны обилие гелия в Солнце и отношение Н/Не по числу атомов, то эти данные можно было бы использовать при расчете моделей больших планет. К сожалению, отношение Н/Не ~ 12 ÷ 20 все еще недостаточно надежно, хотя большинство исследователей принимают такие значения средней массовой концентрации водорода (Х) и гелия (У): Х ~ 70—80%, У ~ 30—20%.

По современным представлениям в протопланетном облаке на расстояниях планет-гигантов температуры (после остывания облака), вероятно, не превышали 150°К, а газовое давление было 10⁻⁵—10⁻⁷ атм в зоне Юпитера и Сатурна и 10⁻⁷—10⁻⁹ в зоне Урана и Нептуна. В этих условиях большинство перечисленных выше элементов

образует гидриды и окислы. Более сложные соединения, например, силикаты, можно представить с достаточной точностью в виде определенной комбинации окислов и та-ким образом конкретизация сложных соединений при построении моделей несущественна. Все космохимические соединения по их легучести разделяются на три группы. К первой группе относят водород (H_2), гелий (He) и неон (Ne). Это так называемая газовая водородо-гелиевая компонента (I-компонента), которая в условиях образования планет-гигантов не входит в конденсат. Вторую группу образуют вещества средней легучести. Это так называемая J-компонента (ледяная компонента). Основные ее составляющие метан (CH_4), аммиак (NH_3) и вода (H_2O). Нелегучие вещества объединяют в третью группу. В нее входят окислы, железо и никель ($SiO_2, MgO, FeO, FeS, Fe, Ni, \dots$). Третью группу называют ТК (тяжелая компонента). Вещества ТК вместе с веществами компонента J образуют состав конденсата (пылевою составляющую) протопланетного газовой-пылевого облака в рассматриваемой его части (ТК+J-компонента).

В случае, если температуры в рассматриваемой части протопланетного облака были более высокими ($> 150^\circ K$), нужно исследовать также другие разбиения веществ на группы, при которых часть вещества ледяной компонента переходит в газовую компоненту. Тогда возникают следующие варианты J: J1 ($CH_4 + NH_3 + H_2O$), JII ($NH_3 + H_2O$), JIII (H_2O). Соответствующие им варианты G-компоненты: G1 ($H_2 + He + Ne$), GII ($He + CH_4$), GIII ($He + NH_3$). Вариант G-компоненты, соответствующий случаю, когда в конденсату относятся только ТК-компонента, будет GIV ($GIII + H_2O$). Внутри каждой группы вещества берутся в той же пропорции, в какой они распространены в космосе.

9.6. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

Зависимость Давления от плотности и температуры $p = p(\rho, T)$ называется уравнением состояния. Обычно уравнение состояния представляют в виде суммы потенциального Давления $p(\rho, 0)$ (нулевой изотермы) и тепло-

$$p(\rho, T) = p(\rho, 0) + \frac{3NT}{4} \rho \gamma(\rho), \quad (73)$$

где $N = 8,314 \cdot 10^7 \text{ эрг/град моль}$ — газовая постоянная, T — абсолютная температура в градусах Кельвина, \bar{A} — средний атомный вес, $\gamma(\rho)$ — параметр Грюнайзена (функция плотности). Повяте параметра Грюнайзена было введено в § 7.5. Важно то, что диапазон изменения $\gamma(\rho)$ очень мал. Действительно, при обычных условиях γ не превосходит $2 \div 3$, а при сверхвысоких Давлениях $\sim 10^8 \text{ бар}$ $\gamma = 2/3$. Характерные Давления в недрах больших планет $10^6 \div 10^8 \text{ бар}$, а температуры $\sim 10^3 - 10^4^\circ K$. Оценим в этих условиях вклад теплового Давления (возникающего из-за тепловых колебаний атомов) в полное Давление для металлического водорода ($\rho_H \sim 1 \text{ г/см}^3$, $\gamma \sim 1$, $\bar{A} = 1$) и для воды ($\rho_{H_2O} \sim 3,5$, $\gamma \sim 1$, $\bar{A} = 6$):

$$p_T = \frac{3NT}{4} \rho \gamma(\rho) \sim \left\{ \begin{array}{l} 3,8,3 \cdot 10^7 (10^3 \div 10^4) \approx 2,5 (10^{11} \div 10^{12}) \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = \\ = 2,5 (10^5 \div 10^6) \text{ бар для } H, \\ \sim 3,5 \approx 1,4 (10^6 \div 10^8) \text{ бар для } H_2O. \end{array} \right.$$

Если обратиться к рис. 34—37, на которых показаны модели Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, то легко видеть, что в (p, T) условиях планетных недр вклад теплового Давления в полное Давление не превышает ($10 \div 20$)%. Следовательно, закон, по которому сжимается вещество в недрах, в основном определяется первым слагаемым в (73) — нулевой изотермой. В настоящее время нулевые изотермы всех основных космохимических элементов и соединений определены с точностью $\sim 5\%$ по Давлению. Для построения $p(\rho, 0)$ использовался метод графической интерполяции. При Давлениях до $\sim 1 \text{ Мбар}$, закон, по которому сжимается то или иное вещество, может быть установлен с помощью экспериментальных данных (статических и динамических). При высоких Давлениях $p > 100 \text{ Мбар}$ этот закон может быть установлен теоретически. Поэтому, чтобы определить нулевую изотерму конкретного космохимического вещества во всем интервале Давлений, представляющем интерес для плането-физики, складенные экспериментальные данные при низких Давлениях «сшиваются» с расчетными значениями при высоких Давлениях. Чтобы члгатель мог составить

представление о функциях $\rho(p, 0)$ для различных состояний, приводим табл. 14. Цифры в таблице даны с большим числом знаков, чтобы не терять точность при определении темпа нарастания плотности. Во втором столбце приведены данные для металлического водорода, а в третьем для молекулярного водорода. Переход молекулярного водорода в металлический не поддается теоретическому

Т а б л и ц а 14

Плотность в г/см³ в зависимости от давления в барах для космохимических элементов и соединений

p , бар	H	H ₂	CH ₄	NH ₃	H ₂ O	He	Ne
1	0,58	0,089	0,51	0,83	1,516	0,32	1,508
1·10 ²	0,617	0,112	0,544	0,861	1,552	0,32	1,603
1·10 ³	0,635	0,170	0,660	0,933	1,622	0,52	1,918
1·10 ⁴	0,657	0,320	0,977	1,288	1,997	0,94	2,911
1·10 ⁵	0,860	0,694	1,803	2,213	3,126	1,90	5,129
1·10 ⁶	1,93	1,83	4,246	5,105	6,607	4,60	10,715
1·10 ⁷	5,90	5,79	12,078	14,061	17,418	13,1	25,586

p , бар	Al	MgO	SiO ₂ (стимул-квт)	Al ₂ O ₃	FeO	FeS*	Fe
1	1,771	3,585	4,287	3,938	5,907	6,250	8,311
1·10 ²	1,871	3,5878	4,2884	3,9836	5,911	6,254	8,317
1·10 ³	2,275	3,608	4,291	4,004	5,947	6,283	8,369
1·10 ⁴	3,396	3,811	4,390	4,128	6,240	6,582	8,797
1·10 ⁵	6,026	4,915	5,300	5,070	7,962	8,367	11,041
1·10 ⁶	12,677	9,572	9,795	9,638	13,996	14,588	17,620
1·10 ⁷	30,761	23,335	23,769	23,497	32,600	33,965	38,637

*) Гипотетическое уравнение состояния.

расчету. Давление перехода слабо зависит от температуры и оценивается величиной $\sim 3 \cdot 10^6$ бар. При переходе в твердой фазе плотность скачком увеличивается на $\sim 10\%$. В расплавленном состоянии (в жидкой фазе) переход происходит непрерывно. В табл. 14 приведены данные для фаз высокого давления. Такой фазой для воды является модификация лед VII, устойчивая при давлении, большем 22,5 кбар. Для железа эта фаза устойчива при давлениях, больших 130 кбар. Уравнение состояния для фазы высокого давления FeS является гипотетическим, так как для

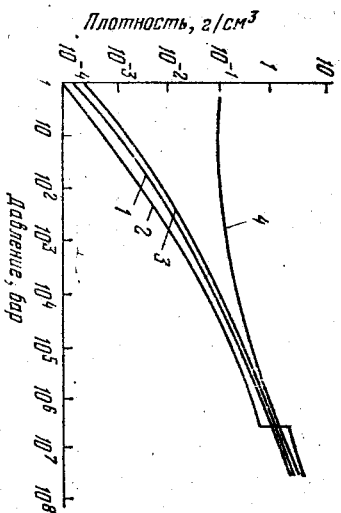


Рис. 32. Уравнения состояния водорода: 1—3 — адиабаты водорода с различными температурами T_1 при $p=1$ бар, равными 140 К (кривая 1), 250 К (кривая 2), 80 К (кривая 3), 4 — нулевая изотерма.

в виде $T_{дх} = T(p)$ и связать распределение температуры в недрах планеты с распределением плотности. Подставив в недрах планеты $T_{дх} = T(p)$ в (73), получаем уравнение адиабаты

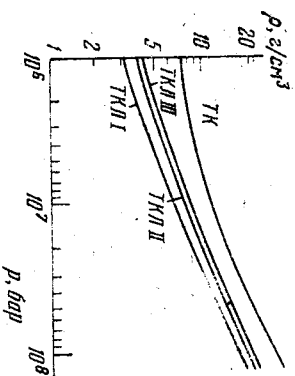


Рис. 33. Нулевые изотермы тяжелых компонентов (ТК) и смеси ТК и различных вариантов льдов (ТК/И I), (ТК/И II), (ТК/И III).

$\rho_{дх} = \rho(p)$ в переменных (ρ, p), которое может быть использовано при расчетах моделей планеты. В настоящее время построены двухслойные модели планет-гигантов. Оболочка планет состоит в основном из водородо-гелиевой

компоненты, а ядра из того или иного вещества ТКЛ-компоненты. В конвективной планете предположение о постоянстве химического состава каждого слоя (оболочки и ядра) является естественным, так как конвекция осушает ядро перемешивание, а возникновение даже небольшого градиента концентрации достаточно, чтобы «запереть» конвекцию. При расчетах уравнения состояния смеси веществ как для оболочек, так и для ядра вычисляются в приближении аддитивности парциальных объемов

$$\frac{1}{\rho(p)} = \sum_i \frac{X_i}{\rho_i(p)},$$

где X_i — обилие по массе каждого вещества, $\sum_i X_i = 1$.

Строение оболочек планет в основном определяется экимаэстью водорода (рис. 32), а строение ядер — нулевыми изотермами ТКЛ-вещества (рис. 33).

9.7. МОДЕЛИ ЮПИТЕРА И САТУРНА

В настоящее время построены двухслойные модели внутреннего строения обеих планет. Ядра планет состоят из конденсата ТК и льдов (обилие элементов в солнечной пропорции). Исследовано четыре варианта химического состава ядра: ТКЛІ (ТК + ЛІ), ТКЛІІ, ТКЛІІІ и ТК. Оболочки моделей первого типа состоят только из газовой компоненты ГІ (или ГІІ, ГІІІ). В них массовые концентрации водорода, гелия и других газов будут соответственно X , Y и Z_1 ; $X + Y + Z_1 = 1$. В модели ІІ типа в состав оболочки, кроме газовой компоненты, входит также вещество ядра с концентрацией Z_2 ; $X + Y + Z_1 + Z_2 = 1$. Величина Z_1 по отношению к сумме $X + Y$ всегда бралась в солнечной пропорции. Члены удовлетворяют известным параметрам планеты — массе, радиусу, периоду вращения и гравитационным моментам J_2 и J_4 (см. табл. 13), в моделях І типа подбиралось отношение Y/X (в оболочке), а в моделях ІІ типа — величина $Z_2/(X + Y + Z_1)$, а отношение $Y/X = 0,26$ фиксировалось в солнечной пропорции.

Адиабатическая модель планеты зависит также от граничных значений давления p_1 и температуры T_1 в облачном слое. Давление p_1 всегда принималось равным одной атмосфере, а T_1 варьировалось. Так, для типичных моде-

лей І типа для обеих планет, показанных на рис. 34 и 35, $T_1 = 140^\circ\text{К}$, а $X = 0,68$ (в оболочке). В этой модели ядра Юпитера и Сатурна состоят из ТКЛІІ. Полная массовая концентрация ТКЛ-вещества в планете обозначена Z_{TKL} . Модели І типа соответствуют схеме образования планет, по которой вначале образуется ядро из конденсата, а затем происходит аккреция газа на образовавшееся

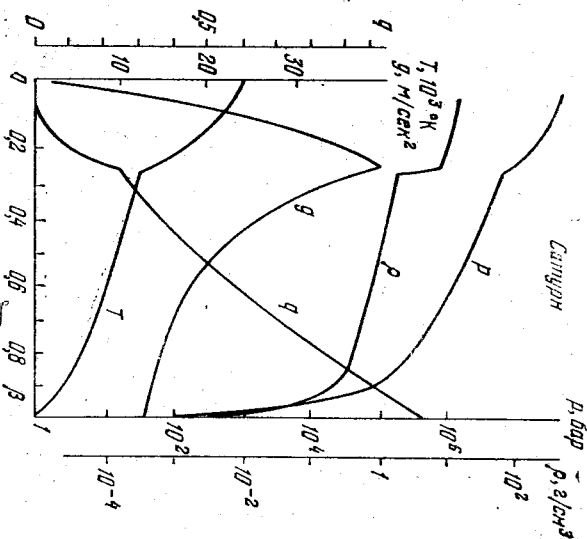


рис. 34. Модель Юпитера. ρ — плотность, p — давление, T — температура, q — гравитационное ускорение, q — относительная масса, заключенная в сфере радиуса β как функции относительного радиуса β .

таким образом ядро. Ясно, что это предельная идеализированная схема, поэтому истинная модель планеты должна быть промежуточной между моделью І и ІІ типов. Для Сатурна модель І типа с $T_1 = 90^\circ\text{К}$ является предельной, так как в такой модели концентрация гелия $Y = 0$, что неприемлемо с позиций космохимии. Для Юпитера модель І типа с $T_1 = 250^\circ\text{К}$ также является предельной, так как при этой граничной температуре T_1 у планеты пропадает ядро из ТКЛ-вещества и при еще больших T_1 для сохранения условия полной массы в модели пришлось бы ввести разуплотнение вещества в центре, что

физически бесмысленно. Это единственная модель Юпитера, которая имеет среднесолнечный состав. Во всех остальных моделях планета обогащена ТКЛ-компонентой по сравнению со среднесолнечной пропорцией элементов. В общем исследовании моделей Юпитера и Сатурна показывается, что обе планеты должны обладать ядрами из ТКЛ-вещества. По массе ядро Юпитера составляет $(3 \div 4)\%$, а ядро Сатурна $(26 \div 28)\%$ от полной массы. Величина $Z_{\text{ТКЛ}}$, приведенная в табл. 15, позволяет оценить минимальные массы вещества протопланетного облака в зонах

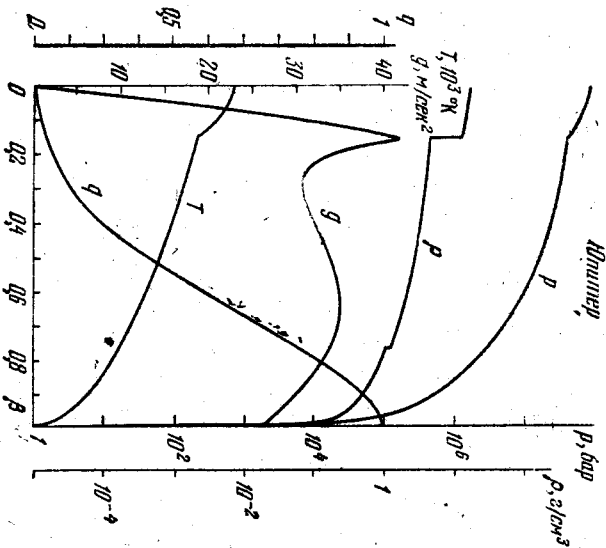


Рис. 35. Модель Сатурна. См. подпись к рис. 34.

образования этих планет. Масса всего вещества в зоне по отношению к массе планеты $M_s/M = (Z_{\text{ТКЛ}}/Z_{\text{ТКЛ}}^0)$, где $Z_{\text{ТКЛ}}^0 \sim (0,012 - 0,018)$ — предполагаемое обилие ТКЛ-компоненты в протопланетном облаке, равное солнечному обилию. Тогда, следовательно, масса потерянного из зоны вещества равна: $\Delta M/M = (M_s/M) - 1$. Эта величина для различных моделей приведена в последнем столбце табл. 15. По этим оценкам масса газа, диссипированного из зоны Юпитера, заметно различается для изученных

моделей. Для Юпитера грубой оценкой будет $(\Delta M/M) \approx \sim 5 \div 10$. Для Сатурна эта величина заключена между ~ 15 и ~ 24 планетными массами для моделей с ядрами из ТКЛ — ТКЛIII, $(\Delta M/M)_c \sim 15 \div 24$.

Тот факт, что обе планеты находятся в конвективном состоянии, т. е. являются адиабатическими, позволил надежно рассчитать распределение температуры в Юпитере и Сатурне (см. рис. 34 и 35) из условия постоянства

Т а б л и ц а 15

Химический состав Юпитера и Сатурна

Планета	T _c , °K	Обилие в оболочке*			Обилие во всей планете			ΔM/M
		X	Y	Z ₂	X	Y	Z _{ТКЛ}	
Юпитер	140	0,68	0,31	0	0,66	0,30	0,04	2
	11	0,71	0,18	0,10	0,69	0,18	0,12	8
	250	0,51	0,47	0,01	0,51	0,47	0,01	0
Сатурн	140	0,60	0,16	0,23	0,50	0,16	0,23	19
	11	0,68	0,31	0	0,50	0,23	0,26	19
	90	0,71	0,18	0,10	0,53	0,14	0,33	24
		0,99	0	0	0,68	0	0,31	24

*) $Z_1 = 0,01$ во всех моделях.

энтропии в их недрах¹⁾. Мы уже отмечали выше, что переход в металлическую фазу молекулярного водорода происходит при $p \sim 3 \text{ Mbar}$. В модели Юпитера, показанной на рис. 34, это соответствует значению относительного радиуса $\beta = r/R$ (R — средний радиус планеты), равному $\beta_n = 0,765$. Металлическая оболочка в Юпитере простирается до границы с ТКЛ-ядром при $\beta_n = 0,15$. На этом уровне давление равно $42,3 \text{ Mbar}$, в центре планеты $p_0 = 78 \text{ Mbar}$.

В модели Сатурна (см. рис. 35) металлическая оболочка лежит в интервале $0,465 \geq \beta \geq 0,267$. Давление на границе с ядром из ТКЛ-компоненты сравнительно невелико: $p_n = 8,12 \text{ Mbar}$ ($\beta_n = 0,267$). Давление в центре Сатурна $p_0 = 48 \text{ Mbar}$. Температуры в центре обеих планет равны

1) Энтропия — это термодинамическая величина, остающаяся постоянной при адиабатическом процессе, когда не происходит обмена теплом между различными элементами среды. Она не имеет столь наглядного смысла, как температура или давление, являясь в то же время не менее важной термодинамической переменной.

$\sim 2,5 \cdot 10^4$ К. В действительности может оказаться, что вещества, из которых состоит ТКД-ядра Юпитера и Сатурна, дифференцированы по плотности. Однако именно сейчас пока данных явно недостаточно для самостоятельного исследования этого вопроса. Юпитер обладает мощным собственным магнитным полем. Это поле было открыто и исследовано по радиоизлучению планеты в 1954—1960 гг. Тогда же было установлено, что поллярность магнитного поля Юпитера обратна поллярности земного магнитного поля. Данные, полученные с помощью космических аппаратов «Пионер-10, -11» позволили охарактеризовать это поле количественно. Определены следующие коэффициенты Гаусса в магнитном потенциале W [формула (29)] планеты:

Дипольные коэффициенты

$$g_1^0 = 4,129, \quad g_1^1 = -0,492, \quad h_1^1 = 0,531 \text{ эс}$$

(этим коэффициентам соответствует напряженность диполя на экваторе планеты $V_1 = 4,19$ эс. Ось диполя наклонена к оси вращения на угол $\sim 10^\circ$),

квадрупольные коэффициенты:

$$g_2^0 = 0,42, \quad g_2^1 = -0,738, \quad h_2^1 = -0,050, \\ g_2^2 = 0,324, \quad h_2^2 = -0,381 \text{ эс}$$

($V_2 = 0,89$ эс).

Определены также октупольные коэффициенты и соответственно $V_3 = 0,61$ эс. Интересно, что отношения $V_2/V_1 \sim 0,2$ и $V_3/V_1 \sim 0,14$ близки к аналогичным отношениям для земного поля. Поле Юпитера является полем экваториального диполя, центр которого отстоит от оси вращения на $\sim 0,2R_{\text{Ю}}$ и на $\sim 0,1R_{\text{Ю}}$ смещен в северное полушарие. Из-за этого максимальное значение поля на поверхности Юпитера в северном полушарии составляет ~ 14 эс, а в южном полушарии 11 эс. Магнитный момент Юпитера $M_{\text{Ю}} = V_1 \cdot R_{\text{Ю}}^3 = 1,35 \cdot 10^{30}$ эс \cdot см³. Источник магнитного поля Юпитера расположен в его обширной магнитосферной оболочке.

Выше отмечалось, что тепловые потоки из недр обеих планет очень велики; они равны потокам, получаемым планетами от Солнца. Это аномальное явление еще не полностью однозначно объяснено, хотя большинство исследователей склоняется к объяснению этого теплового потока гравитационным сжатием планет.

9.8 МОДЕЛИ УРАНА И НЕПТУНА

Двухслойные адиабатические модели обеих планет показаны на рис. 36 и 37. Отношение U/X в водородо-гелиевой оболочке (на Г1) выбрано в солнечной пропорции ($U/X = 0,26$). Для ядра принят состав ТКЛГ ($\text{CH}_4 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{TK}$) в соответствии с предположением о низкой начальной температуре в области образования Урана и Нептуна. Модели Урана и Нептуна принадлежат к моделям II типа, так как их тонкие водородо-гелиевые оболочки содержат примесь 10% ТКЛГ-компоненты. Основные параметры моделей следующие: относительный радиус и масса ТКЛГ-ядер равны соответственно 0,78 и 0,94 для Урана и 0,85 и 0,97 для Нептуна. Давление на границе ядра u Урана $p_u = 117$ кбар, а u Нептуна $p_u = 74,6$ кбар. Давление в центре Урана $p_0 = 5,83$ Мбар, а в центре Нептуна $p_0 = 7,4$ Мбар, температуры в центре Урана достигают 11 тыс. град, а в центре Нептуна — 12 тыс. град. (границная температура $T_1 = 100^\circ \text{K}$).

Обе планеты имеют близкий химический состав $\text{H}_2\text{O} - (0,39 - 0,4)$; $\text{CH}_4 - (0,22 - 0,23)$; $\text{NH}_3 - 0,08$; $\text{TK} - (0,24 - 0,25)$; $(\text{H}_2 + \text{He}) - (0,03 - 0,06)$ по массе. Эти модели имеют значение момента I_2 для Урана 0,01, а для Нептуна 0,004, что близко к наблюдаемым значениям, приведенным в табл. 13. Данных об Уране и Нептуне еще слишком мало, поэтому модели обеих планет следует рассматривать как предварительные. В частности, из физических соображений ясно, что ядра планет должны быть дифференцированы по плотности.

9.9 ПЛАНЕТА ПЛУТОН — БЫВШИЙ СПУТНИК НЕПТУНА?

Плутон — наиболее отдаленная планета в Солнечной системе. Ее среднее расстояние от Солнца составляет 39,5 а. е. Эксцентриситет орбиты велик, а ее наклон к плоскости эклиптики $\sim 18^\circ$. Данные о Плуtone очень ненадежны. Его массу оценивают в $\sim 0,11$ массы Земли, а радиус в 0,5 земного, так что средняя плотность получается равной $\sim 4,9$ г/см³. Период его вращения равен 6,4 суток, т. е. велик для столь удаленной от Солнца планеты, вращение которой никак не могло быть на протяжении ее существования замедлено из-за протискивания ее существующими спутниками. И так, планета Плутон является аномальной как по характеристикам своей орбиты, так и по

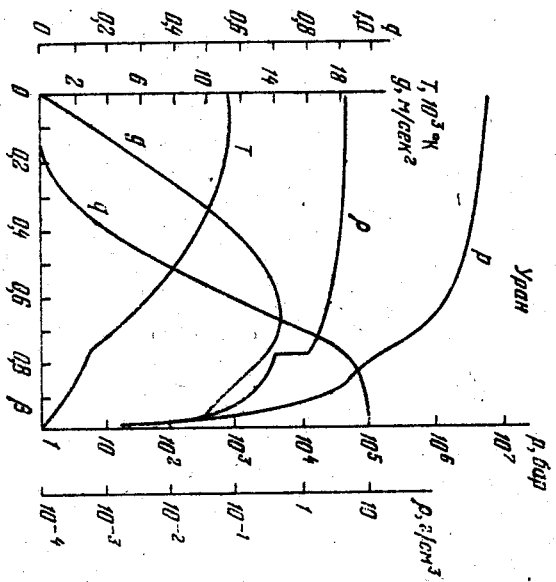


Рис. 36. Модель Урана. См. подпись к рис. 34.

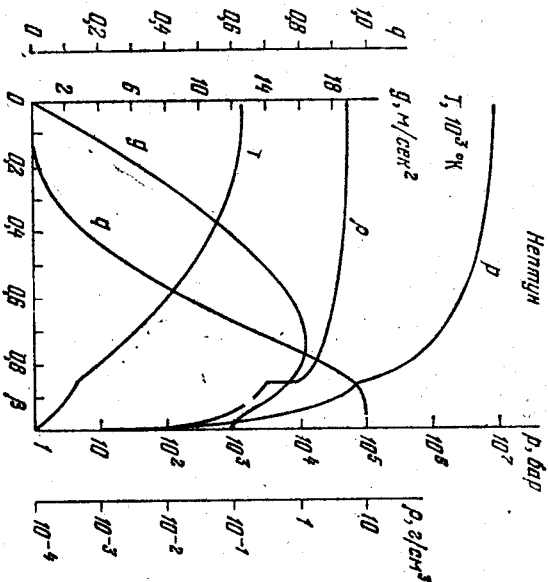


Рис. 37. Модель Нептуна. См. подпись к рис. 34.

материальным параметрам. Действительно, ее средняя плотность, правда, определенная еще очень ненадежно, ближе к величинам, характерным для планет земной группы, а сама планета расположена в стане планет-гигантов. Естественно, строить модели внутреннего строения Плутона еще рано.

Большой научный интерес представляет гипотеза, выдвнутая в 1936 г. английским теоретиком Литтлтоном, согласно которой планета является бывшим спутником Нептуна. Гипотеза предполагает, что Плутон синхронно обращался вокруг Нептуна, т. е. период его вращения вокруг оси равнялся периоду обращения вокруг планеты (так же, как сейчас Луна обращается вокруг Земли и Тритон вокруг Нептуна). В настоящее время практически все спутники в Солнечной системе находятся в состоянии синхронного вращения. Синхронное вращение спутников возникло в раннюю эпоху существования планетной системы и обусловлено торможением вращения спутников приливными, вызываемыми на них планетами. Итак, свой период вращения 6,4 суток. Плутон приобрел на синхронной орбите вокруг Нептуна. Он покинул планету после сближения («столкновения») с Тритоном. Если это так, то период вращения Плутона должен быть примерно равен орбитальному периоду обращения Тритона, т. е. 5,9 суток. Как мы видим, согласие обеих периодов хорошее. В результате этого столкновения Плутон был выброшен на свою сильно эксцентричную и наклонную орбиту, а орбита Тритона также претерпела существенное изменение. На акваториальной она стала сильно наклоненной и движение стало обратным. Гипотеза Литтлтона предполагает, что физические свойства Плутона и Тритона должны быть близки, так как они образовались рядом у одной и той же планеты. Это обстоятельство может быть установлено только с помощью космических исследований, когда будут получены более детальные данные об этих телах. Пока что все это остается интересной гипотезой.