

## О ВНУТРЕННЕМ СТРОЕНИИ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ

Н.А. КОЗЫРЕВ

Малые плотности больших планет типа Юпитера наводят на мысль, что в отличие от планет земной группы в их строении существенную роль играет водород. Для решения этого вопроса в первую очередь необходимо знать физические условия внутри планеты. Так как в центре производные физических величин обращаются в нуль, то центральные данные: давление  $p_c$  и плотность  $\rho_c$  – являются характерными для значительной части планеты. Эти величины могут быть рассчитаны с помощью известных из наблюдений массы  $M$  и радиуса  $R$  планеты. Действительно, с точностью до безразмерного множителя, зависящего от структуры планеты, давление в центре равняется силе тяжести, умноженной на массу столба с основанием в  $1 \text{ см}^2$ . Точно так же центральная плотность отличается от средней на некоторый другой структурный множитель. Эти структурные множители сравнительно мало меняются для допустимых вариантов строения планеты. Например, предполагая, что структура планеты может быть аппроксимирована политропой класса  $n$ , т.е. принимая внутри планеты

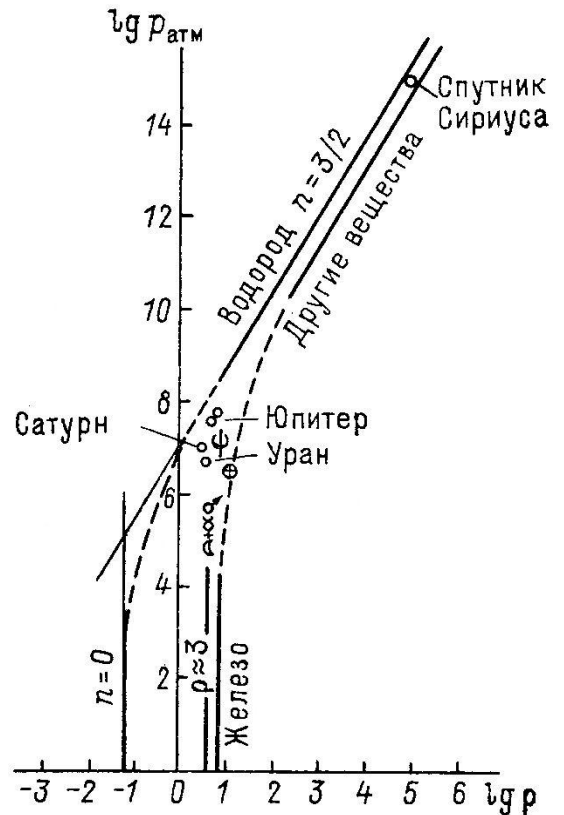
$$p \sim \rho^\Gamma \left( n = \frac{1}{\Gamma - 1} \right),$$

можно получить для Юпитера следующие данные:

$n$	$p_c$	$\rho_c$	$k$	
1	$4 \cdot 10^7 \text{ атм}$	4,6	0,65	(1)
3/2	$7,3 \cdot 10^7 \text{ атм}$	7,9	0,52	

Здесь  $k$  – отношение момента инерции планеты к моменту инерции однородного тела той же массы и того же радиуса. В этом расчете принято:  $M_\odot/M = 1047$ ,  $R_\odot/R = 10,0$  и  $\bar{\rho} = 1,34$ .

Определенная для Юпитера величина  $k = 0,60$  (по движению спутников и сжатию диска) показывает, что физические условия в центре Юпитера должны заключаться между приведенными выше значениями. Эти значения нанесены в виде двух точек в плоскости прилагаемого графика (см. рисунок). Для выяснения химического состава Юпитера остается найти, для какого вещества кривая фазового состояния, т.е. кривая зависимости  $p(\rho)$ , пройдет через эти точки. Для построения этих кривых допустим, что Юпитер холодный. Слово «холодный» будем употреблять в том смысле, что  $kT \ll p/n$ , где  $n$  – число частиц в единице объема. При интересующих нас давлениях около  $10^7$  атм поведение холодных веществ мало изучено. Однако для наших целей достаточно следующих соображений. При  $p > 10^{10}$  атм, т.е. когда  $p/n > 10^{-8} \approx 10^4$  эВ, атомы будут полностью раздавлены давлением и вещество должно иметь свойства газа Ферми ( $n = 3/2$ ):



$$p = 9,89 \mu_e^{-5/3} \rho^{5/3} \cdot 10^6, \quad (2)$$

где  $\mu_e$  – средний молекулярный вес, рассчитанный на один электрон. Для водорода  $\mu_e = 1$ , для прочих веществ, включая гелий,  $\mu_e = 2$ . С другой стороны, для малых давлений ( $p < 10^4$ ) плотность веществ практически постоянна ( $n = 0$ ). На рисунке жирные линии показывают изменение состояния водорода и тяжелых веществ типа железа для упомянутых интервалов давлений. Плотность атомного водорода в нормальных условиях принята равной 0,07. Продолжая линию постоянной плотности и линию газа Ферми, можно видеть, что для промежуточных давлений без всякой теории надежно вписывается кривая изменения состояния, показанная на графике пунктиром. Наклон этой линии показывает, что в значительной массе Юпитера  $1 < n < 3/2$ . Среднее из положений двух точек (1)

$$p_c = 5,2 \cdot 10^7; \quad \rho_c = 6,2 \quad (3)$$

должно наилучшим образом описывать условия в центре Юпитера. Из графика сразу видно, что Юпитер не может быть чисто водородным. Оценить однозначно процентное содержание водорода по этому графику вряд ли возможно. Можно различными моделями, например чисто гелиевым составом, удовлетворить положению точки внутренних условий Юпитера. Однако ввиду того что по формуле (2) средний молекулярный вес определяется как среднее гармоническое из  $\mu_e^{5/3}$ , заметное отклонение от кривой водорода может получиться только при значительном количестве других веществ. Считая вероятным, что среднее положение, которое занимает вещество Юпитера, между кривой водорода и кривой тяжелых веществ будет сохраняться и для давлений, приводящих к уравнению Ферми, получим следующую оценку содержания водорода:  $x \approx 25 \div 40\%$ .

На рисунке помимо Юпитера нанесены точки центральных состояний других планет. Эти точки обозначены соответствующими планетными символами. Показано также положение типичного белого карлика – спутника Сириуса. По-видимому, Юпитер, Сатурн и Уран имеют приблизительно одинаковый состав. Планеты другой группы: Луна, Меркурий, Марс – состоят из веществ, плотность которых при нормальных условиях близка к 3. Внутренние условия Земли вычислены в предположении структуры  $n = 1/2$ , которая отвечает наблюдаемому относительному моменту инерции  $k = 0,85$ . Несмотря на возможность скачков в кривой состояния тяжелых веществ, кажется вероятным, что Земля отличается по своему составу от других планет земной группы и имеет железное ядро.

Исследуем теперь другую возможность строения Юпитера, т.е. будем считать его горячим. Полагая, что температура играет роль в образовании внутреннего давления, из значений (3) по закону идеальных газов находим

$$T_c = 1,1 \cdot 10^5 \mu \text{ град.} \quad (4)$$

Если газ не идеальный, то температура может быть вычислена по этой же формуле, только с другим молекулярным весом. Неоднократно повторяющиеся радиометрические измерения теплового потока Юпитера приводят к температуре поверхности Юпитера, равной  $-120^\circ, -130^\circ\text{C}$  ( $\approx 145 \text{ K}$ ) вместо  $-150^\circ\text{C}$  ( $\approx 120 \text{ K}$ ), которая соответствует среднему поглощенному потоку, идущему от Солнца:  $1,2 \cdot 10^4 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

Наблюдаемый поток тепла в  $(145/120)^4 \approx 2$  раза больше рассчитанного. Таким образом, собственное излучение Юпитера должно быть порядка  $1 \cdot 10^4 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Выясним теперь, при каких условиях температура (4) в центре Юпитера будет давать наблюдаемый тепловой поток  $F$ . В теории внутреннего строения звезд расчет потока в зависимости от внутренней температуры приводит к знаменитому соотношению «масса – светимость ( $L$ )» [1]:

$$K = 4\rho R^2 F \sim \frac{\mu^4}{\kappa} M^3, \quad (5)$$

причем для звезд  $\mu^4/\kappa = 0,1$ .

Применяя эту формулу к Юпитеру и Солнцу, находим

$$\frac{F}{F_{\odot}} = \left(\frac{R_{\odot}}{R}\right)^2 \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^3 \cdot 10 \cdot \frac{\mu^4}{\kappa} = 10^{-6} \frac{\mu^4}{\kappa}.$$

Так как  $F_{\odot} = 6 \cdot 10^{10}$ , то  $F/F_{\odot} = 2 \cdot 10^{-7}$  и, следовательно:  

$$\mu^4/\kappa = 0,2. \quad (6)$$

Получается почти тот же коэффициент, как и у звезд, и можно сказать, что Юпитер удовлетворяет соотношению «масса – яркость»  $L \sim M^3$ . Значение коэффициента (6) представляет важную характеристику строения Юпитера. При больших плотностях и температурах порядка  $10^5$  град. передача тепла скорее всего осуществляется теплопроводностью. Сравнивая уравнение теплопроводности с уравнением лучеиспускания, можно вычислить эффективный коэффициент поглощения, который должен входить в формулу масса – светимость [2]:

$$\kappa^* = \frac{2,6ZT^{1/2}}{\rho},$$

где  $Z$  – порядковый номер элемента. Эта формула справедлива для ионизованного и не- сильно вырожденного газа. Для Юпитера получаем  $\kappa^* \approx 100$ . Таким образом, согласно (6)  $\mu = 2,2$ , и, следовательно, в центре Юпитера  $T_c = 2,5 \cdot 10^5$  град.

Посмотрим теперь, в какой степени состояние газа в Юпитере отличается от идеального. Для этого сравним  $kT = 3,4 \cdot 10^{-11}$  с электростатической энергией, рассчитанной на одну частицу. Согласно теории Дебая – Хюккеля эта энергия имеет значение [3]

$$u = -\frac{1}{3} \left( \frac{\pi Z^3 (Z+1)^3 e^6 n^{+3}}{kT n^2} \right)^{1/2},$$

где  $n^+$  – число ионов в  $\text{см}^3$ . Полагая  $n = 2n^+$ ,  $Z = 1$  и  $n = 4 \cdot 10^{24}$ , находим

$$u = -\frac{1}{3} \left( \frac{\pi e^6 n}{kT} \right)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-11}.$$

Таким образом, частицы существенно связаны, и для водорода вместо  $\mu = 1/2$ , видимо, следует брать  $\mu \approx 1$ . Найденный выше средний молекулярный вес 2,2, вероятно, указывает на значительное присутствие других элементов в количестве, не меньшем 50%.

Замечательная согласованность теоретических результатов с радиометрическими измерениями убеждает в том, что Юпитер действительно горячий и состоит из газа, находящегося на границе нарушения закона Бойля–Мариотта. Другие большие планеты, вероятно, имеют такое же строение. Температура этих планет не может поддерживаться ядерными превращениями. Таким образом, высокая температура внутри больших планет подтверждает полученный нами из анализа внутреннего строения звезд вывод о том, что свечение небесных тел имеет совершенно особую природу и не связано с ядерными реакциями [2]. Вероятно, и внутренняя энергия Земли не исчерпывается радиоактивностью пород или механизмом гравитационной дифференциации О.Ю. Шмидта, а в основном имеет ту же «звездную природу».

#### УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о з ы р е в Н . А . [Источники звездной энергии и теория внутреннего строения звезд](#) // Известия Крымской астрофизической обсерватории, 1948, т. 2, с. 3–43.
2. К о з ы р е в Н . А . [Теория внутреннего строения звезд и источники звездной энергии](#) // Известия Крымской астрофизической обсерватории, 1951, т. 6, с. 54–83.
3. E d d i n g t o n A . S . The internal constitution of the stars. Cambridge, 1926, P. 265.

Доклады АН СССР, 1951, т. 79, № 2, с. 217-220.