

Информация о структуре ядра содержится в спектре  $p$ -мод низкой степени, для  $k$ -рых  $0 \leq r_a \leq 0,2 R_\odot$ . Эти моды были открыты при измерениях доплеровских сдвигов спектральных линий в излучении от всего диска Солнца [А. Клавери (A. Claverie) и др., 1979]. Спектр колебаний состоит из большого числа пар дискретных пиков, равноотстоящих друг от друга на 68 мкГц (рис. 3). Из теории известно, что эти колебания имеют большое число узлов вдоль радиуса ( $n = 12 - 35$ ) и для их частот справедливо соотношение:

$$\nu_{n,l} = \left( n + \frac{l}{2} + \beta_{n,l} \right) \nu_0,$$

где  $\nu_0 = \left( 2 \int_0^{R_\odot} dr (a)^{-1} \right)^{-1}$ ,  $\beta_{n,l}$  — число порядка 1. Следова-

тельно, пары частот в наблюдаемом спектре образованы модами с наборами параметров  $(n, l)$  и  $(n-1, l+2)$  и разделены интервалами  $\nu_0/2$  ( $\approx 68$  мкГц). Величина  $\nu_0$  слабо зависит от внутр. строения, но значение разности частот между соседними  $p$ -модами  $\nu_{n,l} - \nu_{n-1, l+2} = \Delta_{n,l}$  ( $\approx 10$  мкГц) может служить индикатором структуры центральных областей Солнца. Измеренные значения  $\Delta_{n,l}$  расходятся с рассчитанными для стандартной модели не более чем на 70% (табл.), но даже это отличие примерно в 10 раз больше ошибок измерений и неопределённости в расчётах. Значит, некоторые из предположений стандартной модели Солнца неточны. Возможно, вследствие неоднородностей в газовом облаке, из  $k$ -рого образовалось Солнце, первоначальный хим. состав ядра отличается от состава оболочки. Одна из моделей предполагает, что первоначальное содержание тяжёлых элементов было примерно в 10 раз меньше, чем наблюдается ныне на его поверхности, и что в ходе эволюции происходило обогащение оболочки тяжёлыми элементами из окружающей среды. Другое возможное отличие от стандартной схемы эволюции Солнца состоит в том, что вещество в зоне лучистого переноса энергии по каким-то причинам частично перемешивалось, и поэтому кол-во водорода в ядре выше, чем в стандартной модели. Обе эти модели предсказывают поток нейтрино от Солнца,  $k$ -рый согласуется с наблюдаемым; однако частоты  $p$ -мод отличаются от измеренных сильнее, чем в случае стандартной модели.

Важная информация о параметрах солнечного ядра может быть получена из наблюдений гравитационных мод. периоды  $k$ -рых лежат в диапазоне 100—300 мин. Эти моды должны иметь небольшие значения степени ( $l = 1 \div 4$ ) и высокие радиальные порядки ( $n \approx 10 \div 20$ ). Теоретич. значения периодов колебаний таковы:

$$P_{n,l} = P_0 \left( n + \frac{l}{2} + \gamma_{n,l} \right) [l(l+1)]^{-1/2},$$

где  $P_0 = 2\pi^2 \left( \int_0^{r_c} N dr / r \right)^{-1}$ ,  $r_c$  — радиус границы конвек-

тивной зоны,  $\gamma_{n,l}$  — числа порядка 1. Для фиксированного  $l$  периоды колебаний почти равноотстоят друг от друга на величину  $P_0 / \sqrt{l(l+1)}$ . Измеренные и теоретич. значения  $P_0$  даны в табл. Пока данные наблюдений  $g$ -мод недостаточно надёжны для уверенных выводов о строении Солнца.

В спектре долгопериодных осцилляций Солнца наблюдается также стабильное изолиров. колебание с периодом 160,01 мин,  $k$ -рое не удаётся объяснить в рамках стандартной модели внутр. строения (А. Б. Северный и др., 1976).

С. с. позволяет также определять скорости вращения внутр. слоёв Солнца. Вращение Солнца снимает вырождение частот  $p$ - и  $g$ -мод по параметру  $m$ : для заданного значения  $l$  собствен. частота расщепляется на  $(2l+1)$  частот, соответствующих  $m = -l, -(l-1), \dots, (l-$

— 1),  $l$ . Расщепление частот связано с тем, что из-за эффекта Доплера волны, распространяющиеся в направлении вращения, сдвинуты к более высоким частотам, в то время как волны, распространяющиеся против вращения, сдвинуты к более низким частотам. Величина расщепления для акустич. мод определяется в осн. зависимостью угл. скорости вращения в экваториальной плоскости  $\Omega_0$  от радиуса:

$$\nu_{n,l,m} - \nu_{n,l,0} = m \langle \Omega_0 \rangle (2\pi)^{-1},$$

где  $\langle \Omega_0 \rangle = \int_{r_a}^{R_\odot} \Omega_0(r) a^{-1} dr / \int_{r_a}^{R_\odot} a^{-1} dr$  — ср. угл. скорость в

области захвата волн. Поскольку радиусы внутр. границ отражения  $r_a$  отличаются для мод с разными  $n$  и  $l$ , то по известному расщеплению частот можно найти ср. значения угл. скорости в разных областях по радиусу. Измерения и анализ вращательного расщепления частот  $p$ -мод показывают, что ядро, по-видимому, вращается в 2 раза быстрее, чем остальная часть Солнца [Т. Дюваль (T. Duvall) и Дж. Харви (J. Harvey), 1984].

Для более прецизионных измерений частот акустич. мод разработаны методы, позволяющие определять зависимость угл. скорости вращения от широты и напряжённости магн. поля внутри Солнца.

Лит.: Nonradial oscillations of stars, Tokyo, 1979; Конс Дж., Теория звездных пульсаций, пер. с англ., М., 1983; Лейбхардер Дж. и др., Гелиосейсмология, «В мире науки», 1985, № 11, с. 4; Северный А. Б., Котов В. А., Цап Т. Т., Колебания Солнца с периодом 160 мин и другие долгопериодные колебания: анализ спектра мощности за 9 лет наблюдений и интерпретация, «Изв. Крым. астрофиз. обс.», 1985, т. 71, с. 3; Christensen-Dalsgaard J., Gough D., Toomre J., Seismology of the Sun, «Science», 1985, v. 229, № 4717, p. 923. А. Г. Косовичев.

Табл. 4. — Спектральные характеристики  $p$ - и  $g$ -мод ( $\bar{\Delta}_l$  и  $\bar{P}_0$  — значения параметра  $\Delta_{n,l}$  для  $l=0$  и 1, усреднённые по всем модам в интервале частот 2,0—4,0 мГц)

	$\bar{\Delta}_0$ , мкГц	$\bar{\Delta}_1$ , мкГц	$\bar{P}_0$ , мин
Наблюдения	9,2 ± 0,6	9,7 ± 0,03	38 ± 3
Стандартная модель	10,0	10,2	35,4
Модель с перемешиванием вещества в ядре Солнца	16,8	17,0	56,9
Модель с пониженным содержанием тяжёлых элементов в лучистой зоне	13,2	10,3	39,6

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА — состоит из Солнца, планет и спутников, множества астероидов и их осколков, комет и межпланетной среды. С. с. расположена вблизи центральной плоскости Галактики на расстоянии ок. 8 кпк от её центра. Линейная скорость вращения С. с. вокруг галактич. центра ок. 220 км/с, скорость движения С. с. относительно межзвёздного газа 22—25 км/с. Внеш. границей С. с. можно считать сферу гравитационн. влияния Солнца (сфера Хилла) радиусом  $\sim 1$  пк  $\approx 2 \cdot 10^5$  а. е. (размеры большинства подсистем С. с. существенно меньше).

Солнце — медленно вращающаяся звезда с массой  $M_\odot \approx 1,989 \cdot 10^{33}$  г, радиусом  $R_\odot \approx 6,96 \cdot 10^{10}$  см, моментом кол-ва движения  $\approx 1,6 \cdot 10^{46}$  г·см<sup>2</sup>/с. Девять планет являются главными спутниками Солнца, их суммарная масса  $\approx 1/743 M_\odot$ , полный момент кол-ва движения  $\approx 3 \cdot 10^{50}$  г·см<sup>2</sup>/с. Суммарная масса всех остальных наблюдаемых компонент С. с., включая облако комет,  $\lesssim 10^{-4} M_\odot$ . Ок. 98% суммарной массы планет приходится на долю планет-гигантов. Схема расположения планетных орбит в С. с. изображена на рис. Орбиты представляют собой эллипсы, в одном из фокусов  $k$ -рых расположено Солнце. Орбита Плутона обычно считается границей планетной системы ( $\approx 39$  а. е.). Простран-