

щие изменения радиуса и яркости Солнца не превышают 0,001%. Тем не менее удалось зарегистрировать широкий спектр колебаний и на его основе получить данные о внутр. строении Солнца.

**Основные свойства колебаний Солнца.** Колебат. движения Солнца, как и всякой сплошной среды, возникают, если нек-рый элемент газа при смещении из положения равновесия испытывает действие силы, стремящейся вернуть его в исходное положение. На Солнце возвращающие силы могут быть трёх типов: 1) градиенты газового давления, возникающие при сжатиях и разрежениях среды. Они вызывают акустич. колебания; 2) выталкивающие (архимедовы) силы, обусловленные неоднородным распределением вещества в поле тяжести. В конвективно устойчивых слоях эти силы создают внутр. гравитац. колебания; 3) инерционные (кориолисовы) силы, связанные с вращением Солнца. Они приводят к инерционным колебаниям, аналогичным волнам Россби в земной атмосфере.

Колебания могут распространяться в виде волн в определ. областях (сферич. слоях) внутри Солнца. Если эти слои снизу и сверху ограничены зонами, где волновое распространение невозможно, то волны отражаются от границ областей распространения и будут там захвачены. В результате многократного отражения от границ и интерференции захваченных волн образуются стоячие волны, к-рые часто называют собств. колебаниями или модами. Каждая мода имеет свою частоту (зависит от условий в области захвата) и определённую пространственную картину смещений: сферич. поверхности разбиваются на отдельные колеблющиеся участки, разделённые вдоль меридианов и параллелей узловыми линиями, на к-рых газ неподвижен; вдоль радиуса внутри области захвата колебания имеют пучности и узлы, а вне её — экспоненциально затухают. Зная частоту и общую картину колебаний на поверхности, можно восстановить радиальную структуру моды и определить условия в области захвата.

Ещё не вполне ясно, каким образом на Солнце происходит возбуждение колебаний. Возможно, они являются результатом турбулентных движений в конвективной зоне, способных случайным образом возбуждать и гасить колебания. В энергию колебаний может преобразовываться избыток тепла, возникший при увеличении скорости ядерных реакций или при нек-рой задержке потока лучистой энергии в результате локального сжатия вещества.

Акустич. волны (см. *Упругие волны*) имеют периоды от 3 мин до 1 ч. Они распространяются со скоростью звука и отражаются за счёт градиентов плотности и темп-ры во внутр. областях Солнца. Верх. граница отражения лежит сразу под видимой поверхностью (*фотосферой*) Солнца, где плотность резко падает с высотой. Здесь отражаются все волны, для к-рых циклич. частоты  $\omega$  меньше т. н. акустич. частоты обрезания:  $\omega_a = a/2H$ , где  $a$  — скорость звука,  $H$  — характерный масштаб изменения плотности. В фотосфере  $a \approx 6 \cdot 10^8$  см/с,  $H \sim 10^7$  см; поэтому  $\omega_a = 3 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. Соответственно, мин. период захваченных волн  $P_a = 2\pi/\omega_a \approx 200$  с. Поскольку акустич. волны с большими периодами отражаются от более глубоких слоёв, то на поверхности легче всего наблюдаются волны с периодами, близкими к  $P_a$ , — т. н. пятиминутные колебания. Акустич. волна, отражённая от этой верх. границы, распространяется вниз. В результате роста темп-ры с глубиной (а значит, и скорости звука) более глубокая часть волнового фронта движется с более высокой скоростью. Поэтому фронт волны постепенно изгибается, пока волна не поворачивает обратно к поверхности. На нижней отражающей границе горизонтальный компонент фазовой скорости волны равен скорости звука. Т. о., захваченные акустич. волны распространяются вдоль дугообразных траекторий под поверхностью Солнца. Стоячие акустич. волны наз. *p*-модами; они наиболее изучены в наблюдениях.

Внутр. гравитац. волны (см. *Внутренние волны*) имеют периоды, превышающие 20 мин. Они могут распространяться только в области с конвективно устойчивой стратификацией (расслоением) вещества и, кроме того, при условии, что их частота меньше частоты плавучести  $N$  (частоты Брента — Вайсяля):

$$N^2 = g\beta \left[ \frac{dT}{dr} - \left( \frac{dT}{dr} \right)_{ад} \right],$$

где  $g$  — локальное ускорение силы тяжести,  $\beta = -\rho^{-1}(\partial\rho/\partial T)_p$  — коэф. теплового расширения,  $\rho$  — плотность,  $(dT/dr)$  — радиальный градиент темп-ры на Солнце,  $(dT/dr)_{ад} = -\beta Tg/c_p$  — т. н. адиабатич. градиент,  $c_p$  — уд. теплоёмкость. В области лучистого теплопереноса, устойчивой относительно конвекции,  $N^2 > 0$ . В конвективной зоне  $N^2 < 0$ . Поэтому внутр. гравитац. волны захвачены глубоко в недрах Солнца под конвективной зоной. Верхняя и нижняя границы отражения находятся там, где  $N$  приближается к  $\omega$ . Стоячие внутр. гравитац. волны наз. *g*-модами. Надёжных наблюдат. данных о свойствах этих мод пока не получено.

Инерционные волны представляют собой почти горизонтальные вихревые движения газа с большими периодами, сравнимыми с периодом вращения Солнца ( $\approx 25$  сут). На распространение этих волн вдоль радиуса Солнца влияет сила плавучести. В зависимости от частоты они могут распространяться либо в центр. зоне лучистого переноса энергии, где  $N^2 > 0$ , либо в конвективной зоне ( $N^2 < 0$ ). В последнем случае область захвата является узкий слой в верх. части конвективной зоны, характеризующийся глубоким минимумом  $N^2$  (область неэффективной конвекции). Захваченные здесь волны могут наблюдаться на поверхности Солнца. Стоячие инерционные волны наз. *r*-модами; пока их наблюдать не удалось.

**Теоретическое описание акустических и гравитационных мод.** Поскольку периоды *p*- и *g*-мод намного меньше периода вращения Солнца, то в первом приближении пренебрегают влиянием вращения и колебания рассматриваются как малые периодич. возмущения равновесного состояния Солнца. В сферич. системе координат ( $r, \theta, \varphi$ ) распределение амплитуды стоячих волн по поверхности постоянного радиуса описывается сферич. гармониками  $Y_l^m(\theta, \varphi)$  (см. *Сферические функции*), где  $l$  — степень сферич. гармоники — целое число, равное полному кол-ву узловых линий на поверхности и задающее горизонтальную компоненту волнового вектора  $k_h = \sqrt{l(l+1)}/r$ ;  $m$  — азимутальный порядок — целое число, принимающее значения от  $-l$  до  $+l$  и определяющее число узловых линий, пересекающих экватор. Глубинная структура мод характеризуется радиальным порядком  $n$  — числом узлов вдоль радиуса. Собств. частоты и распределения амплитуды колебаний вдоль радиуса находятся в результате решения задачи на собств. значения, для систем обыкновенных дифференц. ур-ний, вытекающих из ур-ний гидродинамики в линейном приближении. В КВ-приближении решения этих ур-ний пропорциональны  $\exp(ik_r r)$ , где радиальный компонент волнового вектора  $k_r$  связан с частотой  $\omega$  дисперсионным соотношением

$$k_r^2 = (\omega^2 - N^2) \left( \omega^2 - L_l^2 \right) (\omega a)^{-2},$$

$$L_l^2 = l(l+1)a^2 r^{-2}. \quad (1)$$

Глобальные свойства осцилляций Солнца удобно рассмотреть с помощью т. н. диаграммы распространения, на к-рой изображены распределения критич. частот  $N^2$  и  $L_l^2$  по радиусу от центра до внеш. атмосферы Солнца (рис. 1). Собств. колебания возможны, если зона распространения волн ( $k_r^2 > 0$ ) ограничена с обеих сто-