

ной (48.53). Физические свойства вещества в этих работах брались, как в [568] и значения  $M_{c0}$  в этих работах почти совпадают. Исследование колебаний звезд с массами от 60 до  $600 M_{\odot}$  показало, что при  $M < 100 M_{\odot}$  колебания звезд практически не приводят к потере массы. Звезды с массами  $M = 100 - 200 M_{\odot}$  теряют массу в процессе колебаний, но за время жизни на главной последовательности эта потеря не очень существенна ( $\leq 3 \cdot 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ ). Если же масса звезды превышает  $300 M_{\odot}$ , то существенная часть массы звезды теряется на стадии водородного горения.

В последующих работах [539, 540] как в аналитических, так и в численных расчетах была получена генерация из-за неустойчивости нескольких радиальных мод колебаний, что приводит к изрезанности кривой предельного цикла  $u(t)$ . В то же время у звезд с массами от 70 до  $210 M_{\odot}$  на стадии нелинейных пульсаций не было получено истечения вещества с поверхности. В [540] отмечается, что отсутствие возбуждения гармоник в работах [568, 603], возможно, связано с выбором слишком большого значения  $F$  при численных расчетах. Истечения вещества в [540] получено не было. Возможно, что, как и в [603], отсутствие истечения связано с грубостью пространственной сетки у поверхности звезды.

## § 51. О переменных звездах

Наблюдения показывают, что все звезды в большей или меньшей степени меняют свой блеск, т. е. являются переменными. Открытие солнечных пульсаций в области периодов  $\sim 5$  мин привели к рождению новой области астрофизики — гелиосейсмологии. К настоящему времени наблюдалось более тысячи частот собственных колебаний Солнца, измеренных с точностью до четвертого-пятого знака [83а]. Этим колебаниям соответствуют небольшие амплитуды переменности блеска  $\Delta m = 10^{-5} \div 10^{-6}$  и они относятся к высоким акустическим  $P$ -модам с  $n = 11 \div 33$  и различными значениями  $l$ , меняющимися от нуля до нескольких сотен. По  $m$  наиболее благоприятны для наблюдений значения  $m = 0, \pm 1$ .

Экспериментальные значения собственных частот сопоставляются с теоретическими, которые в области больших  $n, l$  представимы в виде [83а]

$$\frac{\omega_{nl}}{2\pi} \approx \left( n + \frac{l}{2} + \epsilon_p \right) \Delta\nu - \frac{l(l+1) + \delta_p}{n + \frac{l}{2} + \epsilon_p} A_p \Delta\nu, \quad (50.12)$$

где

$$\Delta\nu = \left( 2 \int_0^R \frac{dr}{c_s} \right)^{-1}, \quad \epsilon_p, \delta_p, A_p - \quad (50.13)$$

константы, чувствительные к строению Солнца.

В первом приближении частоты колебаний с одинаковыми  $n + l/2$  совпадают. При фиксированном  $l$  частоты эквидистантны по  $n$  с интервалом  $\Delta\nu$ . Отклонение от такого вырождения описывается вторым членом

$$\delta\nu_{nl} = \nu_{nl} - \nu_{n-1, l+2} \approx \frac{2(2l+3)}{l + \frac{1}{2} + \epsilon_p} A_p \Delta\nu. \quad (50.14)$$

Определение из наблюдений "большого"  $\Delta\nu$  и "малого"  $\delta\nu_{nl}$  расщеплений дает уникальную информацию о внутреннем строении Солнца, которое в принципе восстанавливается с помощью решения обратной задачи. Расщепление частот по  $m$  связано с вращением Солнца и его магнитным полем. К настоящему времени сделаны лишь первые шаги в решении такой обратной задачи [83а].

Помимо Солнца, звезд-цефеид и звезд типа RR Лиры, пульсации наблюдаются у белых карликов (типа ZZ Кита) с периодами  $P = 200 \div 1000$  с, переменных типа  $\delta$  Щита ( $P = 1 \div 3$  ч), ярких голубых звезд типа  $\beta$  Цефея ( $P = 4 \div 6$  ч), звезд типа W Девы ( $P = 2 \div 45$  сут), примыкающих к цефеидам, и RV Тельца ( $P = 20 \div 150$  сут) [130]. Звезды типа  $\delta$  Щита, или карликовые цефеиды, относятся примерно к тому же спектральному классу, что и звезды типа RR Лиры (A2 - F3), но слабее последних на  $2 \div 3^m$  ( $M_V, \delta$  Щита  $\approx 2 \div 3^m$ ). Амплитуды их колебаний  $0,01 \div 0,1^m$ , а механизм возбуждения связан с зонами неполной ионизации, как у цефеид или звезд типа RR Лиры. Механизмы возбуждения колебаний голубых гигантов спектрального класса B1  $\div$  B2 вблизи главной последовательности типа  $\beta$  Цефея, имеющих массы  $10 \div 20 M_\odot$  и светимости  $\sim 10^3 L_\odot$ , остаются неясными [155].

Наряду с регулярно пульсирующими звездами имеются различные типы звезд, показывающие нерегулярную переменность. Наиболее многочисленными являются красные вспыхивающие звезды малой массы типа UV Кита [197]. Источником переменности у них, а также у более массивных молодых звезд типа T Тельца (см. гл. 8) является мощная конвекция в оболочке. Нерегулярные переменности с характерными временами  $100 \div 700$  суток наблюдаются у красных гигантов, называемых миридами (по звезде Мира Кита). Мириды теряют массу со скоростью  $10^{-6} \div 10^{-4} M_\odot/\text{год}$ ; истечение связывается с прохождением ударных волн в оболочках этих звезд [200, 208]. Явления нерегулярности, связанные с непостоянством кривых блеска, наблюдаются и у звезд типа RV Тельца, являющихся гигантами, несколько менее красными, чем мириды, в которых начинают проявляться эффекты ударных волн. Нерегулярные переменности, наблюдаемые у некоторых типов звезд, видимо, являются проявлениями таких неустойчивостей, которые способны привести к частичной хаотизации поведения звезды как динамической системы.