

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МОДЕЛЯХ СОВРЕМЕННОГО СОЛНЦА
С ПЕРЕМЕШАНЫМИ ВНУТРЕННИМИ СЛОЯМИ

Е. А. Гаврусева, Г. Т. Зацепин, Ю. С. Копысов

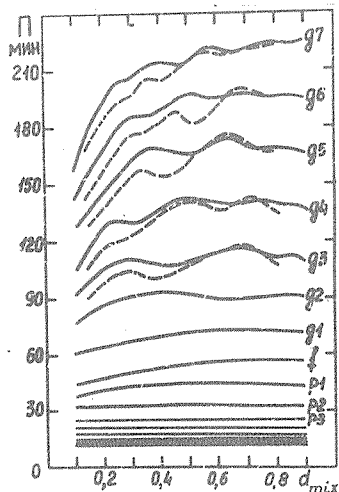
УДК 523.74.76 + 539.123

На примере моделей современного Солнца показано, что концентрация амплитуды собственных колебаний звезды в центральной области происходит в том случае, если узел амплитуды радиального смещения попадает на границу перемешанного ядра. Предлагается объяснение выделенности наблюдаемых 160 мин осцилляций.

Пульсация поверхности Солнца с периодом 160 мин, открытые в 1976 г. /1/, не нашли до сих пор достаточно обоснованного теоретического объяснения. Радиальные колебания не могут иметь столь длительный период. Нерадиальные осцилляции с высокими l и низкими нечетными $l = 1, 3, \dots$ не могли регистрироваться в эксперименте А. Б. Северного /2/. В спектре квадрупольных колебаний ($l = 2$) 160-мин пульсациям соответствуют только высокие гравитационные (g -) моды /3/. При этом остается непонятным, почему не наблюдаются более низкие g -моды, которые, согласно теоретическим представлениям, должны возбуждаться в первую очередь.

Замечательная стабильность фазы 160-мин пульсаций, проявляющаяся в том, что иногда они исчезают, а когда появляются вновь, то имеют ту же фазу, как если бы они не прекращались /3/, позволила предположить, что эти колебания сосредоточены во внутренних областях Солнца /4, 5/. При этом их выделенность объяснялась тем, что, являясь высокой g -модой всего Солнца, колебания с таким периодом оказываются одной из основных мод ядра, в котором происходит их возбуждение. Эта гипотеза сначала проверялась на примере многозонных политропических моде-

лей /4-6/. Дальнейшее исследование велось на основе моделей с перемешанными ядрами, построенных с использованием уравнения теплового равновесия /7/. Постановка задачи на малые колебания звезды подробно описана в /8/. Изучались радиальные и квадрупольные колебания в моделях с различной долей перемешанной по водороду массы d_{mix} для ряда значений концентрации водорода в оболочке X_0 /7/. Радиальные колебания практически не чувствительны к изменению параметров модели. Они захватывают фактически только самые верхние слои Солнца. Так, амплитуда радиальных смещений на поверхности превышает максимальное смещение в центральных областях во всех моделях на 3 + 4 порядка. Эти осцилляции происходят с периодами меньше или порядка 1 часа.



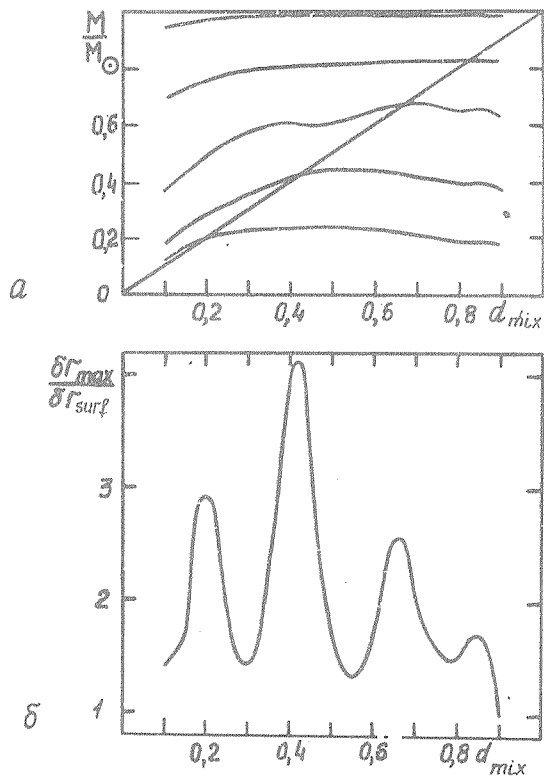
Р и с. 1. Зависимость периодов квадрупольных колебаний от доли перемешанной по водороду массы d_{mix} при содержании водорода в оболочке $X_0 = 0,7$ (сплошные линии) и $X_0 = 0,75$ (пунктирные линии)

Иначе обстоит дело с квадрупольными колебаниями. При $l = 2$ имеются как колебания с малыми периодами, называемые звуковыми или p-модами по классификации Каулинга /9/, которые ведут себя аналогично радиальным модам, так и долгопериодические гравитационные моды, частоты и вид собственных функций которых опре-

деляются строением Солнца в целом. Как видно из рис. 1, на величинах периодов g -мод особенно сильно сказывается изменение параметра d_{mix} . С увеличением доли перемешанной массы наблюдается общий рост периодов g -мод, более ярко выраженный для мод высокого порядка. Однако зависимость эта не монотонная. Для d_{mix} , лежащих в интервале от 0,25 до 0,55 + 0,6, можно подобрать содержание водорода в оболочке такое, что полученная модель будет иметь колебание с периодом 160 мин, которое идентифицируется как g_5 -мода. Для меньших d_{mix} такой период при соответствующем подборе X_0 будут иметь уж более высокие моды — g_6 , g_7 и т.д. Для $d_{mix} \geq 0,6$ при всех X_0 g_5 -мода обладает периодом несколько большим 160 мин, а g_4 — заметно меньшим.

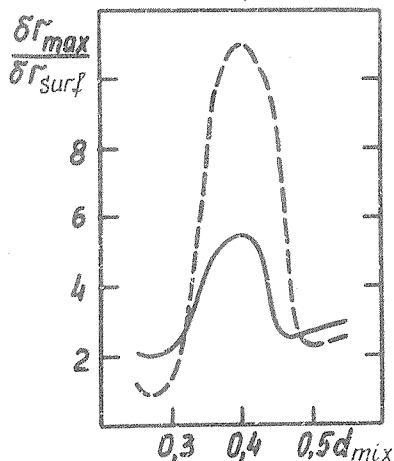
Если колебания возбуждаются в ядре, то потери их энергии, обусловленные в основном вязкими силами, наиболее значительны в конвективной оболочке, где существенна турбулентная вязкость. Эти потери пропорциональны квадрату амплитуды смещения. Если колебание сосредоточено преимущественно в центральной области, то оно будет испытывать малое разрушающее влияние внешних слоев, так как диссипация энергии осцилляций там подавлена из-за малости смещения. Так как пока трудно что-либо сказать о соотношении скорости поступления энергии в колебание и диссипации в конвективной оболочке, то определить, во сколько раз амплитуда в недрах должна превышать амплитуду на поверхности, невозможно. Но совершенно ясно, что чем значительнее такое превышение, тем вероятнее возбуждение соответствующей моды. Кроме того, фаза такого колебания должна быть исключительно стабильной, что находилось бы в хорошем согласии с экспериментальными данными /2/.

С этой точки зрения чрезвычайно интересным оказывается поведение амплитуды радиальной части смещения g -мод при изменении доли перемешанной массы. На рис. 2б представлена зависимость отношения максимальной амплитуды радиального смещения в центральной области δr_{max} к амплитуде на поверхности δr_{surf} (максимальной во внешних слоях) от d_{mix} для g_5 -моды квадрупольных колебаний Солнца при $X_0 = 0,7$ и толщине переходного слоя $\Delta M = 0,05 M_\odot$. Эта зависимость имеет максимумы при тех значениях d_{mix} , когда какой-либо из внутренних узлов радиального смещения попадает на границу перемешанного ядра. На рис. 2а



Р и с. 2. Зависимость положения узлов радиальной части амплитуды смещения (а) и отношения $\delta\gamma_{max}/\delta\gamma_{surf}$ (б) от величины параметра d_{mix} для g_5 -моды квадрупольных колебаний Солнца при $X_0 = 0,7$; $\Delta M = 0,05 M_{\odot}$.

показано поведение узлов радиальной части амплитуды смещения при изменении d_{mix} . По-видимому, от границы перемешанного ядра происходит отражение колебаний. Отражение происходит тем эффективнее, чем ближе к границе находится узел радиального смещения. Когда узел попадает на границу, колебание оказывается практически сосредоточенным в малой центральной области. Причем это тем сильнее выражено, чем больше разница в содержании водорода в ядре и в оболочке, и чем тоньше переходной слой ΔM .



Р и с. 3. Зависимость отношения $\delta r_{max}/\delta r_{surf}$ от величины параметра d_{mix} для ϵ_5 -моды квадрупольных колебаний Солнца при $X_0 = 0,75$; $\Delta M = 0,05 M_\odot$ (сплошная линия), $\Delta M = 0,01 M_\odot$ (пунктирная линия)

Подтверждением сказанному служит рис. 3, на котором представлено отношение δr_{max} к δr_{surf} ϵ_5 -моды для моделей с различной толщиной переходного слоя $\Delta M = 0,05 M_\odot$ и $\Delta M = 0,01 M_\odot$, $X_0 = 0,75$ при изменении d_{mix} вблизи 0,4, и сравнение его с рис. 2б.

Описанное свойство амплитуды смещения позволяет понять, почему может наблюдаться только одна из высоких ϵ -мод не-радиальных колебаний, в то время как более низкие моды отсутствуют. Это вызвано, с одной стороны, ядерным механизмом возбуждения колебаний и, с другой стороны, наличием внутри Солнца перемешанного ядра. Проведенные расчеты показали, что 160-мин осцилляции при $1 = 2$ будут выделены в тех случаях, когда такое ядро захватывает примерно $0,4 M_\odot$ или $0,1 M_\odot$, а колебание идентифицируется при этом как ϵ_5 -или ϵ_7 -мода соответственно. Если принять в качестве модели современного Солнца модель с $d_{mix} = 0,4$, то, помимо ϵ_5 -моды, возможно возбуждение ϵ_7 -моды с периодом около 205 мин, которая также оказывается сосре-

доточечной в ядре. Более низкие моды будут испытывать сильную диссипацию во внешних слоях, так как амплитуда радиального смещения у них не убывает, а растет к поверхности.

Поступила в редакцию

26 мая 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. V. A. Kotov, A. B. Severny, T. T. Tsap, *Nature*, 259, 87 (1976).
2. А. Б. Северный, В. А. Котов, Т. Т. Цап, *АЖ*, 56, 1137 (1979).
3. J. R. Brookes, G. R. Isaak, H. B. van der Raay, *Nature*, 259, 92 (1976).
4. Г. Т. Зацепин, Е. А. Гаврюсева, Ю. С. Копысов, *ДАН СССР*, 251, 1342 (1980).
5. Е. А. Гаврюсева, Ю. С. Копысов, *АЖ*, 58, 610 (1981).
6. Е. А. Гаврюсева, Ю. С. Копысов, Препринт ИЯИ АН СССР, II-0157, М., 1980 г.
7. Е. А. Гаврюсева, Краткие сообщения по физике ФИАН № 10, 52 (1981).
8. P. Ledoux, Th. Walraven, *Handbuch der Physik*, v. 51, Springer, Berlin, 1958.
9. T. G. Cowling, M. A. D. Phil, *MNRAS*, 101, 367 (1942).
10. R. Davis, jr., *Proc. Inform. Conf. Brookhaven Nat. Lab.*, Upton, New-York, v. 1, p. 1, 1978.