

ДВУХЛЕТНИЕ ПУЛЬСАЦИИ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА

Ю.С.Копысов

Рассмотрена возможность возбуждения гравитационных колебаний солнечного ядра, которые бы могли быть причиной двухгодичных пульсаций потока солнечных нейтрино.

Согласно [1, 2] хлор-аргоновые измерения 1970 – 78 гг. указывают на пульсации потока солнечных нейтрино с периодом $\Pi_{\nu} \sim 2$ года, коррелирующие с 26-месячными вариациями числа солнечных пятен. Из-за недостаточности статистики достоверность утверждения о нейтринных пульсациях, по-видимому, невелика, тем не менее выявление принципиальной возможности модуляции потока нейтрино очень важно для постановки дальнейших экспериментов.

Покажем, что естественным механизмом такой модуляции могло бы быть возбуждение низшей g -моды солнечного ядра в предположении, что оно близко к адиабатическому равновесию [3, 4].

Будем описывать солнечное ядро двухзонной политропой. Пусть радиус первой зоны $R_1 \sim 0,1$ радиуса Солнца R_{\odot} и индекс политропы $n_1 = N + \nu_1$, а внешний радиус второй зоны $R_2 \sim 0,2 R_{\odot}$ и $n_2 = N + \nu_2$, где $N = 1/(\gamma - 1)$ а $\gamma = 5/3$ – показатель адиабаты. ν_1 и ν_2 , характеризующие степень отклонения от адиабатического равновесия, подберем так, чтобы период Π_1 низшей дипольной g -моды, для которой первый узел лежит на границе внутреннего ядра R_1 , был равен $2\Pi_{\nu}$, а период Π_2 низшей квадрупольной g -моды, для которой первый узел лежит при $R = R_2$, был равен $160 \text{ мин}^{1)}$. Согласно [4], если параметр ν_3 для мантии подчиняется неравенству $\nu_3 \gg \nu_2$, то амплитуда радиальных смещений для 160-минутной моды в ядре будет выше, чем в мантии. Аналогично при $\nu_2 \gg \nu_1$ амплитуда 52-месячных колебаний во внутреннем ядре будет выше, чем во внешнем.

Если нерадиальные колебания описывать линейными уравнениями [7, 8], то период можно выразить через ν_1 в виде [3]:

$$\Pi_1 \approx \frac{3\pi(k+1)}{x_1} \sqrt{\frac{\pi(N+1)}{G\rho_c l(l+1)\nu_1}}, \quad (1)$$

где $x_1 = R_1/r_0$, $r_0 = \frac{(n_1+1)P_c}{4\pi G\rho_c^2}$, G – гравитационная постоянная, ρ_c и P_c – плотность и давление в центре Солнца, l и k – сферическое волновое число и порядок g -моды внутреннего ядра. Например, для ядра модели из [4] ($\rho_c = 124 \text{ г/см}^3$, $P_c = 2,135 \cdot 10^{17} \text{ дин/см}^2$, $R_1 =$

¹⁾ Осцилляции поверхности Солнца с $\Pi_2 = 160 \text{ мин}$ обнаружены впервые в КРАО [5, 6], а возможность объяснения их колебаниями ядра рассмотрена в [3, 4].

$= 0,14 R_{\odot}$) периоду $\Pi_1 = 52$ месяца соответствует

$$\nu_1 \approx 4 \cdot 10^{-9}. \quad (2)$$

Покажем, что (2) можно считать предельной величиной, соответствующей предельному значению периода Π_1 , получающемуся из условия, что добротность солнечного резонатора

$$Q = \frac{2\pi}{\Pi_1} \frac{W}{P} \quad (3)$$

(W — полная энергия колебаний, P — диссипируемая мощность) должна быть выше единицы. Оценим по порядку величин W и P .

Полную энергию колебаний Солнца запишем в виде

$$W = \kappa W_1, \quad (4)$$

где W_1 — энергия колебаний ядра с массой $M_1 \sim 0,1 M_{\odot}$, а

$$\kappa \sim \frac{M_{\odot}}{M_1} \left(\frac{R_{\odot}}{R_1} \right)^2. \quad (5)$$

При $R_1 \sim 0,1 R_{\odot}$ $\kappa \sim 10^3$. Для оценки W_1 представим энергию ядра в виде

$$E_1 = - \frac{3n_1 - 1}{5n_1 - 1} \frac{GM_1^2}{R_1} = E_{10} + \epsilon, \quad (6)$$

где

$$E_{10} = - \frac{3N - 1}{5N - 1} \frac{GM_1^2}{R_1} \quad (7)$$

полная энергия ядра в состоянии адиабатического равновесия,

$$\epsilon \approx - \frac{2\nu_1}{(5N - 1)^2} \frac{GM_1^2}{R_1} \quad (8)$$

малая добавка, определяющая отклонение от адиабатического равновесия и являющаяся мерой энергии, которая может содержаться в упругих степенях свободы ядра. Накачка энергии в g_1 -моду ядра осуществляется [8, 9] благодаря возмущениям скорости горения ${}^3\text{He}$, обусловленным циркуляцией вещества на фоне сильного градиента концентраций ${}^3\text{He}$. Ввиду большой глубины модуляции скорости счета солнечных нейтрино [2] ($\sim 1 SNU$ в минимуме и $3 \div 4 SNU$ в максимуме), возникающей в нашей модели из-за ускорения цепи реакций ${}^3\text{He} (\alpha, \gamma) {}^7\text{x} \times \text{Be} (p, \gamma) {}^8\text{B} (e^+ \nu) {}^8\text{Be}^*$ вследствие заноса избытка ${}^3\text{He}$ в центр

Солнца, необходимо потребовать, чтобы амплитуда циркуляций была $\sim R_1$. Это означает, что энергия колебаний, $W_1 \sim (2\pi/\Pi_1)^2 R_1^2 M_1$, близка к своему предельному значению $W_1 \sim \epsilon$. Полагая, что диссипация P равна термоядерной энергии, преобразующейся в энергию колебаний, находим из (3), (4), (5) и (8):

$$Q \sim \frac{4\pi}{(5N-1)^2} \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^2 \frac{L_\odot}{P} \frac{R_\odot}{R_1} \frac{t_k}{\Pi} \nu_1 \kappa, \quad (9)$$

где $t_K = GM_\odot^2/R_\odot L_\odot = 3 \cdot 10^7$ лет. Используя (1) и (2) и полагая $P \sim 0,5 L_1 \sim 0,1 L_\odot$, находим при $M_1 = 0,1 M_\odot$, $R_1 = 0,1 R_\odot$:

$$Q \sim 10^{-2} \kappa \left(\frac{\Pi_1}{\Pi} \right)^3. \quad (10)$$

При $\kappa \sim 10^3$ и при $\Pi = \Pi_1$ $Q \sim 10$, т.е. Π_1 является предельным значением, так как увеличение периода ($\Pi > \Pi_1$) ведет к недопустимому снижению добротности. Из (10) следует, что $\kappa \gg 1$ — необходимое условие возбуждения колебаний. Физический смысл этого неравенства в том, что подавляющая доля энергии, генерируемой при циркуляциях вещества, должна идти не столько на поддержание самой циркуляции, сколько на стимулирование тепловых пульсаций ядра, энергия которых, например, посредством параметрического резонанса, должна преобразовываться в энергию гравитационных колебаний солнечной мантии. От ядра к поверхности должна распространяться сейсмическая волна, которая, возможно, и модулирует пятнообразующую активность Солнца.

В 1963 г. Зацепин высказал гипотезу об 11-летних вариациях потока солнечных нейтрино [10]. В нашей модели это действительно возможно, если кроме g_1 возбуждается и дипольная g_4 -мода внутреннего ядра, период которой ~ 22 года. Возбуждение именно g_4 -моды могло бы быть следствием ее резонанса с магнитогидродинамическим процессом переполюсовки магнитного поля Солнца. В этом случае 11-летняя активность синхронизована с колебаниями ядра и ядро служит тем скрытым хронометром, на существование которого указал Дике [11]. Глубина 11-летней модуляции должна быть ниже глубины двухлетней модуляции. Экспериментально 11-летние вариации потока намного труднее выделить, чем двухлетние.

Учет вращения усложняет модель, однако принципиальная сторона явлений не меняется, если момент вращения на единицу массы вещества постоянен вдоль радиуса. Такое распределение может установиться вследствие медленного перемешивания, вызываемого угловой неоднородностью накопления ${}^4\text{He}$, неизбежно существующей при нерадиальных колебаниях ядра. Это же перемешивание, по-видимому, служит главной причиной близости внутреннего ядра к состоянию адиабатического равновесия.

Двухлетние и 11-летние пульсации ядра могут привести к частотной и амплитудной модуляции 160-минутных осцилляций. Частотную моду-

ляцию можно искать по периодическому смещению фазы этих осцилляций.

В заключение выражаю благодарность Г.Т.Зацепину, обратившему мое внимание на работу [1]. За полезные обсуждения благодарю также А.Е.Чудакова и В.Г.Лапчинского.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
18 июня 1981 г.

Литература

- [1] *Sakurai K.* Nature, 1979, 278, 146.
 - [2] *Sakurai K.* Publ. Astron. Soc. Japan, 1980, 32, 547.
 - [3] *Копысов Ю.С.* Препринт ИЯИ АН СССР П-0041, Москва, 1976.
 - [4] *Зацепин Г.Т., Гаврюсева Е.А., Копысов Ю.С.* ДАН СССР, 1980, 251, 1342.
 - [5] *Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T.* Nature, 1976, 259, 87.
 - [6] *Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.* Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1978, 183, 61.
 - [7] *Cowling T.G., Phil M.A.D.* Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1942, 101, 367.
 - [8] *Christensen-Dalsgaard J., Dilke F.W.W., Gough D.O.* Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1974, 169, 429.
 - [9] *Гаврюсева Е.А., Копысов Ю.С.* Краткие сообщения по физике, 1981, №2, 14.
 - [10] *Zatsepin G.T.* Int. Conf. on Cosmic Rays, Jaipur, 1963, 6, 150;
Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. Вестник АН СССР, 1964, №2, 50.
 - [11] *Dicke R.H.* Nature, 1978, 276, 676.
-