

## К ВОПРОСУ О СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

М. Г. Щепкин

Рассмотрено одно из возможных объяснений противоречия между теоретическими предсказаниями и результатами наблюдения нейтринного потока от Солнца. Исходным является предположение о том, что температура внутренних слоев Солнца периодически меняется со временем. При определенных условиях возможна ситуация, когда нейтринная светимость Солнца становится резко меняющейся со временем, а фотонная светимость остается практически постоянной.

Последнее сообщение Дэвиса [ 1 ] о результатах поиска солнечных нейтрино, противоречащих предсказаниям теоретических моделей [ 2, 3 ], вызвало появление ряда работ [ 4 - 6 ], в которых обсуждаются возможные причины возникшего разногласия. Часть выдвигаемых гипотез может быть проверена непосредственно на опыте в земных условиях. Проверка остальных, возможно, потребует уточнения наших знаний о внутризвездных процессах. В основном объяснения возникшего разногласия связаны с анализом реакций, приводящих к образованию  $Be^7$  и  $B^8$ . Ряд авторов упомянутых выше работ высказывают в связи с этим мнение о том, что противоречие пока не столь серьезно, чтобы коренным образом пересматривать существующие представления о строении солнечной материи. Так или иначе противоречие существует, и нам представляется интересным проанализировать одну из возможностей, отмеченных в работах [ 4 - 6 ]. Предположим, что температура внутренних слоев Солнца периодически меняется со временем, оставив в стороне обсуждение причин, которые могут привести к таким изменениям. Характерные промежутки времени, в течение которых происходит изменение температуры, мы будем считать малыми по сравнению со временем релаксации, за которое излучение, рождающееся во внутренних областях Солнца, выходит наружу.

В связи с сильной зависимостью интенсивности нейтринного излучения от температуры [ 4 ] испускание нейтрино происходит в основном в те моменты времени, когда температура максимальна. Поскольку нейтрино практически не взаимодействует с солнечным веществом, успех наблюдения нейтринного потока от Солнца целиком зависит от того, в какой момент времени производится наблюдение. Излучение фотонов также весьма чувствительно к колебаниям температуры. Однако, в отличие от нейтрино, которые практически моментально проходят толщу Солнца, фотоны в силу того, что их движение носит характер диффузии, в среднем за  $(2 - 3) \cdot 10^4$  лет достигают поверхности Солнца. Если периоды колебаний температуры внутри Солнца, как мы условились ранее, значительно меньше этой величины, то непостоянство во времени фотонной эмиссии внутри Солнца слабо скажется на поверхностных явлениях, определяющих светимость Солнца. Итак, температурные колебания внутри Солнца могут привести к тому, что нейтринная светимость становится резко меняющейся со временем, а фотонная светимость Солнца остается практически постоянной. Таково

качественное описание рассматриваемой возможности. Обратимся теперь к количественным оценкам. При этом коэффициент диффузии  $D = \lambda c / 3$  ( $\lambda$  — длина свободного пробега фотонов) мы будем считать постоянным, не зависящим от координат. Величину  $D$  можно определить, зная светимость Солнца  $L_{\odot}$ . Для этого рассмотрим случай, когда выделение лучистой энергии происходит непрерывно внутри малой области радиуса  $R \sim (0,1 - 0,2)R_{\odot}$ , где  $R_{\odot}$  — радиус Солнца. В этой области плотность лучистой энергии, очевидно, обратно пропорциональна расстоянию от центра звезды

$$f(r) = f_0 \frac{R}{r}, \quad (1)$$

$f_0$  — плотность энергии на краю излучающей области:

$$f_0 = \frac{\sigma}{c} T^4.$$

$\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана,  $c$  — скорость света,  $T$  — температура в точке  $r = R$ . Подставив  $f(r)$  в уравнение для светимости

$$L_{\odot} = -4\pi r^2 D \nabla f, \quad (r \geq R), \quad (2)$$

находим

$$D = \frac{c L_{\odot}}{4\pi R \sigma T^4}. \quad (3)$$

Вернемся к задаче о температурных колебаниях и рассмотрим для примера случай, когда температура внутренних слоев Солнца меняется по закону

$$T(t) = T_0 \left( 1 + \frac{\Delta T}{T_0} \cos \frac{t}{\Delta t} \right). \quad (4)$$

Постоянную  $T_0$  следует выбрать так, чтобы энергия, выделяемая в виде излучения внутри Солнца, усредненная по промежутку времени, значительно большему, чем  $\Delta t$ , была равна энергии, рассчитанной по модели с постоянной температурой  $T_{\text{пост}}$ . Выделение лучистой энергии пропорционально пятой степени температуры [4]. Величину  $T_0$  можно положить равной  $T_{\text{пост}}$ , если в разложении  $[T(t)]^5$  по степеням  $\Delta T$  можно учитывать первые два члена

$$E_{\gamma} \sim [T(t)]^5 \approx T_0^5 \left( 1 + 5 \frac{\Delta T}{T_0} \cos \frac{t}{\Delta t} \right). \quad (5)$$

Выясним, какова временная зависимость эмиссии с поверхности Солнца, если внутри энерговыделение происходит по закону (5). Функция Грина уравнения диффузии для ограниченной среды с постоянным коэффициентом диффузии имеет вид:

$$G(r, 0; t, t') = \frac{1}{2R_{\odot}^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin \frac{n\pi r}{R_{\odot}} \exp \left( -n^2 \frac{t-t'}{r} \right), \quad (6)$$

где  $\tau = R_{\odot}^2 / \pi^2 D$  — некое характерное для данной задачи время релаксации, в течение которого рождающееся внутри излучение выходит наружу. Выбрав  $D$  согласно (3), находим

$$\tau \sim (1-2) \cdot 10^4 \text{ лет.}$$

Излучение фотонов с поверхности Солнца пропорционально следующему выражению

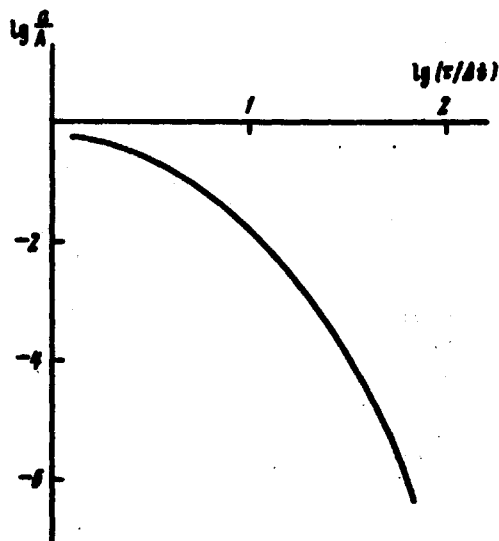
$$L_{\odot} \sim 4\pi R_{\odot}^2 \left[ \frac{d}{dr} \int_{-\infty}^t G(r, 0; t, t') E_{\gamma}(t') dt' \right]_{r=R_{\odot}} \sim$$

$$\sim 1 + A \left\{ \left[ 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{1 + n^4 (\Delta t / \tau)^2} \right] \cos \frac{t}{\Delta t} + \right.$$

$$\left. + 2 (\Delta t / \tau) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} n^2}{1 + n^4 (\Delta t / \tau)^2} \sin \frac{t}{\Delta t} \right\}, \quad (7)$$

где  $A = 5 \frac{\Delta T}{T_0}$ . Последнее выражение можно представить в виде

$$L_{\odot} = L_0 \left[ 1 + a \cos \left( \frac{t}{\Delta t} + \delta \right) \right]. \quad (8)$$



Зависимость отношения коэффициентов  $a$  и  $A'$  от периода колебаний  $\Delta t$  показана на рис. 1. Как видно из рисунка, это отношение быстро убывает с увеличением частоты осцилляций температуры, и следовательно для  $\Delta t / \tau \ll 1$  светимость мало чувствительна к колебаниям температуры внутри Солнца. Так, например, если период колебаний равен 1000 лет, отношение  $a/A$  оказывается меньше 0,01. В то же

время нейтринная светимость, зависящая от температуры как  $T^{25}$  (нейтрино от распада  $B^8$ ) [7], оказывается крайне чувствительной к температурным колебаниям. Результат Дэвиса, свидетельствующий о том, что поток высокоэнергетичных нейтрино примерно на порядок меньше ожидаемого, накладывает нижнюю границу на отношение  $\Delta T/T_0 > 0,1$  [4].

Рождение нейтрино в протон-протонных реакциях также весьма чувствительно к температурным изменениям, хотя и в меньшей степени. Температурная зависимость в этом случае, очевидно, такая же, как и для света ( $\sim T^5$ ). Поэтому, если обсуждавшаяся здесь возможность имеет место в действительности, следует ожидать ослабления потока низкоэнергетичных нейтрино примерно в два раза.

В заключение сделаем несколько замечаний относительно того, каков смысл величины  $\tau$ . В работе В.С.Попова [8] получена формула для среднего времени выхода при диффузии в среде с переменным коэффициентом диффузии  $D(r)$ :

$$\tau' = \frac{1}{3} \int_0^R \frac{r dr}{D(r)}. \quad (9)$$

Применим эту формулу для диффузии фотонов, рождающихся в центре Солнца, положив  $D(r) = D (= \text{const})$ . Тогда

$$\tau' = \frac{R_{\odot}^2}{6D},$$

откуда видно, что введённое нами время релаксации  $\tau$  с точностью до численного коэффициента совпадает со средним временем выхода фотонов из центра Солнца наружу  $\tau'$ . Если вычислить  $\tau'$  по формуле (9), зная зависимость  $D(r)$  [9], получим  $\tau' = 30000$  лет и  $\tau = \frac{6}{\pi^2} \tau' = 20000$  лет, что согласуется с оценкой времени релаксации из светимости. Следует, однако, отметить, что в формуле (9) не учитывается размножение фотонов в процессе диффузии, вследствие чего само понятие среднего времени выхода становится несколько условным.

Автор искренне признателен И.Ю.Кобзареву за ценные советы и внимание к работе.

После того, как статья была отправлена в печать, автору стали известны еще три работы [10, 11, 12], связанные с проблемой солнечных нейтрино. Рассматриваются модели с учетом возможного перемешивания внутренних слоев Солнца. Показано, что процессы перемешивания, происходящие с периодом 1 – 100 млн. лет, могут изменить параметры центральных областей Солнца и тем самым значительно понизить нейтринное излучение.

Отметим также, что при выяснении воздействия перемешивания на фотонную светимость авторы работ [10, 11, 12], следуя, по-видимому, Шаулеру [4], считают время диффузии фотонов из центра Солнца на-

ружу равным кельвиновскому периоду сжатия  $\tau_k \sim 3 \cdot 10^7$  лет. Однако, последний характеризует лишь то время, в течение которого звезда может поддерживать свою светимость за счет гравитационной энергии.

Институт теоретической  
и экспериментальной физики

Поступила в редакцию  
29 декабря 1972 г.

### Литература

- [1] R.Davis et al. Bull. Amer. Phys. Soc., 16, 631, 1971.
  - [2] Abraham Z. and Iben Jun I. Astrophys. J., 170, 157, 1971.
  - [3] Bahcall I.N. and Ulrich R.K. Astrophys. J., 170, 593, 1971.
  - [4] W.A.Fowler. Nature. 238, 24, July, 7, 1972.
  - [5] B.Pontecorvo. Neutrino 72 Europhys Conf. Balatonfüred, Hungary, June 11 - 17, 1972.
  - [6] K.Lande et al. Neutrino 72 Europhys. Conf. Balatonfüred, Hungary, June 11- 17, 1972.
  - [7] W.A.Fowler. Astrophys. J., 127, 551, 1958.
  - [8] В.С.Попов. ЖЭТФ, 58, 1400, 1970,
  - [9] М.Шварцшильд . Строение и эволюция звезд. М., ИИЛ, 1961.
  - [10] Robert T.Rood. Nature Physical Science, 240, №104, 178, 1972.
  - [11] D.Ezer and A.G.W.Cameron. Nature Physical Science, 240, №104, 180, 1972.
  - [12] F.W.W.Dilke and D.O.Gough. Nature, 240, №5379, 262, 1972.
-