

## О ХАРАКТЕРИСТИКАХ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СВЕРХНОВОЙ SN1987A

А.Е. Чудаков, Я.С. Еленский, С.П. Михеев

Приводятся оценки полного энерговыделения в электронные антинейтрино, температуры и радиуса нейтриносферы сверхновой SN1987A, основанные на данных четырех экспериментальных установок, зарегистрировавших нейтринное излучение при коллапсе звезды. Показано, что только данные установки КАМИОКАНДЕ укладываются в современные теоретические представления.

Идея о регистрации нейтринного всплеска от гравитационного коллапса звезды была высказана в 1965 г.<sup>1</sup> В 1977 г. обсуждена<sup>2</sup> и начала осуществляться программа экспериментального поиска этого явления. Недавно четыре экспериментальные группы<sup>3-6</sup> сообщили о возможном наблюдении нейтринного всплеска, ассоциированного со вспышкой сверхновой в Большом Магеллановом Облаке 23 февраля 1987 года. Одна из этих групп (детектор ЛСД, расположенный в тоннеле под Монбланом) зарегистрировала пять импульсов в течение семи секунд, начиная с 2 ч 52 м 36,792 с. В это время три остальных установки не обнаружили сколько нибудь заметного сигнала, превышающего уровень фона. Между 7 ч 34 м и 7 ч 37 м детекторы ИМБ, КАМИОКАНДЕ и Баксанский подземный телескоп зарегистрировали соответственно 8, 12 и 3 импульса (для последней установки учитываются только внутренние слои). События в установках ИМБ и Баксанский подземный телескоп не могут быть вызваны одним и тем же нейтринным всплеском, т. к. зарегистрированы в разное время с разрывом  $\sim 25$  с. Время регистрации события в установке КАМИОКАНДЕ известно с достаточно плохой точностью  $\sim 1$  м. Таким образом отсутствует взаимонезависимое и строго одновременное наблюдение нейтринного сигнала в разных установках. Не смотря на это неудачное обстоятельство экспериментальные данные позволяют оценить некоторые общие характеристики излучающего объекта: полное энерговыделение в электронные антинейтрино, температуру и радиус нейтриносферы, что в свою очередь позволяет сравнить результаты разных установок между собой и со стандартной теорией<sup>7</sup>.

Распределение числа наблюдаемых установкой импульсов в зависимости от энергии антинейтрино  $E$  (МэВ) можно записать в виде:

$$dN = f(E_\nu, T)dE_\nu = C \frac{E_\nu^2}{1 + \exp(E_\nu/T)} \exp\left(-\alpha\left(\frac{E_\nu}{T}\right)^2\right) \Phi_{th}(E_\nu)/E_\nu - 1,29 \text{ МэВ})^2 dE_\nu, \quad (1)$$

где  $T$  – максимальная яркостная температура нейтриносферы, второй и третий множители – спектр нейтрино в стандартной теории<sup>5</sup>,  $\Phi_{th}(E_\nu)$  – эффективность регистрации –

функция, подбираемая эмпирически для учета энергетического порога каждой из установок, последний множитель пропорционален сечению взаимодействия электронного антинейтрино со свободными протонами мишени.

Если для каждого значения температуры  $T$  подобрать константу  $C$  так, чтобы

$$\int f(E_{\nu_i}, T) dE_{\nu_i} = 1,$$

то функция правдоподобия будет равна:

$$L(T) = \prod_{i=1}^m f(E_{\nu_i}, T),$$

где  $m$  — число зарегистрированных импульсов,  $E_{\nu_i}$  — энергия антинейтрино, вызвавшего данный импульс. Энергия антинейтрино принималась равной выделенной в детекторе энергии плюс 0,8 МэВ для сцинтилляционных детекторов и 2,05 МэВ для черенковских. Таким образом учитывалась разница в эффективности регистрации позитронов сцинтилляционными и черенковскими детекторами. Для Баксанского подземного телескопа были приняты во внимание только три импульса зарегистрированные во внутренних слоях телескопа масса мишени при этом составляет 130 т сцинтиллятора.

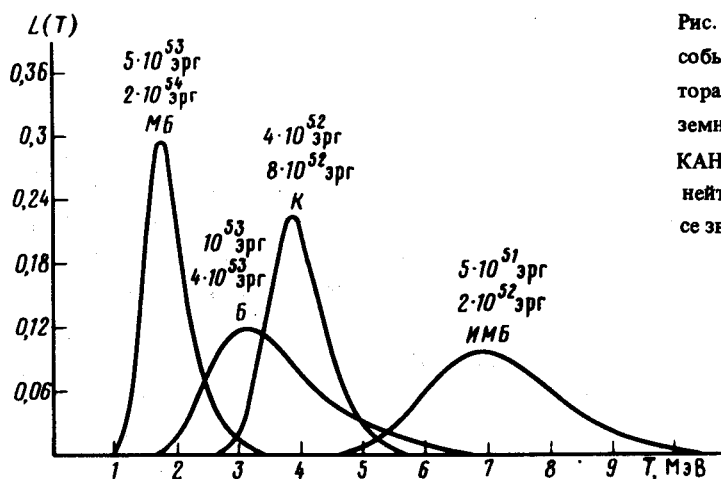


Рис. 1. Функция правдоподобия для событий, зарегистрированных детекторами ЛСД (МБ), Баксанским подземным телескопом (Б), КАМИОКАНДЕ (К) и ИМБ, если они вызваны нейтринным всплеском при коллапсе звезды

На рис. 1 показаны нормированные функции  $L(T)$ , рассчитанные при значении параметра  $\alpha = 0,04$ . Следует отметить, что взаимное расположение кривых на рис. 1 практически не меняется даже при сравнительно сильном изменении параметра  $\alpha$ . Так при  $\alpha = 0$  все температуры уменьшаются примерно в 1,5 раза. Практически нет существенных изменений и при отбрасывании 1 — 2 импульсов с наименьшими энергиями.

Стандартная теория предсказывает для температуры нейтриносферы значение 3 — 5 МэВ, в этот диапазон попадают только события зарегистрированные установками КАМИОКАНДЕ и Баксанским подземным телескопом. Вероятность того, что события в установках КАМИОКАНДЕ и ИМБ вызваны одним и тем же нейтринным всплеском с  $T = 5$  МэВ мала ( $< 10^{-2}$ ).

Зная число свободных протонов ( $N_p$ ) в установке, сечение взаимодействия антинейтрино со свободными протонами, расстояние до объекта ( $R$ ), энергию и число наблюдаемых импульсов и эффективность регистрации, можно вычислить  $Q_{\nu_e}$  — полную энергию всех излученных звездой электронных антинейтрино:

$$Q_{\nu_e} = A \frac{4\pi R^2}{N_p} \sum \frac{E_{\nu_i}}{\sigma_0(E_{\nu_i} - 1,29)^2}.$$

Коэффициент  $A > 1$  учитывает то, что в реальном эксперименте эффективность регистра-

ция нейтрино зависит от энергии, и определяется как отношение значений двух интегралов:

$$A = \int E_\nu \frac{E_\nu^2}{1 + \exp(E_\nu/T)} \exp\left(-\alpha\left(\frac{E_\nu}{T}\right)^2\right) dE_\nu / \int E_\nu \frac{E_\nu^2}{1 + \exp(E_\nu/T)} \exp\left(-\alpha\left(\frac{E_\nu}{T}\right)^2\right) \Phi_{th}(E_\nu) dE_\nu.$$

На рис. 2 нанесены соответствующие зависимости  $Q_{\bar{\nu}_e}$  от температуры для всех четырех установок. Горизонтальной пунктирной линией помечено энерговыделение, ожидаемое в стандартной теории, которое, грубо говоря, равно гравитационной энергии звезды, деленной на число сортов нейтрино. Видно, что только сигналы, зарегистрированные в установках КАМИОКАНДЕ и ИМБ, дают энерговыделение соответствующее теоретическому. Близко к этому значению, но в четыре раза превышая полученное в детекторе КАМИОКАНДЕ, лежит сигнал, обнаруженный на установке Баксанский подземный телескоп.

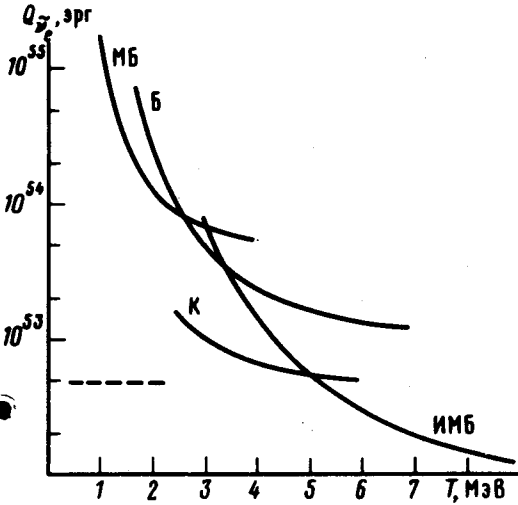


Рис. 2. Полное энерговыделение в электронные антинейтрино, необходимое для создания сигнала, наблюдаемого различными детекторами, как функция температуры

По данным установки ЛСД<sup>5</sup> получается энерговыделение и температура никоим образом не соответствующие современным теоретическим представлениям. Более того, такие значения параметров приводят к непомерно большому радиусу излучающего тела. Действительно, если воспользоваться соотношением Стефана — Больцмана, связывающим светимость, температуру и площадь поверхности светящегося объекта, то радиус излучающей сферы:

$$r \geq 420 \text{ км} \left( \frac{Q_{\bar{\nu}_e} \text{ (эрг)}}{10^{52}} \right)^{1/2} \left( \frac{7}{16} \sigma t \right)^{-1/2} T^{-2} \text{ (МэВ)} = 650 \text{ км}.$$

Если принять плотность вещества под нейтриносферой в соответствии с теорией равной  $10^{13} - 10^{14} \text{ г/см}^3$ , то получается масса порядка  $10^5 M_\odot$ ; а предположив, что масса порядка  $10 M_\odot$ , получаем плотность  $10^{10} \text{ г/см}^3$ , которая возможна до коллапса, а не во время его. Таким образом, сигнал зарегистрированный на установке ЛСД, не может быть описан в рамках стандартной теории и требует привлечения новых, неизвестных пока механизмов генерации нейтрино. Кроме того, наблюдается противоречие между данными детекторов ЛСД и КАМИОКАНДЕ по числу зарегистрированных импульсов. При предположении планковского спектра, исходя из данных детектора ЛСД, в детекторе КАМИОКАНДЕ в зависи-

мости от значения температуры и параметра ожидалось 30 — 50 импульсов, в то время как обнаружено не более четырех. Согласование возможно, если спектр нейтрино в области больших энергий обрезается более резко, чем следует из современной теории.

Если задаться параметрами нейтринной вспышки, которые следуют из данных детектора КАМИОКАНДЕ, как наиболее вероятными, то при  $T = 4$  МэВ и  $\alpha = 0,04$  ( $\alpha = 0$ ) в установке ИМБ ожидалось бы 0,1 (0,5) импульса при зарегистрированных 8, а в детекторе Баксанский подземный телескоп 0,7 (1) в сравнении с 3 обнаруженными. И в этом случае достижение согласия между данными детекторов КАМИОКАНДЕ и ИМБ возможно за рамками стандартной теории, а именно, при спектре нейтрино, имеющем "хвост" при больших энергиях.

Таким образом, по нашему мнению, вопрос о достоверности факта регистрации нейтринного всплеска от гравитационного коллапса звезды не является простым и однозначным, а требует дальнейшего более детального изучения. При этом имеется в виду как рассмотрение иных теоретических возможностей, так и пересмотр экспериментальных данных. Например, если возможно изменить энергии событий в детекторах КАМИОКАНДЕ и ИМБ вследствие каких-либо неопределенностей в абсолютной калибровке, причем энергии событий в детекторе КАМИОКАНДЕ должны быть увеличены, а в детекторе ИМБ уменьшены на 20 %, то достигается согласие данных этих двух детекторов при температуре 5 МэВ и полном энергосвободении  $5 \cdot 10^{52}$  эрг. Однако возможность такой манипуляции могут установить только авторы экспериментов.

Во время подготовки рукописи этой статьи появилось несколько препринтов <sup>8-10</sup>, в которых выполнен анализ подобный нашему. Однако получив примерно такие же параметры как и мы авторы <sup>8-10</sup>, делают совершенно противоположный вывод о полном согласии экспериментальных данных и между собой, и со стандартной теорией. Мы хотим подчеркнуть еще раз, что на наш взгляд с общепринятой теорией согласуются только данные, полученные группой КАМИОКАНДЕ, в остальных случаях наблюдается расхождение, выходящее за рамки возможных статистических ошибок.

#### Литература

1. Domogatsky G. V., Zatsepin G. T. Proc 9-th ICRC, 1965, 2, 1030.
2. Chudakov A. E., Ryazhskaya O. G. Proc. Int. Conf. Neutrino-77, 1978, 1, 155.
3. Hirata K. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 1490.
4. Bionta R. M. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 1494.
5. Алексеев Е. Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 461.
6. Дадыкин В. Л. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 464.
7. Имшенник В. С., Надежин Д. К. Препринт ИТЭФ-98, 1980; Надежин Д. К., Отрощенко И. В. Астрон. Ж. 1980, 57, 78; Bethe H. A., Wilson J. R. Ap. J. 1985, 295, 14; Woosley S. E., Wilson J. R., Mayle R. Ap. J. 1986, 302, 19.
8. Burrows A., Lattimer J. H. Preprint, Arizona University № 725, 1987.
9. De Rújula A. Preprint CERN-TH, 4702/87, 1987.
10. Spergel D. N. et al. Preprint Institute of Advanced Study, Princeton, PAC № 14, 60, 1987.