

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СОБЫТИЙ В ПОДЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРАХ В МОМЕНТ 7 час. 35 мин. МВ 23 февраля 1987 г.

О.Г.Ряжская, В.Г. Рясный

Рассматривается возможность интерпретировать события в подземных установках в момент 7 ч 35 мин мирового времени (МВ) 23 февраля 1987 г как регистрацию нейтринных потоков от Сверхновой SN 1987 А. Такая интерпретация приводит к ряду трудностей как в согласовании данных детекторов Камиканде-2 и ИМВ, так и при объяснении наблюдавшейся анизотропии продуктов взаимодействий.

Как известно, 23.02.1987 г на подземных установках были получены события, имитация которых фоном маловероятна ¹⁻⁴. События на детекторах Камиканде-2 (К2), ИМВ и на баксанском сцинтилляционном телескопе ²⁻⁴, группируются около момента 7:35 МВ и интерпретируются авторами как взаимодействия $\tilde{\nu}_e$, излученных при вспышке Сверхновой SN 1987 А в Большом Магеллановом Облаке. Первые 2 импульса из 11 в детекторе К2 рассматриваются в ⁴ как результат νe -рассеяния. Оценки полной энергии потока нейтрино всех типов ($\nu_e, \mu, \tau, \tilde{\nu}_e, \mu, \tau$) E_ν^{tot} , приведенные в ряде работ (см., например, ^{5,6}), согласуются, по утверждениям авторов, с значением $\sim 3 \times 10^{53}$ эрг.

Между тем анализ события К2 показывает, что компонента, которая при нейтринной интерпретации связывается с νe -рассеянием, может быть и более значительной. С другой стороны, количество регистрируемых актов νe -рассеяния при $E_\nu^{tot} \sim 3 \cdot 10^{53}$ эрг должно быть, по оценке, существенно меньше 2. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Если излучение ν при гравитационном коллапсе соответствует современным представлениям, то основной вклад в наблюдаемый эффект ^{7,8} дают взаимодействия:

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ - 1,8 \text{ МэВ}; \quad E_\nu \lesssim 50 \text{ МэВ}. \quad (1)$$

Сечение реакции (1) при $E_\nu \gtrsim 1,8 \text{ МэВ}$ ⁹:

$$\sigma(\tilde{\nu}_e p) = 2,43 \frac{E_e}{m} [(E_e/m)^2 - 1]^{1/2} \cdot 10^{-44} \text{ см}^2, \quad (2)$$

где $E_e = T + m$ – полная энергия позитрона, T – его кинетическая энергия, m – масса электрона в энергетическом эквиваленте. Если не учитывать энергию отдачи нейтрона, $T \approx E_\nu - 1,8 \text{ МэВ}$, а энергетический спектр позитронов

$$n_{e^+}(T)dT \approx \frac{N_\nu dE_\nu}{4\pi R^2} n_{\tilde{\nu}_e}(E_\nu)\sigma(E_\nu), \quad (3)$$

N_p – количество свободных протонов в рабочем веществе, $R \approx 52 \text{ кпс} = 1,56 \times 10^{23} \text{ см}$ – расстоянии до SN 1987 A; $n_{\tilde{\nu}_e}(E_{\nu})dE_{\nu}$ – энергетический спектр $\tilde{\nu}_e$. Спектр позитронов имеет колоколообразную форму с максимумом в диапазоне 15 – 20 МэВ⁸, поэтому при пороге детектирования $\sim 5 - 10 \text{ МэВ}$ большая часть позитронов регистрируется.

Дифференциальные сечения образования электронов с кинетической энергией в интервале $(T, T+dT)$ при νe -рассеянии¹⁰:

$$\frac{d\sigma_{\nu}}{dT} = 1,68 \left[g_L^2 + g_R^2 \left(1 - \frac{T}{E_{\nu}} \right)^2 \right] 10^{-44} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_{\bar{\nu}}}{dT} = 1,68 \left[g_R^2 + g_L^2 \left(1 - \frac{T}{E_{\nu}} \right)^2 \right] 10^{-44} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1},$$

при $E_{\nu} \gg m$. Здесь $g_R = \sin^2 \theta_W \approx 0,23$, $g_L = 0,5 + \sin^2 \theta_W$ для ν_e и $\tilde{\nu}_e$, $g_L = -0,5 + \sin^2 \theta_W$ для $\nu_{\mu, \tau}$ и $\tilde{\nu}_{\mu, \tau}$. Энергетический спектр электронов рассеяния:

$$n(T)dT = \frac{N_e dt}{4\pi R^2} \sum_{\nu_i} \int_{E_{\text{мин}}}^{\infty} n_{\nu_i}(E_{\nu}) \frac{d\sigma_{\nu_i}}{dT} dE_{\nu}, \quad (5)$$

где N_e – количество электронов в рабочем веществе; $\nu_i = \nu_{e, \mu, \tau}$ и $\tilde{\nu}_{e, \mu, \tau}$, $E_{\text{мин}} \approx T$ при $E_{\nu} \gg m \approx 0,5 \text{ МэВ}$. Спектр электронов круто падает с увеличением T , и при пороге детектирования $\sim 5 - 10 \text{ МэВ}$ значительная часть электронов рассеяния не регистрируется.

Направление движения e^- после νe -рассеяния отличается не более чем на 5° от направления импульса нейтрино. При движении в воде электрон испытывает многократное рассеяние, отклоняясь в среднем на угол $\approx 28^\circ$ ³. Таким образом, несмотря на рассеяние в воде, анизотропия в угловом распределении электронных треков сохраняется.

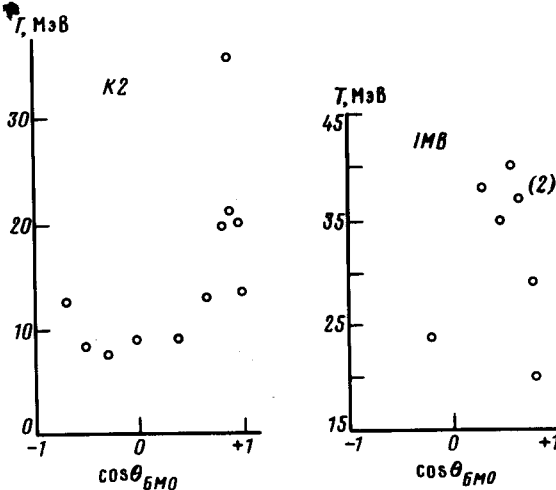


Рис. 1. Энергии импульсов и углы треков в событиях K2 и IMB

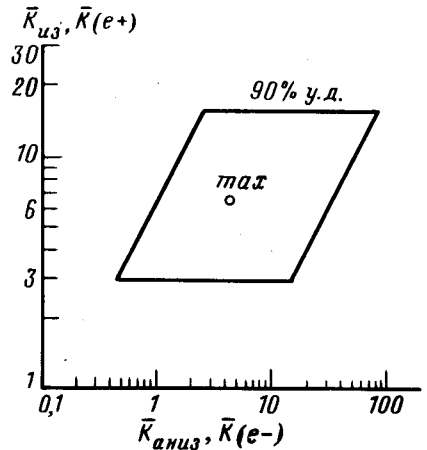


Рис. 2. 90%-ная доверительная область для оценок $\bar{K}_{\text{из}}, \bar{K}_{\text{аниз}}$; max – наиболее вероятное значение $(\bar{K}'_{\text{аниз}}, \bar{K}'_{\text{из}})$

Для получения конкретных оценок мы взяли спектры нейтрино из модели¹¹ и предположили, что они не меняются в течение вспышки. Сворачивая спектры (3) и (5) с функцией отклика детектора K2¹², определим ожидаемую величину эффекта в установке. При $E_{\nu}^{\text{tot}} = 3 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$ среднее количество регистрируемых позитронов $\bar{K}(e^+) \approx 5,3$ или 61% от полного ожидаемого количества взаимодействий (1) в детекторе K2 $\bar{K}^{\text{tot}}(e^+)$; сред-

нее число регистрируемых актов νe -рассеяния $\bar{K}(e^-) \approx 0,46$ или 16% от $\bar{K}^{tot}(e^-)$. Заметим, что рассеяние $\nu_{\mu, \tau} \tilde{\nu}_{\mu, \tau}$ дает 7,5% от $\bar{K}^{tot}(e^-)$. Отношение $\bar{K}(e^+) / \bar{K}(e^-) = 11,7$. Применяя другие модели коллапса, которые дают большую долю $\tilde{\nu}_e$ в полном потоке нейтрино (см., например, ^{13, 14}), можно согласовать $\bar{K}(e^+)$ с данными К2. Однако при этом $\bar{K}(e^+) / \bar{K}(e^-) > 11,7$. Другими словами, модель ¹¹ приводит к наибольшей анизотропии в угловом распределении треков e^\pm , что и определило ее выбор.

Амплитуды импульсов и направления треков для событий К2 ⁴ и ИМВ ³ приведены на рис. 1. Как отмечалось в ^{15, 16}, угловые распределения треков в этих событиях плохо согласуются с изотропией. Анизотропия в детекторе ИМВ могла быть вызвана тем, что часть фотоумножителей в 7 : 35 не работала, но анализ ¹⁷ показал, что изменения оказались незначительными.

Предположим, что событие К2 состоит из анизотропной и изотропной компонент, дающих в среднем $\bar{K}_{аниз}$ и $\bar{K}_{из}$ событий, соответственно. Будем считать также, что все треки анизотропной компоненты лежат внутри конуса с углом при вершине $\theta_{БМО} = 60^\circ$ (ось конуса ориентирована в направлении от Большого Магелланова Облака). Распределение оценок $(\bar{K}_{аниз}; \bar{K}_{из})$ следует из выражений для вероятности получить 5 треков изотропной компоненты в интервале $-1 \leq \cos \theta_{БМО} < 0,5$:

$$P_5 = \frac{(0,75\bar{K}_{из})^5}{5!} e^{-0,75\bar{K}_{из}} \quad (6)$$

и вероятности получить 6 треков из 11 с $0,5 \leq \cos \theta_{БМО} \leq 1$:

$$P_{6,11} = C_{11}^6 p^6 (1-p)^5, \quad (7)$$

где $p = (0,25\bar{K}_{из} + \bar{K}_{аниз}) / (\bar{K}_{из} + \bar{K}_{аниз})$ – вероятность получить 1 трек с $\cos \theta_{БМО} \geq 0,5$. Границы 90%-ной доверительной области показаны на рис. 2. Отметим, что на 99%-ном уровне достоверности $\bar{K}_{аниз} \geq 0,6$. Наиболее вероятные оценки: $\bar{K}'_{из} \approx 6,7$; $\bar{K}'_{аниз} \approx 4,3$.

Если исходить из нейтринной интерпретации событий К2, то анизотропную компоненту естественно связать с νe -рассеянием, а изотропную – с взаимодействиями (1), так что $\bar{K}_{из} = \bar{K}(e^+)$; $\bar{K}_{аниз} = \bar{K}(e^-)$. Из анализа данных следует, что 95%-ный доверительный интервал для $\bar{K}_{аниз} / \bar{K}_{из} : 0,65 \pm 0,49$. Сравнивая его границы с полученным ранее значением $\bar{K}(e^+) / \bar{K}(e^-) = 11,7$, приходим к выводу, что ожидаемое отношение не согласуется с экспериментальными данными даже для модели ¹¹, которая дает наибольшую долю νe -рассеяния в полном эффекте.

Энергетические спектры изотропной и анизотропной компонент события К2 плохо согласуются с существующими моделями коллапса ¹⁸. Для подгонки к экспериментальным данным приходится вводить "мягкие" спектры ν и $\tilde{\nu}_e$. При этом анизотропная компонента может быть целиком связанной с $\nu_{\mu, \tau} e$ - и $\tilde{\nu}_{\mu, \tau} e$ -рассеянием, что приводит к $E_\nu^{tot} \sim (5-6) \cdot 10^{54}$ эрг.

Если рассмотреть совместимость данных К2 и ИМВ, то имеющаяся несогласованность также затрудняет нейтринную интерпретацию. 1) Из данных К2 с учетом эффективности регистрации и разницы в массах рабочего вещества, следует оценка количества взаимодействий, которое должен зарегистрировать детектор ИМВ: $\bar{K}_{ИМВ} \approx 2,7$. Зарегистрировано 8 импульсов. Вероятность случайной флуктуации $< 10^{-2}$. 2) В общем диапазоне $T \gtrsim 20$ МэВ средний угол $\bar{\theta}_{БМО}(К2) = 29^\circ 5 \pm 8^\circ 4$; $\bar{\theta}_{БМО}(ИМВ) = 59^\circ 8 \pm 20^\circ 5$. Углы 6 треков из 8 в событии ИМВ отличаются от $\bar{\theta}_{БМО}(К2)$ более чем на $20^\circ 5$; вероятность случайной флуктуации $< 10^{-3}$.

Таким образом, нейтринная интерпретация событий в 7 : 35 МВ сталкивается с рядом трудностей. Случайная же фоновая флуктуация в нескольких установках крайне маловероятна, особенно если учесть близость этого события к моменту обнаружения СН 1987 А. По

нашему мнению, не следует ограничиваться одной гипотезой о причине срабатывания установок. Возможно, нужно изучить влияние возмущений в геомагнитном поле на скорость счета подземных установок, для чего необходим корреляционный анализ экспериментальных данных различных установок за все время их работы.

Авторы благодарят Г.Т.Зацепина, В.Л.Дадыкина, К.Кастаньоли и Дж.Чини за полезное обсуждение данной работы.

Литература

1. Дадыкин В.Л. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, **45**, 464.
2. Алексеев Е.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, **45**, 461.
3. Bionta K. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**, 1494.
4. Hirata K. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**, 1490.
5. Sato K., Suzuki H. Phys. Lett. B, 1987, **196**, 267.
6. Чудаков А.Е., Еленский Я.С., Михеев С.П. Письма в ЖЭТФ, 1987, **46**, 297.
7. Domogatsky G. V., Zatsepin G. T. Proc. 9-th Int. Cosmic Ray Conf. (hereafter ICRC), 1965, **2**, 1030.
8. Chudakov A. E., Ryazhskaya O. G., Zatsepin G. T. Proc. 13-th ICRC, 1973, **3**, 2007.
9. Domogatsky G. V., Eramzhyan R. A., Nadyozhin D. K. Astrophys. Sp. Sci., 1978, **58**, 273.
10. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки, 1981, М.: Наука.
11. Bowers R., Wilson J. R. Astrophys. J., 1982, **263**, 366.
12. Kifune T. Highlight Talk at 20 th ICRC, 1987, in press.
13. Надежин Д.К., Отрощенко И.В. АЖ, 1980, **57**, 78.
14. Mayle R., Wilson J. R., Schramm D. N. Astrophys J. 1987, **318**, 288.
15. Learned J. Preprint of Hawaii Univ., 1987.
16. Рязжская О.Г. Доклад на объединенной сессии Отделений ядерной и общей физики АН СССР, 27 мая 1987 г.
17. Learned J. Talk at the Workshop on the SN 1987 A, 20-th ICRC, 1987.
18. Ryazhskaya O. G., Ryzasny V. G. Proc. 2-nd Int. Symp. "Underground Physics", 1987; М: Nauka, 1988, in press.