

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

524.352

СОБЫТИЯ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ ПОДЗЕМНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ
23 ФЕВРАЛЯ 1987 года

В. Л. Дадыкин, Г. Т. Зацепин, О. Г. Ряжская

(Институт ядерных исследований АН СССР)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общая постановка задачи и принципы регистрации нейтринного излучения от коллапсов звезд	139
2. Детекторы нейтринного излучения	140
3. Результаты наблюдения	143
3.1. Оптические наблюдения. 3.2. Гравитационная антенна в Риме, работающая при комнатной температуре (Geograv). 3.3. LSD. 3.4. КП. 3.5. БПСТ. 3.6. IMB.	
4. Анализ и интерпретация экспериментальных результатов	146
5. Ограничения на массу покоя нейтрино	152
6. Итоги	153
Список литературы	154

1. Общая постановка задачи и принципы регистрации нейтринного излучения от коллапсов звезд. 23 февраля 1987 г. была зарегистрирована вспышка сверхновой (СН 1987A) в Большом Магеллановом облаке [1]. Согласно современным представлениям разгоранию сверхновой предшествует гравитационный коллапс. В работе [2] впервые было показано, что этот процесс должен сопровождаться мощным коротким импульсом нейтринного излучения. Из теории следует, что суммарная энергия, уносимая нейтрино всех типов: $\bar{\nu}_e$, ν_e , $\bar{\nu}_\mu$, ν_μ , $\bar{\nu}_\tau$, ν_τ , соответствует ~ 0.1 массы ядра звезды и делится между шестью компонентами нейтринного излучения примерно поровну.

На возможность детектировать коллапсы, регистрируя нейтринную вспышку, было впервые указано в работе [3]. Наиболее полное теоретическое

Таблица I

Модель	W_1 , эрг	W_2 , эрг	W_3 , эрг	$\bar{E}_{\bar{\nu}_e}$, МэВ	\bar{E}_{ν_e} , МэВ	$E_{\nu_\mu, \tau}$, МэВ	T , с
Из [6]	$(3-14) \cdot 10^{53}$	$(0.5-2.3) \cdot 10^{53}$	10^{52}	12,6	10	10,5	20
Из [8]						8	5
						25	

W_1 — полная энергия вспышки, перешедшая в нейтрино всех сортов; W_2 — полная энергия, уносимая ν_i , где $\nu_i = \bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$; W_3 — энергия, уносимая ν_e на стадии нейтронизации звезды за время $3 \cdot 10^{-2}$ с; $\bar{E}_{\bar{\nu}_e}$, \bar{E}_{ν_e} , $\bar{E}_{\nu_\mu, \tau}$ — усредненные по спектрам энергии $\bar{\nu}_e$, ν_e и ν_μ, τ соответственно; T — длительность нейтринной вспышки

рассмотрение динамики коллапса немагнитных, невращающихся, сферически симметричных звезд проведено в работах [4—9], в которых получены характеристики нейтринного излучения для различных сценариев коллапса. В табл. I приведены результаты расчетов для типичных сценариев, с наиболее естественными и простыми предположениями о картине коллапса. В опытах по поиску нейтринных вспышек от коллапсов можно использовать реакции

$$\bar{v}_e + p = e^+ + n, \quad \sigma_{\bar{v}_e p} \approx 9,3 E_{e^+}^2 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2, \quad E_{e^+} \gg 0,5 \text{ МэВ}, \quad (1)$$

где E_{e^+} — энергия позитрона;

$$E_{e^+} = E_{\bar{v}} - 1,3 \text{ МэВ},$$

$$v_e + e^- = v_e + e^-, \quad \sigma_{v_e e^-} = 9,4 E_{v_e} 10^{-45} \text{ см}^2, \quad E_{v_e} \gg 0,5 \text{ МэВ},$$

$$v_i + e^- = v_i + e^-, \quad \sigma_{v_i e^-} = 1,6 E_{v_i} 10^{-45} \text{ см}^2, \quad E_{v_i} \gg 0,5 \text{ МэВ}, \quad (2a)$$

$$\bar{v}_i + e^- = \bar{v}_i + e^-, \quad \sigma_{\bar{v}_i e^-} = 1,3 E_{\bar{v}_i} 10^{-45} \text{ см}^2, \quad E_{\bar{v}_i} \gg 0,5 \text{ МэВ} \quad (2b)$$

$$(i = \mu, \tau), \quad 0 < E_{e^-} \ll E_{v_i, \bar{v}_i, v_e}.$$

Детектор, сцинтилляционный или черенковский, наполнен водородсодержащим веществом с массой $\gtrsim 100$ т. Сцинтилляции от e^+ или e^- регистрируются фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Нейтринная вспышка идентифицируется по появлению серии сцинтилляций в диапазоне амплитуд $E_n = 50$ МэВ за время T . E_n — пороговая энергия для регистрации сцинтилляций, T — длительность нейтринной вспышки (от нескольких секунд до нескольких десятков секунд) в зависимости от модели коллапса. Число импульсов в серии при прочих равных условиях пропорционально массе детектора, эффективности регистрации сцинтилляций и обратно пропорционально квадрату расстояния до звезды. Флуктуации частоты фоновых импульсов могут имитировать истинное событие. Частота имитаций равна

$$N_K(m, T) = \sum_{i=K}^{\infty} m \frac{(mT)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-mT}, \quad (3)$$

где m — частота фоновых импульсов, T — длительность пачки импульсов, K — число импульсов в пачке. Так как ожидаемая частота коллапсов в Галактике — один раз в 5—50 лет, то частота имитаций, вообще говоря, должна быть меньше этой величины. На самом деле это требование может быть существенно ослаблено, о чем подробнее ниже. Тем не менее понижение фона — главная задача экспериментов по поиску коллапсов.

С этой целью детекторы помещают глубоко под землей, применяют антисовпадательную защиту. И все-таки имитации за счет флуктуаций возможны даже в условиях минимального фона, не говоря уже об имитациях, вызванных различного рода помехами. Частота последних не поддается никаким прогнозам и оценкам, и гарантировать отсутствие помехи на уровне частот ~ 1 год⁻¹, по-видимому, нереально. Поэтому для достоверности регистрации коллапсов очень важной является параллельная работа нескольких независимых детекторов. Уже два детектора дают уверенную регистрацию коллапса даже на уровне имитаций $\sim 10^2$ год⁻¹ в каждом. Случайное совпадение при этом возможно один раз в 100 лет. Эти соображения в той же мере относятся к работе в параллель с детекторами других типов излучений, электромагнитного и гравитационного, ожидаемых при вспышках сверхновых.

2. Детекторы нейтринного излучения. На сегодняшний день нейтринные вспышки от коллапсов могут быть зарегистрированы шестью детекторами. Сведения о них приведены в табл. II. В момент вспышки СН 1987A два

Таблица II

Детектор	Глубина водного эквивалента, м	Рабочая масса (т), вещество	Порог регистрации, МэВ	Эффективность регистрации		Частота фоновых импульсов $m, c^{-1} ***$
				Спектр e^+ , реакция (1)	Спектр e^- , реакции (2a), (2b) **)	
АСД, СССР	570	C_nH_{2n+2} 105, 130(200)	5	0,97	0,45(0,75)	0,16
БПСТ, СССР	850	C_nH_{2n+2} 90	10	0,6	0,15(0,54)	0,013 (0,033)
LSD, СССР — Италия	5200	C_nH_{2n+2} 140	5—7	0,9	0,4(0,7)	0,01
HSD, США	4200	C_nH_{2n+2} 240	10	0,6	0,15(0,54)	
KII Япония — США	2700	H_2O (1540) *)	7—14	0,7	0,17(0,54)	0,022
IMB, США	1570	H_2O 5000 (3600) *)	20—50	0,1	0,02(0,18)	$3,5 \cdot 10^{-6}$

*) В скобках приведена эквивалентная масса сцинтиллятора C_nH_{2n+2} по отношению к реакции (1).

**) В скобках приведены эффективности регистрации спектра электронов, получаемых в реакциях $\nu_\mu, \tau^- e^- \rightarrow \nu_\mu, \tau^- e^-$ (2b).

***) Фон приведен в интервале энергий E_ν — 50 МэВ; для черенковских детекторов фон дан для регистрации внутренних событий

из них не работали: АСД (сцинтилляционный детектор ИЯИ АН СССР в г. Артемовске) был остановлен на модернизацию, а HSD (сцинтилляционный детектор в Хоумстейке) функционировал по программе поиска магнитных монополей с очень высоким порогом регистрации. Работали четыре детектора: два сцинтилляционных (в СССР и в Италии) и два черенковских (в США и в Японии).

Ожидаемые, в рамках модели стандартного коллапса звезды в Большом Магеллановом облаке, эффекты от реакций (1) и (2a), (2b) для этих детекторов показаны в табл. III. Эффекты для LSD и БПСТ малы, так как детекторы

Таблица III

Детектор	K_{e^+} (1)	K_{e^-} ((2a) + (2b))	K_{e^-} (2b)
LSD	1,5	0,043	0,024
БПСТ (200 т)	2	0,052	0,036
KII	17	0,53	0,36
IMB	6	0,4	0,35

были расчитаны на изучение коллапсов в нашей Галактике, т. е. для средних расстояний в 5 раз меньших, чем в случае СН 1987А. Из таблицы видно, что основной вклад дает реакция (1). С другой стороны, регистрация продуктов реакции (2a), (2b) черенковскими детекторами может дать при благоприятных обстоятельствах информацию о начальной стадии коллапса, когда \bar{e}_e^- нет, а также позволяет определить направление на источник нейтринного излучения.

Следует отметить, что во всех детекторах эффект от $\nu_{\mu, \tau} e^-$ -рассеяния превышает эффект от $\nu_e e^-$ -рассеяния. Это обусловлено, во-первых, более высокими энергиями $\nu_{\mu, \tau}$, а во-вторых, экспериментальными энергетическими порогами, не позволяющими регистрировать большую часть электронов

от $\nu_e e^-$ -рассеяния, спектр которых круто падает с увеличением энергии (см. шестую колонку табл. II). Все детекторы, перечисленные в табл. II, являются многоцелевыми приборами, предназначенными для изучения проникающего излучения. Этим обстоятельством определяются их конструктивные особенности, которые обсуждаются ниже.

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) [10] содержит 3130 жидкостных сцинтилляционных модулей с общей массой ЖС около 330 т. Телескоп представляет собой куб с ребром ~ 14 м; каждая из шести плоскостей куба несет на себе по 400 модулей; еще две горизонтальные плоскости, по 400 модулей на каждой, расположены внутри куба. Расстояние между горизонтальными плоскостями около 3,6 м; толщина поглотителя между ними ~ 170 г·см $^{-2}$. Модуль прямоугольной формы $0,7 \times 0,7 \times 0,3$ м 3 наполнен жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита [11] (молекулярный состав $C_n H_{2n+2}$, $n = 10$) и просматривается одним ФЭУ (диаметр фотокатода 15 см). Модуль имеет высокую чувствительность: энерговыделению 1 МэВ соответствует амплитуда ~ 40 фотоэлектронов, выбиваемых из фотокатода ФЭУ.

В программе поисков коллапсов, для уменьшения фона, пять внешних плоскостей телескопа (четыре вертикальные и верхняя горизонтальная) использованы как антисовпадательная защита. Рабочий объем состоит из трех горизонтальных плоскостей: двух внутренних и нижней (что составляет ~ 40 % полной активной массы телескопа). Информация об амплитуде и времени появления импульсов поступает на ЭВМ.

Ячеистая структура позволяет дополнительно снизить фон, применяя антисовпадательную методику при отборе событий в рабочем объеме. С этой же целью установлен довольно высокий порог 10 МэВ для регистрации энерговыделений в модуле. И, наконец, при анализе не принимаются во внимание те модули, которые в данный момент имеют наибольший темп счета по результатам мониторирования. Таким методом удается снизить вклад, который вносит в фон спонтанная нестабильность работы ФЭУ. Все эти меры позволяют снизить фон до величины $\sim 0,013$ с $^{-1}$.

При анализе результатов 23.2.87 г. авторы, с целью увеличить рабочий объем детектора, несколько снизили требования к фоновым характеристикам модулей. При этом рабочий объем детектора возрос до 200 т, а средняя скорость счета фоновых импульсов — до 0,033 с $^{-1}$.

Жидкостный сцинтилляционный детектор LSD [12] состоит из 72 модулей, расположенных в три этажа в виде параллелепипеда площадью 6×7 м 2 и высотой 4,5 м. Для уменьшения влияния радиоактивности окружающих пород, он экранирован стальными плитами общим весом около 200 т. В детекторе использован жидкий сцинтиллятор на основе уайт-спирита [11]; полное количество сцинтиллятора около 90 т. Каждый модуль, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда $1,0 \times 1,5 \times 1,0$ м 3 , просматривается тремя ФЭУ (диаметр фотокатода 15 см). Энерговыделению 1 МэВ в модуле соответствует суммарный сигнал от трех ФЭУ с амплитудой ~ 15 фотоэлектронов. Энерговыделение в модуле анализируется лишь при совпадении сигналов от трех ФЭУ с разрешающим временем 200 нс. Импульс от схемы совпадений любого из 72 модулей является триггером для всего детектора в целом. В этом случае производится запись в ЭВМ амплитуды и времени энерговыделения в каждом из 72 модулей.

Высокая чувствительность детектора и низкий фон позволяют осуществить регистрацию обеих частиц e^+ и \bar{p} , в реакции (1). Нейтроны замедляются в сцинтилляторе и с временем 170 мкс захватываются водородом, образуя дейтерий и γ -квант. Сцинтилляции от γ -квантов ($E_\gamma = 2,2$ МэВ) регистрируются по высокочувствительному каналу (порог 0,8 МэВ), который открывается на время 500 мкс импульсом от позитрона. Эффективность детектирования нейтрона в том же модуле, где зарегистрирован позитрон, составляет 40—50 %, а с учетом окружающих модулей достигает 75—80 %. Этот метод

впервые был предложен и реализован авторами при создании Артемовского сцинтилляционного детектора (АСД; см. табл. II) [13].

Черенковский детектор Камиоканде II (КII) [14, 15] состоит из двух коаксиальных цилиндров: внешнего, диаметром 19,6 м, высотой 22,5 м, и внутреннего, диаметром 15,6 м, высотой 16 м. Детектор наполнен водой, которая непрерывно очищается по замкнутому циклу; свободный пробег для поглощения черенковского света составляет около 45 м. Черенковское излучение регистрируется ФЭУ с диаметром фотокатода 50 см. Слой воды между стенками цилиндров просматривается ФЭУ, он служит одновременно и активной, и пассивной защитой. Внутренний цилиндр содержит 2140 т воды. Около 900 ФЭУ расположены на внутренней поверхности равномерно, с шагом ~ 1 м; суммарная площадь фотокатодов составляет $\sim 20\%$ поверхности цилиндра. Как известно, в воде релятивистская однозарядная частица излучает ~ 200 фотонов/см по образующей конуса с углом $\sim 40^\circ$ относительно направления движения. Это излучение проецируется на боковую поверхность в виде кольца с шириной, приблизительно равной длине пробега излучающей частицы. Электрону с энергией 10 МэВ соответствует амплитуда ~ 30 фотоэлектронов. Триггером служит срабатывание более чем 20 ФЭУ во временном интервале 100 нс. При этом в ЭВМ поступает информация о величине и времени появления сигнала в каждом ФЭУ. Анализ этой информации, с учетом позиции сработавших ФЭУ, позволяет определить величину энерговыделения, вертекс и угол траектории частицы. Точность этого анализа для энергий вблизи порога сильно зависит от энергии, пространственного положения и ориентации траектории; хуже всего дело обстоит вблизи стенок. Авторы КII считают, что могут регистрировать электроны с энергией 8,5 и 14 МэВ с эффективностью соответственно 50 и 90% во всем объеме детектора. Темп счета триггеров 0,6 Гц, из них 0,37 Гц надежно идентифицируются как мюоны космических лучей, остальное связано с радиоактивностью. Машинный анализ этих событий с учетом времени срабатывания и позиции ФЭУ показывает, что собственный фон эксперимента составляет $\sim 0,022\text{ c}^{-1}$ для электронов с энергиями от 8,5 до 50 МэВ.

Большой черенковский детектор IMB (Irvine — Michigan — Brookhaven) [16] представляет собой прямоугольный параллелепипед $22,5 \times 17 \times 18\text{ m}^3$, заполненный очищенной водой. Рабочий объем около 5000 m^3 просматривается 2048 ФЭУ (диаметр фотокатода 20 см). ФЭУ расположены равномерно на всех шести плоскостях детектора с шагом ~ 1 м. Триггером является срабатывание 25 ФЭУ в интервале времени 50 нс. В этом случае амплитуда и время появления сигнала в каждом ФЭУ анализируются ЭВМ. В результате анализа определяется энергия, вертекс и направление движения частицы. Электрону 20 МэВ соответствует амплитуда ~ 20 фотоэлектронов. Наибольшие неточности в анализе возникают для частиц вблизи стенок. Эффективность регистрации зависит от энергии и составляет 14, 56 и 89 % для 20, 30 и 50 МэВ соответственно. Мюоны космических лучей дают триггер с частотой $\sim 2,7$ Гц; они идентифицируются по тому, что видно, как частица входит в детектор через одну из стенок. Частицы, вертекс которых лежит внутри рабочего объема, составляют фон эксперимента. Скорость счета таких событий $\sim 0,3/\text{день}$.

3. Результаты наблюдения. На рис. 1 показана временная последовательность событий, зарегистрированных различными детекторами 23 февраля 1987 г. Приведены результаты, полученные вблизи двух моментов времени 2 : 52 UT и 7 : 36 UT.

3.1. Оптические наблюдения. Первое оптическое наблюдение сверхновой СН 1987А в галактике Большое Магелланово облако, отстоящей от Земли на расстоянии ~ 52 кпк, было осуществлено в 10 : 40 UT.

3.2. Гравитационная антенна в Риме, работающая при комнатной температуре (Geograv) [17]. По современным представлениям несимметричный

коллапс или взрыв сверхновой должен сопровождаться гравитационным излучением. Был проведен анализ результатов римской гравитационной антенны в связи с эффектом в детекторе LSD в период взрыва сверхновой SN 1987A. Анализ показал, что антенна зарегистрировала увеличение потока

февраль 23, 1987 г.

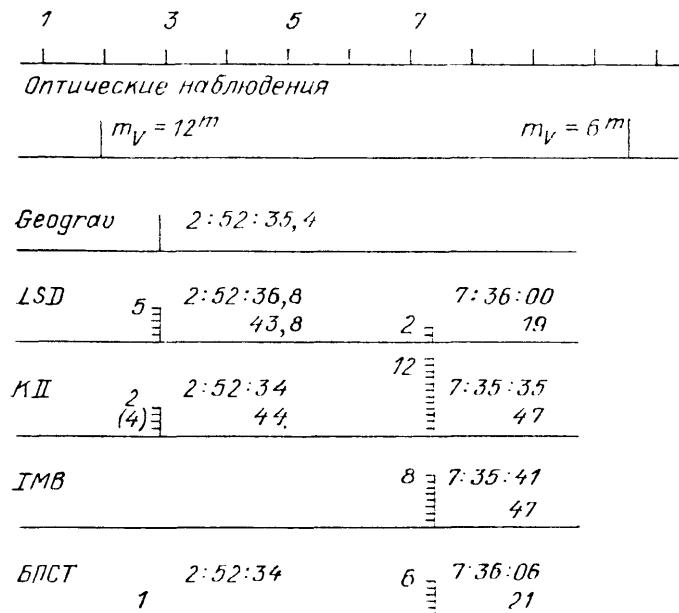


Рис. 1. Временная последовательность эффектов, зарегистрированных различными детекторами 23 февраля 1987 г.

энергии \sim в 6 раз относительно среднего шума в $2:52:35,4 \pm 0,5$ с UT. Это на $1,4 \pm 0,5$ с опережает первый импульс в пачке из 5 импульсов, измеренных LSD. Авторы работы утверждают, что в это время не было зафиксировано ни электромагнитных, ни сейсмических наводок. Частота имитации измеренной конфигурации событий фоном 1 раз в 2 часа.

3.3. LSD [18a, 19] (табл. IV).

Таблица IV

№ события	Время, UT ± 2 мс *)	Энергия **), МэВ
1		
2	2:52:36,79	6,2
3	40,65	5,8
4	41,01	7,8
5	42,70	7,0
	43,80	6,8
1		
2	7:36:00,54	8
	7:36:18,88	9

*) Точность привязки к абсолютному времени в этом эксперименте.

**) E — величина энергии, выделенной в модуле. В случае регистрации реакции $e^-p \rightarrow e^+n$ измеренная энергия соответствует сумме энергии позитрона e^+ и γ -квантов аннигиляции $E_\gamma = 1$ МэВ, $E = E_{e^{\pm}} + 1$ МэВ. Значения E в таблице отличаются от приводимых ранее [18a], что связано с уточнениями калибровок [18b]. Точность калибровок около 20 %. Событие с порядковым номером 3 сопровождалось нейтрон-неподобным импульсом с энергией около 1,4 МэВ и временем запаздывания 278 мкс. События 2, 4, 5 зарегистрированы во внутренних детекторах, характеризуемых низким уровнем собственного фона

3.4. КИ [15] (табл. V).

Таблица V

N	Время UT ± 1 мин *)	E, МэВ	θ , град **)
1 ***)	2 : 52 : 34	5,3	59
2	37	5,8	47
3	40	11,4	15
4	2 : 52 : 44	4,8	130
1	7 : 35 : 35,0	$20,0 \pm 2,9$	18 ± 18
2	35,107	$13,5 \pm 3,2$	15 ± 27
3	35,303	$7,5 \pm 2,0$	108 ± 32
4	35,324	$9,2 \pm 2,7$	70 ± 30
5	35,507	$12,8 \pm 2,9$	135 ± 23
6	35,686	$6,3 \pm 1,7$	68 ± 77
7	36,541	$35,4 \pm 8,0$	32 ± 16
8	36,728	$21,0 \pm 4,2$	30 ± 18
9	36,915	$49,8 \pm 3,2$	38 ± 22
10	44,219	$8,6 \pm 2,7$	122 ± 30
11	45,433	$13,0 \pm 2,6$	49 ± 26
12	7 : 35 : 47,439	$8,9 \pm 1,9$	91 ± 39

*) Точность привязки к абсолютному времени в этом эксперименте.
**) Угол относительно направления на галактику Большое Магелланово облако.
***) Информация о четырех импульсах около времени 2 : 52 : 34 была приведена авторами работы [15] в докладе на совещании по массе нейтрино и нейтринной астрофизике [20] и воспроизведена в препринте [21]

3.5. БПСТ [22] (табл. VI).

Таблица VI

N	Время UT $\pm 54\text{c}^{*}$	E, МэВ
1	2 : 52 : 34	10,8
1	7 : 36 : 06,571	$17,5 \pm 3,5$
2	11,818	$12 \pm 2,4$
3	12,253	$18 \pm 3,6$
4	13,528	$23,3 \pm 4,7$
5	19,505	$17 \pm 3,4$
6	7 : 36 : 20,917	$20,1 \pm 4,0$

*) Точность привязки к абсолютному времени в этом эксперименте. При анализе данных в 7 : 36 масса рабочего вещества была увеличена с 130 до 200 т, при этом скорость счета фоновых импульсов увеличилась до величины $0,033 \text{ с}^{-1}$

3.6. IMB [16] (табл. VII).

Таблица VII

№	Время UT ± 50 мс *)	E , МэВ **)	θ , град ***)
1	7 : 35 : 41 : 37	38	74
2	41,79	37	52
3	42,02	40	56
4	42,52	35	63
5	42,94	29	40
6	44,06	37	52
7	46,38	20	39
8	7 : 35 : 46,96	24	102

В интервале времени 2 : 52 : 37—2 : 52 : 44 и вблизи него импульсов с вертексом внутри детектора нет.

*) Точность привязки к абсолютному времени.
 **) Точность в измерении энергии ± 25 %.
 ***) Угол относительно направления на галактику Большое Магелланово облако. Точность измерения угла $\pm 15^\circ$

4. Анализ и интерпретация экспериментальных результатов. Так как эффекты в детекторах крайне малы, то энергетические и угловые распределения импульсов плохо статистически обеспечены, что затрудняет анализ и сравнение этих характеристик. Поэтому ряд зарубежных и советских авторов в той или иной степени эти характеристики игнорирует [27, 28, 30]. Это аргументируется тем, что при малой статистике нет достаточно корректного способа оценки вероятности реализации измеренной комбинации импульсов. Заметим, что чаще всего игнорируется та информация, которая идет в разрез с предсказаниями теории, а именно, угловые распределения импульсов. При этом те же авторы анализируют энергетические распределения, что представляется по меньшей мере непоследовательным, так как статистическая обеспеченность энергетических и угловых распределений одинакова. Наша точка зрения состоит в том, что должна быть принята во внимание и проанализирована вся без изъятия совокупность информации от нейтринных детекторов, относящаяся к вспышке сверхновой СН 1987А. Ниже мы сделали такую попытку, хотя отчетливо представляем себе все трудности и уязвимость для критики этого анализа.

Эффекты, зарегистрированные в нейтринных детекторах 23 февраля, группируются вблизи двух моментов времени: 2 : 52 и 7 : 35 UT. В табл. VIII

Таблица VIII

Детектор	Частота имитации, год ⁻¹		
	7 : 35 UT		
	2 : 52 UT	По формуле (3)	Эксперимент
LSD БПСТ КИ IMB	< 0,3	120 10^{-7} $3 \cdot 10^{-30}$	$\leq 0,4$ $\leq 0,25$

для каждого детектора показана частота, с которой эффект может быть вызван флюктуацией фона.

Цифры получены с использованием формулы (3) или аналогичной (в любом случае предполагалось, что флюктуации описываются законом Пуас-

сона). Такой подход не вызывает возражений, если параметр m в формуле (3) экспериментально определен за период, сравнимый с временем ожидания имитации. Именно так обстоит дело для LSD и БПСТ; за полное время работы этих детекторов (около 2 и 5 лет соответственно) наблюдается согласие экспериментальных значений $N_k(m, T)$ с распределением Пуассона. Авторы KII и IMB, экстраполируя результаты формулы (3) на периоды, превышающие время эксперимента на много порядков величины, получают весьма малую ожидаемую частоту имитации для своих эффектов. Нам это представляется некорректным; до тех пор, пока авторы не провели соответствующего анализа, экспериментально обоснованными здесь являются цифры $\leq 0,25 \text{ год}^{-1}$ и $\leq 0,4 \text{ год}^{-1}$ для IMB и KII соответственно (так как за 4 и 2 года работы этих детекторов подобных эффектов не наблюдалось).

Важным фактором является совпадение эффекта в нейтринном детекторе с визуальным наблюдением взрыва Сверхновой. Из-за неопределенности модельных представлений можно считать, что коллапс опережает зафиксированную визуально вспышку не более, чем на 24 часа. Для любого из трех детекторов LSD, KII и IMB совпадение в этом интервале времени уменьшает вероятность случайного эффекта в фактор $1/365$, т. е. случайно такое событие реализуется не чаще, чем раз в 10^3 лет. Для БПСТ, где частота имитаций $\sim 1 \text{ сутки}^{-1}$, совпадение со взрывом Сверхновой в пределах 24 часов есть событие тривиальное. Таким образом, эффекты в LSD, KII и IMB — значимые и могут рассматриваться на паритетных началах, в то время как эффект в БПСТ — только в связи с результатами других нейтринных детекторов.

Если эффект вызван нейтринным излучением, должны выполняться некоторые условия, которые носят характер необходимых, но, конечно, не достаточных: 1) амплитуды импульсов ограничены сверху величиной $\sim 50 \text{ МэВ}$; 2) точки взаимодействия лежат внутри детектора и распределены равномерно по массе мишени; 3) угловое распределение ионизирующих частиц изотропно при регистрации обратного β -распада; в этом случае, кроме e^+ , можно при определенных условиях зарегистрировать и нейтрон по захвату на водороде (см. выше описание эксперимента LSD); 4) угловое распределение ионизирующих частиц анизотропно, с резким максимумом в направлении прихода нейтрино, если регистрируется упругое рассеяние нейтрино на электроне. Если эффекты в нескольких детекторах вызваны одной и той же нейтринной вспышкой, с необходимостью появляются следующие дополнительные условия; 5) эффекты одновременны в пределах нормальных флуктуаций, которые возникают при регистрации отдельных импульсов в пачке; 6) эффект пропорционален массе детектора M_i и эффективности регистрации соответствующего взаимодействия нейтрино κ_i , т. е. $k_i \sim \kappa_i M_i$ (i — индекс, относящийся к одному из четырех детекторов); 7) энергетические спектры импульсов $k_i(E)$ одинаковы с учетом эффективности $\kappa_i(E)$; 8) угловые распределения импульсов $k_i(\theta)$ одинаковы, если детекторы регистрируют взаимодействия одного и того же типа.

Рассмотрим, насколько удовлетворяют условиям 1—8 обсуждаемые нами эффекты. Эффекты в каждом из четырех детекторов или соответствуют условиям 1—4 или, по крайней мере, не противоречат им, с учетом информативности детекторов. Лишь угловое распределение в IMB, которое явно анизотропно, в то же время представляется слишком широким для реакции $(\nu e^-) \rightarrow (\nu e^-)$, на что обращают внимание сами авторы (см. рис. 2, б). Угловое распределение эффекта в KII показано на рис. 2, а. Видно, что для $E > 12 \text{ МэВ}$ 6 из 7 импульсов имеют угол $\theta \leq 60^\circ$ относительно направления на источник. Вероятность такой флуктуации при изотропном распределении $\sim 10^{-3}$. Угловое распределение остальных пяти импульсов с энергиями ниже 12 МэВ согласуется с изотропным. Переядем к рассмотрению отклика совокупности детекторов на одну и ту же нейтринную вспышку. Заметим, что учет вращения и магнитного поля звезды позволяет, в принципе, объяснить двухступенчатый коллапс с двумя нейтринными вспышками, разделенными во врем-

мени интервалом несколько часов [21, 23–25]. Поэтому мы вправе обсуждать эффекты в 2 : 52 UT и в 7 : 36 UT, как связанные с двумя различными нейтринными вспышками.

События вблизи 2 : 52 UT. Значимый эффект есть только в LSD: $k_1 = 5$, $T = 7$ с. Как отмечалось выше, в LSD при детектировании обратного β -распада наряду с позитроном регистрируется и нейтрон. Однако вследствие малого числа взаимодействий, составляющих эффект, в идентификации нейтронов возникают трудности из-за фона в нейтронном канале. Предварительный анализ показал, что в нейтронном канале есть импульсы, которые с приблизительно одинаковой вероятностью можно связать как с нейтронами, так

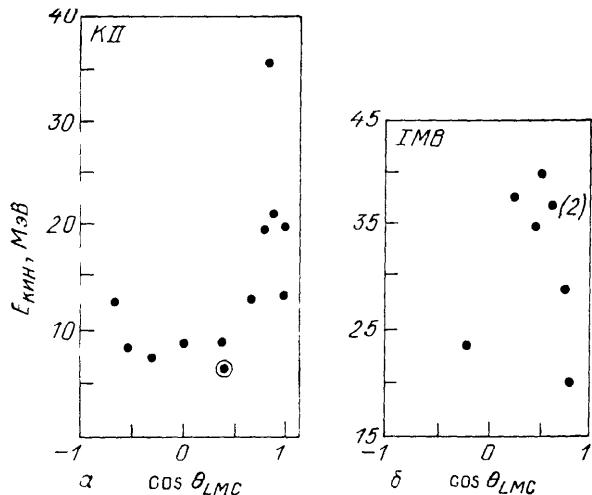


Рис. 2. Связь между энергией E и углом прихода θ_{LMC} для частиц, зарегистрированных детекторами KII (a) и IMB (b)

и фоном. С этой стороны эффект в LSD не противоречит регистрации обратного β -распада. Тогда в остальных детекторах в это время ожидаем

$$k_i = \sum_{j=1}^5 \frac{M_i}{M_1} \frac{\kappa_i (E_j - 1)}{\kappa_1 (E_j)}, \quad (4)$$

где M и κ_1 — масса мишени и эффективность детектора LSD; E_j — энергия в МэВ пяти событий в LSD; $i = 2, 3, 4$ относятся к БПСТ, KII и IMB соответственно. Соотношение (4) справедливо, если эффект в LSD вызван реакцией обратного β -распада. В этой реакции образуется e^+ ; энергия аннигиляции (e^+e^-), около 1 МэВ, хорошо регистрируется большими сцинтилляционными модулями LSD, значительно хуже небольшими модулями БПСТ и практически не регистрируется в KII и IMB. Поэтому при регистрации потока моноэнергетических \bar{v}_e в LSD выделяется энергия на 1 МэВ большая, чем в БПСТ, KII и IMB. С учетом этого обстоятельства $\kappa_2 \approx \kappa_4 \approx 0$ и ожидаемый эффект для БПСТ и IMB равен нулю; для KII ожидаем $k_3 \approx 5-7$ (заметим, что использованные здесь значения κ_3 при энергиях 5–6 МэВ имеют большие неточности [20]). Как это видно из рис. 3, в детекторе есть от 2 до 4 импульсов, которые совместимы с эффектом в LSD. Неопределенность в числе импульсов зависит от способа привязки шкалы времени KII к абсолютному времени. Амплитуды этих импульсов: 5,3; 5,8; 11,4 и 4,8 МэВ. Авторы KII рассматривают их как фоновые; значения θ для этих импульсов даны в табл. V. Таким образом, эффект в 2 : 52 UT не противоречит ни одному из условий 5–8.

События вблизи 7 : 36 UT. Здесь есть два значимых эффекта: в KII ($k_3 = 11$, $T = 13$ с) и в IMB ($k_4 = 8$, $T \approx 6$ с). Эффекты не совпадают во времени. Чтобы совместить их, шкалу времени KII необходимо сдвинуть вправо примерно на 6,4 с, как это иллюстрирует рис. 3. Неточность ± 1 мин

привязки часов к мировому времени в опыте КП позволяет ввести такую поправку. Однако подчеркнем, что такая, сделанная «руками», одновременность эффектов всего лишь устраняет аргументы «против», но не дает аргументов «за», в другом случае очень сильных в отношении достоверности регистрации

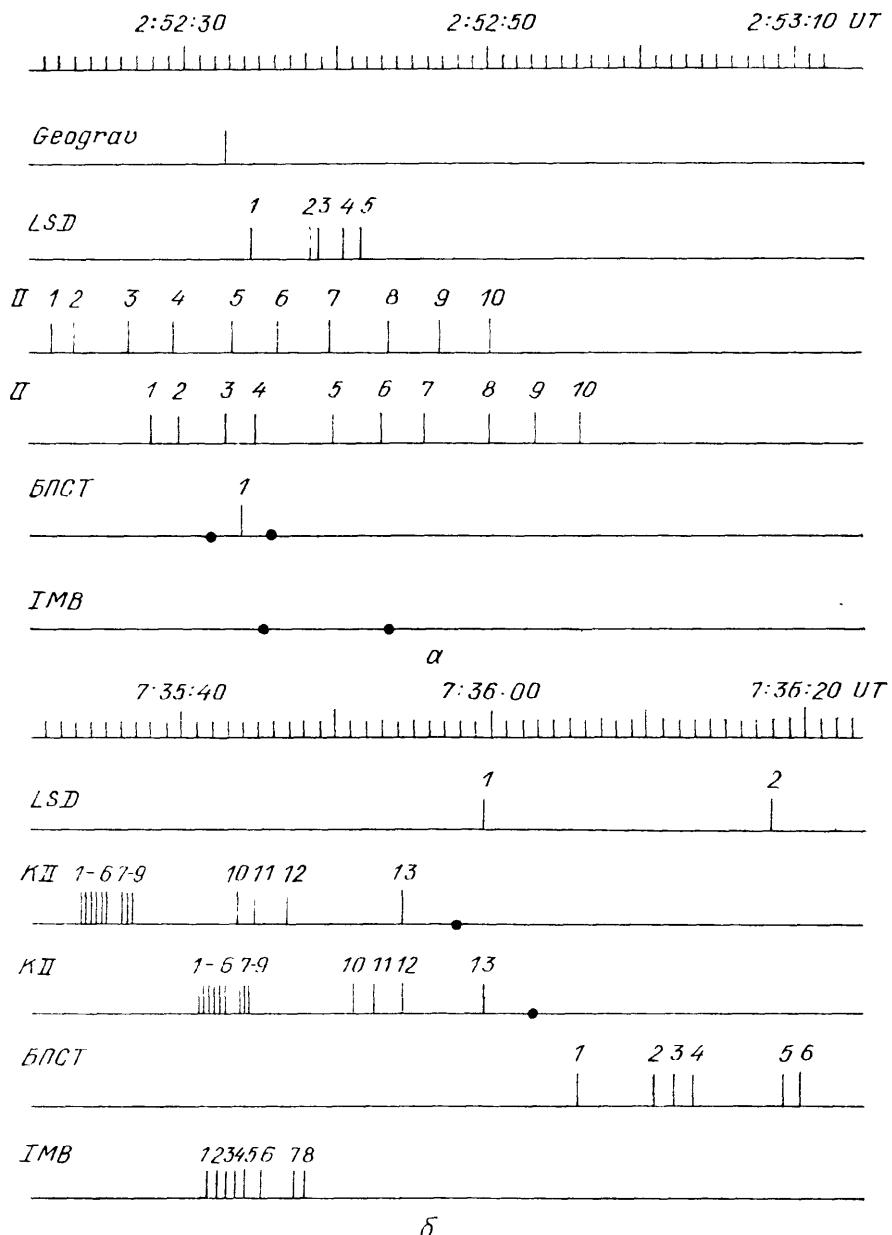


Рис. 3. Временные диаграммы импульсов, зарегистрированных вблизи 2 : 52 UT (а) и 7 : 36 UT (б) различными детекторами. Результаты КП показаны дважды (см. II): первый раз так, как они были зарегистрированы, второй — со сдвигом на 6,5 с вправо

нейтринной вспышки. Все сказанное касается также одновременности срабатывания ИМВ и БПСТ. Данные БПСТ необходимо сдвинуть как минимум на 25 с, если принимать во внимание все 6 импульсов, зарегистрированных в районе 7 : 36 UT. Отбрасывание одного импульса при анализе данных кажется нам некорректным [22]. Итак, эффекты в КП, ИМВ и БПСТ не противоречат условию 5 с оговорками, сделанными выше.

Если взять за основу эффект в КИ, совместив его по времени с эффектом в IMB, и по формуле, аналогичной (4), рассчитать ожидаемое в это время число событий в остальных детекторах, то получим $\bar{k}_1^p = 1,22$, $\bar{k}_2^p = 0,98$ и $\bar{k}_4^p = 2,70$ для LSD, БПСТ и IMB соответственно. Экспериментальные значения, как это видно из рис. 3, составляют 1; 6 и 8. Для LSD вероятность получить $k_1^p \leq 1$ при $\bar{k}_1^p = 1,22$ $P_1 (\leq 1, \bar{k}_1^p = 1,22) \approx 0,3$, т. е. не противоречит эффекту в КИ. Для БПСТ и IMB получим $P_2 (\geq 6, \bar{k}_2^p = 0,98) \approx 0,001$ и $P_4 (\geq 8, \bar{k}_4^p = 2,7) \approx 0,01$ соответственно. Таким образом, величину эффектов в БПСТ и IMB трудно совместить с величиной эффекта в КИ. Условие 6 не выполняется.

Независимо от того, что взять за исходную точку, спектр КП или спектр IMB, рассчитанный по формуле, аналогичной формуле 4, спектр в другом детекторе плохо согласуется с экспериментальным; вероятность, что расхождение вызвано флюктуацией, составляет $(1-5) \cdot 10^{-2}$. Следовательно, условие 7 для эффектов в КИ и IMB выполняется плохо.

Для сравнения угловых распределений мы вычислили $\bar{\theta}$ и среднеквадратичный разброс точек при $E \geq 19$ МэВ: таких точек в КИ четыре, в IMB восемь. Получили соответственно $\bar{\theta} = 25^\circ$, $\sigma = 7^\circ$ и $\bar{\theta} = 60^\circ$, $\sigma = 20^\circ$. Если распределение в IMB считать нормальным с $\bar{\theta} = 60^\circ$ и $\sigma = 20^\circ$, то вероятность того, что четыре точки КИ отклоняются больше, чем на одну среднеквадратичную ошибку в одну сторону, $P \sim (0,17)^4 \sim 10^{-3}$. Это значит, что угловые распределения для эффектов в КИ и IMB не согласуются друг с другом; условие 8 нарушено. Таким образом, на основании проведенного нами простого теста, без каких-либо предположений о природе источника нейтринного излучения, можно сделать следующий вывод:

- а) эффект вблизи 2 : 52 UT не противоречит регистрации импульса нейтринного излучения;
- б) эффекты вблизи 7 : 36 UT, каждый в отдельности, не противоречат регистрации импульса нейтринного излучения ни для одного из трех детекторов БПСТ, КИ и IMB, однако плохо согласуются друг с другом.

Этот анализ носит местами иллюстративный характер, особенно в части, касающейся согласия энергетических спектров. Более точные расчеты с использованием различных видов спектров нейтрино, допустимых современными моделями коллапса, были выполнены рядом авторов [30–36] и также в целом указывают на противоречивость ситуации.

Как уже было нами показано при анализе экспериментальной ситуации, эффект в любом из четырех детекторов мог быть вызван нейтринной вспышкой. Обсудим вопрос о природе источника нейтрино. Эффекты, в общем, похожи на те, что ожидаются при гравитационном коллапсе звезды. Поэтому естественно попытаться связать их со вспышкой сверхновой СН 1987А, тем более, что временная связь этих явлений очевидна.

Эффект вблизи 2 : 52 UT. Если считать, что эти события обязаны антинейтринному излучению от коллапса звезды, то эмиссионный спектр нейтринного излучения должен быть достаточно мягким, температура нейтриносферы $kT \sim 2$ МэВ. Спектр \bar{v} , v можно аппроксимировать распределением, подобным распределению Ферми — Дирака [6]

$$\Phi_{\bar{v}} (c^{-1} \text{МэВ}^{-1}) \sim \frac{e^2}{1 + e^{\varepsilon}} e^{-\alpha \varepsilon^2} \quad \left(\varepsilon = \frac{E_{\bar{v}}}{kT} \right), \quad (5)$$

где $E_{\bar{v}, v}$ — энергия \bar{v} , v в МэВ, kT — эффективная температура нейтриносферы в МэВ, фактор $e^{-\alpha \varepsilon^2}$ учитывает изменение спектра при прохождении нейтринного излучения через звезду.

В рамках этих представлений, при условии нормировки на эффект в LSD, для разных kT в табл. IX приведены значения энергии в антиней-

Таблица IX

kT, МэВ	α	$W_{\bar{\nu}_e} \cdot 10^{54}$ эрг	k_i			
			LSD	БПСТ	КИ	ИМВ
1,7	0,1	$2,7 \pm 1,0$	5	0,2	$5 \pm 2,5$	0
2,1	0,1	$1,8 \pm 0,8$	5	0,5	12 ± 6	0

тринном излучении для источника на расстоянии 52 кпк $W_{\bar{\nu}_e}$, а также ожидаемая величина эффекта для четырех детекторов.

Из сопоставления этих оценок с экспериментом (см. рис. 3) следует, что наблюдаемые эффекты не противоречат ожидаемым. Суммарная энергия нейтринного излучения для звезды СН 1987А получается около $6W_{\bar{\nu}_e} \approx \approx (1 \div 2) \cdot 10^{55}$ эрг с учетом нейтрино всех типов, т. е. на порядок выше гравитационной энергии связи нейтронной звезды. Учет реакции (2) показывает, что ее вклад в эффект не превышает нескольких процентов для любого из четырех детекторов (в той конкретной модели и при тех конкретных параметрах детекторов, которые мы здесь обсуждаем).

Если же отвлечься от модельных представлений и оценить энергетику для источника на расстоянии 52 кпк только из наблюдаемого в LSD эффекта (5 импульсов от обратного β -распада, вызванного потоком антинейтрино со средней энергией 7,5 МэВ), то получим $W_{\bar{\nu}_e} = (6,4 \pm 3,2) \cdot 10^{53}$ эрг и поток около Земли $J_{\bar{\nu}_e} = (9,5 \pm 4,7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Эффект вблизи 7:36 UT. В табл. X приведены наблюдаемые и ожидаемые количества импульсов в пачке для каждого детектора. При оценке ожи-

Таблица X

Детектор	k_i ожидаемое		k_i (эксперимент)
	Реакция (1)	Реакция (2)	
LSD	1,5	0,04	0-1
БПСТ	2	0,05	6
КИ	17	0,5	12
ИМВ	6	0,4	8

даемых эффектов использована модель стандартного коллапса [6] ($W_{\bar{\nu}_e} \sim \sim 10^{53}$ эрг, $kT = 4,6$ МэВ, $\alpha = 0,024$, $R = 52$ кпк) и учтены параметры детекторов. Весь эффект определяется реакцией обратного β -распада; вклад реакции (2) не превышает нескольких процентов.

На первый взгляд кажется, что наблюдаемые значения согласуются с ожидаемыми там, где эффекты являются значимыми, для КИ и ИМВ. Однако это согласие может быть иллюзорным. В предыдущем разделе нами был обоснован вывод о том, что половина событий, зарегистрированных в КП, обнаруживает резкую анизотропию и, следовательно, никак не может быть связана с реакцией обратного β -распада. Это относится к событиям с энерговыделением выше 12 МэВ. Анизотропными являются и события, зарегистрированные в ИМВ. Мы покажем, что ситуацию можно попытаться объяснить, приписав анизотропные события рассеянию нейтринного излучения на электронах [38]. В самом деле, рассмотрим эффект в КИ и события, сконцентрированные вблизи направления на Большое Магелланово облако (БМО). Таких событий 5 из 12; они имеют среднюю энергию около 22 МэВ. Остальные 7 событий распределены изотропно и имеют среднюю энергию около 7 МэВ. Связем первые с рассеянием на электронах, а вторые — с обратным β -распадом. При этом необходимо предположить, что эффективная температура

нейтриносферы для $\bar{\nu}_e$ около 2,2 МэВ. Так как энергия анизотропных событий велика, объяснить их можно только $\nu_{\mu, \tau}$ e^- -рассеянием; для ν_{μ} , ν_{τ} $kT \approx 8-9$ МэВ. В этом предположении представляется возможным согласовать энергетические спектры для анизотропных событий КII и событий IMB (в IMB мы все события связываем с рассеянием на электронах, закрывая глаза на слишком широкое угловое распределение). Однако энергию нейтринного излучения придется увеличить почти на порядок величины по сравнению со стандартным коллапсом. Полная нейтринная светимость получается около $6 \cdot 10^{54}$ эрг, и положение с энергетикой сверхновой при объяснении эффектов в КII и IMB в 7 : 36 UT почти так же неблагополучно, как и для эффекта в LSD в 2 : 52 UT. Заметим, что попытка связать импульс, зарегистрированный римской антенной в 2 : 52 UT 23.2.87 г, со вспышкой сверхновой SN 1987A приводит к энергии, как минимум, в сотни раз превышающей энергию гравитационного излучения при стандартном коллапсе. Таким образом, видно, что интерпретация эффектов, наблюдавшихся группой детекторов 23.2.87 г., как регистрации нейтринного или гравитационного излучения при коллапсе звезды в БМО встречает большие трудности. Прежде всего энергия нейтринного излучения как минимум на порядок превышает энергию связи нейтронной звезды. Помимо этого, пока нет убедительного объяснения «двухступенчатого» коллапса (2 : 52 UT и 7 : 35 UT) и противоречий в результатах трех детекторов вблизи 7 : 36 UT. Многие авторы, рассматривающие регистрацию нейтринного излучения от SN 1987A, например [27], считают, что в условиях малой статистики наиболее значимыми являются интегральные характеристики, такие, как полное число событий, зависимость полного количества зарегистрированных импульсов от времени и энергия, уносимая нейтрино из звезды. С этой точкой зрения трудно не согласиться, но, рассчитывая те или иные параметры, большинство авторов объясняют весь эффект $\bar{\nu}_e$ e^- -взаимодействием, не принимая во внимание угловые распределения. Тогда энергетика событий КII и IMB получается разумной: $W_{\bar{\nu}_e} \sim 10^{53}$ эрг, временные характеристики хорошо согласуются с предсказаниями. То же относится и к полному числу зарегистрированных событий. Отсюда делается вывод, что события, измеренные детекторами IMB и КII, подтверждают теоретические модели. Но известно, что теория поздних стадий звезд для последних часов жизни звезды перед коллапсом не разработана окончательно, не были проведены расчеты вращающихся звезд, имеющих магнитные поля. Поэтому кажется несколько странным, что первая регистрация нейтринного излучения от далеко сколлапсированной звезды хорошо «подтвердила» расчеты, сделанные с большими допущениями.

Существует серия работ, в которых анализируется вся совокупность данных [34—37], но для уменьшения энергии, идущей в нейтринное излучение, авторы предполагают наличие либо некоторого потока высокоэнергичных электронных нейтрино, либо осцилляции между ν_{μ} и ν_e .

По нашему мнению требуются дальнейшие усилия по осмысливанию результатов.

5. Ограничения на массу покоя нейтрино. В предположении, что обсуждаемые здесь эффекты вызваны нейтринным излучением от коллапса звезды в БМО, можно оценить массу покоя нейтрино. Принцип оценки прост и впервые был предложен в работе [26]. Если два нейтрино с энергиями E_1 и E_2 стартуют одновременно и проходят расстояние d , то в конце пути они расходятся на интервал времени Δt . При условии, что все эти величины известны, масса покоя определяется равенством

$$m_{\nu} = E_1 \left[\frac{2c \Delta t E_2^2}{d(E_2^2 - E_1^2)} \right]^{1/2}; \quad (6)$$

$m_{\nu} \ll E_1$, $E_1 < E_2$, c — скорость света.

На самом деле, из-за конечной длительности нейтринной вспышки время старта частиц размыто в пределах нескольких секунд и не известно наблюдателю. Поэтому, опираясь на длительность эффекта Г, а иногда и используя «тонкую структуру» пачки импульсов (см. рис. 3), удается оценить лишь предел на величину m_ν . Такие оценки были сделаны рядом авторов [17, 25, 27–29]; полученные результаты приведены в табл. XI.

Таблица XI

Литература	Предел на m_ν , эВ	Эксперимент
[25]	$7,8^{+4}_{-3}$	KII-импульсы 1–6 (табл. V)
[27]	6,5	» 1–6
[28]	9,5	» 1–8
[29]	4^{+1}_{-1}	» 1–6
[25]	20^{+9}_{-7}	KII-импульсы 7–11 (табл. V)
[29]	24	IMB-импульсы (табл. VII), KII-импульсы 7–11 (табл. V)
[17]	7,2	LSD, запаздывание относительно импульса в Римской антenne

В таблице показаны пределы на массу покоя электронного нейтрино, в предположении, что регистрируется обратный β -распад. Следует иметь в виду, что с учетом соображений, высказанных в предыдущем разделе, эти оценки, возможно, относятся к некоторому конгломерату из электронных, мюонных и τ -нейтрино.

6. Итоги. а) В трех нейтринных детекторах LSD, KII и IMB, расположенных в разных концах земного шара, 23 февраля 1987 г. зарегистрированы короткие пачки импульсов. Каждый из этих импульсов удовлетворяет всем критериям регистрации нейтринного взаимодействия в детекторе. За время эксплуатации детекторов 2,5 – 4 года подобные пачки импульсов ни разу не наблюдались. Спустя несколько часов астрономы визуально зафиксировали вспышку Сверхновой в Большом Магеллановом облаке. Частота случайной корреляции этих событий меньше, чем один раз в тысячу лет для любого из трех детекторов.

б) Интерпретация эффекта 23.2.87 г. в любом из трех нейтринных детекторов LSD, KII, IMB, как регистрации нейтринного излучения от гравитационного коллапса, приведшего к образованию Сверхновой в БМО, сталкивается с большими трудностями в рамках современных теорий коллапса.

в) Мы не считаем, что преодолеть эти трудности можно, игнорируя какую-то часть из общей совокупности экспериментальных фактов (будь то эффект в одном из детекторов, разновременность регистрации событий в разных детекторах, разногласия в угловых и энергетических распределениях в различных детекторах), объявив их статистическими флуктуациями или ошибками экспериментаторов. Оценки показывают, что вероятность таких флуктуаций на уровне 10^{-2} и ниже. Что же касается мнений об ошибочности тех или иных результатов, то для суждения об этом со стороны нет достаточно веских оснований.

г) В связи с этим нам представляется важным продолжить анализ и уточнение экспериментальных результатов, интенсифицировать теоретические разработки моделей коллапсов и расчеты по этим моделям. Не исключено, что найти решение проблемы удастся, рассматривая совсем другие механизмы возникновения эффектов, лишь опосредованно связанные со вспышкой Сверхновой. Основные же надежды в этом вопросе мы связываем с продолжением наблюдений по программе поиска коллапсов и сооружением новых детекторов с большой массой, низкими энергетическими порогами, и хорошей службой времени, и будущими регистрациями коллапсов, происходящих ближе к Земле, в пределах Галактики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IAU Circ. 1987. No. 4316.
2. Зельдович Я. Б., Гусейнов О. Х.//ДАН СССР. 1965. Т. 162. С. 791.
3. Domogatsky G. V., Zatsepin G. T.//Proc. of 9th ICCR. — London, 1965. — V. 2. P. 1030.
4. Agnelli W. D.//Can. J. Phys. 1966. V. 44. P. 2553.
5. Иванова Л. Н. и др.//Труды международного семинара по физике нейтрино и нейтринной астрофизике. — М.: ФИАН СССР, 1969. — Т. 2. С. 180.
6. Надежин Д. К., Отрощенко Н. В.//Астрон. ж. 1980. Т. 57. С. 78.
7. Имшеник В. С., Надежин Д. К. Итоги науки и техники. Сер. «Астрономия». — М.: ВИНИТИ АН СССР, 1982. — Т. 21. С. 63.
8. Bowers R., Wilson J. R.//Astrophys. J. 1982. V. 263. P. 366.
- Wilson J. R. et al.//Ann. N.Y. Acad. Sci. 1986. V. 470. P. 267.
9. Bguenn S.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 938.
10. Alekhine E. N. et al.//a) Proc. of the 16th ICRC. — Kyoto, Japan, 1979. — V. 10. P. 282; б) Proc. of the 12th Intern. Conference «Neutrino 86». — Sendai, Japan, 1986. — P. 270.
- [11] Боводский А. В., Дадыкин В. Л., Ряжская О. Г.//ПТЭ. 1970. № 1. С. 85.
12. Baldino J. et al.//Nuovo Cimento. 1984. V. 7. P. 573.
- Dadykin V. L. et al.//10^a. — P. 285.
13. Kogchagin P. V., Ryassny V. G. et al.//^{10a}. — V. 10. P. 299.
14. Beier E. W. et al.//Proc. of the 7th Workshop on Grand Unification. — Toyama, Japan, 1986 (in press).
15. Hirata K. et al.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 1490.
16. Bionta R. M. et al.//Ibidem. P. 1494.
17. Amaldi E. et al.//Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1325.
18. а) Дадыкин В. Л. и др.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 464.
Aglietta M. et al.//Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1315.
б) Дадыкин В. Л. и др.//Письма Астрон. ж. 1988. Т. 14. С. 107.
19. Aglietta M. et al.//Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1321.
20. Beier E. W. et al.//Proc. of the Neutrino Mass and Neutrino Astrophysics: Telemark IV. — Ashland, 1987 (in press).
- [21] De Rujula A. Preprints CERN-TH 4702, CERN-TH 4839. — Geneva, 1987; Phys. Lett. Ser. B. 1987. P. 193-514.
22. Алексеев и др.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 461.
23. Бисноватый - Коган Г. С.//Proc. of the 2nd Symposium on Underground Physics, UP-87. Baksan Valley, 1987. — М., Nauka, 1988.
24. Imshennik V. S., Nadyozhin D. K.//Astrophys. and Space Phys. Rev. 1987. V. 6. P. 185.
25. Hillerbrandt W. et al. Preprint of Max-Planck Inst. submitted to Astron. and Astrophys. 1987.
26. Затепин Г. Т.//Письма ЖЭТФ. 1968. Т. 8. С. 333.
27. Burrows A., Lattimer J. M. Preprint of the Steward Observatory No. 725. — 1987; Astrophys. J. 1987. V. 318. P. 63.
28. Bahcall J. N., Glassow S. L.//Nature, 1987. V. 326. P. 376.
29. Cowsiak R. Preprint of Tata Institute of Fundamental Research. Bombay, 1987.
30. Чудаков А. Е., Еленский Я. С., Михеев С. П.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. С. 297.
- [31] Lo Secco J. M.//²³.
32. Learned J. Preprint of Hawaii University. — 1987.
33. Ряжская О. Г., Рясный В. Г.//Письма ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 236.
34. Agafune J., Fukugita M.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 367.
35. Nagi Dass N. D. et al.//Current Sci. 1987. V. 56. P. 575.
36. Van der Velde J. C.//Proc. of Workshop «Supernova 1987A: One Year Later». — La Thuile, Aosta Valley, 1988 (in press).
37. Lo Secco J. M.//Ibidem.
38. Ряжская О. Г., Рясный В. Г.//[23].