

# ВОЗМОЖНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ СОБЫТИЯМИ ПОДЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ПЕРИОД ВСПЫШКИ SN 1987A

*Е. Н. Алексеев\**

*Институт ядерных исследований Российской академии наук  
117312, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 июля 2009 г.

Предложено возможное объяснение временных корреляций между данными подземных детекторов (Баксанского телескопа, LSD, IMB, Kamiokande II) и гравитационных антенн Рима и Мериленда, полученными в период вспышки сверхновой SN 1987A. Показано, что синхронизация по времени событий, зарегистрированных различными подземными установками, может быть вызвана гравитационным излучением от сверхновой.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вспышка сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке была настоящим сюрпризом для астрофизики и астрофизиков. С одной стороны, регистрация нейтринного всплеска [1–4] от гравитационного коллапса ядра массивной звезды и наблюдения динамики всего явления в различных диапазонах электромагнитных волн позволили подтвердить, в общих чертах, общепринятый сценарий всплеск сверхновых типа II [5–7]. С другой стороны, необычный тип исходной звезды — голубой гигант, наличие трех колец, окружающих сверхновую SN 1987A, наблюдение на LSD сигнала [8] на 5 ч раньше сигналов трех других нейтринных установок (Kamiokande II, IMB, Баксанского телескопа), потребовали дополнительных идей для объяснения результатов наблюдений [9–11].

Одним из самых неожиданных результатов, связанных с явлением SN 1987A, но не привлечшим к себе достаточного внимания и не получившим до настоящего времени никакого разумного объяснения, являются временные корреляции между событиями, зарегистрированными подземными детекторами и гравитационными антеннами в узком двухчасовом промежутке времени за несколько часов перед явлением сверхновой. Впервые корреляции были найдены в работе [12] при анализе совместных данных

детектора LSD и Римской гравитационной антенны в интервале 1:45–3:45 UT 23 февраля 1987 г. (UT — абсолютное время). Далее были найдены аналогичные корреляции между данными детектора LSD, Баксанского подземного телескопа, подземных водно-черенковских детекторов IMB и Kamiokande II [13]. Кроме того, анализ данных собственно Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа показал, что в том же интервале имелись временные корреляции между событиями различных типов на одной и той же установке [14].

Обнаруженный эффект был очень неожиданным. Для поиска аналогичной синхронизации событий, если она была обусловлена фоновой имитацией, на Баксанском телескопе была выполнена работа по анализу экспериментальных данных за длительный промежуток времени (последующие три года), однако ничего подобного найдено не было. В настоящей статье мы суммируем имеющиеся данные по всем подземным установкам с целью выяснения природы синхронизованных в интервале 1:45–3:45 UT событий 23.02.1987 г. и поиска возможного источника эффекта.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Термин «временная корреляция» включает в себя следующее. Рассматриваются временные (в системе UT) последовательности событий, зарегистриро-

\*E-mail: alexeyev@ms2.inr.ac.ru

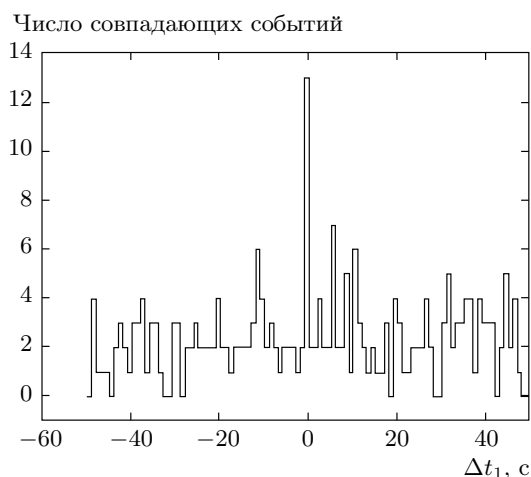
ванных какими-либо двумя детекторами в период времени  $T$  (в данном случае 1:45–3:45 UT 23 февраля 1987 г.). Затем подсчитывается число событий на втором детекторе, попадающих во временное окно совпадения  $\pm\tau$ , отсчитываемого от каждого из событий на первом детекторе. Превышение найденных таким способом временных совпадений над обычными фоновыми случайными совпадениями может свидетельствовать о наличии корреляции между временами прихода событий на разные установки, т. е. о временной корреляции. Ожидаемое число случайных совпадений при такой обработке данных, если экспериментальные события подчиняются распределению Пуассона, равно

$$N = n_1 n_2 T \cdot 2\tau, \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — средние темпы счета установок в секундах,  $\tau$  — временное окно, в котором наблюдаются совпадения (в секундах),  $T$  — время наблюдения.

Сдвигая в целом временную последовательность событий на втором детекторе относительно последовательности событий на первом детекторе и повторяя описанную процедуру подсчета совпадений разных событий при каждом сдвиге, можно получить распределение числа временных совпадений как функцию величины временного сдвига. Поскольку времена (UT) зарегистрированных установками событий определены их собственными часами, то при точной и одинаковой привязке показаний обоих часов к абсолютному времени реальное число временных совпадений будет наблюдаться при равном нулю сдвиге шкалы времени между данными. Однако в реальности часы разных установок имеют разную точность: от миллисекунды до минуты, как это было выяснено при обсуждении зарегистрированного в 7:35 UT 23 февраля нейтринного сигнала от сверхновой SN 1987A тремя подземными нейтринными детекторами. Именно это обстоятельство и потребовало изучения экспериментальных данных с использованием временного сдвига между часами разных установок.

На рис. 1, взятом из работы [12], показано распределение числа временных совпадений (величина окна совпадения составляет  $\tau = \pm 0.5$  с) между событиями, зарегистрированными гравитационными детекторами Рима и Мерленда и сцинтилляционным детектором LSD, в зависимости от величины сдвига шкалы времени  $\Delta t_1$  между часами этих установок. В качестве данных подземной установки LSD использовались одиночные низкоэнергетичные срабатывания сцинтилляционных счетчиков — 96 событий за 2 ч.



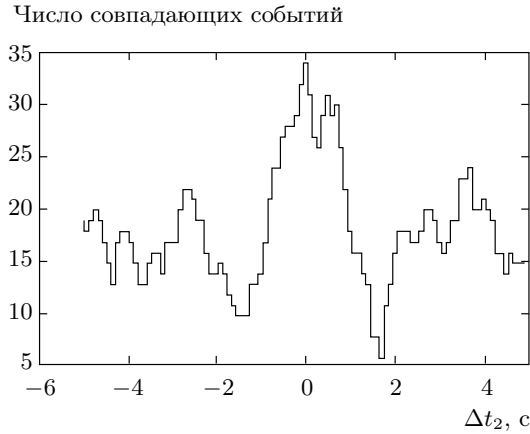
**Рис. 1.** Распределение числа совпадений между низкоэнергетичными событиями, зарегистрированными детектором LSD и гравитационными антеннами Рима и Мерленда, во временном окне  $\tau = \pm 1$  с в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_1$  между часами установок

Данные гравитационных антенн были получены следующим образом: вначале была зарегистрирована последовательность величин энергии (в кельвинах), измеренных за 1 с, которые соответствовали суммарному изменению энергетического статуса гравитационных антенн Рима и Мерленда. Далее из этой последовательности выделялись такие интервалы (1 с), в которых суммарное энерговыделение двух антенн было выше заданного порогового значения (150 К). Как видно из рис. 1, при  $\Delta t_1 = 0$  (что соответствует точной привязке к абсолютному времени часов детекторов) наблюдается отчетливый пик из 13-и совпадений при ожидаемом среднем, равном 2.3. Оцененная авторами работы [1] вероятность случайной имитации 13-и и более совпадений равна

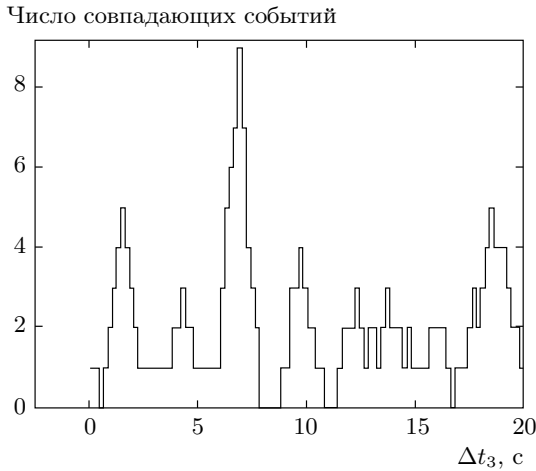
$$W_1 = 9 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, это было указание на существование некоторой временной корреляции между событиями, зарегистрированными разными установками.

Корреляции между данными детекторов LSD и IMB, полученными в тот же период времени, были исследованы в работе [13]. В анализе были использованы одиночные низкоэнергетичные события, зарегистрированные детектором LSD, и мюоны, приходящие под углом более  $60^\circ$  на водно-черенковский детектор IMB. На рис. 2 в работе [13] показано распределение числа совпадений между данными этих двух детекторов во временном окне совпаде-



**Рис. 2.** Распределение числа совпадений между теми же событиями на детекторе LSD и мюонами на детекторе IMB, приходящими под углами более 60° во временном окне  $\tau = \pm 0.5$  с в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_2$  между часами этих установок

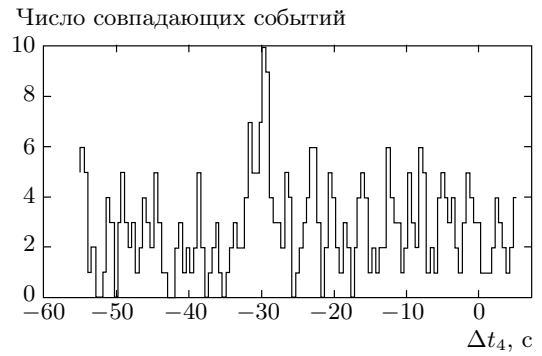


**Рис. 3.** Распределение числа совпадений между событиями, зарегистрированными детекторами LSD и Kamiokande II, во временном окне  $\tau = \pm 0.5$  с в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_3$  между часами этих установок

ний  $\tau = \pm 0.5$  с в зависимости от величины сдвига времени  $\Delta t_2$  между их часами. Как видно из рис. 2, при  $\Delta t_2 = 0$  наблюдается пик из 33-х совпадений при ожидаемом среднем 18.7. Вероятность случайной имитации величины этого пика фоном равна

$$W_2 = 9 \cdot 10^{-4}.$$

Распределение числа совпадений между событиями на детекторах LSD и Kamiokande II (времен-



**Рис. 4.** Распределение числа совпадений между данными детектора LSD и низкоэнергетичными событиями, зарегистрированными Баксанским телескопом, во временном окне  $\tau = \pm 0.5$  с в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_4$  между часами этих установок

ное окно совпадения  $\tau = \pm 0.5$  с) в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_3$  между их часами показано на рис. 3 [17]. Данные LSD представляют собой те же одиночные низкоэнергетичные срабатывания детекторов, а данные Kamiokande II — ограниченные в объеме детектора события с числом сработавших фотоумножителей менее 20 шт. Как видно из рис. 3, при  $\Delta t_3 = 7$  с в распределении наблюдается пик из 9-и совпадений при ожидаемом среднем 2.44. Вероятность случайной имитации этого пика фоном равна

$$W_3 = 6.6 \cdot 10^{-4}.$$

Временные корреляции между событиями, зарегистрированными детектором LSD и Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом, были исследованы в работах [13, 14]. На рис. 4 показано распределение числа совпадений (временное окно совпадения равно  $\tau = \pm 0.5$  с) между событиями, представляющими собой одиночные низкоэнергетичные срабатывания детекторов обеих установок, как функция величины временного сдвига  $\Delta t_4$  между их часами. Видно, что при сдвиге часов Баксанского телескопа  $\Delta t_4 = -29$  с наблюдается пик из 10-и совпадений при среднем фоновом, равном 2.93. Вероятность случайной имитации этого пика фоном составляет

$$W_4 = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Поскольку данные детекторов LSD, IMB, Kamiokande II и Баксанского телескопа являются совершенно независимыми, полная вероятность  $W$

имитации наблюдаемых корреляций фоном равна произведению вероятностей:

$$W = W_1 W_2 W_3 W_4 = 2.7 \cdot 10^{-15}.$$

В связи с тем, что полная вероятность  $W$  достаточно мала, а события, включенные в анализ, имеют разное и независимое происхождение, имеет смысл исследовать временные корреляции более детально.

Последующее изучение обсуждаемой временной синхронизации между данными Баксанского телескопа и других подземных детекторов было выполнено в работе [14]. Кроме уже указанных корреляций между одиночными низкоэнергетичными событиями на Баксанском телескопе и детекторе LSD были найдены корреляции между низкоэнергетичными событиями, зарегистрированными телескопом, и мюонами, приходящими под углом более  $60^\circ$ , на водно-черенковский детектор ИМВ. Далее были обнаружены подобные временные корреляции между событиями различного типа и на собственно Баксанском телескопе, в частности, между одиночными низкоэнергетичными событиями и мюонами, образующими каскады при прохождении через установку. Более того, мюоны, образующие каскады в телескопе, коррелируют также и с низкоэнергетичными событиями на детекторе LSD. Существенным является то, что наиболее ярко эффект временной синхронизации событий проявляется в первый час указанного выше интервала, т. е. 1:45–2:45 UT.

Оценки вероятностей имитаций временных корреляций фоном предполагают, что времена прихода событий распределены по формуле Пуассона. Следовательно, прежде всего необходимо было убедиться, что распределение событий на обсуждаемых установках также подчиняется формуле Пуассона. В работах [8, 15] были получены распределения чисел событий, зарегистрированных за большие промежутки времени (несколько лет), и было показано, что они с высокой степенью точности описываются распределением Пуассона.

В работах [16, 17] было показано, что использованный апостериорный анализ данных гравитационных антенн и, главным образом, оптимизация временного сдвига между данными детектора LSD и данными гравитационных детекторов снижают достоверность найденного эффекта временных корреляций между их событиями. В действительности, рассмотрение малых временных сдвигов (десятых долей секунды) не имеет никакого серьезного физического смысла, поскольку эффект корреляций, очевидно, не является мгновенным, а длится достаточно долго, в течение нескольких секунд.

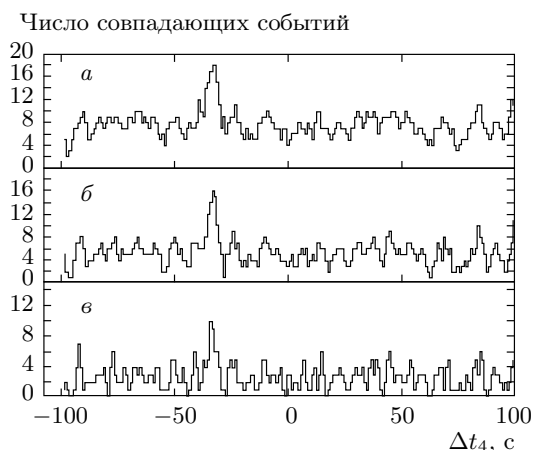


Рис. 5. Распределение числа совпадений между событиями, зарегистрированными детектором LSD и Баксанским телескопом, в зависимости от сдвига времени  $\Delta t_4$  между часами этих установок для различных временных окон  $\tau = \pm 1$  с (а),  $\pm 2$  с (б),  $\pm 3$  с (в)

На рис. 5 показано распределение числа совпадений между низкоэнергетичными событиями, зарегистрированными детектором LSD и Баксанским телескопом, для трех величин временного окна совпадения. Видно, что пик в распределении совпадений между событиями наблюдается при всех значениях временного окна. Однако более подробное изучение [14] показывает, что относительная величина пика растет с увеличением временного окна до  $\pm 2$  с, а затем убывает при величине окна более  $\pm 3$  с. Тем не менее можно согласиться, что некоторая апостериорная оптимизация обработки экспериментальных данных действительно имела место и она может снижать достоверность полученного результата. Однако полная вероятность имитации обсуждаемого эффекта фоном настолько мала, что изменение этой величины даже на два–три порядка не имеет решающего значения.

Дополнительным свидетельством действительной реальности обнаруженного эффекта временных корреляций между разными событиями на разных установках в период явления SN 1987A является тот поразительный факт, что с учетом полученных при анализе корреляций временных сдвигов для часов Kamiokande II (+7 с) и для часов Баксанского телескопа (−29 с) по отношению к часам детектора LSD нейтринные сигналы трех установок, зарегистрированные в 7:35 UT 23 февраля 1987 г. (Kamiokande II, ИМВ и Баксанский телескоп), становятся одновре-

менными около времени сигнала ИМВ, поскольку, как было показано выше, сдвиг между часами LSD и ИМВ равен нулю [9], а часы LSD имели в тот период самую точную привязку к абсолютному времени UT, равную 2 мс [4].

Таким образом, анализ временных корреляций между сигналами подземных установок, имевших место в интервале 1:45–3:45 UT, позволяет выполнить привязку к точному времени часов Kamiokande II и Баксанского телескопа и установить точное время регистрации (7:35:41.4 UT) нейтринного сигнала от SN 1987A 23 февраля 1987 г.

Это серьезное обстоятельство связывает вместе нейтринный сигнал от SN 1987A и эффект синхронизации зарегистрированных детекторами событий примерно за 5 ч до него, что, в свою очередь, не позволяет игнорировать обнаруженный эффект, а заставляет искать возможные причины его появления.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Корреляции между сигналами детекторов, находящихся в различных частях земного шара, могут быть вызваны или приходом на детекторы дополнительных, синхронных по времени, потоков частиц, или, вследствие каких-либо причин, нарушением закона распределения времен прихода событий.

Первая из указанных возможностей должна быть отвергнута по двум причинам. Во-первых, никаких дополнительных потоков частиц на всех детекторах в период 1:45–3:45 UT 23 февраля 1987 г. не наблюдалось. В работах [8, 15] проведен анализ темпов счета событий и показано, что никакого превышения над средним фоном в указанный период на детекторах не было. Во-вторых, поскольку сверхновая находится в Большом Магеллановом Облаке, а все нейтринные детекторы расположены в северном полушарии, предполагаемые частицы должны были бы двигаться из нижней полусферы Земли. Однако часть наблюдаемых коррелирующих событий — сигналы детектора ИМВ и Баксанского телескопа — являются мюонами или, во всяком случае, заряженными частицами, приходящими из верхней полусферы Земли.

Таким образом, остается вторая возможная причина наблюдаемой синхронизации, а именно, одновременное изменение времен прихода событий на всех детекторах. Для того чтобы разобраться в причинах этого явления, необходимо прежде всего рас-

смотреть природу коррелирующих событий на различных детекторах, оставляя пока в стороне события гравитационных антенн.

Основными источниками событий, регистрируемых детекторами LSD и Kamiokande II, являются естественная радиоактивность, нейтроны и гамма-кванты от каскадов, образованных мюонами космических лучей высоких энергий в окружающем установке грунте. Сигналы детектора ИМВ, которые коррелируют с низкоэнергетичными событиями, зарегистрированными детектором LSD и Баксанским телескопом, соответствуют мюонам космических лучей, приходящим на установку под углом более  $60^\circ$ . Источниками низкоэнергетичных одиночных событий, зафиксированных Баксанским телескопом являются естественная радиоактивность, нейтроны и гамма-кванты от мюонных каскадов в грунте, редкий шум фотоумножителей. Источником событий, участвующих в корреляции между низкоэнергетичными одиночными событиями на Баксанском телескопе и детекторе LSD и мюонными каскадами в телескопе являются высокоэнергетичные мюоны космических лучей.

Следовательно, во всех событиях на всех подземных детекторах, участвующих в корреляциях, присутствуют мюоны космических лучей высоких энергий или продукты их взаимодействия. Далее, поскольку в наблюдаемых совпадениях сигналов разных установок находятся не все зарегистрированные, а только их часть, естественно предположить, что коррелирующими событиями во всех детекторах являются именно те их них, которые связаны с мюонами космических лучей высоких энергий. Очевидно, что для того чтобы возникли временные совпадения между событиями детекторов, расположенных в различных частях земного шара, необходимо, чтобы потоки мюонов космических лучей на Земле были каким-то образом синхронизованы по времени.

В связи с этим можно предположить, что для синхронизации времен прихода мюонов космических лучей на Землю необходимо каким-либо образом воздействовать на их источник —  $\pi$ - и  $K$ -мезоны, которые, в свою очередь, рождаются в ядерных взаимодействиях первичных космических лучей в земной атмосфере. В дальнейшем будем говорить только о  $\pi$ -мезонах, имея в виду, что в данном эффекте принимают участие и  $K$ -мезоны.

Одним из возможных способов такого воздействия на источник мюонов является изменение времени жизни  $\pi$ -мезонов. Действительно, поскольку энергии мюонов, принимающих участие во временных корреляциях, велики (более 350 ГэВ для Бак-

санского телескопа и более 1 ТэВ для LSD), энергии их родителей —  $\pi$ -мезонов — должны быть выше критической, и тогда их пробеги до взаимодействия будут меньше, чем пробеги до распада. Следовательно, уменьшение времени жизни  $\pi$ -мезонов будет увеличивать вероятность их распада и, соответственно, приведет к увеличению потока мюонов высоких энергий. Аналогичным образом увеличение времени жизни  $\pi$ -мезонов приведет к росту вероятности их взаимодействий и, соответственно, к уменьшению потока мюонов высоких энергий.

Таким образом, изменение времени жизни  $\pi$ -мезонов на Земле в короткие интервалы времени будет приводить к одновременному изменению потока мюонов на всех детекторах и, следовательно, к появлению временных корреляций событий, связанных с мюонами космических лучей на различных детекторах. Можно сделать приближенную оценку требуемой величины изменения времени жизни  $\pi$ -мезонов. Предположим, что в период времени 1:45–3:45 UT 23 февраля 1987 г. в интервалах, длительностью несколько секунд, происходит уменьшение времени жизни  $\pi$ -мезонов и возрастание потока мюонов на детекторах. Пусть число таких интервалов равно  $N$ . Поскольку полное количество событий, регистрируемых детектором LSD и коррелирующих с данными детекторов (т. е. в пике совпадений за вычетом средне-фонового значения), приблизительно равно 20 (из 96), вероятность появления события в любом из таких интервалов равна  $P_1 = 20/N$ .

С достаточной степенью точности можно считать, что и для низкоэнергетичных одиночных событий, зарегистрированных Баксанским телескопом и имеющих сходную природу с событиями на детекторе LSD, аналогичная вероятность также равна  $P_2 = 20/N$ . Тогда число  $n$  совпадающих событий в таких интервалах для детектора LSD и Баксанского телескопа равно

$$n = P_1 P_2 N.$$

Подставляя сюда измеренное число временных совпадений низкоэнергетичных событий на установках LSD–Баксан, равное 7 (за вычетом фона), получим, что число интервалов, в которых происходило уменьшение времени жизни  $\pi$ -мезонов, равно  $N = 60$ , а вероятность появления обсуждаемого события в детекторе составляет, соответственно,  $P = 0.3$ .

Далее, учитывая множественность рождения вторичных частиц (поскольку при рассматриваемых энергиях первичных частиц рождаются

десятки  $\pi$ -мезонов, а расстояния, на которые расходятся продукты распада  $\pi$ -мезонов, сравнимы с размерами установок), получим, что для появления корреляций достаточно изменить время жизни  $\pi$ -мезонов на величину около 2 %.

В связи с тем, что полные темпы счетов событий в детекторах в обсуждаемый период времени, как было сказано ранее, не изменились, для соблюдения этого условия необходимо, чтобы в промежутки времени между данными интервалами воздействия происходило соответствующее увеличение времени жизни  $\pi$ -мезонов. Теперь следует рассмотреть, каким образом возможно изменять время жизни  $\pi$ -мезонов описанного типа.

Время жизни  $\pi$ -мезона, движущегося со скоростью  $V = \beta c$ , равно

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$\gamma$ -фактор  $\pi$ -мезона с характерной для данных экспериментов энергией  $E \approx 1$  ТэВ составляет примерно 1000. Родившийся в атмосфере на высоте около 15 км  $\pi$ -мезон с такой энергией имеет средний пробег до взаимодействия, равный  $L_{int} = 300$  м. Таким образом, предполагаемый «приемник» некоторого внешнего воздействия представляет собой  $\pi$ -мезон, пробегающий в среднем путь длиной 300 м, а увеличение или уменьшение его времени жизни в какие-либо достаточно короткие промежутки времени приводит к уменьшению или увеличению потока мюонов высоких энергий на уровне Земли.

Какова природа этого внешнего воздействия? Поскольку обсуждаемый эффект связан со сверхновой SN 1987A, из всей совокупности различного вида излучений, исходящих из звезды на заключительном этапе ее эволюции, проникающим (кроме нейтринного) является гравитационное излучение. Оставаясь в рамках имеющихся в настоящее время физических представлений, т. е. не вводя каких-либо новых полей и частиц, разумно предположить, что на время жизни  $\pi$ -мезонов может влиять именно гравитационное излучение, поскольку нейтринное излучение будет зарегистрировано в 7:35 UT.

Гравитационное излучение, возникающее в процессах гравитационного коллапса ядер массивных звезд, рассматривалось в работах [18–20]. В работе [18] была сделана оценка максимальной амплитуды гравитационной волны, возникающей при гравитационном коллапсе ядра звезды для целого ряда моделей. Полученная величина в терминах безразмерной амплитуды  $h$  находится в пределах

$$2.0 \cdot 10^{-23} \leq h \leq 1.25 \cdot 10^{-21}.$$

Данное значение верно для звезды, находящейся на расстоянии 10 кпс от Земли. Очевидно, что для SN 1987A полученная величина должна быть уменьшена еще в 25 раз. Из приведенной оценки видно, что объяснить требуемое изменение времени жизни  $\pi$ -мезона взаимодействием метрического тензора  $g_{\mu\nu}$  с параметрами частицы невозможно, поскольку изменение временных и пространственных координат будет пренебрежимо мало.

В таком случае можно предположить, что изменение времени жизни  $\pi$ -мезона происходит вследствие нарушения лоренц-инвариантности в системе наблюдатель — частица в гравитационной волне. Согласно принципу эквивалентности ОТО законы физики, равно как и преобразования Лоренца, сохраняются в гравитационном поле в малой окрестности в свободно падающей системе отсчета. Однако внутри гравитационной волны система отсчета, связанная с Землей, не является свободно падающей и лоренц-инвариантность в такой системе отсчета не обязана сохраняться.

Поскольку гравитационные волны переносят энергию и импульс, можно сделать энергетическую оценку предполагаемого эффекта влияния гравитационных волн на время жизни релятивистской частицы. В работе [20] была оценена полная энергия, уносимая гравитационными волнами, для различных моделей развития коллапса:

$$1.4 \cdot 10^{-11} M_{\odot} c^2 \leq E_{gw} \leq 2.21 \cdot 10^{-8} M_{\odot} c^2,$$

$M_{\odot}$  — масса Солнца. Предполагая, что данная энергия выделилась в месте расположения сверхновой SN 1987A, т. е. на расстоянии 50 кпс, можно оценить поток энергии на уровне Земли:

$$F = E/4\pi R^2,$$

где  $E$  — энергия, уносимая из звезды гравитационными волнами,  $R$  — расстояние до сверхновой.

Полученная величина потока энергии гравитационного излучения определяется соотношениями

$$0.7 \text{ эрг/м}^2 \leq F \leq 700 \text{ эрг/м}^2$$

за все время излучения гравитационных волн в процессах коллапса и охлаждения горячей нейтронной звезды.

Изменение лоренц-фактора релятивистской частицы, или, что то же самое, изменение ее времени жизни на 1–2 %, эквивалентно изменению энергии частицы на ту же величину. Например, для характерной в данных экспериментах энергии  $E = 1$  ТэВ эта величина составляет 10–20 ГэВ или

$(1.6\text{--}3.2) \cdot 10^{-2}$  эрг, что значительно меньше ожидаемого потока энергии от звезды в виде гравитационного излучения.

Таким образом, если существует механизм передачи энергии от гравитационной волны к релятивистской частице, то возможно изменение ее времени жизни, достаточное для получения наблюдаемого эффекта временной синхронизации событий подземных установок.

Если теперь допустить, что причиной наблюдаемых корреляций событий на нейтринных детекторах является гравитационное излучение от процессов формирования сверхновой SN 1987A, то возникает законный вопрос: какой же сигнал был зарегистрирован гравитационными антеннами Рима и Мериленда?

Чувствительность этих детекторов составляла  $10^{-16}$  в единицах  $h$ , что существенно ниже ожидаемого гравитационного сигнала. Следовательно, их сигналы, коррелирующие с сигналами нейтринных детекторов, не могут быть связаны с реакцией гравитационных антенн на возмущение метрики. При этом прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что амплитуды сигналов гравитационных антенн, совпадающих с сигналами нейтринных детекторов, невелики и находятся в области тепловых шумов.

Другая возможность состоит в том, что коррелирующие события (энерговыведения с порогом выше заданного), полученные с гравитационных антенн, вызваны прохождением через них пучков мюонов, а сигналы обусловлены трансформацией ионизационных потерь энергии мюонов в тепловую энергию.

Отклик гравитационного детектора при прохождении через него заряженных частиц изучался в работе [21]. Малый макет твердотельного гравитационного детектора длиной 20 см и диаметром 3 см облучался на ускорителе пучками протонов с энергией 30 ГэВ и электронов с энергией 0.5 МэВ. Экспериментальные результаты сравнивались с расчетными, выполненными в предположении, что ионизационные потери заряженных частиц в детекторе приводят к нагреванию и, вследствие этого, к возбуждению механических колебаний в детекторе. В работе было найдено, что пучок протонов возбуждает резонансные колебания детектора в области первых гармоник, в то время как влияние электронов на детектор обнаружено не было. Причину последнего авторы объясняют тем, что электроны не проникают в глубь детектора и не происходит его нагрева, достаточного для возбуждения колебаний. Это исследование, по-видимому, и объясняет отрицательные ре-

зультаты экспериментов по проверке влияния космических лучей на гравитационные детекторы [22, 23]. Используемые в этих экспериментах схемы отбора событий выделяли главным образом периферию широких атмосферных ливней, основу которой как раз и составляют электроны и гамма-кванты низких энергий.

Более поздние исследования влияния заряженных частиц на детектор гравитационных волн на криогенном детекторе NAUTILUS [25] с помощью частиц космических лучей показали, что сигнал от частиц космических лучей невелик (до нескольких кельвинов). Однако в этих экспериментах был зарегистрирован один (из 18-и событий) сигнал, величиной на три порядка больше остальных (57.9 К), что сопоставимо с данными гравитационных антенн Рима и Мериленда в период вспышки SN 1987A. Таким образом, возможность того, что события, зарегистрированные гравитационными антеннами Рима и Мериленда 23 февраля 1987 г., вызваны высокоэнергетичными мюонами или группами мюонов космических лучей, остается незакрытой и очень вероятной, требующей серьезного изучения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе суммирована информация об эффекте временной синхронизации (корреляции) событий, зарегистрированном примерно за 5 ч до прихода нейтринного сигнала от сверхновой SN 1987A и, очевидно, связанном с данной сверхновой, поскольку позволил независимо и довольно точно выполнить привязку к абсолютному времени (UT) часов детектора Kamiokande II и Баксанского телескопа. Последующие поиски аналогичного явления в течение длительного времени на Баксанском телескопе успеха не имели.

Полная вероятность имитации фоном временных совпадений событий, зафиксированных гравитационными и нейтринными детекторами, равная  $10^{-15}$ , является достаточно малой, хотя в ней даже не учтены вероятности совпадения событий разного типа на Баксанском телескопе, совпадения низкоэнергетичных сигналов телескопа с мюонами детектора IMB, а также поправки временной привязки часов нейтринных установок в 7:35 UT, т. е. данный эффект не является случайным.

Если предложенное возможное объяснение природы корреляций как следствия некоторого взаимодействия гравитационных волн низкой частоты с  $\pi$ - и  $K$ -мезонами космических лучей является вер-

ным, то найденный эффект представляет собой первую в истории прямую регистрацию гравитационных волн, а метод поиска синхронизованных по временам прихода на различные установки событий — это новый метод регистрации гравитационного излучения. Очень существенным для данного метода является тот факт, что, в отличие от имеющихся в настоящее время гравитационных антенн, он чувствителен к гравитационным волнам низкой частоты (характерное время составляет несколько секунд). Следовательно, способы поиска гравитационного излучения от масштабных явлений значительно расширяются.

Описанный эффект был связан с явлением сверхновой II типа SN 1987A. Это ставит дополнительные вопросы к моделям динамики и формирования взрывов массивных звезд. Действительно, поскольку зарегистрированный установками Kamiokande II, IMB и Баксана нейтринный сигнал имел место в 7:35 UT 23 февраля и, согласно стандартной модели, соответствует процессам гравитационного коллапса звездного ядра и формированию горячей нейтронной звезды, мощное излучение гравитационных волн, по мнению авторов работ [18–21], должно происходить именно в этот же период времени. Оценка энергии гравитационного излучения, приведенная ранее и использованная в данной работе, получена авторами работы [20] именно для этих процессов. Однако эффект временных корреляций событий разных установок (1:45–3:45 UT) на несколько часов предшествует коллапсу ядра звезды и, по-видимому, связан с какими-то другими масштабными явлениями в предсверхновой.

В работе [25] при поиске механизмов выброса нейтронной звезды из центра сверхновой было найдено, что возможны крупномасштабные процессы в звезде за 1 ч до начала коллапса, которые могут привести к излучению гравитационных волн, причем частота таких колебаний составляет приблизительно 1 Гц. Хотя энергия таких гравитационных волн не была оценена, в работе [26] сделана оценка характерной энергии, которая необходима для того, чтобы впоследствии выбросить нейтронную звезду из места образования со скоростью около 1000 км/с. Эта энергия достаточно велика ( $10^{49}$  эрг), и даже если малая ее часть будет излучена в виде гравитационных волн, то этой энергии будет достаточно для возникновения в земных детекторах эффекта временной синхронизации регистрируемых событий.

Таким образом, из всего изложенного выше можно сделать вывод о том, что временные корреляции между событиями, зарегистрированными под-



земными детекторами в период вспышки SN 1987A, вызваны, наиболее вероятно, каким-то воздействием гравитационного излучения низкой частоты от масштабных процессов в предсверхновой на высокоэнергетичные мюоны космических лучей, хотя конкретный механизм воздействия остается пока неизвестным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко, И. В. Кривошеина, Письма в ЖЭТФ **45**, 462 (1987).
2. R. M. Bionata, G. Blewitt, C. B. Bratton et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 1494 (1987).
3. K. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987).
4. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., IAU Cir. 4323 (1987).
5. M. L. Constantini, A. Ianni, and F. Vissani, Phys. Rev. D **70**, 04306 (2004).
6. F. Vissani and G. Pagliaroli, Astron. Lett. **35**, 1 (2009).
7. T. J. Loredo and D. Q. Lamb, Phys. Rev. D **65**, 063002 (2002).
8. M. Aglietta, G. Badino, G. F. Bologna et al., Europhys. Lett. **3**, 1315 (1987).
9. T. Morris and Ph. Podsiadowski, Month. Not. Roy Astron. Soc. **365**, 2 (2006).
10. S. Hannestad, G. Raffeld, and Y. Y. Wong, Phys. Rev. D **76**, 121701 (2007).
11. V. C. Imshennic and O. G. Ryazhskaya, Astron. Lett. **30**, 14 (2004).
12. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., Nuovo Cim. C **12**, 75 (1989).
13. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., Nuovo Cim. C **14**, 171 (1991).
14. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. Н. Закидышев и др., Письма в ЖЭТФ **49**, 548 (1989).
15. L. N. Alexeyeva, Highlights Astron. **8**, 229 (1989).
16. В. Н. Руденко, А. В. Гусев, В. К. Кравчук, М. П. Виноградов, ЖЭТФ **118**, 979 (2004).
17. C. A. Dickson and B. F. Shutz, Phys. Rev. D **51**, 2644 (1994).
18. C. D. Ott, A. Burrows, L. Dessart, and E. Livne, Phys. Rev. Lett. **96**, 201102 (2006).
19. H. D. Dimmelmeier, C. D. Ott, A. Marek, and H.-T. Janka, Phys. Rev. D **78**, 064056 (2008).
20. T. Summerscales, A. Burrows, L. V. Finn, and C. D. Ott, Astrophys. J. **678**, 1142 (2008).
21. A. Marek, H.-Th. Janka, and E. Müller, Astron. Astrophys. **496**, 475 (2009).
22. A. M. G. Strini, G. Strini, and G. Tagliaferri, J. Appl. Phys. **51**, 948 (1980).
23. E. Amaldi and G. Pizzella, Nuovo Cim. C **9**, 612 (1986).
24. F. Ricci, Nucl. Instr. Meth. Phys. Rev. A **260**, 491 (1987).
25. P. Astone, M. Bassan, P. Bonifazi et al., Phys. Lett. B **499**, 16 (2001).
26. J. W. Murphy, A. Burrows, and A. Heger, Astroph. J. **615**, 460 (2004).