

УДК 52-728; 524.352-44

КОРРЕЛЯЦИЯ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ И НЕЙТРИННЫХ СОБЫТИЙ: ДОЛГИЙ ПУТЬ НЕЙТРИНО ОТ SN 1987A

© 2020 Ф. Бучелла^{1*}, Дж. В. Паллоттино², П. Галеотти^{3,4}, Дж. Пиццелла⁵

¹Национальный институт ядерной физики, Неапольский филиал, Неаполь, 80126 Италия

²Национальный институт ядерной физики, Римский филиал 1, Рим, 00186 Италия

³Национальный институт ядерной физики, Туринский филиал, Турин, 10125 Италия

⁴Туринский университет, Турин, 10125 Италия

⁵Национальная лаборатория Фраскати национального института ядерной физики, Фраскати, 00044 Италия

Поступила в редакцию 3 сентября 2019 года; после доработки 9 февраля 2020 года; принята к публикации 9 февраля 2020 года

В работе более детально рассмотрена корреляция между данными, полученными на двух детекторах гравитационных волн (ГВ) (в Риме и в Мэриленде) и двух нейтринных детекторах (LSD в Италии и Kamiokande в Японии), обсуждаемая в нашей недавней работе. Мы нашли, что между событиями U1 и U2, где U1 — отклик детекторов гравитационных волн, а U2 — отклик детекторов нейтрино, существует четкая временная корреляция: а именно, U2 приходит позже U1 на время, зависящее от измеренной энергии в нейтринных детекторах (запаздывание уменьшается с измеренной энергией нейтрино). Прямые расчеты оценивают массу частиц U2 лежащей в диапазоне от 4 до 6 eV. Если далее предположить, что U2 возникает под действием нейтрино, масса которых по оценкам не превышает 0.1 eV (с уровнем значимости 90%), мы берем на себя смелость высказать предположение о том, что нейтрино замедляются на пути в 168 000 световых лет от SN 1987A до Земли.

Ключевые слова: гравитационные волны — нейтрино — сверхновые: индивидуальные: SN 1987A

1. ВВЕДЕНИЕ

Событие SN 1987A уникально: это первая сверхновая, видимая невооруженным глазом, после кеплеровской сверхновой 1604 года. И фактически, это единственный случай, когда созданные человеком детекторы зарегистрировали известный источник нейтрино, находящийся на расстоянии от Земли в 168 000 световых лет. Анализ, представленный в данной работе, посвящен временным корреляциям между разными типами детекторов во время события SN 1987A и углубляет исследование, которое проводилось в течение нескольких лет и завершилось публикацией результата (Galeotti and Pizzella 2016).

Мы отдаем себе отчет в том, что и найденные ранее, и обсуждаемые в настоящей работе корреляции не согласуются с большинством современных теорий. Однако вероятность того, что эти корреляции случайны, очень мала, поэтому мы считаем необходимым представить научному сообществу любой новый результат и убеждены, что физическое объяснение будет найдено, как, например, в работе Imshennik and Ryashskaya (2004)

или в недавней статье Eroshenko et al. (2019). Наш долг — продолжать изучение единичных данных, связанных с SN 1987A, так как вероятность взрыва еще одной близкой сверхновой в ближайшие десятилетия очень мала.

В работе Galeotti and Pizzella (2016) был проведен новый анализ данных, полученных во время события SN 1987A. Обнаружена временная корреляция четырех установок, расположенных на разных континентах: двух детекторов нейтрино (LSD в Италии и Kamiokande (в дальнейшем, KND) в Японии), а также двух детекторов гравитационных волн (GEOGRAV в Риме и Weber в Мэриленде, США).

Не делая предположений о том, какая частица и/или волна вызывает отклик детектора, мы введем для сигналов детекторов гравитационных волн обозначение U1, а для нейтринных событий — U2 (см. статью Aglietta et al. 1989).

На каждом нейтринном детекторе регистрировались энергия (в MeV) и время обнаруженного события. Большинство срабатываний, скорее всего, имеют фоновую природу, но применяемый нами алгоритм основан на идее использования всех

*E-mail: Guido.Pizzella@Inf.infn.it

доступных данных, а не только событий, вызванных взаимодействиями нейтрино. В случае нейтринного детектора LSD важно напомнить, что он зарегистрировал в реальном времени пять взаимодействий 23 февраля в $2^{\text{h}}52^{\text{m}}$ UT за день до оптического обнаружения сверхновой SN 1987A (Galeotti and Pizzella 2016) (в дальнейшем — 5-нейтринное событие LSD).

Детекторы гравитационных волн предоставляли результаты измерения их вибрационного состояния с частотой в 1 Гц.

Таким образом, за один час от каждого детектора ГВ имеется 3600 измерений ($E_R(t)$ от римского детектора и $E_{MD}(t)$ от детектора в Мэриленде), в то же время детекторами нейтрино было зарегистрировано около 100 событий (KND) и около 50 (LSD).

Данные с двух детекторов гравитационных волн сведены в один файл сложением сигналов, пришедших в одно и то же время:

$$E(t) = E_R(t) + E_{MD}(t).$$

Назовем эту величину *энергетическим вкладом*. Два файла от детекторов нейтрино преобразованы в один путем сложения данных LSD и KND.

Мы подчеркиваем, что полученные на каждом их четырех детекторов данные совершенно независимы.

Наконец, для заданного интервала времени ΔT (например, один час) нами была введена сумма $E_{GW} = \sum E(t_i)$, где включающая в себя те энергетические вклады, которые были измерены во времена

$$t_i = t_\nu - \Delta t \pm 0.5 \text{ s}, \quad (1)$$

где t_ν — моменты нейтринных событий, а Δt обозначает возможную задержку между регистрацией сигналов от детекторов ГВ и нейтрино. Эта задержка была определена в предыдущем анализе: при рассмотрении только 5-нейтринного события (Amaldi et al. 1987) она составила $\Delta t = 1.4$ с, а при рассмотрении всего массива данных нейтринных детекторов (Aglietta et al. 1989) — $\Delta t = 1.1$ с. Таким образом, E_{GW} за один час состоит из суммы примерно 150 ($i = 1, \dots \sim 150$) отобранных энергетических вкладов (среди 3600 доступных), которые совпадают (учитывая задержку) с нейтринными событиями. Значение E_{GW} сравнивалось для каждого значения Δt с большим числом фоновых значений $E_B = \sum E(\neq t_i)$, полученных путем случайного отбора регистрируемых моментов на всех четырех детекторах (двух ГВ и двух нейтринных).

Такой метод анализа называется методом *суммарного возбуждения* и детально описан в статьях Aglietta et al. (1989) и Aglietta et al. (1991).

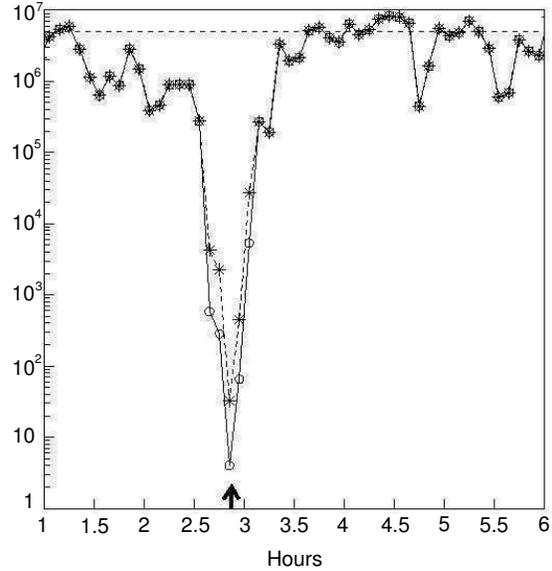


Рис. 1. Сплошная линия и незаполненные кружки: метод суммарного возбуждения в применении к 30-минутным периодам с шагом 0.1 часа в промежутке от 0 до 6 часов UT 23 февраля (см. рис. 5 в работе Galeotti and Pizzella 2016). Для каждого периода корреляция вычислялась после прибавления 1.1 с к времени U1, как обсуждается в статье Galeotti and Pizzella (2016). По шкале ординат показано сколько раз (из 10^7) измерения фона $E_B = \sum E(\neq t_i)$, выполненные в случайные моменты времени, больше или равны значению E_{GW} , полученному во время нейтринных событий (см. текст). В времени от $2^{\text{h}}36^{\text{m}}$ UT до $3^{\text{h}}6^{\text{m}}$ UT, который включает 5-нейтринное событие LSD, $N = 4$, что соответствует вероятности 4×10^{-7} того, что корреляция случайна. Стрелка указывает время 5-нейтринного события LSD. Штриховая линия в верхней части рисунка указывает ожидаемое значение в случае отсутствия корреляции. Штриховая линия со звездочками: 5-нейтринное событие LSD исключено из корреляционного анализа. В этом случае имеем $N = 33$, что соответствует вероятности 3.3×10^{-6} того, что корреляция случайна.

Как показано в работе Galeotti and Pizzella (2016), применение данного метода к данным детекторов ГВ и нейтрино, полученным в промежутке от 0 до 6 часов 23 февраля с интервалами 30 минут и шагом 6 минут, обнаруживает сильную корреляцию на временном интервале в полчаса от $2^{\text{h}}36^{\text{m}}$ UT до $3^{\text{h}}6^{\text{m}}$ UT, как раз во время 5-нейтринного события LSD, с временной задержкой нейтринных сигналов по отношению к сигналам U1 в 1.1 с.

Оценка вероятности того, что эта корреляция случайна, составляет порядка 4×10^{-7} .

С учетом чувствительности двух детекторов ГВ маловероятно, что сигналы U1 могли быть сгенерированы гравитационными волнами от SN 1987A. Нельзя исключать, что сигналы в детекторах ГВ

связаны с другими причинами, например, еще не обнаруженными экзотическими частицами, если только не может быть рассчитано гораздо большее поперечное сечение для гравитационных волн¹.

В настоящей работе мы начинаем с исследования того, была ли сильная корреляция, полученная непосредственно во время 5-нейтринного события LSD, не просто следствием этого 5-нейтринного события.

Применив метод суммарного возбуждения после исключения 5-нейтринного события из данных LSD, мы вновь наблюдаем корреляцию, как показано на рис. 1, в тот же получасовой период, который включает 5-нейтринное событие LSD.

Это подтверждает идею о том, что корреляция между данными детекторов нейтрино и ГВ была не просто следствием событий, определенных как нейтринные, но также и событий, отнесенных к фоновым.

Так как вероятность того, что корреляция между U1 и нейтрино случайна, очень мала, мы решили исследовать соответствующие данные более детально.

2. ЗАВИСИТ ЛИ ЗАДЕРЖКА ОТ ЭНЕРГИИ НЕЙТРИНО?

Экспериментальный результат, описанный выше, показывает, что нейтрино приходят, в среднем, на 1.1 сек позже частиц U1.

Чтобы интерпретировать этот результат, мы должны попытаться выдвинуть некую гипотезу. Простейшей гипотезой было бы предположить, что обе частицы испускаются одновременно сверхновой, при этом масса нейтрино больше массы частиц U1, поэтому они проходят расстояние SN 1987A—Земля за более длительное время. Мы также предполагаем, что частицы U1 движутся со скоростью света.

Можно вычислить массу покоя нейтрино по задержке Δt между сигналом, распространяющимся со скоростью света, и сигналами, зарегистрированными LSD и Kamiokande.

Для нейтрино с энергией E получим

$$\begin{aligned} E &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}, \\ m_0 c^2 &= E \sqrt{\left(\frac{c^2 - v^2}{c^2}\right)} \simeq E \sqrt{\left(\frac{2\Delta t}{D}\right)}, \\ \Delta t &= \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2 \frac{D}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

¹Giuliano Preparata вычислил гораздо большее поперечное сечение в своей теории сверхизлучения (Preparata 1990).

Выразив D в световых секундах, для SN 1987A получим массу покоя нейтрино

$$m_0 = E \sqrt{\frac{\Delta t}{2.7}} \text{ eV} \quad (E \text{ MeV}). \quad (3)$$

Теперь рассмотрим получасовой интервал от 2^h36^m UT до 3^h6^m UT, во время 5-нейтринного события LSD, когда корреляция была наибольшей. Полный подсчет для U2 во временном интервале от 2^h36^m UT до 3^h6^m UT составляет 83: 32 от LSD и 51 от KND.

Интерпретируя сигналы U2, как вызванные нейтрино, при задержке в 1.1 с и средней энергии 83 событий в 7.9 MeV, получаем для массы нейтрино приблизительно 5 eV, что является слишком большим значением относительно современных оценок верхнего предела массы в 2 eV (см., например, Aker et al. 2019).

Погрешность времени прихода ГВ влияет на значение задержки в 1.1 с. Мы приблизительно оценили ошибку синхронизации детекторов ГВ как примерно 0.5 с.

Распределения энергии нейтрино, наблюдавшихся на детекторах LSD и KND (эти два детектора имеют разные предельные значения), показаны на рис. 2.

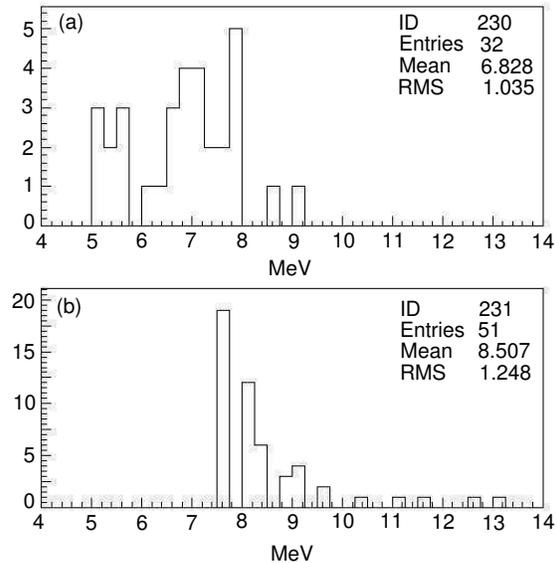


Рис. 2. Распределения энергии наблюдаемых нейтрино. Порог энергии для событий LSD (a) равен 5 MeV, а для KND (b) — 7.5 MeV.

Мы применили метод суммарного возбуждения отдельно для данных LSD и KND и получили результаты для двух детекторов (рис. 3). По этому рисунку мы получили вероятность случайности

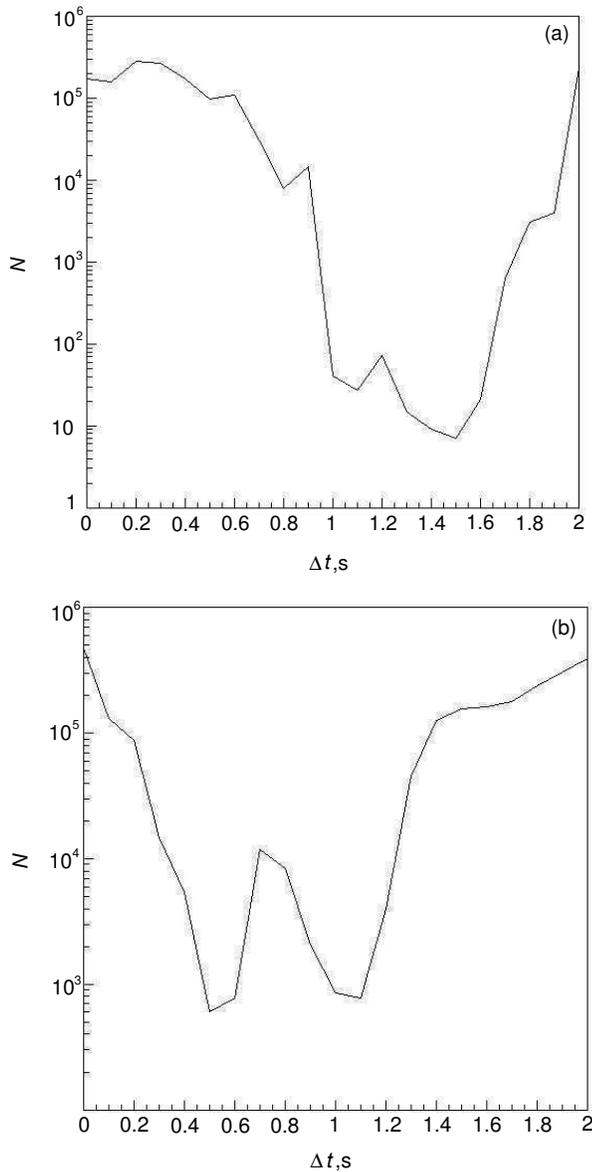


Рис. 3. Зависимость вероятности случайности корреляции между данными U1 и U2 от задержки Δt , используемой в анализе. График (a) показывает только данные LSD (32 события U2), график (b) — только данные KND (51 событие U2).

корреляции между сигналами U1 и U2, когда U2 запаздывают за U1 на время Δt , путем деления числа на шкале ординат на 10^6 , как объяснялось выше (на подписи к рис. 1).

Мы нашли, что наилучшая корреляция получается при более длительных задержках для малоэнергичных нейтрино, какими обычно являются нейтринные события на LSD.

Этот результат показывает увеличение задержки корреляции для нейтрино с меньшей энергией.

Можно проверить, является ли это верной интерпретацией нашего экспериментального резуль-

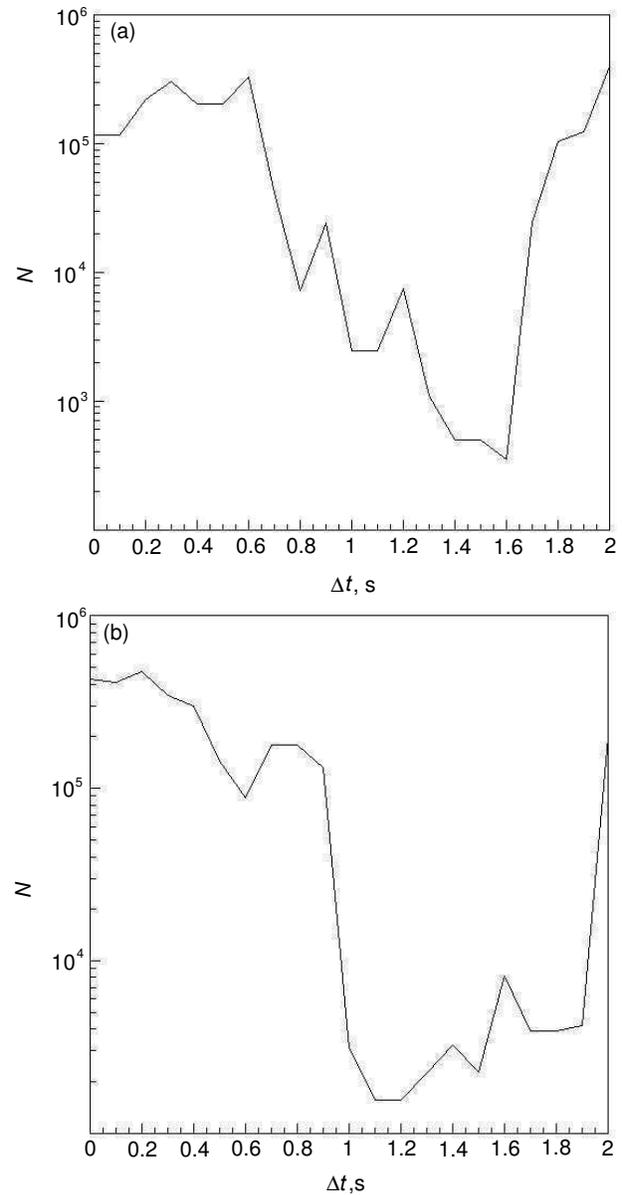


Рис. 4. LSD. Вероятность того, что корреляция между данными U1 и U2 случайна в зависимости от задержки Δt . График (a) показывает энергии менее 7 MeV (17 событий со средним значением 6.06 MeV), график (b) — энергии более 7 MeV (15 событий со средним значением 7.69 MeV).

тата, разделив энергетические распределения нейтрино каждого детектора и рассмотрев их по отдельности. Данный подход иллюстрируется рис. 4 для LSD и на рис. 5 для KND.

Видно, что задержка Δt уменьшается с увеличением энергии нейтрино и для LSD, и для KND, в соответствии с нашей гипотезой.

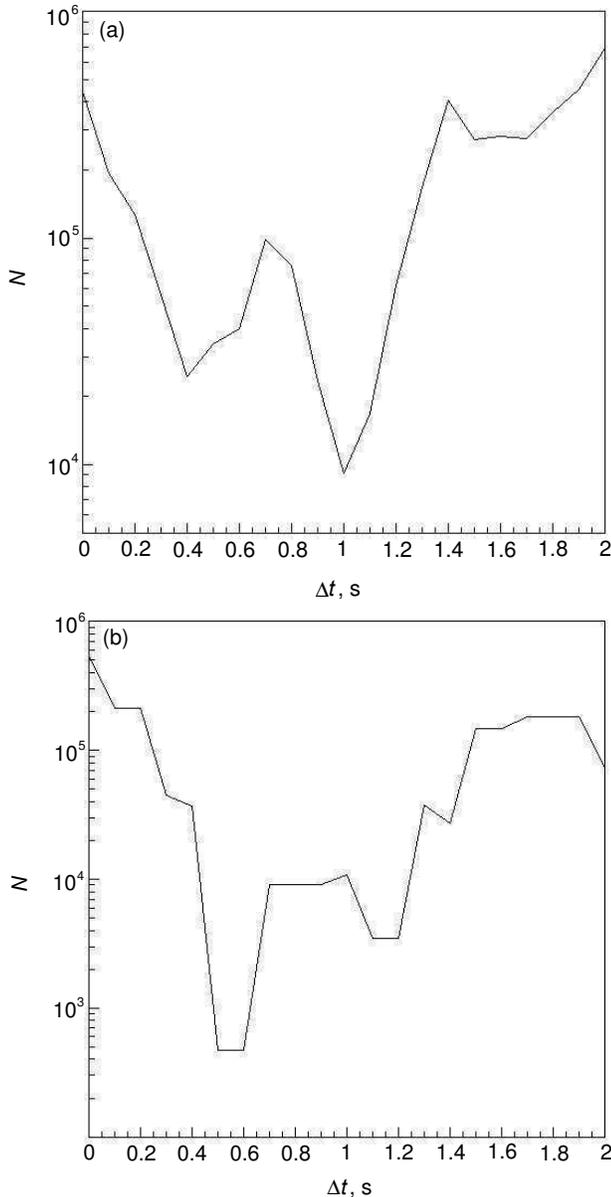


Рис. 5. KND. Вероятность того, что корреляция между данными U1 и U2 случайна в зависимости от задержки Δt . График (а) показывает энергии менее 9 MeV (40 событий со средним значением 8.01 MeV). График (б) показывает энергии более 9 MeV (11 событий со средним значением 10.46 MeV).

3. ОЦЕНКА МАССЫ НЕЙТРИНО

В таблице показаны результаты для событий после их разделения по энергиям нейтрино.

Отметим, что четыре значения массы нейтрино, показанные в таблице, получены по независимым наборам данных. Результаты варьируются примерно от 4.6 eV до 5 eV со средним значением 4.8 eV.

На рис. 6 показана задержка Δt в зависимости от $1/E^2$ (E — энергия нейтрино).

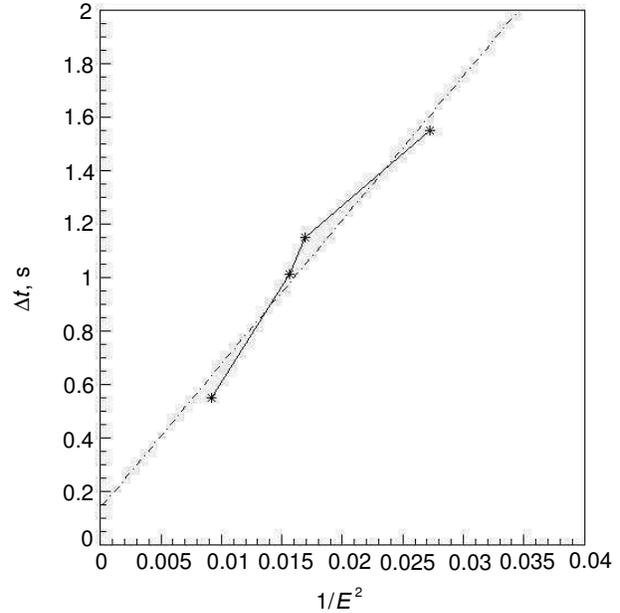


Рис. 6. Измеренная задержка Δt в зависимости от $1/E^2$ (E в MeV) для групп нейтринных событий, приведенных в таблице. Штриховая линия $\Delta t = 0.137 + 54/E^2$ получена аппроксимацией методом наименьших квадратов четырех групп данных.

Заметим, что пересечение с осью y (при $E \rightarrow \infty$) указывает на систематическую ошибку в наших определениях времени. Из уравнения 3 получим массу нейтрино

$$m = \sqrt{54/2.7} = 4.47 \text{ eV}. \quad (4)$$

Этот результат идентичен предыдущему.

3.1. Различные оценки массы покоя нейтрино

Результаты, приведенные в таблице, получены в предположении, что сигналы U1 распространяются со скоростью света.

Для того, чтобы избавиться от этой от него, мы можем использовать только разницу во времени и разность энергий.

Из уравнения 3 получим

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = 2.7m^2 \left[\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right], \quad (5)$$

$$m = \sqrt{\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.7} \frac{E_1 E_2}{\sqrt{E_1^2 - E_2^2}}}. \quad (6)$$

Используя данные из таблицы и уравнение 6, можно скомбинировать первую строчку со второй, третьей и четвертой, вторую строку с третьей и четвертой, а третью с четвертой, и получить шесть

Детектор, диапазон энергий, число нейтринных событий, средняя энергия E и средняя задержка времени, найденные аппроксимацией параболой с центром в минимуме распределений, где корреляция была самой сильной для четырех групп нейтринных событий на рис. 4 и 5. В последней колонке указана масса нейтрино, вычисленная по уравнению 3

Детектор	Энергия, MeV	Число нейтрино	Энергия нейтрино E , MeV	Δt , с	Масса нейтрино, eV
LSD	<7	17	6.06	1.55	4.59
LSD	>7	15	7.69	1.15	5.02
KND	<9	40	8.01	1.014	4.91
KND	>9	11	10.45	0.55	4.72

разных определений массы нейтрино, два из которых совершенно независимы друг от друга.

Используя только две группы данных LSD, получим $m = 3.79$ eV, а для двух наборов данных KND — $m = 5.17$ eV.

Распределение этих шести оценок показано на рис. 7.

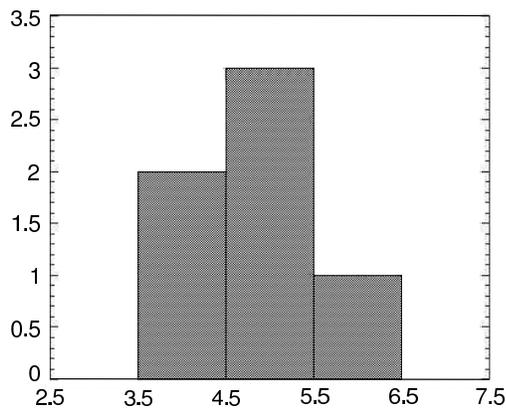


Рис. 7. Распределение шести определений массы нейтрино (eV по оси абсцисс), вычисленные без учета времени регистрации событий U.

Среднее значение равно

$$m_{\nu_e} = 4.9 \pm 0.8 \text{ eV}. \quad (7)$$

И оно вновь больше наблюдаемого верхнего предела массы нейтрино.

Однако согласованность различных определений предполагает, что сигналы детекторов ГВ, вне зависимости от их природы, создаются частицами или полями, распространяющимися со скоростью или равной, или очень близкой к скорости света.

4. ДРУГОЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ СВЯЗИ МЕЖДУ ЗАДЕРЖКОЙ И ЭНЕРГИЕЙ НЕЙТРИНО

Мы выяснили, что энергия нейтрино коррелирует с задержкой относительно сигналов U1, но масса, оцененная в ходе данного анализа, превышает массу нейтрино, полученную в ходе других экспериментов.

Прежде чем обсудить этот результат, мы хотим использовать еще один метод для верификации того факта, что энергия нейтрино и временная задержка Δt коррелируют между собой.

Для каждого из 83 нейтринных событий с энергией E_i в момент t_{ni} рассмотрим сигналы U1, предшествующие каждому моменту времени регистрации нейтрино в пределах двухсекундного интервала, выберем время t_{wi} , когда сигнал U1 наибольший, и рассчитаем задержку $\Delta t_i = t_{ni} - t_{wi}$ между U1 и нейтринными сигналами, которая, как мы считаем, коррелирует с нейтринной энергией E_i .

Результат операции показан на рис. 8, который подтверждает, хотя и очень грубо, найденное нами ранее в этой работе наличие корреляции между энергией нейтрино и задержкой Δt , причем Δt больше для меньших энергий.

Можно получить соотношение между E и Δt . Используя уравнение 3, находим, что на $\Delta t = 0.5$ с, масса нейтрино составляет 3.6 eV, а на $\Delta t = 2$ с находим 6.3 eV, что не сильно отличается от значений, полученных ранее.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы полагаем, что представленный в настоящей работе анализ уменьшает вероятность того, что наблюдаемая корреляция случайна.

Хотя сложно считать, что сигналы U1 вызваны гравитационными волнами, так как твердотельные

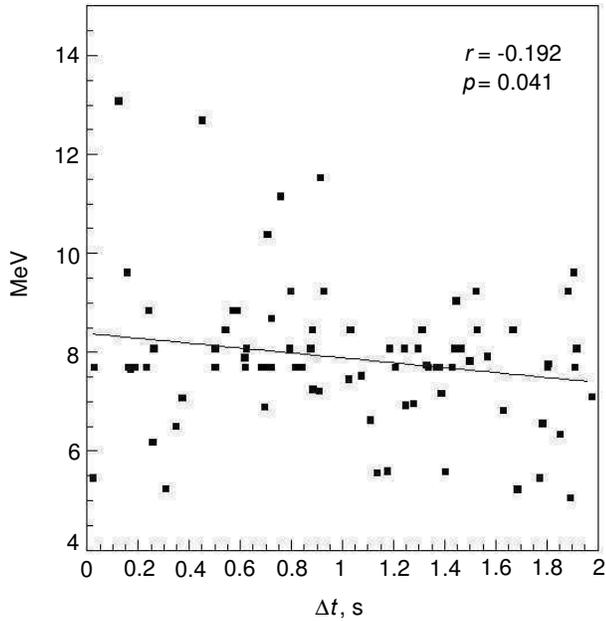


Рис. 8. Энергия нейтрино в зависимости от времени задержки Δt . Показан коэффициент корреляции и односторонняя вероятность того, что корреляция случайна.

антенны Вебера, насколько нам известно, обладают низкой чувствительностью², все же представляется разумным, что сопоставимая доля сигналов, регистрируемых нейтринными детекторами, вызвана нейтрино.

Непреодолимым препятствием представляются оценки значения массы нейтрино, находящиеся в диапазоне от 4 до 5 eV. Действительно, прямые эксперименты с нейтрино (Aker et al. 2019) накладывают верхний предел на массу частицы в 1.1 eV. Если рассматривать пределы, обусловленные космологическими соображениями (Couchot et al. 2017, Tanabashi et al. 2018), в сумме для всех видов нейтрино Σm_ν имеем верхние пределы в диапазоне от 0.12 до 0.17 eV.

Взяв верхний предел массы, полученный в тритиевом эксперименте ($m_\nu = 1.1$ eV) и подставив его в уравнение 3 для самой маленькой энергии нейтрино, обнаруженной в эксперименте LSD (5 MeV), мы получим временную задержку между сигналами U1 и нейтрино в 0.04 с. Практически нулевая задержка получится, если взять космологический верхний предел массы частицы.

Очевидное заключение состоит в том, что полученная в нашем анализе масса не может являться массой покоя нейтрино. Однако, поскольку статистическая достоверность нашего анализа представляется высокой, нужна иная интерпретация.

²Мы не рассматриваем большее поперечное сечение в теории сверхсветимости (Preparata 1990).

Самое простое объяснение — считать, что нейтрино были испущены во время коллапса сверхновой, после испускания частиц U1, при этом нейтрино высокой энергии испускаются раньше низкоэнергетических.

Еще одна возможная идея, хотя и очень фантастическая, состоит в том, что по ходу своего пути от SN 1987A к Земле, составляющем 168 000 световых лет, нейтрино задерживаются (допустим, из-за взаимодействия с темной материей или особой траектории массивных частиц в пространстве—времени) на время порядка 1 сек, причем для нейтрино с меньшими энергиями задержка больше.

Если принять любую из этих интерпретаций, то нам придется признать важную роль детекторов ГВ.

Полученный результат заставляет нас поверить в то, что сигналы U1 вызваны реальной физической причиной. Остается понять феномен (возможно, гравитационные волны), который вызвал одновременную регистрацию сигнала на детекторах ГВ (пара детекторов, находящихся на разных континентах) в точности во время события SN 1987A, также одновременно с двумя детекторами нейтрино, расположенными на межконтинентальных расстояниях.

Что касается возможной фантастической интерпретации того, что задержки нейтрино могли быть вызваны зависящим от энергии замедлением во время путешествия длиной 168 000 световых лет, мы хотим отметить, что насколько нам известно, это первый случай, когда у человека имеется информация о путешествии массивных частиц в межзвездном пространстве.

Несмотря на отсутствие четкой идеи о причинах нейтринных и U1 сигналов, мы считаем важным представить всю экспериментальную информацию.

В заключение отметим, что полная интерпретация наблюдаемых корреляций остается открытой. Однако история науки учит нас, что игнорирование экспериментальных результатов замедляет прогресс нашего понимания Вселенной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим коллаборации Kamiokande, LSD и Рима за предоставление данных. Мы благодарим Марчелло Пикколо за полезные обсуждения и предложения, Паоло Липари, Елиджио Лиси и Франческо Виссани за рекомендации по массам нейтрино.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna, et al., *Nuovo Cimento C, Ser. I* **12C**, 75 (1989).
2. M. Aglietta, A. Castellina, W. Fulgione, et al., *Nuovo Cimento C, Ser. I* **14C**, 171 (1991).
3. M. Aker et al., (KATRIN Collab.), arXiv:1909.06048 (2019).
4. E. Amaldi, P. Bonifazi, M. G. Castellano, et al., *Europhys. Lett.* **3**, 1325 (1987).
5. F. Couchot, S. Henrot-Versillé, O. Perdureau, et al., *Astron. and Astrophys.* **606**, A104 (2017).
6. Yu. N. Eroshenko, E. O. Babichev, V. I. Dokuchaev, and A. S. Malgin, *J. Experimental Theoretical Physics* **128** (4), 599 (2019).
7. P. Galeotti and G. Pizzella, *Europ. Phys. J. C* **76**(8), 426 (2016).
8. V. S. Imshennik and O. G. Ryazhskaya, *Astron. Lett.* **30**, 14 (2004).
9. G. Preparata, *Modern Physics Lett. A*, 5 (1), 1 (1990).
10. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **98** (3) id. 030001 (2018).

Correlation of Gravitational Waves—Neutrino Detectors: the Long Neutrino Voyage from SN 1987A

F. Buccella, G. V. Pallottino, P. Galeotti, and G. Pizzella

The correlation between the data obtained with two gravitational wave (GW) detectors (in Rome and in Maryland) and two neutrino detectors (LSD in Italy and Kamiokande in Japan) has been studied in more detail. If we indicate with U1 the response of the gravitational wave detectors and with U2 the response of the neutrino detectors, we find that there is a clear time correlation between U1 and U2: namely U2 comes later than U1 by an amount depending on the energy measured in the neutrino detectors (the delay decreases with the detected neutrino energy). A straightforward calculation would yield a mass for the U2 particles between 4 and 6 eV. If one further assumes that the U2 is due to neutrinos whose mass has been evaluated to be less than 0.1 eV (at 90% c.l.), we hazard the idea that a slow down during the neutrinos' 168 000 light-year travel from SN 1987A to Earth could be inferred.

Keywords: *gravitational waves—neutrinos—supernovae: individual: SN 1987A*