

ДВАДЦАТЬ ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГАЛАКТИКОЙ В ПОИСКАХ ВСПЛЕСКОВ КОЛЛАПСНЫХ НЕЙТРИНО НА БАКСАНСКОМ ПОДЗЕМНОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ТЕЛЕСКОПЕ

*Е. Н. Алексеев**, *Л. Н. Алексеева*

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

Поступила в редакцию 29 января 2002 г.

Подведены итоги двадцатилетних наблюдений за Галактикой в нейтринном излучении. За исключением регистрации нейтринного сигнала от сверхновой SN 1987A, галактические всплески коллапсных нейтрино не обнаружены. Получено верхнее ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике, равное $f_{collapse}(90\% \text{ ур. д.}) < 0.13 \text{ год}^{-1}$.

PACS: 95.30.Cq, 95.55.Vj, 95.85.Ry, 97.60.Bw, 97.60.Ld

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1933 г. Вольфганг Паули ввел новую нейтральную частицу малой или нулевой массы, чтобы спасти закон сохранения энергии при ядерных бета-распадах [1]. Экспериментально эта частица была наблюдаена лишь спустя двадцать пять лет Райнесом и Коуэном [2]. С тех пор с возрастающей интенсивностью идет изучение взаимодействий нейтрино и их роли в физике элементарных частиц, в астрофизике и космологии. Открытая частица оказалась настолько удивительной, что благодаря своей высокой проникающей способности вследствие слабости взаимодействий с веществом позволила не только изучать ядерные процессы на Земле и в ее атмосфере, но и заглянуть внутрь звездных объектов.

Развитие теоретических и экспериментальных исследований привело к созданию большого числа детекторов для поиска и регистрации нейтрино земного и внеземного происхождения. Поскольку источниками энергии в звездах являются ядерные реакции, соответственно, они испускают и нейтрино. Возникло новое направление исследований — нейтринная астрономия. Однако постоянный поток низкоэнергичных нейтрино очень трудно регистрировать. Об этом свидетельствуют многолетние эксперимен-

ты по изучению нейтринных потоков от ближайшей к Земле звезды — Солнца [3–5].

Еще в 1934 г. Бааде и Цвикки предложили идею существования нейтронных звезд и высказали мысль, что они образуются при взрывах сверхновых [6]. Через тридцать лет, в 1965 г., Зельдович и Гусейнов пришли к выводу, что при нейтронизации вещества в гравитационном коллапсе ядра массивной звезды может возникнуть короткий всплеск высокоэнергичных нейтрино [7], и в том же году было указано на экспериментальную возможность поисков таких нейтринных всплесков [8]. А в 1966 г. Колгейт и Уайт предположили, что нейтрино могут играть решающую роль при взрывах сверхновых звезд [9]. Почти одновременное открытие поздней осенью 1968 г. пульсаров в Крабовидной туманности [10], которая является остатком сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г., и в созвездии Парусов [11] послужило свидетельством образования нейтронных звезд при взрывах сверхновых. Дальнейшие наблюдения и анализ получаемых данных подтверждали такой вывод и позволяли продвинуться вперед в понимании лежащих в основе этих явлений физических процессов [12, 13].

В последующие годы шло интенсивное развитие как теории последних стадий эволюции звезд, так и экспериментов по поиску всплесков таких коллапс-

*E-mail: alexeyev@msl.inr.ac.ru

ных нейтрино. Особой вехой в развитии обоих направлений исследований явилась вспышка сверхновой SN 1987A 23 февраля 1987 г.

Первые эксперименты по поиску всплесков нейтрино от гравитационных коллапсов ядер звезд были начаты в 1973 г. коллаборацией Пенсильвания–Техас–Турин. Это были три маленькие водно-черенковские установки с массами мишени около 20 тонн воды каждая и с энергетическими порогами регистрации частиц 20 МэВ, расположенные одна в шахте Хоумстейка на глубине 4400 м.в.э. [14], другая в шахте штата Огайо на глубине 1800 м.в.э. [15] и третья в автомобильном тоннеле под горой Мон-Блан на глубине 4270 м.в.э. [16]. Проработали они недолго, всего несколько лет. И хотя не было зарегистрировано ни одного ожидаемого всплеска коллапсных нейтрино, они сделали первый шаг на длинной дороге к 1987 г.

Ко второму поколению детекторов коллапсных нейтрино, масса мишени которых уже составляла сотни тонн вещества и которые начали работать в 1977–1980 г.г., относятся Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (Северный Кавказ, Россия) [17], сцинтилляционная установка LSD под горой Мон-Блан (Италия) [18], сцинтилляционный детектор в соляной шахте г. Артемовска (Украина) [18], а также водно-черенковские детекторы Kamiokande II (Япония) [19] и IMB (США) [20], причем два последних были специально созданы для поиска распадов протонов, но оказались способны регистрировать коллапсные нейтрино.

Теоретические модели поздних стадий эволюции массивных звезд до 1987 г. представляли собой одномерные расчеты сферически-симметричных немагнитных невращающихся конфигураций. При этом были сформулированы основные характеристики нейтринного излучения, ожидаемые при гравитационном коллапсе ядра массивной звезды и охлаждении новорожденной нейтронной звезды: полная энергия нейтринного излучения — $(2-5) \cdot 10^{53}$ эрг, средняя энергия нейтрино электронного типа — 8–12 МэВ, доля в полном излучении от электронных антинейтрино — 0.16–0.25, длительность всплеска — 10–20 с [21–24].

Регистрация 23 февраля 1987 года нейтринного сигнала от сверхновой типа II, вспыхнувшей в соседней галактике Большое Магелланово Облако, тремя установками Kamiokande II [25], IMB [26] и Баксанским телескопом [27] впервые подтвердила основные представления общей теоретической картины гравитационного коллапса с образованием нейтронной звезды, но при этом поставила много вопросов, и пе-

ред теорией и перед экспериментом.

Наблюдения за расширяющейся оболочкой остатка сверхновой показывают, что взрыв был несимметричным, с необычным видом остатка, с перемешиванием вещества [28, 29], с необнаруженным до сих пор пульсаром [30] или с кандидатом на пульсар с необычными свойствами [31, 32]. Все это привело к очень бурному развитию теоретического моделирования процессов внутри звезд, продвижению в понимании многих процессов в коллапсе ядра и в оболочке звезды, к усложнению картины коллапса [33–35], особенно при включении в расчеты вращения и сильных магнитных полей [36]. Однако пока еще не на все вопросы найдены ответы, в частности, остаются проблемы механизма сброса звездной оболочки, а также, что очень важно для экспериментаторов, полной временной структуры нейтринной светимости. Помимо этого обсуждается влияние пока не включенных в расчеты общерелятивистских эффектов [37] и слабого магнетизма [38], которые могут привести к более высокой светимости нейтринного излучения, а также возможного наличия у нейтрино ненулевой массы, которая привела бы к изменению их спектров [39].

Развитие методов анализа экспериментальных данных с малой статистикой и применение этих методов к изучению нейтринных сигналов, зарегистрированных 23 февраля 1987 г. тремя установками, позволило авторам также сделать вывод о более сложной временной структуре нейтринного излучения [40].

Важнейший урок, который был извлечен из истории экспериментального наблюдения нейтринного сигнала от SN 1987A, состоит в том, что установки, способные регистрировать коллапсные нейтрино, улучшили и отладили свои физические характеристики и объединяются в единую сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System) для образования триггера совпадений их сигналов (когда они появятся), который оповестит обсерватории других видов излучений о начале наблюдений за сверхновой [41].

Кроме того, стало очевидно, что для надежной и полной регистрации ожидаемого галактического нейтринного всплеска требуются детекторы еще большей массы с чувствительностью ко всем типам нейтрино. Так появились нейтринные детекторы третьего поколения, характерная масса мишени которых составляет около или свыше 1 кт, с низкими энергетическими порогами регистрации событий — около 5 МэВ. Самые мощные из них в случае появления галактического всплеска коллапсных нейтрино регистрируют свыше 8500 нейтрино всех типов

(SuperKamiokande, масса мишени — 32 кт воды) [42], около 1000 нейтрино всех типов в детекторе SNO с тяжелой и легкой водой (полная масса мишени — 2.4 кт) [43] и свыше 350 нейтрино всех типов в сцинтилляционном детекторе LVD [44]. Помимо уже довольно давно работающих сцинтилляционных установок LSD [18] и MACRO [45], которые также регистрируют около 100 и более галактических нейтрино каждая, в сеть наблюдений за коллапсными нейтрино в 1997 г. включилась установка Amanda, расположенная внутри льда на Южном полюсе в Антарктиде [46]. И еще целый ряд новых детекторов готовится к запуску или разрабатываются [47].

Таким образом, особенное значение приобретает столь ожидаемое явление сверхновой типа II или, возможно, типа SN Ib/c [48] в нашей Галактике, к регистрации которого подготовились, по крайней мере, семь нейтринных детекторов, одним из которых является Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп.

2. БАКСАНСКИЙ ПОДЗЕМНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп является прибором широкого профиля научных исследований. Одним из экспериментов с его использованием и стал поиск нейтринных всплесков от вспышек сверхновых звезд. Телескоп расположен в горах Северного Кавказа, у подножья г. Эльбрус, в тоннеле под горой Андырчи на глубине 850 м.в.э. Общий вид телескопа схематически показан на рис. 1, а установка подробно описана в работе [49]. В данной

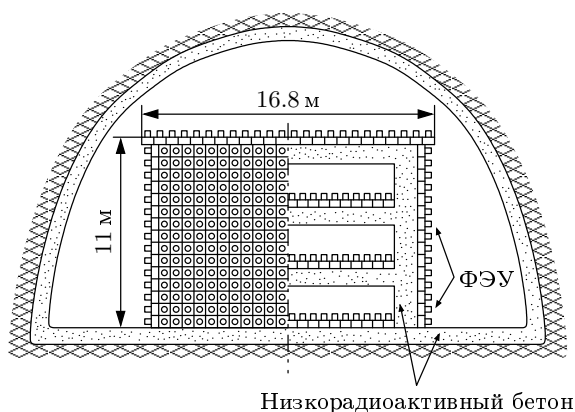
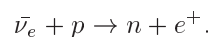


Рис. 1. Схематический вид Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа

работе коротко напомним его основные характеристики.

Телескоп состоит из 3150 стандартных детекторов, которые образуют замкнутую конфигурацию с двумя внутренними слоями, составляющими в результате четыре вертикальных и четыре горизонтальных плоскости. Каждый стандартный детектор имеет размеры $70 \times 70 \times 30 \text{ см}^3$, наполнен органическим сцинтилятором C_nH_{2n+2} , ($n \approx 9$) и просматривается одним фотоумножителем с диаметром фотокатода 15 см. Полная масса мишени равна 330 т, масса мишени, заключенная в трех внутренних (начиная с нижней горизонтальной плоскости) слоях равна 130 т (1200 стандартных детекторов). Энергетический порог регистрации заряженных частиц составляет 8 МэВ для горизонтальных плоскостей и 10 МэВ для вертикальных. Энергетической привязкой измерений стандартного детектора является амплитуда наиболее вероятного энерговыделения при прохождении через него мюонов космических лучей (50 МэВ). Соответственно, величины порогов детекторов выставляются в долях амплитуды этого энерговыделения.

При взрыве сверхновой типа II ожидается мощная вспышка нейтрино всех сортов, но на Баксанском телескопе подавляющая часть зарегистрированных событий будет образована в реакциях обратного бета-распада



Вклад в полный зарегистрированный сигнал от остальных типов нейтрино будет невелик [49].

Поскольку телескоп расположен на относительно небольшой глубине, для значительного понижения фона от пересекающих установку мюонов космических лучей в данном эксперименте применен специальный метод отбора событий, основанный на огромной разнице энергий мюонов и образованных от коллапсных электронных антинейтрино позитронов. Мюоны, проходя через телескоп, оставляют трек из нескольких сработавших детекторов, в то время как образовавшиеся в каком-либо детекторе позитроны практически целиком в нем же и потеряют всю свою энергию. Таким образом, основной критерий отбора событий в данной программе — «один и только один детектор из 3150» — означает отбор одиночных срабатываний стандартных детекторов телескопа, т. е. по отметчику данной программы в память on-line-ЭВМ и затем на носитель записывались данные о состоянии всех устройств установки на момент

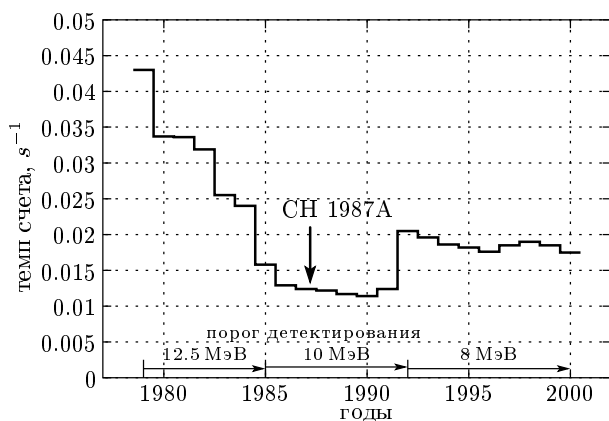


Рис. 2. Временной ход среднегодового темпа счета одиночных срабатываний 1200 детекторов трех внутренних плоскостей телескопа (масса мишени 130 т). Показаны энергетические пороги регистрации частиц в разные годы. Стрелкой указана вспышка сверхновой SN 1987A 23 февраля 1987 г.

срабатывания в нем одного и только одного детектора.

В результате нейтринный сигнал от взрыва сверхновой на установке будет выглядеть как серия событий из одиночно сработавших детекторов в течение длительности нейтринного всплеска.

Темп счета от одиночных фоновых событий, статистические сгустки которых могут имитировать ожидаемый сигнал, в начале эксперимента на телескопе не был постоянным во времени, потому что непрерывно выполнялись работы по устранению того или иного источника фона, что приводило к постоянному снижению полного темпа счета одиночных событий. На рис. 2 показан временной ход среднегодовой частоты одиночных отсчетов детекторов, просуммированной по трем внутренним плоскостям (нижняя и две следующие, рис. 1), в которых содержится 130 т сцинтиллятора в 1200 детекторах. Данные с этой части установки, т. е. полное число одиночных срабатываний внутри заданного временного интервала, выполняют роль триггера в off-line-обработке поступающей с телескопа информации: в случае обнаружения необычного сигнала в данной части телескопа (т. е. число событий больше заданного) в off-line-анализ поступала информация со всей установки.

На рис. 2 указаны также интервалы времени, когда на телескопе понижался энергетический порог регистрации частиц. Как видно из этого рисунка, фон после 1985 г., когда были завершены основные работы по устранению наиболее сильных по-

мех, оставался практически постоянным в пределах определенного энергетического порога регистрации. Небольшое дальнейшее его понижение обусловлено непрерывно продолжавшимися работами по улучшению физических параметров установки.

На том же рисунке стрелкой показано время, когда произошла вспышка сверхновой SN 1987A.

Если в центре Галактики произойдет коллапс ядра массивной звезды с образованием нейтронной звезды, то на телескопе можно ожидать свыше 50 событий от взаимодействий электронных антинейтрино в 130 т-сцинтилляторе или свыше 100 событий во всем телескопе. Текущая информация обрабатывается методом скользящего от события к событию временного интервала длительностью 20 с с пороговым суммарным числом событий в сигнале, равным 5. При нахождении сигнала с заданным или более числом событий анализируется не 20, а 40 с информации с полными данными о каждом событии (координаты на телескопе, время, энергетическая амплитуда, количество срабатываний входящих в сигнал детекторов за текущие сутки, длительность импульса с фотоумножителя). Сигнал считался серьезным кандидатом на регистрацию коллапса, если в течение 20 с в массе мишени 130 т-телескопа (внутренние слои) наблюдалось бы 9 и более событий. За все время наблюдения на телескопе не было обнаружено ни одного такого сигнала.

Телескоп был построен в конце 1977 г., но физические эксперименты начались позже, поскольку всем нам требовалось время, чтобы разобраться в характере созданного прибора. По программе поиска коллапсных нейтрино (программа так и называлась — «Коллапс») установка работает практически непрерывно с середины 1980 г. Исключение составляет один ремонтный день в неделю, когда на установке проводятся необходимые ремонтные и профилактические работы, а также чрезвычайные случаи сезонных отключений электроэнергии или замены on-line-ЭВМ, так что эффективность набора времени слежения за Галактикой составляет 90 % от календарного.

Таким образом, накапливалась информация с телескопа по программе поиска коллапсных нейтрино, но ожидаемого нейтринного сигнала не было. История обнаружения в данных Баксанского телескопа нейтринного сигнала от сверхновой SN 1987A и связанные с этим драматические поиски причины неожиданной тогда погрешности часов уже давно опубликованы [28, 49]. С февраля 1988 г. работают новые часы на автономном питании, обеспечивая точность определения абсолютного времени 1 мс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Когда начинался Баксанский эксперимент по поиску коллапсных нейтрино, очень важным был вопрос о частоте ожидаемых сигналов. При определении длительности временного промежутка между явлениями, в которых ожидаются образование сверхновых, нейтронных звезд или черных дыр, в литературе использованы данные наблюдений исторических сверхновых в нашей Галактике, сверхновых в других галактиках, звездной статистики, статистики пульсаров и даже термолюминесценция образцов донных отложений.

В то время самой оптимистической оценкой такого интервала был анализ по данным наблюдений 149 пульсаров, который прогнозировал рождение одного пульсара приблизительно каждые 6 лет [50]. И хотя более позднее переисследование частоты рождения пульсаров давало уже другую оценку длины этого интервала, равную примерно 30 годам [51], тем не менее в начале нашего эксперимента мы очень надеялись на положительный результат, тем более что последнее явление сверхновой наблюдали на Земле 400 лет назад.

Другой оптимистический результат был получен из исследований звездной статистики, когда при вычислении полной частоты смертей звезд с конечным образованием пульсаров, черных дыр, сверхновых и любых других возможностей, исключая белые карлики, была получена величина интервала между такими явлениями 9_{-3}^{+2} лет [52]. Оценки частоты появления в Галактике сверхновых типа II, предлагаемые другими авторами, дают большой разброс в предсказаниях ее среднего значения, что, видимо, связано с большим количеством используемых допущений и приближений, например, о светимости Галактики [53], о ее морфологическом типе [54], о начальной функции масс [55], о доле регистрируемых пульсаров [56] и многое другое [57–60].

В дальнейшем стали исследовать связи между статистикой сверхновых и эволюцией галактик и приходиться к выводу, что частоты появления сверхновых являются функциями космического времени [61, 62]. Кроме того, изучение световых кривых сверхновых SN Ib/c показало их некоторое сходство со световыми кривыми сверхновых типа II [48], позволило сделать вывод о массивности звезды-предшественника SN Ib/c и предположить, что при их взрывах также могут образовываться нейтронные звезды.

Выполненные в последние годы оценки частоты появления сверхновых из звездной статистики по-

казывают, что в нашей Галактике можно ожидать следующее количество таких явлений [63, 64]: 2_{-1}^{+1} для SN Ib/c и 12_{-6}^{+6} для SN II в 1000 лет. Правда, совсем недавняя работа тех же авторов дает улучшенное значение этих галактических величин [65]: $1.5_{-1.0}^{+1.0}$ для SN II + Ib/c за 100 лет или около одной сверхновой с образованием нейтронной звезды каждые 50 лет. Последнее значение уже почти совпадает с более ранней оценкой длительности этого интервала, найденной равной 10–50 лет [66], если учесть упомянутые выше возможные источники расхождений. В целом, очевидно, по данным звездной статистики искомая частота лежит в интервале 10^{-2} – $3 \cdot 10^{-2}$ в год или со средней оценкой интервала между сверхновыми 47_{-12}^{+12} лет [67].

Из статистики пульсаров в последние годы получено, что они образуются в среднем один каждые 60–330 лет [68], хотя по-прежнему остается очень много неясного в том, в каких системах рождаются пульсары того или иного класса [69, 70].

Таким образом, из оценок частоты взрывов сверхновых и образования пульсаров, выполненных в последние годы, следует сделать вывод, что явление это очень редкое, а разброс оценок очень велик. Следовательно, тем необходимее становится получение результата от прямых наблюдений данных явлений нейтринными детекторами.

Баксанский телескоп ведет наблюдение за Галактикой с 30 июня 1980 г. Благодаря всем выполненным на нем работам по повышению чувствительности к ожидаемому всплеску коллапсных нейтрино, телескоп «просматривает» всю Галактику [49]. Календарное время эксперимента «Коллапс» составляет 19.75 лет, при этом полное «живое» время наблюдения составляет 17.6 лет. За это время на установке не было зарегистрировано ни одного сигнала, за исключением сверхновой 1987А Большого Магелланового Облака, который можно было бы достоверно интерпретировать как всплеск галактических электронных антинейтрино.

Из времени наблюдения можно получить верхнее ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в Галактике. Если среднюю частоту коллапсов обозначить как $f_{collapse}$ и допустить, что, во-первых, их частота (как редких событий) подчиняется закону Пуассона и, во-вторых, для получения результата на уровне достоверности 90 % допустить вероятность пропуска сигнала, равную менее 10 %, то при полном «живом» времени наблюдения $T = 17.6$ лет получаем неравенство

$$\exp(-f_{collapse}T) < 0.1,$$

решение которого относительно $f_{collapse}$ дает следующее ограничение на частоту коллапсов в Галактике:

$$f_{collapse}(90\% \text{ уровень дост.}) < 0.13 \text{ год}^{-1},$$

откуда средний временной интервал $\Delta T_{collapse}$ между ожидаемыми галактическими явлениями превышает

$$\Delta T_{collapse}(90\% \text{ уровень дост.}) > 7.7 \text{ лет.}$$

Таким образом, пройдены первые двадцать лет по дороге к регистрации первого нейтринного всплеска в нашей Галактике, хотя этот путь может оказаться только малой частью необходимого.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить всех сотрудников Баксанской нейтринной обсерватории, как работающих, так и покинувших ее, за долгую и плодотворную совместную работу в данном эксперименте. Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект 00-02-17778).

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Pauli, *Noyaux Atomiques, VI Conseil de Physique Solvay* (1933), Paris (1934), p. 324.
2. F. Reines and C. L. Cowan, *Phys. Rev.* **90**, 492 (1953); **113**, 273 (1959).
3. K. Lande, B. Cleveland, T. Daily et al., *AIP Conf. Proc.* **243**, 1122 (1992).
4. V. N. Gavrin, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **91**, 36 (2001).
5. W. Hampel, *Phys. Lett. B* **447**, 127 (1999).
6. V. Baade and F. Zwicky, *Phys. Rev.* **45**, 138 (1934).
7. Я. Б. Зельдович, О. Х. Гуссейнов, *ДАН* **162**, 791 (1965).
8. G. V. Domogatsky and G. T. Zatsepin, in *Proc. 9th ICRC*, London, UK (1965), Vol. 2, p. 1030.
9. S. A. Colgate and R. H. White, *Astrophys. J.* **143**, 626 (1966).
10. W. J. Cocke, H. J. Disney, and D. J. Taylor, *Nature* **221**, 525 (1969).
11. M. I. Large, A. E. Vaughan, and B. Y. Mills, *Nature* **220**, 340 (1968).
12. G. G. Pavlov, D. Sanwal, G. P. Garmire, and V. E. Zavlin, in *ASP Conf. Series* (2002); E-print archives astro-ph/0112322.
13. V. M. Kaspi and D. J. Helfand, in *ASP Conf. Series* (2002), E-print archives astro-ph/0201183.
14. K. Lande, G. Bozoki, W. Frati et al., *Nature* **251**, 485 (1974).
15. M. Deabyne, W. Frati, K. Lande et al., *Proc 16th ICRC*, Kyoto, Japan (1979), Vol. 13, p. 325.
16. G. Bozoki, in *Proc. 13th ICRC*, Denver, USA (1973), Vol. 3, p. 1994.
17. E. N. Alexeyev, L. N. Alexeyeva, and A. E. Chudakov, in *Proc. 16th ICRC*, Kyoto, Japan (1979), Vol. 10, p. 282.
18. A. E. Chudakov and O. G. Ryazhskaya, in *Proc. Int. Conf. «Neutrino 77»*, Baksan Valley, USSR, Moscow, Nauka (1978), Vol. 1, p. 155.
19. K. Arisaka, K. Hirata, T. Kajita et al., *Phys. Soc. Japan* **54**, 3213 (1985).
20. R. M. Bionta, G. Blewitt, G. B. Bratton et al., *Phys. Rev. Lett.* **51**, 27 (1983).
21. В. С. Имшенник, Д. К. Надежин, *Итоги науки и техники, серия: Астрономия* **21**, 63 (1982).
22. B. Bowers and J. R. Wilson, *Astrophys. J.* **263**, 366 (1982).
23. E. E. Salpeter and S. L. Shapiro, *Astrophys. J.* **251**, 311 (1981).
24. A. Burrows and T. L. Mazurek, *Nature* **301**, 315 (1983).
25. K. S. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba et al., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1490 (1987).
26. R. M. Bonita, G. Blewitt, C. B. Bratton et al., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1494 (1987).
27. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко и др., *Письма в ЖЭТФ* **45**, 461 (1987); E. N. Alexeyev, L. N. Alexeyeva, I. V. Krivosheina et al., *Phys. Lett. B* **205**, 209 (1988).
28. N. Panagia, *Invited Lecture at the Int. Summer School «Experimental Physics of Gravitational Waves»*, Urbino (Italy) ed. by G. Calamai, M. Mazzoni, R. Stanga, and F. Vettrano, World Scientific, Singapore (1999); E-print archives astro-ph/0003083.
29. A. Fassia, W. P. S. Meikle, and J. Spiromilio, submitted to *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2002); E-print archives astro-ph/0112516.
30. S. Park, D. N. Burrows, G. P. Garmire et al., submitted to *Astrophys. J.* (2002); E-print archives astro-ph/0111116.

31. J. Middleditch, J. A. Kristian, W. E. Kunkel et al., *New Astron.* **5**, 243 (2000).
32. S. Nagataki and K. Sato, *Prog. Theor. Phys.* **105**, 429 (2001).
33. H.-T. Janka, *Astron. Astrophys.* **368**, 527 (2001).
34. H.-T. Janka, K. Kifonidis, and M. Rampp, *Lect. Notes Phys.* **578**, 333 (2001).
35. В. М. Суслин, С. Д. Устюгов, В. М. Чечеткин, Г. П. Чуркина, *Астрон. Ж.* **78**, 281 (2001).
36. J. C. Wheeler, D. L. Meier, and J. R. Wilson, E-print archives astro-ph/0112020.
37. S. W. Bruenn, K. R. DeNisco, and A. Mezzacappa, E-print archives astro-ph/0101400.
38. C. J. Horowitz, E-print archives astro-ph/0109209, *Phys. Rev. D* **65**, 043001 (2002).
39. K. Takahashi, M. Watanabe, K. Sato, and T. Totani, *Phys. Rev. D* **64**, 093004 (2001).
40. Th. J. Loredo and D. Q. Lamb, E-print archives astro-ph/0107260.
41. A. Hahig, in *Proc. 10th Annual October Astrophys. Conf. «College Park 1999, Cosmic explosions»*, Maryland (1999), p. 169.
42. J. F. Beacom and P. Vogel, *Phys. Rev. D* **58**, 053010 (1998).
43. C. J. Virtue, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **100**, 326 (2001).
44. M. Aglietta, *Nuovo Cim. A* **105**, 1793 (1992).
45. S. Ahlen, *Astropart. Phys.* **1**, 11 (1992).
46. J. Ahrens, X. Bai, G. Barouch et al., *Astropart. Phys.* **16**, 345 (2002).
47. K. Scholberg, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **91**, 331 (2000).
48. A. V. Filippenko, in *Cosmic Explosions*, ed. by S. Holt and W. W. Zhang, New York: American Institute of Physics (2000); E-print archives astro-ph/0002264.
49. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко и др., *ЖЭТФ* **104**, 289 (1993).
50. J. H. Taylor and R. N. Manchester, *Astrophys. J.* **215**, 885 (1977).
51. V. Trimble, *Rev. Mod. Phys.* **54**, 1183 (1982).
52. J. N. Bahcall and T. Piran, *Astrophys. J. Lett.* **267**, L77 (1983).
53. S. van den Bergh, R. D. McClure, and R. Evans, *Astrophys. J.* **323**, 44 (1987).
54. E. Cappellaro and M. Turatto, *Astron. Astrophys.* **190**, 10 (1988).
55. O. G. Richter and M. Rosa, *Astron. Astrophys.* **206**, 219 (1988).
56. R. Narayan and K. J. Schaudt, *Astrophys. J. Lett.* **325**, L43 (1988).
57. S. van den Bergh, *Astron. Astrophys.* **231**, L2 (1990).
58. D. Battacharya, *J. Astrophys. Astr.* **11**, 125 (1990).
59. B. N. G. Guthrie, *Astron. Astrophys.* **234**, 84 (1990).
60. G. A. Tammann and A. Schroeder, *Astron. Astrophys.* **236**, 149 (1990).
61. P. Madau, in *The Young Universe: Galaxy Formation and Evolution at Intermediate and High Redshift*, ed. by S. D'Odorico, A. Fontana, and E. Giallongo, *PASP* (1998), E-print archives astro-ph/9801005.
62. P. Madau, M. D. Valle, and N. Panagia, submitted to *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* (2002); E-print archives astro-ph/9803284.
63. E. Cappellaro, M. Turatto, D. Yu. Tsvetkov et al., *Astron. Astrophys.* **322**, 431 (1997).
64. E. Cappellaro, R. Evans, and M. Turatto, *Astron. Astrophys.* **351**, 459 (1999).
65. E. Cappellaro, *Invited Rev. at the Meeting: The influence of binaries on stellar population studies*, ed. by D. Vanbeveren, Brussels (2000); E-print archives astro-ph/0012455.
66. S. van den Bergh and G. A. Tammann, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.* **29**, 363 (1991).
67. G. A. Tammann, W. Loeffler, and A. Schroeder, *Astrophys. J. Suppl.* **92**, 487 (1994).
68. A. G. Lyne, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **295**, 743 (1998).
69. S. F. Portgies Zwart and E. P. J. van den Heuvel, *New Astron.* **4**, 355 (1999).
70. D. R. Lorimer, in *Proc. NATO ASI «The Neutron Star-Black Hole Connection»*, E-print archives astro-ph/9911519.