

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

524.35.352

СВЕРХНОВАЯ 1987А: ОБЗОР*)*Д. Р. О. Моррисон*

Объясняются механизмы взрывов звезд в различных типах сверхновых. Представлены удивительные результаты наблюдений Сверхновой 1987А. Приводятся возможные объяснения этих результатов. Обсуждается, какой объект породила эта Сверхновая — нейтронную звезду или черную дыру. Рассмотрены результаты спекл-интерферометрии, обнаружившей таинственный близкий объект, который, возможно, движется лишь вдвое медленнее света. Сверхновая 1987А дала много результатов по нейтрино, интересных для физики частиц. Рассмотрены возможные перспективы работы по сверхновым, а также с детекторами нейтрино и гравитационных волн. Обзор написан специалистом по физике частиц для таких же специалистов.

1. СВЕРХНОВЫЕ ВООБЩЕ И ЧЕМ ИНТЕРЕСНА СН 1987А

Сверхновые — это звезды, которые внезапно взрываются и на несколько месяцев становятся очень яркими, а затем постепенно угасают. Вблизи нас они редки: последняя вспышка, наблюдавшаяся невооруженным глазом, перед Сверхновой 1987А, была в 1604 г. еще до изобретения телескопа; она называется Сверхновой Кеплера.

Пожалуй, лучше всего известна сверхновая, породившая Крабовидную туманность. Эта туманность долго считалась просто облаком газа, заслоняющим далекие звезды, т.е. помехой для серьезной астрономии. Затем было обнаружено расширение этого облака. Взяв скорость расширения 900 км/с, Хаббл пришел к выводу, что здесь примерно 900 лет назад произошел взрыв. Тщательные наблюдения китайских астрономов, зафиксированные в хрониках, показали, что на месте Крабовидной туманности в 1054 г. внезапно появилась «звезда-гостья» (рис. 1), она была очень яркой и наблюдалась даже днем, но постепенно ослабела. В 1006 г. вспыхивала еще более яркая «звезда-гостья», также описанная астрономами Востока **).

После 1604 г. открыто более 600 сверхновых, главным образом, в последнее время в связи с ростом интереса к этим объектам и усовершенство-

*) Morrison D. R. O. Review of Supernova 1987A: Preprint CERN, 26 January, 1988. — Основано на приглашенном обзорном докладе на 18-й конференции по много-частичной динамике. Ташкент, сентябрь 1987 г. — Перевод С. И. Блинникова.

Дуглас Р. О. Моррисон работает в ЦЕРНе, Женева, Швейцария.

**) При том, что СН 1006 и 1054 были описаны восточными астрономами, удивительно молчание о них на Западе, за исключением записи в книге монастыря Сен-Галлен под 1006 г. Это может объясняться религиозным догматом о неизменности небес. В ту эпоху религиозные страсти были накалены до предела: как раз после вспышки СН 1054 произошла схизма — разделение Римской и Византийской церковью. В такое время опасно противопоставлять факт официальной доктрине, особенно, если факт постепенно исчезает из поля зрения.

ванием инструментов, но все эти сверхновые далекие и слабые. Сверхновая 1987А (обозначается СН 1987А) близка — всего 150 000 световых лет от нас. Она вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке (БМО) — молодой неправильной галактике, богатой областями бурного звездообразования, которая гораздо ближе к нам, чем гигантская галактика в Андромеде — М31, отстоящая от нас на 2 200 000 световых лет.

СН 1987А чрезвычайно интересна по многим причинам. Здесь лишь во второй раз удалось наблюдать предсверхновую, т.е. звезду, породившую сверхновую, причем эта предсверхновая, вопреки ожиданиям, не была красным сверхгигантом.



Рис. 1. Китайская карта звездного неба.

Кружком отмечена «звезда-гостья» 1054 г. в том месте, где сейчас находится Крабовидная туманность

Сама вспышка оказалась гораздо слабей, чем ожидали по предыдущим сверхновым. Астрономы относят сверхновые либо к типу I (СНI), либо к типу II (СНII), а СН 1987А не вписывается ни в один из этих типов. Отметим здесь, что астрономы вынуждены классифицировать объекты по их внешним проявлениям, а физики, изучающие частицы, обычно могут быстро их переклассифицировать на основе фундаментальной физики.

До вспышки СН 1987А специалисты в теории звезд разработали очень подробные модели механизмов взрыва СНI и СНII. Предсказывалось, что СНII должны породить нейтронные звезды и излучать нейтрино из ядра. Однако главная трудность в работе астрофизиков — то, что они могут наблюдать только поверхность звезды, ее фотосферу, а не центральное ядро, скрытое непроницаемыми слоями вещества. Проблемы здесь почти те же, что у воображаемого наблюдателя, изучающего Землю с другой звезды, который измеряет среднюю температуру поверхности, замечает, что большая часть поверхности покрыта водой, наблюдает стационарные и движущиеся белые пятна, а потом на основе теории заключает, что ядро Земли в основном состоит из железа! Смелая экстраполяция.

Наблюдение нейтрино от СН 1987А — это огромный шаг вперед: впервые в момент взрыва получена некоторая прямая информация о ядре звезды, позволяющая подробно численно проверить теорию сверхновых.

Однако, хотя согласие теории и наблюдений впечатляет, не исключено, что наблюдались не одна, а две нейтронные вспышки. Встал вопрос: а не образовалась ли при этом черная дыра?

Еще одна особенность СН 1987А — это неожиданное обнаружение вблизи нее загадочного яркого пятна, открытого методом спекл-интерферометрии, которому, правда, не все доверяют. Возникло несколько гипотез о природе этого объекта.

Новые методы, позволяющие изучать не только видимый свет, но и инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские, гамма-лучи, и даже нейтрино, привели в последние годы к революции в астрономии. Однако надо помнить о ее отличии от физики частиц: если наша аппаратура не готова, или

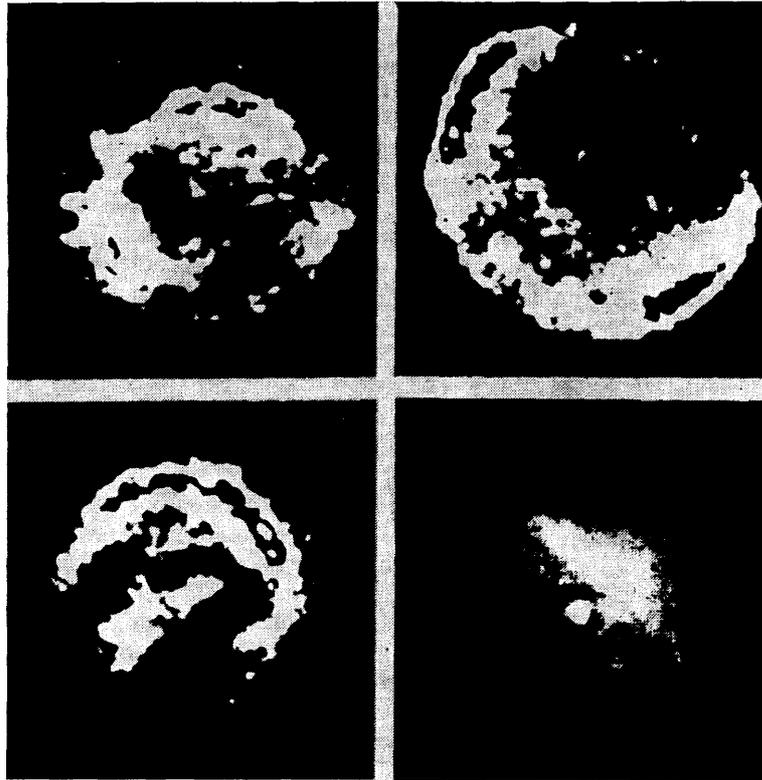


Рис. 2. Рентгеновские изображения Кассиопеи А, ОСН 1006, остатка Сверхновой Кеплера 1604 г. и Крабовидной туманности (из: Сьюард Ф. Д. и др. // В мире науки. 1985. № 10)

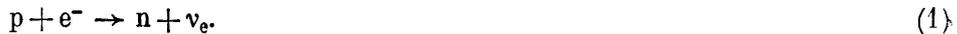
статистика слишком мала, мы можем повторить наш эксперимент, запросив дополнительное время на ускорителе, тогда как астроному, изучающему близкие сверхновые, в такой же ситуации придется ждать сотню лет!

На рис. 2 показаны содержащие очень богатую информацию рентгеновские изображения нескольких остатков сверхновых в нашей Галактике, полученных орбитальной обсерваторией «Эйнштейн». Видны почти сферические слои вещества, разлетающегося вследствие взрыва сверхновой. В трех случаях — «Китайской» СН 1006, в Кассиопее А 1680 г. и СН 1604 Кеплера — нет уярчения в центре, а на рентгеновском изображении Крабовидной туманности от СН 1054 ярко выделяется пятно, создаваемое нейтронной звездой. Нейтронная звезда быстро вращается, в ее очень сильном магнитном поле порядка 10^{12} Гс электроны излучают гамма-кванты, деградирующие при взаимодействии с веществом в наблюдаемое рентгеновское излучение.

В среднем, примерно на каждые 5 изученных сверхновых приходится одна с проявлениями нейтронной звезды. Важный вопрос — есть ли нейтрон-

ная звезда в SN 1987A. Рентгеновский поток от остатка SN 1006 сейчас составляет приблизительно 6 милликравов (замечательная единица — одна тысячная потока Крабовидной туманности), а первые измерения SN 1987A не обнаружили рентгеновского потока на уровне 4 милликравов. Однако позднее рентген был открыт.

Яркое пятно в центре Крабовидной туманности — это пульсар. Он 30 раз в секунду испускает импульс радиоволн с очень строгой периодичностью. Этот феномен быстро отождествили с нейтронной звездой. Она образуется, когда обычная массивная звезда достигает таких плотностей, когда энергия электронов столь высока (при любых, даже нулевых, температурах), что им выгодно сливаться с протонами. Таким образом, гравитационная и слабая силы превращают их в нейтрон и электронное нейтрино:



Из этих нейтронов, связанных гравитацией, и образуется нейтронная звезда. Излучается импульс электронных нейтрино.

О SN 1987A написано уже много статей — говорят, что редакция «Physical Review Letters» получила только в марте и апреле 1987 г. свыше сотни работ, — в несколько раз больше числа нейтринных событий. Мы постарались упомянуть значительное число работ, но просим прощения у тех, кто не упомянут.

2. МНОГОСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ

Считается, что тип вспышки сверхновой определяется массой предсверхновой. Мы рассмотрим строение массивной звезды, например $20 M_{\odot}$, т.е. 20 масс Солнца.

Сегмент массивной звезды схематично изображен на рис. 3, где представлена (согласно расчетам поздних стадий эволюции) многослойная модель, отдельные слои, или оболочки

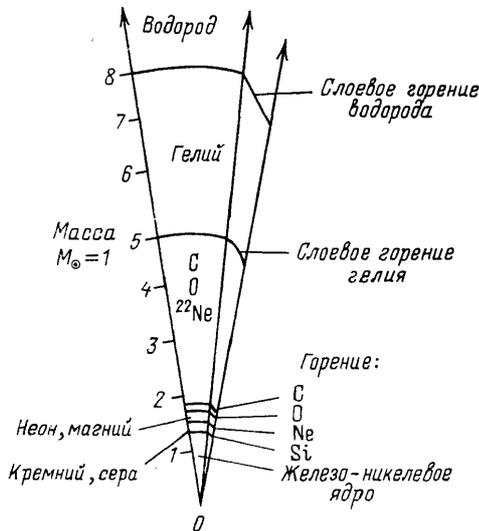


Рис. 3. Сегмент звезды 20 солнечных масс.

Показано многослойное строение с горением на границах слоев с различными элементами. Единицей масштаба служит солнечная масса (на основе рисунка из [65])

которой вложены друг в друга как в гигантской луковице, причем на границе каждой оболочки из более легких элементов синтезируются более тяжелые. Плотность и температура растут к центру. Обратите внимание, что в качестве радиальной координаты на рис. 3 используется не расстояние, а масса внутри слоя в единицах солнечной массы, так как радиус ядра ($\sim 10^3$ км) меньше одной стотысячной радиуса звезды ($\sim 10^8$ км для красного сверхгиганта).

Для пояснения этой модели рассмотрим историю жизни звезды $20 M_{\odot}$.

Сначала звезда представляет собой громадное плотное облако водорода. Силы гравитации увеличивают плотность (и температуру), и начинается цепочка термоядерных реакций, превращающих водород в центре звезды в гелий. Во время горения водорода в центре плотность и температура там почти постоянны. Горение гелия затруднено, так как слияние двух альфа-частиц дает неустойчивый бериллий-8, который тут же распадается обратно (${}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}$). По мере истощения водорода температура и плотность в центре начинают нарастать, а внешний радиус увеличивается и средняя плот-

ность в центре начинает нарастать, а внешний радиус увеличивается и средняя плот-

ность звезды падает. Когда водорода в центре совсем не остается, плотность и температура там так поднимаются, что гелий в ядре начинает новую цепочку термоядерных реакций, перегорая в основном в углерод (в реакции $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$), кислород и неон, а сжатие останавливается. Затем все повторяется: гелий полностью выгорает, гравитация снова повышает плотность и температуру в центре, а наружные слои расширяются еще больше. Рост температуры в центре снова приводит к горению с образованием кремния в ядре, в результате горения которого образуется железо-никелевое ядро, и цепочка термоядерных превращений завершается. Следующий этап — это взрыв сверхновой.

3. МЕХАНИЗМ ВЗРЫВА СВЕРХНОВЫХ I ТИПА

Картина смерти звезды зависит в основном от ее массы. Критической является масса восьми солнечных (при этом промежуток $8 - 10 M_{\odot}$ особый).

При массе, меньшей $8 M_{\odot}$, звезда выгорает (но не до железа), а затем медленно остывает. Водород, а также, возможно, часть гелия из внешних слоев выметается звездным ветром. Остается горячая, медленно остывающая звезда. Ее называют «белым карликом», поскольку после потери внешних слоев ее радиус относительно мал.

Наше Солнце относится к такому типу звезд. Около 4 миллиардов лет назад облако газообразного водорода сжалось в звезду. По мере перегорания этого водорода в гелий наше Солнце будет расширяться. Примерно через 5 миллиардов лет его радиус достигнет максимума, оно станет красным гигантом и его поверхность, возможно, окажется рядом с нашей планетой. Затем оно начнет остывать, сжиматься, потеряет остатки водорода и превратится в белый карлик. Им оно навеки и останется. На небе полным-полно белых карликов.

Однако многие звезды с массой, меньшей $8 M_{\odot}$, заканчивают свою жизнь не так. Дело в том, что вопреки нашей естественной склонности считать свое Солнце типичным и полагать, что для звезды нормально быть одиночной, у большинства звезд есть звезды-спутники.

Надежные оценки сделать нелегко, но $\sim 15\%$ звезд являются одиночными, $\sim 50\%$ — двойными, а остальные входят в еще более сложные кратные системы. Проблема в том, что кратную систему трудно распознать, если у одной из ее звезд нет особенностей и если они не близки по размерам и слишком тесно расположены.

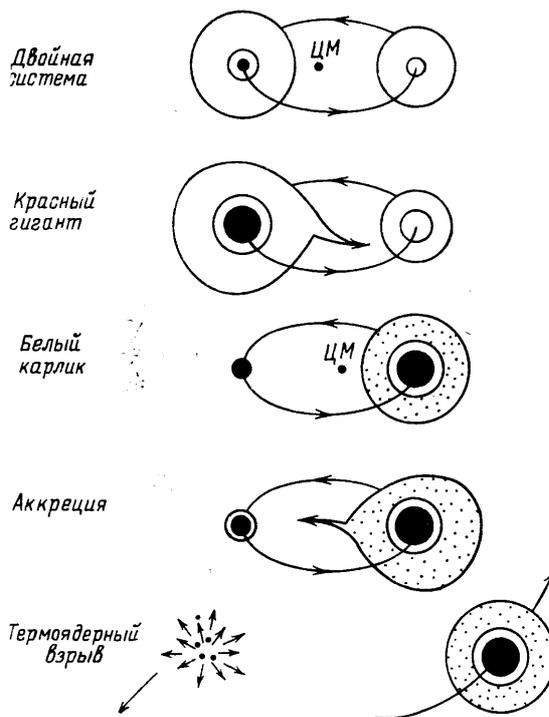


Рис. 4. Пять стадий на пути к взрыву сверхновой I типа в двойной звездной системе (на основе рисунка из ⁶⁵)

Рассмотрим случай двух звезд в двойной системе. Одна, с массой, меньшей $8 M_{\odot}$, выгорает в белый карлик — маленькую компактную звезду, ядро которой может содержать С, N, O, Ne и Si, но не железо или никель. Она притягивает вещество со спутника; это вещество будет оседать на белом карлике, увеличивая его массу до тех пор, пока она не достигнет критического значения $\sim 1,4 M_{\odot}$, после чего звезда сожмется за счет гравитации. Энергия, порожденная гравитационным сжатием, поднимет температуру настолько, что начнутся термоядерные реакции и вся звезда взорвется. Это — сверхновая I типа, она изображена на рис. 4.

Поскольку в основе сверхновых I типа лежит один механизм, все они похожи друг на друга и характеризуются отсутствием линий водорода в наблюдаемом спектре вследствие его выметания.

4. МЕХАНИЗМ ВЗРЫВА СВЕРХНОВЫХ II ТИПА

Рассмотрим массивную звезду более $\sim 8 M_{\odot}$. Когда она достигает показанной на рис. 3 стадии, на которой кремний, сгорая, превращается в никель, кобальт и железо, масса и плотность ее тяжелого металлического ядра нарастают и в какой-то момент начинает выполняться условие, впервые сформулированное Чандрасекаром: если масса превышает некоторую критическую величину M_c , то гравитация становится настолько сильной, что нарушается механическая устойчивость звезды и ядро коллапсирует.

Эта критическая масса равна $\sim 1,4 M_{\odot}$. При температуре $\sim 10^{11}$ К ядра железа в основном распадаются на протоны, нейтроны и какое-то количество альфа-частиц. Атомы, в сущности, тоже коллапсируют и протоны соединяются с электронами, образуя нейтроны (плюс ν_e). Поэтому получающееся компактное ядро называется нейтронной звездой. Коллапс совершается очень быстро, менее чем за секунду. Плотность становится равной $\sim 10^{14}$ г/см³, а радиус ~ 20 км.

«С разгона» коллапс приводит к пересжатию почти несжимаемого ядерного вещества, которое затем дает отдачу, порождающую ударную волну. Эта ударная волна движется очень быстро — в SN 1987A измерена скорость более 30000 км/с (более 1/10 скорости света c). Внезапный коллапс создает условия для падения на нейтронную звезду остальной части исходной звезды. Вещество из этой части устремляется к центру и способно достигать сверхзвуковой скорости, которая при этой высокой плотности равна ~ 20000 км/с.

Ударная волна проходит сквозь остатки или оболочку ядра, выталкивая их наружу и образуя расширяющееся облако, подобное тем, что изображены на рентгеновских снимках на рис. 2. Первые несколько часов ударная волна не видна, поскольку порожденный ею свет поглощается еще до того, как он достигнет внешнего слоя — фотосферы, откуда он уже способен вырваться.

Энергия, выделяющаяся при гравитационном коллапсе, огромна — в несколько раз больше, чем 10^{53} эрг *). Важный вопрос — каким образом эта энергия отводится. Хотя источником ее служит гравитация, очень малая ее доля высвобождается в виде гравитационных волн, поскольку сферическая симметрия гравитации нарушается слабо (для образования гравитационной волны необходим квадрупольный момент). Учет гравитационных волн, кинетической энергии ударной волны, передаваемой веществу, а также наблюдаемого электромагнитного излучения дает лишь 1% полной энергии. Остальные 99% заперты в ядре и могут высвободиться только в виде нейтрино. Это получается потому, что при столь высокой плотности длина

*) Величину этой энергии нам трудно себе представить. Если бы у каждого жителя Земли было по мегатонной водородной бомбе и все они взорвались бы одновременно, то и тогда нечего было бы и сравнивать. Для получения сравнимой с 10^{53} эрг энергии пришлось бы дать каждому по 10^8 таких бомб.

свободного пробега электронов и фотонов крайне мала, тогда как у нейтрино она значительно больше. Это позволяет внешним нейтрино вылетать с так называемой нейтриносферы. Таким образом, мы наблюдаем лишь нейтрино низких энергий с границы нейтриносферы, а не внутренние нейтрино высоких энергий.

Одной из самых важных реакций в нейтронной звезде является:



Заметим, что типы нейтрино не указаны, так что количества образующихся $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau$ и $\bar{\nu}_\tau$ примерно одинаковы. Время гравитационного коллапса мало, несколько миллисекунд, а время, необходимое для высвобождения основной части нейтрино, больше: до наблюдений SN 1987А оно оценивалось в несколько секунд.

Количества и энергии шести типов нейтрино не совсем равны по двум причинам:

а) В начале нейтринного всплеска резко преобладает поток ν_e , благодаря реакции (1) имеющей место при образовании нейтронной звезды.

б) ν_e и $\bar{\nu}_e$ могут участвовать во взаимодействиях заряженного тока (ЗТ) и нейтрального тока (НТ), между тем как другие четыре типа нейтрино могут участвовать лишь в НТ-взаимодействиях (главным образом, в когерентном рассеянии).

5. БОЛЬШАЯ РОЛЬ СВЕРХНОВЫХ В ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Общая химическая и физическая эволюция в галактике показана на рис. 5. Вселенная родилась в «Большом Взрыве», породившем водород и гелий, которые составляют большую часть межзвездного вещества. Это вещество неоднородно, в нем часто встречаются обширные облака водорода, они сжимаются под действием гравитации и образуют звезды (см. п. 3). Если масса звезды относительно мала, она становится красным гигантом, затем, после выгорания, остается небольшой компактный белый карлик, а выметенное вещество снова становится межзвездным. Если у белого карлика есть спутник, то карлик может притягивать с него вещество до тех пор, пока не создадутся условия для взрыва сверхновой I типа. Продукты этого взрыва образуют расширяющееся облако, туманность, которая тоже добавляется к межзвездному веществу.

Если масса звезды велика, то считается, что она становится красным сверхгигантом; это, как указано в п. 4, может привести к взрыву сверхновой II типа, после которого образуется нейтронная звезда и быстро расши-

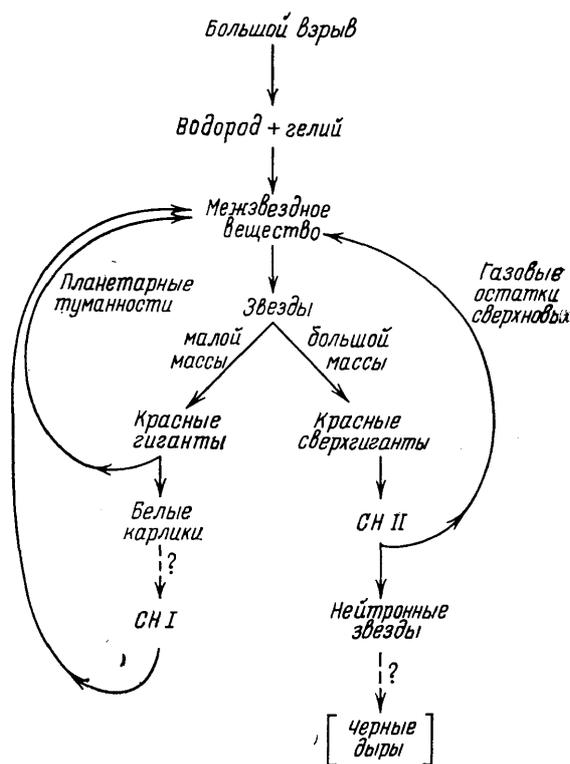


Рис. 5. Роль сверхновых I и II типа в химической эволюции Вселенной (на основе рисунка из [65])

ряющаяся оболочка газового остатка, который опять-таки подпитывает межзвездное вещество.

Есть несколько интересных дополнений:

а) Может происходить аккреция вещества, падающего внутрь из остатка, на нейтронную звезду. Если в некотором радиусе масса станет достаточно большой, то могут возникнуть условия для образования черной дыры. Эта черная дыра позже поглотит еще часть остатка. Ниже мы обсудим этот случай.

б) Процессами звездной эволюции можно объяснить образование тяжелых элементов вплоть до железа, но остается вопрос об образовании еще более тяжелых элементов — таких, как свинец, золото, уран. При рождении нейтронной звезды создается огромный избыток нейтронов, и при температуре свыше 10^{10} К они могут взаимодействовать с железом, порождая более тяжелые элементы. Таким образом, сверхновые, возможно, являются единственным во Вселенной источником этих элементов.

в) Межзвездное вещество состоит не только из водорода и гелия. Вследствие взрывов сверхновых в нем содержатся все химические элементы. Поэтому и во вновь образующейся звезде имеется некоторое количество тяжелых элементов. Наше Солнце содержит больше золота, чем Земля, правда, это золото для нас недоступно. В старых областях звездообразования, каких много в нашей Галактике, произошло так много взрывов сверхновых, что распределение тяжелых элементов, почти однородно. В новых областях звездообразования, таких как БМО, в котором вспыхнула СН 1987А, количество тяжелых элементов, или металличность, Z меньше*). Количество элементов тяжелее гелия в Солнце составляет несколько процентов — и при подсчете потока нейтрино от Солнца важно знать, сколько именно: это влияет на поглощение и от этого может зависеть решение вопроса, существует ли проблема солнечных нейтрино.

6. НАБЛЮДЕНИЯ СН 1987А

6.1. Первые наблюдения и первые результаты. В астрономии первый, кто сообщает о наблюдаемом событии в Международный Астрономический Союз (МАС), называется «первооткрывателем». Случилось так, что Иан Шелтон, астроном из Торонто, работавший в Чили, первым сообщил в МАС¹ 24 февраля о том, что 24.23 февраля (UT) он обнаружил в БМО сверхновую звездной величины, V , равной 5**). Накануне, с 23.054 по 23.101 февраля ее там не было. На самом деле Дж.Джеррад и Р. Х. Мак-Нот² сделали «предоткрытие» — они обнаружили ее на пленках, снятых предыдущей ночью, 23.433 февраля с $V = 6,0$ и 23.445 февраля с $V = 6,2$.

Через семь Циркуляров МАС, 28 февраля, о еще более важном «предоткрытии» было объявлено К. Кастаньоли из Турина, передавшим по телексу: «...23.124 февраля Всемирного времени был обнаружен сигнал на Монбланской нейтринной обсерватории. Сигнал состоял из 5 импульсов выше энергетического порога 7 МэВ за промежуток 7 с. Это согласуется и по энергии, и по продолжительности с предсказаниями стандартных моделей относительно коллапса железного ядра на расстоянии в 50 кпс. Вероятность случайного совпадения с вспышкой СН 1987А равна единице на 10^4 лет. Нейтринный телескоп, работающий с октября 1984 г. под землей на глубине,

*) Многие астрономы почему-то называют «металлами» все элементы тяжелее гелия. Вот так и получается, к ужасу всех воспитанных на уважении к химии людей, что углерод, кислород и неон оказываются металлами.

***) Шкала звездных величин V , используемая в астрономии, довольно необычна — 5 звездных величин соответствуют множителю 100 для светимости. Предельной для визуального наблюдения является $V \approx 6$; рост чисел означает ослабление блеска. Отрицательное число, например $V = -1$, соответствует более ярким объектам, чуть ли невидимым днем.

соответствующей 5000 м водного эквивалента, при сотрудничестве нашего института с группой Г. Т. Зацепина из Института ядерных исследований в Москве, состоит из 90 т жидкого сцинтиллятора в 72 счетчиках, экранированных 200 т железных плит...».

Это было важное сообщение — оно служило прямым свидетельством в пользу сложной теории взрыва СН II типа с образованием нейтронной звезды и нейтринной вспышки.

Группа нейтринных детекторов Камиоканде II зарегистрировала нейтринный сигнал из 11 событий почти сразу же, но сообщила об этом только 10 марта⁴, через 15 Циркуляров МАГ. Однако они привели другой момент времени для этого 13-секундного сигнала — февраль 23.316 — и отметили, что «никаких событий в окрестности 23.12 февраля ВВ (UT) времени, указанном в сообщении Монбланской обсерватории, зарегистрировано не было ...». Промежуток энергий был от порога в 7,5 до 36 МэВ. Затем, 11 марта, появилось сообщение коллаборации Ирвин — Мичиган — Брукхейвен (ИМБ) о том, что за интервал в 6 с был зарегистрирован сигнал из 8 импульсов. Они согласовались с нейтринными событиями с энергиями < 50 МэВ. По времени сигнал совпадал с сигналом Камиоканде II.

Группы физиков, работающие на нейтринных детекторах, вообще-то не имели обыкновения быстро рассылать телексы в погоне за приоритетом, хотя на самом деле они наблюдали сигналы своевременно. Но тут телефонные и прочие каналы заработали вовсю — и весьма эффективно. Рассказывали, что сотрудники Монбланской группы позвонили своим друзьям в Рим, сказали, что обнаружили нейтринный импульс от новой СН, и попросили тех посмотреть на свои детекторы гравитационных волн. В Римской группе были очень огорчены, поскольку в это самое время все детекторы гравитационных волн в мире по соглашению были включены (любое свидетельство) в пользу гравитационных волн было бы куда более убедительным, если бы оно было получено не на одном-единственном, а на нескольких детекторах). Шумовой фон от случайных колебаний гораздо слабее при низких температурах, и поэтому велись работы по переходу на температуры сверхпроводимости. Потом в Римской группе сообразили, что у них остался старый детектор гравитационных волн, работавший при комнатной температуре, — и обнаружили сигнал примерно в то же самое время (на $1,4 \pm 0,5$ с раньше), что и Монбланская группа!

Весьма к месту пришла Морсионская конференция, организованная с 8 по 14 марта в Les Arcs во Французских Альпах, — совместное мероприятие физиков, изучающих частицы, и астрофизиков. Там были представлены три нейтринные группы плюс Римская группа по изучению гравитационных волн, а также русская Баксанская группа, которая тоже утверждала, что наблюдала нейтринный сигнал почти в то же время, что и группы Камиоканде и ИМБ. В течение всей этой недели в объединенные семинары физиков, изучающих частицы, и астрофизиков поступала новая информация. Наибольшие дискуссии велись по двум темам: была ли это сверхновая I или II типа и в чем причины расхождения в хронометраже, в частности, почему группа Камиоканде не наблюдала сигнала одновременно с Монбланской, хотя их детектор гораздо крупнее, 2140 т против 90 т.

Эдоардо Амальди сообщил о результатах Римской группы⁵. На рис. 6 показано движение 2300-килограммового стержня, анализ которого дает небольшой сигнал со скромной вероятностью 3%. Однако для сигнала такой величины потребовалась бы масса СН в 2400 солнечных, что, по мнению Амальди, было маловероятно, если учесть вид предсверхновой и тот факт, что светимость СН оказалась меньше ожидаемой. На рис. 6 показаны также хронологические моменты 5 монбланских событий.

К концу Марионской встречи стало ясно, что мало кто из присутствующих по-настоящему понимает, как сверхновые порождают нейтрино, — кто-то сказал: «...По сверхновым экспертов нет, есть одни сверхновички...».

Астрономические результаты появились быстро. Звездная величина V выросла с 6,2 (февраль 23.44) до 5 (24.23) и до 4,4, (24, 72); 22 февраля она была равна ~ 12 . Это был драматически быстрый рост. 25 февраля Уилер и Киршнер⁶ заявили, что если это СН I типа, то можно ожидать ее уярчения

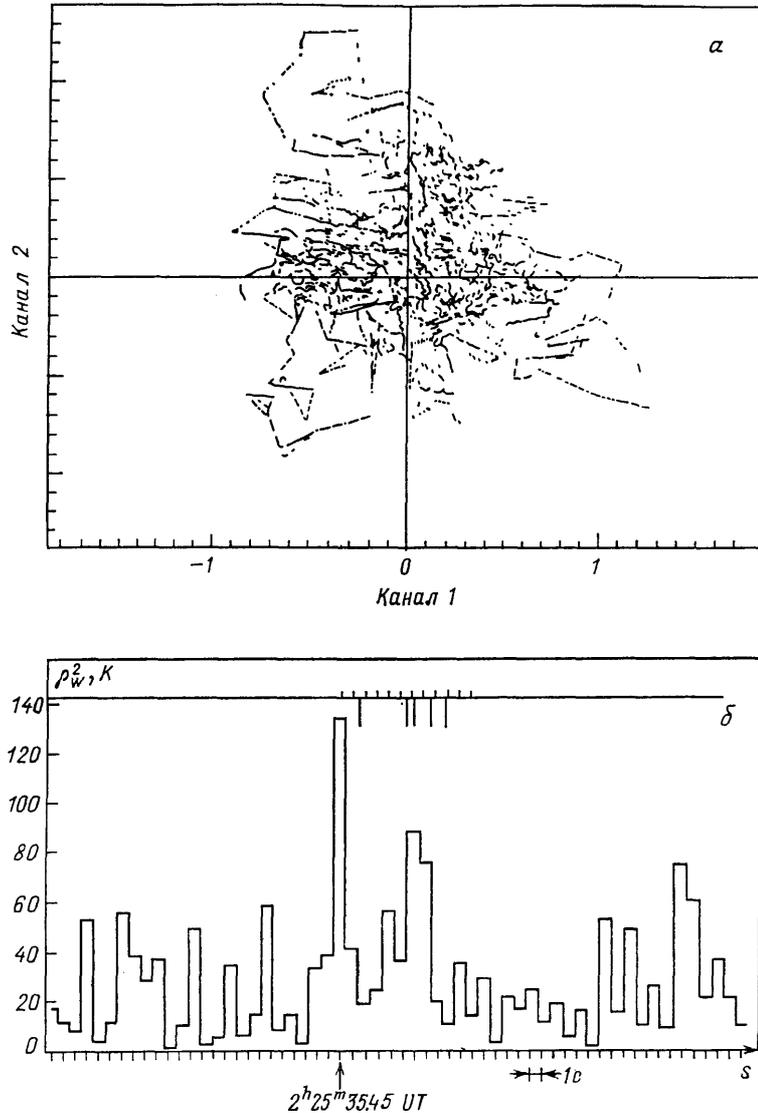


Рис. 6. Римский эксперимент по обнаружению гравитационных волн⁵.
 a — Движение стержня. b — График результатов после исключения броуновского движения стержня. Показаны также моменты пяти нейтринных событий, зарегистрированных на Монбланской установке

до звездной величины -1 , а если она II типа — то до $+1$. Однако на это СН 1987A немедленно откликнулась прекращением резкого роста и стабилизацией на уровне 4.4^m .

24 февраля наблюдалась абсорбция на волне 625 nm^2 , что указывало на I тип. 25 февраля наблюдались линии водорода H_α , H_β и H_γ , что указывало на II тип⁷, так же как и наблюдение эмиссии Ca II . Эффектно вел себя УФ спектр⁹: 25 февраля в нем проявлялись особенности, не свойственные ни одной из известных СН, но 26 февраля он «претерпел драматические изменения и стал чрезвычайно похожим на спектр СН 1983 N в M83 примерно

Цветовой состав видимого спектра также менялся быстрее, чем это нормально для сверхновых, причем синий свет быстро ослабевал, а излучение с большими длинами волн усиливалось. Тем самым наблюдавшаяся в течение первых нескольких дней ровная светимость на самом деле не означала устойчивости — она была, скорее, следствием случайного усреднения слабеющего коротковолнового и растущего длинноволнового излучения.

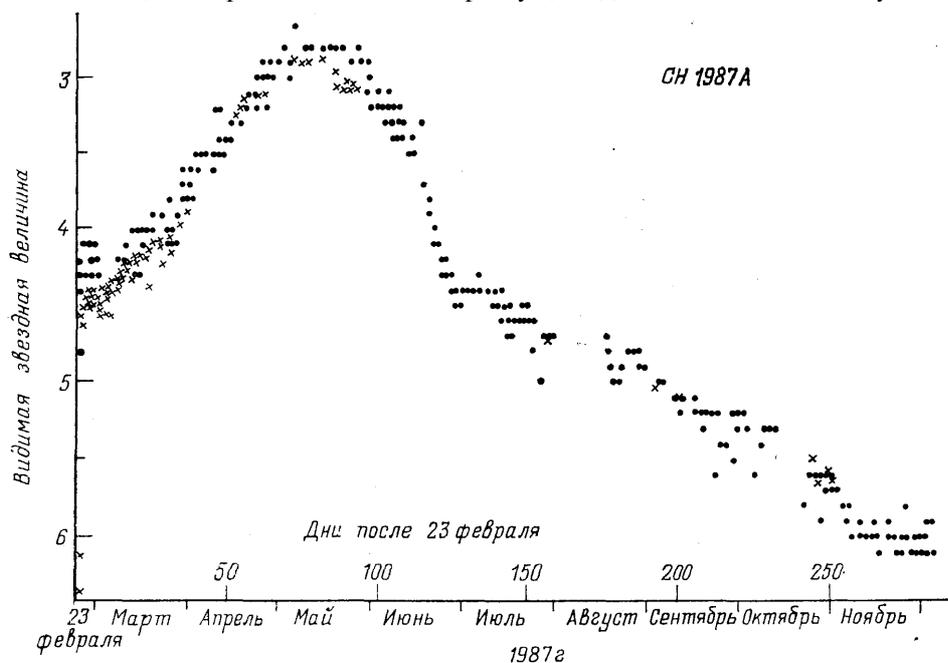


Рис. 7. Звездная величина SN 1987A как функция времени (в сутках после взрыва). Погрешности фотометрических измерений (крестики) $\pm 0,02$, что значительно ниже, чем визуальные ошибки $\pm 0,1$ (точки) (заимствовано из «Циркуляров МАС»)

Этот эффект был еще заметнее в УФ, где после «УФ вспышки» первых дней коротковолновое излучение стало уменьшаться, а длинноволновое увеличиваться. Правда, позже на самых коротких УФ волнах (180нм) излучение выросло в основном за счет появления эмиссионных линий (см. ниже).

6.4. Рентгеновское, гамма- и радиоизлучение. В начале рентгеновское и гамма-излучение не наблюдались, что, как объяснялось выше, соответствовало ожиданиям, поскольку толщина оболочки SN была слишком велика, — это излучение взаимодействовало с ней и вырождалось в более длинноволновое. Затем и японский спутник «Ginga»¹¹, и русская орбитальная станция «Мир»¹² сообщили о наблюдении рентгена. Для «Ginga» рентгеновское излучение от SN 1987A стало заметным, начиная с июля, и круто нарастало, достигнув максимума, по-видимому, в начале сентября. Энергетический спектр падает с ростом энергии до 10 кэВ, но затем выравнивается к верхнему пределу ~ 30 кэВ. Советские измерения охватывают $\sim 20 - 300$ кэВ и дают необычно жесткий спектр, падающий всего лишь по степенному закону с показателем $\sim 1,4$.

Мягкое рентгеновское излучение от сверхновых наблюдалось и прежде, но здесь впервые наблюдался жесткий рентген. Такой бимодальный спектр — с резким, а затем более медленным спадом — представляет большой интерес и будет обсуждаться ниже.

Радиоизлучение наблюдалось австралийскими обсерваториями и достигло пика: ~ 100 миллионских (мян) на частотах ~ 1 ГГц через трое суток, а затем уменьшалось. Для предшествовавших сверхновых II типа это излу-

чение было на несколько порядков сильнее и продолжалось гораздо дольше. Интерпретация этих результатов будет рассмотрена ниже.

6.5. Сверхновая типа I или типа II? Первые результаты относительно SN 1987A свидетельствовали как в пользу I, так и в пользу II типа. Они суммируются в табл. I.

Таблица I. Характеристики сверхновых I и II типа и SN 1987A

Характеристика	Тип I	Тип II	SN 1987A	Вывод
Водород	Нет	Да	Да	II
Максимальная скорость, км/с	10—15000	5000	31000	I
V-подъем	Быстрый	Медленный	Очень быстрый	I
V-плато	Нет	Да	Да	II
V-максимум	0÷1	-1÷+2	3	—
V-падение	55 сут	Медленное	2 декремента (78 сут)	—
Подобие V-кривых блеска	Да	Нет	—	II
УФ	—	—	Очень быстрые вариации	—
Радио	Нет	Да, спустя месяц	10 ⁻³ от SN II	—
Предсверхновая	Белый карлик	Красный сверхгигант	Голубой сверхгигант	—
Галактики	Все	Со звездообразованием	Со звездообразованием	II
Нейтрино	Мало	2—5·10 ⁵³ эрг	~ 5·10 ⁵³ эрг	II

Единственным прямым указанием на поведение ядра служит нейтринная вспышка. Ее следует считать решающим доводом в пользу образования нейтронной звезды. Отличия SN 1987A от типичной сверхновой II типа столь велики, что классификация по феноменологическим признакам оказывается ненадежной. С другой стороны, у всех остальных сверхновых обнаружить нейтрино не удавалось, так что какая-то классификация была нужна. Недавно были открыты несколько сверхновых, не соответствующих ни I, ни II типу, и была предложена классификация по типам Ia и Ib. Можно надеяться, что SN 1987A и другие помогут астрономам создать новую классификацию на основе фундаментальных физических процессов, которые теперь становятся понятнее.

6.6. Скорости и радиусы. Начиная с 25.05 февраля в обсерватории Ла Силла велись спектрофотометрические измерения¹³ от 320 до 900 нм с разрешением в 1 нм при помощи сканера Бохумской обсерватории. На рис. 8,а показаны распределения потока как функции длины волны в A¹⁴ для 25.1 февраля и 20.1 марта. Хотя полный поток видимого излучения на протяжении этого периода оставался почти постоянным, из рис. 7 видно, что спектр резко менялся в двух отношениях:

а) поток ниже 480 нм к 6 марта уменьшился в 100 раз, затем убывал медленнее, а поток выше 500 нм возрастал;

б) менялся линейчатый спектр. До 27 февраля выделялись балмеровские линии H_α, H_β, H_γ и He I (на 588 нм). С начала марта видны сильные линии поглощения, особенно CaII на 850 нм и Na I—D.

На рис. 8, б показаны подробные спектры с разрешением 0,3 нм для H_α с 14 марта (обозначено 0314.0) до 29 марта. С поправкой на лучевую скорость 260 км/с всего БМО максимум эмиссии в линии H_α приходится на 656,9 нм. Можно заметить, что минимум поглощения подвигается к этому значению с уменьшением скорости от -18 000 до -7400 км/с между 25 фев-

раля и 29.2 марта. Граничная скорость в поглощении (т.е. у левого края профиля линии) меняется от $-31\,000$ до $-11\,600$ км/с. Если экстраполировать к началу вспышки СН 1987А 23.1 февраля, то граничная скорость оказывается равной $-40\,000$ км/с или 13% скорости света, а это и есть скорость разлета самых быстрых выбросов.

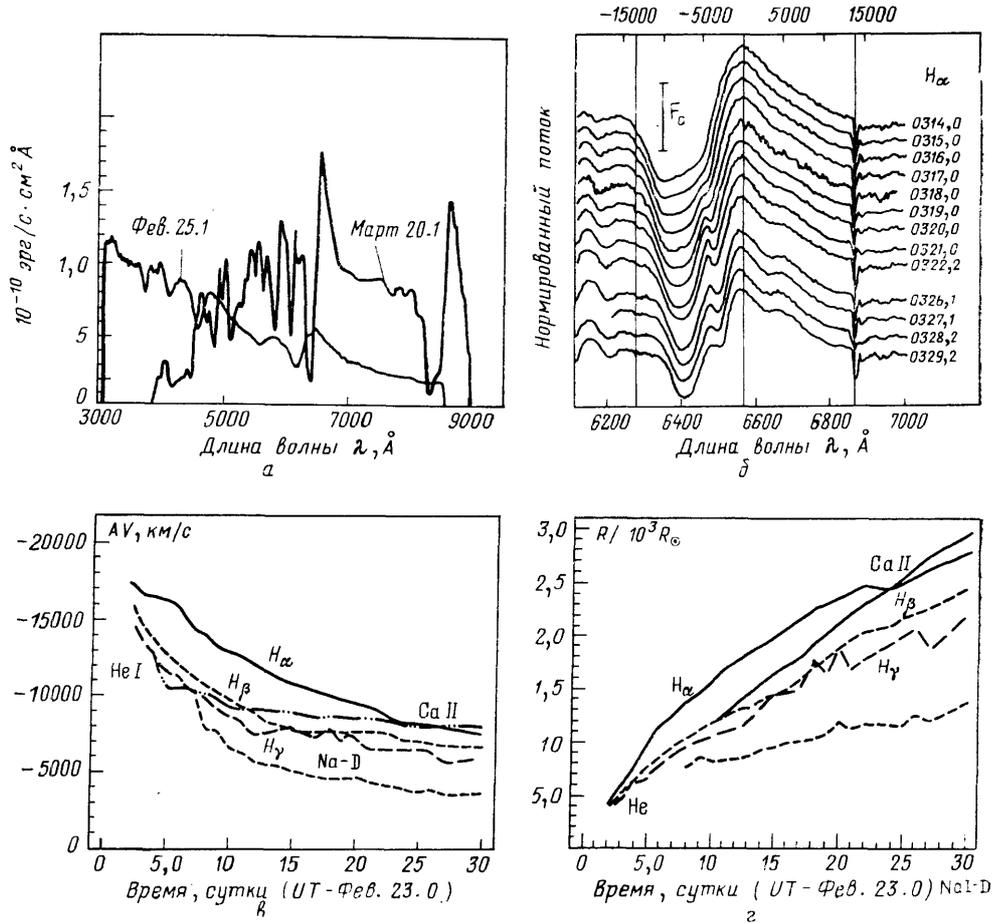


Рис. 8. Спектрофотометрические измерения СН 1987А, проделанные Бохумской группой¹³. а — Распределение потока 25.1 февраля и 20.1 марта. б — Набор профилей линии H_α среднего разрешения ($3 \text{ \AA} = 137 \text{ км/с}$) на период с 14.0 марта по 29.2 марта. в — Скорости в минимуме поглощения H_α, H_β, H_γ, Na I — D, Ca II $\lambda 8542$ и He I $\lambda 5876$. г — Эффективные радиусы (в $1000 R_{\odot}$)

Вычисленные по скоростям минимумов в поглощении (рис. 8, в) эффективные радиусы (в единицах 1000 радиусов Солнца) показаны на рис. 8, г. Можно увидеть, что расширяющаяся оболочка стратифицирована и что разные элементы движутся по-разному. Так, 17 марта радиус H_α равен $25\,000 R_{\odot}$, а Na I — D находится гораздо глубже в оболочке на $12\,000 R_{\odot}$. После 17 марта оптическая толща Ca II набирается на больших радиусах.

На рис. 8, б заметна одна важная особенность. Между минимумом в поглощении и максимумом в излучении начиная с 15 марта виден выступ. Его можно истолковать как результат отклонения от сферической симметрии, что может служить независимым подтверждением существования спутника СН 1987А или таинственного пятна, которое рассматривается в разделе 10.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ НЕЙТРИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

7.1. Установки и зарегистрированные события. В установке Камиоканде¹⁵ используется водяной черенковский детектор с активным объемом 2140 т. Наблюдалось 11 событий, в которых электрон, порожденный взаимодействием нейтрино, давал заметное черенковское излучение и обладал энергией в диапазоне от 7,5 до 36 МэВ. Общее время составило 13 с, 8 событий произошло за первые две секунды.

В установке ИМБ¹⁶ также использовался водяной черенковский детектор ~ 5000 т. За 6 с наблюдалось восемь нейтринных событий, шесть из которых произошли в первые две секунды. Эта вспышка имела место в течение 7-часового периода, когда четвертая часть фотоумножителей не работала, так что эффективность регистрации при 20 МэВ составляла всего 14%. Измерялись энергии от 20 до 40 МэВ.

В Монбланском туннеле находится 90-тонный жидкий сцинтилляционный детектор объединения Турин — ИЯИ АН СССР (Москва)¹⁷. На нем в течение 7 с наблюдались пять взаимодействий, из них лишь одно — за первые три секунды. Сначала сообщалось об энергиях от 7 до 11 МэВ, но через несколько месяцев они были исправлены на 5,8—7,8 МэВ. Фоновый счет исключительно низок, поскольку лаборатория расположена в глубине Монбланского массива. Вероятность регистрации нейтрона, связанного с электронным событием, равна 40%, и один такой нейтрон наблюдался.

В Баксанской установке¹⁸ также используется жидкий сцинтилляционный детектор на небольшой глубине в шахте. Наблюдалось три взаимодействия за 2 с и пять за 9 с. Порог составлял 10 МэВ, а события имели энергии от 12 до 23,3 МэВ.

В табл. II¹⁹ подробно указаны хронометраж, энергия и углы относительно СН 1987А.

7.2. Статистическая значимость экспериментов. В соответствии с их статистической значимостью четыре результата нейтринных детекторов можно разделить на три группы:

а) *Много выше фона.* Группа Камиоканде установила, что фоновый сигнал, связанный со статистическими флуктуациями, возможен реже, чем раз в 10^5 лет. Группа ИМБ наблюдала восемь нейтрино за 6 с, тогда как частота фона составляет всего два в сутки.

б) *Один раз в 520 суток.* Монбланская группа наблюдала сигнал из пяти событий за 7 с, частота случайной имитации его 0,7 в год или один раз в 520 суток. Если с учетом неопределенности момента коллапса СН промежутков времени для него положить равным 5 ч, то вероятность имитации составит $4 \cdot 10^{-4}$.

в) *Один раз в 1,4 суток.* На Баксанской установке наблюдались пять взаимодействий за 9 с при темпе имитации один раз в 1,4 суток. Отсчеты >10 МэВ происходят раз в 30 с.

7.3. Хронометраж на разных установках. Первое событие, зарегистрированное ИМБ 23 февраля, произошло в $07^h35^m41,37^s$. Поскольку погрешность составляла всего 50 мс и статистическая значимость очень велика, это можно принять за самый надежный начальный момент нейтринной вспышки для Земли.

У Камиоканде первое событие было зарегистрировано в $07^h35^m35^s$, но из-за последовавшей неисправности в подаче энергии время не было откалибровано. С большим запасом погрешность составляет ± 1 мин. Это согласуется с хронометражем ИМБ с точностью до 6,5 с.

Первое Баксанское событие отмечено в $07^h36^m6^s$ с погрешностью 2с*).

*) Погрешность БСТ оказалась больше; см. обзор В. С. Имшенника и Д. К. Надежина в этом номере УФН. (Примеч. пер.)

Таблица II. Результаты на установках K2 (II), ИМБ и LSD: время от первого события, энергия и (в случае водяных детекторов) углы черенковских конусов относительно направления на СН 1987А. Приведены недавно пересмотренные величины энергии для LSD

Установка	Событие	Время, с	E_e , МэВ	$\theta_{\text{БМО}}$, град
Камиока II (вода)	1	0	$20,0 \pm 2,9$	18 ± 18
	2	0,107	$13,5 \pm 3,2$	15 ± 27
	3	0,303	$7,5 \pm 2,0$	108 ± 32
	4	0,324	$9,2 \pm 2,7$	70 ± 30
	5	0,507	$12,8 \pm 2,9$	135 ± 23
	6	0,686	$6,3 \pm 1,7$	68 ± 77 *)
	7	1,541	$35,4 \pm 8,0$	32 ± 16
	8	1,728	$21,0 \pm 4,2$	30 ± 18
	9	1,915	$19,8 \pm 3,2$	38 ± 22
	10	9,249	$8,6 \pm 2,7$	122 ± 30
	11	10,433	$13,0 \pm 2,6$	49 ± 26
	12	12,439	$8,9 \pm 1,9$	91 ± 39
ИМБ (вода)	33162	0	$38 \pm 9,5$	74 ± 15
	33164	0,42	$37 \pm 9,3$	53 ± 15
	33167	0,65	40 ± 10	56 ± 15
	33168	1,15	$35 \pm 8,8$	63 ± 15
	33170	1,57	$29 \pm 7,3$	40 ± 15
	33173	2,69	$37 \pm 9,3$	52 ± 15
	33179	5,01	20 ± 5	39 ± 15
	33184	5,59	24 ± 6	102 ± 15
LSD (UNO) (сцинтиллятор)	994	0	$6,2 \pm 0,7$	
	995	3,86	$5,8 \pm 0,7$	
	996	4,22	$7,8 \pm 0,9$	
	997	5,91	$7,0 \pm 0,7$	
	998	7,01	$6,8 \pm 0,8$	

*) Событие 6 отвергнуто как лежащее ниже энергетического порога

Поскольку запаздывание по сравнению с ИМБ составляет 24 с, этот результат следует считать несовместимым. Так как ни ИМБ, ни Камиоканде — группы с более крупными детекторами — не сообщают о нейтринной вспышке в этот момент, а статистическая значимость данного эксперимента относительно низка, ниже этот результат не рассматривается.

Время первого Монбланского события — $2^{\text{h}}52^{\text{m}}36,79^{\text{s}}$ с точностью лучше 2 мс. Это на $4^{\text{h}}43^{\text{m}}$ раньше, чем у ИМБ и Камиоканде и несовместимо с ними.

Группа Камиоканде отмечала, что если на Монбланской установке наблюдался такой сигнал, то они должны были бы наблюдать в это время 28 ± 12 событий за 7 с, но ничего похожего на такую вспышку зарегистрировано не было (тот факт, что вспышка не наблюдалась ИМБ, менее важен, поскольку там был более высокий порог в 20 МэВ). В работах^{19,20} эти подсчеты оспариваются.

Нейтринная вспышка в окрестности 10 с от момента первого события ИМБ в $07^{\text{h}}35^{\text{m}}41,37^{\text{s}}$ на Монбланском детекторе не наблюдалась.

Ввиду относительно большой статистической значимости для вспышек, зарегистрированных ИМБ и Камиоканде, приходится с сожалением заключить, что Монбланская вспышка не была связана с СН 1987А. Это могла быть либо очень большая статистическая флуктуация, либо событие местного, а не мирового значения.

Правда, с учетом статистической значимости Монбланского результата в некоторых работах высказывалось предложение, что СН 1987А дала две нейтринных вспышки, хотя стандартная теория сверхновых предсказывает только одну. Мы вернемся к этому вопросу позже, когда будем рассматривать «черные дыры».

7.4. Полная энергия нейтрино от СН 1987А. В стандартной теории сверхновых величина полной энергии, высвобождаемой в виде нейтрино, почти неизменна — от $\sim 2 \cdot 10^{53}$ до $5 \cdot 10^{53}$ эрг — для самых различных масс предсверхновых. Большая неопределенность связана с расстоянием до БМО, известным лишь с точностью до 30%²¹.

Группа Камиоканде приводит оценку $\sim 3 \cdot 10^{53}$ эрг. Гораздо более полные вычисления Шэффера и др.²² дают $3,9(+1,5; -1,8) \cdot 10^{53}$ эрг для ИМБ и Камиоканде вместе. Здесь же утверждается, что Монбланский результат дает $\geq 3 \cdot 10^{54}$ эрг, а «ни в одной из существующих моделей такая энергия связи не получается». Баксанский результат тоже приводит к подобной, хотя и менее серьезной, трудности.

7.5. Угловое распределение событий относительно направления на сверхновую. Группа Камиоканде отметила, что два их первых события, в моменты 0 и 0,107 с, по-видимому, указывают направление на СН 1987А, при этом углы равны $18 \pm 18^\circ$ и $15 \pm 27^\circ$. Считается, что самой частой реакцией должна быть



где позитрон не дает информации о направлении. Вторая возможная реакция — упругое рассеяние нейтрино (не антинейтрино)



где имеется некоторая корреляция с направлением, но сечение этой реакции примерно в 10^2 раз меньше, чем первой. Однако полный подсчет снижает отношение этих двух реакций до двадцати к одному или десяти к одному в зависимости от исходных предположений. Группа Камиоканде разбивает свои 11 событий на 9, связанных с рождением позитрона, и 2 — с рассеянием на электронах, быть может, два первых события. Статистические доводы в пользу этого довольно неубедительны.

7.6. Сравнение результатов Камиоканде и ИМБ. На рис. 9 изображена зависимость энергии от времени события, нулевым: считается момент первых событий, зарегистрированных Камиоканде и ИМБ. Можно отметить ряд особенностей:

- 1) 13 из 19 событий наблюдались в течение первых двух секунд.
- 2) В серии Камиоканде между первой двухсекундной вспышкой и последними 3 событиями имеется долгий перерыв — более 7 с. В нескольких работах подсчитано, что это статистически значимо. Следует отметить, однако, что три события ИМБ после двухсекундной вспышки попадают в этот пробел.
- 3) Средняя энергия имеет тенденцию уменьшаться со временем.
- 4) Числовые множители (например, $\times 5$) около некоторых точек указывают, что таким событиям приписываются произвольные веса. Например, событие ИМБ в 5 с имеет вес 7, поскольку при его медианной измеренной энергии в 20 МэВ эффективность составляет всего 14%. Эти веса важны, хотя иногда ими пренебрегают. Так, мы только что отметили, что 5 из 8 событий, наблюдавшихся ИМБ, произошли в течение первых двух секунд, но с учетом весов следует сказать, что 9 из 22 событий произошли в течение первых двух секунд и 13 — после!

Есть и еще одна важная поправка, на которую указали Колб и др.²¹: если спектр не плоский, следует учитывать эффект размывания. Здесь мы имеем дело с быстро убывающим спектром и с круто нарастающей кривой эффективности. Тогда, по их подсчетам, энергия события 20 МэВ на самом деле равна 21,4 МэВ, что несколько меняет приписанные веса.

Группа Камиоканде занималась и поиском²³ нейтрино высоких энергий, идентифицируемых по летящим вверх мюонам $> 1,7$ ГэВ (вверх, поскольку Камиока находится в северном полушарии, а SN 1987A — на южном небе). За период с 23 февраля по 1 сентября наблюдались 24 таких мюона, но их пространственное распределение согласуется с атмосферным фоном от космических лучей.

Вывод состоит в том, что хотя над 19 событиями Камиоканде и ИМБ можно продолжать работать с пользой, необходима более богатая статистика.

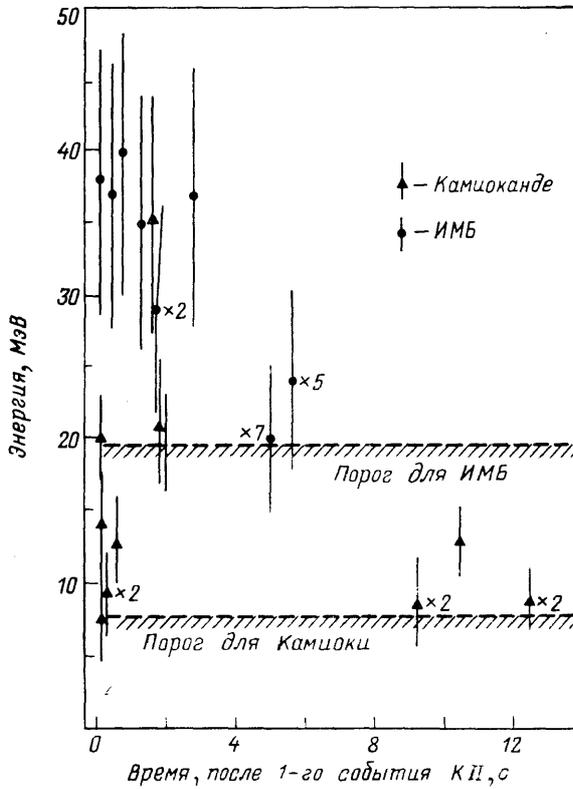


Рис. 9. Зависимость энергии от времени для нейтринных событий Камиоки и ИМБ.

За начало отсчета принят момент первого события Камиоки

нения основных ее особенностей мы рассмотрим только две. Позже мы обсудим и другие работы.

8.1. Околзвездное вещество. Подобно тому как наше Солнце испускает частицы, порождая солнечный ветер, все звезды выбрасывают частицы, которые образуют облака. Их называют околзвездным веществом. Шевалье и Франссон²⁴ рассматривают радиоволны, излучаемые SN 1987A, как результат взаимодействия сверхновой с плотным околзвездным веществом. Это явление наблюдалось у ярких сверхновых II типа SN 1979C и SN 1980K. Вблизи поверхности сверхновой происходит ускорение частиц и усиление магнитного поля, возникает синхротронное излучение, которое поглощается околзвездным веществом с испусканием радио- и рентгеновского излучения.

Одна из верременных констант t_{20} , показывающая просветление около звездного вещества, для SN 1987A составляла всего 2,1 сут, тогда как для SN 1979C и SN 1980K она равнялась 950 и 120 суткам. С учетом оптических свойств предсверхновой класса V31 можно сделать вывод, что скорость околзвездного ветра равна 550 км/с, а темп потери массы $9 \cdot 10^{-6} M_{\odot}$ в год. Таким образом, за относительно короткий период в миллион лет предсверхновая могла потерять $9 M_{\odot}$. Авторы приходят к выводу, что предсверхновая была

8. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ — ОСНОВА ИНТЕРПРЕТАЦИИ SN 1987A

SN 1987A посвящено много теоретических работ, но в этом разделе для объяс-

небольшой компактной звездой и что плотность околозвездного вещества относительно мала из-за большой скорости ветра. Возможно, предсверхновая успела потерять значительную долю своей исходной оболочки, т.е. много водорода у внешнего слоя, изображенного на рис. 3.

8.2. СН 1987А — взрыв звезды с $20M_{\odot}$ после потери массы. С. Э. Вусли и др.²⁵ дали подробную интерпретацию СН 1987А 5 марта, сразу же после взрыва! Он и его коллеги проделали уже много детальных расчетов сверхновых. Прежде всего, они предполагают, что СН 1987А — голубой сверхгигант, и это несмотря на то, что в момент представления их работы ошибка в интерпретации УФ спектра, казалось, исключала такую возможность.

Подсчитано, что предсверхновая спектрального класса В31 имела эффективную температуру 15000К и наблюдаемый блеск $V = 12,2$, что должно было бы соответствовать звезде с массой на главной последовательности $\sim 20M_{\odot}$. В нормальном случае она должна была бы иметь радиус $50 \cdot 10^7$ км и быть красным сверхгигантом. Однако оптические свойства предсверхновой — голубого сверхгиганта дают радиус $\sim 3 \cdot 10^7$ км. Низкая светимость СН 1987А может быть частично объяснена низкой металличностью Z в БМО ($Z \sim 1/3 Z_{\odot}$), но, скорее всего, больше связана с потерей массы предсверхновой, потерявшей большую часть своего водорода. При этом большая часть гелия ($\sim 6M_{\odot}$) еще сохранилась. Этим могли бы объясняться следующие особенности:

а) скорость в фотосфере выше нормальной — поскольку там меньше тормозящего вещества;

б) плато светимости, наблюдавшееся в течение первых 10 дней, — так как разогретая ударной волной звезда быстро расширяется и поверхность рекомбинации водорода распространяется по расширяющейся оболочке;

в) короткое время подъема светимости от 23.316 февраля (нейтринный импульс) до 23.443 февраля («предоткрытие»³), каких-то $1,1 \cdot 10^4$ с. Если бы предсверхновая была красным сверхгигантом, этот промежуток был бы гораздо дольше, $\sim 10^5$ с, но если она — голубой сверхгигант, то наблюдаемое время подъема вполне приемлемо;

г) температура фотосферы (внешней оболочки, излучение которой может наблюдаться) падает от 15000 до 6 000 К, так что поток УФ ослабевает.

Вусли и др. предсказывали также, что:

д) видимый блеск V начнет возрастать через 25 суток;

е) произойдет изменение цвета в сторону больших длин волн, поскольку с расширением водородный слой станет тоньше и начнет просвечивать лежащий под ним слой гелия;

ж) усилению блеска способствует $\sim 0,1 M_{\odot} {}^{56}\text{Co}$, который испускает гамма-лучи и позитроны, позже аннигилирующие с порождением гамма-лучей. Через 300 — 600 суток должна наблюдаться гамма-линия 847 КэВ от ${}^{56}\text{Co}$;

з) примерно через год можно будет увидеть линии вновь синтезированных изотопов O, Si, Fe и т.д. (для СН 1980К это произошло через 220 суток).

Существенно здесь то, что специалисты по сверхновым, такие как Вусли, смогли быстро изменить свою стандартную модель и превратить предсверхновую в компактную звезду. Это позволило им объяснить многие необычные особенности, наблюдавшиеся к тому времени. Поэтому вместо того, чтобы рассматривать наблюдавшиеся у СН 1987А особенности как свидетельства против стандартной модели, следует считать, что эта модель получила подтверждение, поскольку ее модификации позволяют объяснить широкий класс явлений.

9. ОБРАЗОВАНИЕ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ — ДВЕ НЕЙТРИННЫЕ ВСПЫШКИ?

9.1. **Образование черной дыры.** Многие авторы указывали, что при аккреции вещества из внутренних слоев остатков на поверхность нейтронной звезды в конечном счете в некотором радиусе накопится масса, достаточная для образования менее чем за миллисекунду черной дыры. Условие для образования черной дыры просто, роль играют только масса и радиус *). Поскольку вещество оболочки проваливается внутрь почти со скоростью звука, равной при тамошней плотности $\sim 10^4$ км/с, а расстояние, которое оно должно пролететь, составляет ~ 1000 км, можно ожидать, что время образования черной дыры будет порядка секунды. Однако проваливающееся вещество тормозится или останавливается идущей наружу ударной волной. Взаимодействие этих двух эффектов чрезвычайно сложно и зависит, в частности, от массы предсверхновой, но вообще-то считается, что при некоторых условиях черные дыры образуются и это происходит за время порядка нескольких секунд.

Если черная дыра образовалась, то она будет продолжать втягивать вещество остатков. Поэтому можно ожидать, что она захватит много никеля, кобальта и железа.

Вследствие этого уярчение за счет распада ^{56}Ni и ^{56}Co должно сильно уменьшиться и гамма-линия 847 КэВ от ^{56}Co не будет наблюдаться. Не будет наблюдаться и пульсар в центре расширяющейся туманности.

9.2. Тесты образования черной дыры в СН 1987А.

Рассмотрим свидетельства за и против того, что после образования нейтронной звезды в СН 1987А образовалась черная дыра. Прежде всего мы принимаем сценарий Вусли и др., который подтверждается многими более поздними теоретическими работами и тестами.

а) Предсказывалось (см., например, ²⁵), что через ~ 30 суток блеск усилится за счет распада $\sim 0,1 M_{\odot}$ ^{56}Co . Именно это и наблюдалось. Свидетельство против черной дыры.

б) Начиная с 1 июня, поток видимого излучения имеет 2 склона (см. рис.7): сначала он круто убывал, а затем резко перешел на более пологое снижение. Такое поведение качественно и, в грубом приближении, количественно согласуется с быстрым распадом ^{56}Ni в ^{56}Co и с более медленным распадом в ^{56}Fe . Свидетельство против черной дыры.

в) Образование черной дыры приводит к излучению нейтрино. Сначала в результате аккреции возникают такие большие плотности и гравитационные силы, что благодаря электронным захватам испускаются электронные нейтрино. Затем выделяется энергия гравитационного коллапса; большая ее часть остается связанной в черной дыре, но какая-то доля вырывается наружу и 99% этой энергии может высвободиться только в виде нейтрино. Подсчитано, что энергия, выделяемая в виде нейтрино, приблизительно равна энергии, ушедшей на образование нейтронной звезды.

Таким образом суммарная энергия, высвобождаемая в виде нейтрино, должна измениться от $(2-5) \cdot 10^{53}$ эрг, характерных для нейтронной звезды, до $(4-10) \cdot 10^{53}$ эрг. Оценки, полученные на основании 19 событий Камиоканде и ИМБ (см., например, ²²), оказываются в диапазоне $(4-5) \cdot 10^{53}$ эрг, но погрешность такова, что ясного результата нет.

г) Если через несколько секунд после образования нейтронной звезды образовалась черная дыра, полное время нейтринного излучения должно быть дольше и в нем может появиться пропуск. Первый вопрос — какова длительность вспышки вследствие образования нейтронной звезды? Самые подробные расчеты проведены, по-видимому, в работе Мэйле, Уилсона и Шрамма²⁶, где рассматривается пример эволюции энергии со временем,

*) Без учета вращения. (Примеч. пер.)

Таблица III. Ядра звезд по Мэйле и др.²⁶

Главная последовательность: масса, M_{\odot}	Модель	Железное ядро: масса, M_{\odot}	Нейтронная звезда: масса, M_{\odot}	Энергия связи, 10^{53} эрг
12	С	1,31	1,26	1,6
25	В	1,63	1,58	4,5
25	С	2,05	1,96 — ЧД?	8,6
50	А	1,79	1,60	4,7
100	А	1,85	Черная дыра?	—

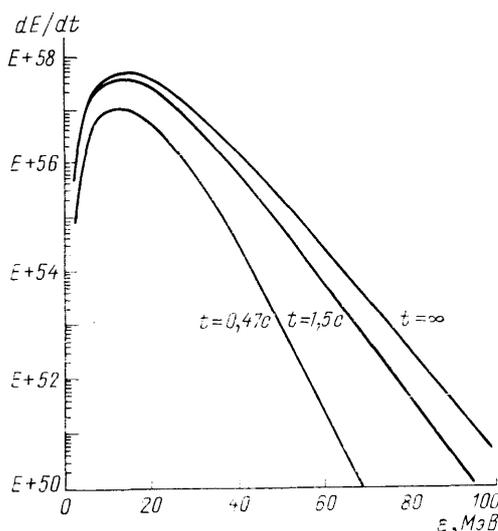
В модели А используется скорость реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 1975 г. В модели В используется скорость реакции в 2,5 раза больше, чем в А. В модели С используется скорость реакции в 3,0 раза больше, чем в А.

показанный на рис. 10 (табл. III). Можно видеть, что большая часть нейтрино испускается за 1,5 с. Однако по другим оценкам, полученным, быть может, из менее подробных расчетов, это время больше — до ~ 10 с. Считается, что время, нужное для высвобождения нейтрино после коллапса в черную дыру, того же порядка, но мне неизвестна ни одна работа, где проводились бы эти трудные вычисления. Есть искушение принять статистически необычно долгий промежуток в серии Камиоканде за время аккреции, но события ИМБ приходится на его середину. Таким образом, можно сказать, что наблюдавшееся Камиоканде время 13 с согласуется лишь с образованием нейтронной звезды, но если доверять подробным расчетам Мэйле и др., то эту длительную нейтринную вспышку можно истолковать в пользу образования черной дыры. Есть, правда, и другие теоретические расчеты, в которых время получается более долгим, десятки секунд.

д) Наличие двух нейтринных вспышек, разделенных промежутком более чем в несколько минут, могло бы служить главным свидетельством в пользу образования черной дыры. Мы обсудим это в следующем разделе.

е) Дальнейшими тестами будут наблюдение и сила гамма-линий, например, 847 КэВ от ^{56}Co , а также обнаружение пульсара. Еще один тест на нейтронную звезду — поток рентгеновских лучей, поскольку нейтронная звезда ускоряет в своем магнитном поле электроны и другие частицы, а это порождает интенсивное синхротронное излучение, взаимодействующее с туманностью. Именно поэтому рентгеновское излучение от Крабовидной туманности в несколько сотен раз сильнее, чем от туманностей без пульсаров.

9.3. Две нейтринные вспышки. Хиллебрандт и др.²⁷ и Де-Рухула¹⁹ высказали предположение, что события, наблюдавшиеся на Монбланской установке — это нейтрино от образования нейтронной звезды, а вспышка Камиоканде/ИМБ связана с образованием спустя $4^{\text{h}}43^{\text{m}}$ черной дыры.

Рис. 10. Спектры электронных антинейтрино от SN 25 солнечных масс, модель С (табл. III)²⁶.Излученная энергия $1,5 \cdot 10^{53}$ эрг в $\bar{\nu}_e$

В подтверждение этой гипотезы выдвигаются три главных аргумента:

а) в обеих работах утверждается, что быстрое время подъема от сигнала Камиоканде/ИМБ до первого визуального наблюдения, а именно $1,1 \cdot 10^4$ с, слишком коротко. Однако, как сказано выше, для измеренной скорости ударной волны 31000 км/с и для компактной предсверхновой примерно такое время и получается;

б) Хиллебрандт и др., используя принцип исключения и причинность, выводят, что характерное время для образования черной дыры должно составлять по меньшей мере два часа;

Де-Рухула проводит очень подробные вычисления, которые показывают, что с учетом распределения плотности остаточного вещества и других параметров время, необходимое для образования черной дыры в ходе аккреции, может равняться нескольким часам.

В данный момент мне неизвестны ни какое-либо подтверждение, ни опровержение этих расчетов;

в) Де-Рухула с помощью вероятностных подсчетов и рассуждений пытается доказать, что результаты всех трех нейтринных групп согласуются между собой.

Первая проблема — отсутствие наблюдения сигнала у Камиоканде в момент регистрации монбланского сигнала. Пользуясь имевшимися в то время монбланскими данными (позже пересмотренными в сторону понижения энергии), он получает температуру 0,9 (+0,5; -0,2) МэВ. Это гораздо ниже, чем ~ 4 МэВ, которые дают нормальные теоретические расчеты, но зато здесь эффективно используется тот факт, что порог у Монблана ниже, чем у Камиоканде, так что вероятность наблюдения для большинства событий Камиоканде очень мала. В результате вероятность согласованности этих двух экспериментов повышается до 0,9%, 0,3% или 0,05% в зависимости от того, 2,1 или 0 событий наблюдались у Камиоканде (погрешность Камиоканде в хронометраже делает это число неопределенным). Такую вероятность можно считать ненулевой, но можно и сделать вывод, что эти два эксперимента несовместимы с вероятностью более 99%. Правда, автор оправдывает столь низкую вероятность тем, что аналогичные расчеты приводят к вероятности для совместимости Камиоканде и ИМБ, в лучшем случае равной 0,14%. Встречая подобные рассуждения, вспоминаешь семейную поговорку: «два грязных не составят чистого, две лжи не образуют истину».

г) Самый сильный аргумент в пользу гипотезы двух нейтринных вспышек — низкий фон $4 \cdot 10^{-4}$ для Монбланского сигнала. К этому нужно относиться серьезно. Однако в целом все данные и, в частности кривая видимого блеска, свидетельствуют в пользу гипотезы, что черная дыра не образовалась и что поэтому имела место лишь одна нейтринная вспышка в момент Камиоканде/ИМБ.

10. ТАИНСТВЕННОЕ ПЯТНО — СПУТНИК СН 1987А?

10.1. Наблюдения. Каровска и др.²⁸ из Бостонского Центра Астрофизики (ЦА) сообщили, что обнаружили яркую деталь с разделением 57 миллисекунд от сверхновой. Они пользовались методом спекл-интерферометрии на 4-метровом телескопе Межамериканской обсерватории Серро Тололо.

Наблюдения проводились 25 марта и 2 апреля, т.е. на 30-е и 38-е сутки. Угловое расстояние 57 миллисекунд соответствует примерно двум световым неделям, если направление на спутник составляет прямой угол с направлением на Землю; при других углах расстояние больше. Яркое пятно имело звездную величину около 6,5 и не существовало до взрыва СН 1987А, поскольку оно на 5 звездных величин ярче, чем любой наблюдавшийся там прежде объект. Это означает, что яркое пятно связано с СН 1987А, но судя по хронометражу, скорость, необходимая для прохождения пути от Сверхновой

до пятна, должна быть больше 0,4 скорости света. Это казалось очень удивительным, но через 10 суток Мэтчер и др.²⁹ из Имperiал-колледж (ИК) в Лондоне сообщили, что с помощью Англо-австралийского телескопа они также наблюдали второй источник примерно в том же месте 14 апреля, на 50-е сутки. В обоих случаях использовались длины волн линии H_{α} 656—658 нм и яркое пятно было примерно на три звездные величины слабее сверхновой.

Эти два наблюдения нового яркого источника и тангенциальная скорость 0,4с были неожиданными. Несколько успокаивал знаменитый случай

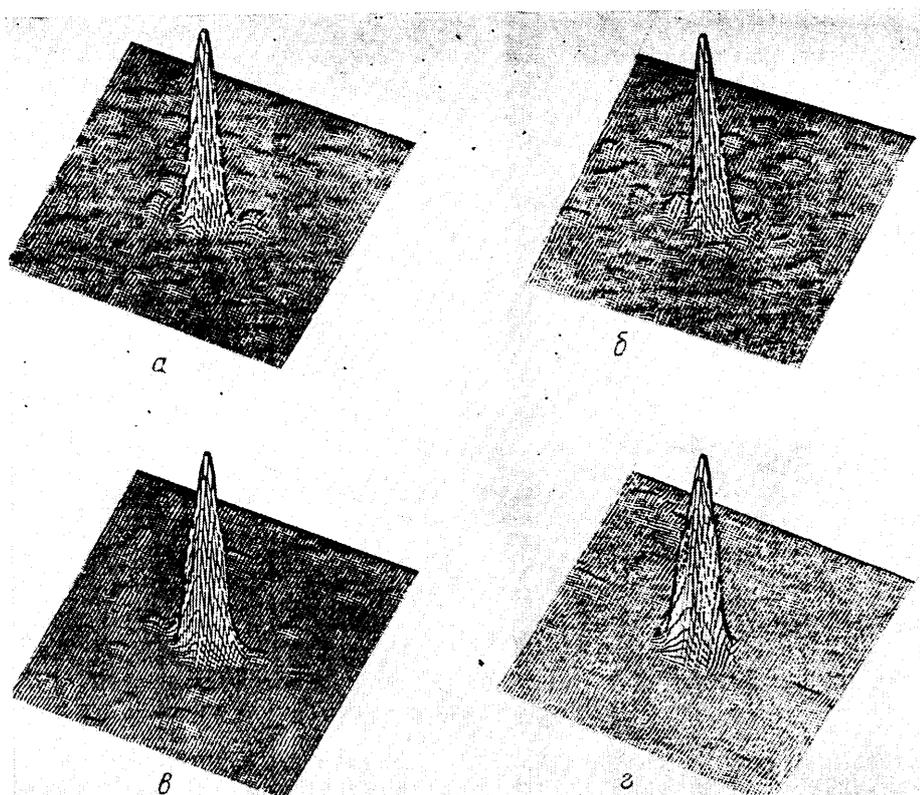


Рис. 11. Автокорреляционные спекл-интерферометрические изображения ЦА SN 1987А на трех длинах волн (а — в) и калибровочной звезды (г) (см. текст²⁹)

SS 433, где, как установлено наблюдениями в H_{α} , в рентгеновском и в радиодиапазонах, испускаются две струи в противоположных направлениях со скоростью $1/4 c$.

Некоторые, однако, не склонны доверять спекл-интерферометрии. После того как дальнейшие наблюдения, в июне и в июле, не выявили никаких следов второго яркого источника, их сомнения усилились несмотря на то, что спекл-интерферометрия является теперь полезным и хорошо разработанным методом. Разберем эти наблюдения поподробнее.

В ЦА наблюдали пятно на 656,3 нм с позиционным углом $194 \pm 5^\circ$ на расстоянии 59 ± 8 угл. мсек. В ИК наблюдали пятно на 658,5 нм под углом либо 196 ± 2 , либо 16 ± 2 (различные методы анализа приводят у них к неопределенности в 180°) на расстоянии 74 ± 8 миллисекунд.

По данным ЦА очень яркий источник был на $2,7 \pm 2$ звездной величины слабее, чем SN 1987А, по данным ИК — на 3 звездных величины. Пока что согласие превосходное.

Группа ЦА обнаружила этот эффект также на 533 нм и, несколько слабее, на 450 нм, но не на 400 нм. Их результаты показаны на рис. 11 вместе с результатами для звезды без спутника. Данные ИК приведены на рис. 12; пожалуй, лишь натренированный глаз различит здесь сигнал. Между 38 и 50 сутками они вели наблюдения на более коротких длинах волн, но не нашли источника со звездной величиной, отличающейся меньше, чем на 4 от сверхновой.

3 июня в ЦА не наблюдали явного второго источника, но поскольку блеск сверхновой увеличился до 3,1 звездной величины, это означало, что они были близки к порогу обнаружения. Наблюдения от 2 июля не дали убедительных результатов несмотря на то, что теперь Сверхновая была

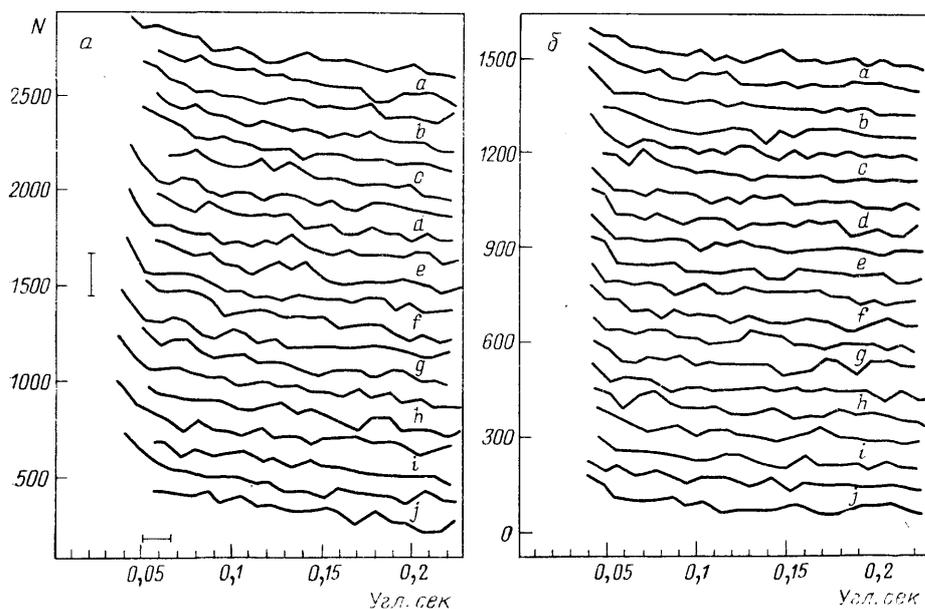


Рис. 12. Профили автокорреляционных функций Империял-колледж, Лондон.
а — SN 1987A. б — Контрольная звезда — см. текст ²⁹

тусклее, $V = 4,3$. Спекл-наблюдения, проведенные в инфракрасном диапазоне, 3600 нм, в Европейской Южной обсерватории (ESO) ³¹ с 16 по 23 июня дали неуверенные свидетельства в пользу этого эффекта: если пятно существовало, то на удалении 57 ± 30 угл. мсек.

10.2. О б с у ж д е н и е и о б ъ я с н е н и е. Если предположить, что яркое пятно существует, возникают два существенных вопроса:

а) Постоянна ли его светимость, или оно вспыхнуло только на несколько месяцев? Пока что данные говорят в пользу гипотезы о краткой вспышке, но ожидаются новые данные.

б) Стационарно ли оно или удаляется?

Измерения ЦА дали 59 ± 8 угл. мсек на 30-е и 38-е сутки, а ИК — 74 ± 8 угл. мсек на 50-е сутки. Эта разница в 15 ± 11 миллисекунд согласуется с нулем, т. е. с отсутствием движения, но ее же интерпретировали как указание на то, что источник постепенно удаляется от SN 1987A; данные наблюдений согласуются и с этим. Хотелось бы иметь больше данных, чтобы провести дальнейший анализ, но если источник слабеет, то определенного экспериментального результата можно и не получить.

Тем не менее во многих теоретических работах предлагаются механизмы для объяснения второго яркого источника. Например:

а) Пульсар испускает плазменный пучок через окно в оболочке, что порождает струю ³².

б) Тусклый спутник разогревается излучением СН. Так, Хиллебрандт и др.³³ предполагают, что это могло бы быть облако протозвездного газа с размером 0,1 пк или $3 \cdot 10^{17}$ см, плотностью от 10^6 до 10^7 атомов водорода на 1 см^3 и температурой 10^6 К , взаимодействующее с УФ излучением, возникшим в тот момент, когда ударная волна вышла на поверхность взорвавшейся звезды.

в) Звезда разрывается надвое при взрыве сверхновой.

г) Облако газа испускается предсверхновой до взрыва.

д) Эффект создает гравитационная линза, порожденная массивным объектом между Сверхновой и Землей.

е) По аналогии с SS 433 Колгейт и др.³⁰ предполагают, что ударная волна вырывает с оболочки узкую «магнитную струю», которая постепенно теряет свою энергию. Такое предположение весома, поскольку SS 433 действительно существует и скорость струи $c/4$ измерена как в видимом, так и в радиодиапазоне. Считается, что это двойная звездная система, в которой одна звезда взорвалась и стала нейтронной, а затем в результате аккреции превратилась в черную дыру. Внешний вращающийся аккреционный диск взаимодействует с магнитным полем, и энергия поля питает две струи³⁴.

Работа Колгейта и др.³⁰ полезна, поскольку в ней рассмотрены критерии применимости моделей, но в связи с этой работой возникает так много вопросов, что существование SS 433 оказывается очень кстати, — иначе трудно было бы поверить в наличие второго источника у СН 1987А.

Можно ожидать, что выбросы Сверхновой примерно через год достигнут того места, где наблюдался второй источник, и результат может многое прояснить.

11. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ БЛАГОДАРЯ СН 1987А, ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАССУ НЕЙТРИНО И Т. П.

11.1. О г р а н и ч е н и я н а м а с с у н е й т р и н о . Почти 20 лет назад Зацепин высказал предположение, что наблюдение на Земле нейтринной вспышки от сверхновой позволит получить ограничения на массу $\bar{\nu}_e$ и ν_e . Так, если вспышка продолжалась 2 с, как считается в²⁵, и если она наблюдалась в течение 12,5 с (как это было у Камиоканде), то нейтрино обладали бы измеримой массой. Правда, Колб, Стаббинс и Тэрнер²¹ приводят временные кривые для наблюдавшихся ИМБ и Камиоканде событий с учетом ошибок в энергии (рис. 13), и если бы масса была в самом деле ненулевой, то эти линии должны были бы где-нибудь сойтись, но легко видеть, что это не так. Поэтому результаты согласуются с нулевой массой нейтрино.

Ограничениям на массу нейтрино посвящено много работ, но прежде чем судить о них, стоит изучить работу Колба и др., в которой авторы указывают на многие скрытые допущения и приходят к выводу, что «нет более надежных ограничений, чем современные лабораторные». Эти пределы таковы:

$$m_{\nu} < 18 \text{ эВ (95\%-ный уровень достоверности), Фричи и др.}^{35},$$

$$m_{\nu} < 27 \text{ эВ (95\%-ный уровень достоверности), Робертсон и др.}^{36},$$

$$20 < m_{\nu} < 45 \text{ эВ, ИТЭФ, Борис и др.}^{37}.$$

Шрамм³⁹ приходит к такому же выводу.

Все это слишком осторожно. Возможно, одна из лучших оценок — это $m_{\nu}^2 = 4 \cdot (+28, -63) \text{ эВ}^2$, полученная Эбботом, Де-Рухолой и Уокером³⁹.

11.2. О г р а н и ч е н и я н а н е й т р и н н ы е о с ц и л л я ц и и и э ф ф е к т М и х е е в а — С м и р н о в а — В о л ь ф е н с т е й н а (МСВ). Для нормальных нейтринных осцилляций СН 1987А мало что при-

бавляет к уже известному, если не делать предложений, зависящих от модели. Для эффекта МСВ⁴⁰, где рассматриваются осцилляции в веществе, в работе⁴¹ вычисляется, что $m_\nu < 7 \cdot 10^{-22}$ эВ, если $\sin^2 2\theta \geq 10^{-4}$, но эти расчеты очень зависят от модели.

11.3. Предел на электрический заряд электронного антинейтрино. Барбьеллини и Коккони⁴² указывают, что если бы нейтрино обладали некоторым электрическим зарядом, то из-за наличия магнитных полей между БМО и Землей длины их траекторий зависели бы от их энергии, а потому их прилет наблюдался бы с разбросом. Для

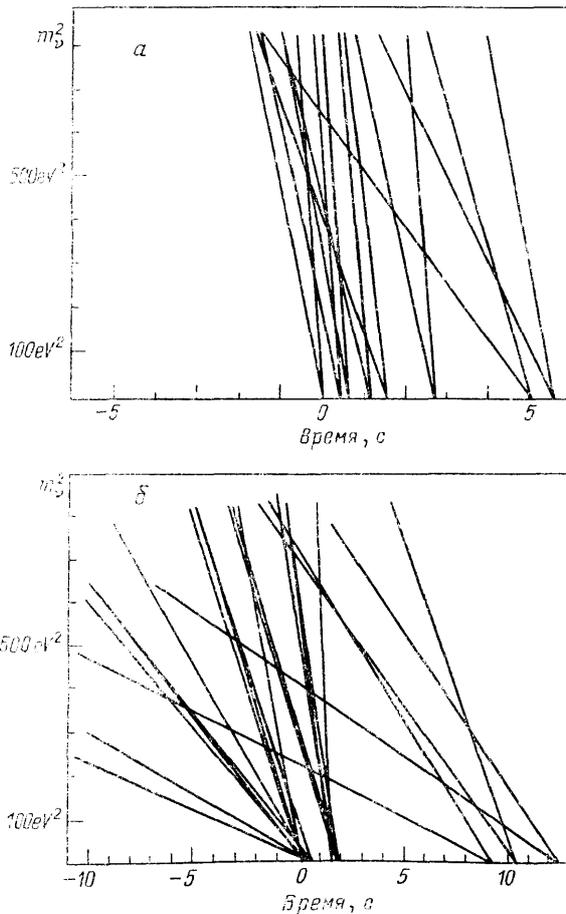


Рис. 13. Вычисленные смещения по времени для нейтринных событий в источнике как функции квадрата массы нейтрино m_ν^2 для ИМБ (а) и Камиоканде (б)

межгалактического магнитного поля 10^{-9} Гс получается, что отношение заряда нейтрино к заряду электрона $q/e \leq 2 \cdot 10^{-15}$, а для магнитного поля нашей Галактики 10^{-6} Гс $q/e \leq 2 \cdot 10^{-17}$, что существенно лучше прежнего предела 10^{-13} .

11.4. Магнитный момент электронного антинейтрино. Волошин и др.⁴³ высказали идею, что проблему солнечных нейтрино можно было бы решить, если бы нейтрино обладали большим магнитным моментом. Однако Бэрроуз и Латтимер⁴⁴ отмечают, что отсутствие нейтринных событий высокой энергии исключает эту возможность, если допустить, что магнитное поле нейтринной звезды достигает $\sim 10^{12}$ Гс *).

11.5. Время жизни массивных нейтрино. Дар и Дадо⁴⁵ отмечают, что отсутствие наблюдаемого гамма-излучения после нейтринной вспышки позволяет найти ограничения на время жизни тяжелых

нейтрино, распадающихся в ν_e . В частности, это ликвидирует пробел, оставшийся после экспериментов на ускорителях и предыдущих астрофизических и космологических наблюдений, для нейтрино с массой, меньшей 100 МэВ.

11.6. Число сортов нейтрино. Полная энергия, высвобождаемая в виде нейтрино, хорошо известны в теории. Если бы число сортов нейтрино превышало 3, то его доля, приходящаяся на каждый вид, нап-

*) М. Г. Волошин (Препринт ИТЭФ-46. Москва, 1988) показал, что как раз такое поле при $\mu_\nu = 10^{-11}$ μ_B достаточно для резонансного перехода правых нейтрино в левые и противоречия с наблюдениями нет. (Примеч. пер.)

пример на электронные антинейтрино, была бы снижена, и поэтому в расчетах полной энергии нейтрино согласия между теорией и экспериментом уже бы не было. Эллис и Олив⁴⁶ предлагают предел на число сортов нейтрино ≤ 6 , Шрамм³⁸ — ≤ 7 , а Шэффер и др.²² получают ≤ 4 .

11.7. Тест специальной теории относительности. Нейтрино и первые лучи света от СН 1987А достигли Земли с разницей в несколько часов. Это говорит о том, что нейтрино и фотоны имеют одинаковую предельную скорость с точностью до $2 \cdot 10^{-9}$, согласно Лонго⁴⁷ или с точностью $1 \cdot 10^{-8}$ по более консервативной оценке Стодольского⁴⁸. Если бы радиус фотосферы предсверхновой удалось установить поточнее, то можно было бы улучшить этот предел для предельных скоростей частиц с различными свойствами.

11.8. Тест происхождения космических лучей высоких энергий. Березинский и Гинзбург⁴⁹ утверждают, что космические лучи высоких энергий, по-видимому, рождаются в сверхновых. Сильные магнитные поля, быстрое вращение и возможный аккреционный диск создают условия для ускорения до высоких энергий. Авторы предлагают и обсуждают эксперименты для поиска космических лучей следующих видов:

- а) гамма-лучи 50—100 МэВ;
- б) гамма-лучи с энергией > 1 ТэВ;
- в) широкие атмосферные ливни с энергией гамма-лучей $> 10^3$ ТэВ.

Предсказаны значения потоков космических лучей; согласно оценкам, их можно будет наблюдать через год-два.

11.9. Ограничения на константы связи. Исходя из данных по нейтрино, Эллис и Олив⁴⁶ исключают легкие псевдоскалярные бозоны с константами связи с электронами в пределах $10^{-27} < \alpha_e < 10^{-24}$, а также расширяют астрофизические ограничения на константу аксионного распада до $f_a \geq 4 \cdot 10^9$ ГэВ. Колб и Тэрнер⁵⁰ наложили ограничения на константы связи нейтрино с постулируемыми частицами космического фона; в частности, связь электронного нейтрино с майораном должна быть меньше, чем $\sim 10^{-3}$, безразмерная связь с безмассовым векторным полем также должна быть меньше 10^{-3} , а для константы связи g с массивным бозоном массы M должно выполняться $g/M < 12$ МэВ⁻¹.

12. КАКОВА ЧАСТОТА ВСПЫШЕК СВЕРХНОВЫХ?

Ответить на этот вопрос нелегко, поскольку многое зависит от детектора. Так, сверхпроводящие детекторы гравитационных волн должны бы регистрировать сверхновые в нашей Галактике, радиус которой равен ~ 30 000 световых лет, и, возможно, в БМО на расстоянии 160 000 световых лет, если звезда достаточно велика, а коллапс достаточно асимметричен для возникновения большого квадрупольного момента. Но им будет очень трудно обнаружить сверхновую в ближайшей к нам гигантской галактике — туманности Андромеды — на расстоянии 2 200 000 световых лет. Нейтринные детекторы проявили работоспособность на расстояниях БМО, но только для СН II типа, дающих большой поток нейтрино. Оптические и другие электромагнитные детекторы могут действовать на гораздо больших расстояниях, но если сверхновая появится в далеких частях Млечного Пути нашей Галактики, то ее нельзя будет наблюдать в видимом свете из-за пыли.

По многочисленным оценкам примерно одна сверхновая приходится на одну гигантскую галактику раз в 30 лет. Недавно С. ван ден Берг и Р. Мак-Клор из Астрофизической обсерватории Канадского доминиона восполь-

зовались данными преподобного Э. О. Ивенса из Австралии, который частным образом и довольно равномерно обзревает небеса в поисках сверхновых и достиг в этом деле выдающихся успехов. За период в пять лет он провел 50 403 наблюдения в 1017 галактиках и первым обнаружил II сверхновых, причем открыл бы еще 4, если бы другие не увидели их раньше. Авторы подсчитали, что за 100-летний период в галактике с массой $10^{10} M_{\odot}$ должно появиться 0,7 и 1,1 СН I и СН II соответственно. Для нашей Галактики с $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ это дает частоту в 1 сверхновую за 28 лет. Однако есть указания на то, что только одна СН из пяти порождает нейтронную звезду.

С другой стороны, пример СН 1987А показывает, что сверхновая с нейтронной звездой может быть гораздо более тусклой, чем ожидалось ранее, а это увеличивает число СН, от которых приходят нейтринные и гравитационные сигналы. Отметим также, что Сверхновая Кассиопея А, расположенная на расстоянии всего 9000 световых лет, была зарегистрирована лишь одним наблюдателем, Джоном Флемстидом, в 1680 г., — по-видимому, это была СН II, порожденная звездой Вольфа — Райе, т. е. компактной горячей голубой звездой, взрыв которой обладал выраженной асимметрией.

С учетом всех этих факторов, а также результатов исследований в рентгеновском и радиодиапазонах можно прикинуть, что в нашей Галактике и поблизости от нее сверхновая II типа появляется один раз в 30 — 50 лет.

13. выводы

а) Имеет место впечатляющее согласие между количеством, энергией и временем регистрации нейтрино и теорией сверхновых II типа, порождающих нейтронную звезду в ходе гравитационного коллапса. Это — начало нейтринной астрономии.

б) Вопреки ожиданиям, предсверхновой СН 1987А был голубой, а не красный сверхгигант.

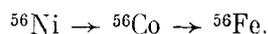
в) Можно сделать вывод, что предсверхновая была звездой массой в 15 — 20 солнечных, которая затем потеряла около половины своей массы за 10^6 лет за счет звездного ветра. Хотя большая часть водорода была выметена и стала околовзвездным веществом, некоторое его количество сохранилось к моменту взрыва сверхновой.

г) Если модифицировать модель с учетом вышеуказанного вида предсверхновой, то получается хорошее согласие теории и наблюдений в видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

д) Полученные результаты и согласие с теорией служат подтверждением того, что тяжелые элементы образуются в соответствии с теорией нуклеосинтеза.

е) Метод спекл-интерферометрии дает некоторые свидетельства в пользу существования нового объекта или спутника СН 1987А, который должен быть с нею связан, но находится на таком расстоянии, что приходится предполагать скорость, равную по меньшей мере 0,4 световой.

ж) Кривая светимости показывает, что световое излучение после взрыва в основном обусловлено цепочкой распадов



з) Не исключено, что аккреция вещества на нейтронную звезду оказалась достаточной для возникновения черной дыры. Нужно подождать до тех пор, пока расширяющаяся оболочка остатков не станет достаточно прозрачной для наблюдения рентгеновских и гамма-лучей.

и) Нейтринный сигнал, наблюдавшийся на Монбланской установке с высокой статистической значимостью, не согласуется с совокупностью других данных, которые очень хорошо согласуются между собой и теорией. Поневоле приходится заключить, что судя по информации в целом, этот сигнал не связан с СН 1987А.

14. ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ СВЕРХНОВЫХ

Упрощенное описание СН II дано в главе 4. Здесь мы рассмотрим их подробнее и укажем на некоторые проблемы.

Чандрасекаровское условие устойчивости объекта по отношению к гравитационному сжатию выглядит так:

$$\text{масса} < 1,46 (2Y_e)^2 \cdot M_{\odot},$$

где Y_e — число электронов на один барион. При равных количествах протонов и нейтронов $Y_e = 1/2$, и поэтому, если масса ядра $> 1,46 M_{\odot}$, оно сколлапсирует — так как полное давление, стремящееся сохранить ядро звезды, в основном определяется давлением газа вырожденных электронов.

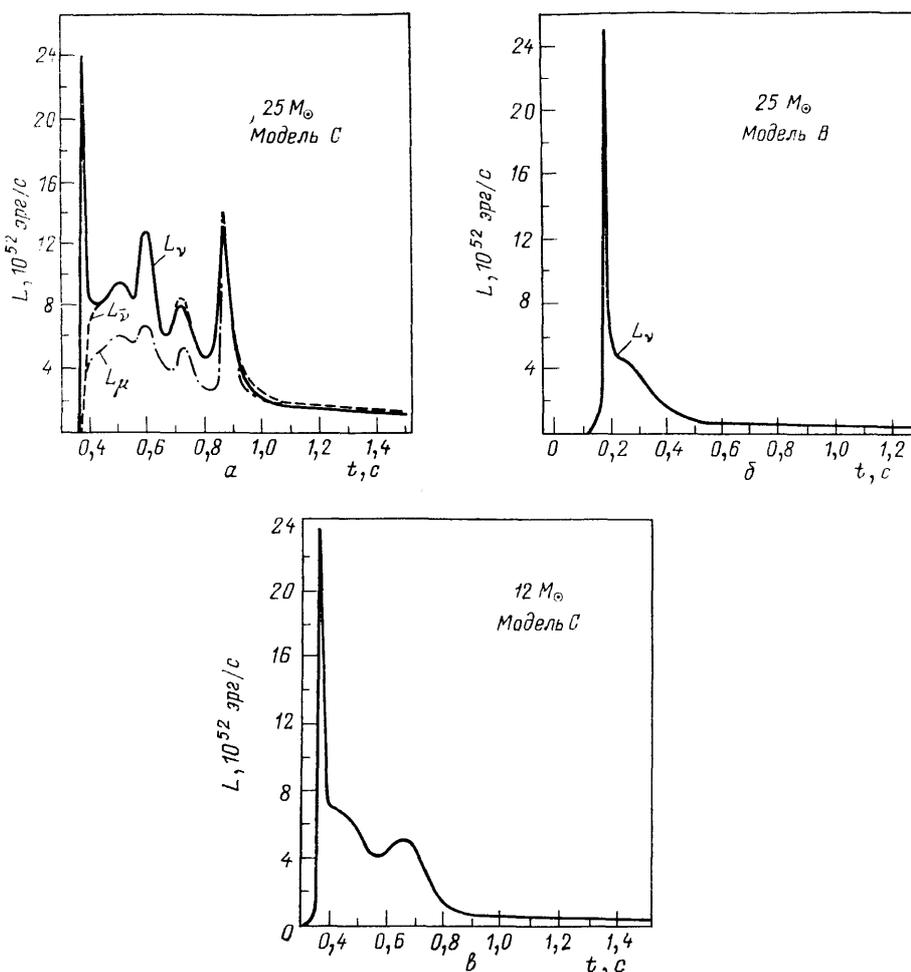


Рис. 14. Зависимость светимости электронных нейтрино от времени для звезд $25 M_{\odot}$ (а, б) и $12 M_{\odot}$ (в).

В моделях В и С скорость реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ принята в 2,5 или 3 раза больше, чем скорость 1975 г. На рис. а показаны кривые светимости для антинейтрино (штриховая линия) и для мюонных нейтрино (штрихпунктирная)

Когда масса железного ядра ($Y_e = 0,46$) становится больше $1,2 M_{\odot}$, начинается сжатие. После того как плотность достигает 10^9 г/см³, фермиевская энергия электронов становится равной ~ 5 МэВ и они могут взаимодействовать с ядрами, в результате чего уменьшается количество электронов и давление электронного газа. Это падение давления и превращает сжатие в коллапс. Кроме того, ядра железа частично разрушаются, выде-

ляя p -, n - и альфа-частицы, а поскольку энергия при этом поглощается, внутренняя энергия уменьшается, что способствует ускорению коллапса. Протоны захватывают все больше электронов, обилие электронов, Y_e , продолжает уменьшаться и может упасть от начального значения 0,46 до значений, меньших 0,4. Поэтому в процессе сжатия чандрасекаровская масса убывает, так что окончательные размеры сколлапсировавшего ядра с трудом поддаются простой оценке — они зависят от многих факторов, в частности, от исходных размеров звезды. Одна из самых больших неопределенностей при подсчете массы коллапсирующего ядра — скорость реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$. Есть подозрения, что измерения 1975 г. дали заниженное значение.

В таблице 3 приведены расчеты Мэйле, Уилсона и Шрамма²⁶ для массы звезды от 12 до $100 M_{\odot}$ и для трех различных скоростей реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$. Мы видим, что масса нейтронной звезды меняется в пределах от 1,26 до

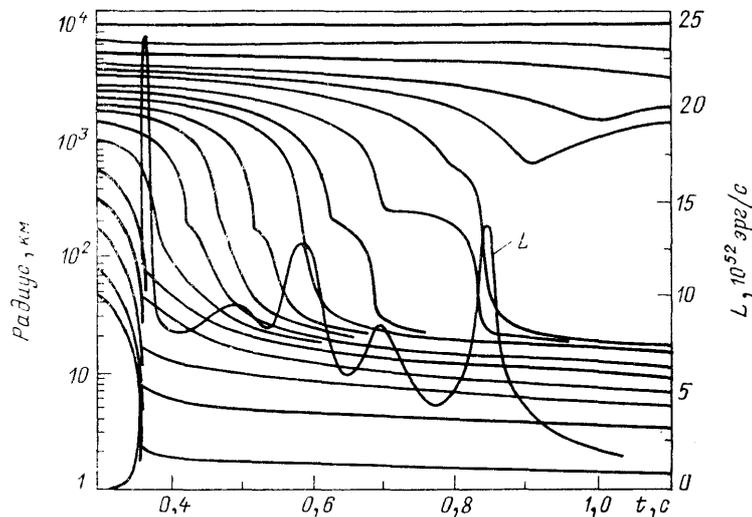


Рис. 15. Траектории лагранжевых точек в модели S , $25 M_{\odot}$, табл. III, а также мощность излучения электронных нейтрино (всплеск в момент 0,37 с уменьшен вдвое)²⁶

1,96 солнечных, что может привести к образованию черной дыры. Энергия связи может меняться от $1,26 \cdot 10^{53}$ до $8,6 \cdot 10^{53}$ эрг. Эти границы несколько шире, чем у некоторых других авторов, и это может повлиять на некоторые выводы, такие как вывод о числе сортов нейтрино.

На рис. 14, $a - \delta$ показано влияние массы предсверхновой и скорости реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ на вид нейтринного спектра. Можно видеть, что длительность нейтринного импульса и наличие осцилляции зависят от сделанных предположений.

Вернемся к механизму взрыва сверхновой II типа, описанному в п. 4. После коллапса нейтронная звезда сжимается слишком сильно, происходит отдача и возникает ударная волна, скорость которой может достигать 40 000 км/с. Одновременно внутренние слои остатка устремляются в область пониженной плотности со скоростями, примерно равными скорости звука, которая в столь плотном веществе может достичь 20 000 км/с. Если звезда не очень массивна, от ~ 8 до $16 M_{\odot}$, то ударная волна может вытолкнуть оболочку. Но в более массивной звезде ударная волна может быть замедлена и остановлена, и тогда наблюдать взрыв будет нелегко. В течение какого-то времени это представляло основную теоретическую проблему. Теперь подсчитано, что нейтрино, испущенные при коллапсе ядра, взаимодействуют с падающим внутрь железом, поглощаются и испускаются вновь, тем са-

мым разогревая его. От этого давление увеличивается и ударная волна вновь начинает двигаться.

Это проиллюстрировано на рис. 15, взятом из работы Мэйле и др.²⁶, для звезды $25 M_{\odot}$, модель С из табл. III. Коллапс ядра происходит в момент $\sim 0,38$ с, а ударная волна возобновляет движение в $\sim 0,8$ с. Показана также мощность излучения электронных нейтрино. Можно видеть, что в потоке

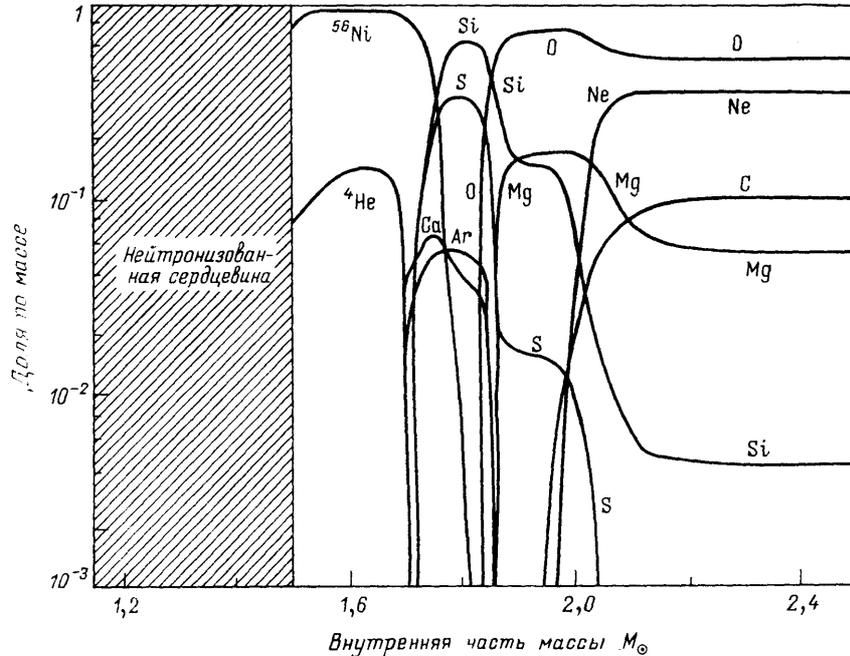


Рис. 16. Распределение элементов во внутренней части массы $2,5 M_{\odot}$ сверхновой массы $25 M_{\odot}$ (см. текст⁵²)

нейтрино предсказываются колебания. Данные Камиоканде анализировались на предмет выявления таких колебаний, но статистика слишком бедна. Если бы сверхновая II типа взорвалась в нашей галактике, то статистики нейтрино должно было бы хватить для решения этой трудной проблемы.

Сложность процесса взрыва СН проиллюстрирована и на рис. 16, на котором Вусли и Уивер⁵² приводят распределение элементов во внутренней области массы $2,5 M_{\odot}$ в звезде $25 M_{\odot}$. Следует отметить, что ударная волна может зажечь Si, O и Ne.

15. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРЕДСКАЗАНИЯ

15.1. Проявления молекул в ИК спектрах. В ИК спектрах, полученных с помощью 3,6-метрового телескопа ESO⁵³ и в лаборатории Kuiper Airborne⁵⁴, имеются сильные эмиссионные линии, в том числе CO и, возможно, SiO. По оценкам⁵³ температура CO равна ~ 2000 К, а масса CO равна $\sim 0,0004 M_{\odot}$. Получены также температура железа 4000 К и масса $0,04 M_{\odot} \text{ Fe}^+$.

15.2. Межзвездное вещество на луче зрения. Свет, излучаемый СН 1987А, может возбуждать вещество, расположенное на луче зрения между нею и Землей, а это позволяет получить информацию о межзвездном веществе. Исследовав линии кальция, Магейн⁵⁵ обнаружил следы остатков предыдущего взрыва сверхновой в БМО. На Англо-Австралийской обсерватории⁵⁶ в спектре поглощения впервые наблюдались проявления

[Fe X] (железа, лишеного 9 электронов). Это указывает на существование области разложения, состоящего из температуры 10^6 К и полной массой более $10^7 M_{\odot}$.

При помощи 1,4-метрового телескопа ESO К. Бадалило и др.⁵⁷ обнаружили диффузные межзвездные полосы. Происхождение некоторых из них они связывают с БМО, а других — с нашей Галактикой.

15.3. Анализ видимого, рентгеновского и гамма-излучения. В работе⁵⁸ высказано предположение, что болометрическая кривая блеска отклоняется от линейной скорости распада, ожидаемой при распаде ^{56}Co , но это решительно опровергается результатами из Серро-Тололо⁵⁹ и из Южно-Африканской астрономической обсерватории⁶⁰, которые говорят, что между 147 и 257 сутками время экспоненциального распада лежало между 106 и 115 сутками в согласии со средней продолжительностью жизни ^{56}Co в 111 суток. Это означает, что основным источником

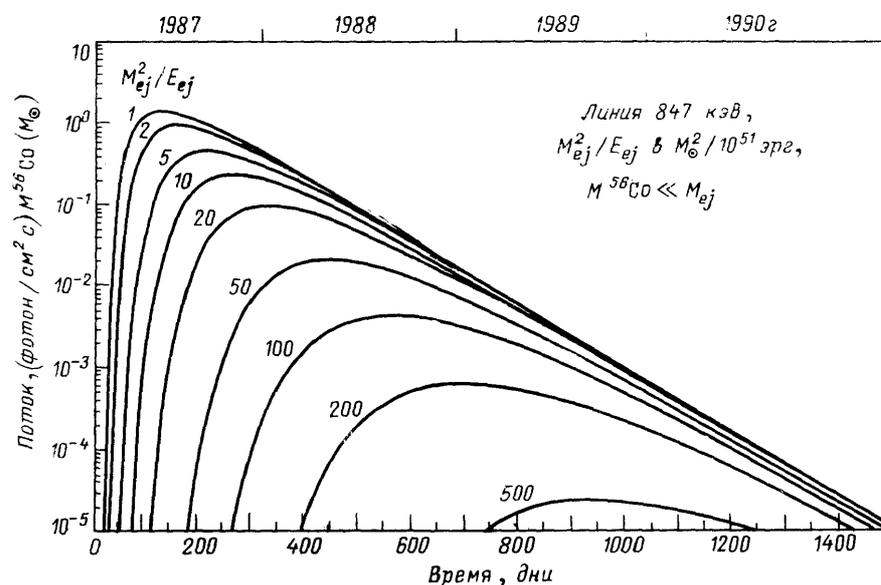


Рис. 17. Предсказанное изменение во времени для излучения на линии 847 КэВ от ^{56}Co в SN 1987A⁶³

энергии служит радиоактивный распад. Анализ данных спутника «Ginga» в рентгене⁶¹, проведенный Ито и др.⁶¹ и Масаи и др.⁶², свидетельствует о том, что тепловое рентгеновское излучение порождается взаимодействием расширяющегося выброса с околозвездным веществом, а более жесткое рентгеновское излучение связано с гамма-излучением от радиоактивного распада, деградировавшим под действием эффекта Комптона. Подробные вычисления показывают, что часть из $0,07 M_{\odot} ^{56}\text{Ni}$, распадающегося в ^{56}Co , попала во внешние слои выбросов, что позволило наблюдать рентген на «Ginga» раньше. Можно ожидать, что с расширением и уточнением остаточной оболочки поток рентгеновского излучения будет ослабевать и в конечном счете будет наблюдаться гамма-излучение от распада ^{56}Co , в частности, линия 847 КэВ. На рис. 17 иллюстрируются результаты детальных расчетов потока различных гамма-лучей как функции времени и отношения массы выбросов к их энергии, проделанных Чэном и Лингенфелтером⁶³. Сравнение результатов за несколько следующих лет с теорией позволит определить массу предсверхновой.

Франссон и Шевалье⁶⁴ делают предсказания относительно дальнейшего излучения в инфракрасном, оптическом, рентгеновском и гамма-диапа-

зонах. По относительной силе некоторых линий можно будет найти массу предсверхновой. Примерно на 700-е сутки произойдет ИК катастрофа и температура упадет до нескольких сотен К. В течение нескольких лет рентгеновское излучение будет идти в основном от вырождения радиоактивных источников, затем это излучение затухнет и сменится рентгеновским излучением от центральной нейтронной звезды.

16. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхновая 1987А, — несомненно, важнейшее событие в астрофизике и вообще в истории науки. Для физиков, изучающих частицы, значение его особенно велико. Это событие побуждает их сотрудничать с астрофизиками и позволяет оценить огромную работу, которую те сумели проделать. Я хотел бы выразить свою признательность астрофизикам за многочисленные и интересные беседы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shelton I.//International Astronomical Union Circular (IAUC). No. 4316.
2. Gerrard G., McNaught R. H.//IAUC. No. 4316.
3. IAUC. No. 4323.
4. IAUC. No. 4338.
5. Amaldi E.//Moriond Conference 1987; Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1325.
6. IAUC. No. 4318.
7. IAUC. No. 4317.
8. IAUC. No. 4321.
9. IAUC. No. 4326.
10. IAUC. No. 4327.
11. Ginga: Dotani T. et al.//Nature. 1987. V. 330. P. 230.
12. «Мир»: Sunyaev R. et al.//Ibidem. P. 227.
13. Hanuschik R. W., Dachs J.//Astron. and Astrophys. 1987. V. 182. P. L29; ESO Workshop.— Garching-bei-München, July 6—8, 1987.
14. Turtle A. J. et al.//Nature. 1987. V. 327. P. 38.
15. Кампоканде II: Hirata K. et al.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 1490.
16. IMB: Bionta R. N. et al.//Ibidem. P. 1494.
17. Монблан: Aglietta M. et al.//Europhys. Lett. 1987. V. 3. P. 1315.
18. Баксан: Алексеев Е. Н. и др.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 461.
19. De Rujuła A. Preprint. CERN/TH.4702.— Geneva, 1987.
20. Монблан: Aglietta M. et al.//Europhys. Lett. 1987. V. 3.
21. Kolb R., Stebbins A. J., Turner M. S.//Phys. Rev. Ser. D. 1987. V. 35. P. 35.
22. Schaeffer R. et al.//Nature. 1987. V. 300. P. 142.
23. Кампоканде: Oyama Y. et al.//Intern. Centre for Elementary Particle Physics (Tokyo) report. UT-ICEPP 87-05.— 1987.
24. Chevalier R. A., Fransson C.//Nature. 1987. V. 328. P. 44.
25. Woosley S. E. et al.//Astrophys. J. 1987. V. 318. P. 664.
26. Mayle R., Wilson J. R., Schramm D. N.//Astrophys. J. 1987. V. 318. P. 288.
27. Hillebrandt W. et al.//Astron. and Astrophys. 1987. V. 180. P. L20.
28. Wampler A. et al.//Ibidem. V. 182. P. L51.
29. Karovska M. et al.//IAUC. Nos. 4382, 4440.
30. Nisenson P. et al.//Astrophys. J. 1987. V. 320. P. 415.
31. Matcher S. J. et al.//IAUC. Nos. 4391, 4413.
32. Meikle W. P. S. et al.//Nature. 1987. V. 328. P. 608.
33. Colgate S. A. et al. Yale preprint YTP-87-30.— 1987.
34. IAUC. No. 4417.
35. Rees M.//Nature. 1987. V. 328. P. 207.
36. Hillebrandt W. et al. Submitted to Astron. and Astrophys. Lett.
37. Colgate S. A., Petochek A. G.//Bull. APS. April. 1987.
38. Fritschi M. et al.//Phys. Lett. Ser. B. 1987. V. 173. P. 485.
39. Robertson R. G. H. et al.//Telemark Conference. March 1987.
40. Борис С. Д. и др.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 42. С. 130.
41. Schramm D. Fermilab-Pub-87/91-A.— 1987.
42. Abbott L. F., De Rujuła A., Walker T. P. CERN/TH. 4799.— Geneva, 1987.

40. Mikheyev S. P., Smirnov A. Yu.//Nuovo Cimento. 1987. V. 96. P. 17.
Wolfenstein L.//Phys. Rev. Ser. D. 1987. V. 17. P. 2369.
41. Notzold D.//Report Max-Planck Inst. MPI—PAE/Ph. Th. 09.— Munich, 1987.
42. Barbellini G., Cossoni G.//Nature. 1987. V. 329. P. 21.
43. Волошин М. Б., Высоцкий М. И., Окунь Л. Б.//ЖЭТФ. 1986. Т. 64. С. 446.
44. Burrows A., Lattimer J. M.//Astrophys. J. 1987. V. 318. P. L63.
45. Dar A., Dado S.//Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 2968.
46. Ellis J., Olive K. //Phys. Lett. Ser.B. 1987.V. 198. P. 525.
47. Longo M. J. Michigan preprint.— June 1987.
48. Stodolsky L., Max-Planck Inst. Report MPI-PHE/Ph. Th. 48.— Munich.
49. Berezhinsky V. S., Ginzburg V. L.//Nature. 1987. V. 329. P. 807.
50. Kolb E. W., Turner M. S. Fermilab pub. 87/110-A.— 1987.
51. Burrows A.//Astrophys. J. 1987. V. 318. P. L57.
52. Woosley S. E., Weaver T. E.//Essays in Nuclear Astrophysics/Eds C.A.Barnes, D. D. Clayton, D. N. Schramm.— Cambridge: University Press, 1982.— P. 377.
53. IAUC. No. 4484.
54. IAUC. No. 4500.
55. Maugain P.//Nature. 1987. V. 329. P. 606.
56. Sky and Telescope. Nov. 1987. P. 478.
57. Badadilo C. et al.//Astron. and Astrophys. 1987. V. 182. P. L59.
58. IAUC. No. 4482.
59. IAUC. No. 4486.
60. IAUC. No. 4485.
61. Itoh M. et al.//Nature. 1987. V. 330. P. 233.
62. Masai K. et al.//Ibidem. P. 235.
63. Chan K. W., Lingenfelter R. E.//Astrophys. J. 1987. V. 318. P. L51.
64. Fransson C., Chevalier R. A.//Ibidem. V. 322. P. L15.
65. Murdin P. L. Supernovae.— Cambridge: University Press, 1986.