

Она может представлять интерес для широкого круга физиков и астрофизиков.

*В. А. Догель*

524.352(049.3)

### ОБОЛОЧКИ СВЕРХНОВЫХ

*Supernova Shells and Their Birth Events: Proceedings.* Bad Honnef, FRG, 1988/Ed. W. Kundt.— Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer-Verlag, 1988.— 253p.— (Lecture Notes in Physics. V. 316).

Книга представляет собой сборник материалов рабочего совещания, состоявшегося 7 — 11 марта 1988 г. в Физическом центре Бад-Хоннеф, ФРГ. На Совещании рассматривалось современное, во многом противоречивое состояние знаний о происхождении, эволюции и морфологии расширяющихся оболочек сверхновых (ОСН). Прогресс в методах наблюдений, с одной стороны, и в моделировании процессов расширения и излучения ОСН — с другой, заставляет, как отмечает в предисловии редактор издания и один из инициаторов Совещания W. Kundt, «помолодеть» эту имеющую уже устоявшиеся традиции отрасль астрофизики. Вспышка СН 1987А в Большом Магеллановом Облаке значительно повысила интерес к проблеме ОСН и оказала несомненное влияние на Совещание.

Материалы сборника сгруппированы в 4 главы: 1. Оболочки сверхновых. Общие положения; 2. Оболочки сверхновых. Особые объекты; 3. Взрывы сверхновых; 4. Сверхоболочки и частицы высоких энергий. Открывает гл. 1 работа W. Kundt, в которой автор выдвигает предположение о фрагментации оболочки сверхновой на самых ранних стадиях взрыва («осколочная бомба»). В качестве наблюдательных обоснований для этой гипотезы автор привлекает: 1) пекулярности морфологии некоторых ОСН, в частности Крабовидной туманности и Кассиопеи А («дымовые трубы»); 2) «бочкообразное» распределение масс в ОСН; 3) наличие во многих ОСН выбросов за пределами границ оболочки (на расстояниях до 3 радиусов оболочки); 4) наличие в некоторых ОСН конденсаций в форме жгутов; 5) проблему несоответствия ожидаемого максимального возраста ОСН статистике ОСН; 6) существенное превышение длительности стадии свободного расширения некоторых ОСН над ожидаемой в рамках подхода Седова—Тейлора. В случае, если предположение о фрагментации ОСН справедливо, должен быть пересмотрен подход к моделированию динамики расширения ОСН и к оценкам энергии сверхновой, уходящей на образование ОСН (по мнению автора, кинетическая энергия фрагментов может превышать  $10^{51}$  эрг). Добавим от себя, что предположение о крупномасштабной неоднородности оболочки СН 1987А высказывалось Р. А. Сюняевым для объяснения необычно раннего обнаружения рентгеновского излучения от СН 1987А. Фрагментарность ОСН может привести также к более раннему обнаружению пульсара — остатка СН 1987А, если он существует.

G. Srinivasan и D. Bhattacharya приводят результаты расчетов эволюции светимости ОСН, состоящей из плериона и собственно оболочки. Светимость плериона определялась «подкачкой» энергии от пульсара, светимость оболочечного компонента — взаимодействием с межзвездной средой и процессами в самой оболочке. Величина выброшенной при взрыве СН массы, начальная скорость выброса, напряженность магнитного поля и период пульсара, а также плотность межзвездной среды задавались как свободные параметры. Выводы авторов сводятся к тому, что значения исходных параметров существенным образом определяют эволюцию ОСН: при «слабых» взрывах (энерговыведение в ОСН меньше

$10^{50}$  эрг) молодые ОСН проявляют себя как яркие плерионы, постепенно превращаясь в ОСН оболочечного типа. При «сильных» взрывах (энерговыведение порядка  $10^{51}$  эрг) в остатках с быстро (период порядка 5 мс) и медленно (период больше 100 мс) вращающимися пульсарами эволюция также происходит от преимущественно плерионного к оболочечному типу ОСН (в качестве примера рассматривается MSH 15—52). Однако в «крабоподобных» остатках (период пульсара порядка 20 мс, «сильный» взрыв, магнитное поле  $\sim 10^{12}$  Гс) светимость плериона всегда будет доминировать. По мнению авторов, из отсутствия плерионов в большинстве ОСН следует, что основная часть нейтронных звезд рождается с большими периодами вращения.

Статистика ОСН обсуждается в работах D. A. Green и Sidney van den Berg. Van den Berg демонстрирует тесную корреляцию между распределениями Галактических радио-ОСН, СО-эмиссии, а также эмиссии в инфракрасном и в гамма-диапазонах и приходит к выводу, что распределение ОСН тесно связано с распределением межзвездного газа. Поэтому оценка частоты вспышек сверхновых в Галактике, основанная на статистике ОСН, может быть занижена за счет вспышек вне галактической плоскости, не дающих заметных ОСН. D. A. Green обсуждает эффекты наблюдательной селекции, связанные не только с ограниченной чувствительностью, но и с конечным угловым разрешением приборов. За счет этих эффектов не наблюдаются как слабые, так и яркие, но с небольшими угловыми размерами ОСН, что также может снизить частоту вспышек СН в Галактике. R. G. Strom предлагает подход к определению относительных расстояний до остатков исторических СН 1 типа (СН1), основанный на использовании соотношения Седова—Тейлора между радиусом остатка  $r$ , энергией взрыва  $E$ , плотностью среды  $N$  и временем расширения  $t$ :  $r \propto (E/N)^{1/5} t^{2/5}$ . W. Reich и E. Fürst приводят данные по статистике недавно обнаруженных галактических ОСН. Добавление новых данных существенно не изменяет пространственное распределение галактических ОСН. В другой работе, представленной на данном совещании, E. Fürst и W. Reich приводят обзор данных по вариациям спектральных индексов в радиодиапазоне, особое внимание уделив ОСН S147. По мнению авторов, радиоизлучение S147 показывает существование двух компонент: мелкомасштабной, привязанной к оптическим волокнам, и крупномасштабной, которая интерпретируется как излучение газа. Обсуждаются различные подходы к интерпретации излома спектра в районе 1 ГГц.

Различные аспекты динамики и механизмов излучения ОСН рассматриваются в работах W. Brinkmann, S. A. E. G. Falle и J. R. Giddings, а также D. E. Innes, основанных на компьютерном моделировании. Как отмечают все эти авторы, имеющиеся знания об ОСН недостаточны для адекватного моделирования. W. Brinkmann подчеркивает необходимость существенного повышения пространственного разрешения рентгеновских детекторов для получения физически значимых данных о природе, химическом составе и механизмах излучения остатков как СН1, так и СН2. Показывается также важность учета эффектов неравновесной ионизации. Falle и Giddings моделировали взаимодействие ударной волны с неоднородностями межзвездной среды. Основываясь на полученных результатах, авторы подтверждают предположение о происхождении нитевидной структуры Петли Лебеда за счет дифракции и рассеяния первичной ударной волны на крупномасштабных (порядка 1 пк) неоднородностях. D. E. Innes приходит к выводу о сходстве эмиссии неадиабатической радиационно-неустойчивой ударной волны и излучения «стандартной» устойчивой волны с меньшей скоростью.

В следующей главе рассматриваются отдельные объекты. R. Bandiera обсуждает выдвинутую им ранее (в 1987 г.) гипотезу о том, что Сверхно-

вая Кеплера относится к типу 1b и имеет предшественником звезду типа Вольфа—Райе в двойной системе с нейтронной звездой. Результатом вспышки СН может быть рождение двойной системы из нейтронных звезд. R. G. Strom рассматривает пекулярный остаток СТВ80, демонстрирующий наличие почти всех составляющих ОСН. D. K. Milne и др. обсуждают данные наблюдений на частоте 843 МГц остатков  $G316.3-0.0$  и  $G332.4+0.1$ . Оба остатка имеют оболочечную структуру с выбросами, которые могут представлять собой либо результат проникновения плазмы в полости межзвездной среды, либо тороидальную магнитоплазменную структуру. R. G. Arendt, E. Dwek и R. Petre приводят данные наблюдений в инфракрасном диапазоне объекта Корма А и оценивают параметры этого остатка. D. A. Green сообщает о наблюдениях с высоким угловым разрешением ( $3''$ ) в радиодиапазоне ОСН  $G11,2-0,3$ , которые показывают, что оболочка имеет выбросы и напоминает Cas A.

M. de Muizon и др. обсуждают новые данные в радиодиапазоне о пекулярном галактическом объекте  $G70.7+1.2$ , который, по мнению авторов, представляет собой радиооболочку. W. Reich, N. Junkes и E. Fürst сообщают об открытии компактного молекулярного облака в направлении  $G70.68+1.20$ . Плотность облака более  $1000 \text{ см}^{-3}$ , диаметр около 0,55 пк и дальность — около 5,5 кпк. Авторы считают, что имеются веские основания связывать этот объект с  $G70.68+1.20$ . Те же авторы сообщают об открытии 4 новых галактических ОСН в радиодиапазоне на волне 11 см. Обнаружено также, что около 50% известных остатков имеют в этом диапазоне высокую степень поляризации. H. Greidanus и R. G. Strom сообщают данные наблюдений поля  $7' \times 7'$  в Петле Лебеда в линиях  $H_\alpha$  и [OIII]. Угловое разрешение составляло  $7''$ . Наблюдения проводились с целью определения кинематических характеристик оптических компонент. Авторы интерпретируют наблюдения в линии [OIII] как указание на существование тонкого газового «листа». J. J. Claas приводит результаты обработки данных наблюдений ОСН  $G292,0+1,8$  в рентгеновском диапазоне 0,05—10 кэВ. Чтобы описать эти данные в рамках модели равновесной ионизации, требуется вводить две излучающие компоненты с различными температурами — 0,5 и 2,0 кэВ, что может служить указанием на неравновесность процесса ионизации. Автор отмечает, что попытка объяснить существование низкотемпературной и высокотемпературной компонент привлечением модели с обратной ударной волной (одно из следствий подхода на базе уравнений Седова—Тейлора) приводит к значительно более высокой разности температур.

Обзор J. M. Lattimer открывает группу статей, посвященных сверхновым, в частности СН 1987А. В нем рассматриваются динамика коллапса ядер массивных звезд в конце их термоядерной эволюции и сопровождающие коллапс эффекты. В частности, особое внимание уделяется нейтринному излучению и попытке теоретического объяснения событий, зарегистрированных подземными нейтринными установками во время вспышки СН 1987А. В целом обзор интересен сжатым изложением современной теории гравитационного коллапса, проблем сброса оболочки звезды и излучения нейтрино. Отмечается, что пока не удалось вскрыть механизмы передачи в оболочку и мантию звезды энергии, достаточной для их сброса. Гидродинамическая ударная волна, возникающая при остановке сжатия звездного ядра, растрчивает свою энергию на пути к поверхности на диссоциацию ядер железа, а нейтринное давление малоэффективно из-за захвата и сравнительно медленной ( $\sim 10 \text{ с}$ ) диффузии нейтрино из прото-нейтронной звезды. Отмечается также, что динамика нейтринной светимости определяется в основном процессами диффузии нейтрино, образованных на начальной стадии коллапса, а также остыванием нейтронной звезды. Сравнивая теоретический ход кривой нейтринного блеска с временным распределением импульсов в событиях, полу-

ченных на подземных черенковских детекторах Камиоканде II и 1MB в ~7:35 UT 23 февраля 1987 г., автор приходит к выводу о регистрации этими детекторами нейтрино от коллапса, приведшего к вспышке СН 1987А. Заметим, что экспериментальная картина событий в подземных детекторах во время вспышки СН 1987А значительно сложнее, чем описывается в данном обзоре (см., например, [1]), и не дает однозначного указания на детектирование нейтрино. К недостаткам данного обзора можно отнести и полную неознакомленность автора с работами советских теоретиков. Так, концепция образования горячей нейтронной звезды, охлаждаемой нейтринным излучением, была выдвинута не в работе Burrows, Mazurek, Lattimer в 1981 г., как указывается в данном обзоре, а значительно раньше в ряде работ группы В. С. Имшенника и Д. К. Надежина, опубликованных в 70-х годах (см., например, [2]). Тогда же была получена и кривая нейтринной светимости, а также сформулирована проблема сброса оболочки СН.

W. Kundt в своей второй статье данного сборника рассматривает концепцию «магнитной пружины», которая передает в оболочку звезды энергию быстровращающейся, только что родившейся, нейтронной звезды, что приводит к взрыву СН. Отмечается, что оболочка при этом расширяется не как однородная плазма, а фрагментирует на плотные сгустки. Предлагается объяснение экспоненциального спада кривой блеска СН как результат диффузии фотонов из этих сгустков. Заметим, что данный подход может полностью изменить картину нарастания блеска СН на самых начальных стадиях взрыва по сравнению с гидродинамическими расчетами.

S. van den Berg, рассматривая спектры, статистику и пространственное распределение сверхновых типов 1b и 2, приходит к заключению, что, как СН1b, взрываются звезды с массой более 15 масс Солнца на главной последовательности, в то время как предшественники СН2 имеют на стадии главной последовательности массы от 8 до 15 масс Солнца. В то же время N. Panagia и V. G. Laidler приводят аргументы против. По их мнению, к вспышке типа СН1b приводит взрыв звезды умеренной массы — порядка 7 масс Солнца, входящей в состав двойной системы. Эта дискуссия, по нашему мнению, еще раз показывает, что в понимании природы СН разных типов, несмотря на очевидный прогресс теории, точка еще не поставлена.

N. Panagia приводит обзор результатов наблюдений СН 1987А в ультрафиолетовом диапазоне с помощью спутника IUE. Наблюдения приводят к следующим выводам: 1) радиус-взорвавшейся звезды относительно невелик, несколько десятков радиусов Солнца; 2) голубой сверхгигант Sk-69°202 класса В3I — единственный кандидат на предсверхновую; 3) наличие узких эмиссионных линий NV 1240 Å, NIV 1483 Å, HeII 1640 Å, OIII 1663 Å, NIII 1750 Å, CIII 1909 Å, появившихся после мая 1987 г., а также низкая скорость расширения излучающего газа, связанного с этими линиями (10–30 км/с), вызывают предположение о том, что Sk-69°202 прошел стадию красного сверхгиганта, и наблюдаемые компоненты являются медленно расширяющимися внешними слоями, сброшенными красным сверхгигантом в виде звездного ветра. Если последнее предположение верно, то столкновение расширяющихся со скоростью до 30000 км/с внешних слоев оболочки СН 1987А с ранее сброшенным веществом приведет к резкому увеличению интенсивности ультрафиолетового излучения в ближайшие 10 лет.

Как известно, рентгеновское излучение от СН 1987А появилось неожиданно быстро. Уже через 4 месяца после вспышки оно было обнаружено спутником Ginga и модулем «Квант» станции «Мир». Спектр излучения уходит под фотоэлектрический барьер ( $\approx 10$  кэВ), заметны его короткопериодические вариации. Для того чтобы объяснить пекуляр-

ности рентгеновского излучения от СН 1987А, R. Bandiera, F. Pacini и M. Salvati предлагают модель, в которой центральный пульсар с периодом около 20 мс «подпитывает» частично скрытый внешней оболочкой плерион. При этом внешняя оболочка состоит из хаотично движущихся фрагментов с размерами, сравнимыми на ранних стадиях расширения с диаметром оболочки. Согласно этой модели, наблюдаемая интенсивность рентгеновского излучения будет возрастать со временем примерно как  $t^{3/2}$ . Сравнивая спектры, полученные на спутнике Ginga в сентябре 1987 г. и январе 1988 г., авторы приходят к выводу о качественном согласии предложенной модели с наблюдениями.

N. Bartel приводит обзор данных, полученных с помощью радиоинтерферометра с очень длинной базой (VLBI), для 6 молодых ОСН: СН 1987А (возраст в период наблюдений около 0,01 года), СН 1980К (2,5 года), СН 1979С (3,7 года), СН1986J (возраст от 3 до 12 лет), SNR41 9+58 (возраст от 20 до 50 лет) в галактике М82 и СН ~ 1850 (возраст примерно от 60 до 200 лет) в NGC4449. Радиоинтерферометрия с межконтинентальными базами — сравнительно молодая отрасль радиоастрономии. К числу достижений VLBI автор относит: получение изображения SNR41 9+58 в другой галактике на расстоянии около 3,3 Мпк (угловое разрешение  $0",34$ ), определение скорости углового расширения и пределов на ее изменение для СН 1979С в галактике М100 из скопления галактик в созвездии Девы; измерение размеров радиооболочки СН 1987А, а также измерение расстояния до скопления в Деве и величины постоянной Хаббла (на базе измерений расстояния до М100 получено значение  $H_0 = 60 \pm 20$  (км/с)/Мпк).

P. L. Biermann обсуждает данные наблюдений компактных радиоисточников в галактике М82 и приходит к выводу, что они представляют собой старые или очень молодые остатки сверхновых, излучающие в радиодиапазоне. Распределение источников по спектральным индексам имеет два явно выраженных максимума в районе значений  $\alpha \approx -0,5$  и  $\alpha \approx -1,0$ . Природа такого распределения пока не ясна.

J. Spicker и J. V. Feitzinger рассматривают в своей работе сверхоболочки в Большом Магеллановом Облаке. Существует проблема несоответствия между наблюдениями и ожидаемыми размерами и скоростями расширения сверхоболочек. Авторы полагают, что реалистичный сценарий расширения ОСН на самых поздних стадиях их эволюции должен учитывать неоднородность межзвездной среды и возможность того, что в процессе взаимодействия ОСН с межзвездной средой внутри оболочки остаются остатки облаков и межоблачной среды, существовавших до прохождения ударной волны. ОСН инжектируют энергию в межзвездную среду на всех масштабах. L. A. Zank и H. J. Völk проводят расчет генерации космических лучей на поздних стадиях эволюции ОСН и приходят к выводу о том, что ОСН остаются наиболее вероятным источником космических лучей с энергиями до  $10^{14}$  эВ/нуклон.

В заключении можно с сожалением отметить полное отсутствие советских исследователей на рабочем совещании в Бад-Хоннефе, несмотря на активную работу в рассмотренных областях физики СН и ОСН, проводимую в нашей стране. Трудно судить, что явилось причиной (или причинами) этого обстоятельства, однако более активное участие советской стороны в Совещании было бы, без сомнения, очень полезным.

*В. Г. Рясный*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дадькин В. Л., Зацепин Г. Т., Ряжская О. Г. // УФН. 1989. Т. 158. С. 139.
2. Надежин Д. К. Нейтринное излучение при образовании горячей нейтронной звезды и проблема сброса оболочки. — Препринт ИПМ АН СССР № 26. — Москва, 1976; Astrophys. and Space Sci. 1978. V. 53. P. 131.