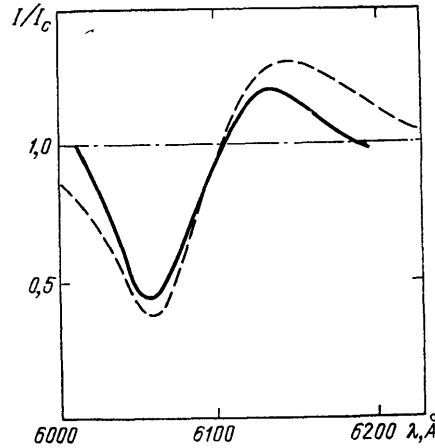


**Н. Н. Чугай.** Сверхновая в Большом Магеллановом Облаке: первый год наблюдения. Сверхновая 1987А, взорвавшаяся 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке (БМО), дает уникальную возможность ответить на многие нерешенные вопросы физики сверхновых. Впервые хорошо известна сама звезда до взрыва. Это голубой сверхгигант под номером —69 202 из каталога Сандулека. Отсутствие его признаков в ультрафиолетовом спектре SN1987А по данным спутников «Астрон»<sup>1</sup> и IUE не оставляет сомнений в том, что взорвалась именно эта звезда. По наблюдаемым фотометрическим характеристикам, полученным на основе фотографий в разных цветах, светимость звезды до взрыва составляла  $10^5$  солнечных, температура  $(12\text{—}20)\cdot 10^3$  К, радиус — 30 — 60 солнечных. Почти за сто лет наблюдений за БМО звезда не показала никаких признаков переменности. Анализ вспышки радиоизлучения SN1987А, наблюдавшегося в течение 10 дней после взрыва<sup>2</sup>, приводит к оценке темпа потери массы предсверхновой  $10^{-6} \text{—} 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ . Вероятно, за  $10^4$  лет до взрыва звезда была красным сверхгигантом и теряла вещество с более высоким темпом. Это вещество, обнаруженное по узким ультрафиолетовым линиям в спектре SN1987А в конце мая 1987 года, имеет повышенное на порядок величины содержание азота (С. Fransson, частное сообщение).

Сверхновая 1987А относится к типу II, ибо в ее спектре сильны водородные линии. Однако по ряду признаков это уникальная сверхновая для своего типа. Прежде всего, у нее необычная кривая блеска: низкая светимость в первые два месяца и затянутый период роста светимости, максимум которой достигнут ею через 86 дней (вместо одной—двух недель). Сейчас не вызывает сомнений, что особенности поведения светимости SN1987А обусловлены сравнительно малым радиусом предсверхновой по сравнению с обычными сверхновыми типа II<sup>3</sup>. Другая особенность SN1987А — сильная линия бария **Ba II 6142 Å**, которая появилась в спектре через три недели после вспышки. Высказывается мнение, что присутствие этой линии является результатом существенного избытка бария (на порядок величины) по сравнению с нормальным содержанием. При более детальном анализе выясняется, что этот вывод не имеет серьезных оснований. Наблюдаемая линия удовлетворительно воспроизводится при массе оболочки 8 солнечных, содержании бария 1/3 от солнечного, распределении плотности  $\rho \propto \exp(-v/v_0)$  (где  $v_0$  — характерная скорость, определяемая при условии, что энергия взрыва равна  $10^{51}$  эрг) (см. рисунок). Здесь предполагалась однократная ионизация Ba. Для обычных сверхновых типа II условия в оболочке, по-видимому, таковы, что барий ионизуется дважды.



Линия **Ba II 6142 Å** в спектре SN1987А 20 марта 1987 г.

Сплошная линия — наблюдение (R. M. Catchpole и др.), штриховая — расчет при массе оболочки  $8 M_{\odot}$  и содержании Ba, равном 1/3 солнечного

Подавляющая доля наблюдаемого излучения SN1987А в рассматриваемый период заключена в непрерывном спектре, который имеет почти планковский характер с температурой около 5000 К. В эмиссионных линиях, роль которых нарастает со временем, через 230 дней после взрыва было сосредоточено около 25 % излучаемой энергии<sup>4</sup>. На поздней стадии ( $t \gtrsim 100$  сут) наблюдаемое излучение обусловлено энергией радиоактивного распада  $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  (среднее время жизни  $^{56}\text{Co}$  равна 111,2 сут). Сам  $^{56}\text{Co}$  является продуктом распада  $^{56}\text{Ni}$  (время жизни 8,8 сут). Подтверждение радиоактивного механизма свечения SN1987А на поздней стадии получено в наблюдениях полного потока излучения, проведенных на Южно-африканской обсерватории. В период 130—260 дней интегральный поток убывал экспоненциально со средним временем жизни  $113 \pm 0,6$  дней, что весьма близко к среднему времени жизни  $^{56}\text{Co}$ . Для объяснения мощности свечения SN1987А на данной стадии требуется начальная масса  $^{56}\text{Ni}$  в оболочке 0,07—0,08 солнечной массы. Обнаружена и гамма-линия 847 кэВ, испускаемая ядром  $^{56}\text{Fe}$  при распаде  $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ . По данным спутника SMM поток в линии 847 кэВ с августа по октябрь 1987 года составлял  $(1,0 \pm 0,25) \times 10^{-3}$  квантов/см<sup>2</sup>с<sup>5</sup>. Он соответствует тому, что 1 % от всех квантов 847 кэВ выходит из оболочки без рассеяния. Практически не вызывает сомнений, что рентгеновское излучение с жестким спектром, обнаруженное модулем «Квант» на станции «Мир» в августе 1987 г., представляет собой комптонизованное гамма-излучение, испускавшееся при распаде  $^{56}\text{Co}$  в оболочке SN1987А<sup>6</sup>.

Интересно, что сферически-симметричные однородные модели оболочки SN1987А с центральной локализацией  $^{56}\text{Ni}$  предсказывают гораздо более позднее появление гамма-излучения от распада  $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ . В частности, модель оболочки, описывающая эволюцию потока квантов 847 кэВ (масса оболочки  $11,3 M_{\odot}$ , энергия взрыва  $10^{51}$  эрг), должна предполагать перемешивание  $^{56}\text{Ni}$  более чем в шести солнечных массах вещества

оболочки. Другая возможность — отклонение формы оболочки от сферически-симметричной. Здесь следует сказать о том, — что поляризационные наблюдения показывают наличие заметной линейной поляризации в линиях  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  и  $NaI\ 5892\ \text{\AA}$  (до 2 %). Наиболее естественно интерпретировать эту поляризацию в рамках модели несферической оболочки SN1987A (Ю. Н. Гнедин, частное сообщение).

В спектрах на поздней фазе обнаружено загадочное «красное смещение» эмиссионных линий<sup>4</sup>. Его величина составляет 500—1500 км/с для различных линий. Некоторые линии, например  $[O I]\ 6300, 6364\ \text{\AA}$ , вовсе не показывают красного смещения. Наиболее очевидная интерпретация этого смещения — асимметрия распределения вещества во внутренних частях оболочки. Однако возможен эффект красного смещения и в симметричной модели (например, «кокон» с дырами, яркость которого на внутренней стороне больше яркости снаружи). Заметим, что симметричные модели должны приводить к исчезновению красного смещения на достаточно поздней фазе.

Сюрпризом оказалось обнаружение эмиссионной полосы молекулы CO на волне 2,3 мкм через 120 дней после взрыва<sup>4</sup>. Это первое обнаружение молекул в оболочке сверхновой. Температура возбуждения CO на 230 день составила всего 2000 К. Одновременно с этим в спектре видна линия поглощения  $HeI\ 10830\ \text{\AA}$  с потенциалом возбуждения 20 эВ, что свидетельствует о крайне неравновесных условиях в оболочке SN1987A. Заметим, что присутствие линии  $HeI$  в спектре SN1987A было предсказано на основе радиоактивной модели свечения сверхновых типа II на поздней стадии<sup>7</sup>.

В ближайшие годы следует ожидать новых интересных наблюдательных проявлений SN1987A. Прежде всего, астрофизики ждут эффектов, связанных с возможным присутствием нейтронной звезды в центре оболочки. Она может проявить себя в оптике через инжекцию энергии в оболочку SN1987A, а также непосредственно в рентгеновском диапазоне. Другой интересный эффект, в основном в радио, ожидается от столкновения внешнего края оболочки SN1987A с плотным околозвездным газом, потерянным предсверхновой на стадии красного сверхгиганта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярчук А. А. и др. // Письма Астрон. ж. 1987. Т. 13. С. 739.
2. Turtle A. J. et al. // Nature. 1987. V. 327. P. 38.
3. Грассберг Э. К., Имшенник В. С., Надежин Д. К., Угрюмов В. П. // Письма Астрон. ж. 1987. Т. 13. С. 547.
4. Danziger I. J. et al. // ESO Preprint No. 554.—1987.
5. Matz S. M. // IAU Circ. 1987. No. 4510.
6. Сюняев Р. А. и др. // Письма Астрон. ж. 1987. Т. 13. С. 1027.
7. Чугай Н. Н. // Ibidem. С. 671.

524.352(048)

**Г. С. Бисноватый-Коган.** Гравитационный коллапс, излучение нейтрино и кривые блеска сверхновых. Взрывы сверхновых в результате коллапса происходят на последнем рубеже жизни массивных ( $\geq 8 M_{\odot}$ ) звезд. Полное выделение энергии при коллапсе примерно в 20 раз больше, чем за все время спокойной эволюции звезды. Менее массивные звезды с  $M < 8 M_{\odot}$  становятся белыми карликами, теряя большую часть своей массы в ходе эволюции. Основными эволюционными стадиями массивной звезды являются: горение водорода в ядре (главная последовательность); горение гелия в ядре и водорода в слоевом источнике (стадия сверхгигантов) и последующая быстрая эволюция до образования железного ядра и начала гидродинамического коллапса (для  $M > 10 M_{\odot}$ ) либо до начала нейтронизации в ядре из  $O^{16} + Ne^{20} + Mg^{24}$ , также переходящей в коллапс (см. обзор<sup>1</sup>).

Расчеты коллапса в приближении сферической симметрии без вращения и магнитного поля ведутся более 20 лет. Основным вопросом является воз-