

Звездный коллапс и взрывы сверхновых

18.1. ВВЕДЕНИЕ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Наше обсуждение компактных объектов было бы неполным без рассмотрения сверхновых. Как уже описывалось в разд. 9.1 и 10.1, для некоторых астрофизиков не стало сюрпризом, когда пульсары в Крабовидной туманности и в созвездии Парусов были обнаружены в остатках сверхновых. Еще в 1934 г. Бааде и Цвикки [31] показали, что гравитационной энергии, высвобождаемой при коллапсе эволюционирующего звездного ядра в нейтронную звезду, более чем достаточно, чтобы обеспечить энергией наблюдаемые вспышки сверхновых. С тех пор многие исследователи рассматривали коллапс и взрывы сверхновых как события, тесно связанные с образованием нейтронных звезд (и, возможно, черных дыр).

В настоящее время имеется немало косвенных свидетельств, позволяющих считать рождение нейтронных звезд следствием коллапса и взрывов сверхновых. Все расчеты эволюции невращающихся звезд с массами в диапазоне $10 \leq M/M_{\odot} \leq 70$ показывают, что у таких звезд развивается неустойчивое ядро, которое содержит примерно $1,5 M_{\odot}$ железа и претерпевает динамический коллапс [16, 47, 601]. Оптические, радио- и рентгеновские наблюдения расширяющегося газа, который имеется в остатках сверхновых II типа, хорошо согласуются с предположением, что эти массивные звезды разрушаются вслед за взрывом в ядре¹⁾. Например, взрывной ядерный синтез в массивной звезде позволяет объяснить относительное содержание элементов между кислородом и элементами «железного максимума» [18, 600], а также обогащенных нейтронами изотопов («r-процесс»). Относительное содержание элементов в остатках сверхновых Кассиопея А [125] и Корма А [103] свидетельствует, что составляющее их вещество образовалось из оболочки массивной звезды. Кривые блеска сверхновых II типа хорошо согласуются с моделью, предусматривающей импульсное выделение энергии порядка 10^{51} эрг внутри внешней оболочки проэволюционировавшей массивной звезды, достигшей стадии красного гиганта [21, 122, 124, 235, 346]. Энергия взрыва гораздо меньше энергии гравитационной связи, высвобождающейся при коллапсе ядра в нейтронную звезду:

$$\Delta E_B \sim \frac{GM_{\text{core}}^2}{R} = 3 \times 10^{53} \left(\frac{M_{\text{core}}}{M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ км}} \right)^{-1} \text{ эрг.} \quad (18.1.1)$$

¹⁾ Наблюдатели делят сверхновые на два типа. В этой главе будут рассматриваться только сверхновые II типа, возникающие, как считают, в результате коллапса массивных звезд ($M > 8M_{\odot}$). Сейчас полагают, что сверхновые I типа возникают при полном взрыве вырожденного ядра звезды с массой $4 \leq M/M_{\odot} \leq 8$, который не образует заметного остатка.

Однако самый важный аргумент — это отождествление пульсаров, которое явно свидетельствует, что внутри молодых остатков сверхновых находятся нейтронные звезды.

Существует, правда, одна деталь, вносящая дисгармонию в эту последовательную во всех других отношениях картину: ни один из современных численных расчетов, моделирующих гравитационный коллапс звездного ядра, не приводит к взрыву! Некоторые теоретические модели, разработанные в течение многих лет исследования этой проблемы, предсказывали взрывы, следующие за коллапсом ядра [15, 89, 144, 294, 513, 617, 619]. Однако последние результаты моделирования, основанные на более ясном понимании привлекаемых сложных физических процессов, не позволяют прийти к выводу об одновременном образовании газового остатка и нейтронной звезды.

Если принять во внимание достаточно сложную физику коллапсирующего звездного ядра и трудность численных расчетов, то не удивительно, что определение конечного этапа эволюции массивных звезд оказалось одной из самых сложных проблем теоретической астрофизики. Один из источников затруднений связан со сложным глобальным взаимодействием гравитационных и гидродинамических сил, с одной стороны, и процессом переноса нейтрино — с другой. Кроме того, существуют еще не вполне ясные детали в наших представлениях о микрофизике горячего и плотного вещества. Поэтому понятно, почему вплоть до настоящего времени практически всем расчетам моделей коллапса ядра и взрыва сверхновых присущи те или иные *известные* недостатки, которые потенциально могут влиять на конечный результат моделирования.

Если вспомнить бурную историю исследования коллапса и противоречивые результаты его расчетов за последние 15 лет, то очевидно, что рассматривать несовершенные современные модели как точные было бы крайне преждевременным. Их предварительный характер становится совершенно ясным, если вспомнить, что в этих вычислениях мы имеем дело с веществом, плотность которого близка к ядерной, и что они обычно ограничиваются сферическими невращающимися немагнитными конфигурациями. По этой причине, а также из-за общего недостатка места наше обсуждение коллапса сверхновых будет достаточно кратким. Мы сосредоточим внимание на нескольких важнейших физических идеях, лежащих в основе наших представлений о коллапсе звездного ядра, а не на конкретных моделях. Поскольку не исключено, что даже это обсуждение в самом ближайшем будущем станет устаревшим, мы рекомендуем читателю ознакомиться с текущей литературой по проблеме коллапса и сверхновых¹⁾.

¹⁾ Исторический обзор ранних (до 1970 г.) моделей коллапса ядра и взрыва сверхновой с обсуждением некоторых процессов с участием нейтрино, которые учитываются в этих моделях, имеется в книге Зельдовича и Новикова [636]. Обзор более новых работ (до 1983 г.) с акцентом на соответствующие уравнения состояния горячего плотного вещества дан в [19, 347]. Современный анализ проблемы гравитационного излучения, возникающего при коллапсе звездного ядра, содержится в обзорной статье (545); см. также гл. 16.