

вии с выражением

$$P_f \approx \left( \frac{Y_{e,f}}{Y_{e,i}} \right)^{4/3} P_{\text{eq}} \sim (0,7-0,8) P_{\text{eq}}. \quad (18.6.27)$$

Как отмечалось в гл. 6, конфигурация с  $\Gamma = 4/3$  обладает нейтральной устойчивостью к гомологичным радиальным возмущениям. Таким образом, коллапс протекает гомологично (как и в аналогичной ситуации для сверхмассивных звезд, описанной в гл. 17) и соотношение (18.6.26) справедливо (приближенно) вплоть до ядерных плотностей. В этой точке уравнение состояния становится жестким и  $\Gamma$  резко увеличивается. При  $\rho_{\text{плс}}$  и выше этой плотности атомные ядра сливаются. Как только это произойдет, вещество можно рассматривать как однородную среду, состоящую из отдельных протонов и нейтронов. Эти нуклоны, «выдавленные» из атомных ядер, можно рассматривать как вырожденный газ Ферми с взаимодействиями. При этих плотностях можно использовать результаты вычислений для вещества с  $T = 0$  со всеми соответствующими им неопределенностями (см. гл. 8).

Вскоре после того, как в центре звезды достигаются ядерные плотности, движение вещества звездного ядра достаточно быстро замедляется. Реакцией на возрастание давления ядерного вещества становится «отскок» звездного ядра. В следующем разделе будут рассмотрены следствия этого «отскока». Как сейчас полагают, он составляет основу взрыва сверхновой.

## 18.7 ГОМОЛОГИЧНЫЙ КОЛЛАПС ЗВЕЗДНОГО ЯДРА, ОТСКОК И ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ?

Голдрайх и Вебер [231] показали, что если показатель адиабаты коллапсирующей ньютоновской газовой сферы удовлетворяет условию  $\Gamma = 4/3$ , то коллапс внутренней части конфигурации будет *гомологичным*. Это означает, что положение и скорость данной точечной массы в гомологичном «внутреннем» ядре меняются по закону

$$r(t) = \alpha(t)r_0, \quad \frac{\dot{r}}{r} = \frac{\dot{\alpha}}{\alpha}, \quad (18.7.1)$$

где  $r_0$  — начальное положение. Плотность тем временем изменяется самогласованно в соответствии с уравнением

$$\rho(r(t), t) = \alpha^{-3}\rho_0(r_0), \quad (18.7.2)$$

и профиль плотности во время коллапса сохраняется. Голдрайх и Вебер нашли, что масса гомологичного внутреннего ядра может быть найдена из соотношения

$$M_{\text{hc}} = 1,0449d^{3/2}M, \quad (18.7.3)$$

где  $d \equiv P/P_{\text{eq}} < 0,971$  — дефицит давления, а  $M$  — масса начальной равновесной политропы с  $n = 3$  [625].

Мы уже сталкивались с гомологичным коллапсом в гл. 17, где изучался коллапс в черную дыру сверхмассивной звезды с  $\Gamma \approx 4/3$  и  $d \approx 1$ . Предполагается, что коллапс звездного ядра также должен быть гомологичным во внутренних областях, поскольку основной вклад в давление вносят вырожденные релятивистские электроны, для которых  $\Gamma \approx 4/3$ . Это предположение подтверждается детальными гидродинамическими расчетами коллапса звездного ядра [17, 591, 619], которые свидетельствуют, что соотношение (18.7.3) выполняется с точностью лучше 20%. Таким образом, из соотношений (18.2.5) и (18.2.7) следует, что  $M \sim M_{\text{Ch}} \sim 5,83 Y_e^2 M_{\odot} \sim 1 M_{\odot}$ . Поэтому с помощью выражений (18.6.27) и (18.7.3) можно оценить, что гомологичное внутреннее ядро имеет массу <sup>1)</sup>

$$M_{\text{hc}} \sim (0,6-0,8) M_{\odot}. \quad (18.7.4)$$

Как только в гомологичном внутреннем ядре плотность достигает  $\rho_{\text{нuc}} \sim 2,8 \cdot 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>, давление быстро возрастает, так как нуклонный компонент вызывает «ужесточение» уравнения состояния, и поэтому  $\Gamma$  превышает значение 4/3. При плотностях, в несколько раз превосходящих  $\rho_{\text{нuc}}$ , давление оказывается достаточным, чтобы сдерживать коллапс. Вследствие этого гомологичное ядро «отскакивает» от центра, прежде чем в конце концов придет к гидростатическому равновесию. «Внешняя» часть ядра тем временем продолжает падать к центру со сверхзвуковой скоростью. В результате «отскачившая» назад внутренняя часть ядра, действуя как поршень, возбуждает ударную волну во внешней части ядра, падающей к центру.

Характерная начальная энергия, сообщаемая ударной волне, в несколько раз больше  $10^{51}$  эрг [589, 619], что соответствует начальной скорости волны  $u_s \geq 5 \cdot 10^9$  см/с. Этой энергии более чем достаточно, чтобы разрушить массивную звезду, при условии, что энергия передается оболочке, окружающей железное ядро. В этом случае ударная волна по мере прохождения через звезду должна изменять направление движения вещества к центру на обратное, вызывая взрывное движение наружу. В результате возникает вспышка сверхновой, а внутри остается родившаяся нейтронная звезда. Однако на самом деле энергия постоянно «вытекает» из ударной волны вследствие испускания нейтрино и диссоциации атомных ядер. Компенсируется ли такая «утечка» энергии притоком кинетической энергии падающего вещества, преобразованной в тепло, и диффузией нейтрино к фронту ударной волны? Этот вопрос остается в настоящее время предметом дискуссий [88, 347, 589].

<sup>1)</sup> Обычно начальная масса ядра бывает несколько больше,  $M \sim 1,4 M_{\odot}$ , что связано с тепловым повышением давления вырожденных холодных электронов [88].

*Упражнение 18.16.* Оцените энергию связи  $E_B$  вещества звезды с массой  $\sim 10 M_\odot$  и радиусом  $\sim 5R_\odot$ , окружающего коллапсирующее вырожденное ядро и сравните с начальной энергией ударной волны.

*Ответ:*  $E_B \sim GM^2/R \sim 10^{50}$  эрг сразу после «отскока» ядра звезды.

*Упражнение 18.17.* Оцените характерную температуру вещества за фронтом ударной волны. Что происходит с атомными ядрами после прохождения через ударную волну?

*Ответ:*  $\frac{1}{2}kT < \frac{1}{2}m_B u_s^2 \sim 13$  МэВ, что выше энергии связи атомного ядра.

Выброс наружу внешних слоев массивной звезды посредством гидродинамической ударной волны «отскока», порождаемой внутренним ядром, остается наиболее вероятным механизмом взрыва сверхновой на основе гравитационного коллапса. Любопытно, что аналогичная картина предусматривалась в одной из самых первых моделей сверхновых, предложенной Колгейтом и Джонсоном [143]. Они предположили, что спадающее к центру ядро звезды может испытывать достаточно быстрый «отскок» при высоких плотностях (из-за вырождения атомных ядер), который приводит к возникновению ударной волны, передающей энергию в наружные слои звездного вещества.

В течение ряда лет было предложено много различных моделей сверхновых, объясняющих, каким образом энергия гравитационной связи, выделяемая при коллапсе, может эффективно переноситься во внешние слои звезды, обеспечивая их выброс. Колгейт и Уайт [144] предложили модель, согласно которой пары нейтрино-антинейтрино, образующиеся в горячем веществе за фронтом ударной волны, переносят свою энергию в наружные области с меньшей плотностью. Нагрев, вызванный этим переносом, обеспечивает достаточное тепловое давление, которое «сдувает» внешние части звезды, оставляя внутри теплую нейтронную звезду. К сожалению, подробные гидродинамические расчеты с привлечением переноса нейтрино [15, 617] показали, что этот механизм неэффективен из-за слишком высокой непрозрачности звездного вещества для нейтрино; он может обеспечивать лишь образование черных дыр без всякого взрыва.

Впоследствии было высказано предположение [511], что нейтрино, покидающие звездное ядро, могут передавать свой импульс лежащему снаружи веществу и вызывать тем самым взрыв. Эта модель, основанная на переносе импульса нейтрино, также оказалась несостоятельной, как только были выполнены более тщательные численные расчеты с учетом слабых нейтральных токов [89, 620]. Причина в том, что нейтральные токи приводят к большим нейтринным непрозрачностям и малым потокам (см. уравнение (18.5.20)). Действительно, вклад импульса может быть эффективным только в том случае, если нейтринная светимость превосходит критическую «эддингтоновскую нейтринную светимость», при которой направленная наружу сила, обусловленная вкладом импульса нейтрино, равна направ-

ленной к центру силе тяготения. По аналогии с уравнением (13.7.6), дающим эддингтоновскую фотонную светимость, можно записать (пренебрегая асимметрией вперед—назад в дифференциальном сечении рассеяния):

$$L_{\text{Edd}, \nu} \approx \frac{4\pi GMc}{\kappa_{\nu}}, \quad (18.7.5)$$

где  $\kappa_{\nu}$  — доминирующая нейтринная непрозрачность. Предположим, что основным механизмом непрозрачности во внешних слоях является когерентное рассеяние тяжелыми атомными ядрами и что нейтрино за распространяющейся наружу ударной волной «отскока» обладают энергиями, сравнимыми с  $3kT \leq 25$  МэВ [см. выражение (18.5.22) и упражнение 18.17]. При таких предположениях с учетом соотношения (18.5.6) найдем

$$\kappa_{\nu} \approx \frac{\sigma_A^{\text{coh}}}{Am_u} \approx 2,2 \times 10^{-17} \text{ см}^2/\text{г}, \quad (18.7.6)$$

где принято  $Z \approx 26$ ,  $A \approx 56$  и  $E_{\nu} = 25$  МэВ. Подстановка значения (18.7.6) в выражения (18.7.5) дает

$$L_{\text{Edd}, \nu} \approx 2 \times 10^{54} \text{ эрг/с} > L_{\nu}, \quad (18.7.7)$$

где оценка  $L_{\nu}$  представлена соотношением (18.5.20). Неравенство (18.7.7) показывает неэффективность передачи импульса как единственного механизма, ответственного за выброс оболочки.

Хотя механизм ударной волны «отскока» кажется наиболее вероятным средством создания взрыва, недавние детальные гидродинамические вычисления с учетом переноса не подтвердили эффективность этого механизма (см., например, обзор [347]). Однако ситуация может измениться, если в численное моделирование поведения ядра после «отскока» будут внесены необходимые уточнения. В качестве альтернативы возможны и другие, более экзотические механизмы, приводящие (поодиночке или совместно) к возникновению взрыва. Среди них могут быть конвекция [185], неустойчивость Рэлея—Тейлора [142, 370, 546] или отклонения от сферической симметрии, вызванные, например, вращением или магнитными полями [349, 415].

Один факт не вызывает сомнения: несколько нейтронных звезд, например, пульсары в Крабовидной туманности и в Парусах, находятся сейчас внутри остатков сверхновых. Безусловно, гравитационный коллапс *может* приводить к взрыву сверхновой и образованию нейтронной звезды. Как это в действительности происходит, еще предстоит определить.

---

*Упражнение 18.18.* Просмотрите рефераты литературы за последние 12 месяцев, посвященной гравитационному коллапсу звездного ядра и взрывам сверхновых. Какова общепринятая точка зрения (если она существует) относительно вероятного механизма взрыва и образования нейтронной звезды? Поддерживают ли детальные расчеты эту точку зрения? Убедило ли это вас?

---