

тяготения ломает ядерные связи, и в конце концов тяготение оказывается ответственным за всю излученную энергию. В этом смысле идеи великих физиков прошлого оказываются правильными.

Вероятно, коллапс приводит к ядерному взрыву (см. § 4). Если взрывом разрушается не вся звезда, и масса остатка меньше  $M_{\text{max}}^{\text{OB}}$ , то возникает [пульсар (см. гл. 13). Случай  $M_{\text{остатка}} > M_{\text{max}}^{\text{OB}}$  см. §§ 6,7 гл. 11 и гл. 14.

## § 2. Нестабильность массивных звезд с ядерными источниками энергии

В этом параграфе мы рассмотрим специфический вид неустойчивости звезды, приводящий, по-видимому, к существованию верхнего предела массы обычных звезд.

Еще в 1941 г. Леду показал, что достаточно массивные звезды с ядерными источниками энергии будут неустойчивы относительно раскачки колебаний. В работе Шварцшильда и Харма (1959) вычисления проделаны на основе новых моделей внутреннего строения массивных звезд, полученных численным расчетом. Более поздние расчеты можно найти у Стозерса и Симона (1968). Механизм пульсационной неустойчивости заключается в следующем. Звезда, находясь в устойчивом равновесии, обладает собственной частотой колебаний  $\omega^2 \approx GM/R^3$ . Допустим, что такие колебания возбуждены. Наряду с раскачкой колебаний имеются механизмы их затухания. Раскачивающим механизмом является изменение выделения ядерной энергии в центре звезды. Вследствие сильной зависимости выделения энергии от температуры основное выделение энергии происходит при максимальном сжатии. Звезда получает как бы импульс, который увеличивает амплитуду колебаний.

Затухание колебаний происходит вследствие нарушения стационарности теплового потока в звезде. Как можно показать, это нарушение вызывает появление силы, тормозящей колебания\*).

Скорость изменения энергии колебаний  $L_1$  можно записать в виде

$$L_1 = L_2 - L_3,$$

где  $L_2$  — скорость увеличения энергии колебаний за счет ядерных реакций,  $L_3$  — скорость потери энергии колебаний. Если  $L_1 > 0$ , то колебания возрастают, и звезда неустойчива. Если  $L_1 < 0$ , то звезда устойчива относительно пульсаций.

Шварцшильд и Харм провели расчеты для звезд в интервале масс от  $M = 218 M_{\odot}$  до  $M = 28 M_{\odot}$ , состоящих из 75% H и 22% He. Результаты их расчетов для звезд главной последовательности приведены в табл. XII.

\*) О другом механизме пульсации, вызывающем переменность цефеид, см. конец параграфа.

Таблица XII

## Пульсационная неустойчивость массивных звезд

$M/M_{\odot}$	218,3	121,1	62,7	28,2
$\lg (L/L_{\odot})$	6,64	6,24	5,76	5,04
$(\delta R/R)_c$	0,632	0,583	0,312	0,392
$t_{\text{лет}}$	930	1800	44 000	-1 400

Первая строка — масса звезды, вторая — общая светимость, третья — амплитуда колебания в центре, если на поверхности принять  $\delta R/R = 1$ , четвертая — время увеличения колебаний в  $e$  раз, знак (—) означает, что колебания затухают.

Для звезд небольшой массы на главной последовательности амплитуда колебаний в центре по отношению к амплитуде колебаний на поверхности мала; соответственно слагаемое  $L_2$  мало по сравнению с  $L_3$ , а  $L_1$  отрицательно — звезда устойчива. Для больших масс  $(\delta R/R)_c$  вдвое больше, чем для малых, и  $L_1$  положительно — звезда неустойчива.

Критическое значение массы, больше которой звезды неустойчивы, около  $60 M_{\odot}$ . Это значение зависит от химического состава  $M_{\text{кр}} \sim \mu^{-2}$ . Приведенные значения носят, конечно, приближенный характер и значение  $M_{\text{кр}} = 60 M_{\odot}$  неточно. Но, по-видимому, можно утверждать, что звезды с  $M > 100 M_{\odot}$  и с ядерными источниками энергии пульсационно неустойчивы. Заметим, что верхний предел масс известных звезд близок к  $M_{\text{кр}} \approx 60 M_{\odot}$ .

Однако подчеркнем, что линейная теория дает определенный закон нарастания или затухания лишь малой амплитуды колебаний, т. е. число (и знак)  $\omega_0$  в множителе  $e^{\omega_0 t}$ .

Если  $\omega_0 > 0$  и колебания нарастают, то при определенной амплитуде включаются нелинейные эффекты, и от этих эффектов зависит окончательная судьба рассматриваемого тела. В одном случае рост колебаний останавливается при определенной амплитуде, в другом случае происходит взрыв и разрушение тела. В первом случае расчет предельной амплитуды труден, но период колебаний и сам факт колебательной неустойчивости хорошо описывается линейной теорией. В последнее время появились работы [см. Зиберт (1970), Аппенцеллер (1970)], в которых утверждается, что в звездах, даже  $100 M_{\odot}$  и более, нелинейные эффекты ограничивают амплитуду пульсаций и не приводят к разрушению звезды.

Отметим, наконец, что генерация колебаний за счет ядерных реакций в центральной части звезды и затухание колебаний в обо-

лочке, характерные для звезд большой массы, получены в расчете и до сих пор не имеют прямого наблюдательного подтверждения. Хорошо известные пульсирующие переменные звезды, так называемые цефеиды, по современным взглядам представляют собой звезды не слишком большой массы (несколько  $M_{\odot}$ ) на определенной стадии эволюции между главной последовательностью и гигантами.

Как показал Жевакин (1963) [см. также Кристи (1968)], в этом случае возбуждение колебаний зависит как раз от тепловых процессов в оболочке. При неполной ионизации гелия (или водорода) в достаточно толстом слое, зависимость теплопроводности от плотности и температуры такова, что колебания усиливаются.

### § 3. Устойчивость эволюции звезды

Астрономические наблюдения показывают наличие большого качественного разнообразия в мире звезд. Это разнообразие касается, например, химического и изотопного состава звезд: наблюдаются звезды, в которых содержание редких земель в 1000 раз больше среднего, звезды с отношением  $C^{13} : C^{12} \approx 1$  (вместо 0,01 на Земле); известна, наконец, одна звезда с  $He^3 : He^4 = 4$  (вместо обычного отношения  $10^{-7}$ ). Есть и другие аномалии. Некоторые звезды имеют аномально большие магнитные поля. Есть звезды, периодически меняющие свой блеск (цефеиды), звезды, регулярно вспыхивающие, наконец, звезды, испытывающие катастрофические взрывы (сверхновые). Известный пример вспышки сверхновой — это взрыв, давший начало Крабовидной туманности.

Очень грубо можно считать, что все недавно образовавшиеся молодые звезды, состоящие примерно из 70% водорода, 29% гелия и 1% более тяжелых элементов, похожи друг на друга. Все свойства таких звезд полностью определяются массой; эти звезды образуют однопараметрическое семейство. На диаграмме спектр — светимость они образуют «главную последовательность» Герцшпрунга — Рассела. Понятие молодости звезды в свою очередь зависит от скорости расходования горючего: звезда с  $M \sim M_{\odot}$  достигает среднего возраста через  $5 \cdot 10^9$  лет, звезда с массой  $30 M_{\odot}$  исчерпывает водород и старится за  $6 \cdot 10^8$  лет. Следует заметить, что звезда, почти полностью исчерпавшая водород в центре, еще не сильно отличается по внешним параметрам от совсем молодой и лишь затем начинает сравнительно быстро меняться.

Именно для периода эволюции после исчерпания водорода характерно разнообразие наблюдаемых свойств и поведения звезды. Вопросы, возникающие в связи с этой стадией эволюции, не полностью разъяснены и, по-видимому, не связаны специально с релятивистскими эффектами. Поэтому мы остановимся на них только очень кратко. Подробнее см. обзор Ибен (1967).