

Сверхмассивные звезды и черные дыры

17.1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхмассивные звезды — это гипотетические равновесные конфигурации с массами в диапазоне $10^3 — 10^8 M_{\odot}$. Как мы увидим, они могут быть довольно компактными с потенциалами на поверхности, составляющими небольшую, но не пренебрежимо малую долю c^2 . В ходе квазистатической эволюции они могут претерпевать катастрофический гравитационный коллапс. Следовательно, возможные предшественники сверхмассивных черных дыр — это сверхмассивные звезды. Обе категории объектов — сверхмассивные звезды и сверхмассивные черные дыры — часто привлекаются в качестве источника энергии, ответственного за интенсивную активность, которая наблюдается в квазарах и ядрах активных галактик. По этим причинам обсуждение свойств сверхмассивных звезд выглядит вполне естественным в книге о компактных объектах. Как мы увидим, общие свойства равновесия и устойчивости сверхмассивных звезд можно без труда проанализировать на основе математического аппарата, уже разработанного для белых карликов и нейтронных звезд (используя, например, энергетический вариационный принцип; см. гл. 6).

По мере увеличения массы рассматриваемой звезды вклад излучения в давление, удерживающее систему в равновесии, становится все больше, а доля газового давления все уменьшается. Этот факт будет показан ниже. В соответствии с теоретическими расчетами [517] «нормальные» звезды главной последовательности имеют максимальную массу около $60 M_{\odot}$. Выше этого значения массы сочетание давления излучения и ядерной энергии, выделяющейся в центральных областях звезды, приводит к сильной пульсационной неустойчивости. Это теоретическое предсказание подтверждается отсутствием наблюдаемых звезд с массами более $60 M_{\odot}$.

Несмотря на существование этого предела, давно предполагается, что в природе могут образовываться сверхмассивные звезды с массами гораздо выше $1000 M_{\odot}$. Такой объект будет поддерживаться в гидростатическом равновесии почти полностью за счет давления излучения

$$P = P_r = \frac{1}{3} aT^4, \quad (17.1.1)$$

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{Gm(r)\rho}{r^2}. \quad (17.1.2)$$

В поверхностных слоях поток энергии переносится наружу путем диффузии фотонов. Светимость определяется выражением

$$L = -4\pi r^2 \frac{c}{3\kappa\rho} \frac{d}{dr} (aT^4), \quad (17.1.3)$$

где принятая непрозрачность обусловлена томсоновским рассеянием в ионизованной водородной плазме

$$\kappa = \frac{\sigma_T}{m_p} = 0,40 \text{ см}^2/\text{г}. \quad (17.1.4)$$

Здесь σ_T — томсоновское сечение рассеяния, а m_p — масса протона [сравните с уравнениями (И.31) и (И.41)]. Подставив уравнения (17.1.1) и (17.1.2) в (17.1.3) и положив $m(r) = M$, получим

$$L = L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi c G M m_p}{\sigma_T} = 1,3 \times 10^{38} \frac{M}{M_\odot} \text{ эрг/с}. \quad (17.1.5)$$

Итак, звезда излучает на эддингтоновском пределе (см. разд. 13.7).

Хойл и Фаулер [282, 283] были первыми, кто предложил сверхмассивные звезды в качестве источников энергии для квазаров и ядер активных галактик. Типичная светимость квазара порядка 10^{46} эрг/с ($10^{13} L_\odot$!) естественно приводит к идее излучения на эддингтоновском пределе объектом с массой $M \sim 10^8 M_\odot$. Начиная с 1963 г. возможность высвобождения больших количеств ядерной и гравитационной энергии в таких объектах исследовалась неоднократно¹⁾.

Зельдович [633] и Солпитер [497] в качестве альтернативы высказали предположение, что объектами, ответственными за энергетическую активность квазаров и ядер активных галактик, могут быть сверхмассивные черные дыры. С тех пор модели черной дыры как источника наблюдаемого оптического, радио- и рентгеновского излучения этих объектов стали предметом интенсивных теоретических исследований²⁾. В большинстве из предложенных моделей в качестве механизма, обеспечивающего энергию излучения, предполагается аккреция газа на сверхмассивные черные дыры (см. гл. 14). Как уже отмечалось в разд. 13.7, максимальная светимость, порождаемая аккрецией, должна быть, вероятнее всего, сравнимой с L_{Edd} . Как сверхмассивные звезды, так и черные дыры могут излучать на эддингтоновском пределе, и это объясняет, в частности, почему и те, и другие объекты занимают видное место в моделях квазаров и ядер активных галактик.

Сравнительно недавно Торн и Брагинский [569] предположили, что гравитационный коллапс сверхмассивных звезд и столкновения сверхмассивных черных дыр в квазарах и ядрах активных галактик могут вызывать всплески длинноволнового гравитационного излучения с $\lambda \geq 10^6 (M/10^6 M_\odot)$ км.

¹⁾ Обзор и ссылки на ранние работы см. в [522]; ссылки на более поздние работы приведены в [421].

²⁾ Ссылки приведены в [73, 477].

Некоторые данные наблюдений свидетельствуют о существовании в центрах галактик несветящихся компактных объектов. Например, звезды вблизи центра гигантской эллиптической галактики M87 в скоплении Девы обладают большими скоростями, которые можно объяснить, предположив, что они движутся в гравитационном поле центральной черной дыры, имеющей массу $5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ [162, 503, 626]¹⁾. В нашей Галактике высокие скорости газовых облаков вблизи центра могут служить аргументом в пользу существования там компактной массы с $M \sim 10^6 M_{\odot}$ [323].

Упражнение 17.1. Центральный объект туманности 30 Золотой Рыбы в Большом Магеллановом Облаке предварительно отождествлен со сверхмассивной звездой [110]. Уверенное отождествление затрудняется по меньшей мере двумя факторами: а) наблюдаемый спектр «загрязнен» другими звездами, и не исключено, что он создается скоплением очень горячих, но в других отношениях нормальных звезд; б) отмечается заметное пекулярное поглощение света пылью. Однако наблюдения со спутника IUE показывают, что очень яркий голубой источник излучения в центре этой гигантской области ионизованного водорода представляет собой пекулярный горячий объект с мощным звездным ветром. Наблюденные спектры позволяют оценить, что скорость истечения ветра V_w должна составлять 3500 км/с, а цветовая температура — около 60 000 К. По оценкам с учетом расстояния, потока излучения (с поправками на поглощение) и цветовой температуры светимость должна быть порядка $0,7 \cdot 10^8 L_{\odot}$.

а) Предполагая, что источник представляет собой отдельную светящуюся звезду, используйте выражение (17.1.5) для оценки ее массы.

Ответ: $M/M_{\odot} \approx 2000$.

б) Предполагая, что звезда излучает как черное тело с температурой T , подсчитайте ее радиус.

Ответ: $R/R_{\odot} \approx 80$.

в) Совместима ли гипотеза сверхмассивной звезды со скоростью ветра, подчиняющейся очевидному ограничению $V_w > V_{\text{esc}}$, где $V_{\text{esc}} = (2GM/R)^{1/2}$ — скорость убегания?

г) Что можно сказать по поводу пульсационной неустойчивости сверхмассивной звезды, учитывая наблюдения заметного звездного ветра ($\dot{M}_w \approx 10^{-3,5} M_{\odot}/\text{год}$)?

В последующих разделах мы будем рассматривать свойства сверхмассивных звезд, пренебрегая поначалу эффектами общей теории относительности, выгоранием ядерного горючего и другими усложняющими факторами. Поскольку предполагается, что давление целиком обусловлено излучением, значение показателя адиабаты для сверхмассивной звезды (4/3) находится на грани динамической неустойчивости. Поэтому далее мы обсудим, как эффекты общей теории относительности влияют на устойчивость. Затем обсуждаются дополнительные эффекты, связанные с ядерными реакциями, вращением и т.д. Наконец, описываются результаты численных расчетов коллапса сверхмассивных звезд в сверхмассивные черные дыры.

¹⁾ Альтернативная интерпретация без предположения о черной дыре изложена в [169].