

5.7. Соотношения $M-L$ и $M-R$ для звезд главной последовательности

Наблюдения двойных звезд позволяют оценивать массы компонентов, что дает возможность установить эмпирическую зависимость между массой и светимостью. Оказалось, что для звезд главной последовательности полная (болومترическая) светимость $L \sim M^3$ для звезд с массой Солнца и выше, и $L \sim M^{4.5}$ для $M < M_{\odot}$. Эти зависимости были теоретически объяснены английским астрофизиком А. С. Эддингтоном в 1926 г.

Обратимся к уравнению лучистой теплопроводности (5.19) или его эквивалентной форме (5.26), которое показывает, что фотонная светимость звезды определяется непрозрачностью ее оболочки. Для порядковых оценок заменим производные по радиусу делением на радиус: $d/dr \rightarrow 1/R$, а температуру звезды заменим ее характерным значением $T \rightarrow T_c$, где $T_c \sim \mu GM/RR$ (теорема вириала). Тогда, опуская постоянные (кроме постоянной тяготения), получаем:

$$L \sim \frac{\mu^4 G^4}{\kappa} M^3. \quad (5.36)$$

Таким образом, если непрозрачность слабо зависит от параметров среды (а это действительно так в горячей плазме, когда основной вклад в поглощение вносит рассеяние на свободных электронах), то $L \sim M^3$, что и наблюдается в массивных звездах. Для крамерсовского закона непрозрачности (5.22), характерного для более низких температур (у звезд с массой порядка солнечной и меньше), получится более крутая зависимость светимости от массы, что также подтверждается наблюдениями ($L \sim M^n$, $n \approx 4-5$).

Обратите внимание на крутую зависимость светимости в (5.36) от постоянной тяготения Ньютона: $L \sim G^4$ — она может быть использована для получения ограничений на некоторые физические теории, в которых постоянная тяготения изменяется со временем. Если бы G изменялась со временем, то при прочих равных условиях изменялась бы светимость Солнца. Само существование мирового океана в течение миллиардов лет на Земле (необходимое условие для органической жизни) ограничивает вариации средней температуры Земли в пределах ± 30 К, т. е. $\Delta T/T_3 \lesssim 0.1$. Поскольку $T_3 \sim L_{\odot}^{1/4}$, то из самого факта наличия жизни на Земле немедленно получаем $\Delta G/G \lesssim 0.1$ за 10^9 лет, то есть $(dG/dt)/G < 10^{-10}$ лет $^{-1}$.

Теперь рассмотрим *зависимость масса–радиус* для звезд главной последовательности. Воспользуемся полученным соотношением (5.36). Учтем, что светимость звезды связана с генерацией энергии в термоядерных реакциях, то есть

$$L \sim \varepsilon M \sim \rho T^{Z_e} M,$$

где $Z_e \equiv d(\log \varepsilon)/d(\log T)$ – число Зельдовича (показатель степенной зависимости энерговыделения на единицу массы от температуры), $Z_e \sim 4-8$ для протон–протонного цикла и ~ 15 для CNO-цикла. Приравнявая это выражение к светимости по (5.36) и подставляя $\rho \sim M/R^3$ в вириальное соотношение $T_c \sim M/R$, получаем

$$R \sim M^{\alpha_R},$$

где $\alpha_R = (Z_e - 1)/(Z_e + 3)$. Чем больше масса звезды на главной последовательности, тем больше ее радиус и светимость и выше эффективная температура. Именно по этой причине более массивные звезды ранних спектральных классов (O, B, A, F) лежат левее и выше Солнца на диаграмме Герцшпрунга–Рессела (цвет–светимость), так как цвет (спектральный класс) звезды определяется ее эффективной температурой.

5.8. Атмосферы звезд

Основной физический параметр стационарной звезды данного возраста – ее масса. Она определяет светимость, время жизни, радиус, эффективную температуру. Следующий по важности параметр – химический состав, определяющий молекулярный вес и влияющий на непрозрачность, а через нее – и на остальные параметры.

Анализируя излучение звезд, мы получаем непосредственную информацию только об их атмосферах. Атмосферой звезды называют фотосферу, которая определяет видимый радиус звезды, и области, лежащие выше нее, то есть к атмосфере относятся области с оптической толщиной $\tau \lesssim 1$ в непрерывном спектре. Температура, плотность, скорость газа и химический состав атмосферы оцениваются по спектру.

Эффективная шкала высот (т. е. высота однородной атмосферы) $h = kT/mg = kTR^2/mGM \ll R$, но поскольку атмосферы не изотермичны, h имеет локальный смысл. Самый тонкий слой атмосферы – фотосфера, а наиболее протяженный – корона (однако для нее приведенное выше неравенство не выполняется).