

Однако, поскольку кристаллизация начинается в центре звезды и по мере ее охлаждения постепенно распространяется к наружным слоям, вклад q в энерговыделение не приводит к возникновению пика в функции светимости. Этот вклад не приводит к следствиям, явно свидетельствующим о кристаллизации и не объясняет резкого убывания функции светимости.

В правой части уравнения (4.5.1) мы также опустили член, связанный с излучением нейтрино. Тепловое излучение нейтрино¹⁾ превосходит излучение фотонов, когда фотонная светимость $L \geq 10^{-0,5} L_{\odot}$, а температура $T \geq 10^{7,8}$ К. Добавление L_{ν} в левую часть уравнения (4.5.1) вызовет уменьшение времени остывания и соответствующее падение теоретической функции светимости выше $\lg(L/L_{\odot}) = -0,5$ по сравнению с кривой остывания Местела. Такое падение заметно на кривой Лэмба и Ван Хорна, приведенной на рис. 4.3, которая более подробно обсуждается ниже.

Наконец, конвекция может привести к более эффективному переносу энергии и уменьшению времени остывания. Однако тщательный анализ, проделанный Фонтеном и Ван Хорном [199], а также Лэмбом и Ван Хорном [331], указывает, что в первом приближении конвекция, по всей видимости, несущественна.

Детальные расчеты охлаждения были выполнены также Суини [554], а также Шавивом и Ковецем [535]. Результат Шавива и Ковца для звезды с массой $0,6 M_{\odot}$ часто цитируется, так как существует мнение, что средняя масса белых карликов, найденная по радиусу, близка к этому значению²⁾. Результаты упр. 4.7 показывают, что дебаевское охлаждение для звезды с массой $0,6 M_{\odot}$ начинается при столь низкой светимости, что оно не влияет на функцию светимости в интересующем нас диапазоне, доступном наблюдениям, нижняя граница которого в настоящее время опустилась до $\sim 10^{-5} L_{\odot}$. Таким образом, результаты Шавива и Ковца гораздо ближе к первоначальной кривой охлаждения Местела, чем результаты Лэмба и Ван Хорна.

4.6. СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Детальное сравнение теории с наблюдениями можно делать двумя способами: либо рассматривая функцию светимости белых карликов, либо оценивая возраст белых карликов в звездных скоплениях. В принципе оба способа позволяют выяснить, насколько хорошо мы понимаем твердотельные свойства самогравитирующих астрономических объектов.

а) Сравнение с возрастом скоплений

Используя данные о светимости белых карликов в звездных скоплениях, Лэмб и Ван Хорн [331] теоретически оценили их возраст, полагая, что все

¹⁾ Процессы теплового излучения нейтрино описаны в разд. 18.

²⁾ См., например, работу [317].

белые карлики подобны чисто углеродным карликам с массой $1 M_{\odot}$. Они сравнили найденный теоретически возраст с возрастом скоплений; очевидно, возраст любого скопления должен быть больше, чем возраст любого находящегося в нем белого карлика, так как мы полагаем, что все звезды в скоплении образовались одновременно. В результате было обнаружено удовлетворительное согласие оценок (табл. 4.1). Похожее сравнение было сделано также Суини [554].

В принципе эта процедура является очень мощным методом наблюдательной проверки теорий, однако в настоящее время ее применение тормозится малым числом хорошо наблюдаемых белых карликов в скоплениях и неопределенностями в определении возраста скоплений.

б) Сравнение с функцией светимости

Напомним наше определение функции светимости, данное в гл. 1, переписав его в виде

$$\phi(L/L_{\odot})d \lg(L/L_{\odot}) \text{—пространственная плотность белых карликов в единичном интервале } \lg(L/L_{\odot}). \quad (4.6.1)$$

Если скорость рождения белых карликов однородна по пространству и постоянна во времени в течение всей жизни Вселенной, то можно ожидать, что для белых карликов с определенным возрастом и химическим составом величина ϕ удовлетворяет соотношению

$$\phi\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) \propto \left[\frac{d \lg(L/L_{\odot})}{d\tau}\right]^{-1}. \quad (4.6.2)$$

Это просто означает, что правая часть выражения (4.6.1) пропорциональна $d\tau$ — временному интервалу, в течение которого белый карлик смещается на единичный логарифмический интервал по шкале светимости.

Запишем $\tau \propto L^{-\alpha}$, где при $L > L_c$ имеем $\alpha = 5/7$ из уравнений (4.2.4) и (4.5.3), а при $L \leq L_c$ из уравнения (4.5.4) получаем $-1/7 \leq \alpha \leq 0$. Тогда

$$\lg \phi = -\alpha \lg\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) + \text{const.} \quad (4.6.3)$$

Таблица 4.1

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОЗРАСТОВ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ
С ВОЗРАСТОМ СКОПЛЕНИЙ [31]

Скопление	Диапазон светимости, $\lg(L/L_{\odot})$	Теоретический возраст, лет	Возраст скопления, лет
Гиалды	(-1) — (-2,4)	$4 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$	$(4 - 5) \cdot 10^8$
Ясли	(-2,3) — (-2,8)	$4 \cdot 10^8 - 9 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^8$

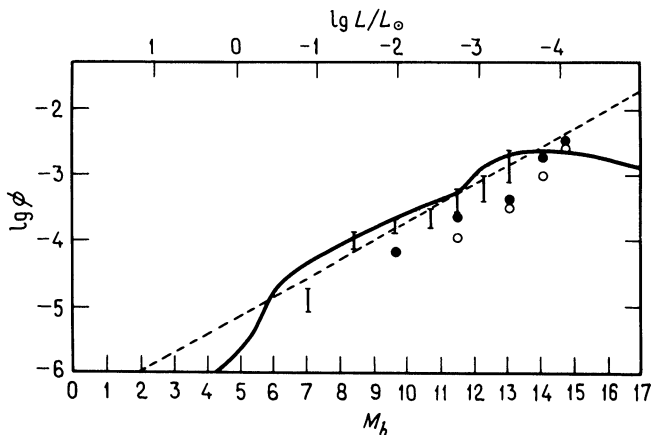


Рис. 4.3. Сравнение эмпирической функции светимости ϕ (в единицах $\text{pc}^{-3} M_b^{-1}$), полученной Либертом [360] на основании данных Сиона [542], с теоретическими функциями светимости. Черные кружки нанесены в предположении, что имеющиеся данные относительно полны вплоть до предельного значения $M_b \sim 13,5$ ($L \sim 10^{-3,5} L_\odot$); светлые кружки — до $M_b \sim 14,5$ ($L \sim 10^{-4} L_\odot$). Наклон данных определен лучше, чем общая нормировка. Эмпирическая функция светимости Грина [238, 239], которая имеет более надежную абсолютную шкалу, но определена только до $\sim 10^{-3} L_\odot$, показана отрезками, соответствующими одному стандартному отклонению. Сплошной линией представлена теоретическая функция Лэмба и Ван Хорна [331] для звезд с массой $1 M_\odot$. Штриховая кривая, представляющая закон остывания Местела [$\alpha = 5/7$ в уравнении (4.6.3)], близка по форме к результатам расчетов Шавива и Ковеца [535] для $M = 0,6 M_\odot$. (По статье Либерта [360].)

Эмпирическая функция светимости, найденная Либертом [360] на основании данных Сиона [542], в диапазоне от $L \sim 10^{-2} L_\odot$ до $\sim 10^{-4} L_\odot$ приведена на рис. 4.3. Там же изображена эмпирическая функция светимости Грина [238, 239], которая известна в диапазоне от $\sim 10^{-1} L_\odot$ до $\sim 10^{-3} L_\odot$. Налицо вполне хорошее по астрофизическим меркам согласие с предсказаниями Местела, Шавива—Ковеца и Лэмба—Ван Хорна, которые в этом диапазоне светимости близки друг к другу.

Едва ли удастся накопить достаточно статистики по горячим белым карликам ($L > 10^{-1} L_\odot$), чтобы проверить наличие провала, вызванного нейтринным охлаждением согласно вычислениям Лэмба—Ван Хорна, так как белые карлики проводят в этом интервале светимости сравнительно мало времени.

Лэмб и Ван Хорн предсказывают, что дебаевский режим в охлаждении начинается при $L \sim 10^{-4} L_\odot$ и приводит к широкому максимуму с шириной около 2 в единицах $\lg(L/L_\odot)$. Как отмечалось выше, согласно Шавиву и Ковцу, этот эффект должен проявляться при заметно меньших светимостях из-за предположения о более низком значении массы.

Согласно сводке данных, приведенной Либертом и др. [361], белых карликов с очень низкой светимостью ($L \lesssim 10^{-4,5} L_{\odot}$) действительно оказывается слишком мало. Если ещё более тщательные поиски не изменят этого результата, то он будет иметь важные последствия. Существующие теории остывания по-прежнему предсказывают заметное число белых карликов с такими светимостями, и ни один известный физический эффект не может вызвать столь резкий излом в функции светимости. В этой связи Либерт и др. [361] высказали предположение, что звезды в диске Галактики, которые вносят главный вклад в обсуждаемую выборку, образовались не так давно по сравнению с принимаемым в настоящее время возрастом галактического гало ($\sim 10^{10}$ лет).