за Запольского и Солпитера [629] следует, что максимальное значение радиуса белого карлика для холодных углеродных звезд составляет $R_{max} = 3{,}9 \cdot 10^{-2} R_\odot$ при $M = 2{,}2 \cdot 10^{-3} M_\odot$.

3.6. СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ: МАССЫ И РАДИУСЫ

Как мы увидим в гл. 4, время охлаждения белого карлика достаточно велико, так что множество вырожденных карликов остаются видимыми в течение значительного времени благодаря излучению с их поверхности. Это удачное для нас обстоятельство позволяет в «нулевом приближении» проверить теорию белых карликов, изучая их расположение на диаграмме Герцшпрунга—Рессела (Г—Р). Г—Р-диаграмма представляет собой зависимость логарифма светимости L от логарифма эффективной температуры T_e, которая определяется равенством

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4, \tag{3.6.1}$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана[1]. Белые карлики с определенным значением массы (порядка $1\ M_\odot$) имеют определенный радиус (около 10^9 см), и, следовательно, согласно равенству (3.6.1), они занимают определенную *линию* на Г—Р-диаграмме: $L \sim T_e^4$. Поскольку, как мы считаем, массы карликов составляют около $1\ M_\odot$, они должны занимать узкую полосу на Г—Р-диаграмме заметно левее и ниже главной последовательности нулевого возраста. Сравнение теоретических оценок с наблюдениями свидетельствует об удовлетворительном согласии (рис. 3.3).

Лучший способ определения радиуса белых карликов состоит в подгонке параметров модели их атмосферы по наблюдаемому остаточному излучению. Поток F_ν, эрг/(с · см^2 · Гц), измеряемый на Земле, равен

$$F_\nu = \frac{R^2 F_\nu\,(\text{на поверхности})}{D^2}, \tag{3.6.2}$$

где R — радиус белого карлика, а D – расстояние до Земли. Величина D для близлежащих белых карликов определяется по измерению их параллакса. Далее строится модель атмосферы белого карлика, зависящая от эффективной температуры и поверхностной силы тяжести, таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемый поток на различных длинах волн. Отсюда определяется значение R. Обширная сводка данных по этому вопросу с типичной неопределенностью 5—10% представлена Шипманом [536].

Найти массу белого карлика гораздо труднее, так как для этого нужно, чтобы звезда входила в двойную или тройную систему, что позволяет определить массу по ее динамике. В настоящее время известны три белых карлика, для которых как масса, так и радиус известны с довольно хоро-

---

[1] См. приложение А, где Г—Р-диаграмма обсуждается более подробно.

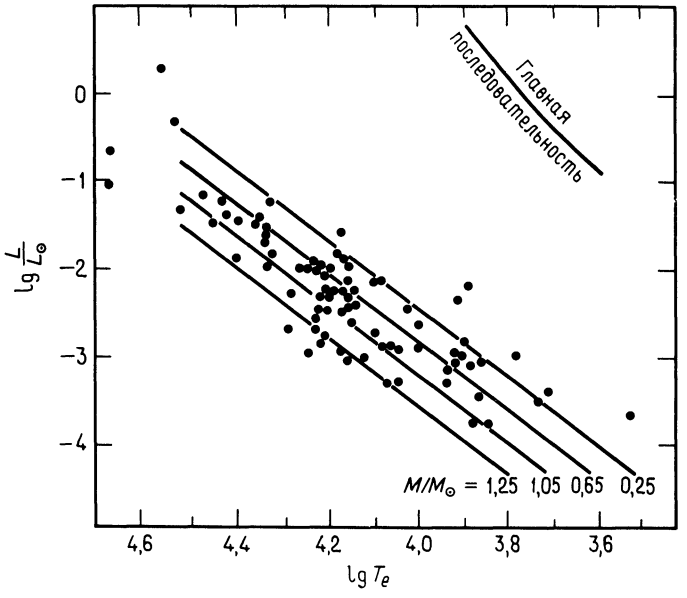

Рис. 3.3. Положения белых карликов, расстояния до которых известны, на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Наклонные линии отвечают постоянному значению радиуса; приписанное им значение массы получено из уравнения состояния Чандрасекара при $\mu_e = 2$. (Данные собраны Суини [554].)

шей точностью. Они перечислены в табл. 3.2 и указаны на графиках зависимости M от R (рис. 3.1), полученных Хамадой и Солпитером. Для Процион B, который обычно изображают на таких диаграммах, неопределенности в значениях M и R заметно больше.

Весьма обнадеживающим является то обстоятельство, что все три белых карлика с наиболее хорошо известными значениями M и R лежат точно на кривых Хамады—Солпитера. Действительно, наблюдения свидетельствуют в пользу предположения, что Сириус B и 40 Эридана B вовсе не состоят из одного чистого железа. Поскольку интервал ошибок отвечает одному стандартному отклонению (1σ), наблюдения не противоречат утверждению, что белые карлики состоят из углерода и кислорода, как и получается на основании современных расчетов эволюции их предшественников.

Еще одна проверка соотношения между массами и радиусами белых карликов может быть выполнена посредством измерения эйнштейновского гравитационного красного смещения[1]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \simeq \frac{GM}{Rc^2}. \tag{3.6.3}$$

[1] Мы выведем эту формулу в разд. 5.3.

Таблица 3.2

ЗНАЧЕНИЯ МАСС И РАДИУСОВ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

	Масса[1], $M_\odot$	Радиус[2], $R_\odot$	Красное смещение[3], км/с
Сириус B	$1{,}053 \pm 0{,}028$	$0{,}0074 \pm 0{,}0006$	$89 \pm 1{,}6$
40 Эридана B	$0{,}48 \pm 0{,}02$	$0{,}0124 \pm 0{,}0005$	$23{,}9 \pm 1{,}3$
Stein 2051	$0{,}50 \pm 0{,}05$ или $0{,}72 \pm 0{,}08$	$0{,}0115 \pm 0{,}0012$	?

[1] Масса Сириуса — по [217]; 40 Эридана B — по [270] (см., однако, [603]); Stein 2051 — по [552].
[2] Радиусы — по [536].
[3] Красное смещение Сириуса B — по [244]; 40 Эридана B — по [603].

Наблюдаемое гравитационное красное смещение обычно выражают как эквивалентное доплеровское смещение $\Delta\lambda/\lambda = v/c$, т.е.

$$v = 0{,}6362 \frac{M/M_\odot}{R/R_\odot} \text{ км/с} \quad . \tag{3.6.4}$$

Это дает 91 ± 8 км/с для Сириуса B и 22 ± 1,4 км/с для 40 Эридана B в прекрасном согласии с наблюдениями.

Упражнение 3.8. В литературе приведены следующие данные о красных смещениях: Ван Маанен 2: 14 ± 18 км/с [273] и 33 ± 16 км/с [218]; EG 64: 131 км/с; EG 113: 52 км/с; последние два результата получены Гринстейном и Тримбл [243], которые отмечают, что ошибки приведенных значений могут быть велики. Согласно Шипману [536], радиусы этих звезд равны соответственно 0,0138 $R_\odot$, 0,0182 $R_\odot$ и 0,0094 $R_\odot$. Согласуются ли эти значения с соотношением масса—радиус Хамады и Солпитера?

3.7. ПИКНОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В плотном веществе ядерные реакции могут идти даже при нулевой температуре. Эти реакции происходят в силу того, что нулевые колебания ионов с энергией $E_0 \sim \hbar\omega_0$ около узла решетки позволяют им преодолевать кулоновский барьер соседних ионов. В этом разделе мы грубо приближенно