

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

А.Т. Агишев

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

**Сборник лекций для студентов бакалавриата,
обучающихся по образовательной программе
«6В05306 - Физика и астрономия»**

Алматы, 2025

Лекция 8. Белые Карлики

Цель лекции

Познакомить студентов с физическими свойствами, структурой и эволюцией белых карликов — конечных остатков звёзд с начальными массами $\leq 8 M_{\odot}$, рассмотреть природу вырождения электронного газа, зависимость масса–радиус, предел Чандрасекара и механизмы охлаждения белых карликов.

Основные вопросы:

1. Происхождение белых карликов и предел Чандрасекара.
2. Состав и структура белых карликов.
3. Вырожденный электронный газ и его давление.
4. Зависимость масса–радиус и физический смысл.
5. Энергетика и процессы охлаждения белых карликов.
6. Классификация по спектральным типам (DA, DB и др.).
7. Наблюдательные характеристики и распределение масс.

Краткие тезисы:

Происхождение и общие характеристики: **Белые карлики** — конечный этап эволюции звёзд с начальными массами **2.3–8 $M_{\odot}$** , которые после стадии **post-AGB** теряют оболочку и оставляют **вырожденное углеродно-кислородное ядро**.

Если масса ядра меньше **предела Чандрасекара ($\sim 1.44 M_{\odot}$)**, звезда не может продолжать коллапс и стабилизируется как белый карлик.

Звёзды с начальными массами $\geq 6 M_{\odot}$ также могут завершить эволюцию в виде белого карлика, если потери массы на AGB достаточно велики.

Типичные размеры: $R \approx R_{\oplus} \approx 10^{-2} R_{\odot}$, при массе $\sim 0.6 M_{\odot}$ и светимости $10^{-5} L_{\odot}$.

Состав и строение. Основная часть массы — углерод и кислород, внешние слои — гелий и, у некоторых, водород. Типы белых карликов: DA — атмосфера из водорода ($\sim 80\%$ объектов). DB — атмосфера из гелия ($\sim 20\%$). Редкие типы: DQ, DZ, DO — с линиями C, Ca, He и других элементов. Температуры: $200\,000\text{ K} \rightarrow 4\,000\text{ K}$, при этом большинство белых карликов горячее Солнца.

Вырожденный электронный газ и уравнение состояния. Давление в белом карлике создаётся **вырожденным электронным газом**, не зависящим от температуры. При этом структура определяется уравнением состояния:

$$P_e = K \rho^{5/3} \text{ (нерелятивистский случай)}$$

$$P_e = K' \rho^{4/3} \text{ (релятивистский случай)}$$

Электронное давление уравнивает гравитацию — поэтому белый карлик стабилен.

Соотношение масса–радиус. Радиус уменьшается при увеличении массы – обратная зависимость:

$$R \propto M^{-1/3}$$

для нерелятивистского газа, и ещё более крутая зависимость при релятивистском вырождении. При $M \rightarrow M_{\text{ch}}$ ($1.44 M_{\odot}$) радиус стремится к нулю — звезда неустойчива. Для маломассивных белых карликов R больше, а для массивных — меньше.

Механическая и тепловая структура. Механическая структура определяется давлением электронов (вырожденный газ). Тепловые свойства зависят от невырожденных ионов, которые хранят тепловую энергию. Перенос энергии осуществляется: в глубинах — теплопроводностью (ионы, не фотоны), во внешних слоях — излучением и конвекцией. Внешние слои — нормальный газ, действующий как тепловой изолятор, поэтому белые карлики остывают очень медленно.

Энергетика и охлаждение. Поскольку термоядерные реакции прекратились, излучение обусловлено **охлаждением ионов**:

$$L = -C_v M \frac{dT}{dt}$$

(светимость пропорциональна скорости снижения температуры). Охлаждение сопровождается незначительным гравитационным сжатием: половина выделяющейся энергии идёт на излучение, другая — увеличивает энергию Ферми электронов. В итоге звезда становится **чёрным карликом**, полностью вырожденным объектом без излучения. Время охлаждения белого карлика ($M \approx 1 M_{\odot}$, $L = 10^{-3} L_{\odot}$) — **$\sim 10^9$ лет**, что сопоставимо с возрастом Галактики.

Наблюдательные характеристики. Белые карлики образуют чёткую **последовательность** на диаграмме MV – $(B-V)$. Радиусы и массы одиночных белых карликов — близки; максимум распределения по массам:

$$\langle M \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$$

Белые карлики в двойных системах демонстрируют большой разброс масс. Самые старые и холодные белые карлики имеют светимость $L \approx 3 \times 10^{-5} L_{\odot}$.

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) При каких условиях образуется белый карлик?
- 2) Что представляет собой предел Чандрасекара и чему он равен?
- 3) Почему давление в белом карлике не зависит от температуры?
- 4) Объясните физический смысл зависимости масса–радиус.
- 5) В чём отличие DA и DB белых карликов?
- 6) Почему белые карлики остывают очень медленно?

- 7) Какова причина излучения белого карлика при отсутствии термоядерных реакций?
- 8) Как долго может длиться стадия охлаждения белого карлика?

Рекомендуемый список литературных источников:

- 1) Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A. (2012). *Stellar structure and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>
- 2) Шварцшильд, М. (2009). *Строение и эволюция звезд* (Пер. с англ., 4-е изд.). URSS.
- 3) Hansen, C. J., Kawaler, S. D., & Trimble, V. (2004). *Stellar interiors: Physical principles, structure, and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b97471>

Лекция 8. Белые Карлики

Как упоминалось в предыдущей лекции, звёзды со средней массой от **2.3 $M_{\odot}$ до примерно 8 $M_{\odot}$** в конечном итоге развивают вырожденное углеродно-кислородное ядро после стадии горения гелия. Точная масса этого ядра зависит от (до сих пор ещё не полностью изученного) механизма потери массы на стадии AGB. Когда масса ядра post-AGB звезды с начальной массой $\lesssim 8M_{\odot}$ меньше предела Чандрасекара ($\sim 1.4M_{\odot}$) то есть не превышает этого предела, в конце эволюции остаётся полностью вырожденная звезда: **белый карлик** рождается после стадии post-AGB.

Исследование звёздных скоплений подтверждает, что звёзды с начальной массой $\gtrsim 6M_{\odot}$ действительно могут завершить свою эволюцию как белые карлики. В ряде звёздных скоплений были найдены белые карлики с точкой поворота главной последовательности ниже звёзд с массой $6M_{\odot}$. В этих скоплениях звёзды с массой $\lesssim 6M_{\odot}$ всё ещё находятся на главной последовательности, следовательно, некоторые белые карлики должны быть конечным продуктом эволюции звёзд с начальными массами $\gtrsim 6M_{\odot}$. Эти звёзды явно потеряли большую часть массы на стадии AGB.

Белые карлики имеют размеры, сопоставимые с размерами Земли, и их масса примерно в 3×10^5 раз больше, чем у Земли. Белые карлики представляют собой однородный класс звёздных остатков. Они формируют чётко выраженную последовательность на диаграмме B–V, M_V . Самые холодные обнаруженные объекты имеют светимость около $3 \times 10^{-5} L_{\odot}$.

Сильная корреляция между светимостью (или M_V) и эффективной температурой (или B–V) показывает, что радиусы белых карликов должны быть очень похожи, а именно:

$$R \approx 0.01 R_{\odot}$$

Из наблюдаемых значений их поверхностной гравитации следует, что массы одиночных белых карликов также очень близки, с сильным максимумом распределения при

$$M \approx 0.6 M_{\odot}$$

Для белых карликов, находящихся в двойных системах, наблюдается гораздо больший разброс масс.

Белые карлики состоят в основном из углерода и кислорода, и имеют тонкие внешние оболочки из гелия и, возможно, водорода. Соотношение этих элементов зависит от эффективности горения гелия. В общем случае, чем массивнее белый карлик, тем больше углерода он содержит.

Из спектроскопических наблюдений сделан вывод, что состав **звёздной атмосферы** может быть различным. Наиболее частые белые карлики имеют

атмосферу, состоящую в основном из водорода. Они называются **DA белые карлики**.

80% известных белых карликов принадлежат к типу DA. Существует также группа белых карликов с атмосферой, состоящей в основном из гелия. Они называются **DB белые карлики**. Их доля составляет около 20%. Очень небольшое количество белых карликов имеют атмосферу со специфическим химическим составом, которая не относится к этим двум основным классам. Их делят на разные классы в зависимости от наблюдаемых спектральных линий определённых химических элементов. Эффективная температура белых карликов варьируется от **200 000 К** до **4 000 К**. Большинство этих звёзд имеет температуру выше солнечной, и именно поэтому введён термин «**белый карлик**».

У звезды с массой меньше **1.44 $M_{\odot}$** вырожденный электронный газ способен уравновесить огромную силу гравитации. Чем меньше масса белого карлика, тем больше обычного невырожденного вещества всё ещё остаётся.

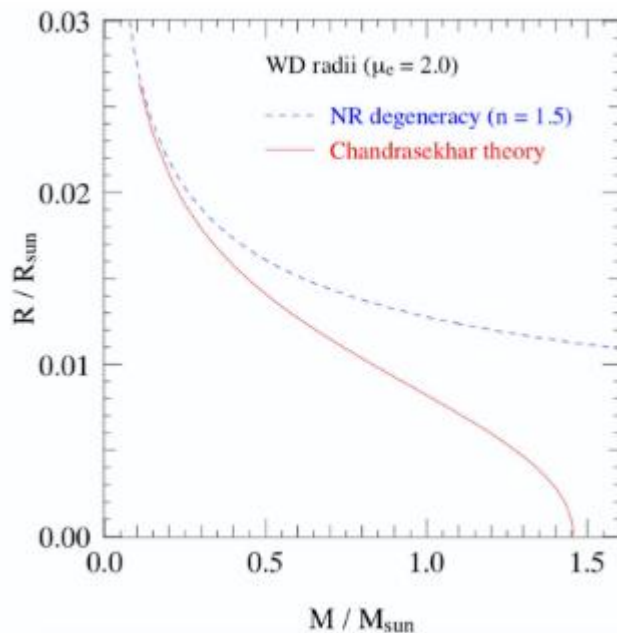


Рисунок 8.1 Схематическое представление зависимости масса–радиус для «классической» структуры белого карлика согласно теории Чандрасекара для полностью релятивистского вырожденного электронного газа. Для сравнения также показан нерелятивистский случай вырождения.

Во внешних слоях, как это характерно для конфигураций, состоящих из вырожденного вещества, механические и тепловые свойства разделены. С одной стороны, механическая структура хорошо описывается давлением электронов, принадлежащих к газу, состоящему из вырожденных электронов. С другой стороны, невырожденные ионы, подчиняющиеся законам идеального газа, ответственны за массу белого карлика.

Можно показать, что белые карлики следуют зависимости **масса–радиус**, то есть **радиус белых карликов зависит только от массы и не зависит от температуры**. Более того, из зависимости масса–радиус следует, что радиус тем меньше, чем больше масса, то есть масса обратно пропорциональна радиусу. Эта «классическая структура белого карлика» показана на рисунке 8.1. По обе стороны от этой зависимости, в областях низкой массы и высокой массы, требуются поправки, так как классическая теория, выведенная Чандрасекаром, больше не применима. Таким образом, более точно определённый предел Чандрасекара равен только **1.44 $M_{\odot}$** .

Тепловые свойства ответственны за излучение и дальнейшую эволюцию белого карлика. В глубинных областях белого карлика вещество вырождено, и перенос энергии осуществляется очень эффективно с помощью теплопроводности, при которой тепло переносят ядра, а не фотоны. В наружных слоях перенос энергии происходит по-другому. Наружные слои содержат менее вырожденное вещество, и перенос энергии осуществляется через излучение или конвекцию. Наружные слои состоят из нормального газа, который действует как очень эффективный изолирующий слой, заставляя белый карлик остывать постепенно и очень медленно. Таким образом, у нас есть невырожденный внешний слой, в котором температура гораздо ниже, и который изолирует вырожденное изотермическое горячее ядро. По этой причине белый карлик слабо светится в оптическом диапазоне, но ярко излучает в рентгеновском диапазоне, так как эти длины волн улавливают излучение горячего ядра.

Так как термоядерные реакции больше не происходят, излучение, которое испускает белый карлик, должно происходить из другого энергетического источника. Для белых карликов энергия, необходимая для объяснения светимости, получается из **охлаждения ионов**:

$$L \sim \dot{T}$$

(то есть светимость пропорциональна скорости снижения температуры).

Происходит крайне слабое гравитационное сжатие из-за охлаждения, так как уменьшается только давление ионов, но не электронное давление, которое является наиболее важным из обоих.

Половина гравитационной энергии, высвобождаемой сжатием, используется для обеспечения светимости, а другая половина идёт на увеличение энергии Ферми электронов. Наконец, результат этого механизма охлаждения заключается в том, что белый карлик эволюционирует в «**чёрный карлик**»: сжатие полностью останавливается, и вся энергия имеет форму энергии Ферми электронов в этот момент.

Типичное время охлаждения белого карлика с массой **1 $M_{\odot}$** и светимостью $L/L_{\odot}=10^{-3}$ составляет **10⁹ лет**. Самые старые наблюдаемые белые карлики имеют возраст, сопоставимый с возрастом нашей Галактики.

Список литературы:

- 4) Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A. (2012). *Stellar structure and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>
- 5) Шварцшильд, М. (2009). *Строение и эволюция звезд* (Пер. с англ., 4-е изд.). URSS.
- 6) Hansen, C. J., Kawaler, S. D., & Trimble, V. (2004). *Stellar interiors: Physical principles, structure, and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b97471>