

Ахмедов Георгий Рафикович

Белые карлики

Отчет о семинаре

Руководитель:
профессор А. Ф. Холтыгин

СПбГУ, Санкт-Петербург – 2015

Содержание

1	Определение Белых Карликов	3
2	История открытия	5
2.1	Парадокс плотности	6
3	Происхождение белых карликов	8
3.1	Тройная гелиевая реакция и изотермические ядра красных гигантов	8
3.2	Потеря массы красными гигантами и сброс ими оболочки	11
4	Физика и свойства белых карликов	13
4.1	Зависимость масса — радиус и предел Чандрасекара	14
4.2	Особенности спектров и спектральная классификация	15
5	Эволюция белых карликов	17
6	Астрономические феномены и белые карлики	21
6.1	Рентгеновское излучение белых карликов	21
6.2	Аккреция на белые карлики в двойных системах	22

1 Определение Белых Карликов

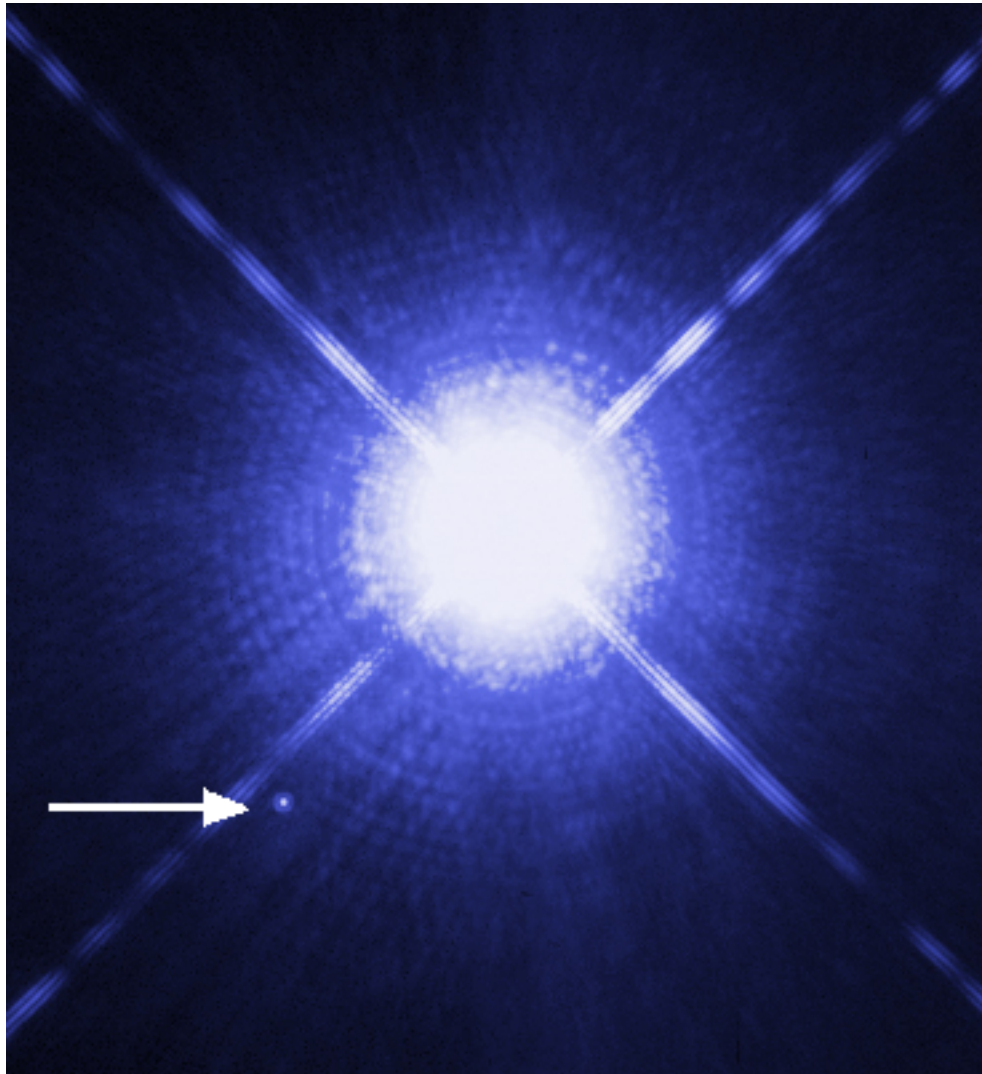


Рис. 1: Сириус А и Сириус Б, “Глазами” космического телескопа Хаббл.

Белые карлики — проэволюционировавшие звёзды с массой, не превышающей предел Чандрасекара (максимальная масса, при которой звезда может существовать как белый карлик), лишённые собственных источников термоядерной энергии.

Белые карлики представляют собой компактные звёзды с массами, сравнимыми или больше массы Солнца, но с радиусами в 100 раз меньше [1] и, соответственно, болометрическими светимостями в 10 000 раз меньше солнечной. Средняя плотность вещества белых карликов в пределах их

фотосфер $10^5\text{--}10^9$ г/см³ [1], что почти в миллион раз выше плотности звёзд главной последовательности. По распространённости белые карлики составляют, по разным оценкам, 3—10 % звёздного населения нашей Галактики. Неопределённость оценки обусловлена трудностью наблюдения удалённых белых карликов из-за их малой светимости.

Характеристика	Солнце	Земля	Сириус Б
Масса (M_{\odot})	1.0	$3 \cdot 10^{-6}$	0.94
Радиус (R_{\odot})	1.0	0.009	0.008
Светимость (L_{\odot})	1.0	0.0	
Средняя плотность (г/см ³)	1.41	5.5	$2.8 \cdot 10^6$
Плотность ядра (г/см ³)	160	9.6	$3.3 \cdot 10^7$
Температура поверхности (K°)	5770	287	27000
Температура ядра (K°)	$1.6 \cdot 10^7$	4200	$2.2 \cdot 10^7$

2 История открытия

Первым открытым белым карликом [2] стала звезда 40 Эридана В в тройной системе 40 Эридана, которую ещё в 1785 году Вильям Гершель включил в каталог двойных звёзд [3]. В 1910 году Генри Норрис Расселл обратил внимание на аномально низкую светимость 40 Эридана В при её высокой цветовой температуре, что и послужило впоследствии выделению подобных звёзд в отдельный класс белых карликов.

Вторым и третьим открытыми белыми карликами стали Сириус В и Процион В. В 1844 году директор Кёнигсбергской обсерватории Фридрих Бессель, анализируя данные наблюдений, которые велись с 1755 года, обнаружил, что Сириус, ярчайшая звезда неба, и Процион периодически, хотя и весьма слабо, отклоняются от прямолинейной траектории движения по небесной сфере [4]. Бессель пришёл к выводу, что у каждой из них должен быть близкий спутник. Сообщение было встречено скептически, поскольку слабый спутник оставался ненаблюдаемым, а его масса должна была быть достаточно велика — сравнимой с массой Сириуса и Проциона, соответственно.

В январе 1862 года Элвин Грэхэм Кларк, юстируя 18-дюймовый рефрактор, самый большой на то время телескоп в мире (Dearborn Telescope), впоследствии поставленный семейной фирмой Кларков в обсерваторию Чикагского университета, обнаружил в непосредственной близости от Сириуса тусклую звёздочку. Это был спутник Сириуса, Сириус В, предсказанный Бесселем. [5]

А в 1896 году американский астроном Д. М. Шеберле открыл Процион В, подтвердив тем самым и второе предсказание Бесселя.

В 1915 году американский астроном Уолтер Сидней Адамс измерил спектр Сириуса В. Из измерений следовало, что его температура не ниже, чем у Сириуса А (по современным данным, температура поверхности Сириуса В составляет $25\,000\text{ K}^\circ$, а Сириуса А — $10\,000\text{ K}^\circ$, что, с учётом его в 10 000 раз более низкой светимости, чем у Сириуса А, указывает на очень малый радиус и, соответственно, высокую плотность — 10^6 г/см^3 (плотность Сириуса $0,25\text{ г/см}^3$, плотность Солнца $1,4\text{ г/см}^3$).

В 1917 году Адриан ван Маанен открыл [6] ещё один белый карлик — звезду ван Маанена в созвездии Рыб.

В 1922 году Виллем Якоб Лейтен предложил называть такие звёзды «белыми карликами». [7]

2.1 Парадокс плотности

В начале XX века Герцшпрунгом и Расселлом была открыта закономерность в отношении спектрального класса (то есть температуры) и светимости звёзд — диаграмма Герцшпрунга — Расселла (Г—Р диаграмма). Казалось, что всё разнообразие звёзд укладывается в две ветви Г—Р диаграммы — главную последовательность и ветвь красных гигантов. В ходе работ по накоплению статистики распределения звёзд по спектральному классу и светимости Расселл обратился в 1910 году к профессору Эдуарду Пикерингу. Дальнейшие события Расселл описывает так [8]:

«Я был у своего друга . . . профессора Э. Пиккеринга с деловым визитом. С характерной для него добротой он предложил получить спектры всех звёзд, которые Хинкс и я наблюдали . . . с целью определения их параллаксов. Эта часть казавшейся рутинной работы оказалась весьма плодотворной — она привела к открытию того, что все звёзды очень малой абсолютной величины (то есть низкой светимости) имеют спектральный класс М (то есть очень низкую поверхностную температуру). Как мне помнится, обсуждая этот вопрос, я спросил у Пиккеринга о некоторых других слабых звёздах. . . , упомянув, в частности, 40 Эридана В. Ведя себя характерным для него образом, он тут же отправил запрос в офис (Гарвардской) обсерватории, и вскоре был получен ответ (я думаю, от миссис Флеминг), что спектр этой звезды — А (то есть высокая поверхностная температура). Даже в те палеозойские времена я знал об этих вещах достаточно, чтобы сразу же осознать, что здесь имеется крайнее несоответствие между тем, что мы тогда называли бы „возможными“ значениями поверхностной яркости и плотности. Я, видимо, не скрыл, что не просто удивлён, а буквально сражён этим исключением из того, что казалось вполне нормальным правилом для характеристик звёзд. Пиккеринг же улыбнулся мне и сказал: „Именно такие исключения и ведут к расширению наших знаний“ — и белые карлики вошли в мир исследуемого»

Удивление Расселла вполне понятно: 40 Эридана В относится к относительно близким звёздам, и по наблюдаемому параллаксу можно достаточно точно определить расстояние до неё и, соответственно, светимость. Светимость 40 Эридана В оказалась аномально низкой для её спектрального класса — белые карлики образовали новую область на Г—Р диаграмме. Такое сочетание светимости, массы и температуры было непонятно и не находило объяснения в рамках стандартной модели строения звёзд главной последовательности, разработанной в 1920-х годах.

Высокая плотность белых карликов оставалась необъяснимой в рамках классической физики и астрономии и нашла объяснение лишь в рамках квантовой механики после появления статистики Ферми — Дирака. В 1926 году Фаулер в статье «О плотной материи» («On dense matter», *Monthly Notices R. Astron. Soc.* 87, 114—122) [9] показал, что, в отличие от звёзд главной последовательности, для которых уравнение состояния основывается на модели идеального газа (стандартная модель Эддингтона), для белых карликов плотность и давление вещества определяются свойствами вырожденного электронного газа (ферми-газа) [9].

Следующим этапом в объяснении природы белых карликов стали работы Якова Френкеля, Э. Стоунераген и Чандрасекара. [10] В 1928 году Френкель указал, что для белых карликов должен существовать верхний предел массы, то есть эти звёзды с массой выше определённого предела неустойчивы и должны коллапсировать. [11] К этому же выводу независимо пришёл в 1930 году Э. Стоунер, который дал правильную оценку предельной массы. Более точно её вычислил в 1931 году Чандрасекар в работе «Максимальная масса идеального белого карлика» («The maximum mass of ideal white dwarfs», *Astroph. J.* 74, 81—82) [12] (предел Чандрасекара) и независимо от него в 1932 году Л. Д. Ландау [10].

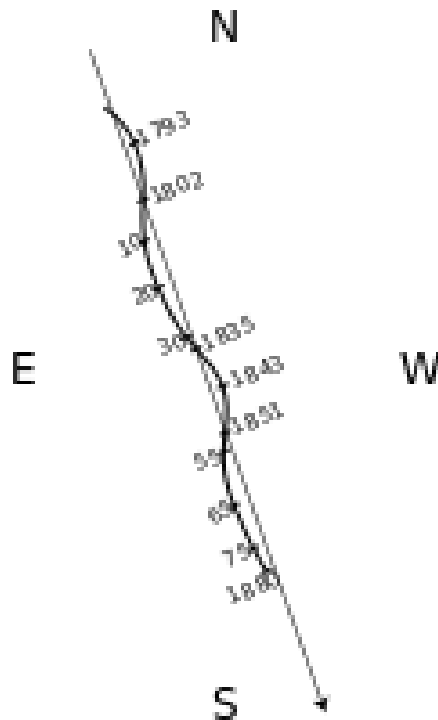


Рис. 2: идимое движение Сириуса по небесной сфере (по Фламариону)

3 Происхождение белых карликов

Решение Фаулера объяснило внутреннее строение белых карликов, но не пояснило механизм их происхождения. В объяснении генезиса белых карликов ключевую роль сыграли две идеи: мысль астронома Эрнста Эпика, что красные гиганты образуются из звёзд главной последовательности в результате выгорания ядерного горючего, и предположение астронома Василия Фесенкова, сделанное вскоре после Второй мировой войны, что звёзды главной последовательности должны терять массу, и такая потеря массы должна оказывать существенное влияние на эволюцию звёзд. Эти предположения полностью подтвердились.

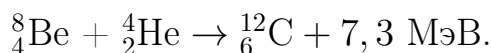
3.1 Тройная гелиевая реакция и изотермические ядра красных гигантов

В процессе эволюции звёзд главной последовательности происходит «выгорание» водорода — нуклеосинтез с образованием гелия. Такое выгорание приводит к прекращению энерговыделения в центральных частях звезды, сжатию и, соответственно, к повышению температуры и плотности в её ядре. Рост температуры и плотности в звёздном ядре ведёт к условиям, в которых активируется новый источник термоядерной энергии: выгорание гелия (тройная гелиевая реакция или тройной альфа-процесс), характерный для красных гигантов и сверхгигантов.

При температурах порядка 10^8 K° кинетическая энергия ядер гелия становится достаточно высокой для преодоления кулоновского барьера: два ядра гелия (${}^4\text{He}$, альфа-частицы) могут сливаться с образованием нестабильного изотопа бериллия ${}^8\text{Be}$:



Большая часть ${}^8\text{Be}$ снова распадается на две альфа-частицы, но при столкновении ${}^8\text{Be}$ с высокоэнергетической альфа-частицей может образоваться стабильное ядро углерода ${}^{12}\text{C}$:



Несмотря на весьма низкую равновесную концентрацию ${}^8\text{Be}$ (например, при температуре $\sim 10^8 \text{ K}^\circ$ отношение концентраций $[{}^8\text{Be}]/[{}^4\text{He}] \sim 10^{-10}$), скорость такой тройной гелиевой реакции оказывается достаточной для достижения нового гидростатического равновесия в горячем ядре звезды. Зависимость энерговыделения от температуры в тройной гелиевой реакции чрезвычайно высока, так, для диапазона температур $T \sim 1\text{--}2 \cdot 10^8 \text{ K}^\circ$ энерговыделение $\varepsilon_{3\alpha}$:

$$\varepsilon_{3\alpha} = 10^8 \rho^2 Y^3 * \left(\frac{T}{10^8}\right)^{30}$$

где Y — парциальная концентрация гелия в ядре (в рассматриваемом случае «выгорания» водорода близка к единице).

Следует, однако, отметить, что тройная гелиевая реакция характеризуется значительно меньшим энерговыделением, чем цикл Бете: в пересчёте на единицу массы энерговыделение при «горении» гелия более чем в 10 раз ниже, чем при «горении» водорода. По мере выгорания гелия и исчерпания источника энергии в ядре возможны и более сложные реакции нуклеосинтеза, однако, во-первых, для таких реакций требуются всё более высокие температуры, и, во-вторых, энерговыделение на единицу массы в таких реакциях падает по мере роста массовых чисел ядер, вступивших в реакцию.

Дополнительным фактором, по-видимому, влияющим на эволюцию ядер красных гигантов, является сочетание высокой температурной чувствительности тройной гелиевой реакции и реакций синтеза более тяжёлых ядер с механизмом нейтринного охлаждения: при высоких температурах и давлениях возможно рассеяние фотонов на электронах с образованием нейтрино-антинейтринных пар, которые свободно уносят энергию из ядра: звезда для них прозрачна. Скорость такого объёмного нейтринного охлаждения, в отличие от классического поверхностного фотонного охлаждения, не лимитирована процессами передачи энергии из недр звезды к её фотосфере. В результате реакции нуклеосинтеза в ядре звезды достигается новое равновесие, характеризующееся одинаковой температурой ядра: образуется изотермическое ядро.

В случае красных гигантов с относительно небольшой массой (порядка солнечной) изотермические ядра состоят, в основном, из гелия, в случае более массивных звёзд — из углерода и более тяжёлых элементов. Однако в любом случае плотность такого изотермического ядра настолько высока, что расстояния между электронами образующей ядро плазмы становятся соизмеримыми с их длиной волны Де Бройля $\lambda = h/mv$, то есть выполняются условия вырождения электронного газа. Расчёты показывают, что плотность изотермических ядер соответствует плотности белых карликов, то есть ядрами красных гигантов являются белые карлики.

На фотографии шарового звёздного скопления NGC 6397 идентифицируются белые карлики обоих типов: и гелиевые белые карлики, возникшие при эволюции менее массивных звёзд, и углеродные белые карлики — результат эволюции звёзд с большей массой.

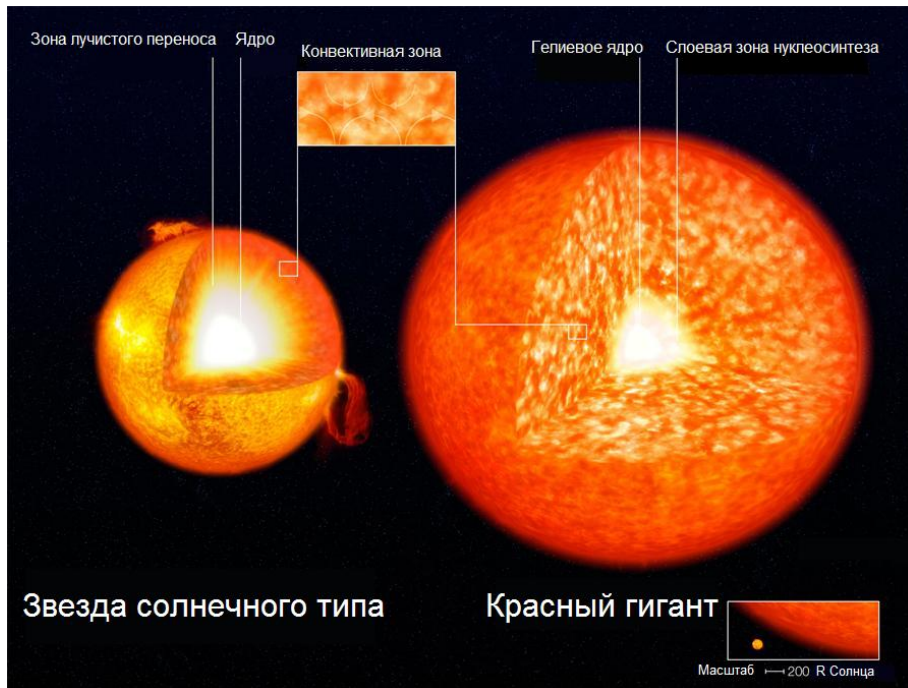


Рис. 3: Строение звезды главной последовательности солнечного типа и красного гиганта с изотермическим гелиевым ядром и слоевой зоной нуклеосинтеза (масштаб не соблюден).

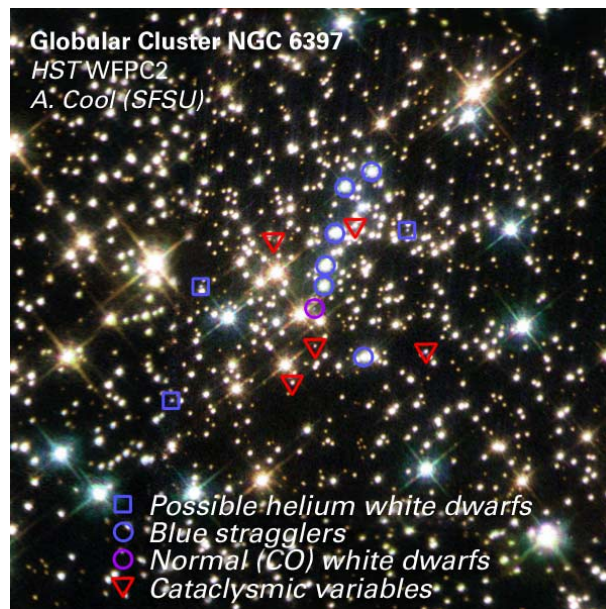


Рис. 4: Популяция белых карликов в шаровом звёздном скоплении NGC 6397. Синие квадраты — гелиевые белые карлики, фиолетовые кружки — «нормальные» белые карлики с высоким содержанием углерода.

3.2 Потеря массы красными гигантами и сброс ими оболочки

Ядерные реакции в красных гигантах происходят не только в ядре: по мере выгорания водорода в ядре, нуклеосинтез гелия распространяется на ещё богатые водородом области звезды, образуя сферический слой на границе бедных и богатых водородом областей. Аналогичная ситуация возникает и с тройной гелиевой реакцией: по мере выгорания гелия в ядре она также сосредотачивается в сферическом слое на границе между бедными и богатыми гелием областями. Светимость звёзд с такими «двухслойными» областями нуклеосинтеза значительно возрастает, достигая порядка нескольких тысяч светимостей Солнца, звезда при этом «раздувается», увеличивая свой диаметр до размеров земной орбиты. Зона нуклеосинтеза гелия поднимается к поверхности звезды: доля массы внутри этой зоны составляет 70 % массы звезды. «Раздувание» сопровождается достаточно интенсивным истечением вещества с поверхности звезды, наблюдаются такие объекты как протопланетарные туманности.

Такие звёзды явно нестабильны, и в 1956 году астроном и астрофизик Иосиф Шкловский предложил механизм образования планетарных туманностей через сброс оболочек красных гигантов, при этом обнажение изотермических вырожденных ядер таких звёзд приводит к рождению белых карликов [13]. Точные механизмы потери массы и дальнейшего сброса оболочки для таких звёзд пока неясны, но можно предположить следующие факторы, способные внести свой вклад в потерю оболочки:

- Из-за крайне высокой светимости существенным становится световое давление потока излучения звезды на её внешние слои, что, по расчётным данным, может привести к потере оболочки за несколько тысяч лет.
- Вследствие ионизации водорода в областях, лежащих ниже фотосферы, может развиться сильная конвективная неустойчивость. Аналогичную природу имеет солнечная активность, в случае же красных гигантов мощность конвективных потоков должна значительно превосходить солнечную.
- В протяжённых звёздных оболочках могут развиваться неустойчивости, приводящие к сильным колебательным процессам, сопровождающимся изменением теплового режима звезды. На рис. 5 наблюдаются волны плотности выброшенной звездой материи, которые могут быть следствиями таких колебаний.
- У красных гигантов с «двухслойным» термоядерным источником, перешедших на поздней стадии своей эволюции на асимптотическую ветвь

гигантов, наблюдаются термические пульсации, сопровождающиеся «переключением» водородного и гелиевого термоядерных источников и интенсивной потерей массы.

Так или иначе, но достаточно длительный период относительно спокойного истечения вещества с поверхности красных гигантов заканчивается сбросом его оболочки и обнажением его ядра. Такая сброшенная оболочка наблюдается как планетарная туманность. Скорости расширения протопланетарных туманностей составляют десятки км/с, то есть близки к значению параболических скоростей на поверхности красных гигантов, что служит дополнительным подтверждением их образования сбросом «излишка массы» красных гигантов.

Сейчас предложенный Шкловским сценарий конца эволюции красных гигантов является общепринятым и подкреплён многочисленными наблюдательными данными.

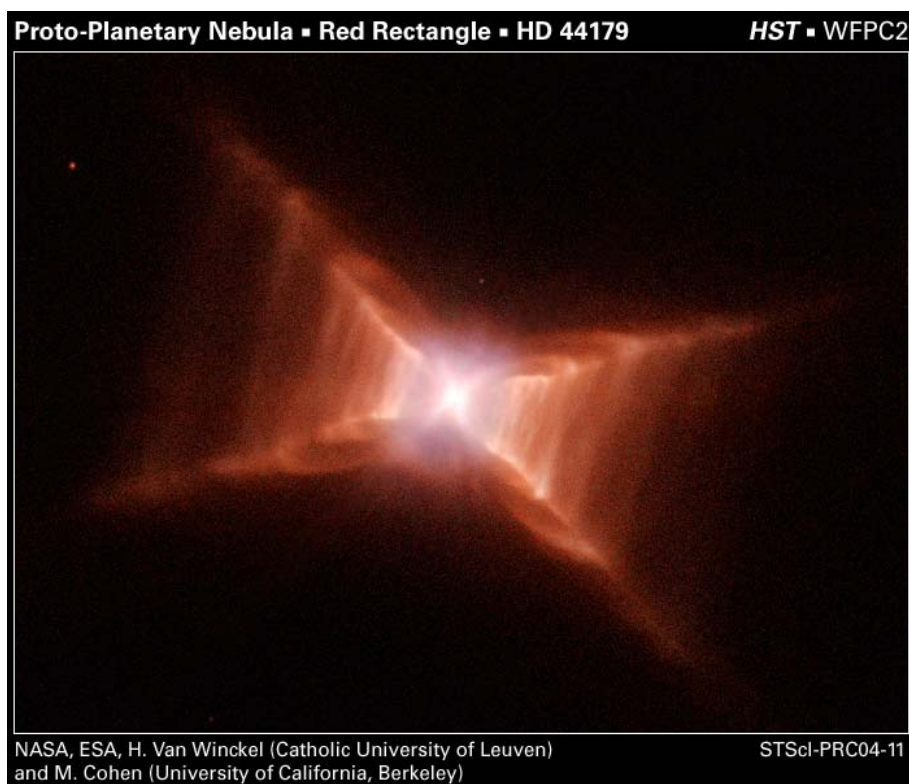


Рис. 5: Протопланетарная туманность HD 44179: асимметричный выброс газопылевой материи красным гигантом.

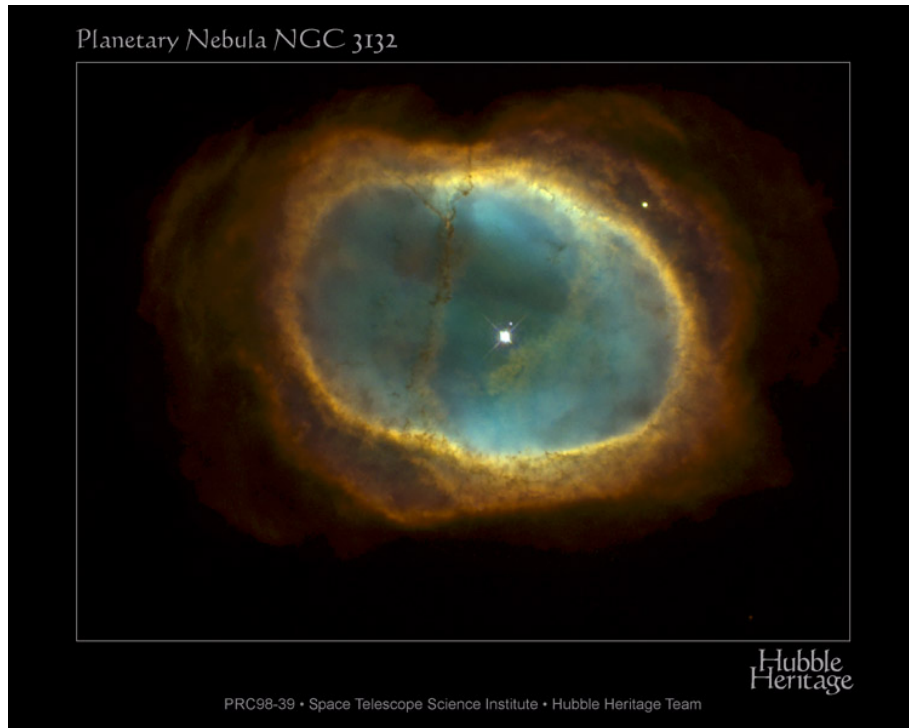


Рис. 6: Планетарная туманность NGC 3132: в центре двойная звезда — аналог Сириуса.

4 Физика и свойства белых карликов

Как уже упоминалось, массы белых карликов составляют порядка солнечной, но размеры составляют лишь сотую (и даже меньше) часть солнечного радиуса, то есть плотность вещества в белых карликах чрезвычайно высока и составляет $\rho \sim 10^5 - 10^9$ г/см³. При таких плотностях электронные оболочки атомов разрушаются, и вещество представляет собой электронно-ядерную плазму, причем её электронная составляющая представляет собой вырожденный электронный газ. Давление P такого газа подчиняется следующей зависимости:

$$P = K\rho^{5/3}$$

где ρ — его плотность, то есть, в отличие от уравнения Клапейрона (уравнения состояния идеального газа), для вырожденного электронного газа температура в уравнение состояния не входит — его давление от температуры не зависит, и, следовательно, строение белых карликов не зависит от температуры. Таким образом, для белых карликов, в отличие от звёзд главной последовательности и гигантов, не существует зависимость масса — светимость.

4.1 Зависимость масса — радиус и предел Чандрасекара

Вышеприведённое уравнение состояния действительно для холодного электронного газа, но температура даже в несколько миллионов градусов мала по сравнению с характерной ферми-энергией электронов ($kT \ll E_F$). Вместе с тем, при росте плотности вещества из-за запрета Паули (два электрона не могут иметь одно квантовое состояние, то есть одинаковую энергию и спин), энергия и скорость электронов возрастают настолько, что начинают действовать эффекты теории относительности — вырожденный электронный газ становится релятивистским. Зависимость давления P релятивистского вырожденного электронного газа от плотности уже другая:

$$P = K\rho^{4/3}$$

Для такого уравнения состояния складывается интересная ситуация. Средняя плотность белого карлика

$$\rho \sim M/R^3,$$

где M — масса, а R — радиус белого карлика. Тогда давление:

$$P \sim M^{4/3}/R^4$$

и сила давления, противодействующая гравитации и равная перепаду давления по глубине:

$$\frac{P}{R} \sim \frac{M^{4/3}}{R^5}$$

Гравитационные силы, противодействующие давлению:

$$\frac{\rho GM}{R^2} \sim \frac{M^2}{R^5},$$

то есть, хотя перепад давления и гравитационные силы одинаково зависят от радиуса, но по-разному зависят от массы — как $\sim M^{4/3}$ и $\sim M^2$ соответственно. Следствием такого соотношения зависимостей является существование некоторого значения массы звезды, при которой гравитационные силы уравновешиваются силами давления, а при увеличении массы белого карлика его радиус уменьшается. Другим следствием является то, что если масса больше некоторого предела (предел Чандрасекара), то звезда коллапсирует.

Таким образом, для белых карликов существует верхний предел массы. Интересно, что для наблюдаемых белых карликов существует и аналогичный нижний предел: поскольку скорость эволюции звёзд пропорциональна их массе, то мы можем наблюдать маломассивные белые карлики как остатки лишь тех звёзд, которые успели проэволюционировать за время от начального периода звездообразования Вселенной до наших дней.

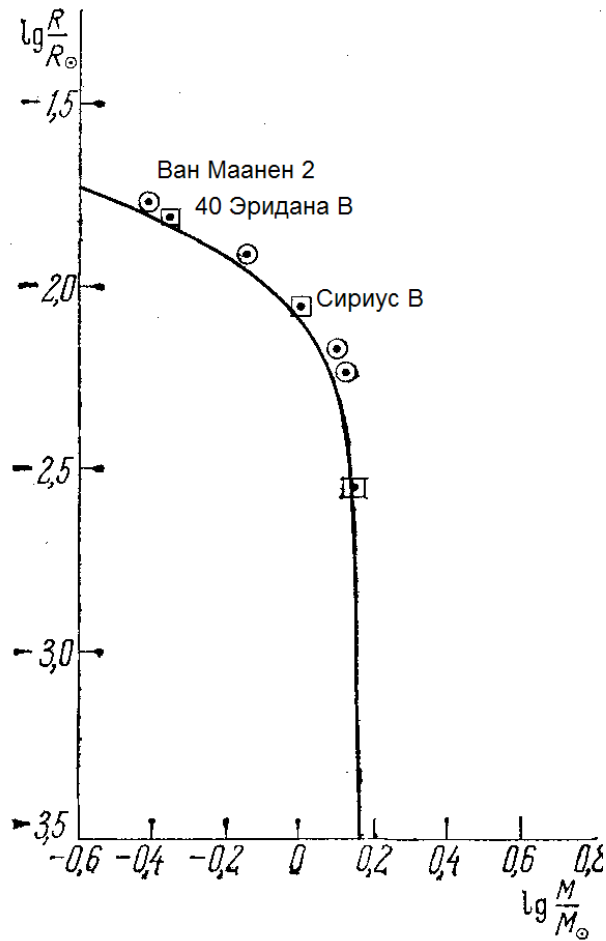


Рис. 7: Зависимость масса — радиус для белых карликов. Вертикальная асимптота соответствует пределу Чандрасекара.

4.2 Особенности спектров и спектральная классификация

Спектры белых карликов сильно отличаются от спектров звёзд главной последовательности и гигантов. Главная их особенность — небольшое число сильно уширенных линий поглощения, а некоторые белые карлики (спектральный класс DC) вообще не содержат заметных линий поглощения. Малое число линий поглощения в спектрах звёзд этого класса объясняется очень сильным уширением линий: только самые сильные линии поглощения, уширяясь, имеют достаточную глубину, чтобы остаться заметными, а слабые, из-за малой глубины, практически сливаются с непрерывным спектром.

Особенности спектров белых карликов объясняются несколькими факторами. Во-первых, из-за высокой плотности белых карликов ускорение свобод-

ного падения на их поверхности составляет $\sim 10^8$ см/с² (или ~ 1000 км/с²), что, в свою очередь, приводит к малым протяжённостям их фотосфер, огромным плотностям и давлениям в них и уширению линий поглощения. Другим следствием сильного гравитационного поля на поверхности является гравитационное красное смещение линий в их спектрах, эквивалентное скоростям в несколько десятков км/с. Во-вторых, у некоторых белых карликов, обладающих сильными магнитными полями, наблюдаются сильная поляризация излучения и расщепление спектральных линий вследствие эффекта Зеемана.

Белые карлики выделяются в отдельный спектральный класс D (от англ. Dwarf — карлик), в настоящее время используется классификация, отражающая особенности спектров белых карликов, предложенная в 1983 г. Эдвардом Сионом; в этой классификации спектральный класс записывается в следующем формате [14]:

D [подкласс] [особенности спектра] [температурный индекс],

при этом определены следующие подклассы:

- DA — в спектре присутствуют линии бальмеровской серии водорода, линии гелия не наблюдаются
- DB — в спектре присутствуют линии гелия He I, линии водорода или металлов отсутствуют
- DC — непрерывный спектр без линий поглощения
- DO — в спектре присутствуют сильные линии гелия He II, также могут присутствовать линии He I и H
- DZ — только линии металлов, линии H или He отсутствуют
- DQ — линии углерода, в том числе молекулярного C₂

и спектральные особенности:

- P — наблюдается поляризация света в магнитном поле
- H — поляризация при наличии магнитного поля не наблюдается
- V — звёзды типа ZZ Кита или другие переменные белые карлики
- X — пекулярные или неклассифицируемые спектры

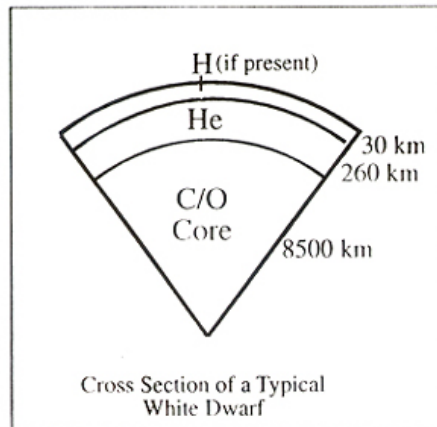


Рис. 8: Разрез типичного Белого карлика.

5 Эволюция белых карликов

Белые карлики начинают свою эволюцию как обнажившиеся вырожденные ядра красных гигантов, сбросивших свою оболочку — то есть в качестве центральных звёзд молодых планетарных туманностей. Температуры фотосфер ядер молодых планетарных туманностей чрезвычайно высоки — так, например, температура центральной звезды туманности NGC 7293 составляет от $90\,000\text{ K}^\circ$ (оценка по линиям поглощения) до $130\,000\text{ K}^\circ$ (оценка по рентгеновскому спектру) [15]. При таких температурах большая часть спектра приходится на жёсткое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение.

Вместе с тем, наблюдаемые белые карлики по своим спектрам преимущественно делятся на две большие группы — «водородные» спектрального класса DA, в спектрах которых отсутствуют линии гелия, которые составляют 80 % популяции белых карликов, и «гелиевые» спектрального класса DB без линий водорода в спектрах, составляющие большую часть оставшихся 20 % популяции. Причина такого различия состава атмосфер белых карликов долгое время оставалась неясной. В 1984 году Ико Ибен рассмотрел сценарии «выхода» белых карликов из пульсирующих красных гигантов, находящихся на асимптотической ветви гигантов, на различных фазах пульсации [16]. На поздней стадии эволюции у красных гигантов с массами до десяти солнечных в результате «выгорания» гелиевого ядра образуется вырожденное ядро, состоящее преимущественно из углерода и более тяжёлых элементов, окружённое невырожденным гелиевым слоевым источником, в котором идёт тройная гелиевая реакция. В свою очередь, над ним располагается слоевой водородный источник, в котором идут термоядерные реакции цикла Бете превращения водорода в гелий, окружённый водородной оболочкой; таким образом, внешний водородный слоевой источник является «производителем»

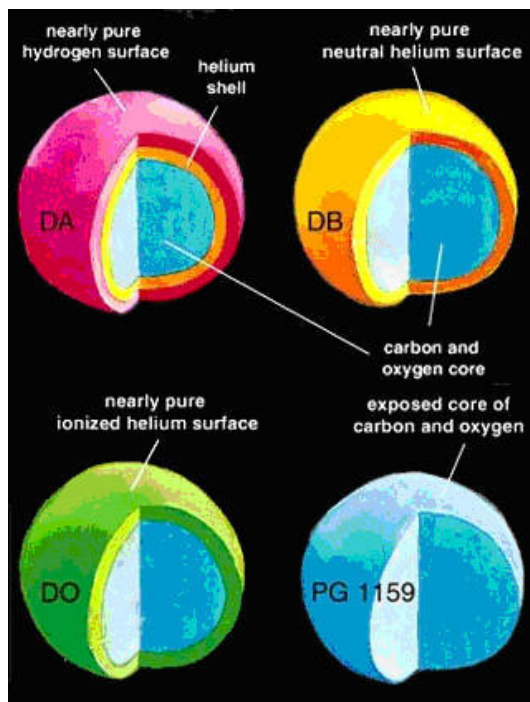


Рис. 9: Разрезы Белых карликов разных спектральных классов.

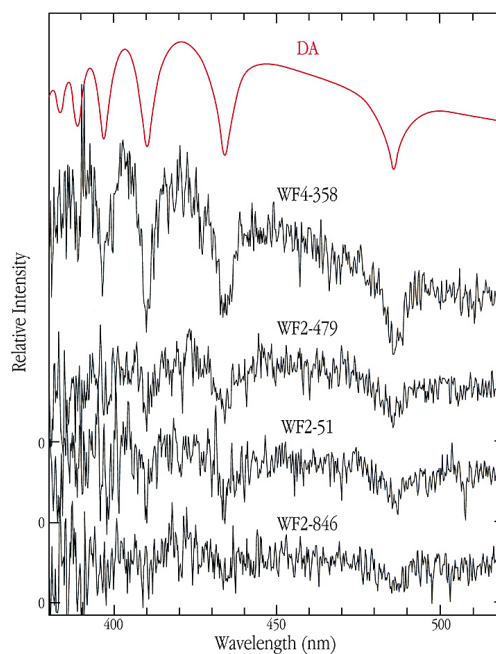


Рис. 10: Спектры белых карликов в шаровом скоплении NGC 6397. «Стандартный» спектр белого карлика спектрального класса DA для сравнения показан сверху (красный).

гелия для гелиевого слоевого источника. Горение гелия в слоевом источнике подвержено тепловой неустойчивости вследствие чрезвычайно высокой зависимости от температуры, и это усугубляется большей скоростью преобразования водорода в гелий по сравнению со скоростью выгорания гелия; результатом становится накопление гелия, его сжатие до начала вырождения, резкое повышение скорости тройной гелиевой реакции и развитие слоевой гелиевой вспышки.

За крайне короткое время (~ 30 лет) светимость гелиевого источника увеличивается настолько, что горение гелия переходит в конвективный режим, слой расширяется, выталкивая наружу водородный слоевой источник, что ведёт к его охлаждению и прекращению горения водорода. После выгорания избытка гелия в процессе вспышки светимость гелиевого слоя падает, внешние водородные слои красного гиганта сжимаются, и происходит новый поджог водородного слоевого источника.

Ибен предположил, что пульсирующий красный гигант может сбросить оболочку, образовав планетарную туманность, как в фазе гелиевой вспышки, так и в спокойной фазе с активным слоевым водородным источником, и, поскольку поверхность отрыва оболочки зависит от фазы, то при сбросе оболочки во время гелиевой вспышки обнажается «гелиевый» белый карлик спектрального класса DB, а при сбросе оболочки гигантом с активным слоевым водородным источником — «водородный» карлик DA; длительность гелиевой вспышки составляет около 20 % от длительности цикла пульсации, что и объясняет соотношение водородных и гелиевых карликов DA:DB 80:20.

Крупные звёзды (в 7—10 раз тяжелее Солнца) в какой-то момент «сжигают» водород, гелий и углерод и превращаются в белые карлики с богатым кислородом ядром. Звёзды SDSS 0922+2928 и SDSS 1102+2054 с кислородсодержащей атмосферой это подтверждают. [17]

Поскольку белые карлики лишены собственных термоядерных источников энергии, то они излучают за счёт запасов своего тепла. Мощность излучения абсолютно чёрного тела (интегральная мощность по всему спектру), приходящаяся на единицу площади поверхности, пропорциональна четвёртой степени температуры тела:

$$j = \sigma T^4$$

где j — мощность на единицу площади излучающей поверхности, а σ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана.

Как уже отмечалось, в уравнение состояния вырожденного электронного газа температура не входит — то есть радиус белого карлика и излучающая площадь остаются неизменными: в результате, во-первых, для белых карликов не существует зависимость масса — светимость, но существует зависимость возраст — светимость (зависящая только от температуры, но не от площади излучающей поверхности), и, во-вторых, сверхгорячие молодые белые карлики должны достаточно быстро остывать, так как поток излучения и, соответственно, темп остывания, пропорционален четвёртой степени температуры.

В пределе, после десятков миллиардов лет остывания любой белый карлик должен превратиться в так называемый Чёрный карлик (не излучающий видимый свет). Хотя пока таких объектов во Вселенной не наблюдается (по некоторым подсчетам минимум 10^{15} лет требуется для остывания белого карлика до температуры $5K^\circ$), так как время, прошедшее со времени образования первых звезд во Вселенной, составляет (по современным представлениям) около 13 миллиардов лет, но некоторые белые карлики уже охладели до температур ниже $4000 K^\circ$ (например белые карлики WD 0346+246 и SDSS J110217, 48+411315.4 с температурами $3700K^\circ$ — $3800K^\circ$ и спектральным классом M0 на расстоянии около 100 световых лет от Солнца [18]), что, наряду с малыми размерами, делает их обнаружение весьма сложной задачей.

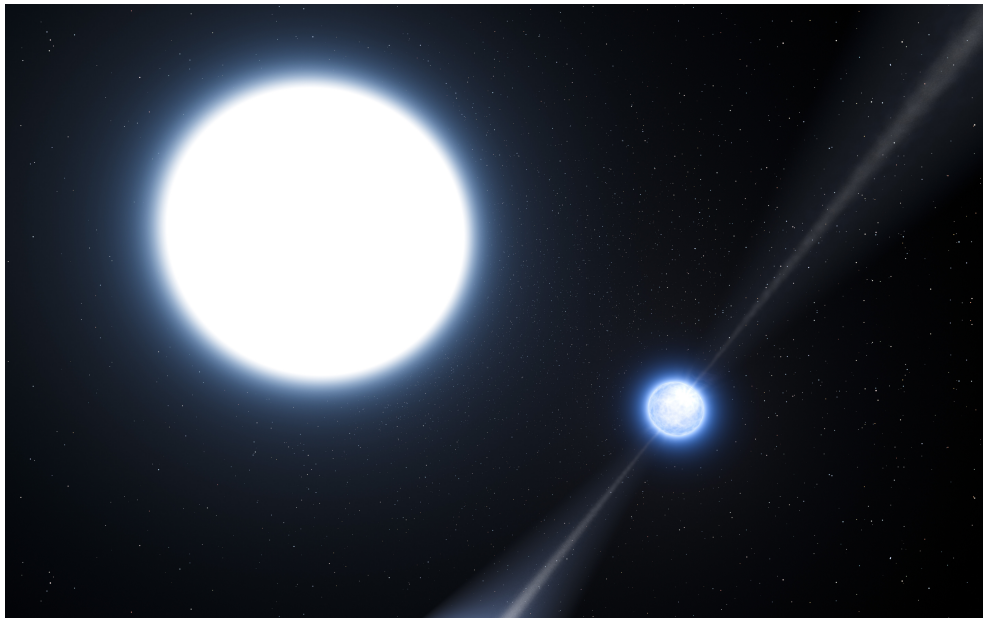


Рис. 11: Экзотическая двойная система PSR J0348+0432, состоящая из пульсара и белого карлика, который обращается вокруг него за 2,5 часа.

6 Астрономические феномены и белые карлики

6.1 Рентгеновское излучение белых карликов

Температура поверхности молодых белых карликов — изотропных ядер звёзд после сброса оболочек, очень высока — более $2 \cdot 10^5 \text{ K}^\circ$, однако достаточно быстро падает за счёт нейтринного охлаждения и излучения с поверхности. Такие очень молодые белые карлики наблюдаются в рентгеновском диапазоне (например, наблюдения белого карлика HZ 43 спутником ROSAT). В рентгеновском диапазоне светимость белых карликов превышает светимость звезд главной последовательности: иллюстрацией могут служить снимки Сириуса, сделанные рентгеновским телескопом «Чандра» — на них белый карлик Сириус Б выглядит ярче, чем Сириус А спектрального класса A1, который в оптическом диапазоне в 10 000 раз ярче Сириуса Б [19] [20].

Температура поверхности наиболее горячих белых карликов — $7 \cdot 10^4 \text{ K}^\circ$, наиболее холодных — меньше $4 \cdot 10^3 \text{ K}^\circ$ (см., например, Звезда ван Маанена и WD 0346+246 с SDSS J110217, 48+411315.4 спектрального класса M0).

Особенностью излучения белых карликов в рентгеновском диапазоне является тот факт, что основным источником рентгеновского излучения для них является фотосфера, что резко отличает их от «нормальных» звёзд: у последних в рентгене излучает корона, разогретая до нескольких миллионов кельвин, а температура фотосферы слишком низка для испускания рентгеновского излучения.

В отсутствие аккреции источником светимости белых карликов является запас тепловой энергии ионов в их недрах, поэтому их светимость зависит от возраста. Количественную теорию остывания белых карликов построил в конце 1940-х годов профессор Самуил Каплан [8].

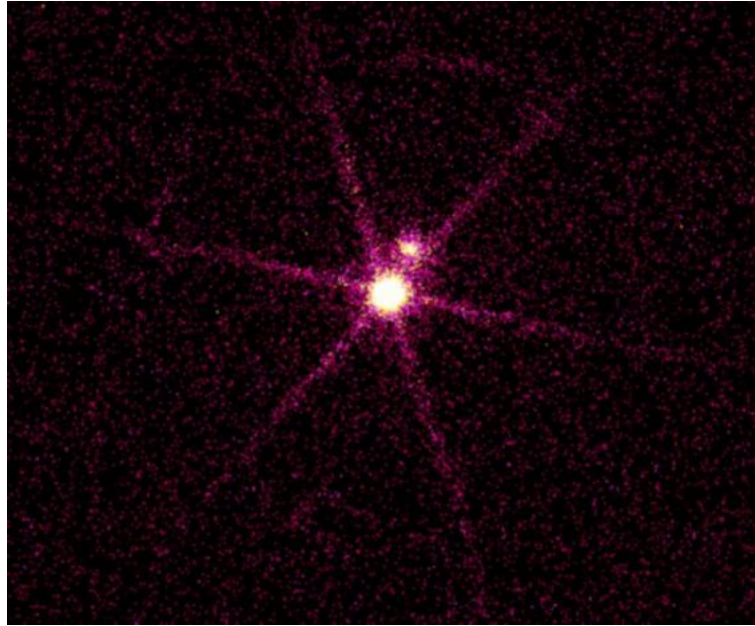


Рис. 12: Снимок Сириуса в мягком рентгеновском диапазоне. Яркий компонент — белый карлик Сириус Б, тусклый — Сириус А.

6.2 Аккреция на белые карлики в двойных системах

При эволюции звёзд различных масс в двойных системах темпы эволюции компонентов неодинаковы, при этом более массивный компонент может проэволюционировать в белый карлик, в то время как менее массивный к этому времени может оставаться на главной последовательности. В свою очередь, при сходе в процессе эволюции менее массивного компонента с главной последовательности и его переходе на ветвь красных гигантов размер эволюционирующей звезды начинает расти до тех пор, пока она не заполняет свою полость Роша. Поскольку полости Роша компонентов двойной системы соприкасаются в точке Лагранжа L_1 , то на этой стадии эволюции менее массивного компонента чего через точку L_1 начинается переток материи с красного гиганта в полость Роша белого карлика и дальнейшая аккреция богатой водородом материи на его поверхность, что приводит к ряду астрономических феноменов:

- Нестационарная аккреция на белые карлики в случае, если компаньон является массивный красный карлик, приводит к возникновению карликовых новых (звёзд типа U Gem (UG)) и новоподобных катастрофических переменных звёзд.
- Аккреция на белые карлики, обладающие сильным магнитным полем, направляется в район магнитных полюсов белого карлика, и циклотрон-

ный механизм излучения аккрецирующей плазмы в околополярных областях магнитного поля карлика вызывает сильную поляризацию излучения в видимой области (полюсы и промежуточные полюсы).

- Аккреция на белые карлики богатого водородом вещества приводит к его накоплению на поверхности (состоящей преимущественно из гелия) и разогреву до температур реакции синтеза гелия, что, в случае развития тепловой неустойчивости, приводит к взрыву, наблюдаемому как вспышка новой звезды.
- Достаточно длительная и интенсивная аккреция на массивный белый карлик приводит к превышению его массой предела Чандрасекара и гравитационному коллапсу, наблюдаемому как вспышка сверхновой типа Ia.

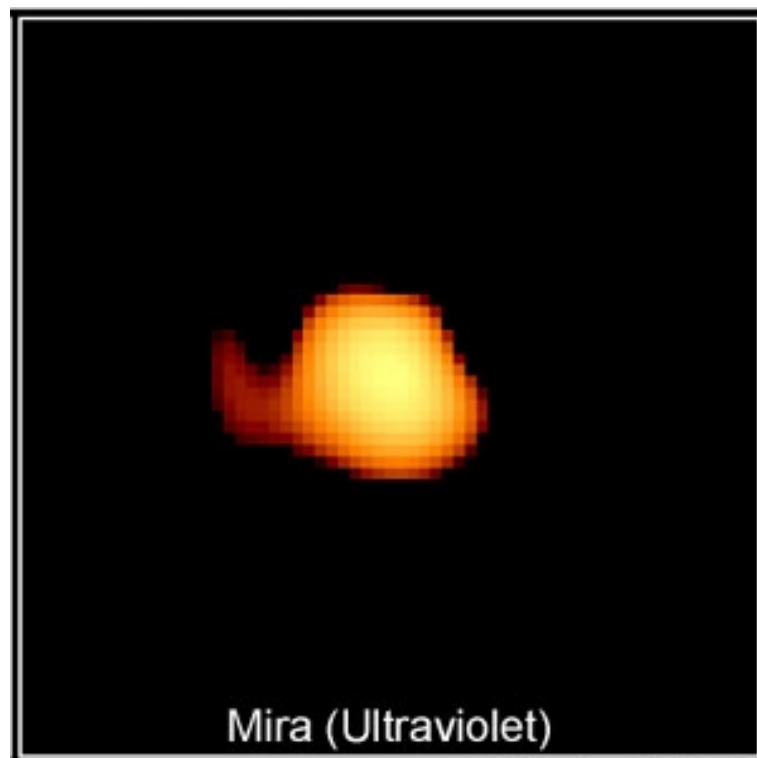


Рис. 13: Переменная звезда Мира (Кита) в ультрафиолетовом диапазоне. Виден аккреционный «хвост», направленный от основного компонента — красного гиганта к компаньону — белому карлику.

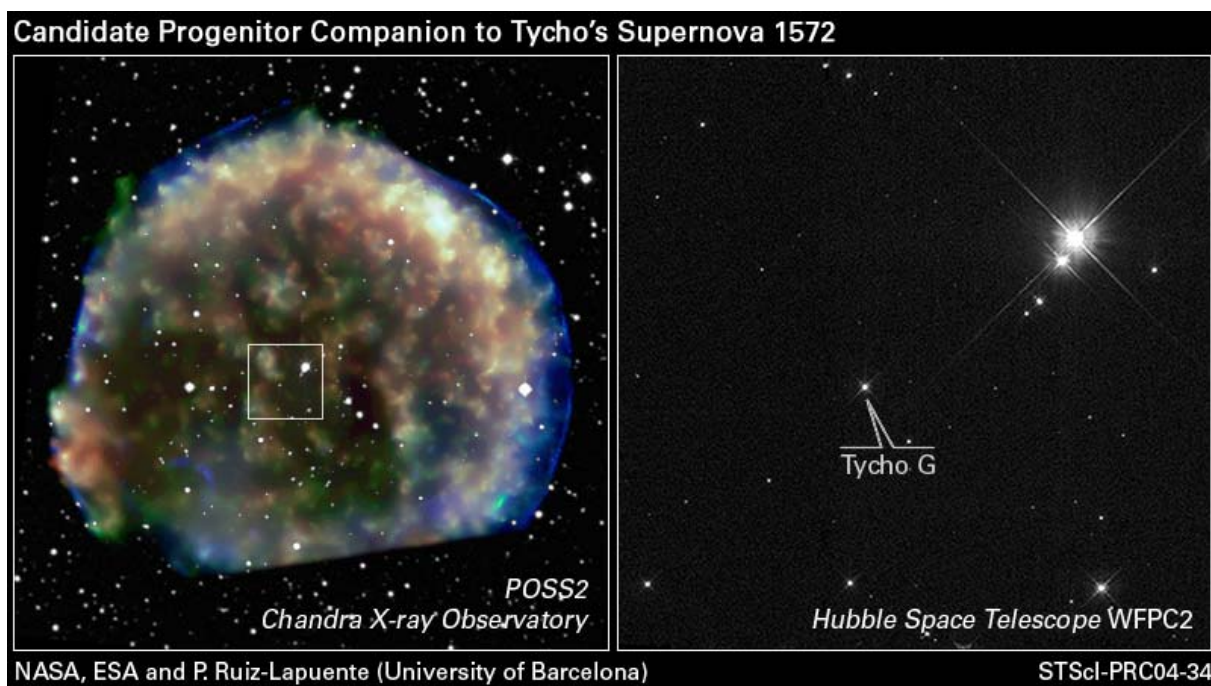


Рис. 14: Слева — изображение в рентгеновском диапазоне остатков сверхновой SN 1572 типа Ia, наблюдавшейся Тихо Браге в 1572 году. Справа — фотография в оптическом диапазоне, отмечен бывший компаньон взорвавшегося белого карлика.

Список литературы

- [1] Я. Б. Зельдович, С. И. Блинников, Н. И. Шакура. Физические основы строения и эволюции звёзд. — М.: МГУ, 1981.
- [2] E. Schatzman. White Dwarfs. — Amsterdam: North-Holland, 1958. — С. 1.
- [3] Catalogue of Double Stars, William Herschel, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 75 (1785), pp. 40-126
- [4] On the proper motions of Procyon and Sirius (англ.). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (12/1844)
- [5] Flammarion C. (1877). «The Companion of Sirius». Astronomical register 15: 186—189. Проверено 2010-01-05.
- [6] van Maanen A. Two Faint Stars with Large Proper Motion. Publications of the Astronomical Society of the Pacific (12/1917). — Vol. 29, No. 172, pp. 258—259.
- [7] (2005) «How Degenerate Stars Came to be Known as White Dwarfs». American Astronomical Society Meeting 207 207. Bibcode: 2005AAS...20720501H
- [8] В. В. Иванов. Белые карлики. Астронет (17.09.2002).
- [9] Fowler R. H. On dense matter (англ.). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (12/1926)
- [10] Яковлев Д.Г. Работа Я.И. Френкеля о силах сцепления и теория белых карликов (К 100-летию со дня рождения Я.И. Френкеля) // Успехи физических наук. — 1994. — Т. 164, № 3-4. — С. 653–656.
- [11] J. Frenkel Anwendung der Pauli-Fermischen Elektronengastheorie auf das Problem der Kohäsionskräfte (нем.) // Zeitschrift für Physik. — 1928. — Bd. 50, Nr. 3-4. — S. 234–248.
- [12] Chandrasekhar S. The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs (англ.). Astrophysical Journal (07/1931)
- [13] Шкловский И. С. О природе планетарных туманностей и их ядер // Астрономический журнал. — 1956. — Т. 33, № 3. — С. 315—329.
- [14] A proposed new white dwarf spectral classification system, E. M. Sion, J. L. Greenstein, J. D. Landstreet, J. Liebert, H. L. Shipman, and G. A. Wegner, The Astrophysical Journal 269, 1 (June 1, 1983), pp. 253—257.

- [15] Leahy, D. A.; C. Y. Zhang, Sun Kwok (1994). «Two-temperature X-ray emission from the planetary nebula NGC 7293». *The Astrophysical Journal* 422: 205-207. Проверено 2010-07-05.
- [16] Iben Jr, I. (1984). «On the frequency of planetary nebula nuclei powered by helium burning and on the frequency of white dwarfs with hydrogen-deficient atmospheres». *The Astrophysical Journal* 277: 333—354.
- [17] София Нескучная. Карлик дышит кислородом
- [18] 12-Billion-Year-Old White-Dwarf Stars Only 100 Light-Years Away
- [19] Sirius A and B: A Double Star System In The Constellation Canis Major // Photo Album of Chandra X-Ray Observatory