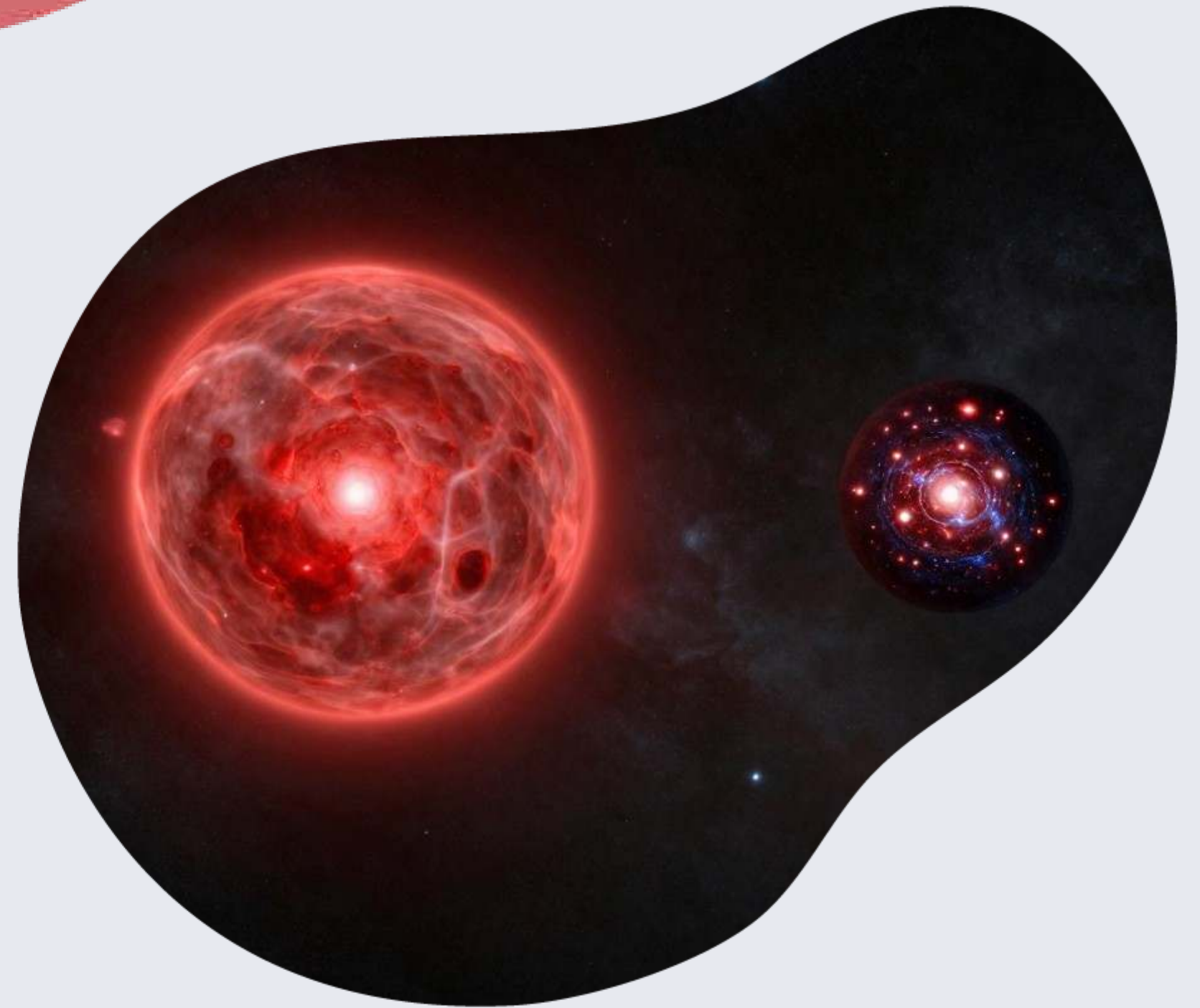


Размеры звёзд и плотность их вещества

Почему огромные звёзды иногда разрежены,
а компактные — чрезвычайно плотны?





От облака к звезде: что решает массу и размер

Звёзды рождаются из газопылевых облаков, но их дальнейшая судьба определяется массой. Именно она задаёт температуру ядра, темп термоядерных реакций и итоговый тип звезды — от крошечных объектов до сверхгигантов, превосходящих Солнце в тысячи раз по радиусу.

Как измеряют размеры и плотность звёзд

01

Радиусы в солнечных единицах

Чтобы сравнивать звёзды между собой, их радиусы обычно выражают через радиус Солнца. Такая шкала удобна для описания объектов от малых карликов до гигантов и сверхгигантов.

02

Масса как главная характеристика

Массу звезды сопоставляют с массой Солнца. Именно она сильнее всего влияет на внутреннее давление, температуру ядра, скорость термоядерных реакций и возможный путь эволюции.

03

Плотность в привычных единицах

Среднюю плотность записывают в г/см^3 , чтобы её можно было сравнивать с веществом на Земле. Это помогает увидеть, насколько звёздное вещество может быть разреженным или, наоборот, сжатым.

04

Как получают оценки

Радиус рассчитывают по светимости и температуре поверхности с помощью закона Стефана—Больцмана. Вместе с массой эти данные дают представление о размере, плотности и строении звезды.

05

Эталон для сравнения

Радиус Солнца составляет около 696 тысяч километров, а средняя плотность — примерно $1,4 \text{ г/см}^3$. Поэтому Солнце служит удобной точкой отсчёта для других звёзд.

Сравнение основных типов звёзд по размерам и плотности

Таблица показывает, как тип звезды связан с её радиусом, плотностью и стадией эволюции.

Чем больше радиус звезды, тем ниже обычно её средняя плотность; самые компактные объекты оказываются наиболее плотными.

Тип	Радиус	Плотность	Стадия
Белый карлик	≈ Земля	очень высокая	остаток
Главная последовательность	≈ Солнце	средняя	активная
Красный гигант	десятки $R_{\odot}$	низкая	поздняя
Красный сверхгигант	сотни–тысячи $R_{\odot}$	очень низкая	поздняя

Обобщение общепринятых астрономических оценок для типов звёзд



Средняя плотность звёзд разных типов

На диаграмме виден не только разрыв между классами, но и огромный диапазон плотностей, недостижимый в обычных земных условиях.

Плотность меняется на много порядков: от разреженной оболочки гигантов до сверхсжатого вещества белых карликов и нейтронных звёзд.

Справочные астрономические оценки: Солнце, красные гиганты, белые карлики, нейтронные звёзды

Солнце как эталон для сравнения звёзд

Удобная точка отсчёта

Солнце используют как стандарт, потому что его размеры и масса известны достаточно точно. Это позволяет выражать параметры других звёзд в понятных относительных единицах.

Связь с внутренним строением

Солнце показывает, что размер звезды не равен её однородности: внешние слои гораздо менее плотны, чем центральные области. Поэтому сравнение с Солнцем помогает понимать структуру других звёзд.

Плотность меняется к центру

Средняя плотность Солнца составляет около $1,4 \text{ г/см}^3$, но внутри она растёт к ядру. Именно там условия достаточно экстремальны для превращения водорода в гелий.



Красные карлики: маленькие, но очень долговечные

1 Небольшая масса

Красные карлики обычно имеют массу от 0,08 до 0,5 массы Солнца. Из-за этого гравитационное сжатие у них слабее, чем у более массивных звёзд.

2 Слабое, но стабильное излучение

Поверхность таких звёзд сравнительно холодная, поэтому они светят тускло. Однако водород расходуется медленно, и термоядерная энергия выделяется очень долго.

3 Чемпионы по численности

Красные карлики — самый распространённый тип звёзд в Галактике. Их много, потому что небольшие звёзды образуются легче и дольше сохраняют устойчивость.

4 Без превращения в гигантов

При малой массе звезда не достигает условий, необходимых для развития в сверхгигант. Поэтому красные карлики остаются компактными и эволюционируют крайне медленно.

Красные гиганты и сверхгиганты



Расширение после выгорания ядра

Когда водород в ядре исчерпан, звезда теряет привычное равновесие. Её оболочка начинает раздуваться, а внешние слои становятся всё менее плотными.



Гигантские размеры

Радиус красных гигантов достигает десятков и сотен солнечных радиусов, а у сверхгигантов — тысяч. При этом основная часть объёма почти не содержит плотного вещества.



Малая средняя плотность

Несмотря на колоссальный размер, средняя плотность таких звёзд очень мала. Их огромный объём заполнен разреженным газом, а не плотной материей.

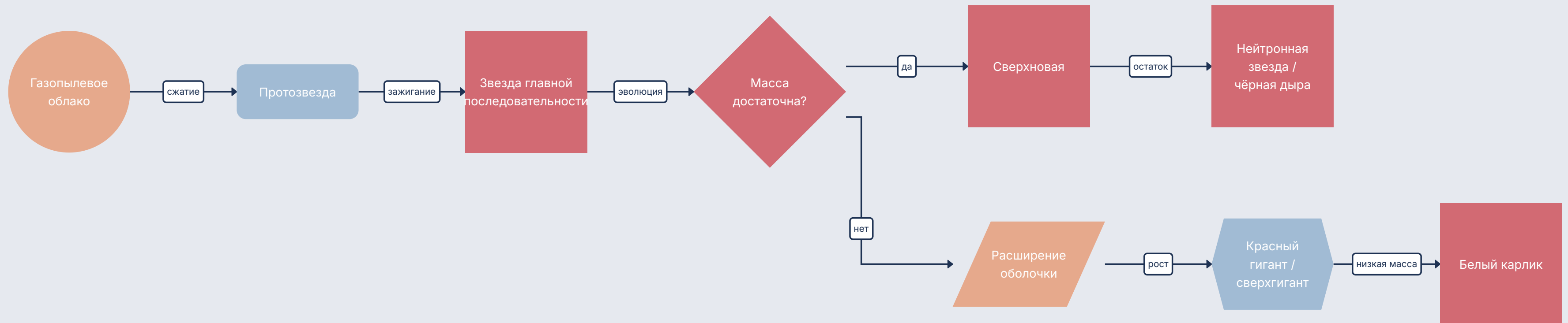


Известный пример

Бетельгейзе — один из самых известных красных сверхгигантов. Он наглядно показывает, что большая звезда может быть очень «пустой» внутри по сравнению с компактными объектами.

Эволюция звезды и изменение её размеров

Схема основана на общепринятой последовательности звёздной эволюции, где ключевую роль играет исходная масса звезды.





Связь массы и радиуса у звёзд

Для звёзд главной последовательности рост массы обычно ведёт к увеличению размера, однако форма зависимости остаётся нелинейной.

Более массивные звёзды чаще крупнее, но это не означает большей плотности: размер и плотность изменяются по-разному.

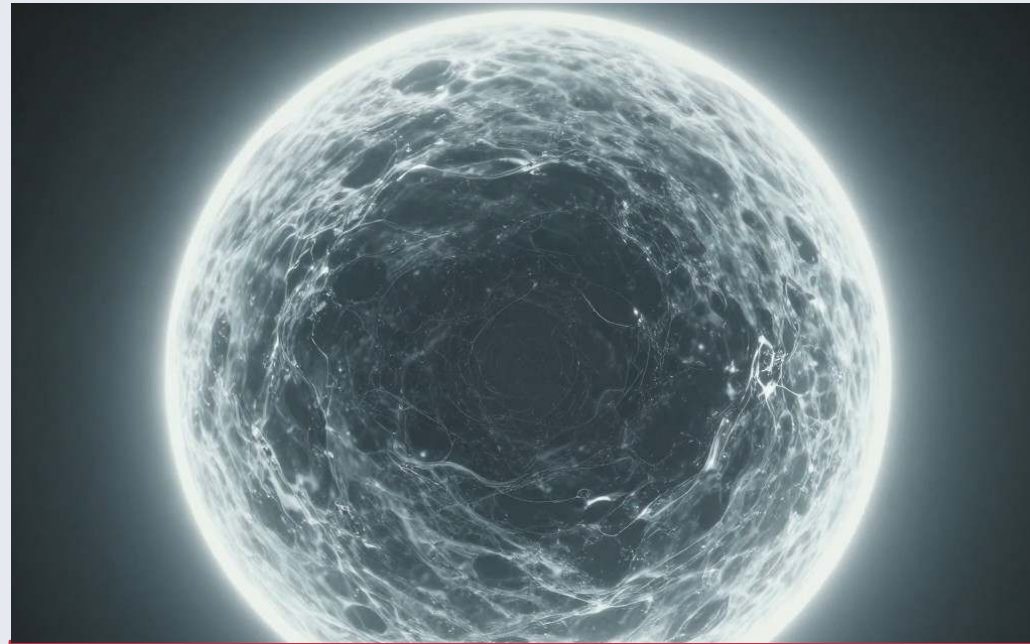
Обобщённые оценки для звёзд главной последовательности по учебным астрономическим соотношениям

Почему плотность звёзд различается



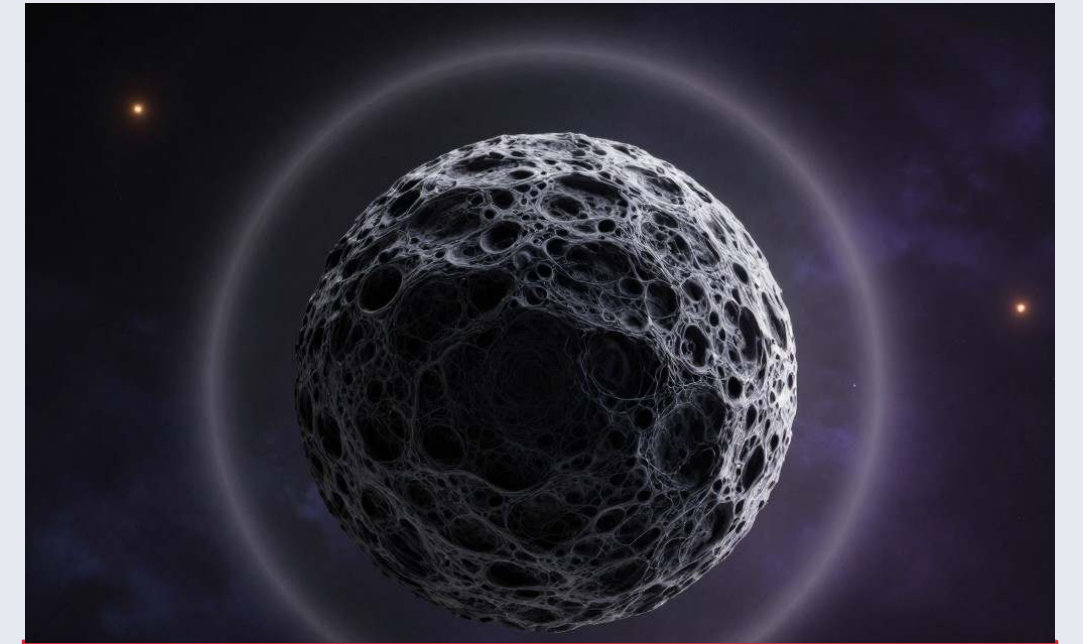
Равновесие, которое держит звезду

Внутри звезды постоянно сталкиваются два процесса: тяготение стремится сжать вещество, а давление горячего газа и излучения сопротивляется этому. Если равновесие меняется, меняется и плотность. Поэтому внешне похожие звёзды могут иметь совершенно разное внутреннее устройство.



Когда электронов уже недостаточно

У белых карликов обычного газового давления недостаточно, чтобы удержать сжатое вещество. Тогда сопротивление создаёт вырожденный электронный газ, и звезда остаётся очень компактной. На иллюстрации это можно показать как плотное ядро без привычной разреженной оболочки.



Предел сжатия вещества

В нейтронных звёздах обычные атомы уже не существуют в привычном виде: вещество сжато до состояния, близкого к ядерной материи. Из-за этого даже небольшой объём содержит огромную массу, а размеры объекта остаются очень малыми по астрономическим меркам.

Экстремальные объекты: сравнение плотности и размеров

Объект	Радиус	Плотность
Солнце	696 тыс. км	1,4 г/см ³
Красный гигант	десятки–сотни R _☉	очень малая
Белый карлик	≈ размер Земли	10 ⁵ –10 ⁶ г/см ³
Нейтронная звезда	10–12 км	ядерная

Сравнение показывает, как резко меняются радиус и средняя плотность у звёзд разных типов.

Чем компактнее объект, тем выше его средняя плотность. Огромный радиус сам по себе не означает большую массу или плотность.

1,4
массы Солнца — верхний
предел устойчивой массы
белого карлика

Этот предел показывает, что белый карлик не может бесконечно набирать массу: при его превышении устойчивость нарушается и дальнейшая эволюция идёт по другому сценарию.

*Предел Чандрасекара; стандартные данные
по эволюции звёзд*

Нейтронные звёзды: объекты с ядерной плотностью

01

Рождение после сверхновой

Нейтронная звезда возникает, когда массивная звезда завершает жизнь взрывом сверхновой. Внешние слои разлетаются, а ядро стремительно сжимается под действием собственной гравитации.

02

Сверхкомпактные размеры

При массе порядка масс Солнца объект уместается в область размером всего около десятка километров. Для астрономии это почти точка, хотя внутри сосредоточена колоссальная масса.

03

Плотность ядерного уровня

Вещество нейтронной звезды настолько сжато, что его плотность сравнима с плотностью атомных ядер. Поэтому даже небольшая порция такого вещества обладает фантастически большой массой.

04

Редкие и трудные для наблюдения

Нейтронные звёзды сложно обнаружить напрямую, но они проявляют себя как пульсары, источники рентгеновского излучения и участники двойных систем. Эти признаки помогают изучать их строение.





Порядок величин плотности вещества в звёздах

Логарифмический разброс плотности отражает разную внутреннюю структуру: от разреженных оболочек гигантов до сверхсжатого вещества компактных остатков.

Плотность меняется не плавно, а скачками на многие порядки. Это связано не с размером, а с фазой эволюции и видом давления внутри звезды.

Обобщённые справочные оценки средних плотностей звёздных объектов; порядок величин

Как астрономы определяют размеры звёзд



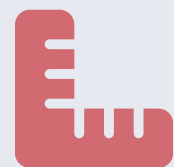
Светимость и температура

Радиус выводят из светимости и температуры поверхности по закону Стефана—Больцмана. Эти величины позволяют связать наблюдаемое излучение с площадью звезды.



Наблюдение затмений

В двойных системах размеры и массы уточняют по кривым блеска и движению компонентов. Затмения дают особенно точные данные о форме и относительных размерах.



Интерферометрия

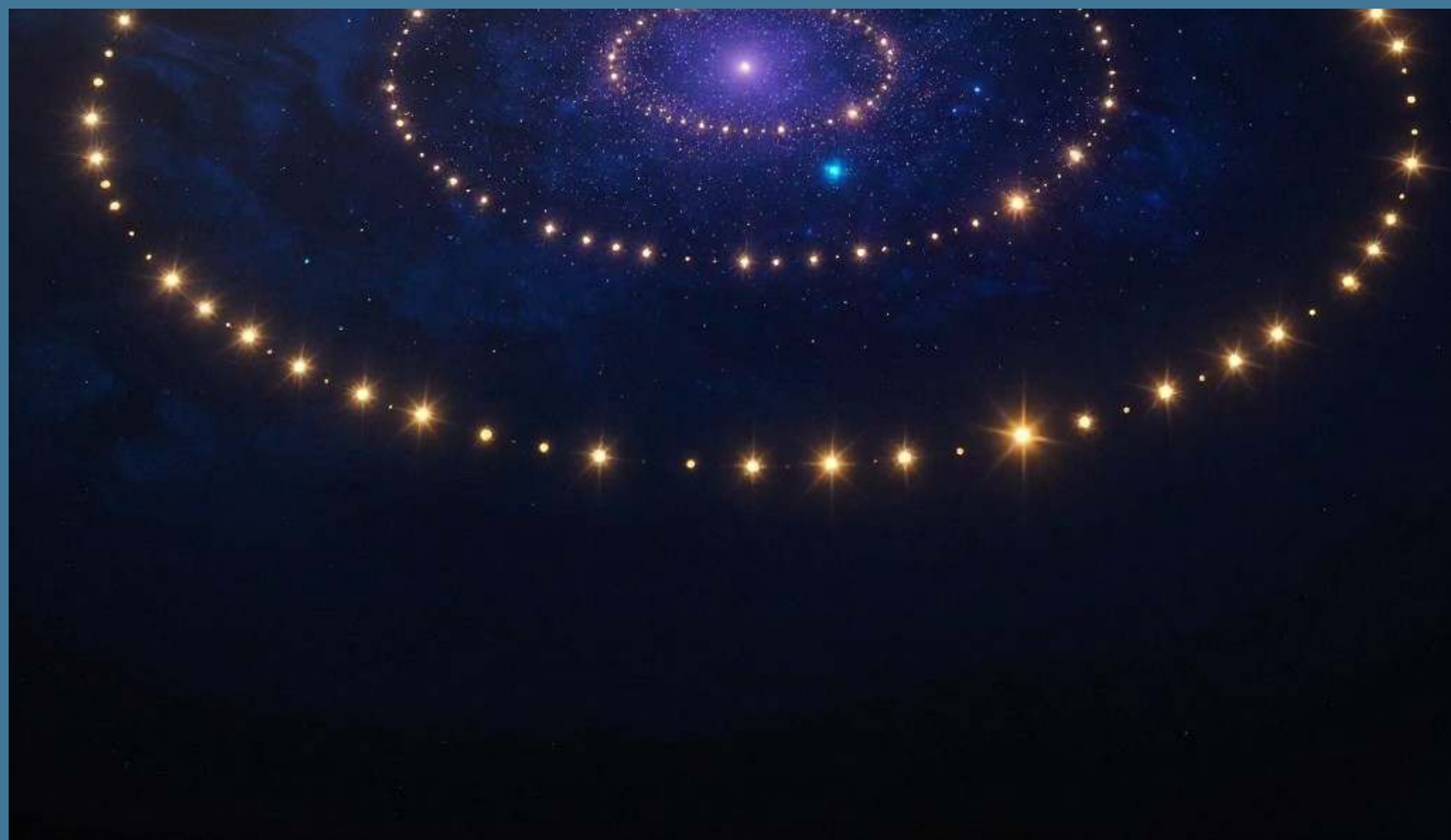
Для ближайших звёзд применяют интерферометрию, которая позволяет измерить очень малый угловой размер. Затем его переводят в линейный радиус при известном расстоянии.



Спектр звезды

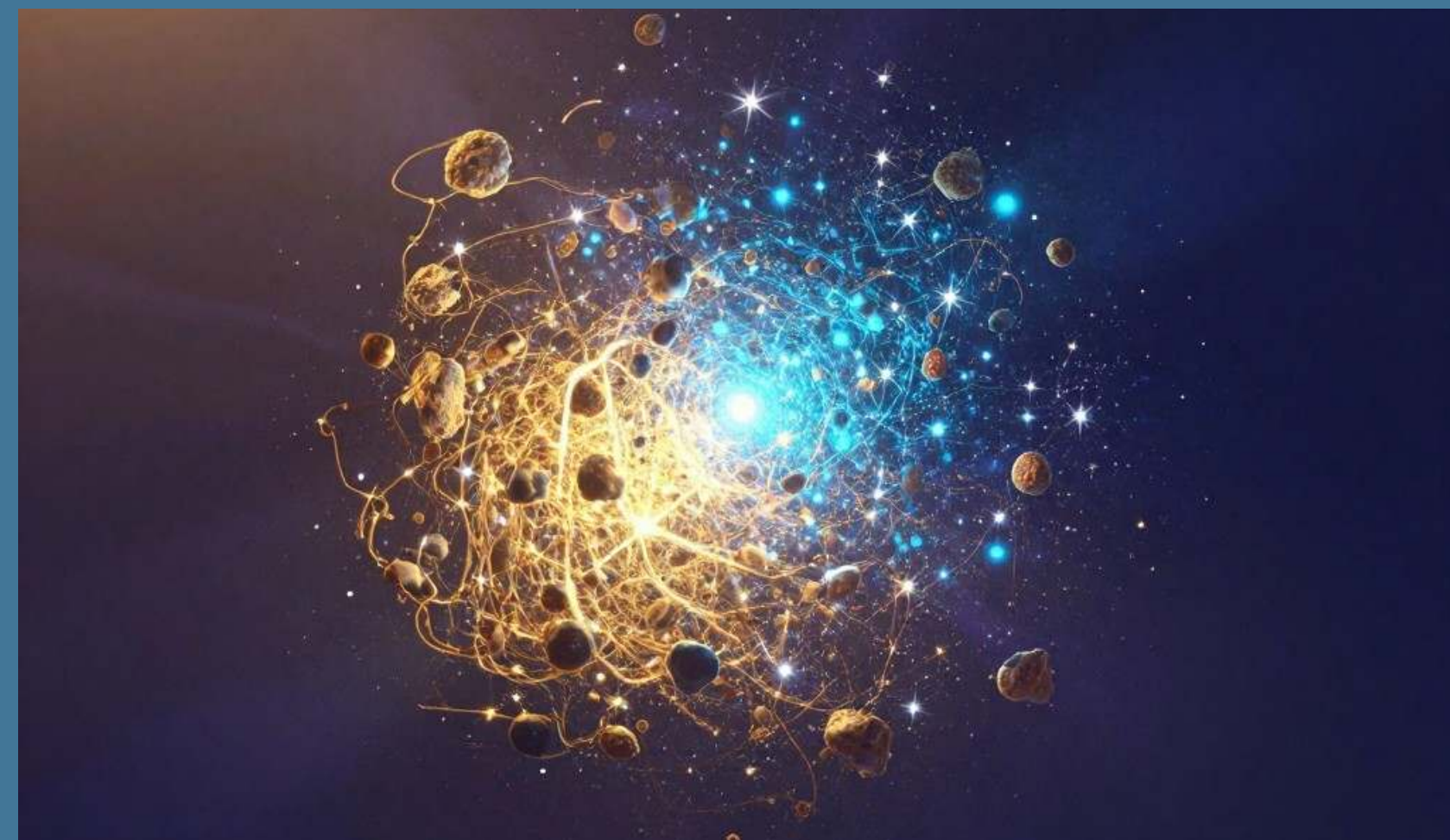
Спектральные линии сообщают о температуре, химическом составе и классе светимости. По ним астрономы уточняют параметры звезды даже тогда, когда её диск неразрешим.

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела и размеры звёзд



Карта звёздных состояний

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела показывает, что звёзды не распределяются случайно. Главная последовательность образует наклонную полосу, а гиганты и сверхгиганты поднимаются выше, потому что при высокой светимости их размеры значительно больше.

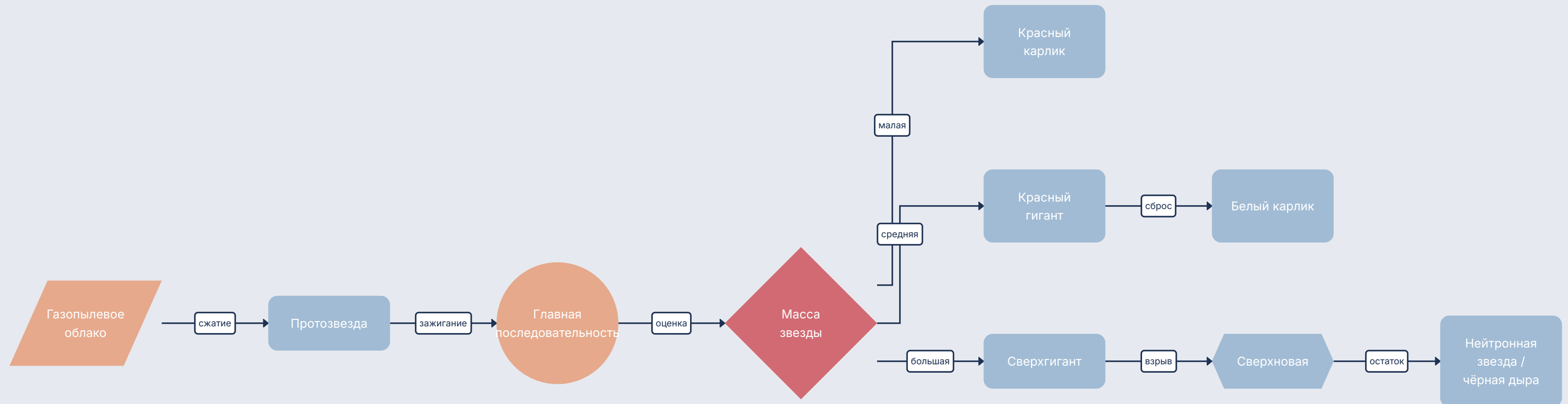


Компактные и яркие исключения

В нижней левой части диаграммы находятся белые карлики: они горячие, но из-за малого размера светят слабо. Эта картина помогает увидеть, что температура, светимость и радиус связаны, но не совпадают друг с другом.

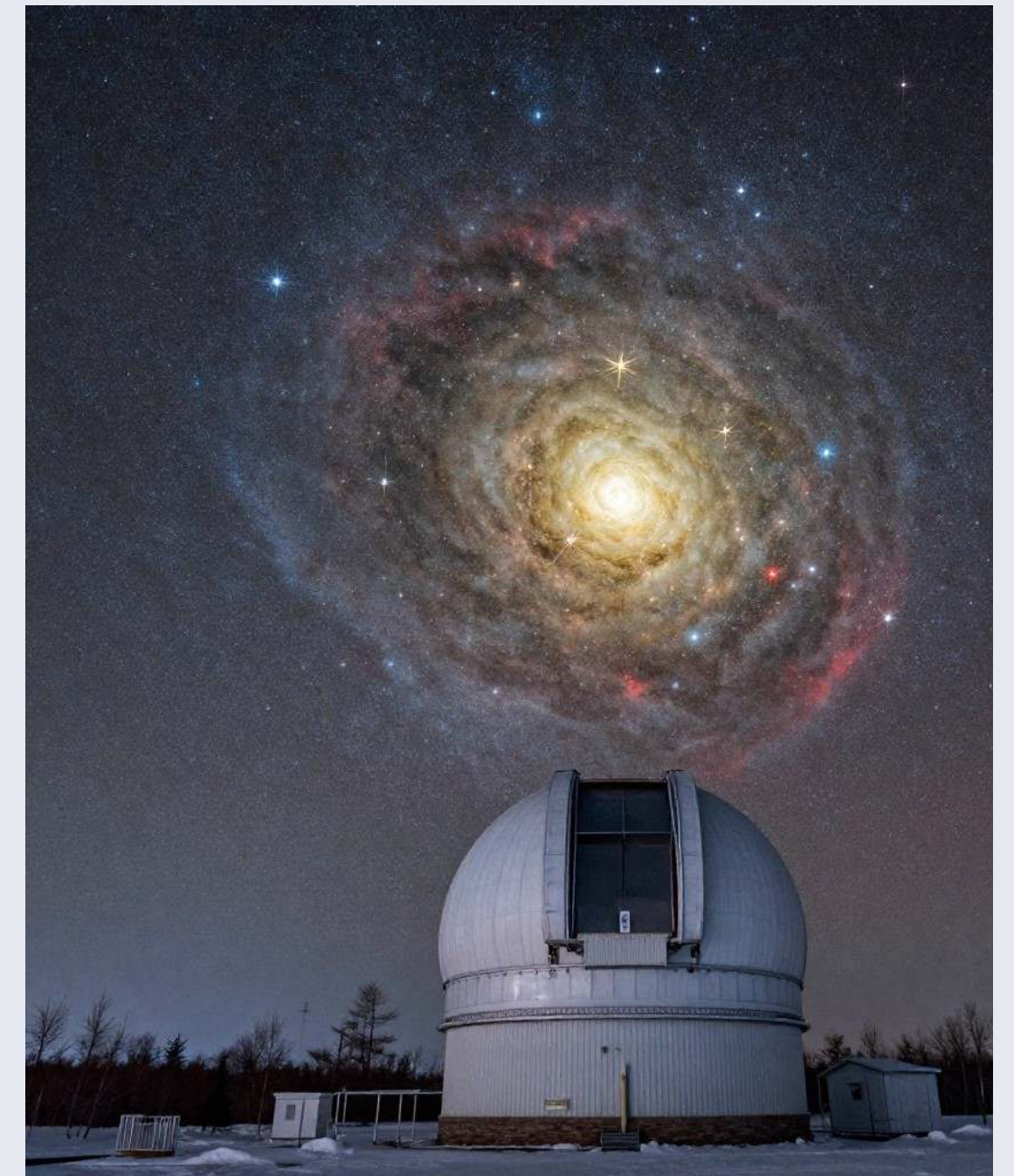
От массы звезды к её конечной судьбе

Схема основана на зависимости эволюции звезды от исходной массы и последующих стадий термоядерного горения.



Практическое значение изучения размеров и плотности звёзд

- 1 Возраст скоплений**
Сопоставляя размеры и светимость звёзд в скоплении, астрономы уточняют его возраст. Это помогает восстановить историю формирования звёздных систем и отдельных областей Галактики.
- 2 Происхождение элементов**
Стадии эволюции звёзд объясняют, откуда берутся углерод, кислород, железо и более тяжёлые элементы. Без звёздной эволюции не было бы привычного химического разнообразия во Вселенной.
- 3 Экстремальная физика**
Сравнение плотностей показывает, как вещество ведёт себя при огромных давлениях и температурах. Такие условия недостижимы на Земле, поэтому звёзды служат естественной лабораторией космической физики.





Главный вывод: размер и плотность звезды не совпадают

Звезда может быть огромной и разреженной или маленькой, но предельно плотной. Именно масса определяет её эволюцию, а гравитация и термоядерные реакции создают удивительное разнообразие звёздных объектов.

