



# Эволюция звёзд: ключевые этапы и значение для Вселенной

Звёзды проходят стадии от рождения до конца, формируя структуру нашей Вселенной.

# От мифов к науке: путь изучения звёзд

- С древности звёзды вдохновляли человечество. XIX век принес понимание их изменения и жизненного цикла, что стало фундаментом современной астрофизики.



# Происхождение звёзд: молекулярные облака

Звёзды рождаются в холодных молекулярных облаках, состоящих главным образом из водорода и гелия с примесями пыли.

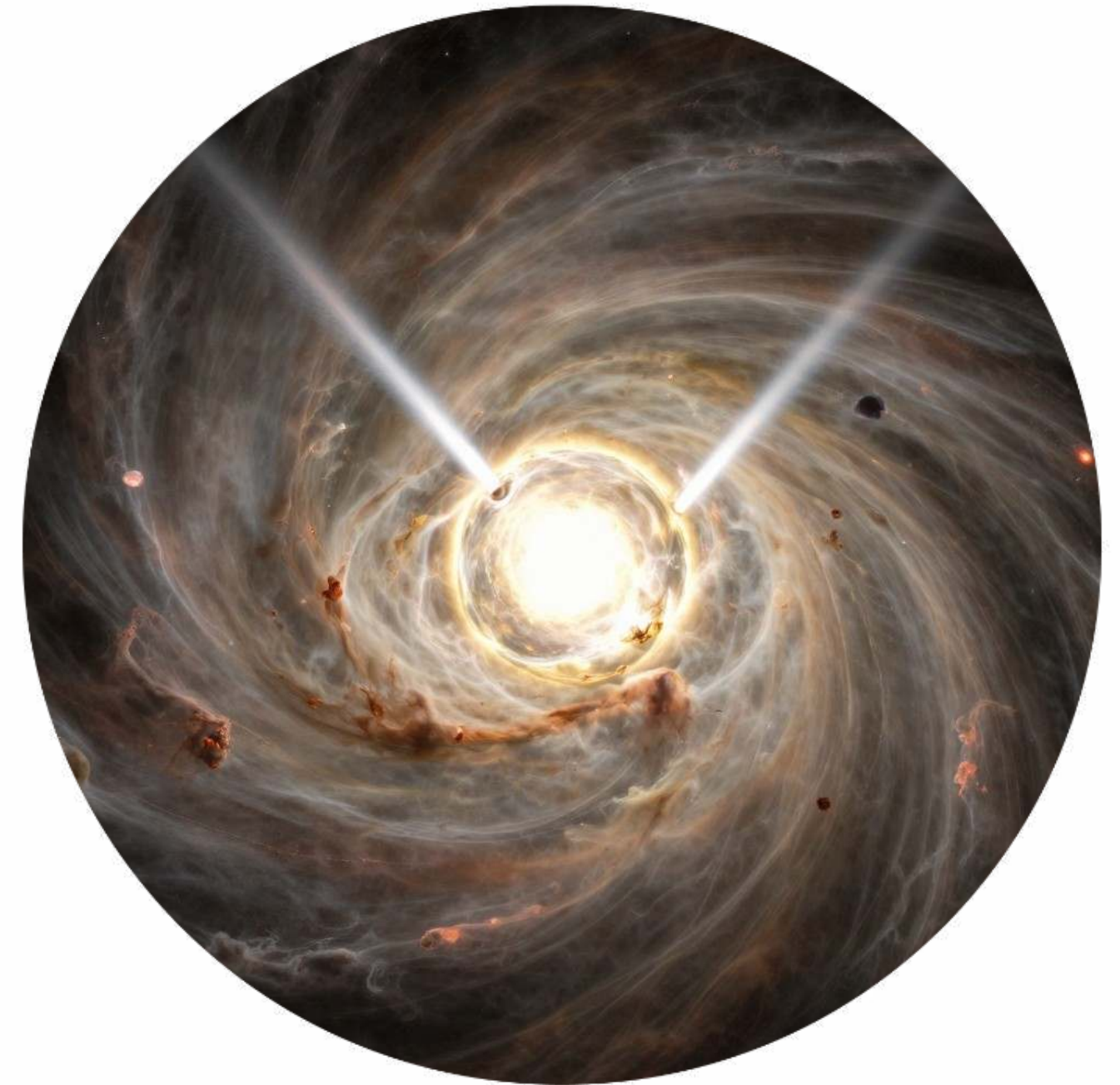
Размеры этих облаков колеблются от нескольких до сотен световых лет, создавая среды для зарождения новых звёзд.

Известные регионы звездообразования включают Туманность Ориона и Туманность Орла, являющиеся объектами интенсивных исследований.

# Гравитационный коллапс и формирование протозвезды

Под действием гравитации плотные ядра молекулярных облаков сжимаются, повышая температуру и плотность для образования протозвезды.

Протозвёздный этап длится от тысяч до ста тысяч лет, сопровождаясь появлением аккреционных дисков и протозвёздных джетов.



# Ядерные реакции и начало звёздной жизни

При достижении в ядре температуры выше 10 миллионов Кельвин запускаются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода.

Звёзды солнечного типа используют протон-протонный цикл для термоядерного синтеза, обеспечивая стабильное энергопроизводство.

Массивные звёзды преимущественно задействуют цикл CNO, ускоряя процесс слияния ядер и развитие звезды.

Начало горения водорода знаменует переход к устойчивой фазе главной последовательности звёздной жизни.

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела: основные классы звёзд

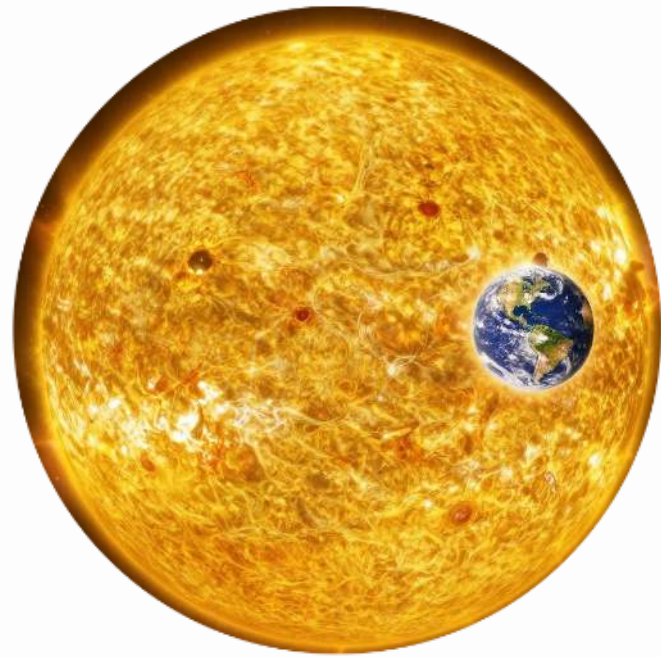
На диаграмме показаны основные группы звёзд и их распределение по светимости и температуре.

Большинство звёзд находятся на главной последовательности, где происходит активное термоядерное горение.



NASA, ESA, 2023

# Жизнь звезды на главной последовательности



## Стабильность и долголетие: как Солнце поддерживает жизнь

Солнце проводит около 90% жизни на главной последовательности, устойчиво преобразуя водород в гелий в ядре. Этот процесс обеспечивает стабильное излучение и поддерживает условия для жизни на Земле.



## Масса и срок: влияние размера звезды на её эволюцию

Массивные звёзды потребляют топливо быстрее и имеют короткую жизнь главной последовательности. Например, Альфа Центавра, более массивная, живёт значительно меньше, чем Солнце.

# Красные гиганты: расширение и охлаждение

После выгорания водорода ядро звезды сжимается, что вызывает расширение и охлаждение внешних слоёв с температурой поверхности 3000–5000 К.

Звёздный ветер усиливается, приводя к потере массы и обогащению межзвёздного пространства тяжелыми элементами.

Яркие представители красных гигантов — Арктур и Альдебаран — важны для изучения процессов поздних стадий звёздной жизни.

# Схема эволюции звёзд по массе

Основные этапы развития  
различных типов звёзд

# Планетарные туманности: ключевые характеристики



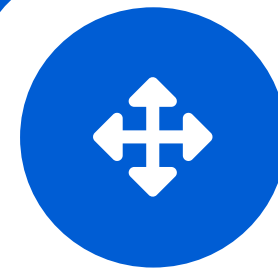
## Формирование оболочек

Планетарные туманности возникают при сбросе звёздой средней массы внешних оболочек после стадии красного гиганта.



## Ионизация газа

Обнажённое горячее ядро ионизует оттекающий газ, создавая многоцветные структуры с различной спектральной характеристикой.



## Размеры туманностей

Диаметры планетарных туманностей обычно составляют несколько световых лет, что делает их заметными объектами на небесной сфере.



## Знаковые примеры

Известные туманности — Кольцо (M57) и Улитка (NGC 7293) — служат эталонами изучения данных явлений.

# Белые карлики: компактные останки звёзд

- Белый карлик — это маленькое, но очень плотное тело, состоящее из вырожденной материи, поддерживаемое силой электронного вырождения. Его масса ограничена пределом Чандрасекара, составляющим около 1,4 солнечных масс.
- Диаметр белого карлика примерно равен размеру Земли — от 10 до 20 тысяч километров. Известные примеры — Сириус В и 40 Эридана В. Со временем яркость таких объектов снижается вследствие постепенного охлаждения.



# $10^{15}$

**энергия сверхновой может превышать  
светимость всей галактики на  
несколько недель.**

Во время взрыва сверхновой выделяется энергия порядка  $10^{15}$  солнечных энергий, обеспечивая синтез тяжелых элементов и формирование нейтронных звёзд или черных дыр.

NASA, ESA

# Нейтронные звёзды и пульсары



## Образование нейтронной звезды после сверхновой

После взрыва сверхновой ядро звезды массой от 1,4 до 3 солнечных масс коллапсирует, формируя нейтронную звезду. Эти объекты крайне компактны и обладают огромной плотностью — около  $10^{17}$  кг на кубический метр.



## Пульсары — маяки Вселенной

Пульсары представляют собой вращающиеся нейтронные звёзды, испускающие узконаправленные радио- и рентгеновские лучи. Их регулярные импульсы помогают изучать физику экзотических состояний материи в экстремальных условиях.

# Чёрные дыры: конечный этап эволюции самых массивных звёзд

Черная дыра образуется, если масса сжимающегося ядра превышает предел Оппенгеймера-Волкова, примерно 3 солнечных массы, что не позволяет никаким силам противостоять гравитационному коллапсу.

Известные объекты включают Стрелец A\* — сверхмассивную черную дыру в центре Млечного Пути и звезду LB-1, где обнаружены необычные свойства при взаимодействии с черной дырой.

Радиус горизонта событий типичной черной дыры, называемый радиусом Шварцшильда, составляет десятки километров, внутри которого ничто, даже свет, не может покинуть объект.

Черные дыры служат важными лабораториями для тестирования теорий гравитации и квантовой физики в экстремальных условиях, продолжая вызывать интерес ученых и астрономов по всему миру.

# Сравнение звёздных остатков: белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры

Таблица демонстрирует основные параметры трёх типов звёздных остатков, показывая взаимосвязь массы, размера и плотности при их различной природе.

С уменьшением размера плотность возрастает, что отражает переход от вырожденной материи к нейтронной и затем к гравитационной сингулярности.

| Параметр                       | Белый карлик    | Нейтронная звезда     | Чёрная дыра   |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Масса ( $M_{\odot}$ )          | 1,0–1,4         | 1,4–3,0               | >3            |
| Диаметр (км)                   | 10 000–20 000   | 20–30                 | От десятков   |
| Плотность (г/см <sup>3</sup> ) | $\sim 10^6$     | $\sim 10^{14}$        | Очень высокая |
| Магнитное поле (Гаусс)         | $10^5$ – $10^7$ | $10^{11}$ – $10^{13}$ | Не измеряется |

NASA, ESA (2020)

# Влияние звёздных остатков на космическую среду



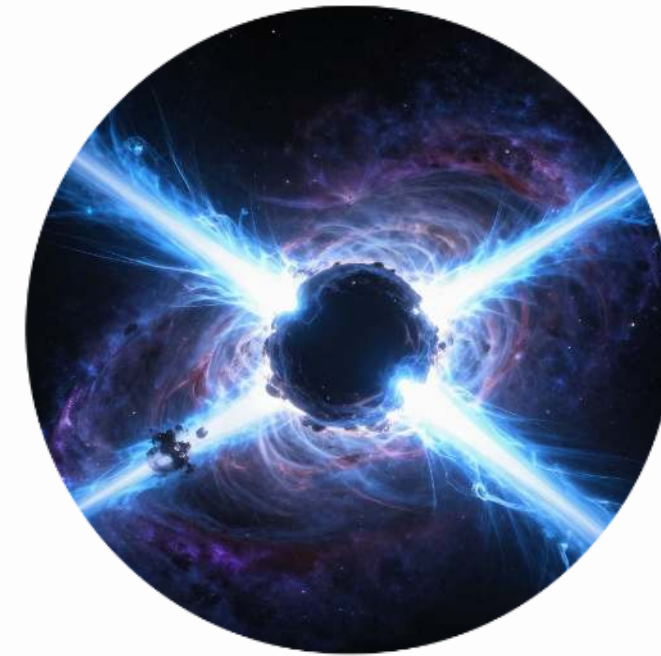
## Сверхновые и обогащение межзвёздной среды

Взрывы сверхновых распространяют тяжелые элементы по галактике, способствуя формированию новых звезд и планет. Это критически важно для химической эволюции и возникновения жизни во Вселенной.



## Гравитационные волны от столкновений нейтронных звезд

Слияния нейтронных звезд сопровождаются выбросом гравитационных волн и производством элементов, тяжелее железа. Эти события открывают новые пути для изучения космоса и физики.



## Черные дыры и релятивистские струи

Черные дыры аккумулируют газ и создают релятивистские струи, влияя на эволюцию галактик. Они также служат природными лабораториями для проверки фундаментальных физических законов.

# Примеры звёздной эволюции в разных скоплениях

Глобулярные скопления, такие как М13, состоят из древних звезд, демонстрируя поздние стадии эволюции и позволяя изучать прошлое развития галактик.

Рассеянные скопления, например Плеяды, содержат молодые горячие звёзды на разных этапах главной последовательности, иллюстрируя текущие процессы звездообразования.



# Современные методы изучения эволюции звёзд



## Спектральный анализ

Определяет химический состав и физические параметры звезд, позволяя проводить диагностику атмосферы и выявлять элементы.



## Фотометрия

Измеряет изменения яркости звезд, что помогает изучать переменные звёзды и их жизненные циклы.



## Астросейсмология

Исследует внутренние колебания звезд, раскрывая их структуру и возраст с высокой точностью.



## Космические наблюдения

Телескопы Hubble, Gaia и James Webb собирают детальные данные, значительно расширяя понимание процессов звездной эволюции.

# Значение эволюции звёзд для существования жизни

.....

Тяжёлые элементы, необходимые для жизни, формируются внутри звезд и распространяются во Вселенной через сверхновые взрывы и звездный ветер.

.....

Формирование планетных систем и органических молекул невозможно без предыдущих циклов звёздной эволюции и распространения элементов.

.....

Химическая эволюция Вселенной, обуславливающая экологические условия, напрямую зависит от разнообразия звёздных жизненных циклов.



# **Синтез: место звёздной эволюции в космосе и науке**

Эволюция звёзд формирует основу структуры и состава Вселенной, влияет на возникновение жизни и расширяет наше понимание происхождения и будущего космоса.