

Учреждение образования
«Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова»

Факультет мониторинга окружающей среды

Ядерная астрофизика

1-31 04 05 Медицинская
физика

2020 - 2021

Гипотеза Большого Взрыва

Big Bang Theory



Стандартная модель



- Впервые выдвинута в начале XX века Ватиканским аббатом Леметром (Lemetre) и позже развитая Г. Гамовым (Gamow, 1947)
- Вселенная, которую мы наблюдаем, произошла 14 – 18 млрд. лет назад из протоматерии
- Средние плотность ρ и температура T ее

$$\rho \approx \frac{5 \cdot 10^8}{t^2} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right], T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t}} [K]$$

- время t измеряется в секундах, с

Стандартная модель



- По современным представлениям мы можем сказать что-то определенное лишь о моментах времени порядка *планковского момента* (G — универсальная гравитационная постоянная,

$$G = 6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2})$$

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с}$$

Стандартная модель



- когда считается, что все 4 вида фундаментальных взаимодействий были объединены в одно при энергиях протонов, определяемых т.н. планковской энергией ($E_{Pl} \sim \hbar / t_{Pl}$)

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Стандартная модель



- Радиус области локализации частиц согласно принципу неопределенности составлял на тот момент величину, называемую т.н. *ПЛАНКОВСКОЙ* длиной l_{Pl}

$$l_{Pl} = \frac{\hbar c}{2E_{Pl}} \approx 10^{-35} \text{ м}$$

Суперсимметрия



- Теоретические модели, описывающие объединение всех видов фундаментальных взаимодействий, получили название *суперсимметричных теорий* (SUSY — от английских слов «SUper SYmmetry»).
- В моделях этого рода бозоны и фермионы объединяются в одно поле, в котором существуют бозон-фермионные состояния, называемые *супермультиплетами*.
- Каждый бозон в супермультиплете имеет некоторого фермионного партнера и наоборот.

Основные **SUSY**-партнеры



Частица, спин	SUSY-партнер, спин
кварк, 1/2	скварк, 0
лептон 1/2	слептон, 0
нейтрино, 1/2	снейтрино, 0
фотон, 1	фотино, 1/2
глюон, 1	глюино, 1/2
W -бозон, 1	вино, 1/2
Z -бозон, 1	зино, 1/2
гравитон, 2	гравитино, 3/2

Суперструна

- Одна из наиболее популярных сейчас моделей суперчастиц — *суперструна* — гипотетический одномерный объект, имеющий длину порядка планковской длины и натяжение, выражаемое как энергия на единицу длины, определяемое отношением E_{Pl}/l_{Pl} , имеющем порядок 10^{-7} эВ/м.



Теория суперструн



- При энергиях ниже планковской теория суперструн переходит в квантовую теорию поля с точечными фундаментальными частицами.
- Минимальная размерность пространства, в котором может быть построена теория суперструн, равна 10: 1
 - временная координата
 - и 10 пространственных.
- При энергиях ниже планковской это пространство *компактифицируется*, т.е. редуцируется по определенным правилам к четырехмерному пространству-времени.

Этапы развития Вселенной

- Квантовый хаос. Суперсимметрия (все взаимодействия объединены)



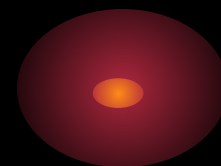
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
$< 10^{-43} \text{ с}$	$> 10^{28}$	$< 10^{-35}$	$> 10^{32}$

Этапы развития Вселенной



- **Планковский момент**

Отделение гравитационного взаимодействия.



Время
(после
Большого
Взрыва)

**Характерные
энергии, эВ**

**Характерные
расстояния, м**

**Характерные
температуры,
К**

10^{-43} с

10^{28}

10^{-35}

10^{32}

Этапы развития Вселенной



- **Великое объединение**
(сильного и электрослабого взаимодействий)

Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
$10^{-43} - 10^{-36}$ с	$10^{28} - 10^{24}$	$10^{-35} - 10^{-31}$	$10^{32} - 10^{28}$

Этапы развития Вселенной



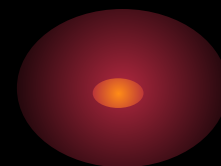
- **Конец Великого объединения**
(разделение электрослабого и сильного взаимодействий)

Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
10^{-36} с	10^{24}	10^{-31}	10^{28}

Этапы развития Вселенной



- **Конец электрослабого объединения**
(разделение электромагнитных и слабых взаимодействий)



Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
10^{-10} с	10^{11}	10^{-18}	10^{15}

Этапы развития Вселенной



- Кварк-адронный фазовый переход

Время
(после
Большого
Взрыва)

10^{-6} с

**Характерные
энергии, эВ**

10^9

**Характерные
расстояния, м**

10^{-16}

**Характерные
температуры,
К**

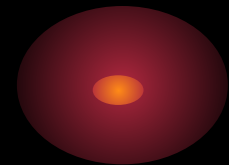
10^{13}

Этапы развития Вселенной



- **Адронная эра.**

Рождение и аннигиляция адронов и лептонов



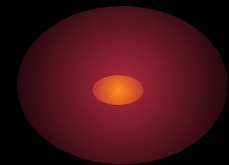
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
$10^{-10} - 10^{-4} \text{ с}$	$10^{11} - 10^8$	$10^{-18} - 10^{-15}$	$10^{15} - 10^{12}$

Этапы развития Вселенной



- **Лептонная эра.**

Рождение и аннигиляция лептонов



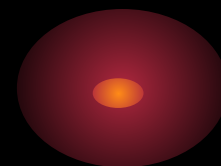
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
$10^{-4} - 10$ с	$10^8 - 10^6$	$10^{-15} - 10^{-12}$	$10^{12} - 10^{10}$

Этапы развития Вселенной



- Отделение нейтрино.

Вселенная становится прозрачной для нейтрино (антинейтрино)



Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
0,1 – 1 с	$2 \cdot 10^6$	10^{-13}	$2 \cdot 10^{10}$

Этапы развития Вселенной



- Дозвездный синтез гелия

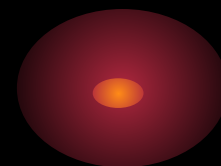
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
$10^2 - 10^3$ с	$\sim 10^5$	$10^{-12} - 10^{-11}$	$\sim 10^9$

Этапы развития Вселенной



- **Радиационная эра.**

Излучение преобладает над
веществом



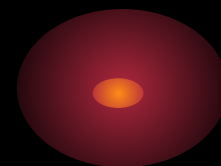
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
10 с — 40 000 лет	$10^6 - 1$	$10^{-12} - 10^{-7}$	$10^{10} - 10^4$

Этапы развития Вселенной



- **Начало эры Вещества.**

Вещество доминирует над излучением



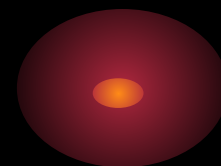
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
40 000 лет	1	10^{-7}	10^4

Этапы развития Вселенной



- Образование атомов.**

Разделение вещества и излучения.
Вселенная становится прозрачной для излучения.



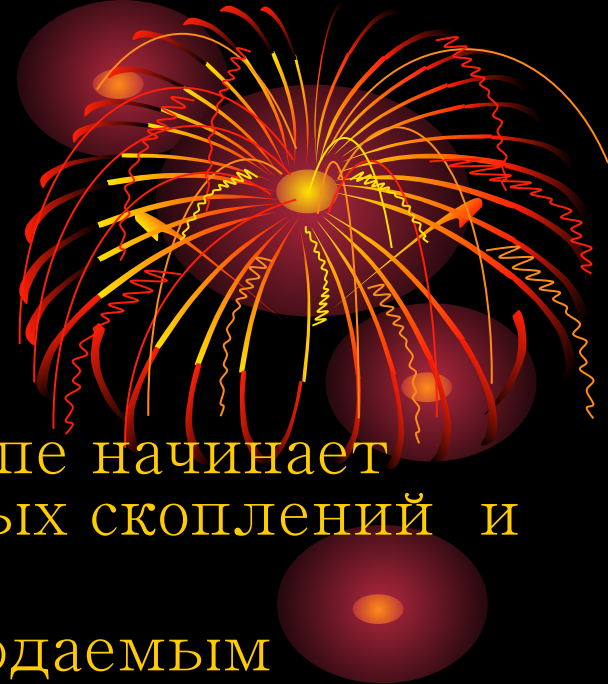
Время (после Большого Взрыва)	Характерные энергии, эВ	Характерные расстояния, м	Характерные температуры, К
400 000 лет	$3 \cdot 10^{-1}$	10^{-4}	$3 \cdot 10^3$

В это время ...



- В результате разделения вещества и излучения развиваются первичные неоднородности в распределении вещества, приведшие к образованию *галактик и сверхгалактик* (через 1 млрд. лет после Большого взрыва).
- Более мелкие неоднородности явились зародышем *звезд и звездных скоплений* .

Закон Хаббла



- Расширение Вселенной на этом этапе начинает происходить как разбегание звездных скоплений и галактик.
- Это явление подтверждается наблюдаемым *красным смещением* испускаемого ими излучения.
- По многочисленным наблюдательным данным установлено, что скорость V разлета двух галактик и расстояние R между ними связаны *законом Хаббла* (E. Hubble):

$$V = HR$$

- где H — *постоянная Хаббла*. В настоящее время ее значение принято считать равным

$$71 \pm 7 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$$

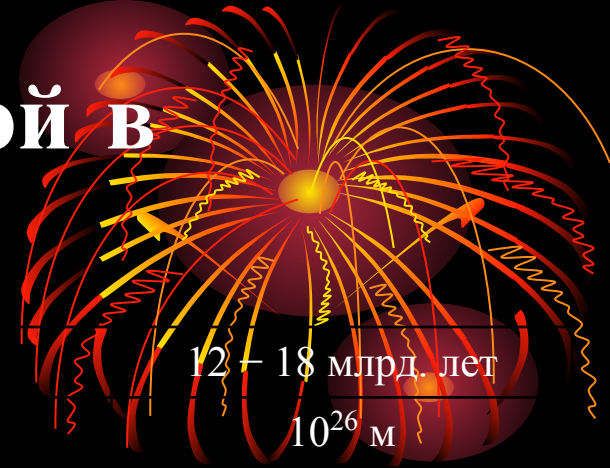
Время существования Вселенной



- Предполагая, что это значение не менялось за время эволюции Вселенной, из закона Хаббла можно оценить время, прошедшее после Большого Взрыва:

$$t_0 \approx \frac{R}{V} = \frac{1}{H} = (12 - 16) \text{ млрд. лет}$$

Характеристики Вселенной в настоящее время



12 – 18 млрд. лет

10^{26} м

10^{53} кг

10^{-26} кг/м³

10^{78}

$< 10^{-4}$

71 ± 7 км/с · Мпк

2,73 К

$4,11 \cdot 10^8$ м⁻³

$2,6 \cdot 10^5$ эВ/м³ =
 $= 4,6 \cdot 10^{-31}$ кг/м³

$(10^9 - 10^{10}) : 1$

	По числу	По массе
--	----------	----------

водород	91 %	70,7 %
---------	------	--------

гелий	8,9 %	27,4 %
-------	-------	--------

остальные	$< 0,2$ %	1,9 %
-----------	-----------	-------

Возраст t_0

Радиус (горизонт видимости) $R_0 = ct_0$

Полное количество вещества и энергии

Средняя плотность вещества и энергии

Полное барионное число (число нуклонов)

Доля антивещества

Постоянная Хаббла, H

Температура реликтового излучения

Плотность реликтовых фотонов

Плотность энергии реликтовых фотонов

Отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов

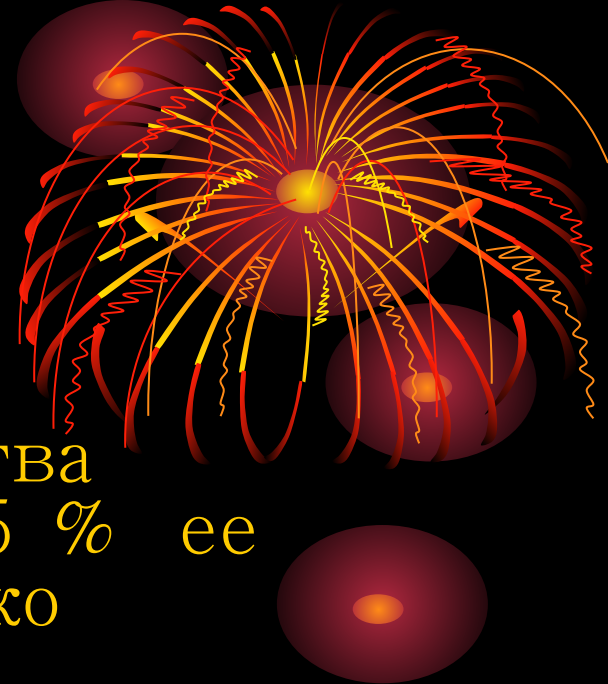
Распространенность атомов (ядер)

Состав Вселенной



- Состав Вселенной известен с меньшей детальностью.
- Нам известно о вкладе в плотность Вселенной *барионной материи*.
- В нее входят светящиеся в оптическом диапазоне звезды ($1/10$ от всей барионной материи), межзвездная пыль и газ, молекулярные облака, останки эволюции звезд, планеты и очень маленькие звезды, массы которых недостаточны для реакций нуклеосинтеза

Барионная материя



- Основная масса этого вещества сосредоточена в барионах (85 % ее составляют протоны и только 15 % — нейтроны).
- Нейтроны связаны в ядрах, главным образом, в гелии. В свободном состоянии они превращаются в протоны.
- Один протон и один электрон в современной Вселенной содержатся в среднем в $4 - 5 \text{ м}^3$.
- Барионная материя составляет всего 5 % от полной плотности Вселенной .

Темная материя

- Остальные 95 % вещества Вселенной составляет т.н. *темная материя*.
- О ее существовании свидетельствуют наблюдаемые гравитационные эффекты.
- Согласно данным наблюдений темная материя может быть разделена на две части. К первой части (от 20 % до 40 % от общей массы темной материи) относят неизвестные массивные частицы (ими могут быть отнесены массивные стабильные нейтральные суперчастицы и массивные нейтрино), а вторая часть (от 60% до 80 %) представляет собой *физический вакуум*.



Физический вакуум



- В настоящее время под физическим вакуумом понимают наименьшее состояние частиц поля.
- Плотность энергии вакуума может быть не равной нулю. На фоне вакуума разворачиваются процессы во Вселенной .
- Ему можно приписать отрицательное давление и с его помощью объясняют явление гравитационного отталкивания.
- Плотность энергии вакуума, умноженную на т.н. эйнштейновскую гравитационную постоянную $8\pi G/c^2$, называют *космологической постоянной* Λ , введенной когда-то Леметром.

Основные факты в пользу теории Большого Взрыва



- существование реликтового излучения с температурой $2,73\text{ К}$ в настоящее время;
- высокая распространенность гелия (примерно $1/4$ часть всех ядер по массе);
- соотношение $(10^9 - 10^{10}):1$ между числом фотонов и числом барионов.
- Последнее более тщательно обосновывается в т.н. *инфляционной модели* горячей стадии расширения Вселенной (до момента 10^{-4} с)

Источники энергии и эволюция звезд

Образование звезд

- Предполагается, что звезды образовались по причине гравитационной неустойчивости в молекулярных облаках, которые могут возникнуть в столкновениях галактик, либо в результате взрыва *сверхновой* (см. ниже).
- В процессе сжатия облака газа и пыли образуются глобулы, которые могут иметь массу от 0,09 до 60 масс Солнца $M_{\odot}$.
- При дальнейшем сжатии глобулы плотность и температура внутри нее возрастает до значений, при которых возможны термоядерные реакции. Процесс сжатия протооблака длится примерно 10 – 15 млн. лет.

Оценка температуры разогрева

- В настоящее время считается вполне обоснованным утверждение, что источником энергии звезд являются реакции термоядерного синтеза
- Гравитационное сжатие материи приводит к сближению ядер, которые начинают вступать в реакции синтеза.
- При этом происходит разогрев материи до температур

$$T = \frac{1}{20} \frac{GM}{kR} M_p$$

Для Солнца

$$T \sim 10^6 \text{ K}$$

- Температура фотосферы Солнца
- $4,3 \cdot 10^3 \text{ K}$
- внутренние части Солнца (ядро радиусом в $R/4$) предположительно находятся при температуре $1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ и с плотностью вещества $1,58 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$
- Это соответствует концентрации водорода порядка 10^{32} м^{-3} , что соответствует условиям возникновения термоядерного синтеза

Из истории

- Предположение о том, что в энергия звезд черпается из реакций термоядерного синтеза водорода в гелий, впервые было высказано А. Эддингтоном (A. Eddington, 1920).
- В 1928 г. Г. Гамов вывел формулу для вероятности того, что заряженные частицы смогут преодолеть кулоновский барьер и вступить в реакцию ядерного синтеза, протекающую под действием, главным образом, сильных взаимодействий.

Из истории

- только через 10 лет Теллером и (E. Teller), Аткинсоном (R. Atkinson) и Хутермансом (F. Houtermans) были сделаны первые оценки температуры и концентрации частиц, необходимые для осуществления такой реакции.
- В 1939 г. Х. Бете (H. Bethe) проанализировал различные возможности превращения водорода в гелий и впервые предложил последовательность таких реакций, известную под названием *водородного*, или *протонного цикла* (pp-цикла).

Протонный цикл (pp-цикл)



- $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,420 \text{ МэВ}$
- $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma + 5,494 \text{ МэВ}$
- В настоящее время протонный цикл представляется в виде 4 ветвей, в которых происходит синтез гелия-4

Ветви pp-цикла

Ветвь <i>pp</i> I (86 %)	Ветвь <i>pp</i> II (~14 %)
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H} + 12,860 \text{ МэВ}$	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 1,586 \text{ МэВ}$
Ветвь <i>pp</i> III (0,11 %)	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \nu_e + 0,862 \text{ МэВ}$
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 1,586 \text{ МэВ}$	${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2{}^4\text{He} + 17,347 \text{ МэВ}$
${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma + 0,137 \text{ МэВ}$	Ветвь <i>pp</i> IV ($3 \cdot 10^{-5} \%$)
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e + 17,469 \text{ МэВ}$	${}^3\text{He} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e + 19,284 \text{ МэВ}$
${}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He} + 0,092 \text{ МэВ}$	

Синтез протонов

- Среднее время t протекания реакции (т.е. время, за которое число протонов в звезде уменьшается в e раз) из-за малости ее сечения будет весьма велико и будет зависеть от плотности материи в ядре звезды (ее массы).
- Для Солнца оно составляет по порядку величины 10^9 лет.
- Для звезд с массой в 20 масс Солнца это время гораздо меньше и составляет величину порядка 10^7 лет.
- Остальные реакции *pp*-цикла протекают значительно быстрее.

Синтез ядер гелия

- Когда часть водорода синтезировалась, и центральная часть прогрелась до температур порядка 10^8 К, начинается интенсивный синтез ядер гелия.
- Этот процесс приводит к образованию ядер углерода в т.н. *3 α -реакциях*, или *тройных альфа-процессах*



- состоящих из следующих стадий:



- где звездочкой отмечены возбужденные состояния промежуточных ядер.

Углеродно–азотный цикл и двойной углеродно-азотно-кислородный цикл

- После образования ядер углерода начинается их участие в синтезе ядер гелия в качестве *катализатора* – т.н. *углеродно–азотный* (или *C – N*) *цикл* и *двойной углеродно-азотно-кислородный цикл* (К. Вайцзеккер, 1938, Х. Бете, 1939)

Углеродно-азотный цикл

(C–N цикл)



- $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma + 1,943 \text{ МэВ}$
- $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e + 1,710 \text{ МэВ}$
- $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma + 0,551 \text{ МэВ}$
- $^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma + 14,297 \text{ МэВ}$
- $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e + 2,243 \text{ МэВ}$
- $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He} + 4,966 \text{ МэВ}$

Двойной углеродно-азотно-кислородный цикл (C–N–O цикл)

C–N-цикл + 3^1H + ^{15}N + ^4He + ^{14}N

- $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma + 12,128 \text{ МэВ}$
- $^{16}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma + 0,600 \text{ МэВ}$
- $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu_e + 2,251 \text{ МэВ}$
- $^{17}\text{O} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + ^{14}\text{N} + 1,191 \text{ МэВ}$

Кислород и неон

- Кислород-16 может быть синтезирован и непосредственно из углерода-12 (*альфа-реакция*):
 - $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma + 7,162 \text{ МэВ},$
 - что вместе с перечисленными выше реакциями приводит к производству кислорода-16.
- При достаточной наработке кислорода и соответствующем росте температуры может начать образовываться ^{20}Ne :
 - $^{16}\text{O} + ^4\text{He} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma + 4,731 \text{ МэВ}.$

Двойной неоново-натриевый цикл (Ne–Na цикл)



- $^{20}\text{Ne} + ^1\text{H} \rightarrow ^{21}\text{Na} + \gamma + 2,432 \text{ МэВ}$
- $^{21}\text{Na} \rightarrow ^{21}\text{Ne} + e^+ + \nu_e + 3,036 \text{ МэВ}$
- $^{21}\text{Ne} + ^1\text{H} \rightarrow ^{22}\text{Na} + \gamma + 6,740 \text{ МэВ}$
- $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e + 1,051 \text{ МэВ}$
- $^{22}\text{Ne} + ^1\text{H} \rightarrow ^{23}\text{Na} + \gamma + 8,793 \text{ МэВ}$
- $^{23}\text{Na} + ^1\text{H} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} + 2,377 \text{ МэВ}$

Альфа-ядра

- При соответствующем повышении температуры начинают синтезироваться более тяжелые *альфа-ядра*, т.е. ядра, массовое число которых кратно 4, с $Z > 22$, : ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar , ^{40}Ca , ^{44}Ti .
- Эти ядра также могут сыграть роль катализаторов синтеза гелия из ядер водорода по схеме, аналогичной неоновому-натриевому циклу (можно говорить о *магний-алюминиевом*, *кремний-фосфорном* и т.п. *циклах*).

Когда водород в звезде ПОДХОДИТ К КОНЦУ . . .

- Звезда охлаждается и начинает сжиматься.
- Если масса звезды велика (свыше $4M_{\odot}$), наступает пора интенсивного синтеза углерода и других альфа-ядер из гелия.
- На этой стадии развития звезды при достаточной ее массе могут наступить *углеродный, неоновый, кислородный, кремниевый циклы* термоядерного синтеза.

Углеродный цикл

- В углеродном цикле происходит синтез ядер углерода-12, в результате чего могут образовываться неон-20 и гелий, натрий-23 и водород, магний-23 и нейтрон.
- Завершается углеродный цикл образованием магния-24.
- Углеродный цикл возможен, если гравитационное поле звезды способно сжать ее таким образом, чтобы в центре звезды была достигнута температура в 600 МК.

Неоновый и кислородный циклы

- После завершения углеродного цикла в звезде с массой, равной или большей $8M_{\odot}$, при температуре центральной части $1,2 \cdot 10^9$ К и плотностях порядка $3 \cdot 10^9$ кг/м³ начинается *неоновый цикл*.
- В реакциях фоторасщепления в этом цикле может образовываться кислород-16 и гелий-4, а также синтезироваться более тяжелые элементы.
- *Кислородный цикл* начинается с температур порядка $1,5 \cdot 10^9$ К и плотностях порядка 10^{10} кг/м³. Этот цикл завершается серой-32.

Кремниевый цикл

- *Кремниевый цикл* может начаться только в звездах с массами $(8 - 11)M_{\odot}$, в которых гравитационное сжатие может довести значения температуры в центральной части звезды до $2,7 - 3,5 \cdot 10^9$ К.

Завершение синтеза

- Данные циклы сопровождаются также альфа-процессами и синтезом вновь образовавшихся протонов и альфа частиц. При альфа-процессах на этой стадии завершается энергетически выгодный синтез элементов массовым числом 56
кремний-28 $\rightarrow$ сера-32 $\rightarrow$ аргон-36 $\rightarrow$
кальций-40 $\rightarrow$ титан-44 $\rightarrow$ хром-48 $\rightarrow$
железо-52 $\rightarrow$ никель-56.
- Синтез более тяжелых элементов становится невозможным.

Основные этапы эволюции звезды: итоги

- На начальной стадии эволюции звезды преобладает протонный цикл.
- После выгорания водорода в центре звезды она сжимается до тех пор, пока не создадутся условия для синтеза гелия.
- Водород продолжает синтезироваться на более удаленной оболочке от центра звезды.
- Затем, в зависимости массы звезды в ее центре может начать синтезироваться углерод, и т.д.
- Более легкие элементы продолжают синтезироваться на внешних оболочках звезды.
- Синтез продолжается вплоть до образования в центре звезды ядер с массовым числом 56 – железа и никеля.
- С этого момента термоядерный синтез в центре звезды прекращается.

Скорость выгорания

- Скорость выгорания водорода и других элементов зависит от массы звезды.
- Среднее время, в течение которого могут происходить любые термоядерные реакции в звезде, оценивается величиной $10^{-3} Mc^2/L$.
- Для Солнца эта величина составляет $\sim 10^{10}$ лет.
- Чем выше масса звезды, тем, как правило, выше ее светимость.
- Поэтому более тяжелые звезды быстрее теряют свою энергию (и массу) за счет излучения. Потеря массы происходит также за счет выбросов вещества.
- Большие звезды, называемые *гигантами* и *сверхгигантами* (см. ниже), теряют свою массу за счет выбросов вещества гораздо интенсивнее, чем более легкие звезды.

Параметры выгорания ядерного горючего для звезды с массой $M = 20M_{\odot}$

Горючий материал	Температура (МК)	Плотность $10^6(\text{кг/м}^3)$	Среднее время выгорания τ (лет)
H	37	0,0045	$8,1 \cdot 10^6$
He	188	0,97	$1,2 \cdot 10^6$
C	870	170	976
Ne	1570	3100	0,6
O	1980	5550	1,25
Si	3340	33400	0,0315

Спектральные классы звезд

Спектральный класс	Наблюдательные оптические характеристики класса	Поверхностная температура, К	Цвет звезды
О	Горячие звезды с линиями поглощения HeII	30000 – 50000	голубой
В	Линии поглощения HeI (линии H усиливаются к классу А)	12000 – 30000	Голубовато-белый
А	Линии H достигают наибольшей интенсивности, а затем ослабевают; усиливаются линии CaII	7600 – 11000	Белый
F	Линии CaII усиливаются, линии H ослабевают; развиваются линии металлов	6000 – 7600	Желто-белый
G	Сильные линии CaII и других металлов; линии H ослабевают	5000 – 6000	Желтый
K	Сильные линии металлов; появляются полосы поглощения CH и CN	4000 – 5000	Оранжевый
M	Сильные полосы TiO	2500 – 4000	Красный

Откуда обозначения

- Наименование спектральных классов звезд сформировались еще в XIX веке.
- Остроумные астрономы из обсерватории Mount Palomar (США) предложили запоминать последовательность спектральных классов по первым буквам слов следующей шутливой фразы:

«O, Be A Fine Girl, Kiss Me!».

Подклассы спектральных классов

- Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрой от 0 до 9 (в сторону уменьшения поверхностной температуры), справа от буквы, именующей класс.
- После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды. Различают 7 классов светимостей

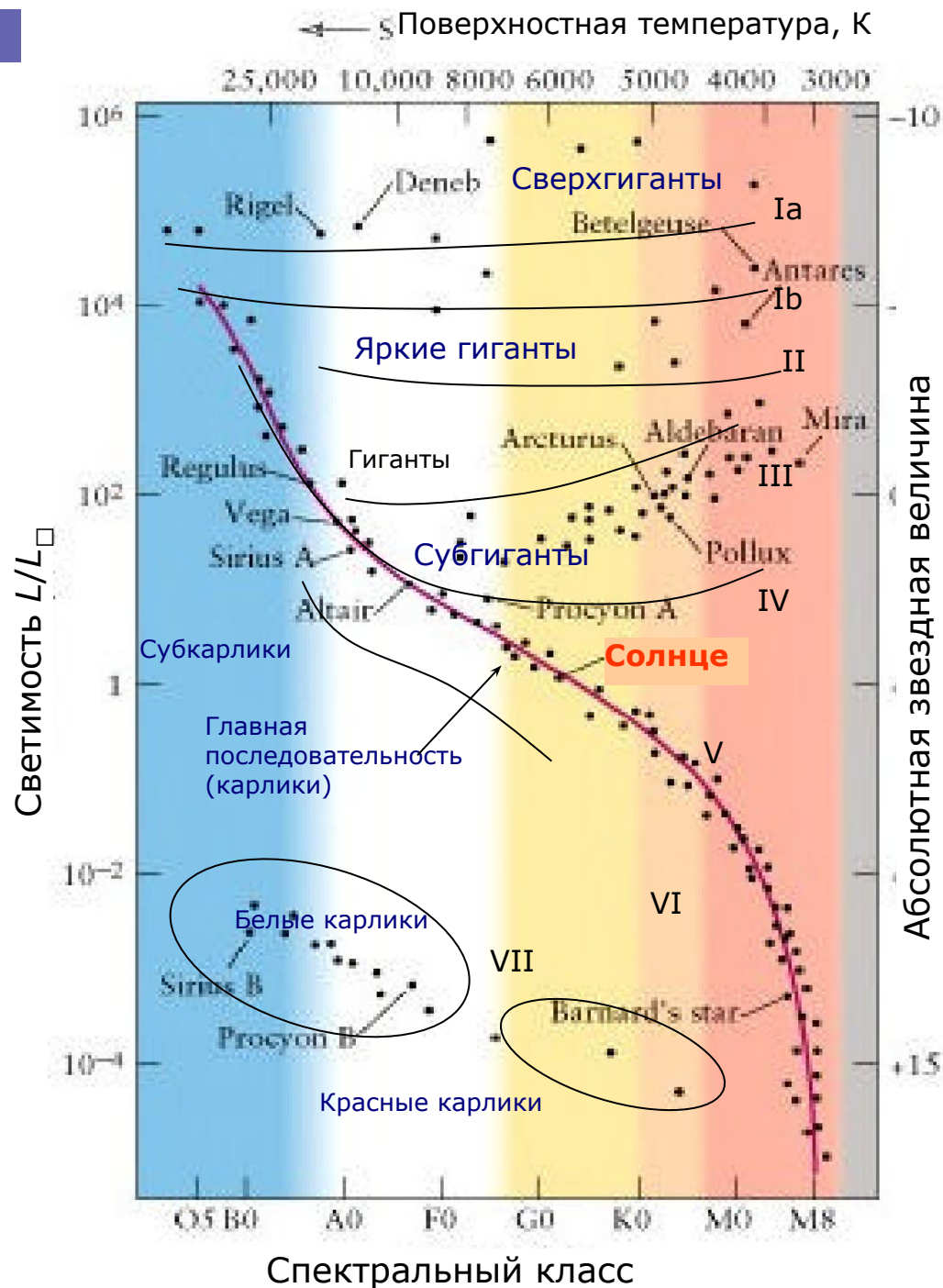
Классы светимостей

- I – *сверхгиганты* (supergiants); среди них различают классы светимостей Ia и Ib;
- II – *яркие гиганты* (bright giants);
- III – *гиганты* (giants);
- IV – *субгиганты* (subgiants);
- V – *главная последовательность*, или *карлики* (main sequence, или dwarfs)
- VI – *субкарлики* (subdwarfs)
- VII – *белые карлики* (white dwarfs) и *красные карлики* (red dwarfs).

Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

- Звезды располагаются в зависимости от их светимости L , выраженной в единицах светимости Солнца $L_{\odot} = 3,827 \cdot 10^{26}$ Вт (по оси ординат), и температуры их поверхности, полученной по измерениям яркостной температуры звезд с помощью телескопов (по оси абсцисс; поверхностная температура растет справа налево).

Диаграмма Герцшпрунга – Рассела



Сверхгиганты

- *Сверхгиганты* имеют очень большие массы (как правило, от 18 до 60 $M_{\odot}$). Термоядерный синтез в них может происходить не только в центре звезды, но и в других оболочках.
- Горячие или голубые сверхгиганты (такие как Ригель, Денеб и др.) имеют большую массу, чем холодные или красные сверхгиганты (например, Бетельгейзе).
- Но у красных сверхгигантов больше радиус.
- Примером красного сверхгиганта может служить Антарес, имеющий спектральный класс и класс светимости M0I, поверхностную температуру всего 3300 K, но светимость, составляющую $34000L_{\odot}$, радиус, в 530 раз, превышающий $R_{\odot}$, и имеющий массу $19M_{\odot}$.

Субгиганты

- Светимости *гигантов* варьируются по классам от II (*яркие гиганты*) до IV (*субгиганты*).
- Они обычно относятся к классам K и M (оранжевые и красные гиганты). Хотя могут иметь и более высокий спектральный класс, как, например, Процион A (α Малого Пса), имеющий спектральный класс F5IV.
- Гиганты имеют массы, сравнимые с массой звезд середины главной последовательности, но очень большие размеры (хотя и не такие, как у сверхгигантов).
- Например, Арктур (α Волопаса) имеет спектральный класс K2III, поверхностную температуру 4000 K, но светимость в 130 раз, превышающую светимость Солнца $L_{\odot}$, радиус, в 26 раз больший радиуса Солнца $R_{\odot}$, и массу, составляющую $4,2M_{\odot}$.
- В центральной части гигантов весь водород уже превратился в гелий и идет синтез углерода, кислорода и неона, а также продолжается синтез гелия в удаленной от центра оболочке.

Главная последовательность

- Звезды, в центре которых синтезируется, главным образом, водород, составляют в настоящее время большую часть звезд нашей Галактики (80 %). Они принадлежат к т. н. *главной последовательности (main sequence)* – ГП
- К ним относится Солнце.
- Звезды ГП иногда называют карликами

Главная последовательность

- Массы звезд главной последовательности только в несколько раз (2 – 4) отличаются от массы Солнца $M_{\odot}$.
- К звездам главной последовательности относятся Регул, Сириус А, Вега, Альтаир, Звезда Барнарда и др.
- Ближайшая к Солнцу звезда, α Центавра, расстояние до которой составляет всего 1,33 пк, имеет класс G2V, т. е. также относится к звездам главной последовательности.
- В звездах главной последовательности, имеющих массу и светимость выше солнечной, синтез водорода, идет, в основном, по двойному CNO-циклу.
- В звездах, имеющих массу меньше или порядка солнечной, преобладает *pp*-цикл.

Белые карлики

- *Белые карлики* имеют настолько малые размеры, что их светимость намного меньше светимости Солнца, не смотря на то, что среди них встречаются звезды, имеющие поверхностную температуру выше, чем у Солнца.
- Поэтому на диаграмме Г–Р они образуют полосу, лежащую ниже главной последовательности.
- Большинство белых карликов имеют массу, примерно равную массе Солнца, но их радиусы лежат в пределах от $0,01R_{\odot}$ до $0,001R_{\odot}$ (почти как радиус Земли).
- Поэтому они намного плотнее Солнца (их средняя плотность составляет $10^6 - 10^7$ от средней плотности Солнца).

Белые и черные карлики

- Белые карлики исчерпали возможности для термоядерного синтеза и представляют собой конечную стадию эволюции многих звезд.
- Они сжимаются и охлаждаются и в будущем (через несколько миллиардов лет) превратятся в т.н. **черные карлики**, звезды, которые не наблюдаются в настоящее время из-за достаточно молодого возраста Вселенной.
- Примером белого карлика может служить Сириус В (спектральный класс – A5VII, поверхностная температура – 8200 К, светимость – $2,6 \cdot 10^{-3} L_{\odot}$, радиус – $2,6 \cdot 10^{-2} R_{\odot}$, масса – $0,96 M_{\odot}$).

Сириус

- Эта звезда еще примечательна тем, что образует *двойную звездную систему* со звездой главной последовательности Сириусом А (спектральный класс – A1V, поверхностная температура – 9700 K, светимость – $61L_{\odot}$, радиус – $2,4R_{\odot}$, масса – $3,3M_{\odot}$) и поэтому ее обнаружили лишь сравнительно недавно.
- Эта система находится на расстоянии 2,7 пк от Земли и считается одной из ближайших двойных звездных систем.
- По наблюдениям за двойными системами можно весьма точно установить массы входящих в них звезд, а также изучить их характеристики и поведение звездных атмосфер. В частности, наблюдают притяжение части атмосферы одной звезды другой звездой пары (*аккреция*).

Типичный сценарий эволюции звезд

- По мере выгорания водорода в центре звезды она сжимается, в результате давление и температура в ее центре повышаются до значений, достаточных для синтеза гелия.
- Происходит значительное расширение звезды, и она превращается в красный гигант
- После выгорания водорода в недрах Солнца через примерно 5 млрд. лет оно расширится до нынешней орбиты Меркурия, или даже Венеры, а по некоторым оценкам его край может достичь нынешней орбиты Земли.

Типичный сценарий эволюции звезд

- Процессы синтеза все более тяжелых ядер ускоряются.
- Звезда при этом может быстро терять массу в виде не только излучения, но и т.н. *звездного ветра*.
- Он образуется как за счет высоких кинетических энергий частиц, возникающих при термоядерном синтезе, за счет быстрого вращения звезды, либо за счет давления электромагнитного излучения, сопровождающего термоядерные реакции и другие явления, происходящие в звезде.

Типичный сценарий эволюции звезд

- Если поле тяготения достаточно велико, то сбрасываемая с внешней оболочки масса может удерживаться недалеко от звезды в виде туманности (пример – туманность в созвездии Ориона).
- Если потери массы красным гигантом значительны (они могут составлять до половины массы всей звезды), то по мере синтеза все более тяжелых элементов термоядерные процессы могут прекратиться, и гигант начнет сжиматься под действием гравитационных сил.
- Звезда минует главную последовательность и переходит в разряд белых карликов.

Типичный сценарий эволюции звезд

- Звезды, имеющие массу, намного меньшую массы Солнца, не проходят стадии красного гиганта, а сразу превращаются в *красные карлики*.
- В них термоядерная эволюция заканчивается, как правило, образованием гелия. Энергетику этих звезд определяют, в основном процессы конвективного переноса тепла.
- По мере остывания они также должны превратиться в черные карлики.

Особенности для сверхгигантов

- Сверхгиганты могут вести себя несколько иначе.
- После завершения кремниевого цикла сверхгигант может взорваться в виде *сверхновой* (Supernovae).
- Центральная часть при этом может превратиться в *нейтронную звезду* (neutron star), либо, если ее масса была достаточно велика – в т.н. «*черную дыру*» (black hole).
- Остальная часть материи звезды выбрасывается в межзвездное пространство, образуя *туманность* (например, Крабовидная туманность), а также потоки частиц очень высоких энергий, в том числе, и весьма мощные потоки фотонов и нейтрино.
- По потокам этих частиц мы узнаем о вспышке сверхновой звезды. Вспышки сверхновых в нашей Галактике происходят в среднем 1 раз в 100 лет.

Нейтронные звезды

- *Нейтронные звезды* представляют собой сверхплотные (с плотностью, сравнимой с плотностью ядерной материи $10^{17} - 10^{18} \text{ кг/м}^3$) и чрезвычайно малые по размерам (от 10 до 20 км в поперечнике!) образования, состоящие, в основном, из нейтронов.
- Нейтроны образуются при чрезвычайно сильном сжатии звезды во время взрыва сверхновой, при котором электроны «вдавливаются» в протоны (происходит массовый электронный захват ядрами).

Нейтронные звезды

- Дальнейшему сжатию звезды препятствует принцип Паули, поскольку нейтроны являются фермионами. Нейтронные звезды очень быстро вращаются (период обращения от 1,4 мс до 30 с), создают чрезвычайно сильные магнитные поля.
- Нейтронные звезды могут иметь максимум интенсивности электромагнитного излучения как в оптическом диапазоне (*пульсары*), так и в радиодиапазоне.
- Одна из первых нейтронных звезд была обнаружена в Крабовидной туманности, оставшейся после взрыва сверхновой.

Черные дыры

- Гравитационное сжатие звезды может оказаться таким сильным, что часть материи при вспышке сверхновой образует т.н. «черную дыру».
- Существование черных дыр предсказал еще в начале 19 века Лаплас, предположив, что существуют космические объекты такой массы, которые свет не может покинуть.
- Для этих объектов скорость частиц, способных их покинуть, т.е. вторая космическая скорость ,
$$\sqrt{2GM/R}$$
- где R – радиус объекта, окажется равной скорости света.

Черные дыры

- Радиус такого тела тогда будет равен $r_g = 2GM / c^2$
- Эта величина называется *гравитационным радиусом* или *радиусом Шварцшильда* по имени немецкого астронома К. Шварцшильда, (K. Schwarzschild), нашедшего первое точное сферически симметричное решение уравнений тяготения Эйнштейна, в котором пространство вокруг тяготеющей материальной точки разбивается на две сферические области.
- Вывод этой формулы, проведенный выше, основан на равенстве потенциальной энергии частицы GmM/R массы m в поле сферически симметричного тела радиуса R и ее кинетической энергии $mu^2/2$. Последняя формула неприменима к свету, но в начале 19 века это еще было не известно. Случайно величина r_g имеет именно такой вид и в релятивистской теории Шварцшильда.

Черные дыры

- В области $r > r_g$ движение частиц описывается законами, которые вдали от тяготеющего центра и при достаточно малых скоростях движения частиц переходят в законы механики Ньютона для материальной точки, движущейся в гравитационном поле.
- В области $r < r_g$ пространство (радиальная координата) и время как бы меняются ролями. При этом свет, испущенный в точке $r < r_g$, не может преодолеть потенциальный барьер – сферу радиусом $r = r_g$, которая поэтому называется *горизонтом событий*

Черные дыры

- Позже английский физик-теоретик Хоукинг (S. Hawking) предположил, что черные дыры все же можно наблюдать, если допустить, что некоторые ультрарелятивистские частицы и свет, испущенные внутри черной дыры, могут «просочиться» во внешнее пространство-время благодаря туннельному эффекту (*испарение черных дыр*).
- В этом случае говорят, что черная дыра имеет *волосы*. В настоящее время ведется интенсивный поиск черных дыр в двойных системах. Черную дыру можно было бы обнаружить, в частности, по аккреции вещества от ее видимого партнера по двойной системе.

Черные дыры

- На сегодняшний день теория черных дыр достаточно хорошо развита и подлежит подтверждению с помощью все более точных астрономических методов наблюдений.
- Считается, что ядра галактик являются сверхмассивными (несколько миллионов масс Солнца) черными дырами.
- Рассматривается возможность существования черных дыр с массами в сотни масс Солнца.

Черные дыры

- Их отличительной особенностью должна быть очень высокая светимость в рентгеновском диапазоне. Рассматриваются черные дыры с массами, варьирующихся от значений, сравнимых с массой Солнца ($1,5 - 3,3 M_{\odot}$ – *предел Толмена – Оппенгеймера – Волкова*) до $15 M_{\odot}$. Эти черные дыры могут быть ядрами белых карликов или нейтронных звезд.
- На ранних стадиях эволюции Вселенной могли возникать т.н. черные микродыры с массами порядка планковской.