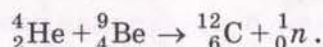


§66. СОСТАВ И РАЗМЕРЫ ЯДРА

Опыты Резерфорда, проведенные в 1919 г., показали, что в состав ядер атомов входят *протоны* p , имеющие заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массу $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг ①. Они вылетали, например, при бомбардировке α -частицами ${}^4_2\text{He}$ ядра азота ${}^{14}_7\text{N}$ вместе с изотопом кислорода ${}^{17}_8\text{O}$ в процессе реакции: ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$. При этом источник α -частиц находился внутри металлического сосуда, заполненного азотом. В свободном состоянии в земных условиях протоны встречаются как ядра атома водорода ${}^1_1\text{H}$.

В 1932 г. английский физик *Джеймс Чедвик* показал, что помимо протонов в состав ядра входят электрически нейтральные *нейтроны* (от лат. *neutron* — нейтральный) ②. Масса нейтрона превосходит массу протона всего на 0,14%. В опыте Чедвика нейтроны ${}^1_0n$ вылетали при облучении ядер атомов бериллия α -частицами:



В свободном виде в земных условиях нейтроны не встречаются из-за самопроизвольного распада: среднее время жизни нейтрона близко к 15,3 мин.

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия между ними,

подтвержденного в 1919 г. опытами Резерфорда. При бомбардировке ядер атома водорода (протонов) α -частицы испытывали кулоновское отталкивание на расстоянии, большем 3 фм ③. Однако на меньших расстояниях пролета наблюдалось притяжение α -частиц к протону, обусловленное сильным взаимодействием нуклонов.

Притяжение между протоном и нейтроном объясняется их постоянным обменом друг с другом виртуальной (экспериментально ненаблюдаемой) частицей — π^+ -мезоном ④.

Процесс обмена виртуальными частицами изображают на диаграммах Фейнмана (*Ричард Фейнман* — американский физик), на которых реальной частице сопоставляется прямая линия, а виртуальной — волнистая. По современным представлениям

*протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — нуклона (от лат. *nucleus* — ядро). Протон — нуклон в заряженном состоянии, нейтрон — в нейтральном.*

Нуклоны обладают, как и электрон ⑤, полуцелым спином, т.е. имеют спиновый момент импульса, равный $\hbar/2$. Взаимодействие нуклонов зависит от взаимной ориентации их спинов. При антипараллельных спинах энергия взаимодействия нуклонов оказывается меньше, чем при параллельных. Поэтому парное расположение нуклонов с антипараллельными спинами в одном энергетическом состоянии энергетически наиболее выгодно.

Радиус ядра R с массовым числом A можно оценить в предположении плотной упаковки нуклонов в ядре, т.е. когда объем ядра складывается из объемов отдельных нуклонов радиусом r_0 ⑥:

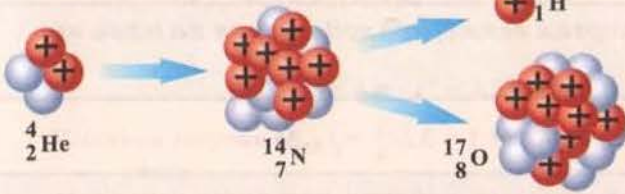
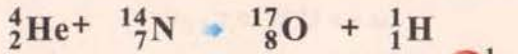
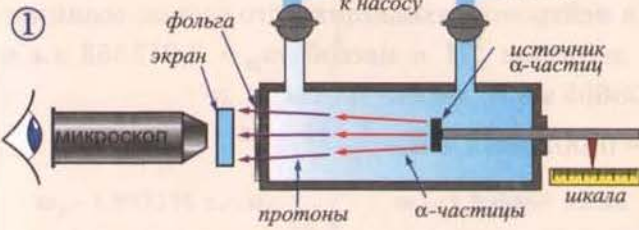
$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \cdot A.$$

Следовательно, радиус ядра $R = r_0 \cdot A^{1/3}$.

Эксперименты показывают, что $r_0 \approx 1,2$ фм.

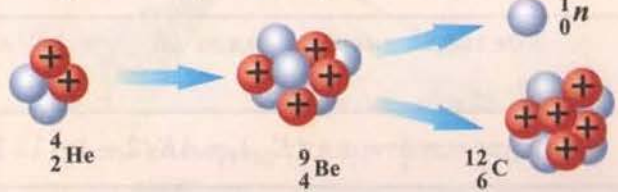
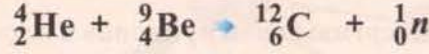
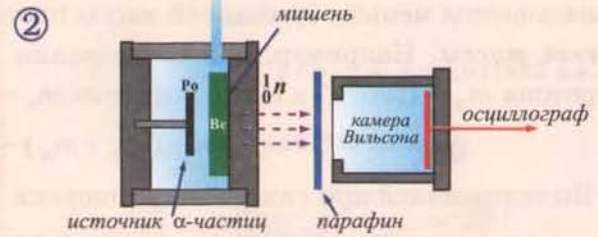
ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА (Э.РЕЗЕРФОРД – 1919 г.)

Схема опыта



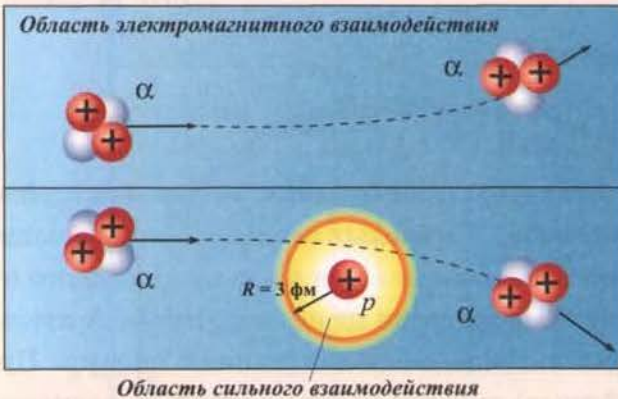
ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА (ДЖ. ЧЕДВИК – 1932 г.)

Схема опыта



СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ

③ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ α -ЧАСТИЦЫ С ПРОТОНОМ



④ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

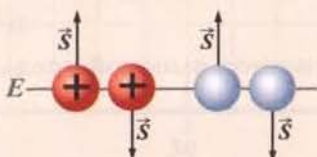


⑤ ЯДРО АТОМА ГЕЛИЯ

Нуклоны в ядре



Спины нуклонов в основном энергетическом состоянии



⑥ РАЗМЕР ЯДРА



A – массовое число – число нуклонов в ядре

Объем ядра

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot A$$

$$R = rA^{1/3}$$

$$r = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

§67. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНОВ В ЯДРЕ

При образовании ядра из протонов и нейтронов выделяется энергия ①. В результате масса ядра оказывается меньше суммарной массы протонов и нейтронов, входящих в его состав: возникает **дефект массы**. Например, при образовании ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ с массой $m_D = 2,013553$ а.е.м. из протона $m_p = 1,00727$ а.е.м. и нейтрона $m_n = 1,008665$ а.е.м. дефект массы

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = 0,002388 \text{ а.е.м.}$$

Выделившаяся при синтезе ядра энергия

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,002388 \cdot 931,5 = 2,224 \text{ МэВ},$$

определяет энергию связи нуклонов в ядре.

Удельная энергия связи $(E_{\text{св}})_1 = \Delta E/A$ — энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

Для ядра дейтерия $(E_{\text{св}})_1 = \Delta E/2 = 1,112 \text{ МэВ}$.

Энергия связи нуклонов в ядре равна минимальной работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на составные части — протоны и нейтроны ②.

Оценим удельную энергию связи нуклона в α -частице — ядре атома ${}^4_2\text{He}$ ($m_\alpha = 4,001506$ а.е.м.). Дефект массы

$$\Delta m = 2(m_p + m_n) - m_\alpha = 0,030376 \text{ а.е.м.}$$

Энергия связи нуклонов в ядре

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 28,296 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи нуклона

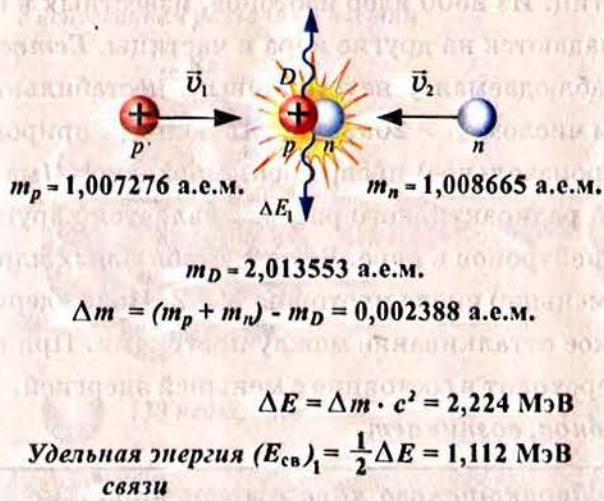
$$(E_{\text{св}})_1 = \Delta E/4 = 7,07 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи зависит от массового числа A ③. У небольших легких ядер дейтерия ${}^2_1\text{H}$, трития ${}^3_1\text{H}$ она мала из-за малого числа нуклонов. У тяжелых элементов при больших A (и больших зарядовых числах Z) энергия связи нуклона уменьшается из-за кулоновского отталкивания протонов. Слабая зависимость удельной энергии связи от полного числа A нуклонов в ядре свидетельствует о том, что нуклоны связаны короткодействующими силами. При далекодействующих силах (таких, как гравитационные) энергия связи зависит от размеров: камень в 6 раз труднее оторвать от поверхности Земли, чем от Луны. Ядерные силы напоминают быстро убывающие с расстоянием силы взаимодействия между молекулами жидкости. Энергия связи молекул не зависит от массы жидкости, поэтому удельная теплота парообразования воды одинакова при испарении воды из чашки и из озера. Лишний нуклон взаимодействует лишь с ближайшими соседями. Подобно молекулам, находящимся на поверхности воды, нуклоны втягиваются внутрь ядра, испытывая поверхностное натяжение. Вот почему ядра имеют сферическую форму. Ядро является как бы каплей ядерного вещества.

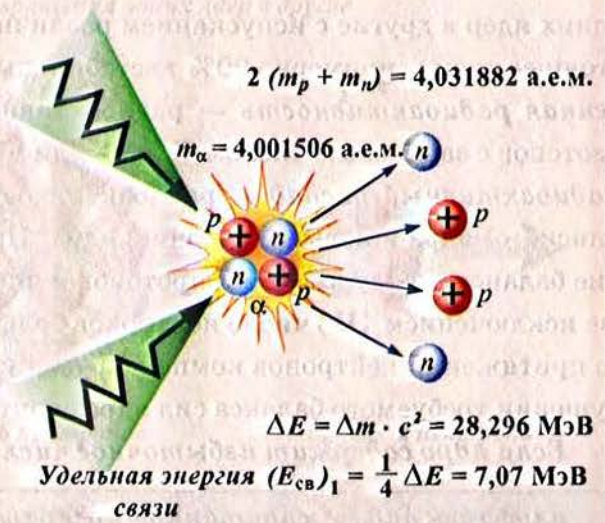
Наибольшей энергией связи обладают стабильные ядра, содержащие целое число α -частиц (${}^4_2\text{He}$). Максимальная удельная энергия связи 8,795 МэВ в ядре никеля ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ — наиболее стабильного из всех ядер.

Широкая распространенность железа во Вселенной объясняется высокой удельной энергией связи ядра железа.

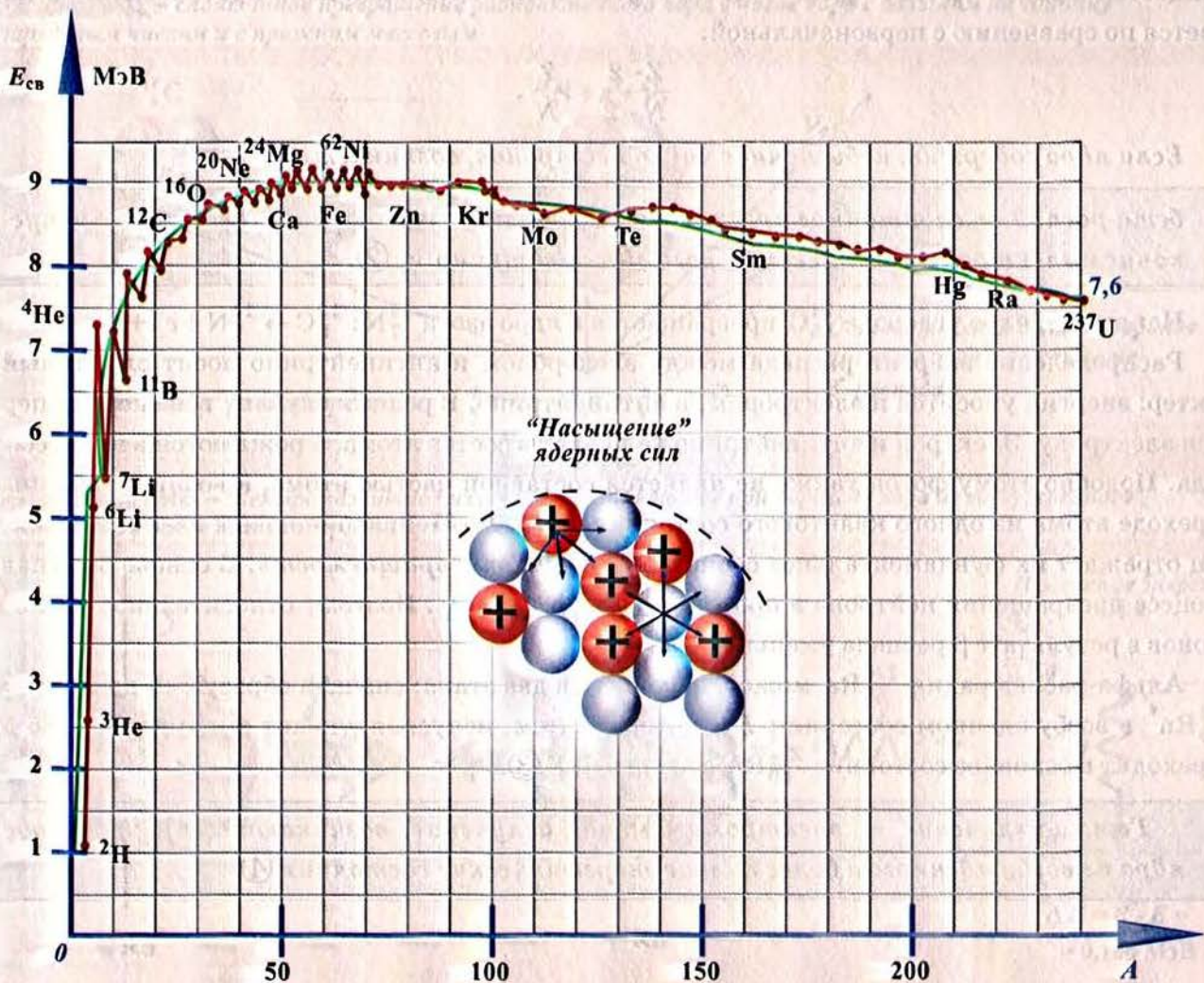
① ОБРАЗОВАНИЕ ДЕЙТРОНА



② ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ α -ЧАСТИЦЫ



③ УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНА В ЯДРЕ



§68. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность (от лат. radio — излучаю) — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц. Из 2500 ядер изотопов, известных в настоящее время, примерно 90% нестабильны и распадаются на другие ядра и частицы. **Естественная радиоактивность** — радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых, нестабильных изотопов с зарядовым числом $Z > 83$ или массовым числом $A > 209$, существующих в природе. **Радиоактивный распад** — радиоактивное (самопроизвольное) превращение исходного (материнского) ядра в новые (дочерние) ядра. Причиной радиоактивного распада является нарушение баланса между числом Z протонов и числом N нейтронов в ядре. Во всех стабильных ядрах (за исключением ${}^1_1\text{H}$) число нейтронов больше (не меньше) числа протонов: $N \geq Z$. Поле ядерного притяжения нейтронов компенсирует кулоновское отталкивание между протонами. При нарушении требуемого баланса сил ядро спонтанно переходит в состояние с меньшей энергией.

Если ядро содержит избыточное число протонов, возникает

альфа-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием α -частицы (ядро атома ${}^4_2\text{He}$) ①.

Широко используемым источником α -частиц является радий ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. При распаде он превращается в радон ${}^{222}_{86}\text{Rn}$: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, а относительная доля протонов в ядре уменьшается по сравнению с первоначальной:

$$\frac{Z-2}{N-2} < \frac{Z}{N}.$$

Если ядро содержит избыточное число нейтронов, возникает

бета-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона e^- и электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$ ②.

Например, ядро углерода ${}^{14}_6\text{C}$ превращается в ядро азота ${}^{14}_7\text{N}$: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$.

Распределение энергии распада между электроном и антинейтрино носит случайный характер: энергия уносится и электроном, и антинейтрино. В редких случаях вся энергия передается электрону. Электрон и антинейтрино не входят в состав атома, а рождаются в процессе распада. Подобно этому фотон также не является составной частью атома, а возникает лишь при переходе атома из одного квантового состояния в другое. Появление новых элементарных частиц отражает их фундаментальное свойство — **взаимопревращаемость**. В основе β -распада — процесс превращения нейтрона в протон: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + e^- + \bar{\nu}_e$. Поэтому относительное число нейтронов в результате β -распада уменьшается.

Альфа-распад радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ может проходить в два этапа: сначала образуется дочернее ядро ${}^{222}_{86}\text{Rn}^*$ в возбужденном состоянии E^* , которое затем, испуская γ -квант с энергией 0,186 МэВ, переходит в основное состояние ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ с энергией E ③.

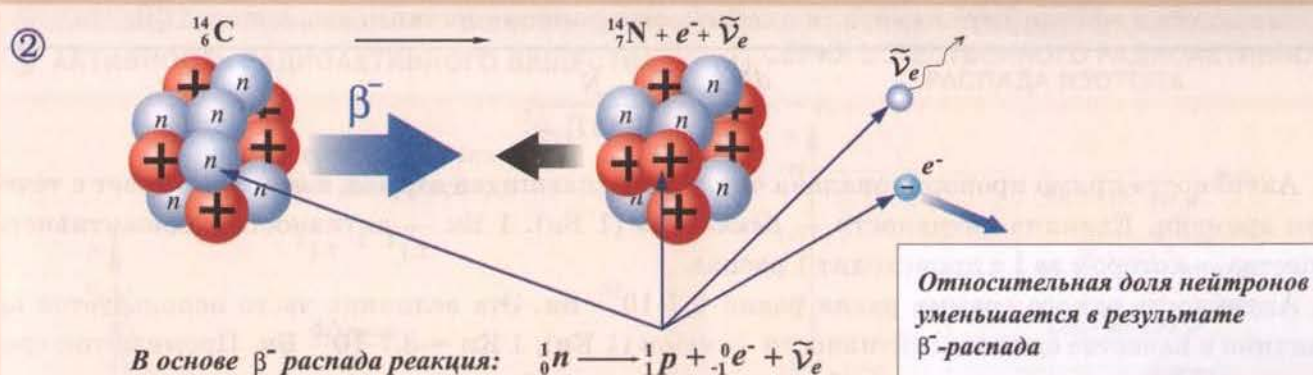
Гамма-излучение — электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбужденного в более низкие энергетические состояния ④.

α - РАСПАД – спонтанный распад радиоактивного ядра, сопровождающийся испусканием α-частиц.

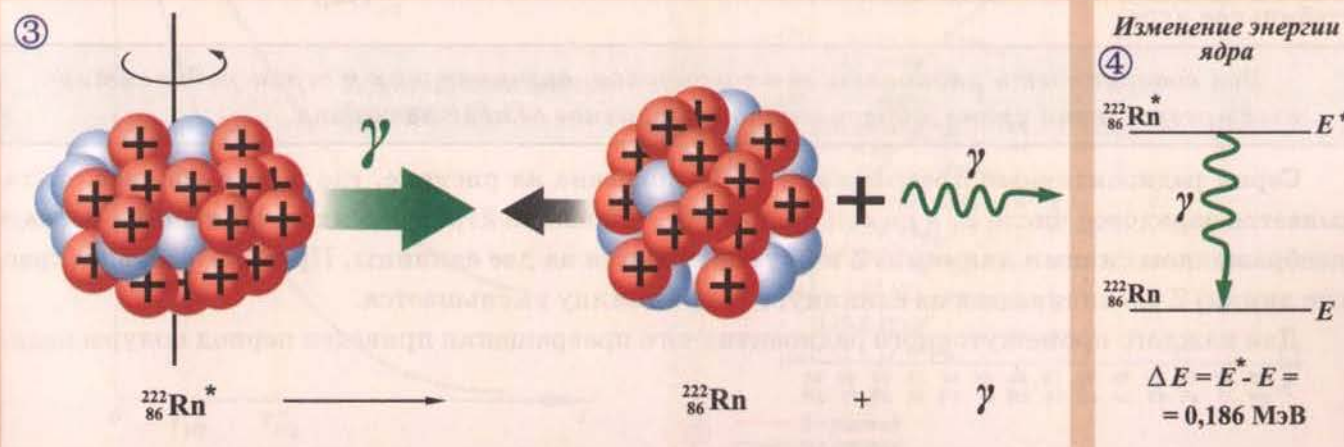
РАДИОАКТИВНОСТЬ – явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц



β⁻ - РАСПАД – спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с бóльшим на единицу зарядовым числом и с прежним массовым



γ - ИЗЛУЧЕНИЕ – электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбужденного состояния в более низкое энергетическое состояние



§69. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Радиоактивный распад — статистический процесс. Нельзя указать, какие именно атомы в радиоактивном образце, состоящем в начальный момент времени ($t = 0$) из N_0 атомов, распадутся за определенное время. Но можно практически с полной достоверностью предсказать, сколько атомов независимо распадется за этот промежуток времени. Например, половина из N_0 ядер атомов радона $^{222}_{86}\text{Rn}$ распадется за 3,82 суток. Чем больше N_0 ①, тем точнее будет выполняться это вероятностное предсказание.

Период полураспада — промежуток времени, за который распадется половина первоначального числа атомов.

Период полураспада не зависит от начального числа частиц. По истечении периода полураспада $T_{1/2}$ нераспавшимися останутся $N_0/2$ атомов. В произвольный момент времени t число нераспавшихся радиоактивных ядер

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}. \quad (1)$$

Закон (1) убывания числа радиоактивных ядер со временем — **закон радиоактивного распада**. Чем меньше период полураспада, тем быстрее происходит распад. В таблице приведен период полураспада некоторых изотопов ②.

Скорость радиоактивного распада характеризует число ядер $N_{\text{расп}} = N_0 - N$, распавшихся в единицу времени, или активность радиоактивного вещества A ③:

$$A = \frac{dN_{\text{расп}}}{dt} = \frac{N}{1,44T_{1/2}}.$$

Активность прямо пропорциональна числу нераспавшихся атомов, которое убывает с течением времени. Единица активности — **беккерель** (1 Бк). 1 Бк — активность радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит 1 распад.

Активность одного грамма радия равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. Эта величина часто используется на практике в качестве единицы активности — **кюри** (1 Ки); $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Промежуток времени $t = 1,44T_{1/2}$ характеризует **среднее время жизни радиоактивного изотопа**.

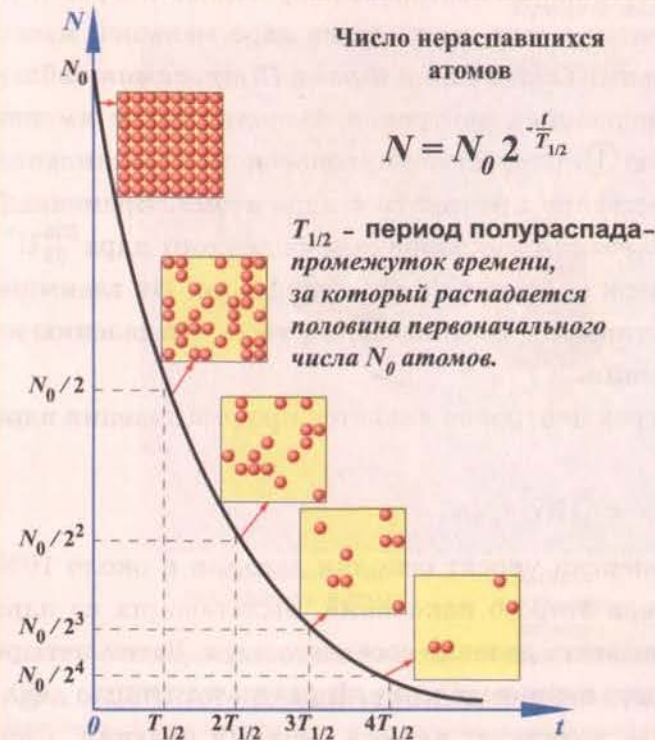
Естественный радиоактивный распад конкретного изотопа может являться отдельным звеном длинной последовательности (серии) ядерных превращений ④. Промежуточные в серии дочерние ядра, будучи нестабильными, продолжают распадаться до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

Вся совокупность радиоактивных изотопов, возникающих в серии радиоактивных превращений урана, образует радиоактивное семейство урана.

Серия радиоактивных превращений $^{238}_{92}\text{U}$ показана на рисунке, где по оси абсцисс откладывается зарядовое число Z , а по оси ординат N — число нейтронов в ядре. При альфа-распаде (изображенном синими линиями) Z и N уменьшаются на две единицы. При бета-распаде (красные линии) Z увеличивается на единицу, а N на единицу уменьшается.

Для каждого промежуточного радиоактивного превращения приведен период полураспада.

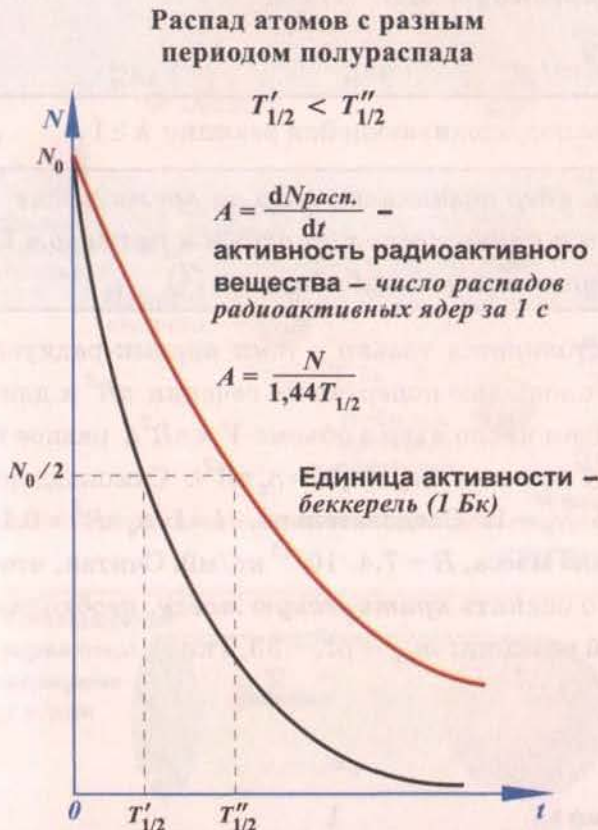
① ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА



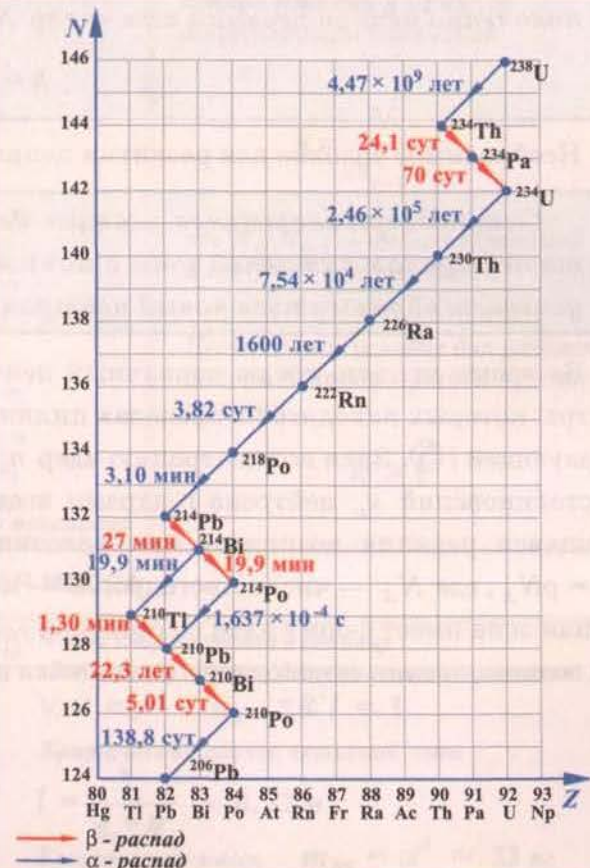
② ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА НЕКОТОРЫХ ИЗОТОПОВ

ИЗОТОП	Период полураспада
^{104}Tc	18 минут
^{222}Rn	3,8 суток
^{131}I	8 суток
^{60}Co	5,24 года
^3H	12,3 года
^{90}Sr	28 лет
^{226}Ra	1600 лет
^{14}C	5730 лет
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$ лет
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ лет

③ АКТИВНОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА



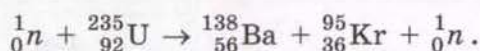
④ СЕРИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ИЗОТОПА



§70. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Искусственная радиоактивность — радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях. Ядра тяжелых элементов могут делиться на ядра меньшей массы при внешнем воздействии. В 1938 г. немецкие ученые **Отто Ган** и **Франц Штрассман** наблюдали деление ядра урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ под действием медленных нейтронов. Использование именно нейтронов обусловлено их электронейтральностью ①. Отсутствие кулоновского отталкивания протонами ядра позволяет нейтронам беспрепятственно проникать в ядро атома. Временный захват нейтрона вызывает пространственные колебания нуклонов возбужденного ядра ${}^{236}_{92}\text{U}^*$. Избыток нейтронов в центре ядра означает избыток протонов на его периферии. Их взаимное отталкивание приводит к искусственной радиоактивности изотопа ${}^{236}_{92}\text{U}^*$, т.е. к его делению на ядра меньшей массы, называемые осколками деления.

Типичной реакцией деления с образованием трех нейтронов является процесс деления ядра урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ ②:



В процессе деления ядра урана около 90% энергии уносят осколки деления и около 10% возникающие нейтроны. Любой из двух нейтронов второго поколения, вылетающих из ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ в процессе деления, может в свою очередь вызвать деление соседнего ядра. Затем четыре нейтрона третьего поколения способны вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер начинает лавинообразно нарастать — возникает **цепная реакция деления**. Скорость цепной реакции деления ядер характеризует

коэффициент размножения нейтронов ③ — отношение числа нейтронов N_i в i -ом поколении цепной реакции к их числу N_{i-1} в предыдущем $(i-1)$ -ом:

$$k = N_i / N_{i-1}.$$

Необходимое условие для развития цепной самоподдерживающейся реакции $k \geq 1$.

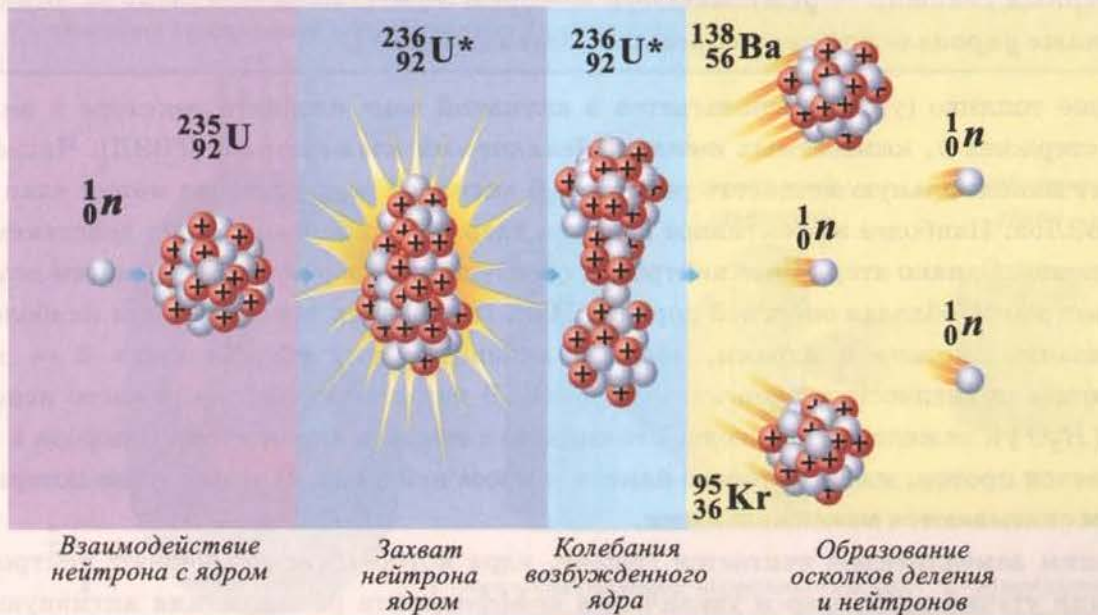
Самоподдерживающаяся реакция деления ядер возникает, если за время пролета нейтроном активной зоны с минимальным критическим линейным размером l успевает образоваться новый нейтрон в результате реакции деления ④.

За время пролета среды первичный нейтрон столкнется только с теми ядрами радиуса R , центры которых находятся в пределах цилиндра с площадью поперечного сечения πR^2 и длиной образующей l ⑤. Зная концентрацию ядер n_y , найдем число ядер в объеме $V = \pi R^2 l$, равное числу столкновений ν_c нейтрона с ядрами в единицу времени: $\nu_c = n_y V = n_y \pi R^2 l$. Самоподдерживающаяся реакция возникает при условии, что $\nu_c = 1$. Следовательно, $l = 1/n_y \pi R^2 \approx 0,12$ м ($n_y = \rho N_A / M$, где N_A — число Авогадро, M — молярная масса, $R = 7,4 \cdot 10^{-15}$ кг/м). Считая, что активная зона имеет форму куба со стороной l , можно оценить **критическую массу**, необходимую для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции: $m_{кр} = \rho l^3 = 33,2$ кг.

①

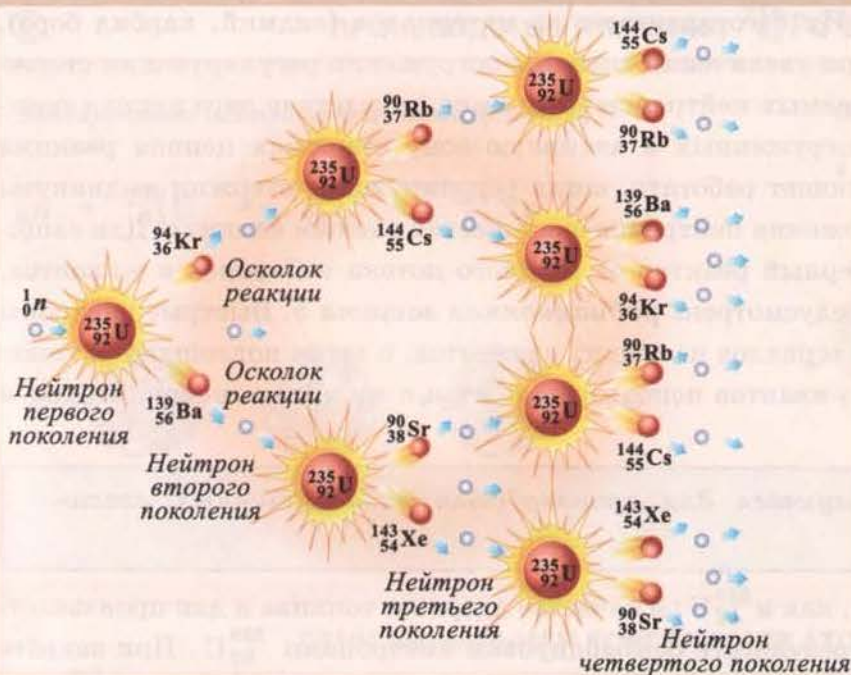
ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Процесс деления ядра урана



②

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА $^{235}_{92}\text{U}$



③ СКОРОСТЬ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

Коэффициент размножения нейтронов - отношение числа нейтронов в данном поколении цепной реакции к их числу в предыдущем поколении

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

где N_i, N_{i-1} - число нейтронов в i и $(i-1)$ поколениях

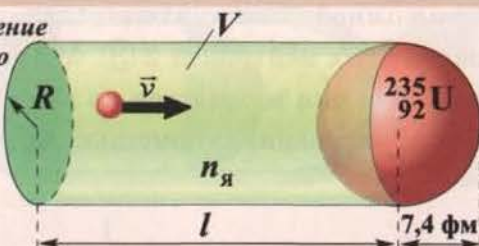
Необходимое условие для развития цепной самоподдерживающейся реакции

$$k \geq 1$$

КРИТИЧЕСКАЯ МАССА

④

Столкновение первичного нейтрона с ядром



⑤

Число столкновений в единицу времени при самоподдерживающейся реакции

$$\nu_c = n_y V = n_y \cdot \pi R^2 l = 1$$

Критический размер активной зоны

$$l = \frac{1}{n_y \pi R^2} \approx 0,12 \text{ м}$$

$$\text{Критическая масса } m_{кр} = \rho l^3 \approx 33 \text{ кг}$$

§71. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Ядерный реактор — устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер ①.

Ядерное топливо (уран) располагается в активной зоне ядерного реактора в виде вертикальных стержней 1, называемых *тепловыделяющими элементами* (ТВЭЛ). Число ТВЭЛов определяет максимальную мощность реактора. В активной зоне реактора может находиться до 90 000 ТВЭЛов. Наиболее эффективное деление ядер $^{235}_{92}\text{U}$ происходит под действием медленных нейтронов. Однако вторичные нейтроны, образующиеся в результате реакции деления, являются быстрыми, обладая энергией порядка МэВ. Поэтому их замедляют для наиболее эффективного взаимодействия с ядрами, вводя в активную зону *замедлитель* 2 — вещество, уменьшающее кинетическую энергию нейтронов. В качестве замедлителя часто используется обычная (H_2O) и тяжелая (D_2O) вода. Это связано с тем, что ядром атома водорода в молекуле воды является протон, масса которого близка к массе нейтрона. В этом случае потери энергии нейтроном оказываются максимальными.

Хорошим замедлителем считается графит, ядра которого не поглощают нейтронов. Для уменьшения утечки нейтронов и увеличения коэффициента размножения активную зону окружают *отражателем нейтронов* 3 — оболочкой, отражающей нейтроны внутрь зоны. Управление скоростью цепной реакции осуществляется с помощью передвижения в активной зоне *регулирующих стержней* 4. Их изготавливают из материалов (кадмий, карбид бора), сильно поглощающих нейтроны. При увеличении глубины погружения регулирующих стержней в активную зону число поглощаемых нейтронов возрастает, вследствие чего цепная реакция ослабевает. При полностью погруженных в активную зону стержнях цепная реакция должна прекратиться. Реактор начинает работать, когда регулирующие стержни выдвинуты настолько, что коэффициент размножения нейтронов оказывается равным единице. Для защиты персонала, обслуживающего ядерный реактор от мощного потока нейтронов и γ -квантов, возникающих при делении ядер, предусмотрена *радиационная защита* 5. Быстрые нейтроны сначала замедляются с помощью материалов из легких элементов, а затем поглощаются тяжелыми элементами. Для защиты от γ -квантов используется бетон с железным наполнителем и соединениями бора.

Ядерные реакторы используются для производства радиоактивных изотопов ②.

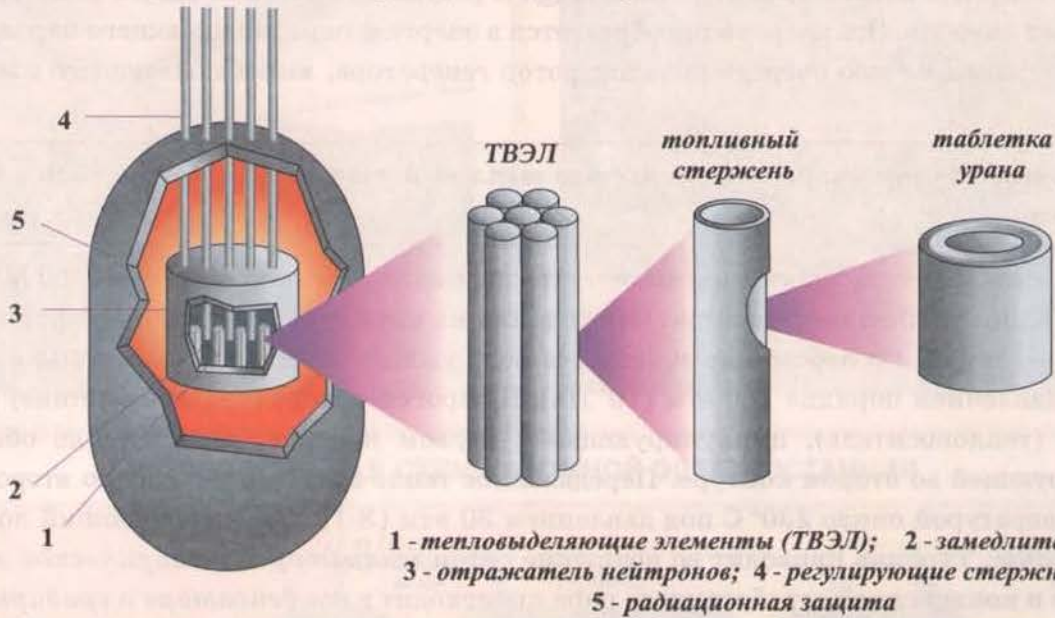
Плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$, используемый, как и $^{235}_{92}\text{U}$, в качестве ядерного топлива и для производства ядерного оружия, получается в результате бомбардировки нейтронами $^{238}_{92}\text{U}$. При захвате нейтрона образуется изотоп $^{239}_{92}\text{U}$. После двух последующих β -распадов возникают $^{239}_{93}\text{Np}$ и $^{239}_{94}\text{Pu}$.

В состав одной из возможных конструкций *атомной бомбы* входят два куска урана $^{235}_{92}\text{U}$ (или плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$) 1, а также источник первичных нейтронов 2 ③. Масса каждого из этих кусков меньше критической, поэтому в отдельности они взорваться не могут. Однако их суммарная масса превышает критическую. После выстреливания с помощью *запала* 3 одного куска урана в другой бомба взрывается.

①

СХЕМА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

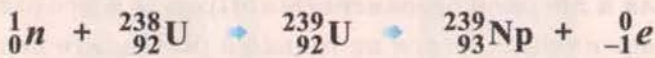
Ядерный реактор – устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер



②

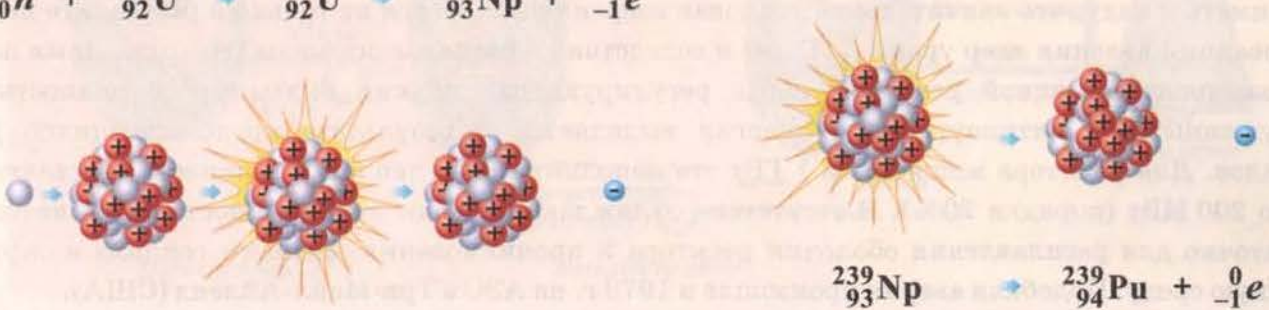
ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ $^{239}_{94}\text{Pu}$ В РЕАКТОРЕ

Бомбардировка нейтронами изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$



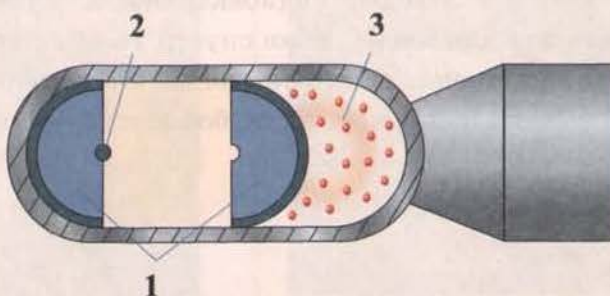
Образование плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$

в результате бета-распада



③

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ АТОМНОЙ БОМБЫ



1 - куски урана $^{235}_{92}\text{U}$

(или плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$)

2 - источники первичных нейтронов

3 - запал

§72. АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Ядерный реактор — основной элемент *атомной электростанции* (АЭС), преобразующей тепловую ядерную энергию электрическую ①. В результате деления ядер в реакторе выделяется тепловая энергия. Эта энергия преобразуется в энергию пара, вращающего паровую турбину. Паровая турбина в свою очередь вращает ротор генератора, вырабатывающего электрический ток.

Мощность реактора — количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.

При каждом акте деления ядер выделяется значительная энергия (около 200 МэВ), поэтому стенки ТВЭЛов сильно нагреваются. Отвод тепла из активной зоны осуществляется *теплоносителем* — водой. Во избежание закипания вода выводится из активной зоны в *парогенератор* под давлением порядка 100 атм (10^7 Па). В парогенераторе (теплообменнике) радиоактивная вода (теплоноситель), циркулирующая в первом контуре, отдает тепло обычной воде, циркулирующей во втором контуре. Передаваемое тепло превращает воду во втором контуре в пар с температурой около 230°C под давлением 30 атм ($3 \cdot 10^6$ Па), вращающий лопатки *паровой турбины*. Турбина приводит во вращение ротор *генератора электрической энергии*. Охлаждение и конденсация отработанного пара происходит в *конденсаторе* и *градирне*.

Первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт была построена в 1954 г. в нашей стране (г. Обнинск).

Коэффициент полезного действия АЭС зависит, в частности, от КПД парогенератора и турбины. КПД современных АЭС порядка одной трети.

Учитывая значительную величину тепловой энергии, выделяемой в ядерном реакторе АЭС, жизненно необходимо решение *проблем контроля и ядерной безопасности*. Прежде всего следует иметь в виду, что значительная тепловая энергия выделяется не только в результате цепной реакции деления ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$, но и вследствие β -распадов осколков реакции. Даже после завершения цепной реакции, когда регулирующие стержни оказываются полностью погруженными в активную зону, энергия выделяется в результате продолжающихся β -распадов. Для реактора мощностью 1 ГВт эта дополнительная тепловая мощность составляет около 200 МВт (порядка 20%). В отсутствие охлаждающей воды этой мощности оказывается достаточно для расплавления оболочки реактора и проникновения ядерного топлива в окружающую среду. Подобная авария произошла в 1979 г. на АЭС в Три-Майл-Айленд (США).

В 1986 г. избыточное удаление регулирующих стержней из активной зоны реактора третьего энергоблока Чернобыльской АЭС привело к увеличению мощности реактора в 10 000 раз за 4 с. Избыточное тепловыделение привело к выбросу в атмосферу радиоактивных веществ и радиационному загрязнению обширных территорий Украины, Белоруссии и России.

В результате работы АЭС возникают ядерные отходы. Радиоактивность отработавших ТВЭЛов остается высокой, представляя опасность для людей даже спустя 25 000 лет. Отработавшие ТВЭЛы обычно хранят в жидком виде в цистернах из нержавеющей стали, окруженных бетоном. Наиболее активные отходы остекловывают и помещают в глубокие шахты под землей.

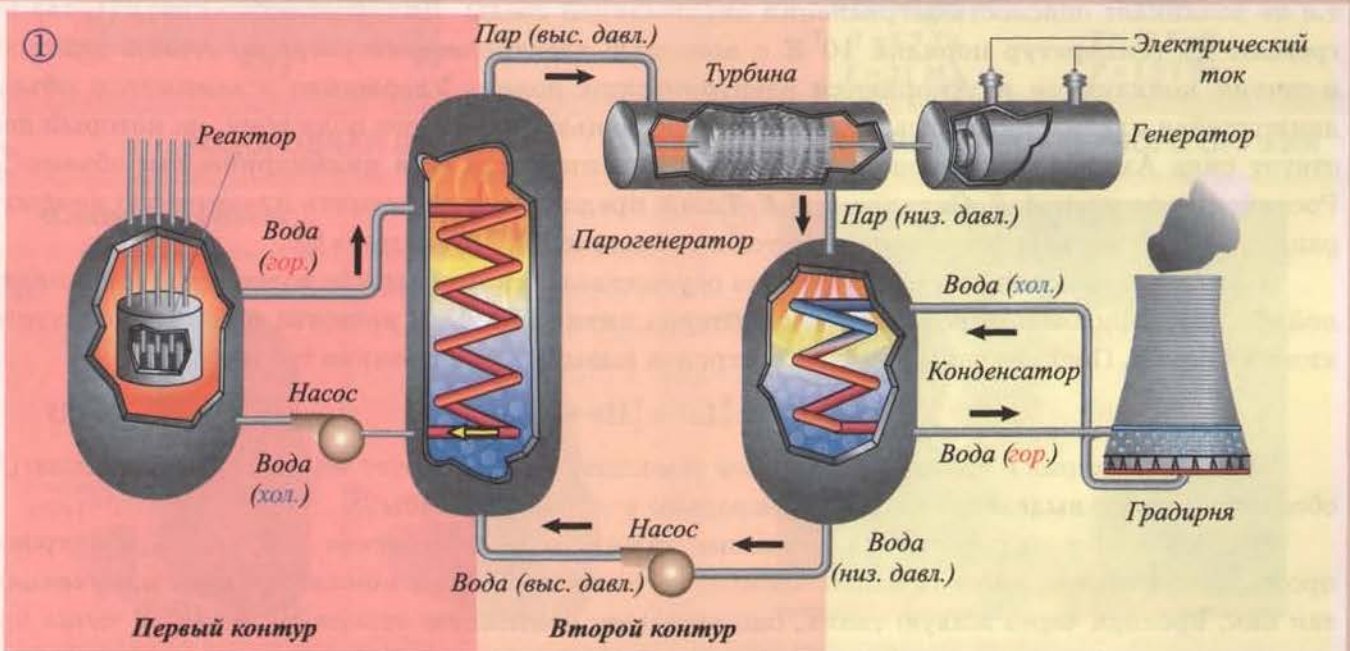
ЗАЛ УПРАВЛЕНИЯ СТАНЦИЕЙ



ГЕНЕРАТОР



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



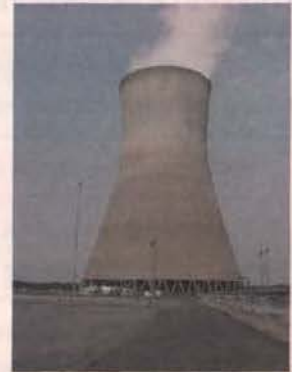
ЗАМЕНА ТВЭЛ В РЕАКТОРЕ



ПАРОГЕНЕРАТОР



ГРАДИРНЯ



§73. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выделение ядерной энергии может происходить не только при реакции деления ядер, но и при реакции соединения (синтеза) ядер ①. При соединении двух легких ядер, например, дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$, синтезируется более тяжелое ядро ${}^4_2\text{He}$ и вылетает нейтрон:



При синтезе легких ядер выделяется значительная энергия (17,6 МэВ), большая, чем при реакции деления тяжелых. Для слияния ядер они должны сблизиться до расстояний, меньших 10^{-14} м, где действуют силы ядерного притяжения. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Для его преодоления ядра должны обладать значительной кинетической энергией, соответствующей температуре, превышающей 10^7 К.

Термоядерный синтез — реакция, в которой при высокой температуре, большей 10^7 К, из легких ядер синтезируются более тяжелые.

При *управляемом термоядерном синтезе* (УТС) не образуются радиоактивные отходы, т.е. не возникает опасность загрязнения окружающей среды. Для осуществления УТС газ нагревают до температур порядка 10^7 К с помощью электрического разряда. Атомы дейтерия и трития ионизируются и ускоряются электрическим полем. Удержание в замкнутом объеме движущейся плазмы оказалось возможным с помощью магнитного поля тока, на который действует сила Ампера, сжимающая плазму и удерживающая ее в цилиндрическом объеме ②. Российские физики *А.Д. Сахаров* и *И.Е. Тамм* предложили применять плазменную конфигурацию в форме тора, которая используется в установке УТС «Токамак» ③.

Неуправляемый термоядерный синтез осуществляется при взрыве водородной (термоядерной) бомбы, зарядом которой является дейтерид лития LiD ④. В качестве запала используется атомная бомба. После ее взрыва поток нейтронов вызывает образование трития ${}^3_1\text{H}$:



Наличие дейтерия и трития при высокой температуре инициирует термоядерную реакцию (1), обеспечивающую выделение энергии при взрыве водородной бомбы ⑤.

Радиоактивное излучение (включающее гамма- и рентгеновское излучение, электроны, протоны, α -частицы, ионы тяжелых элементов) называют также *ионизирующим излучением*, так как, проходя через живую ткань, оно вызывает ионизацию атомов ⑥. В любой точке пространства существует ионизирующее излучение, или *естественный радиационный фон*. Наибольший вклад в естественный радиационный фон вносит радиоактивный радон и продукты его распада. Вклад *искусственных источников радиации* (реакторы, ускорители, рентгеновские установки) в естественный радиационный фон — около 18%.

Доза поглощенного излучения — отношение энергии излучения $E_{\text{изл}}$, поглощенной облучаемым телом, к его массе m : $D = E_{\text{изл}}/m$ ⑦.

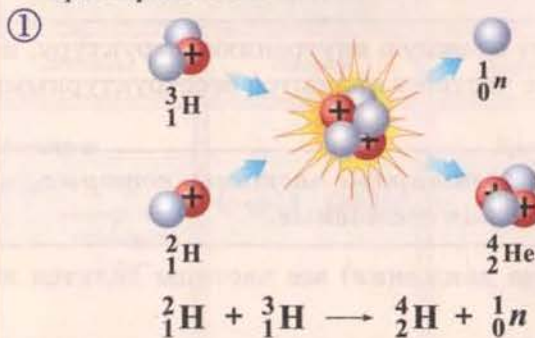
Единица D — *грэй* (1 Гр = 1 Дж/кг).

Эквивалентная доза поглощенного излучения H — произведение дозы поглощенного излучения на коэффициент качества k : $H = Dk$.

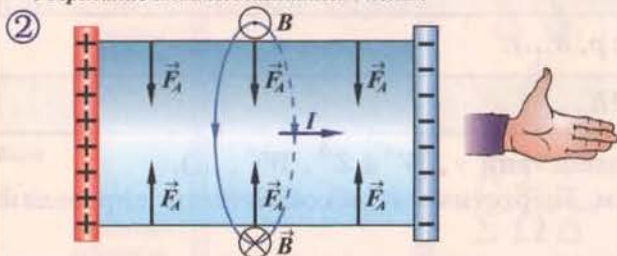
Коэффициент качества характеризует различие биологического действия различных видов излучения. Единица эквивалентной дозы поглощенного излучения — *зиверт* (1 Зв).

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Термоядерный синтез



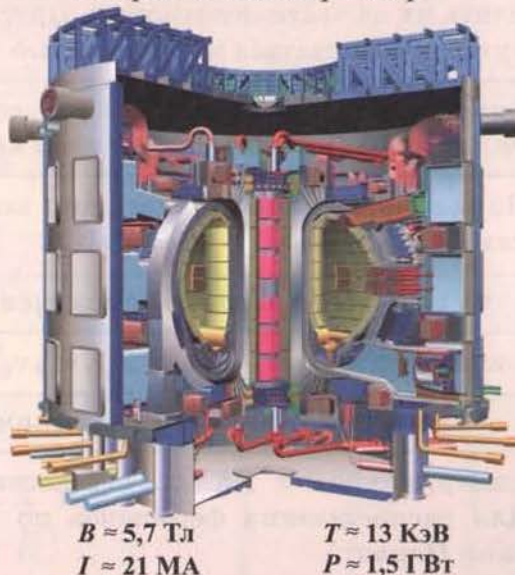
Удержание плазмы магнитным полем



УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ТОКАМАК ITER

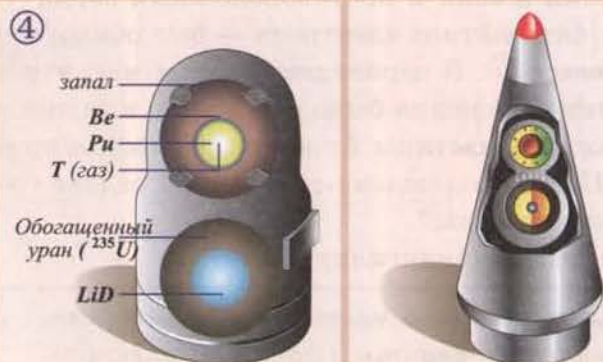
Международный термоядерный экспериментальный реактор



ВОДОРОДНАЯ БОМБА

Конструкция бомбы

Термоядерная боеголовка



ИСПЫТАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ



БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

⑥ Вклад источников ионизирующего излучения в радиационный фон



⑦ Доза поглощенного излучения

$D = \frac{E_{\text{изл}}}{m}$ $E_{\text{изл}}$ — энергия излучения, поглощенная телом массой m
 Единица — 1 Грей

Коэффициент качества ионизирующего излучения k

Ионизирующее излучение	Рентгеновское излучение, γ -излучение	e^-	n		β	α
			медленные	быстрые		
k	1	1-1,5	3-5	10	10	20

Эквивалентная доза поглощенного излучения

$H = D \cdot k$ Единица — 1 Зиверт

§74. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Элементарная частица — микробъект, который невозможно расщепить на составные части.

Ряд элементарных частиц (например, нуклоны) имеет сложную внутреннюю структуру, но разделить их на части невозможно. Другие элементарные частицы являются бесструктурными и могут рассматриваться как первичные

фундаментальные частицы — бесструктурные элементарные частицы, которые до настоящего момента времени не удалось описать как составные.

По величине спина (собственного момента количества движения) все частицы делятся на два класса: **фермионы** ① и **бозоны** ②.

Фермионы — частицы с полуцелым спином: $\hbar/2, 3\hbar/2, \dots$

(например, лептоны: $e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$, барионы: $p, n, \dots$).

Бозоны — частицы с целым спином: $0, \hbar, 2\hbar, \dots$

(например, мезоны: $\pi^+, K^-, \dots$, переносчики взаимодействий $\gamma, W^+, Z^0, W^-, \dots$).

Для распределения фермионов по возможным энергетическим состояниям справедлив **принцип Паули**:

в одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами ③.

Античастица $\bar{a}$ (элементарной частицы a) — элементарная частица, имеющая равную (по отношению к a) массу покоя, одинаковый спин, время жизни и противоположный заряд ④. Позитрон e^+ (от лат. positivus — положительный) — античастица электрона — был обнаружен в 1932 г. американским физиком **Карлом Андерсоном** ⑤. В перпендикулярном магнитном поле частица двигалась по окружности. Ее направление движения было неизвестно и зависело от знака заряда. Для определения направления движения частицы Андерсон разместил на ее пути свинцовую пластинку, тормозившую частицу. После прохождения пластинки радиус трека уменьшился. Это означало, что заряд частицы положительный.

При столкновении частицы и античастицы они исчезают (аннигилируют).

Аннигиляция — процесс взаимодействия элементарной частицы с ее античастицей, в результате которого они превращаются в γ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или другие частицы.

При столкновении электрона и позитрона обе частицы исчезают, а рождаются два γ -кванта (фотона):

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Минимальная энергия излучения $E_{\text{изл}} = 2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$.

Рождение пары — процесс, обратный аннигиляции ⑥.

Электрон-позитронная пара может возникнуть, например, при взаимодействии γ -кванта с веществом. Электрически нейтральные кванты превращаются в частицы, общий заряд которых равен нулю:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

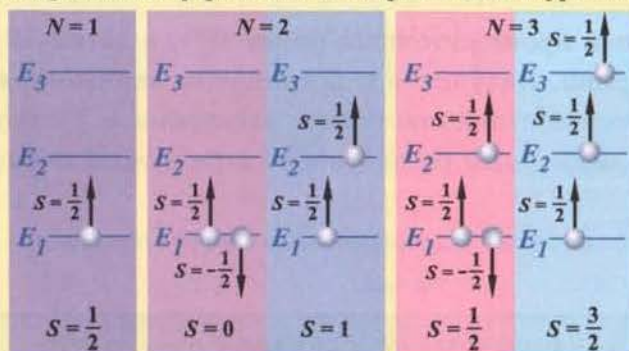
Для рождения пары требуется минимальная энергия, равная сумме энергий покоя частиц $2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$. После рождения электрон-позитронной пары, попадающей в магнитное поле, сила Лоренца действует на разноименно заряженные частицы в противоположные стороны, чем и объясняется их закручивание в разных направлениях.

Классификация элементарных частиц

① ФЕРМИОНЫ ($S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$)			② БОЗОНЫ ($S = 0, 1, \dots$)				
Фундаментальные частицы		Элементарные частицы (Адроны)	Переносчики взаимодействий				
Лептоны	Кварки	Барiony	Мезоны	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитационное
Электрон e^- ν_e электронное нейтрино	u d c s t b	Протон $u u d$ Нейтрон $u d d$ $\Lambda^0 \Sigma^+ \Sigma^0$ $\Sigma^- \Omega^- \Delta^{++}$	π^+ $u \bar{d}$ K^- $u \bar{s}$ $\pi^0 \pi^- K^+$ $\eta^0 K^0 \dots$	Глюоны 	Фотон γ	Промежуточные бозоны W^+ Z^0 W^-	Гравитон 

③ ПРИНЦИП ПАУЛИ

Распределение фермионов по энергетическим уровням



В одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами

⑤ ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА e^+

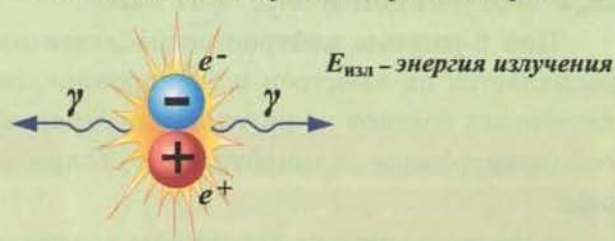
Трек позитрона в камере Вильсона в магнитном поле $\vec{B}$



без свинцовой пластинки со свинцовой пластинкой

④ АНТИЧАСТИЦЫ

Аннигиляция электрон-позитронной пары

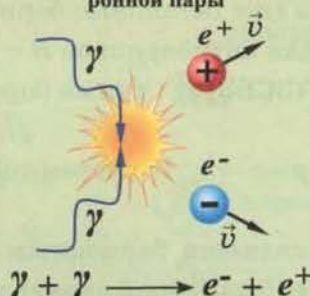


$$e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$$

$$E_{\text{изл}} = 2m_e c^2 = 2 \cdot (9,1 \cdot 10^{-31}) (3 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,02 \text{ МэВ}$$

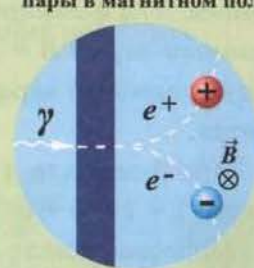
⑥ РОЖДЕНИЕ ПАРЫ

Рождение электрон-позитронной пары



$$\gamma + \gamma \longrightarrow e^- + e^+$$

Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле



§75. ЛЕПТОНЫ И АДРОНЫ

По отношению к сильному взаимодействию все элементарные частицы делятся на две большие группы: *адроны* (от греч. hadros — большой, сильный) и *лептоны* (от греч. leptos — легкий).

Адроны — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

Лептоны — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии ①.

К лептонам относят 12 частиц (6 частиц и 6 античастиц).

Все лептоны — фермионы — обладают полуцелыми спинами $\hbar/2$. Для лептонов вводят квантовое число — *лептонный заряд* $L = 1$, для антилептонов $L = -1$, для адронов $L = 0$. Согласно закону сохранения лептонного заряда (ЗСЛЗ) ②: сумма лептонных зарядов до и после взаимодействия сохраняется. Поэтому в реакциях слабого взаимодействия лептонов участвуют лептон-нейтринные дуплеты.

Для реакции β -распада $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ЗСЛЗ имеет вид: $0 = 0 + 1 - 1$,

Для реакции распада мюона $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ЗСЛЗ: $1 = 1 - 1 + 1$,

Для реакции распада таона $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$ ЗСЛЗ: $1 = 1 - 1 + 1$.

Слабое взаимодействие лептонов происходит посредством обмена виртуальными частицами — *переносчиками взаимодействия* ③. Их массу m_0 можно условно оценить с помощью правила квантования орбит Бора, полагая $v = c$: $m_0 R_{\text{сл}} c \approx \hbar$, где радиус слабого взаимодействия $R_{\text{сл}} \approx 10^{-18}$ м. Массы промежуточных векторных бозонов W^+ , W^- , Z^0 соответствуют энергиям $m_W c^2 = 81 = 81$ ГэВ и $m_Z c^2 = 91$ ГэВ.

При β -распаде нейтрон распадается на протон и промежуточный бозон W^- , а затем W^- распадается на электрон и электронное антинейтрино. Излучение и поглощение заряженных векторных бозонов — результат превращения одного лептона (например, электрона e^-) в другой (электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$), при котором векторный бозон уносит отрицательный заряд.

Адроны делятся на две группы в зависимости от значения их спина: *мезоны* (от греч. meso — средний) и *барионы* (от греч. barys — тяжелый) ④.

Мезоны — бозоны со спином, равным 0, $\hbar$, участвующие в сильном взаимодействии.

Барионы — фермионы со спином, равным $\hbar/2$, $3\hbar/2$, участвующие в сильном взаимодействии ⑤.

В свою очередь в группе барионов выделяют подгруппы: *нуклоны* (протоны, нейтроны) со спином $\hbar/2$ и *гипероны* (все остальные барионы). Для барионов вводят квантовое число — *барионный заряд* $B = 1$, для антибарионов $B = -1$, для лептонов $B = 0$. Согласно закону сохранения барионного заряда (ЗСБЗ) ⑥: сумма барионных зарядов до и после взаимодействия сохраняется.

При β -распаде $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (с учетом того, что e^- и $\bar{\nu}_e$ не являются барионами) ЗСБЗ имеет вид: $1 = 1 + 0 + 0$.

Массовое число A является барионным зарядом ядра. В уравнении ядерной реакции ⑦ сумма верхних индексов (барионный заряд) должна быть одинакова в обеих частях уравнения.

①

ЛЕПТОНЫ

Дуплет	Название	Символ		Масса		L	Время жизни, с
		частица	анти-частица	в m_e	МэВ		
I	Электрон	e^-	e^+	1	0,511	± 1	Стабилен
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	$0(< 1,4 \cdot 10^{-5})$	± 1	Стабильно
II	Мюон	μ^-	μ^+	207	105,66	± 1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	$0(< 0,25)$	± 1	Стабильно
III	Таон	τ^-	τ^+	3492	1784	± 1	10^{-13}
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	$0(< 35)$	± 1	Стабильно

②

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЛЕПТОННОГО ЗАРЯДА

β^- -РАСПАД

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(L=0) \quad (L=0) \quad (L=1) \quad (L=-1)$$

$$0 = 0 + 1 - 1$$

РАСПАД МЮОНА

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$(L=1) \quad (L=1) \quad (L=-1) \quad (L=1)$$

$$1 = 1 - 1 + 1$$

РАСПАД ТАОНА

$$\tau^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

$$(L=1) \quad (L=1) \quad (L=-1) \quad (L=1)$$

$$1 = 1 - 1 + 1$$

③

СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕПТОНОВ

ДИАГРАММА ФЕЙНМАНА



МАССА ЧАСТИЦЫ - ПЕРЕНОСЧИКА

$$m_W = \frac{\hbar}{R_{\text{эл}} c} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{10^{-18} \cdot 3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$$

$$m_W c^2 \approx 81 \text{ ГэВ}$$

ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЕ e^- И $\bar{\nu}_e$



④

Барions $B=1$ ($S=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$)

Название	Символ	Масса (МэВ)	Время жизни, с
Протон	p	938,3	Стабилен
Нейтрон	n	939,6	898
Лямбда-гиперон	Λ^0	1116	$2,6 \cdot 10^{-10}$
Сигма +- гиперон	Σ^+	1189	$0,5 \cdot 10^{-10}$
Дельта плюс плюс	Δ^{++}	1232	10^{-23}
Омега минус	Ω^-	1672	$0,8 \cdot 10^{-10}$

АДРОНЫ

⑤

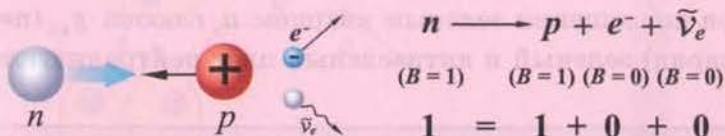
Мезоны $B=0$ ($S=0,1$)

Название	Символ	Масса (МэВ)	Время жизни, с
Пи - ноль	π^0	135	$0,87 \cdot 10^{-16}$
Пи - плюс	π^+	139,6	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Пи - минус	π^-	139,6	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Ка - плюс	K^+	493,7	$1,24 \cdot 10^{-8}$
Ка - минус	K^-	493,7	$1,24 \cdot 10^{-8}$
Эта - ноль	η	548,8	$\approx 10^{-18}$

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ БАРИОННОГО ЗАРЯДА

β^- -РАСПАД

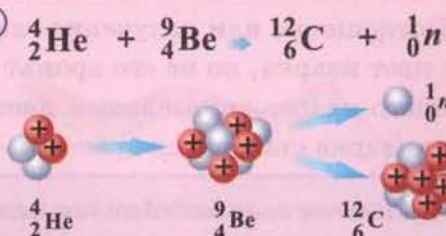
⑥



ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРОНА

⑦



§76. КВАРКИ

Достаточно большие (в среднем) массы адронов по сравнению с массами лептонов позволили в 1963 г. американским физикам-теоретикам *Мюррею Геллману* и *Джорджу Цвейгу* предположить, что адроны являются составными частицами. Изучение в 1969 г. рассеяния электронов на нейтронах и протонах подтвердило наличие трех заряженных частиц — *кварков*. Каковы их основные характеристики?

Если предположить, что все кварки имеют одинаковый спин, то он обязательно должен быть полуцелым. Только при сложении трех полуцелых спинов кварков можно получить целый спин нуклона.

Электрический заряд кварков может быть как положительным Q , так и отрицательным q . Если нейтрон состоит из одного кварка с зарядом Q и двух кварков с зарядом q , то протон будет иметь противоположный состав: два кварка с зарядом Q и один с зарядом q . Тогда заряд нейтрона и протона можно представить в виде:

$$0 = Q + 2q,$$

$$e = 2Q + q.$$

Решение системы двух уравнений с двумя неизвестными дает величины зарядов кварков:

$$Q = +\frac{2}{3}e, q = -\frac{1}{3}e.$$

Характерной особенностью кварков, не встречающейся у других частиц, является дробный электрический заряд ①.

Кварк с зарядом $+\frac{2}{3}e$ называли *u-кварком* (от англ. up — вверх), а кварк с зарядом $-\frac{1}{3}e$ — *d-кварком* (от англ. down — вниз). Кварковый состав протона можно представить как (*uud*), а нейтрона — (*udd*).

Барионный заряд кварков принят равным $\frac{1}{3}$, что дает для барионов (протонов и нейтронов) $B=1$ ②. Сохранение барионного заряда объясняет невозможность распада протона на более мелкие частицы. Для антикварков $\bar{u}$ и $\bar{d}$ электрические и барионные заряды имеют противоположные знаки. Вслед за *u*- и *d*-кварками были открыты еще четыре типа кварков: *c* (от англ. charmed — очарованный), *s* (от англ. strange — странный), *t* (от англ. truth — правда) и *b* (от англ. beauty — красота). Различные типы кварков называют *ароматом*. Все кварки — фермионы.

Согласно кварковой модели Δ^{++} -барион состоит из трех одинаковых *u*-кварков, являющихся фермионами, что противоречит принципу Паули. Была выдвинута гипотеза, что эти *u*-кварки не одинаковы, а отличаются *цветом*. Конкретный *u*-кварк несет один из трех цветовых зарядов: красный u_k , зеленый u_z или синий u_c . Тогда состав бариона можно представить в виде (u_k, u_z, u_c). *Антикварки* имеют антицвет, как бы нейтрализующий цвет: антикрасный (фиолетовый), антизеленый (малиновый), антисиний (желтый).

Цветовой заряд является характеристикой взаимодействия кварков, но не адронов в целом. Все адроны цветонейтральны.

Мезоны имеют целый спин, т.е. состоят из кварка и антикварка ③.

Поглощение или излучение глюона (от англ. glue — клей), несущего цетовой заряд, изменяет цвет кварка, но не его аромат ④. При поглощении зеленым кварком u_z глюона $g_{\bar{z}}$ (переносящего красно-антизеленый цетовой заряд) зеленый и антизеленый цвет нейтрализуются, а цвет кварка становится красным — u_k .

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене глюонами ⑤.

① КВАРК (АРОМАТ)

Электрический заряд q

Барионное число B

АНТИКВАРК (АРОМАТ)

Электрический заряд q

Барионное число B

u

$$+\frac{2}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{u}$

$$-\frac{2}{3}e$$

$$-\frac{1}{3}$$

d

$$-\frac{1}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{d}$

$$+\frac{1}{3}e$$

$$-\frac{1}{3}$$

c

$$+\frac{2}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{c}$

$$-\frac{2}{3}e$$

$$-\frac{1}{3}$$

s

$$-\frac{1}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{s}$

$$+\frac{1}{3}e$$

$$-\frac{1}{3}$$

t

$$+\frac{2}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{t}$

$$-\frac{2}{3}e$$

$$-\frac{1}{3}$$

b

$$-\frac{1}{3}e$$

$$\frac{1}{3}$$

$\bar{b}$

$$+\frac{1}{3}e$$

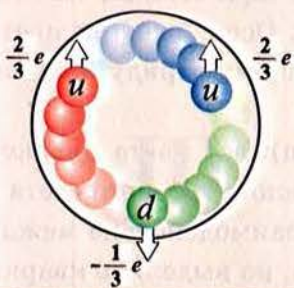
$$-\frac{1}{3}$$

КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

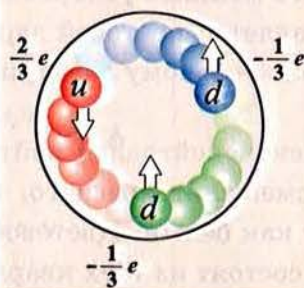
②

БАРИОНЫ

Протон



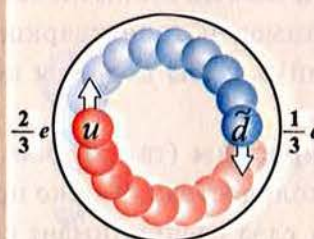
Нейтрон



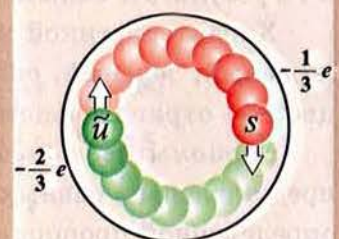
③

МЕЗОНЫ

π^+ - мезон



K^- - мезон

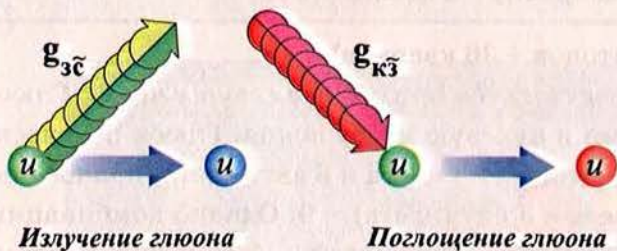


ГЛЮОН – ПЕРЕНОЩИК СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАРКОВ В НЕЙТРОНЕ

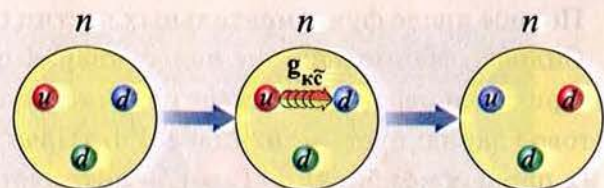
④

Изменение цвета кварка



⑤

Обмен глюоном между кварками



Изменение аромата кварка при β^- -распаде

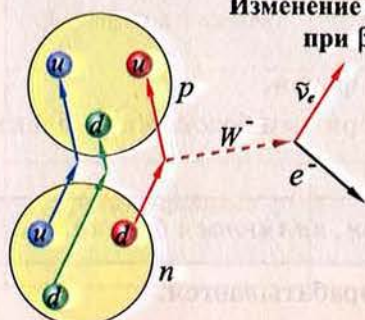
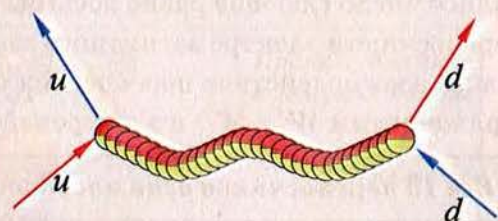


Диаграмма Фейнмана для взаимодействия кварков



§77. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Общая закономерность в систематике элементарных частиц заключается в том, что

все фундаментальные частицы являются фермионами, а все переносчики взаимодействия бозонами.

В настоящее время фундаментальными частицами считают кварки и лептоны, образующие начальный структурный уровень организации материи. Учитывая, что известно 6 ароматов кварков и 6 лептонов, можно говорить о кварк-лептонной симметрии мира.

Полное число лептонов (6 лептонов + 6 антилептонов) = 12.

Соответствующие пары кварков и лептонов образуют три поколения фундаментальных частиц ①. Все стабильные структуры окружающего нас сравнительно низкотемпературного мира состоят из фундаментальных частиц первого поколения: двух стабильных лептонов (электрона и электронного нейтрино) и двух кварков (u и d). При более высоких температурах и больших энергиях существуют второе и третье поколения нестабильных частиц, которые рождались на ранних этапах возникновения горячей Вселенной. В настоящее время такие частицы возникают в результате сильных и слабых взаимодействий в мощных ускорителях заряженных частиц.

Характеристикой взаимодействия кварков является цветовой заряд. Основные три цвета (красный, зеленый, синий) как бы подобны положительному электрическому заряду, а антицвета — отрицательному.

Барионы цветонейтральны (так же как электронейтрален нейтрон): все цвета кварков представлены в равных количествах. Также при смешении красного, зеленого и синего света в определенной пропорции глаз воспринимает свет как белый. Цветовое взаимодействие между барионами не наблюдается. Протоны и нейтроны состоят из трех кварков, но выделить кварки нельзя. Отдельный кварк имеет цвет и поэтому не может существовать в свободном состоянии. Мезоны, как и все адроны, цветонейтральны и состоят из кварка и антикварка с противоположными цветовыми зарядами.

Полное число кварков (6 кварков + 6 антикварков) $\times$ 3 цвета = 36.

Полное число фундаментальных частиц (12 лептонов + 36 кварков) = 48.

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене **глюонами** ②. Глюон электрически нейтрален, имеет целочисленный спин и нулевую массу покоя. Глюон переносит цветовой заряд: цвет — антицвет. Учитывая, что существует 3 цвета и 3 антицвета, полное число их парных комбинаций (цвет — антицвет) (3 цвета $\times$ 3 антицвета) = 9. Однако комбинации: красный — антикрасный, зеленый — антизеленый, синий — антисиний — бесцветны. Поэтому цветовой заряд несут лишь 6 глюонов. Как следует из теории, называемой квантовой хромодинамикой (от греч. *chroma* — цвет), бесцветных глюонов — 2.

Полное число глюонов равно восьми.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия является фотон.

Слабое взаимодействие переносится промежуточными векторными бозонами — электрически заряженными W^+ , W^- и электронейтральными Z^0 .

Все 13 переносчиков взаимодействия, включая гравитон, являются бозонами.

Теория элементарных частиц в настоящее время активно разрабатывается.

ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ – ФЕРМИОНОВ (ВСЕГО – 48)

①

Поколение	Частица	Цвет	q	m , ГэВ
I	Кварк	u	$\frac{2}{3}e$	0,330
		d	$-\frac{1}{3}e$	0,333
	Лептон	e^-	$-e$	$5,11 \times 10^{-4}$
		ν_e	0	$< 1,4 \times 10^{-8}$
II	Кварк	c	$\frac{2}{3}e$	1,65
		s	$-\frac{1}{3}e$	0,486
	Лептон	μ^-	$-e$	0,106
		ν_μ	0	$< 2,5 \times 10^{-4}$
III	Кварк	t	$\frac{2}{3}e$	> 80
		b	$-\frac{1}{3}e$	4,5
	Лептон	τ^-	$-e$	1,78
		ν_τ	0	$< 0,035$

ПЕРЕНОСЧИКИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ – БОЗОНЫ (ВСЕГО – 13)

②

Взаимодействие	Переносчики взаимодействий
Сильное	антицвет цвет Глюоны
Электромагнитное	Фотон
Слабое	Промежуточные векторные бозоны
Гравитационное	Гравитон

§78. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Астрономические объекты распределены в пространстве неравномерно. Их скопление в пределах определенного расстояния друг от друга характеризует ту или иную астрономическую структуру.

Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.

Удобной масштабной единицей, используемой в астрофизике, является средний размер планетной системы (10^{16} м) и одновременно *световой год* — расстояние, проходимое световым лучом за один год ($1 \text{ св.г.} = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ м} \approx 10^{16} \text{ м}$).

В таблице приведены средние размеры основных астрономических структур в порядке возрастания их размера.

Средний размер астрономических структур

Астрономическая структура	Планетная система	Ближайшие звезды	Звездное скопление	Галактика	Скопление галактик	Сверхскопления галактик	Наблюдаемая Вселенная
Средний масштаб (св. лет)	1	10	100	100 000	10 млн	100 млн	14 млрд

На рисунках показано взаимное пространственное (3-D) расположение некоторых астрономических структур во Вселенной по мере удаления от Солнца.

На рисунке ① (см. также стр. 184) показано пространственное расположение 22 ближайших к Солнечной системе звезд. Звезды, расположенные не далее 250 св. лет от Солнца, изображены на рисунке ② (см. также стр. 184).

Солнечная система, находясь в рукаве Ориона на расстоянии $r = 28\,000$ св. лет от центра нашей Галактики — Млечный путь, совершает один оборот вокруг него за период $T = 230$ млн лет ③ (см. также стр. 185). По этим данным можно оценить массу M_G Галактики, примерное число N звезд в ней. Второй закон Ньютона для Солнца массой $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ кг имеет вид:

$$M_\odot = \frac{4\pi^2}{T^2} r = G \frac{M_\odot M_G}{r^2}.$$

Следовательно,

$$M_G = 4\pi^2 \frac{r^3}{GT^2} = 2 \cdot 10^{41} \text{ кг}.$$

Тогда примерное число звезд с массой Солнца в Галактике оказывается порядка

$$N = \frac{M_G}{M_\odot} = 10^{11}.$$

Местная группа галактик, включающая Млечный Путь, насчитывает около сорока ближайших галактик ④ (см. также стр. 185). Внутри местной группы Млечный Путь движется в сторону туманности Андромеды со скоростью 50 км/с.

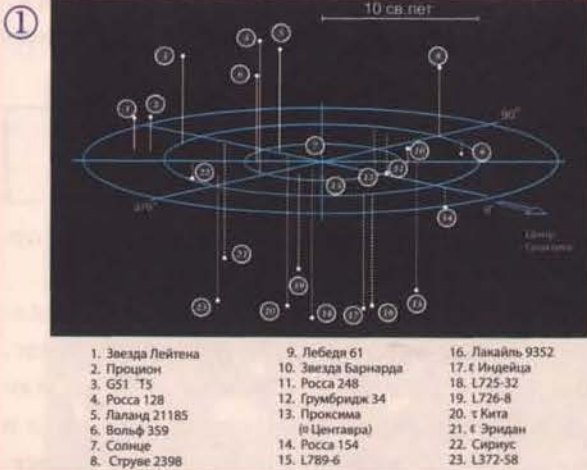
Местная группа входит в состав сверхскопления Девы ⑤ (см. также стр. 185), перемещающегося в направлении ближайшего сверхскопления со скоростью 400 км/с.

Сверхскопления галактик, наиболее отдаленные от сверхскопления Девы, наблюдаются на расстоянии около 14 млрд световых лет ⑥ (см. также стр. 186).

10 св. лет

БЛИЖАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ

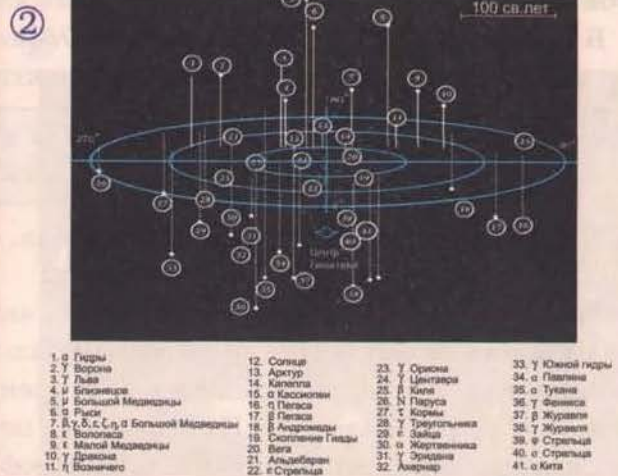
ЗВЕЗДЫ, БЛИЖАЙШИЕ К СОЛНЦУ



100 св. лет

ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ

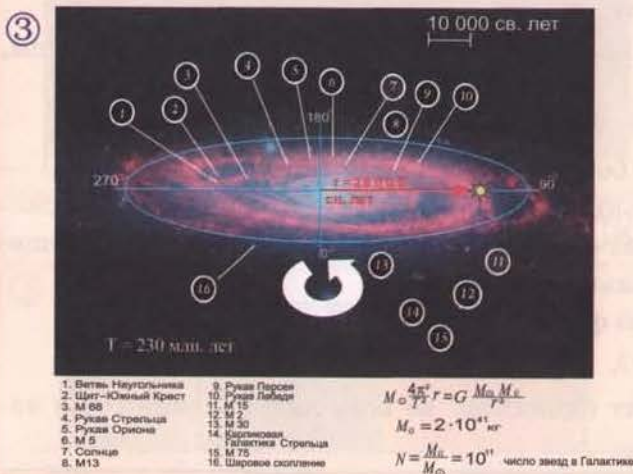
СКОПЛЕНИЕ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ СОЛНЦА



100 000 св. лет

ГАЛАКТИКА

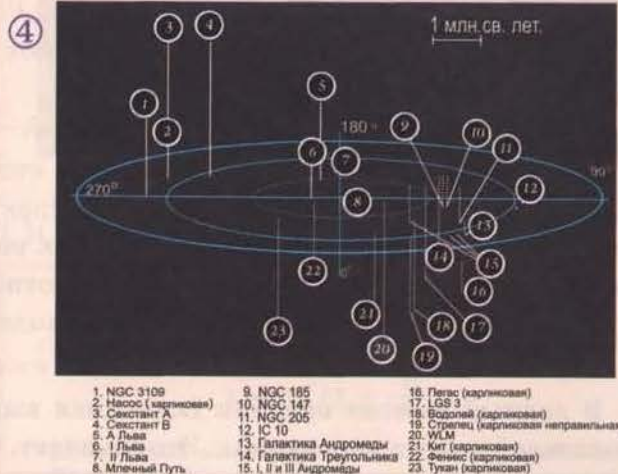
МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ



10 млн. св. лет

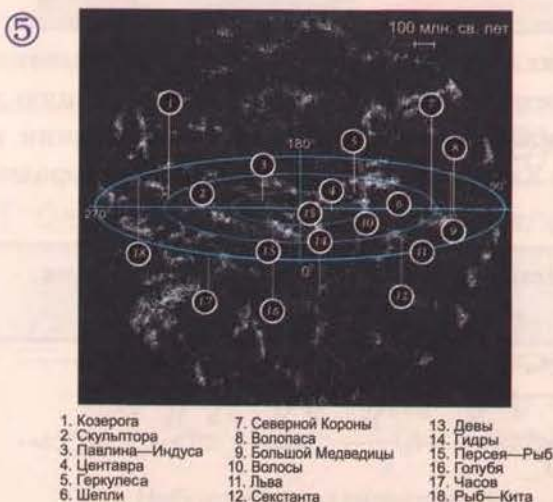
СКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК



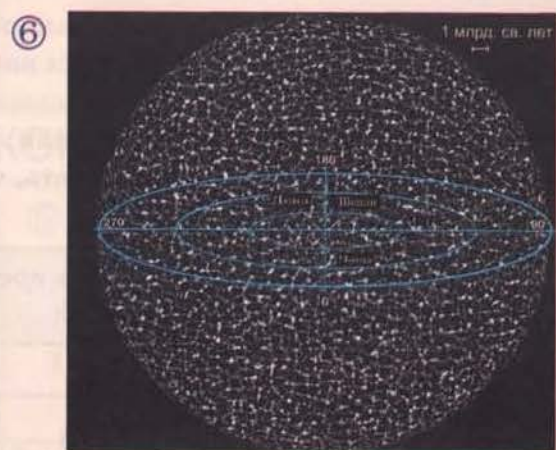
100 млн. св. лет

СВЕРХСКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК



14 млрд. св. лет

НАБЛЮДАЕМАЯ ВСЕЛЕННАЯ



На больших расстояниях Вселенная однородна и изотропна

§79. ЗАКОН ХАББЛА

Астрофизические исследования спектров излучения и поглощения астрономических объектов позволили выяснить их химический состав, плотность, температуру, скорость движения.

В 1929 году американский астроном *Эдвин Хаббл*, изучая с помощью телескопа диаметром 2,5 м характер и скорость движения 18 галактик, получил неожиданный результат.

Галактики разбегаются от Земли и скорость v этого убегания пропорциональна расстоянию r до них ①. $v = H_0 \cdot r$, (1)

где $H_0 = 70$ км/с/Мпк — постоянная Хаббла. (В астрономии расстояние часто измеряют в парсеках (пк) $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. г.} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$).

Закон Хаббла означает, что галактика, находящаяся от Земли на расстоянии 1 Мпк, удаляется от Земли со скоростью 70 км/с. Чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Разбегание галактик, или расширение Вселенной, наблюдается не только с Земли, но и из любой другой точки Вселенной. На рисунке ② показано движение галактик относительно Земли и относительно соседней галактики А. В астрофизике скорость движения источника света измеряется с помощью **эффекта Доплера** ③. При этом длина волны λ_0 спектральной линии излучения неподвижного атома сравнивается с длиной волны λ , воспринимаемой наблюдателем, рассчитываемой по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + v/c) \quad (\text{при } v \ll c) \quad (2)$$

Таким образом длина волны λ оказывается больше длины волны, излучаемой источником, на величину

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 v/c \quad (3)$$

Возникает сдвиг спектра излучения в сторону больших длин волн (в красную область) — «**красное смещение**». Красное смещение спектральных линий возрастает при увеличении скорости движения источника излучения. Как видно из формулы (3) при $v/c \ll 1$ красное смещение пропорционально скорости источника относительно приемника.

Таким образом скорость галактики находится из формулы (3):

$$v = c \cdot \Delta\lambda / \lambda \quad (4)$$

В данный момент времени Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях для наблюдателей во всех галактиках. Это означает, что

на больших масштабах (порядка 1 млрд световых лет) Вселенная однородна и изотропна.

Вселенная однородна, если в произвольных одинаковых объемах содержится равное число галактик. Вселенная изотропна, если в разных направлениях находится одинаковое число галактик.

Если закон Хаббла, т.е. пропорциональность скорости разбегания галактик расстоянию до них, выполняется при наблюдении с Земли, то он также выполняется и при наблюдении из произвольной Галактики ④. Можно сказать, что закон Хаббла является следствием однородности и изотропности Вселенной.

Закон Хаббла позволяет оценить время разлета самых отдаленных Галактик, или время расширения Вселенной ⑤:

$$t = r/v = 1/H_0 = \frac{1}{70 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}} \approx 14 \text{ млрд лет.}$$

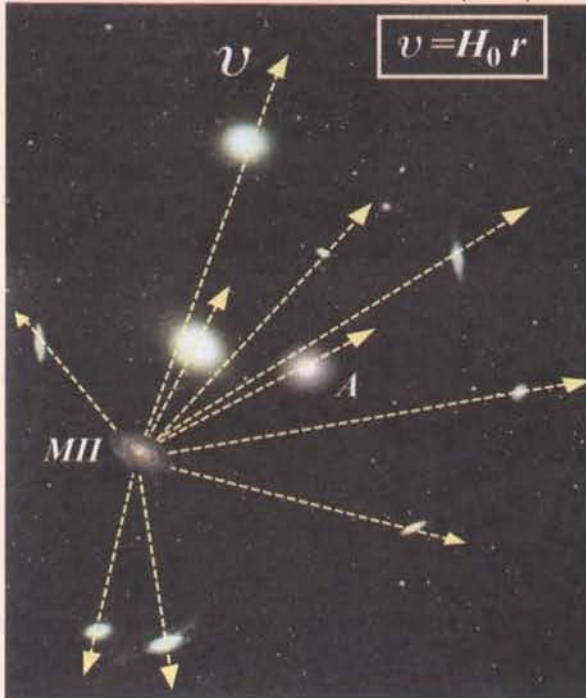
$$= \frac{1}{10^6 \cdot 3,26 \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 14 \text{ млрд лет.}$$

Это время примерно характеризует **возраст Вселенной**.

РАЗБЕГАНИЕ ГАЛАКТИК

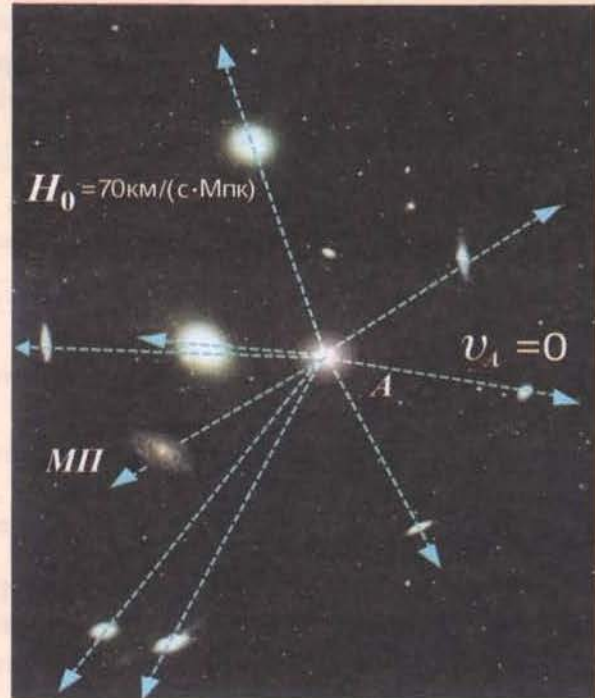
Наблюдение расширения Вселенной из Млечного Пути (МП)

①



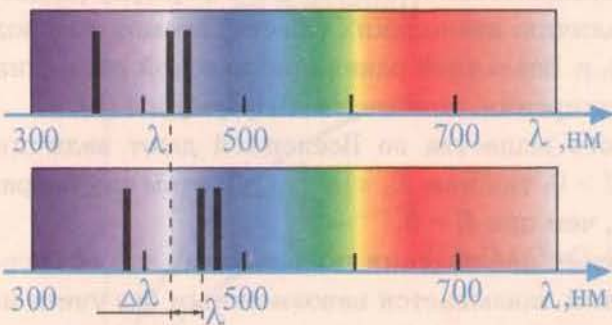
Наблюдение расширения Вселенной из галактики А

②



ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ГАЛАКТИК

③ „Красное смещение” спектральных линий.



Использование эффекта Доплера

При удалении источника света со скоростью v от наблюдателя

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Длина волны λ , воспринимаемая наблюдателем, оказывается больше λ_0 — длины волны, излучаемой источником.

„Красное смещение” $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c}$

Скорость галактики находится из формулы: $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$

СЛЕДСТВИЯ ЗАКОНА ХАББЛА

④ Однородность и изотропность Вселенной



⑤

Возраст Вселенной

Время расширения Вселенной

$$t = \frac{r}{v} = 1/H_0 = \frac{1}{70 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}} = 14 \text{ млрд лет}$$

§80. МОДЕЛЬ ФРИДМАНА

Математическая модель, впервые (до опыта Хаббла) предсказавшая теоретически расширение Вселенной, была предложена в 1922 г. российским ученым **Александром Александровичем Фридманом**.

В модели Фридмана отдельные галактики представляются как пробные материальные частицы, непрерывно распределенные в пространстве. Вселенная рассматривается как совокупность расширяющихся сферических слоев с центром в т. О, где находится наблюдатель ①.

Энергия внешней оболочки массой m_0 , расширяющейся с начальной скоростью v в поле внутреннего шара массой M и радиусом r , была представлена в виде $E_k + E_p = E$:

$$\frac{m_0 v^2}{2} - G \frac{m_0 M}{r} = E \quad (1)$$

где E — полная механическая энергия оболочки (нуль отсчета потенциальной энергии принят на бесконечности).

Характер эволюции Вселенной зависит от величины и знака E ②.

$$1) \text{ При } E = 0 \quad v^2 = 2GM / r \quad (2)$$

$$\text{Подставим } v = r' \text{ в (2):} \quad (r')^2 = 2GM / r \quad (3)$$

Из (3) следует, что радиус Вселенной возрастает с течением времени ③ (кривая 1).

Для однородной и изотропной Вселенной $v = H_0 \cdot r$. Учитывая, что масса M Вселенной связана с ее плотностью ρ ($M = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$), и подставляя v и M в (2), получаем:

$$H_0^2 r^2 = 2G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 / r.$$

$$\text{Тогда} \quad \rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_c \quad (4)$$

где ρ_c — **критическая плотность** Вселенной. Подстановка значений H_0 и G в формулу (4) дает: $\rho_c \approx 10^{-26}$ кг/м³. По величине она соответствует наличию нескольких (шести) атомов водорода в одном кубическом метре. Если реальная плотность ρ Вселенной равна критической ρ_c , полная механическая энергия $E = 0$ и реализуется закон расширения, описываемый формулой (3).

2) Многочисленные оценки плотности видимого вещества во Вселенной дают величину $\rho < 0,1\rho_c$. Если $\rho < \rho_c$, из формулы (1) следует, что $E > 0$, так как $E_k < |E_p|$ ④. В этом случае расширение Вселенной происходит быстрее (кривая 2), чем при $E = 0$.

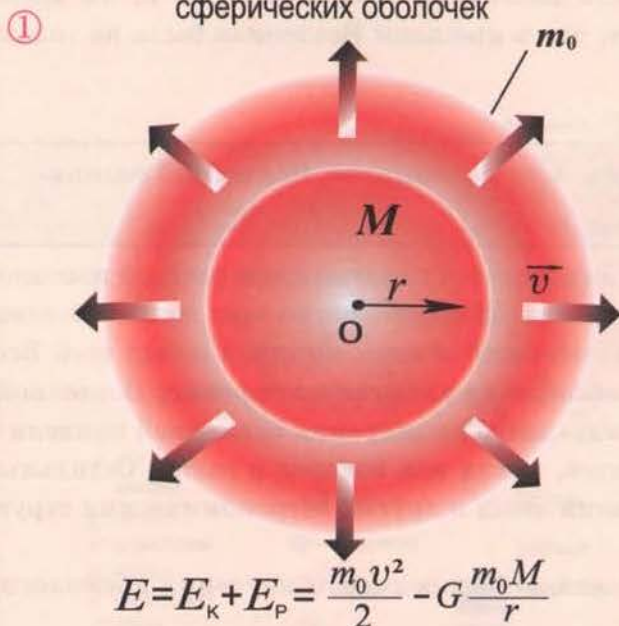
3) Тем не менее многочисленные астрономические наблюдения показывают, что объяснение движения отдельных звезд и звездных скоплений оказывается невозможным без учета наличия дополнительной, невидимой, «скрытой» массы.

Физическая природа скрытой массы (темного вещества) пока однозначно не выяснена. Существуют предположения о барионных объектах на периферии Вселенной, ненаблюдаемых черных дырах, наличии массы покоя у нейтрино. От величины скрытой массы зависит сценарий дальнейшего развития Вселенной.

Если результирующая плотность ρ Вселенной превышает (с учетом скрытой массы) критическую плотность ρ_c , т. е. $\rho > \rho_c$, то кинетическая энергия $E_k < |E_p|$, а $E < 0$. Вселенная расширяется до некоторого максимального радиуса, примерно вдвое большего, чем наблюдается теперь, а затем сжимается до первоначального состояния (кривая 3).

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Вселенная как совокупность расширяющихся сферических оболочек



Характер расширения Вселенной зависит от величины и знака E

КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

При $E = 0$

$$v^2 = \frac{2GM}{r}$$

Для однородной и изотропной Вселенной
 $v = H_0 r$ (закон Хаббла)

$$M = \rho_c \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$$

Тогда

$$H_0^2 r^2 = \frac{2G \rho_c \cdot \frac{4}{3} \pi r^3}{r}$$

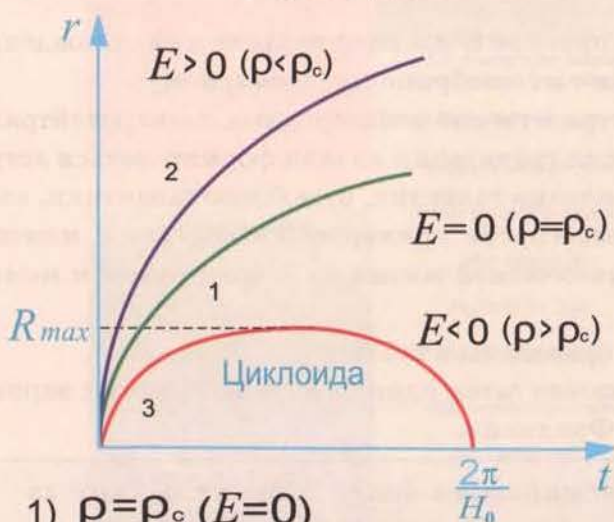
Критическая плотность Вселенной

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \simeq 10^{-26} \text{ кг/м}^3$$

соответствует нескольким атомам водорода в 1 м^3

ЗАВИСИМОСТЬ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ ОТ ЕЕ РЕАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

③ Изменение радиуса Вселенной со временем



1) $\rho = \rho_c$ ($E=0$)

— открытое плоское пространство

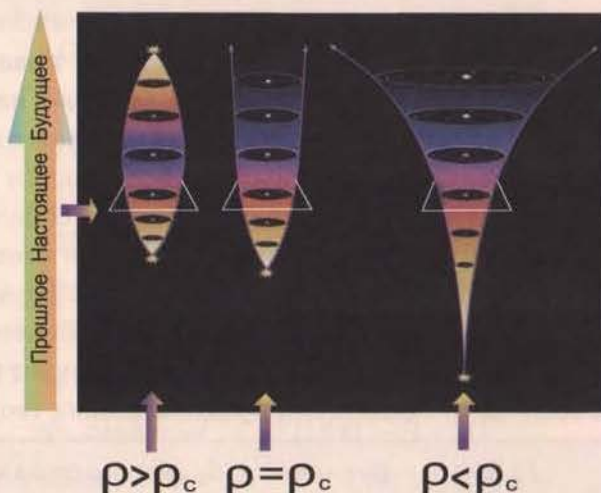
2) $\rho < \rho_c$ ($E>0$)

— открытое гиперболическое пространство

3) $\rho > \rho_c$ ($E<0$)

— замкнутое, конечное, сферическое пространство

④ Варианты эволюции Вселенной



Расширение Вселенной при различных возможных плотностях

§81. ПЕРИОДЫ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

Разлет галактик, подтверждаемый экспериментально законом Хаббла, означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. В то же время расширение приводит к охлаждению. Это означает, что в прошлом Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем теперь.

В конце 40-х годов XX века

русский физик Георгий Гамов предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого Взрыва ①.

Согласно приведенным выше оценкам возраста Вселенной и наблюдениям распада изотопов Большого Взрыв произошел около 14 млрд лет тому назад одновременно во всех точках Вселенной. Если Вселенная конечна, Взрыв произошел в точечном объеме, который и был всей Вселенной. Ничего больше не существовало. По мере расширения увеличивался размер Вселенной.

Огромные температуры во время взрыва и последующего расширения Вселенной привели к термоядерному синтезу легких химических элементов, таких как водород и гелий. Остальные элементы были синтезированы в процессе образования звезд и других астрономических структур.

Особенности эволюции объектов во Вселенной являются предметом изучения космологии (от греческого *κοσμολογία* — изучение мира).

Космология — теоретическая астрофизика мегамишталов.

Современная космология выделяет несколько характерных периодов эволюции Вселенной. Однако укрупненно принято считать, что таких важнейших периодов было три ②.

- I. В период ранней Вселенной (спустя 2–3 минуты от Большого Взрыва) образовались элементарные частицы вещества в плазменном состоянии, из которых практически состоит Вселенная и в настоящее время: протоны, нейтроны, электроны, нейтрино, переносчики взаимодействий, α -частицы.
- II. На протяжении следующих 350 тысяч лет расширение Вселенной привело к ее охлаждению и изменению состояния вещества от плазменного к газообразному (атомарному).
- III. В течение следующего миллиарда лет из пространственно неоднородных электронейтральных облаков водорода и гелия под действием сил гравитации начали формироваться астрономические структуры: сверхскопления и скопления галактик, отдельные галактики, звезды, планеты. Солнечная система образовалась спустя примерно 9 млрд лет с момента Большого Взрыва. Наиболее ранние следы органической жизни на Земле относят к моменту времени 10 млрд лет от Большого Взрыва.

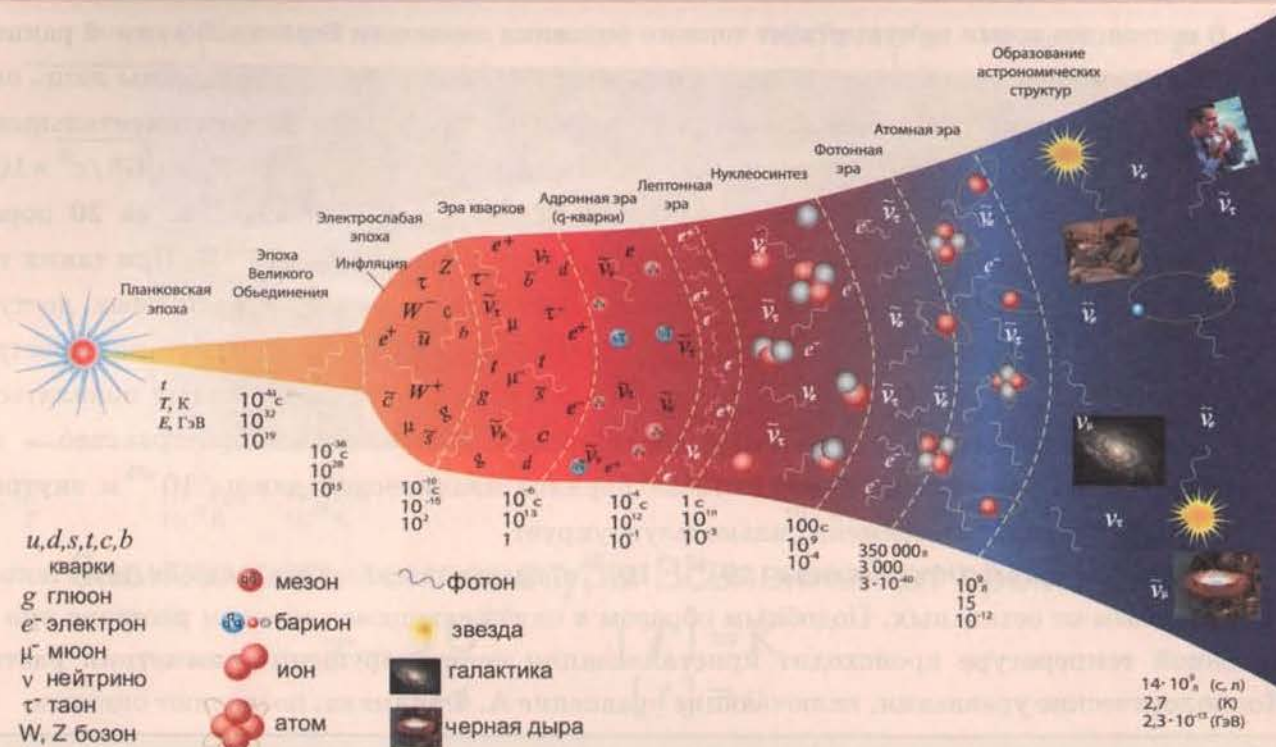
Более детально периоды эволюции Вселенной приведены в таблице.

Можно примерно предвидеть, как будет реализован затем один из двух возможных вариантов эволюции Вселенной, предсказанных теорией Фридмана.

1) $\rho \leq \rho_c$. Вселенная будет постоянно расширяться далее, и безжизненные галактики продолжат путешествие в замерзшей темноте к концу времени.

2) $\rho > \rho_c$. Вселенная прекратит расширяться, коллапсирует и погибнет в состоянии, подобном началу Большого Взрыва, в котором время теряет его последовательную определенность.

① БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ. РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ



§82. РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ

В настоящее время не существует точного описания эволюции Вселенной в самой ранней фазе — *Планковской эпохе*, начинающейся в момент Большого Взрыва. Возможны лишь оценки характерных параметров с помощью метода размерностей, используя фундаментальные константы G , $\hbar$, c . Минимальный размер Вселенной (планковский радиус) $R_P = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 10^{-35}$ м, в конце Планковской эпохи в момент времени $t_P = R_P/c = \sqrt{G\hbar/c^5} \approx 10^{-43}$ с, на 20 порядков меньше размера протона. Температура Вселенной в этот момент $T_P \approx 10^{32}$ К. При таких температурах все фундаментальные взаимодействия были неразличимы ①. В масштабах, доступных современной физике, порядка 10^{-18} м (радиус действия слабого взаимодействия) пространство — время является гладким ②. На расстояниях порядка 10^{-32} м начинают появляться начальные флуктуации. На плоскости, изображающей четырехмерное пространство — время возникает заметный рельеф. На масштабах порядка планковской длины 10^{-35} м внутренняя структура пространства-времени сильно флуктуирует.

В эпоху Великого Объединения ($10^{-43} - 10^{-36}$ с) гравитационное взаимодействие становится независимым от остальных. Подобным образом в охлаждающемся солевом растворе при определенной температуре происходит кристаллизация соли (нарушение симметрии раствора). Космологические уравнения, включающие уравнение А. Фридмана, позволяют оценить

зависимость температуры T (в К) Вселенной от времени t (в с):

$$T = 10^{10} / \sqrt{t}. \quad (1)$$

В инфляционную фазу ($10^{-36} - 10^{-34}$ с) сильное взаимодействие отделилось от электрослабого (электромагнитного и слабого) ③. Выделение энергии при таком фазовом переходе привело к резкому экспоненциальному росту масштаба Вселенной. Благодаря инфляции истинный размер Вселенной оказывается в миллион раз больше, чем ее видимый размер порядка 14 млрд световых лет.

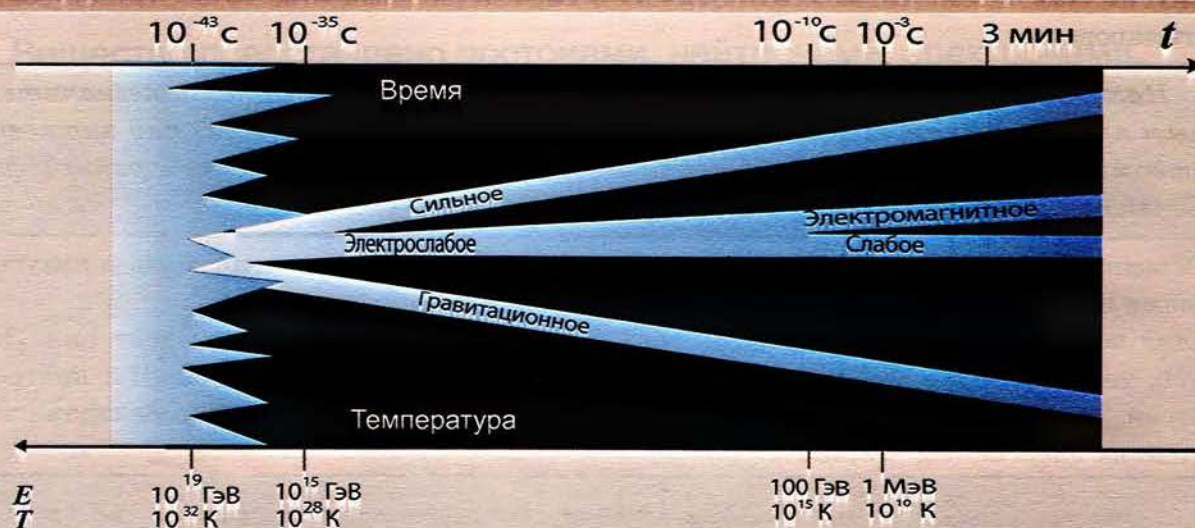
В электрослабую эпоху ($10^{-34} - 10^{-10}$ с) разделяются электромагнитное и слабое взаимодействия. При температурах, больших критической $T_c \approx 3 \cdot 10^{15}$ К ≈ 200 ГэВ, взаимодействия подобны друг другу (симметричны) и подчиняются закону Кулона.

В эру кварков ($10^{-10} - 10^{-6}$ с) Вселенную заполняет смесь кварков — антикварков, лептонов и антилептонов, частиц — переносчиков взаимодействий.

В адронную эру ($10^{-6} - 10^{-4}$ с) свободные кварки объединяются в мезоны или барионы в диапазоне температур 10^{13} К — 10^{12} К (см. формулу (1) ④). Ввиду того, что Вселенная, расширяясь, продолжала охлаждаться, адроны (барионы и мезоны) не могли распасться на кварки в результате обратного процесса.

В конце лептонной эры ($10^{-4} - 1$ с) температура охлаждающейся Вселенной оказывается недостаточной для рождения пары электрон-позитрон, так как энергия кванта теплового излучения kT оказывается меньше, чем энергия покоя рожденных частиц $kT < m_e c^2$ ⑤. Поэтому как соответствующая пара частица-античастица, так и антивещество, исчезает в результате реакций аннигиляции.

① РАЗДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

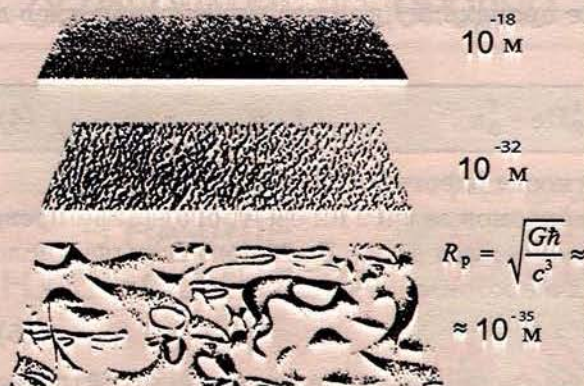


Зависимость температуры Вселенной от времени:

$$T = \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}, \quad [T] = \text{K}, \quad [t] = \text{с}$$

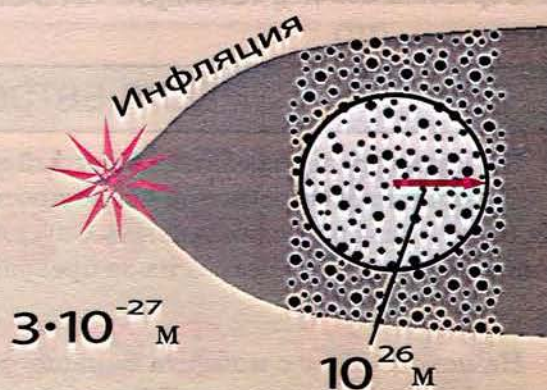
② ПЛАНКОВСКАЯ ЭПОХА ($t < 10^{-43}$ с)

Квантовый вакуум пространства-времени на разных масштабах



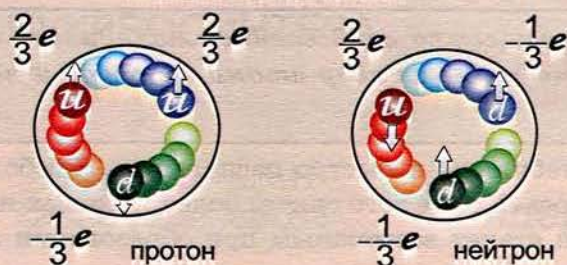
③ ИНФЛЯЦИОННАЯ ФАЗА ($10^{-36} - 10^{-34}$ с)

Истинные размеры Вселенной превышают видимый горизонт 10^{26} м

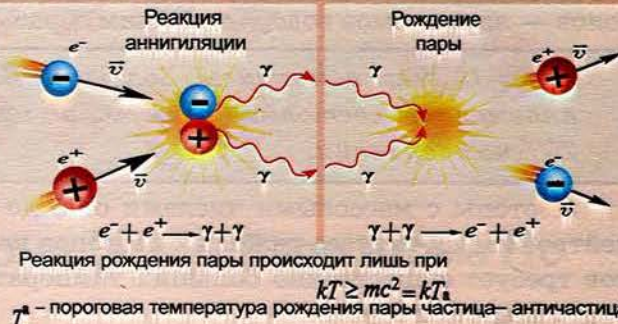


④ АДРОННАЯ ЭРА ($10^{-6} - 10^{-4}$ с)

Кварковая структура нуклонов



⑤ ЛЕПТОННАЯ ЭРА ($10^{-4} - 1$ с)



§83. ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Спустя чуть более 1 с с момента Большого Взрыва антивещество во Вселенной полностью аннигилировало.

Наличие вещества в современном мире можно объяснить лишь незначительным преобладанием вещества (протонов, нейтронов, электронов) над антивеществом (антипротонами, антинейтронами, позитронами) в самой ранней фазе Большого Взрыва.

Вещество осталось представленным протонами, нейтронами, электронами, а излучение — фотонами и нейтрино.

Стад возможен **нуклеосинтез**, т.е. образование более сложных ядер: дейтерия ${}^2_1\text{H}$, трития ${}^3_1\text{H}$, гелия ${}^4_2\text{He}$ ①. Нуклеосинтез начинается с объединения протона ${}^1_1\text{H}$ и нейтрона ${}^1_0\text{n}$ в дейтрон — ядро дейтерия ${}^2_1\text{H}$, сопровождающимся испусканием кванта γ электромагнитного излучения с энергией $E_\gamma = 2,22$ МэВ (I).

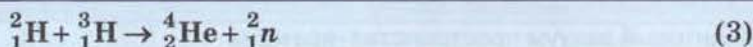


При обратной реакции, если энергия кванта E_γ оказывается больше 2,22 МэВ, дейтрон под действием излучения распадается на протон и нейтрон:



В этот момент времени из-за охлаждения Вселенной энергия фотонов оказывается недостаточной для диссоциации (2) дейтрона.

Второй этап процесса — взаимодействие двух дейтронов ${}^2_1\text{H}$ с образованием трития ${}^3_1\text{H}$ и протона ${}^1_1\text{H}$ с выделением энергии 4,03 МэВ (II).



Образование ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ на третьем этапе происходит при взаимодействии ядер дейтерия и трития (III).



В результате этой реакции быстрый нейтрон уносит энергию 17,59 МэВ.

До начала нуклеосинтеза число протонов и нейтронов за счет их быстрого взаимопревращения было примерно одинаковым. Спустя несколько секунд после Большого Взрыва число нейтронов начало уменьшаться из-за превращения их в протоны:



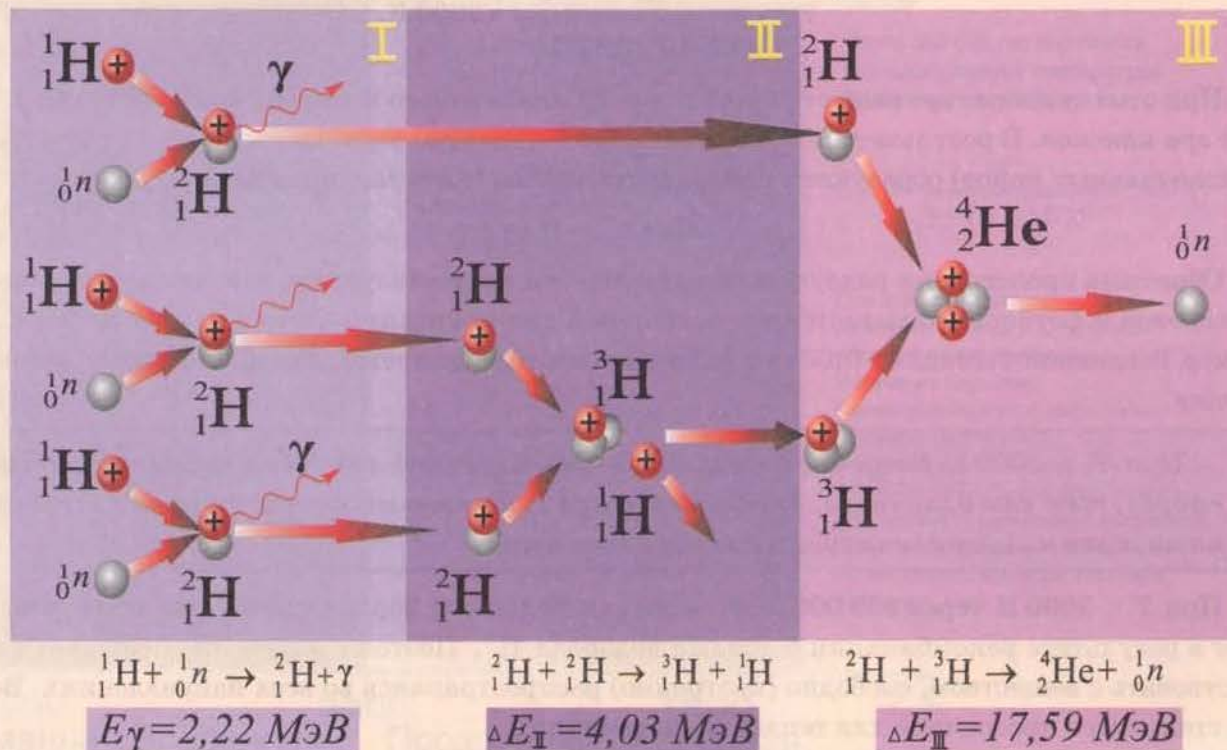
На исходе 225 с с момента Большого Взрыва соотношение числа протонов и нейтронов оказалось 7:1 ②. Например, на 14 протонов приходилось в среднем два нейтрона. Такое соотношение привело к образованию первичного газа, состоящего из водорода и гелия. При синтезе ядер гелия (α -частиц) два нейтрона объединялись с двумя протонами. Свободными остались 12 протонов — ядра атомов водорода. Таким образом,

через 15 мин с момента Большого Взрыва вещество во Вселенной находилось в плазменном состоянии и состояло на 75% по массе из ядер атома водорода и на 25% из ядер гелия.

Изотопы с массовыми числами от 5 до 8 нестабильны и быстро распадались. Свободных нейтронов для синтеза тяжелых изотопов не осталось. Кроме того синтез более тяжелых изотопов требует существенно больших температур. Он станет возможным при образовании звезд миллиарды лет спустя.

① НУКЛЕОСИНТЕЗ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ (1-100 с)

Вещество представлено протонами, нейтронами, электронами, а излучение – фотонами и нейтрино



② ОБРАЗОВАНИЕ ВОДОРОДНО-ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ (100 с – 15 мин)

$$N_p : N_n = 7:1$$

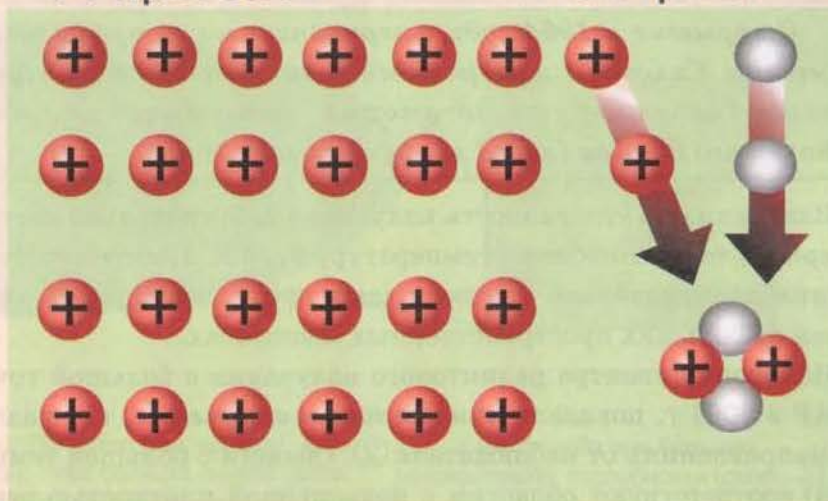
В НАЧАЛЕ
НУКЛЕОСИНТЕЗА

В КОНЦЕ
НУКЛЕОСИНТЕЗА

Состав плазмы

14 протонов

2 нейтрона



12 ядер атома H

Ядро атома He

75% по массе – ядра H
25% по массе – ядра He

§84. РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Температура вещества Вселенной, существовавшего в виде водородно-гелиевой плазмы, через 350 000 лет из-за ее расширения оказывается порядка ①:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{3,5 \cdot 10^5 \cdot 3,15 \cdot 10^7}} \approx 3000 \text{ К.}$$

При этой температуре вещество переходит из плазменного в газообразное состояние: наступает *эра атомов*. В результате рекомбинации (объединения) заряженных частиц (электронов и положительных ионов) образуются нейтральные атомы (с испусканием фотона γ):



Обратные процессы их разрушения практически не реализуются, так как средняя энергия электронов и фотонов оказывается недостаточной для ионизации атомов. В этот момент, когда размер Вселенной составлял 0,001 ее размера в настоящее время, Вселенная изменилась даже внешне.

При $T > 3000 \text{ К}$ Вселенная выглядела непрозрачной (подобно туманной атмосфере), так как излучение, взаимодействуя с заряженными частицами (электронами, ионами), отклонялось и поглощалось ими.

При $T < 3000 \text{ К}$ через 350 000 лет с момента Большого Взрыва свободные электроны исчезают в результате рекомбинации с ионами водорода H^+ . Поэтому излучение перестает взаимодействовать с веществом, свободно (изотропно) распространяясь во всех направлениях. Вселенная становится прозрачной для теплового излучения.

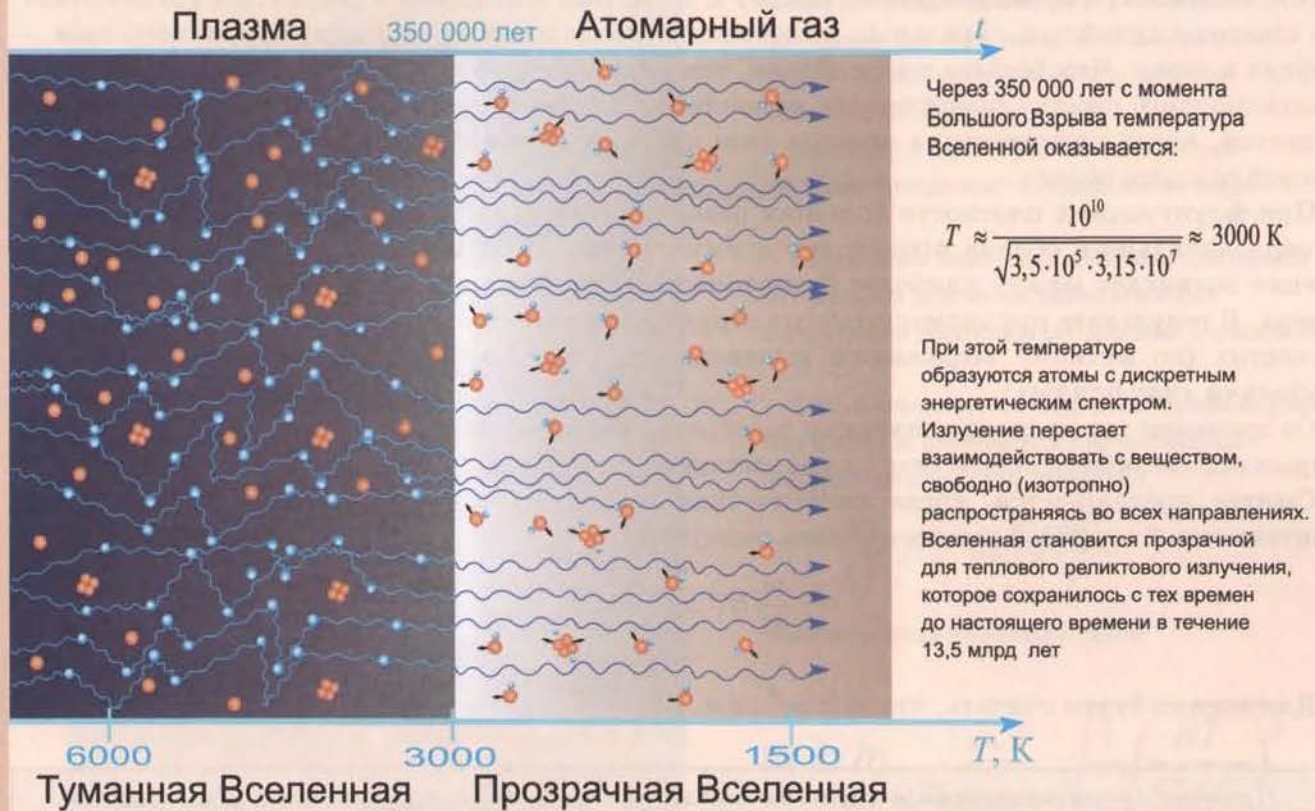
Модель Большого Взрыва, предложенная в 1948 году *Георгием Гамовым*, предсказывала, что это тепловое излучение сохранилось с тех времен до настоящего времени в течение 14 млрд лет. Поэтому часто такое излучение называют *реликтовым*. Вследствие расширения Вселенной температура реликтового излучения должна была уменьшиться примерно в 1000 раз, т.е. быть порядка 3 К. Длина волны 1 мм, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения при такой температуре, находится в СВЧ-диапазоне.

Открытие в 1964 году американскими астрофизиками Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном изотропного реликтового СВЧ-излучения, приходящего извне в нашу Галактику, стало вторым экспериментальным подтверждением модели Большого Взрыва (вслед за эффектом Хаббла).

Измеренная интенсивность излучения действительно соответствовала излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру 2,73 К. Изотропность и однородность реликтового излучения дополнительно подтверждают предположения об однородности и изотропности Вселенной на больших пространственных масштабах.

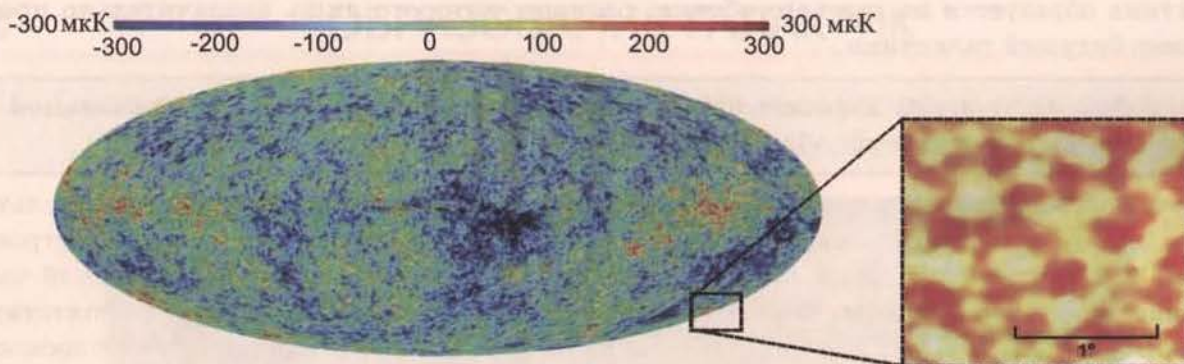
Измерения спектра реликтового излучения с большой точностью космическим аппаратом WMAP в 2001 г. показали *анизотропию излучения*, т.е. различие его температуры в различных направлениях от наблюдателя ②. Области с большей температурой (большей энергией фотонов) соответствуют областям с повышенной плотностью вещества в ранней Вселенной. Подобные уплотнения первичного газа (водорода и гелия), соизмеримые с размерами сверхскоплений галактик, подтверждают гипотезу об образовании астрономических структур во Вселенной.

① ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



② АНИЗОТРОПИЯ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Тепловое реликтовое излучение в диапазоне длин волн 3 – 14 мм, зафиксированное WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) – космическим аппаратом, запущенным в 2001 г.



Области красного цвета имеют большую температуру (а вещество – большую плотность), чем области синего цвета.

Пространственные масштабы флуктуаций плотности вещества оказываются порядка размера сверхскоплений галактик, т. е. около 100 млн св. лет.

Участок неба при большей разрешающей способности (около 7')

§85. ОБРАЗОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В течение миллиарда лет с момента Большого Взрыва формировались условия для образования первоначальных астрономических структур (сверхскоплений галактик, скоплений галактик, галактик) и объектов (звезд, планет и т.д.). Они возникали в результате гравитационного сжатия случайных локальных уплотнений (неоднородных облаков) первичного газа — водорода и гелия. Чем больше масса облака, тем сильнее его гравитационное сжатие. Процессу гравитационного сжатия препятствует возрастание давления газа внутри облака. Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа сравнивается с потенциальной гравитационной энергией газового облака.

При флуктуациях плотности больших размеров (порядка сверхскопления галактик) сжатие первоначального облака происходит асимметрично ①. Наибольшее гравитационное притяжение возникает между наиболее близкими частями облака в направлении минимального размера. В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определенных плоскостях (по меткому выражению выдающегося российского физика **Якова Борисовича Зельдовича** «как блины»).

Со временем такая среда неизбежно разобьется на отдельные фрагменты (облака), размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации.

Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа сравнивается с потенциальной гравитационной энергией газового облака радиусом r :

$$\frac{m}{M}RT \simeq G \frac{m^2}{r}.$$

Для оценки будем считать, что $m \simeq \rho r^3$, т.е. $r = \left(\frac{m}{\rho}\right)^{1/3}$, $M = M_H = 10^{-3}$ кг/моль.

Процесс гравитационного сжатия облака начинается только, если его масса m оказывается больше некоторой минимальной массы Джинса m_d , названной

в честь английского астрофизика Джеймса Джинса: $m \geq m_d \simeq \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{RT}{GM_H} \right)^3}$.

Галактика образуется из газового облака, размеры которого лишь незначительно превышают размер будущей галактики.

Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы ②.

В отсутствие начального вращения гравитация равномерно сжимает облако. В результате образуется эллиптическая галактика с сильной концентрацией звезд к центру. В быстровращающемся облаке гравитационное сжатие также приводит к образованию сферической части (гало) в виде звезд первого поколения. Однако концентрации вещества в центре препятствуют центробежные силы инерции. В результате газ концентрируется в галактической плоскости, перпендикулярной оси вращения. Образуется спиральная галактика. **Спиральные галактики**, к которым относится наша Галактика — Млечный путь, составляют 70% всех галактик, **эллиптические** — примерно 25%. Остальные 5% галактик составляют так называемые **неправильные галактики**.

Чем больше начальная масса галактики, тем больше гравитационное сжатие, тем быстрее образуется галактика.

При последующем сжатии облака образуются первые звезды.

① ОБРАЗОВАНИЕ СВЕРХСКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Сжатие неоднородного облака водорода и гелия



Гравитационное сжатие первоначального облака происходит асимметрично. Наибольшее притяжение возникает между наиболее близкими частями облака, расстояния между которыми постоянно уменьшаются.

В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определенных плоскостях.

Со временем такая среда неизбежно разбивается на отдельные фрагменты, размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации.

Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа массой m сравнивается с потенциальной энергией газового облака радиусом r

$$\frac{m}{M} RT \simeq G \frac{m^2}{r}$$

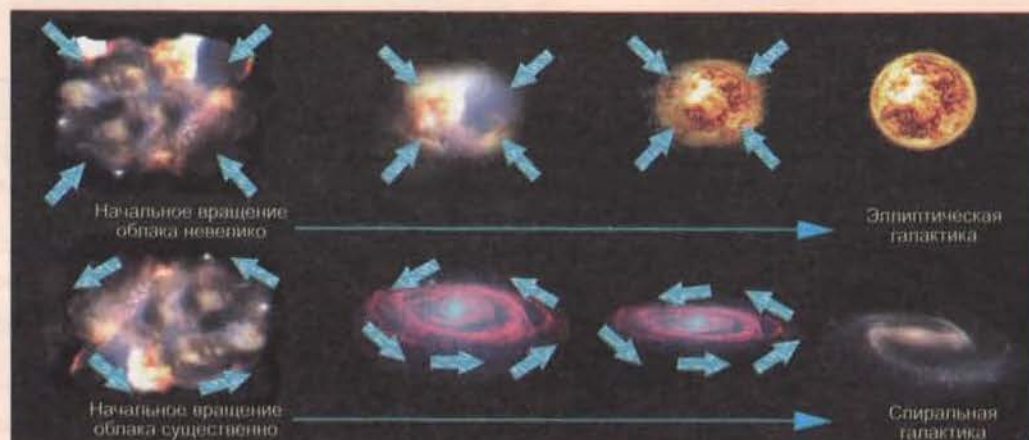
Сжатие облака начинается, если

$$m \geq m_{\text{Дж}} \simeq \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{RT}{G M_H} \right)^3},$$

где $M_H = 10^{-3}$ кг/моль

② ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК

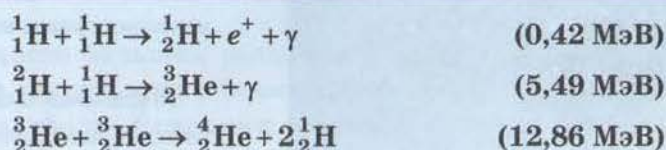
Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы



§86. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

При температуре порядка 12–15 млн К, до которой нагревается облако водородной плазмы при его гравитационном сжатии, становятся возможными реакции термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода — протонов.

Наиболее вероятной цепочкой реакций с превращением четырех протонов в одно ядро гелия является **протон-протонный цикл**, предложенный немецким физиком **Хансом Бете** в 1939 г. ①.



В скобках показана энергия, выделяющаяся в результате реакции.

Первая реакция — образование дейтрона ${}^2_1\text{H}$ при столкновении двух протонов (I) проходит с очень малой вероятностью: каждый протон вступает в эту реакцию в среднем за 10 млрд лет. Однако благодаря огромному числу протонов $N_p = m / m_p$ «узкое место» цикла преодолевается (для Солнца $N_{p\odot} = M_{\odot} / m_p = 10^{57}$).

Вторая (II) и третья (III) реакции протекают значительно быстрее: за время 10 с и 10^6 лет.

Вводя стехиометрический коэффициент 2 для первых двух реакций и суммируя левые и правые части протон-протонного цикла, получаем



Оценим энергию, выделяющуюся в результате протон-протонного цикла ②:

$$(2 \cdot 0,4 + 2 \cdot 5,49 + 12,86) \text{ МэВ} = 24,7 \text{ МэВ}.$$

Каждый из двух позитронов быстро аннигилирует с электроном с выделением энергии $2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$. Таким образом при реакции (1) выделяется энергия

$$E_{pp} = (24,7 + 2 \cdot 1,02) \text{ МэВ} = 26,7 \text{ МэВ}.$$

Тогда полная термоядерная энергия $E_{\text{тя}}$, которая может выделиться на Солнце в результате синтеза ядер гелия из четырех ядер водорода, равна

$$E_{\text{тя}} = \frac{1}{4} N_{p\odot} \cdot E_{pp} = \frac{1}{4} \cdot 10^{57} \cdot 26,7 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx 10^{44} \text{ Дж}.$$

Время, за которое будет израсходована термоядерная энергия Солнца:

$$\tau_{\text{тя}} = E_{\text{тя}} / P_{\text{изл}} = 10^{44} / (4 \cdot 10^{26} \cdot 3,16 \cdot 10^7) \approx 10 \text{ млрд лет}.$$

Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звезд ③.

От массы звезды существенно зависит срок ее существования, а также конечный результат ее эволюции.

Чем больше масса звезды, тем сильнее и быстрее ее гравитационное сжатие, большая энергия выделяется в единицу времени, выше температура в центре, интенсивнее идет термоядерный синтез, в процессе которого образуются более тяжелые химические элементы ④.

Температура внутри звезды убывает по мере удаления от ее центра. Поэтому на разной глубине одновременно проходят различные ядерные реакции синтеза и образуются слои, состоящие из химических элементов, последовательно выгоравших в звезде.

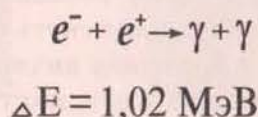
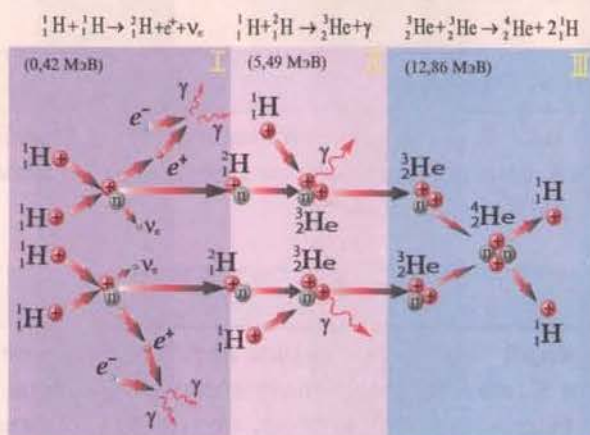
Взрыв сверхновых изменяет состав первичного газа, состоявшего на 75% по массе из водорода и на 25% из гелия, добавляя в него тяжелые элементы. Всего девять химических элементов составляет 99,6% вещества во Вселенной.

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

ПРОТОН-ПРОТОННЫЙ ЦИКЛ

①

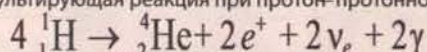
Ханс Бете, 1939 г.



ВРЕМЯ СВЕЧЕНИЯ СОЛНЦА

②

Энергия, выделяющаяся при свечении Солнца
Результирующая реакция при протон-протонном цикле



Энергия, выделяющаяся в результате протон-протонного цикла:

$$E_{pp} = (2 \cdot 0,42 + 2 \cdot 5,49 + 12,86) \text{ МэВ} = 24,7 \text{ МэВ}$$

При аннигиляции двух позитронов выделяется дополнительная энергия

$$2m_e c^2 = 1,02 \text{ МэВ, т.е.}$$

$$E_{pp} = (24,7 + 2 \cdot 1,02) \text{ МэВ} = 26,7 \text{ МэВ}$$

Число протонов $N_{p\odot}$ на Солнце

$$N_{p\odot} = \frac{M_{\odot}}{m_p} = \frac{2 \cdot 10^{30}}{1,6 \cdot 10^{-27}} \approx 10^{57}$$

Полная термоядерная энергия $E_{\text{тj}}$, которая может выделяться на Солнце в результате синтеза ядра гелия из четырех ядер водорода

$$E_{\text{тj}} = \frac{1}{4} N_{p\odot} \cdot E_{pp} \approx 10^{44} \text{ Дж}$$

Время, за которое будет израсходована термоядерная энергия при мощности излучения $P_{\text{изл}}$

$$\tau_{\text{тj}} = \frac{E_{\text{тj}}}{P_{\text{изл}}} = \frac{10^{44}}{4 \cdot 10^{26} \cdot 3,16 \cdot 10^7} \approx 10 \text{ млрд. лет}$$

Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звезд

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

③

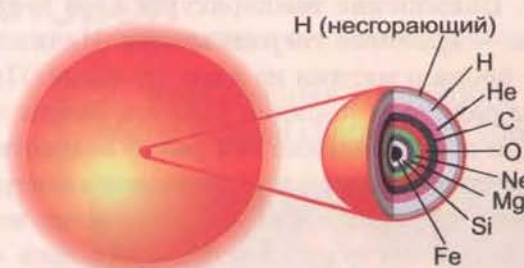
Минимальная начальная масса звезды, $M_{\odot}$	Термоядерная реакция в ядре звезды	Последний синтезируемый химический элемент	Минимальная температура синтеза, млн. К
0,1	$4 {}^1_1\text{H} \rightarrow$	${}^4_2\text{He}$	10
2	$3 {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow$	${}^{12}_6\text{C}$	100
4	$2 {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} +$	${}^{24}_{12}\text{Mg}$	600
5	$2 {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} +$	${}^{32}_{16}\text{S}$	740
8	$2 {}^{20}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} +$	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	1500
15	$2 {}^{28}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{56}_{28}\text{Fe} +$	${}^{56}_{28}\text{Fe}$	4000
20	${}^{56}_{26}\text{Fe} + \gamma \rightarrow$	$13 {}^4_2\text{He} + 4 {}^1_0\text{n}$	6000

Чем больше минимальная начальная масса звезды, тем тяжелее последний синтезируемый химический элемент в звезде

СИНТЕЗ ТЯЖЕЛЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

④

Ядро предсверхновой звезды



Процентный состав химических элементов примерно такой же, как на Земле

Процентное содержание основных химических элементов межзвездного вещества

Химический элемент	H	He	O	C	Ne	N	Fe	Mg	Si
Процентное содержание	70%	28%	0,7%	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,05%	0,05%

§87. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД РАЗЛИЧНОЙ МАССЫ

От массы звезды зависит срок ее существования и конечный результат эволюции.

Чем больше масса звезды, тем быстрее ее гравитационное сжатие, выше температура в центре, интенсивнее термоядерный синтез, в процессе которого образуются более тяжелые химические элементы.

Рассмотрим последовательно эволюцию звезд различных масс ①.

Если масса звезды

$$m < 0,08 M_{\odot} \quad (M_{\odot} — \text{масса Солнца}),$$

температура в центре протозвезды будет меньше 10 млн К — пороговой температуры, необходимой для начала термоядерного протон-протонного цикла. Такая протозвезда, называемая **коричневым карликом**, излучает преимущественно в ИК диапазоне.

Если

$$m \approx M_{\odot},$$

водород в центре звезды полностью превращается в гелий через миллиарды лет. Когда температура при сжатии гелиевого ядра возрастет до 100 млн К, из гелия начинает синтезироваться углерод. Силы гравитации сжимают углерод до такой высокой температуры, что звезда начинает расширяться и излучать красный свет из-за охлаждения ее поверхности. Внешняя поверхность звезды (например, Солнца), называемой **красным гигантом**, может достигнуть орбиты Земли. Ядро звезды сжимается так, что электронные оболочки соседних атомов начинают перекрываться. Звезда становится **белым карликом**, остывающим миллиарды лет, излучая энергию в 1000 раз меньшую, чем Солнце.

Если

$$m \approx 10 M_{\odot},$$

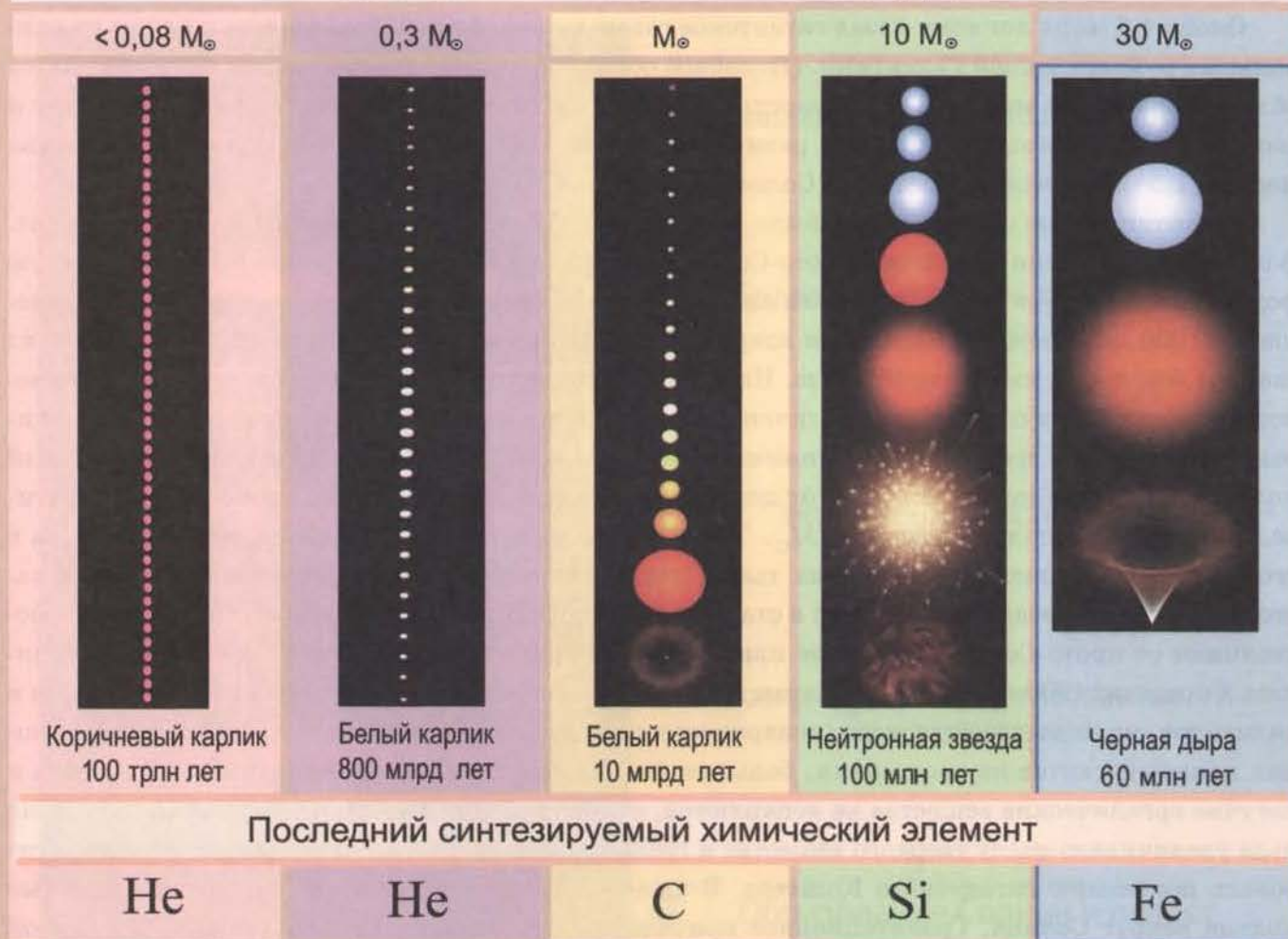
водород за 10 млн лет синтезируется в гелий, а температура и давление в центре звезды уменьшается. Затем звезда в течение нескольких десятков тысяч лет сжимается гравитацией. При температуре свыше 100 млн К начинаются реакции синтеза ядер углерода и кислорода из ядер гелия. Повышение температуры ядра ведет к разогреванию и расширению внешней оболочки звезды — **красного сверхгиганта**. Начинается синтез ядер более тяжелых химических элементов — неона и магния из ядер углерода. При синтезе ядер кислорода образуется кремний. Ядро звезды радиусом порядка радиуса Земли за доли секунды сжимается в шар радиусом около 10 км. При этом давление так резко возрастает, что электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны с испусканием электронного нейтрино. Такую звезду называют **нейтронной звездой**. После сжатия возникает волна расширения сжатого шара ядерного вещества. Происходит гигантский взрыв-вспышка **сверхновой** звезды ②. Сверхновая 1054 г. оставила нейтронную звезду массой около $2,5 M_{\odot}$ и крабовидную туманность ③.

Если

$$m \approx 30 M_{\odot}$$

термоядерные реакции, характерные для звезды массой $10 M_{\odot}$, в начальной фазе эволюции протекают ускоренно. Однако избыток массы приводит к сжатию кремниевого ядра и повышению его температуры до 4 млрд К, при которой ядра кремния синтезируются в ядро железа — самое тяжелое ядро, синтез которого происходит с выделением энергии. Не выдерживая огромного гравитационного давления, железное ядро быстро коллапсирует. В результате на месте взорвавшейся сверхновой остается **черная дыра**. Взрыв сопровождается мощным потоком нейтронов из железного ядра. Присоединение нейтронов к ядрам приводит к образованию тяжелых химических элементов, рассеянных во Вселенной взрывами сверхновых. Именно поэтому такие элементы входят в состав Земли.

① НАЧАЛЬНАЯ МАССА ЗВЕЗДЫ



ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

② Вспышка сверхновой
Ударная волна

Нейтронная звезда

Расширяющаяся газовая оболочка

Масса нейтронной звезды после взрыва сверхновой 1054 г. составила $2,5 M_{\odot}$

③ Крабовидная туманность
после взрыва сверхновой 1054 г.



При вспышках сверхновых во Вселенной образовались практически все атомы химических элементов, более тяжелых, чем гелий

§88. ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Около 4,6 млрд лет тому назад гигантское газопылевое облако образовалось в одном из спиральных рукавов нашей Галактики. (Подобное облако наблюдается в созвездии Ориона). Масса облака примерно в миллион раз превосходила массу Солнца, имело нерегулярную структуру и состояло из ряда неоднородных по размеру областей. Одна из областей уплотнения вещества массой $(1,5-2) M_{\odot}$ могла образовать Солнечную систему ①.

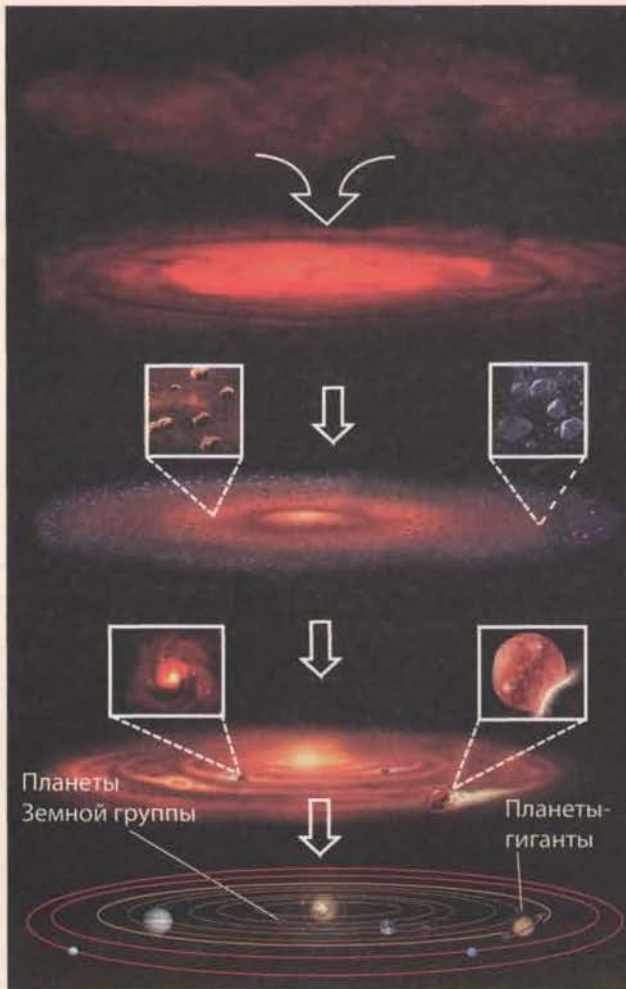
Гравитационное сжатие уменьшило размер центральной части уплотнения в 100 000 раз. В центре уплотнения оказалось прото-Солнце массой около $0,1 M_{\odot}$, принявшее сферическую форму, излучавшее в красной области спектра ②. Остальная часть вещества образовала в течение 100 000 лет диск, вращавшийся вокруг прото-Солнца и состоявший на 98,5% по массе из газа и 1,5% пыли, взвешенной в газе. Начальное вращение облака при уменьшении его размеров приводит к значительному увеличению скорости вращения (подобно фигуристу, увеличивающему скорость вращения приближением рук к корпусу). Вращение предотвращало полный коллапс. Внешние зоны удалялись от центра. Зоны диска, ближайшие к прото-Солнцу, втягивались внутрь, пополняя массу до $M_{\odot}$. Турбулентность в газе уменьшалась, и пыль оседала в его плоскости в течение нескольких тысяч лет. Наличие пылевого диска наблюдается в настоящее время у звезды β -Пикторис в стадии ее образования. Температура пыли убывала с расстоянием от прото-Солнца. В районе планет земной группы $(0,8 \div 1,3)$ а. е. температура менялась в пределах $(900 \div 1400)$ К ③. В этом диапазоне температур пыль состояла из зерен железа и силикатов, но не могла содержать испаряющуюся воду и летучие вещества. В области нынешних планет-гигантов на расстоянии, большем 5 а. е., при температуре, меньшей 225 К, вода и летучие органические вещества не испаряются, существуя только в твердой фазе. Присутствие льда увеличивало массу твердого вещества и гравитационное притяжение частиц, что способствовало появлению гигантского Юпитера. В пылевом диске образовались гигантские плотные кольца вокруг Солнца. Гравитационное притяжение частиц и их столкновения между собой приводили в течение 100 000 лет к образованию зерен (укрупнению частиц пыли). Через 10 000 лет в плоскости протопланетного диска образовалось около 100 млрд объектов неправильной формы размером от 1 до 10 км *планетезимали* (зародыши планет) ④. Состав планетезималей зависел от их температуры, т. е. от их расстояния от Солнца.

На расстояниях $(30 - 1000)$ а. е., т. е. практически за планетами, на периферии находится гигантский койперовский пояс ледяных планетезималей, названный в честь американского ученого *Джеральда Койпера*. При попадании планетезимали внутрь Солнечной системы в результате изменения ее траектории она приобретает хвост кометы. Планетезимали, окруженные газом (99% $(H + He)$, 1% CO, N_2, CNO), вращались в одну сторону вокруг Солнца, сталкиваясь при небольших относительных скоростях. Выделение тепла при неупругих столкновениях способствовало их слипанию в более массивные объекты. Чем больше диаметр объекта и соответственно его масса, тем чаще он испытывает столкновения и растет в размерах. Так образуется *протопланета* (планета в стадии образования).

Спустя примерно миллион лет от начала образования Солнечной системы в результате объединения при столкновениях планетезималей и протопланет начинают образовываться ядра планет и сами планеты ⑤.

Подтверждением изложенной гипотезы образования Солнечной системы являются наблюдения газопылевых дисков в созвездии Ориона ⑥ и у звезды β Пикторис ⑦.

ГРАВИТАЦИОННОЕ СЖАТИЕ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА



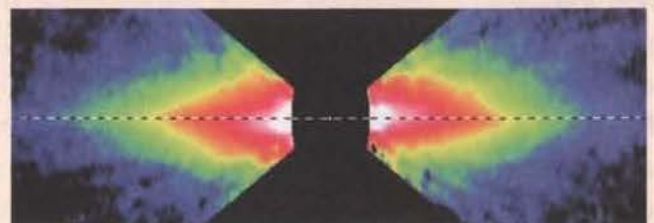
- ① Вращающееся газопылевое облако
- ② Образование газопылевого диска и прото-Солнца
- ③ Укрупнение частиц пыли
- ④ Возникновение планетезималей и протопланет
- ⑤ Образование Солнца и планет

ГАЗОПЫЛЕВЫЕ ДИСКИ У МОЛОДЫХ ЗВЕЗД В СТАДИИ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

- ⑥ Газопылевые диски в созвездии Ориона



- ⑦ Газопылевой диск у звезды β Пикторис (фотография с телескопа Хаббла)



В центральной области находится яркая звезда и ближайшая к ней планета

§89. ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Спустя примерно миллион лет с начала образования Солнечной системы в зоне между нынешним Меркурием и Марсом возникло около 20 протопланет массами между Луной и Меркурием и миллионы меньших по размеру планетезималей, состоящих из силикатов и железа. Столкновения протопланет с планетезималями приводило либо к укрупнению планет ①, либо к фрагментации планетезималей. Из-за столкновений с планетезималями на поверхности планеты плавилась силикаты, железо. Более тяжелая железная лава оседала к центру планеты, застывая на глубине. Ядра планет Земной группы Меркурия, Венеры, Земли состоят из железа, а мантии в основном из силикатов железа и магния ②. Ядро Марса состоит из смеси железа и сульфида железа. У Луны железное ядро практически отсутствует.

Согласно одной из современных гипотез Луна могла возникнуть при нецентральной столкновении Земли с протопланетой размера Марса, в результате которого часть силикатной мантии Земли была выброшена на Земную орбиту ③. Из нее вследствие гравитационного притяжения образовалась Луна.

Изотопный анализ образцов старейших лунных пород показал, что Луна возникла примерно через 10 млн лет после формирования Земли. Через 500 млн лет от начала образования Солнечной системы бомбардировка Земли планетезималями практически прекратилась и значительно ослабели бомбардировки *кометами*-планетезималями диаметром от 5 до 500 км, покрытыми льдом, принесшими на Землю воду и атмосферу.

Атмосфера Венеры и Марса в настоящее время (так же как и Земли 4 млрд лет назад) в основном состоит из углекислого газа CO_2 .

Массы Меркурия и Луны недостаточны для удержания существенной атмосферы.

На расстояниях от Солнца, больших 5 а. е., частицы межпланетной пыли были в несколько раз тяжелее, чем в области планет Земной группы, из-за снега органических веществ и льда на их поверхности. Здесь возникали планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун ④. В течение миллиона лет вследствие гравитационного притяжения и столкновений частиц образовалось металло-силикатное ядро Юпитера (содержащее также углерод и кислород) массой $m = 12m_{\oplus}$ ⑤. Мощный гравитационный центр укрупнился ($m_{\text{я}} = 29m_{\oplus}$) в результате многочисленных столкновений с планетезималями и протопланетами, быстро захватывая атмосферу, состоящую из водорода и гелия и имеющую массу $317m_{\oplus}$. Гравитационное поле Юпитера отбрасывало планетезимали в *область Оорта* ⑥ (в честь голландского астронома *Яна Оорта*), на расстояние около 50 000 а. е. от Солнца, где находится большинство комет. В области между Марсом и Юпитером столкновения планетезималей вызывали их фрагментацию, приводя к образованию *пояса астероидов* ⑦ (см. так же стр. 186). Образование Сатурна происходило аналогично, но более медленно: около 2 млн лет. Сатурн аккумулировал атмосферу массой $80m_{\oplus}$. Кольца Сатурна состоят из независимо двигающихся отдельных обломков водяного льда размерами от долей миллиметра до 10–25 м. Размер колец Сатурна около 60 000 км, а толщина не более 20 м. Образование Урана и Нептуна происходило заметно медленнее. Меньшие массы ядер этих планет не позволили аккумулировать значительные атмосферы.

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

①



Планеты земной группы

②

Процентное соотношение массы ядра и мантии планет земной группы и Луны

Планета	$m/M_{\oplus}$	$m_c/m, \%$	$m_o/m, \%$
Меркурий	0,053	60,4	39,6
Венера	0,715	39,9	60,1
Земля	1,0	38,0	62,0
Марс	0,107	26,2	73,8
Луна	0,012	0	100

ОБРАЗОВАНИЕ ЛУНЫ И МЕРКУРИЯ

③

Нецентральное столкновение Земли с протопланетой размером с Марс (50 млн. лет после образования Солнечной системы)



Анализ проб лунного грунта показал его подобие земному грунту, который был расплавлен, а затем охлажден

Центральное столкновение Меркурия с протопланетой



В результате столкновения увеличилась относительная масса ядра Меркурия

④

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ



Планеты-гиганты

Формирование ядер планет-гигантов завершилось примерно через 15 млн лет с начала образования Солнечной системы

СООТНОШЕНИЕ МАССЫ ЯДРА И ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ

⑤

Планета	$m/M_{\oplus}$	$m_c/m, \%$	$m_o/m, \%$
Юпитер	317	9,0	91
Сатурн	94	20	80
Уран	14,6	89	11
Нептун	17,3	89	11

⑥

КОМЕТЫ

а)

Облако Оорта



б)

Пояс Койпера

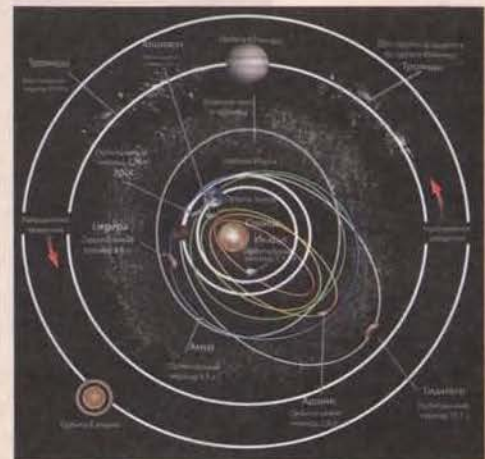


Области локализации комет в Солнечной системе:

- а) кометы с большим периодом обращения в сферическом слое,
б) кометы с малым периодом обращения в плоскости эклиптики

⑦

АСТЕРОИДЫ

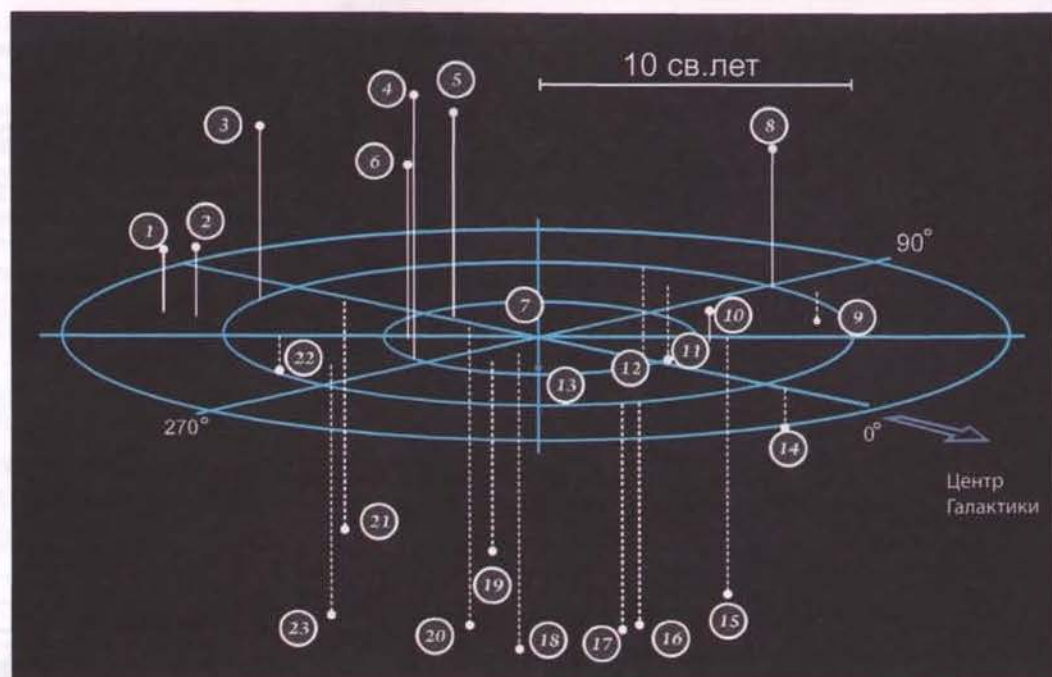


Орбиты астероидов и главный пояс астероидов, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, лежат практически в плоскости эклиптики

Приложение I

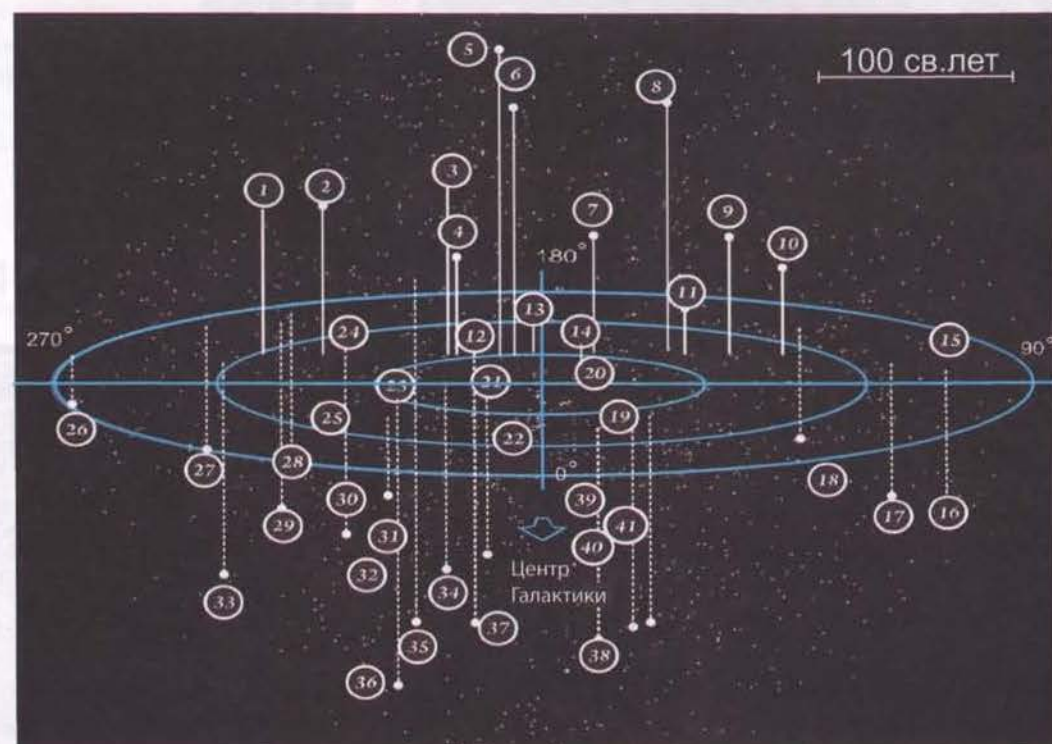
ЗВЕЗДЫ, БЛИЖАЙШИЕ К СОЛНЦУ

1. Звезда Лейтена
2. Процион
3. G51-15
4. Росса 128
5. Лаланд 21185
6. Вольф 359
7. Солнце
8. Струве 2398
9. Лебедя 61
10. Звезда Барнарда
11. Росса 248
12. Грэмбридж 34
13. Проксима (α Центавра)
14. Росса 154
15. L789-6
16. Лакайль 9352
17. ε Индейца
18. L725-32
19. L726-8
20. τ Кита
21. ε Эридан
22. Сириус
23. L372-58



СКОПЛЕНИЕ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ СОЛНЦА

1. α Гидры
2. γ Ворона
3. γ Льва
4. μ Близнецов
5. μ Большой Медведицы
6. α Рыси
7. β, γ, δ, ε, ζ, η, α Большой Медведицы
8. ε Волопаса
9. ε Малой Медведицы
10. γ Дракона
11. η Возничего
12. Солнце
13. Арктур
14. Капелла
15. α Кассиопеи
16. η Пегаса
17. β Пегаса
18. β Андромеды
19. Скопление Гиады
20. Вега
21. Альдебаран
22. ε Стрельца
23. γ Ориона
24. γ Центавра
25. β Киля



26. η Паруса

27. τ Кормы

28. γ Треугольника

29. ε Зайца

30. α Жервентника

31. γ Эридана

32. Ахернар

33. γ Южной Гидры

34. α Павлина

35. α Тукана

36. γ Феникса

37. β Журавля

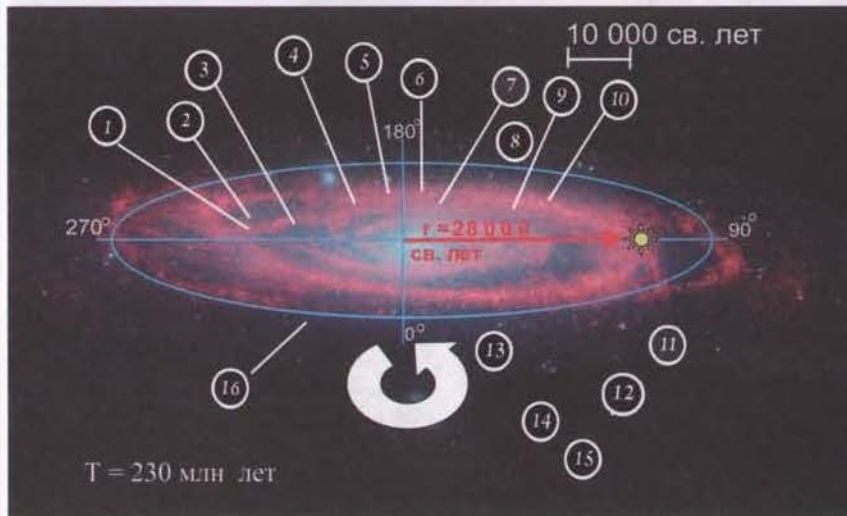
38. γ Журавля

39. φ Стрельца

40. σ Стрельца

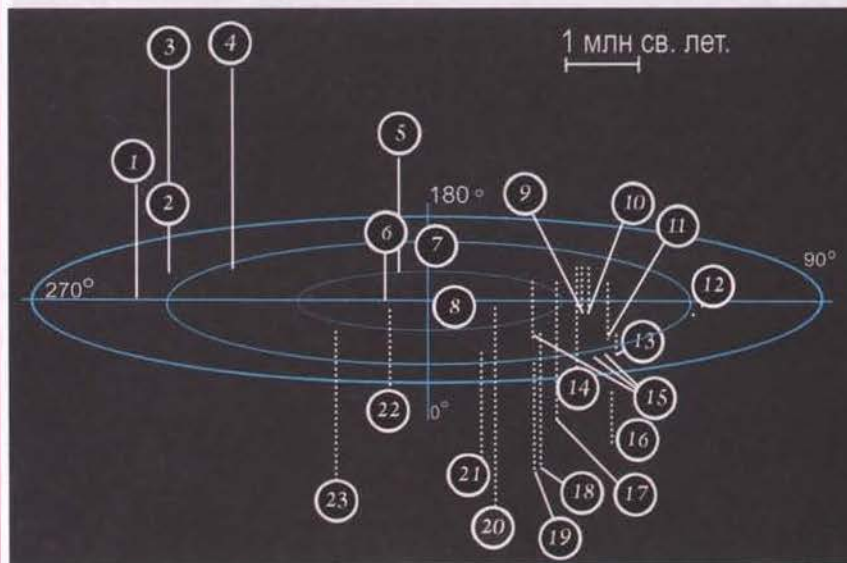
41. α Кита

ГАЛАКТИКИ



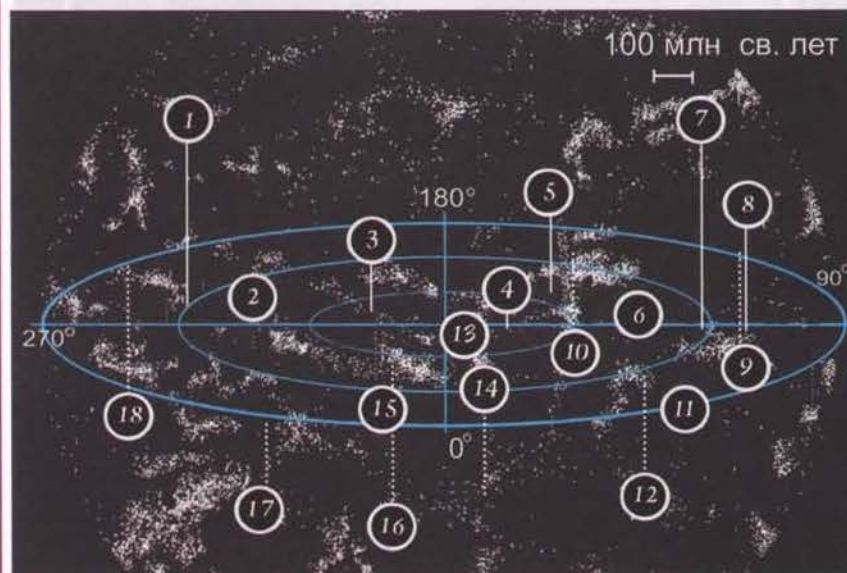
МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

1. Ветвь Наугольника
2. Щит — Южный Крест
3. М 68
4. Рукав Стрельца
5. Рукав Ориона
6. М 5
7. Солнце
8. М 13
9. Рукав Персея
10. Рукав Лебеда
11. М 15
12. М 2
13. М 30
14. Карликовая Галактика Стрельца
15. М 75
16. Шаровое скопление



МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

- | | |
|-----------------------|-----------------|
| 1. NGC 3109 | 7. II Льва |
| 2. Насос (карликовая) | 8. Млечный путь |
| 3. Секстант А | 9. NGC 185 |
| 4. Секстант В | 10. NGC 147 |
| 5. А Льва | 11. NGC 205 |
| 6. I Льва | 12. IC 10 |
13. Галактика Андромеды
 14. Галактика Треугольника
 15. I, II и III Андромеды
 16. Пегас (карликовая)
 17. LGS 3
 18. Водолей (карликовая)
 19. Стрелец (карликовая неправильная)
 20. WLM
 21. Кит (карликовая)
 22. Феникс (карликовая)
 23. Тукан (карликовая)

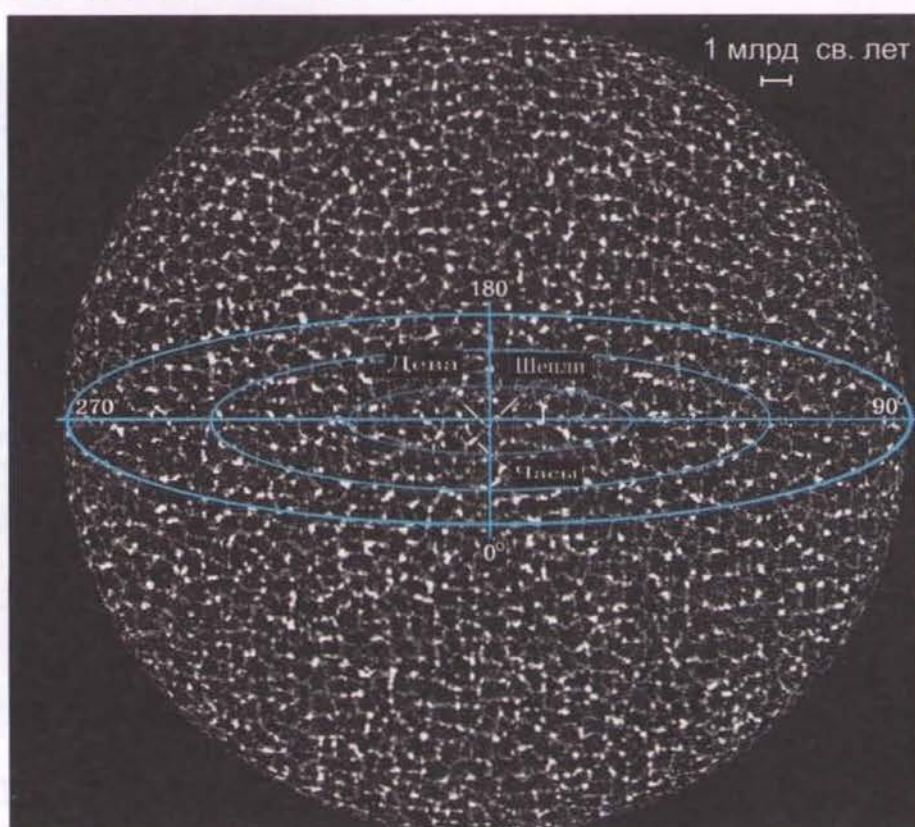


СВЕРХСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

1. Козерога
2. Скульптора
3. Павлина — Индуса
4. Центавра
5. Геркулеса
6. Шелли
7. Северной Короны
8. Волопаса
9. Большой Медведицы
10. Волосы
11. Льва
12. Секстанта
13. Девы
14. Гидры
15. Персея — Рыб
16. Голубя
17. Часов
18. Рыб — Кита

НАБЛЮДАЕМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

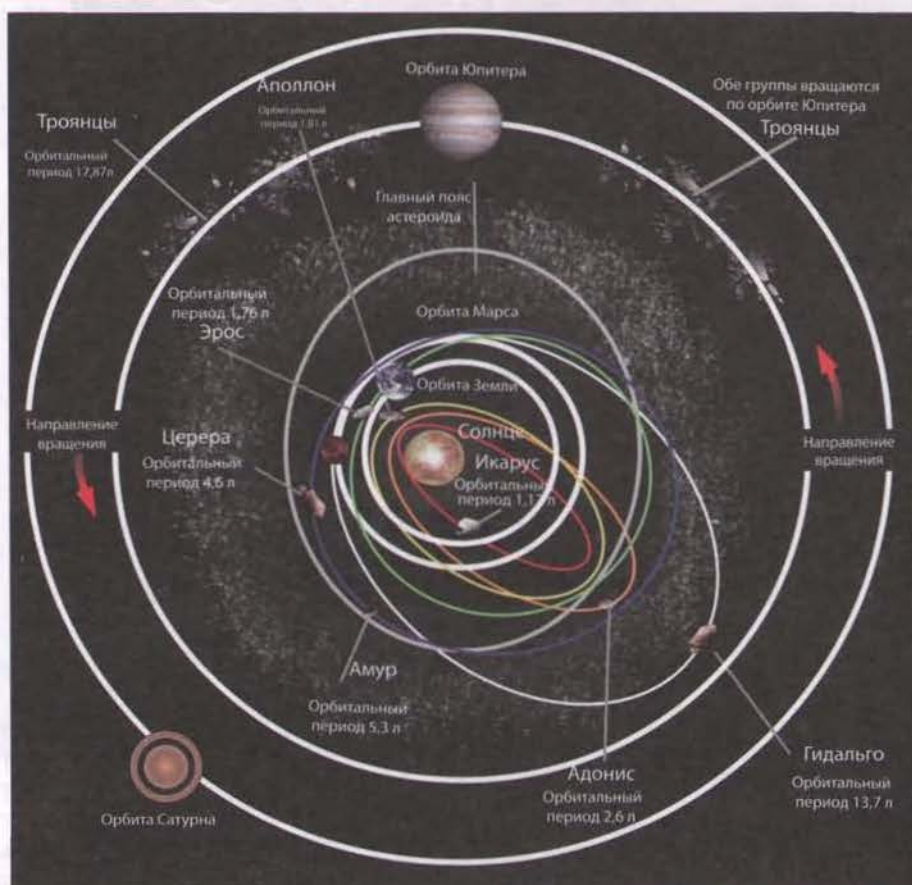
На больших масштабах Вселенная однородна и изотропна.



АСТЕРОИДЫ

Пересечение орбит астероидов может приводить к столкновениям, увеличению числа астероидов и уменьшению среднего размера.

Орбиты астероидов и главный пояс астероидов, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, лежат практически в плоскости эклиптики.



ОПТИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

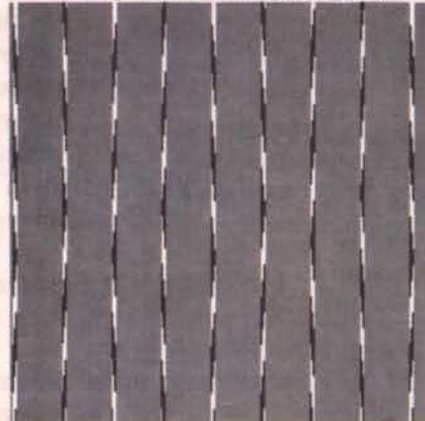
СПИРАЛЬ ФРЭЗЕРА

Линия на чертеже — спираль? Или это концентрические окружности?



"СОГНУТЫЕ" ПРОВОДА

Провода согнуты или параллельны друг другу?



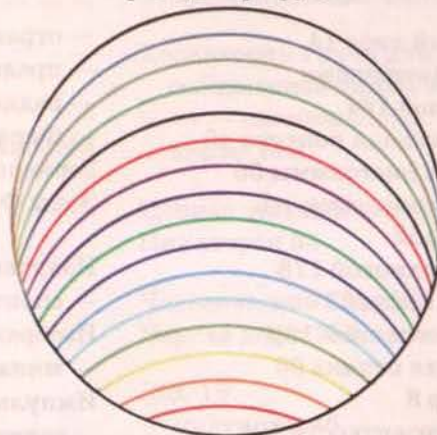
"МИГАЮЩАЯ" РЕШЕТКА

Мигают ли кружки, когда взгляд переводится по плоскости клеток?



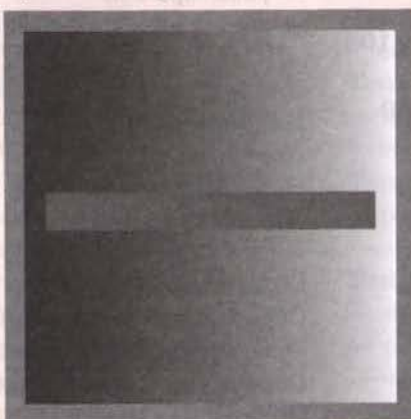
ДЕЛЕНИЕ ОТРЕЗКА ПОПОЛАМ ДУГАМИ

Дуга какого цвета проходит через центр круга?



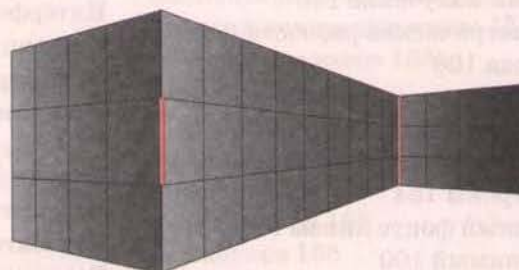
ОДНОВРЕМЕННЫЙ КОНТРАСТ

Одинаков ли оттенок цвета у всей центральной горизонтальной полосы?



СРАВНЕНИЕ ДЛИН ОТРЕЗКОВ

Какой из оранжевых отрезков длиннее?



- Абсолютно черное тело 118
- Абсолютный показатель преломления среды 88
- Адроны 154
- Активность радиоактивного вещества 142
- Альфа-распад 140
- Ампер 38
- Амперметр 8
- Анизотропия реликтового излучения 172
- Аннигиляция 152
- Антикварки 156
- Античастицы 152
- Ароматы 156
- Астрофизика 160
- Атомная бомба 146
- электростанция 148
- Барионный заряд 154
- Барионы 154
- Белый карлик 178
- Бета-распад 140
- Бипризма Френеля 110
- Близорукость 102
- Бозоны 152
- Вакуумный диод 14
- Варианты эволюции Вселенной 164
- Вектор площади контура 40
- Векторные диаграммы 56
- Взаимопревращаемость частиц 152
- Взрыв сверхновой 178
- Вибратор Герца 68
- Возраст Вселенной 162
- Волоконная оптика 90
- Вольтметр 8
- Время когерентности 106
- релаксации 50
- Галактики спиральные 174
- эллиптические 174
- неправильные 174
- Гамма-излучение 140
- Геометрическая разность хода 108
- Генератор переменного тока 46
- Главная оптическая ось 94
- плоскость линзы 94
- Гипероны 154
- Главный фокус линзы 96
- мнимый 100
- Глюоны 156
- Давление электромагнитной волны 72
- Дальнозоркость 102
- Детектирование 82
- Диамагнетик 42
- Дисперсия света 92
- Дифракционная решетка 116
- Дифракция 112
- света на щели 114
- Длина волны 70
- де Бройля 124
- когерентности 106
- Доза поглощенного излучения 150
- эквивалентная 150
- Дырка 12
- Дырочная проводимость 12
- Естественный радиационный фон 150
- Зависимость от температуры удельного сопротивления проводника 10
- — — — — полупроводника 12
- Закон Джоуля–Ленца 20
- Ома для замкнутой цепи 18
- — — участка цепи 8
- отражения света 84
- преломления света 88
- радиоактивного распада 140
- Фарадея–Максвелла 48
- Зеркало Ллойда 110
- Зоны Френеля 114
- Излучение индуцированное 132
- спонтанное 132
- Изображение действительное 98
- мнимое 86
- Импульс электромагнитной волны 72
- Индуктивность контура 40
- Индукция собственная 30
- магнитного поля 24
- Интенсивность излучения 70
- Интерференция 106
- Интерференционная картина 108
- Инфляционная фаза 168
- Ионизирующее излучение 150
- Источник тока 18
- Кварки 156
- Когерентные волны 106
- Колебательный контур 60
- Коричневый карлик 178
- Корпускулярно-волновой дуализм 122
- Космология 166
- Коэффициент размножения нейтронов 144
- трансформации 52
- «Красное смещение» галактик 162
- Красный гигант 178
- сверхгигант 178
- Кривая намагничивания 42
- Критическая плотность Вселенной 164
- Лавинная ионизация газа 14
- Лазер 132
- Лептонный заряд 154
- Лептоны 154
- Линза 94
- рассеивающая 94
- собирающая 94
- тонкая 94
- Линии индукции магнитного поля 26
- Лупа 104
- Луч 84
- Магнитная проницаемость среды 42
- Магнитное поле 22
- — в веществе 42
- — электрического тока 24
- однородное 30
- Магнитные ловушки 36
- полюса 22
- Магнитоэлектрическая индукция 68
- Масс-спектрограф 34
- Мезоны 154
- Модель Фридмана 164
- Модуляция сигнала амплитудная 80
- — частотная 80
- Момент импульса 128
- Монохроматическая волна 92
- Мощность полезная 54
- реактора 148
- электрического тока 20
- Направленная скорость 6
- Напряжение 8
- Нейтрон 136
- Нейтронная звезда 178
- Нуклеосинтез 170
- Область Оорта 182
- Образование галактик 174
- Солнечной системы 180
- Обратимость световых лучей 84
- Оптическая сила 96

- Однородный проводник 104
- Оптический микроскоп 104
 - телескоп-рефрактор 104
- Оптическое усиление 132
- Опыт Резерфорда 126
 - Юнга 110
- Остаточная намагниченность 44
- Парамагнетик 42
- Переносчики взаимодействий 158
- Период полураспада 142
- Петля гистерезиса 42
- Планетарная модель атома 126
- Планетезимали 180
- Планковская эпоха 168
- Плоскость поляризации 70
- Поворотная призма 90
- Полное внутреннее отражение 90
- Полупроводник *n*-типа 12
 - *p*-типа 12
- Поперечное увеличение линзы 98
- Постоянный магнит 22
 - ток 6
- Постулат Бора первый 128
 - второй 130
- Потери мощности 54
- Поток жидкости 40
 - магнитный 40
- Пояс астероидов 182
- Правило буравчика для прямого тока 24
 - — — витка с током 26
 - квантования орбит Бора 130
 - левой руки 28
 - правой руки для прямого тока 24
- Преломление волны 88
- Примесная проводимость 64
- Принцип Гюйгенса 84
 - — — Френеля 114
 - Паули 152
 - суперпозиции 26
- Просветление оптики 110
- Протон 136
- Протон-протонный цикл 176
- Протопланеты 180
- Работа выхода 120
- Радиационные пояса Земли 36
- Радиоактивное семейство урана 142
- Радиолокация 76
- Радиоприем 76
- Радиосвязь 76
- Радиотелефонная связь 76
- Радиус кривизны линзы 94
 - ядра 136
- Радиоактивность 140
 - естественная 140
 - искусственная 144
- Радиоактивный распад 140
- Размер астрономических структур 160
- Разряд дуговой 14
 - искровой 14
 - самостоятельный 14
 - тлеющий 14
- Рамка с током в магнитном поле 30
- Реликтовое излучение 172
- Рентгеновская трубка 134
- Рождение пары 152
- Ротор 46
- Самоиндукция 50
- Сила Ампера 28
 - Лоренца 32
 - оптическая 96
 - тока 6
- Соединение проводников последовательное 16
 - — параллельное 16
 - — смешанное 16
- Соленоид 50
- Соотношение неопределенностей Гейзенберга 124
- Соппротивление 8
 - емкостное 58
 - индуктивное 58
 - удельное 8
 - электрическое 8
- Спектр линейчатый 130
 - сплошной 130
 - электромагнитных волн 74
- Спектральная чувствительность глаза 102
- Спин 42
- Температурный коэффициент сопротивления 10
- Тепловое излучение 118
 - действие электрического тока 20
- Термоэлектронная эмиссия 14
- Термоядерный синтез 150
 - — управляемый 150
- Ток замыкания 50
 - индукционный 50
 - размыкания 50
 - электрический 6
 - смещения 68
- Транзистор 66
- Трансформатор
 - повышающий 52
 - понижающий 52
- Триод 14
- Угловое увеличение 104
- Угол полного внутреннего отражения 88
- Удельная энергия связи 138
- Уравнение бегущей волны 70
 - Эйнштейна для фотоэффекта 120
- Условие интерференционных максимумов 108
 - — минимумов 108
- Фермионы 152
- Ферромагнетики 42
 - магнито-жесткие 42
 - магнито-мягкие 42
- Фокусное расстояние 96
- Формула линзы 100
- Фотоэффект 120
- Фронт электромагнитной волны 70
- Фундаментальная частица 152
- Характерные лучи для собирающей линзы 96
 - — — рассеивающей линзы 100
- Цепная реакция деления 144
- Циклотрон 34
- Человеческий глаз 102
- Черная дыра 178
- ЭДС 18
 - индукции 46
- Электрический пробой газа 14
- Электромагнитная волна 68
 - индукция 48
- Электронная проводимость полупроводника 64
- Элементарная частица 152
- Энергия ионизации атома 130
 - связи нуклонов 138
- Эпоха Великого Объединения 168
 - электрослабая 168
- Эра адронная 168
 - лептонная 168
 - кварков 168
- Эффект Хаббла 162
- Явление насыщения 42
- Ядерный реактор 146

Приложение III

Ампер Андре 11



Андерсон Карл 74



Басов Николай Г. 64



Бете Ханс 86



Больцман Людвиг 57



Бор Нильс 62



де Бройль Луи 60



Гамов Георгий 81



Ган Отто 70



Гейгер Ханс 61



Гейзенберг Вернер 60



Геллман Мюррей 76



Генри Джозеф 23



Герц Генрих 23



Гильберт Уильям 9



Гюйгенс Христиан 40



Декарт Рене 9



Джинс Джеймс 85



Джоуль Джеймс 8



Зельдович Яков Б. 85



Койпер Джерард 88



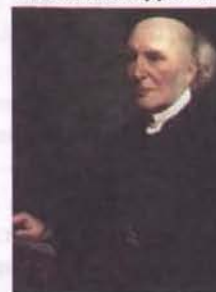
Лебедев Петр Н. 72



Ленц Эмиль Х. 8



Ллойд Хэмфри 53



Лоренц Хендрик 14



Максвелл Джеймс 32



Маркони Гульельмо 36



Марсден Эрнест 61



Оорт Ян 89



Пензиас Арно 84



Планк Макс 57



Попов Александр С. 36



Прохоров Александр М. 64



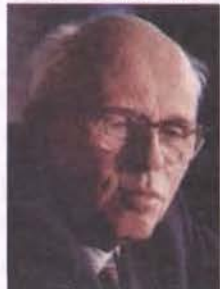
Пуассон Симон-Дени 54



Резерфорд Эрнест 61



Сахаров Андрей Д. 73



Тамм Игорь Е. 73



Таунс Чарльз 64



Томсон Уильям 28



Уилсон Роберт 84



Фарадей Майкл 22



Фейнман Ричард 66



Френель Огюстен 53



Фридман Александр А. 80



Хаббл Эдвин 79



Цвейг Джордж 76



Чедвик Джеймс 66



Штрассман Фритц 70



Эрстед Ханс 10



Юнг Томас 53



Учебное издание

Касьянов Валерий Алексеевич

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАС ПО ФИЗИКЕ 11 класс

Издательство «ЭКЗАМЕН»

Гигиенический сертификат
№ 77.99.60.953.Д.000454.01.09 от 27.01.2009 г.

Главный редактор *Д.В. Яновский*
Художественный редактор *Л.В. Демьянова*
Технический редактор *Т.В. Фатюхина*
Корректор *И.В. Русанова*
Дизайн обложки *Л.В. Демьянова*
Компьютерная верстка *Н.Н. Балахонцева*

105066, Москва, ул. Нижняя Красносельская, д. 35, стр. 1.
www.examen.biz

E-mail: по общим вопросам: info@examen.biz;
по вопросам реализации: sale@examen.biz
тел./факс 641-00-30 (многоканальный)

Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, том 2; 953005 — книги, брошюры, литература учебная

Отпечатано по технологии CtP
в ОАО «Печатный двор» им. А.М. Горького
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15

По вопросам реализации обращаться по тел.: 641-00-30 (многоканальный).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И СОЛНЦА

Тело Солнечной системы	 ЮПИТЕР JUPITER	 САТУРН SATURN	 УРАН URANUS	 НЕПТУН NEPTUNE	 СОЛНЦЕ HELIOS
Фотография					
Масса (в массах Земли, $m_{\oplus}$)	318	95,2	14,5	17,1	332000
Радиус (в радиусах Земли, $R_{\oplus}$)	11,2	9,5	4,0	3,9	109
Средняя плотность, 10^{-3} кг/м^3	1,33	0,7	1,32	1,64	1,4
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	5,2	9,54	19,2	30,1	-
Среднее расстояние от Солнца, млн. км	778	1426	2869	4,496	-
Звездный период обращения вокруг Солнца, годы	11,86	29, 46	84,01	164,7	-
Средняя орбитальная скорость, км/с	13,1	9,65	6,8	5,43	-
Звездный период вращения вокруг оси	9,93 ^ч	10,6 ^ч	17,2 ^ч	16,1 ^ч	25,4 ^д
g , м/с ²	25,8	11,3	9,0	11,6	274
v_{II} , км/с	60,4	36,2	21,4	23,8	620
Температура поверхности, К	125	95	60	60	6000
Наклон оси плоскости орбиты	87°	63,5°	- 8°	61°	82,8°
Число спутников (на 2008 г.)	63	50	27	13	-
Состав атмосферы	H ₂ (86%) He (14%)	H ₂ (92,4%) He (7,4%) CH ₄ (0,2%)	H ₂ (84%) He (14%) CH ₄ (2%)	H ₂ (84%) He (13%) CH ₄ (3%)	H ₂ (65%) He (35%)

"Иллюстрированный Атлас по физике" – уникальное учебное пособие, не имеющее аналогов в мировой и отечественной учебной литературе, сочетающее достоинства интересного, доказательного учебника и красочного альбома наглядных иллюстраций, помогающих глубже понять суть физических явлений и легче запомнить их взаимосвязи.

"Иллюстрированный Атлас по физике" может использоваться как основное учебное пособие для изучения физики на базовом уровне.

Простота и лаконичность изложения курса физики 11 класса делает **«Иллюстрированный Атлас по физике»** незаменимым при подготовке к контрольным работам, экзаменам и ЕГЭ.

«Атлас» можно использовать совместно с любым УМК, а также как раздаточный материал к учебным таблицам по физике КПСО **«СПЕКТР»**, содержательно включенным в состав **«Атласа»** к комплектам:

- **Физика. 11 класс. Арт. 5-8616-015**
- **Физика. Постоянный ток. Арт. 5-8623-008**
- **Физика. Электродинамика. Арт. 2-090-667**
- **Физика. Магнитное поле. Арт. 5-8669-012**
- **Физика. Электромагнетизм. Арт. 5-8624-008**
- **Физика. Излучение и прием электромагнитных волн. Арт. 5-8668-008**
- **Физика. Геометрическая и волновая оптика. Арт. 5-8670-018**
- **Физика. Квантовая физика. Арт. 5-8548-008**
- **Физика. Физика высоких энергий. Арт. 5-8675-012**
- **Физика. Эволюция Вселенной. Арт. 5-8676-012**

ISBN 978-5-377-02835-2



9 785377 028352



ЭКЗАМЕН