

# АТОМ

Атом - "ἄτομος" (греч) - "неделимый".

Вот атом, который построил Бор.  
Это - протон.  
Который в центр помещен  
Атома, который построил Бор.

А вот электрон.  
Который стремглав облетает протон.  
Который в центр помещен  
Атома, который построил Бор.

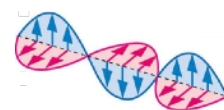
Нильс Бор

В этой Истории мы поговорим о школьных разделах физики, посвященных атому и квантовым эффектам. Из привычного нам макромира, где правят законы классической физики, мы отправляемся в микромир. Тут всё по другому...

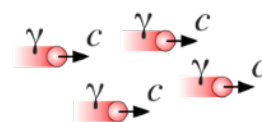
Напомню вам слова, сказанные в Истории про Оптику:

Физика рассматривает два "вида деятельности" света: распространение света и взаимодействие света с веществом.

В вопросах распространения свет рассматривается как электромагнитная волна и описывается законами классической физики



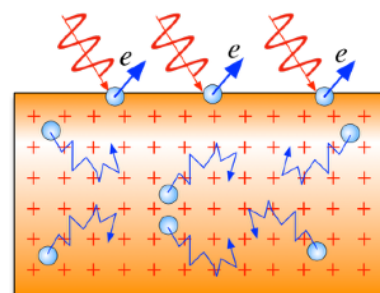
А уж если изучать взаимодействие света с веществом, то придётся перейти на уровень квантовой механики и рассматривать свет как поток элементарных частиц - фотонов (их ещё называют *гамма-квантами*).



Световая волна, падающая на тело, частично отражается от него, частично проходит насквозь, частично поглощается. В большинстве случаев энергия поглощенной световой волны целиком переходит во внутреннюю энергию вещества, что приводит к нагреванию тела. Нередко, однако, известная часть этой поглощенной энергии вызывает и другие явления. Очень важными действиями света, получившими большие практические применения, является *фотоэлектрический эффект*.

## ➔ Фотоэлектрический эффект

В Историях про Магнетизм и Ток мы говорили, что в проводнике много свободных электронов, которые весело носятся по проводнику, совершая хаотическое тепловое движение. Эти электроны хоть и называются *свободными*, но их свобода ограничивается перемещением **внутри** проводника. Внутри проводника их удерживают кулоновские силы притяжения к положительно заряженным атомам кристаллической решетки проводника. Говорят, что у *электрона есть энергия связи с кристаллической решеткой*. И чтобы эту энергию преодолеть (вырвать электрон из тела проводника) надо совершить *работу выхода*, то есть сообщить электрону дополнительную энергию.



В вакуумных приборах (ламповые диоды и триоды) происходит непосредственное нагревание катода для придания свободным электронам энергии для покидания проводника<sup>1</sup>. А приложенное между катодом и анодом напряжение "гонит" вырванные из проводника электроны по цепи, создавая электрический ток.

<sup>1</sup> Об этом мы говорили в Истории про Ток. Процесс испускания электронов под действием температуры называется *термоэлектронной эмиссией*.

Но энергию можно сообщить электронам и при облучении проводника светом. Свет - электромагнитная волна, переносящая энергию. И при воздействии света на проводник свободные электроны получают необходимую для покидания проводника энергию. В этом и состоит фотоэффект<sup>2</sup> - *фотоэлектрический эффект*. Он был открыт в 1887 году.

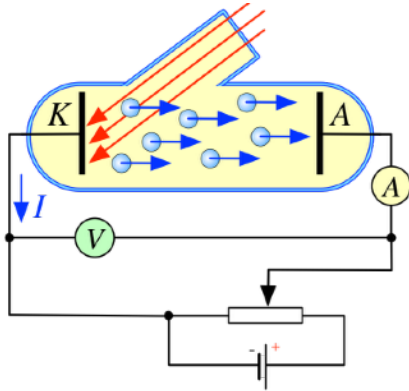
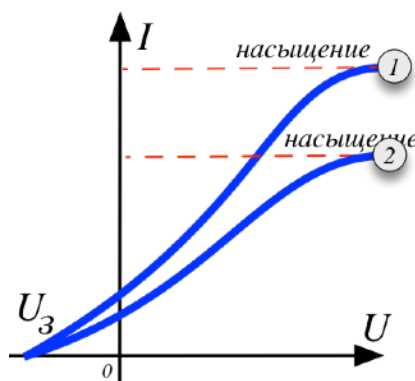


Схема для изучения фотоэффекта показана на рисунке. В стеклянном вакуумном баллоне находятся два металлических электрода - катод и анод. Их поверхности тщательно очищены. К электродам прикладывалось напряжение  $U$ . Катод освещался *монохроматическим* светом длины волны  $\lambda$ . (Напомню: частота и длина световой волны связаны так:  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ). При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения.



На рисунке изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности<sup>3</sup> светового потока, падающего на катод. Кривая 1 соответствует бОльшей интенсивности светового потока. Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода (*в ламповых диодах и триодах также возникает насыщение анодного тока - мы об этом говорили*). Ток насыщения прямо пропорционален интенсивности падающего света.

Даже если напряжение катод-анод станет нулевым, то до анода всё равно будет долетать часть электронов, вырвавшихся из катода (фотоэлектронов), и фототок будет течь. *То есть энергии световой волны, передаваемой электрону, хватает как на вырывание его из проводника, так и на сообщение ему кинетической энергии*. Можно записать так:

$E_{\text{волны}} = A_{\text{выхода}} + E_{\text{кинетич}}$ , где  $E_{\text{волны}}$  - энергия световой волны, передаваемая электрону,  $A_{\text{выхода}}$  - работа выхода: энергия, необходимая для вырывания электрона из металла,  $E_{\text{кинетич}}$  - кинетическая энергия фотоэлектрона после вырывания ( $\frac{m \cdot v^2}{2}$ ).

Если же напряжение катод-анод станет отрицательным, то анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $e \cdot U$ . И чтобы фототок стал равным нулю, надо "запереть" все вылетающие фотоэлектроны у катода: то есть подать на катод отрицательное запирающее<sup>4</sup> напряжение  $-U_з$ . Можно посчитать максимальную кинетическую энергию последнего "самого шустрого" фотоэлектрона, долетевшего до

анода:  $\left(\frac{m \cdot v^2}{2}\right)_{\text{max}} = e \cdot U_з$ . Пока всё понятно и соответствует всем классическим представлениям.

<sup>2</sup> А сам процесс испускания электронов под действием света называется *фотоэлектронной эмиссией*.

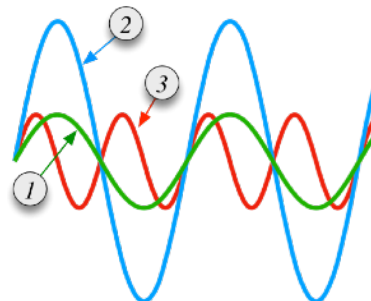
<sup>3</sup> Напомню: интенсивность - величина, пропорциональная квадрату амплитуды световой волны.

<sup>4</sup> Иногда говорят "задерживающее".

Но тут любопытные учёные начали экспериментировать с величиной длины волны  $\lambda$  (частотой  $\nu$ ) монохроматического света, облучающего катод, и начались неожиданные результаты.

Их интересовал уже не фототок в целом, а поведение отдельного электрона при выбивании его с поверхности проводника. Меняя частоту  $\nu$  облучающего проводник света, они измеряли величину запирающего напряжения  $U_3$ , оценивая тем самым максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

Давайте на секундочку отвлечёмся от фотоэлектронов. Вот перед вами условно изображены три световые волны. **Волна 1** описывается уравнением:  $x = A \cdot \sin(2\pi \cdot \nu \cdot t)$ , где  $\nu$  - частота волны; **волна 2:**  $x = 3A \cdot \sin(2\pi \cdot \nu \cdot t)$  - той же частоты  $\nu$ , но амплитудой в 3 раза больше (а следовательно с интенсивностью в 9 раз большей, чем у волны 1); **волна 3:**  $x = A \cdot \sin(2\pi \cdot 2\nu \cdot t)$  - той же амплитудой, что и волна 1, но с в 2 раза большей частотой. **Вопрос:** *какая из этих трёх волн передаст большую энергию электрону при облучении его?*

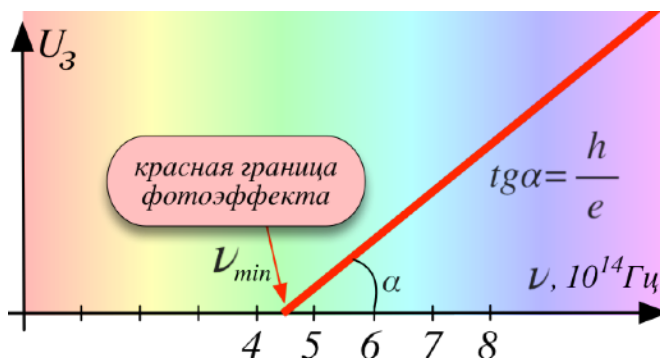


Все наши знания классической физики говорят, что большую энергию электрону должна передать волна 2: интенсивность её в 9 раз больше, чем у волн 1 и 3, значит она более "энергичная". **Но !!!** Эксперименты показали, что *интенсивность облучающего света не влияет на величину  $U_3$  (а следовательно, и на максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов)!!!* А вот *волна 3 удвоенной частоты как раз и увеличивает эту кинетическую энергию*. Классическая физика объяснить это не могла. "Нет связи энергии волны с частотой!" - бубнила она.

Многочисленные эксперименты установили следующие основные закономерности фотоэффекта - их ещё называют "законы Столетова"<sup>5</sup>:

- число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 секунду, прямо пропорционально интенсивности света - *первый закон Столетова*.
- максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности - *второй закон Столетова*.
- для каждого вещества существует так называемая *красная граница фотоэффекта*, т. е. наименьшая частота  $\nu_{min}$ , при которой еще возможен фотоэффект - *третий закон Столетова*.
- фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{min}$ .

Все эти закономерности фотоэффекта в корне противоречили представлениям классической физики о взаимодействии света с веществом. Согласно волновым представлениям при взаимодействии с электромагнитной световой волной электрон должен был бы постепенно накапливать энергию, и потребовалось бы значительное время, зависящее от интенсивности света, чтобы электрон накопил достаточно энергии для того, чтобы вылететь из катода. Как показывают расчеты, это время должно было бы исчисляться минутами или часами. Однако, опыт показывает, что фотоэлектроны



<sup>5</sup> А.Г. Столетова - русский физик, много работавший с явлением фотоэффекта..

появляются немедленно после начала освещения катода. В этой модели также было невозможно понять существование красной границы фотоэффекта. Волновая теория света не могла объяснить независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности светового потока и пропорциональность максимальной кинетической энергии частоте света.

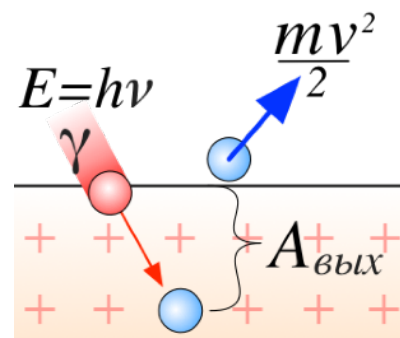
Выход был найден Альбертом Эйнштейном в 1905 г. Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано им на основе гипотезы Макса Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой  $E = h \cdot \nu$ , где  $h$  - постоянная Планка ( $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$  м<sup>2</sup>·кг/с). Так рождалась квантовая механика.

Эйнштейн пришел к выводу, что свет имеет прерывистую (дискретную) структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций - **квантов**, впоследствии названных **фотонами (или гамма-квантами)**. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию  $h\nu$  одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Часть энергии электрона затрачивается на "вырывание" из проводника - преодоление потенциального барьера на границе металл-вакуум. Для этого электрон должен совершить **работу выхода  $A$** , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left( \frac{m \cdot v^2}{2} \right)_{max} = e \cdot U_3 = h \cdot \nu - A$$

- уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности фотоэффекта. Наличие красной границы объясняется тем, что при частотах света меньше  $\nu_{min}$  электрону не хватает энергии для совершения работы выхода  $A$  и он остаётся в проводнике. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 секунду поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность (а это и есть интенсивность светового потока). Из этого следует, что ток насыщения должен быть прямо пропорционален интенсивности светового потока.



Тангенс угла наклона прямой на графике  $U_3(\nu)$  равен  $tg\alpha = \frac{h}{e}$ ,  $e$  - заряд электрона.

Для выражения величин энергии в квантовой механике джоуль слишком велик: пришлось бы постоянно приписывать  $10^{-15}$  или  $10^{-19}$  Дж. Поэтому используется кратная единица "электрон-вольт" (эВ):

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \iff 1 \text{ Дж} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$$

В таблице приведены значения работы выхода электронов и красные границы фотоэффекта (в длинах волн) для разных металлов.

| Металл   | $A_{вых}$ , эВ | $\lambda_{кр}$ , нм | Металл | $A_{вых}$ , эВ | $\lambda_{кр}$ , нм | Металл | $A_{вых}$ , эВ | $\lambda_{кр}$ , нм |
|----------|----------------|---------------------|--------|----------------|---------------------|--------|----------------|---------------------|
| Серебро  | 4,7            | 264                 | Медь   | 4,36           | 284                 | Цезий  | 1,94           | 640                 |
| Алюминий | 4,2            | 295                 | Натрий | 1,9            | 680                 | Калий  | 2,25           | 550                 |

<sup>6</sup> Постоянная Планка - ключевая константа в квантовой механике.

Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные элементы (натрий, цезий). Поэтому соединения щелочных металлов используют для создания катодов в фотоэлементах, предназначенных для регистрации видимого света.

### Несколько замечаний про фотоэффект

- при **термоэлектронной эмиссии** (когда электроны покидают нагретый катод лампового диода, например) электроны тоже совершают **работу выхода**. И это та же работа выхода, что совершают электроны при **фотоэлектронной эмиссии**. Эксперименты показали совпадение этих величин в обоих случаях;
- число вылетевших с поверхности проводника электронов не равно числу фотонов, попавших за то же время на эту поверхность. Не всякий фотон сообщает свою энергию отдельному электрону. Значительная часть энергии будет распределена между атомами металла и приведет к его нагреванию. Опыт показывает, что лишь малая часть (меньше 1 %) световой энергии обычно переходит в энергию вылетевших электронов. Остальная же часть поглощенных фотонов ведет к нагреванию металлов;
- на практике явление фотоэффекта используется во всевозможных датчиках и измерителях освещенности в схемах автоматики, в солнечных батареях как на земле, так и в космических аппаратах.

*Законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении (при взаимодействии с веществом) ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов (гамма-квантов).*

### Про фотон:

- энергия фотона равна  $E = h \cdot \nu$ ;
- импульс фотона равен  $p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot \nu}{c}$
- частота - энергия - импульс фотона связаны напрямую через константы;
- фотон движется в вакууме со скоростью  $c \approx 300.000$  км/ч или  $c \approx 300.000.000$  м/с. С другой скоростью он двигаться не может;
- фотон не имеет массы. Принимая во внимание положения Специальной Теории Относительности, следует говорить, что **фотон не имеет массы покоя**. Если бы фотон имел отличную от нуля массу покоя, то он не мог бы двигаться со скоростью света;
- если в задаче на фотоэффект говорится, что "свет длиной волны  $\lambda$  падает на поверхность проводника", то вы должны понимать, что речь пойдет о фотонах частотой  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , из которых состоит свет и которые фотоэффект обеспечивают.

То, что у отдельного фотона есть энергия  $E = h \cdot \nu$ , следует и из гипотезы Планка и из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Но как понимать то, что у фотона есть импульс? Оказывается, что при переносе энергии всегда переносится и импульс, то есть любая волна (световая, звуковая), которая переносит энергию, переносит и импульс. Поэтому мы с необходимостью должны приписать фотону с энергией  $E = h \cdot \nu$  импульс  $p = \frac{h \cdot \nu}{c}$ , направленный в направлении распространения волны. Утверждение о переносе волной импульса может показаться немного непривычным (вспомним школьное определение "волна переносит энергию, но не переносит массу"), вступающим в конфликт со школьным же определением импульса  $p = m \cdot v$ . Но это кажущаяся проблема: это определение импульса для классической частицы просто не имеет отношения к волне электромагнитного поля.

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах - корпускулах. Но это не был механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом - корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название корпускулярно-волнового дуализма. Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц. Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корпускулярных свойств у микрообъектов. Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы квантовой механики.

## Задачи по теме "Кванты и фотоэффект"

> **Задача 1** (взята из учебника физики для 11-х классов Мякишева - Буховцева 2019 года издания). Определите массу фотона красного цвета, длина волны которого  $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-5}$  см.

**Решение:** Ох уж эти составители школьных задач! Понятно, что они хотят "притянуть" в задачу формулу Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$ . Давайте аккуратненько разберёмся.

Фотон - это частица-переносчик электромагнитной энергии (электромагнитного взаимодействия). Он несётся со скоростью света и переносит ЭМ-энергию "из точки А в точку Б". Можно сказать, что фотон и есть чистая ЭМ-энергия. У фотона нет массы покоя (она равна нулю), он вообще не может находиться в покое. Он вообще не может двигаться иначе, как со скоростью света. Многие элементарные частицы (электрон, протон и пр.) могут находиться в состоянии покоя и имеют ненулевую массу покоя (но они не могут двигаться со скоростью света). И эта ненулевая масса покоя влияет на поведение этих частиц при взаимодействии с другими частицами. А на поведение фотона при взаимодействии с другими частицами влияет только его энергия.

Формула Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$  говорит о том, что энергия и масса - эквивалентны, что масса может быть преобразована в энергию, а энергия может быть преобразована в массу. Или, идя ещё дальше: *масса - это частный случай энергии.*

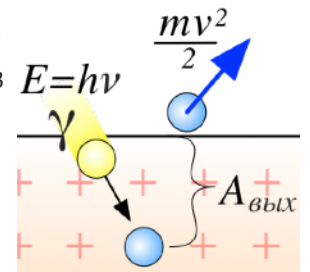
Когда в задаче просят определить массу фотона (что на мой взгляд не очень корректно и притянуто за уши: фотон - это чистая энергия, так и описывать его надо в энергетических терминах), то это значит, что надо лишь формально определить "массовый эквивалент" той энергии, которой он обладает. Если мы определим этот "массовый эквивалент", например, величиной в 1 грамм (ха-ха), то *это категорически НЕ означает*, что мы должны рассматривать фотон как несущуюся со скоростью света дробину массой 1 грамм.

Ну вот при таком понимании давайте формально определим "массовый эквивалент" энергии фотона. Энергия фотона равна  $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ . Приравнивая её по формуле

Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$ , имеем:  $\frac{h \cdot c}{\lambda} = m \cdot c^2$ . Откуда  $m = \frac{h}{\lambda \cdot c}$ . Что даёт

$m \approx 0,35 \cdot 10^{-32}$  кг. Напомню, что масса электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг. То есть "массовый эквивалент" нашего фотона в 260 раз легче электрона.

> **Задача 2.** Работа выхода электрона с поверхности цезия равна  $A_{\text{вых}} = 1,89$  эВ. С какой максимальной скоростью вылетают электроны из цезия, если металл освещён жёлтым светом с длиной волны  $\lambda = 0,589$  нм?



**Решение:** Задача на прямое применение уравнения Эйнштейна для

фотоэффекта:  $\frac{m_e \cdot v_{\text{max}}^2}{2} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - A$ , откуда

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m_e} \left( h \cdot \frac{c}{\lambda} - A \right)}$$

подстановке значений.

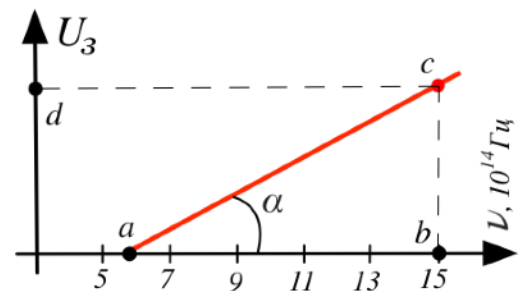
$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; A_{\text{вых}} = 1,89 \text{ эВ} = 1,89 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; \\ \lambda = 0,589 \cdot 10^{-9} \text{ м}; h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{кг/с}.$$

> **Задача 3.** Красная граница фотоэффекта для лития  $\lambda_1 = 520$  нм. Какое запирающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы электроны, испускаемые литием под действием ультрафиолетового излучения с длиной волны  $\lambda_2 = 200$  нм не могли создать ток в цепи?

**Решение:** Давайте переведём данные в задаче длины волн в частоты соответствующих фотонов по формуле  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ . Тогда красная граница

фотоэффекта для лития будет равна  $5,769 \cdot 10^{14}$  Гц (точка a), а частота ультрафиолетового излучения  $15 \cdot 10^{14}$  Гц (точка b).

График зависимости запирающего напряжения от частоты облучающего света для нашей задачи будет выглядеть вот так:



Ну а дальше можно решать как графически, так и формульно.

**Графически.** Очевидно, что искомая величина на графике - точка d (или длина отрезка bc).

$$bc = ab \cdot \text{tg} \alpha. \text{tg} \alpha = \frac{h}{e}; \text{длина } ab = \text{разности частот } b - a.$$

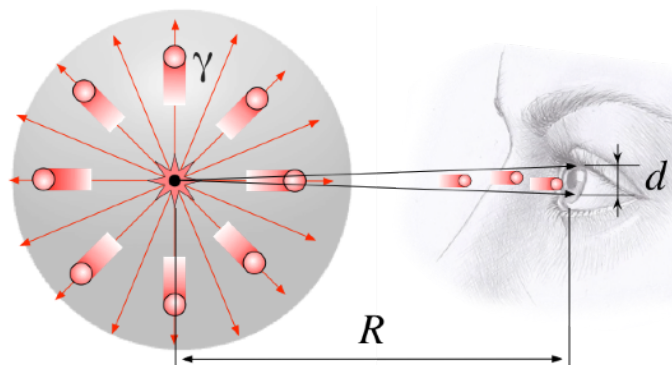
**Формульно.** Зная красную границу фотоэффекта для лития, легко посчитать работу выхода

электрона из лития:  $A = \frac{h \cdot c}{\lambda_1}$ . А величину запирающего напряжения считаем по

$$\text{уравнению Эйнштейна для фотоэффекта: } e \cdot U_3 = \frac{h \cdot c}{\lambda_2} - A.$$

> **Задача 4.** Мощность точечного источника монохроматического света  $P = 10$  Вт на длине волны  $\lambda = 500$  нм. На каком максимальном расстоянии этот источник будет замечен человеком, если глаз реагирует на световой поток 60 фотонов в секунду. Диаметр зрачка  $d = 0,5$  см.

**Решение:** Эта задача больше на геометрию, чем на физику.



Точечный источник за одну секунду испускает световую энергию в 10 Дж. Энергия одного фотона, испускаемого им, равна  $E_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ . Можно посчитать сколько фотонов испускает он за одну секунду:  $N = \frac{P \cdot t_0}{E_0}$ , где  $t_0 = 1$  сек. Значит за одну секунду  $N$  фотонов пересекают сферу любого радиуса, центр которой совпадает с положением точечного источника. Тогда поверхностная плотность фотонов, пересекающих такую сферу радиуса  $R$  за одну секунду, равна  $N$ , деленное на площадь сферы радиуса  $R$ :  $n = \frac{N}{4\pi \cdot R^2}$ .

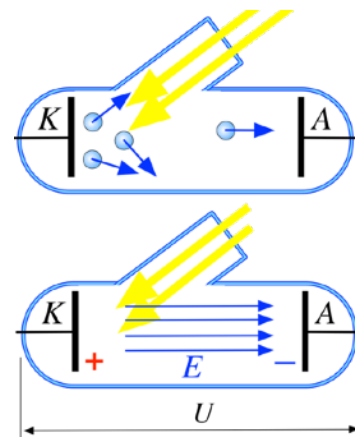
Минимальная различимая человеком плотность фотонов, попадающая в зрачок за 1 секунду, равна  $n_{min} = \frac{4 \cdot 60}{\pi \cdot d^2}$ . Приравнявая эти плотности, получаем то максимальное расстояние, на котором этот источник будет замечен человеком.

> **Задача 5.** При освещении вакуумного фотоэлемента желтым светом ( $\lambda_1 = 600$  нм), он заряжается до разности потенциалов  $U_1 = 1,2$  В. До какой разности потенциалов зарядится фотоэлемент при освещении его фиолетовым светом ( $\lambda_2 = 400$  нм)?

**Решение:** На катод фотоэлемента падает свет и выбивает из него электроны. Между катодом и анодом не приложено внешнее напряжение. Электроны вылетают с катода по всем направлениям. Катод теряет электроны, то есть заряжается положительно. До анода долетают *некоторые* электроны и анод заряжается отрицательно. То есть между катодом и анодом возникает электростатическое поле, которое, во-первых, начинает тормозить электроны, летящие к аноду, а, во-вторых, стремится возвратить на катод вылетевшие с него под действием света электроны.

Максимально достигаемая при этом разность потенциалов между катодом и анодом устанавливается тогда, когда:

- ни один новый электрон не достигает анода (электростатическое поле не даёт ему это сделать) и анод не набирает большего отрицательного заряда;





- на катоде возникает динамическое равновесие: сколько новых электронов свет выбивает с катода, столько же электростатическое поле и возвращает обратно на катод - катод не набирает бОльшого положительного заряда.

А рассчитать эту ситуацию легко с помощью уравнения фотоэффекта. "Самый шустрый" электрон, выбитый светом с катода, который летит-летит к аноду, но так и не долетает - ему не даёт это сделать электростатическое поле, имеет кинетическую энергию,

определяемую уравнением Эйнштейна для фотоэффекта:  $\left(\frac{m \cdot v^2}{2}\right)_{max} = h \cdot \frac{c}{\lambda_1} - A$ . Но

эту кинетическую энергию "гасит" электростатическое поле, поэтому можно записать:

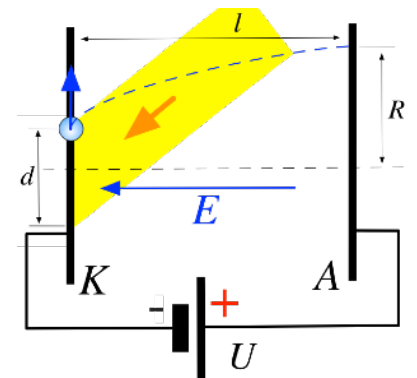
$\left(\frac{m \cdot v^2}{2}\right)_{max} = e \cdot U_1$ . Тогда:  $e \cdot U_1 = h \cdot \frac{c}{\lambda_1} - A$ . При облучении этого же фотоэлемента

фиолетовым светом получаем:  $e \cdot U_2 = h \cdot \frac{c}{\lambda_2} - A$ . Откуда:

$$e \cdot U_2 - e \cdot U_1 = h \cdot \frac{c}{\lambda_2} - h \cdot \frac{c}{\lambda_1} \text{ и находим спрашиваемое } U_2.$$

**> Задача 6.** Излучение аргонового лазера с длиной волны  $\lambda = 500$  нм сфокусировано на плоском фотокатоде в пятно диаметра  $d = 0,1$  мм. Работа выхода фотокатода  $A = 2$  эВ. На анод, расположенный на расстоянии  $l = 30$  см от катода, подано ускоряющее напряжение  $U = 4$  кВ. Найти диаметр пятна фотоэлектронов на аноде. Анод считать плоским и расположенным параллельно поверхности катода.

**Решение:** Электроны, вылетающие с катода под действием света, имеют *все возможные направления скорости*. Край пятна на аноде будут образовывать электроны, пролетевшие до встречи с анодом максимальное расстояние по вертикали. На край пятна на аноде попадут электроны, а) вылетевшие с края пятна на катоде и б) имеющие при вылете максимальную скорость, направленную параллельно поверхности катода и анода.



А максимальные скорости мы умеем считать с помощью

уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:  $\frac{m_e \cdot v_{max}^2}{2} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - A$ . На электрон действует

горизонтальная кулоновская сила  $F = e \cdot E = e \cdot \frac{U}{l}$ , ускоряющая его с ускорением

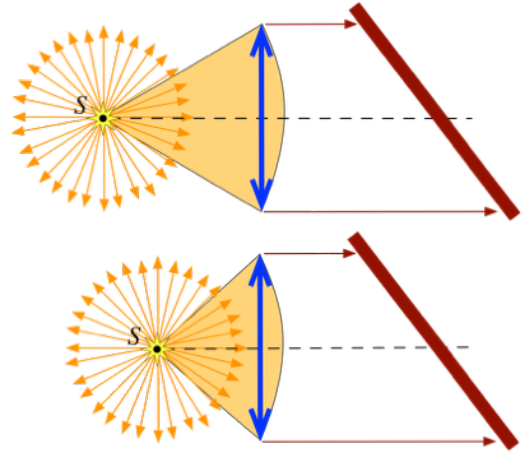
$a = e \cdot \frac{U}{l \cdot m_e}$ . По горизонтали электрон пролетит путь  $l = \frac{1}{2} a \cdot t^2$  (кинематика). А по

вертикали  $x = v_{max} \cdot t$ . Искомый радиус пятна на аноде:  $R = x + \frac{d}{2}$ .

> **Задача 7.** (из ЕГЭ) В установке по наблюдению фотоэффекта свет от точечного источника  $S$ , пройдя через собирающую линзу, падает на фотокатод параллельным пучком. В схему внесли изменение: на место первоначальной линзы поставили собирающую линзу того же диаметра, но с меньшим фокусным расстоянием. Источник света переместили вдоль главной оптической оси линзы так, что на фотокатод свет снова стал падать параллельным пучком. Как изменился при этом (уменьшился или увеличился) фототок насыщения? Объясните, почему изменяется фототок насыщения, и укажите, какие физические закономерности вы использовали для объяснения.

**Решение:** На рисунке показано как изменилась система: по сути источник света стал размещаться ближе к линзе. А следовательно, и световой поток, попадающий на линзу увеличился - увеличился телесный угол конуса тех лучей, которые на линзу стали попадать. И в итоге увеличилась интенсивность попадающего на фотокатод света.

По закону фотоэффекта ток насыщения зависит от интенсивности падающего света, то есть от количества фотонов, падающих на фотокатод в единицу времени. А значит, увеличивается и ток насыщения.



=====

## ■ Давление света

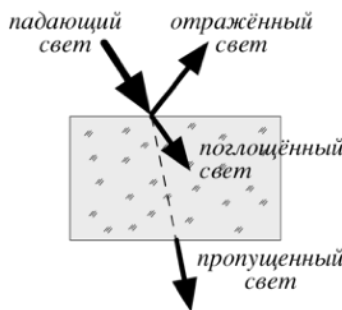
А давайте вспомним идеальный газ<sup>7</sup>. Основное уравнение МКТ газов связывает давление газа  $p$  и среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул  $E_k$ :

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \bar{E}_k, \text{ где } n - \text{ концентрация газа (число молекул в данном объёме).}$$

Молекулы идеального газа обладают кинетической энергией теплового движения и импульсом (в механическом смысле: как  $m \cdot \vec{v}$ ). И в результате соударений со стенками сосуда создают на них давление. Из механических представлений молекул идеального газа как невзаимодействующих друг с другом и упруго соударяющихся со стенками сосуда материальных точек и методами математической статистики и выведено основное уравнение МКТ газов.

И тогда возникает вопрос: а нельзя ли распространить эту аналогию и на фотоны, падающие на поверхность тела? Оказывают ли они давление? Ведь у фотонов есть и энергия и импульс<sup>8</sup>.

И ответ на этот вопрос: да, *свет оказывает давление на освещаемый объект!*



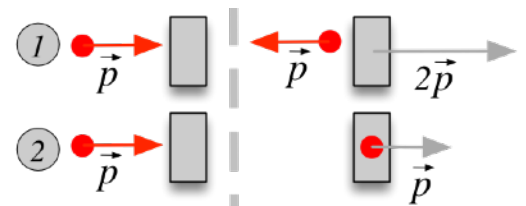
Но в отличие от молекул идеального газа надо учитывать специфику взаимодействия света с веществом.

Взаимодействие это выражается в трёх явлениях: отражении, поглощении и пропускании.

Пропущенный свет (то есть те фотоны, которые не провзаимодействовали с веществом, а пролетели сквозь него) не оказывает давление на тело.

Отраженный и поглощённый свет оказывают давление на тело.

Маленькая иллюстрация разницы этих давлений. Пусть к телу летят два фотона с импульсом  $p$  каждый. Первый фотон отражается от тела и летит обратно (аналог упругого соударения молекулы идеального газа со стенкой сосуда). Второй фотон поглощается телом (аналог абсолютно неупругого соударения).



Легко показать с помощью закона сохранения импульса, что в первом случае фотон передаст телу импульс  $2p$ , а во втором - импульс  $p$ .

Пусть за единицу времени на тело падает  $N$  фотонов.

Вводим обозначения:

$$\alpha = \frac{n_1}{N} - (n_1 - \text{число отражённых фотонов}) - \text{коэффициент отражения};$$

$$\beta = \frac{n_2}{N} - (n_2 - \text{число поглощённых фотонов}) - \text{коэффициент поглощения};$$

$$\gamma = \frac{n_3}{N} - (n_3 - \text{число пропущенных фотонов}) - \text{коэффициент пропускания}.$$

<sup>7</sup> О нём мы говорили в *Истории про Тепло - про молекулярно-кинетическую теорию (МКТ)*.

<sup>8</sup> Световое давление обусловлено именно импульсом фотонов.

Очевидно, что  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .  $\alpha, \beta, \gamma$  - оптические характеристики тела.

Световое давление на тело выражается формулой<sup>9</sup>:  $p = \frac{2\alpha + \beta}{S} \cdot \frac{W}{c}$ , где  $S$  - площадь тела;  $W$  - мощность потока света, падающего на тело;  $c$  - скорость света в вакууме.

В формулу постоянная Планка не вошла. Это означает, что полученный результат не является результатом квантовой физики и может быть получен из классических соображений. Кроме того, формула не зависит от частоты излучения, важна только полная мощность падающего излучения.

Для зеркальной поверхности ( $\alpha = 1, \beta = 0$ ) световое давление:  $p = \frac{2}{S} \cdot \frac{W}{c}$ ;

для абсолютно чёрного тела ( $\alpha = 0, \beta = 1$ ):  $p = \frac{1}{S} \cdot \frac{W}{c}$ .

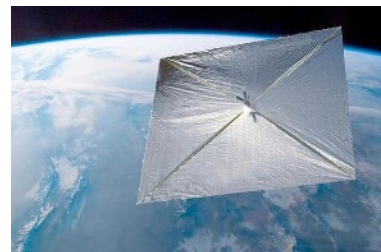
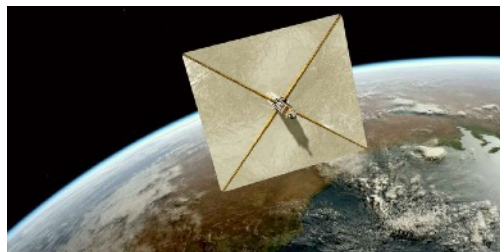
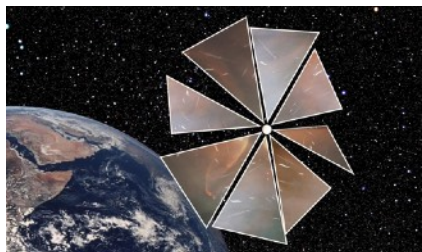
*Давление на зеркальную поверхность в два раза больше!*

В качестве оценки величины давления света, найдём какое давление создаёт свет Солнца на зеркальную поверхность на орбите Земли. Интенсивность солнечного излучения на земной орбите равно  $\frac{W}{S} \approx 1,4$  кВт/м<sup>2</sup>. Для зеркальной поверхности

$p = \frac{2}{S} \cdot \frac{W}{c} = 9,3 \cdot 10^{-6}$  Па. Эта величина очень маленькая: при приложении этого

давления к площадке площадью 1 квадратный сантиметр на площадку будет действовать сила примерно равная  $10^{-9}$  Н. Эта сила равна силе тяжести, действующей на объект массой 0.1мкг. Для сравнения, вес макового зёрнышка составляет около 0.5 мг - в тысячу раз больше!

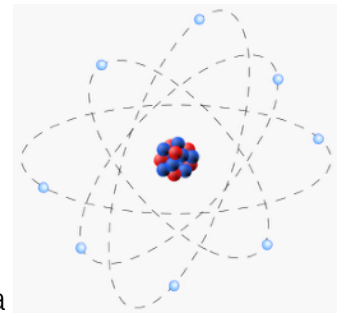
Давление света имеет и практическое применение. Несколько космических аппаратов используют *солнечный парус* в качестве дополнительного двигателя. И хотя его "мощность" невелика (около 9 микроньютонов на квадратный метр), но разгон происходит постоянно и постепенно "накапливается".



<sup>9</sup> Её вывод из соображений классической физики весьма прост - через второй закон Ньютона в импульсной форме.

## → Строение атома

К началу 20-го века физики пришли к соглашению, что атом имеет планетарную<sup>10</sup> структуру: в центре расположено положительно заряженное массивное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, а вокруг него по орбитам движутся электроны. В целом заряд атома равен нулю.



Простейший из атомов - атом водорода: один протон в качестве ядра и один электрон на круговой орбите вокруг него.

Давайте сначала поговорим о размерах атома водорода. Вот некоторые цифры:

- масса электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг;
- заряд электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- масса протона  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг,  $m_p = 1836 \cdot m_e$ ;
- заряд протона  $q_p = -e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- радиус протона  $r_p = 0,83 \cdot 10^{-15}$  м;
- радиус электрона  $r_e = 0,25 \cdot r_p$ ;
- радиус атома водорода (радиус орбиты электрона)  $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$  м.

Чтобы лучше ощутить соотношения между этими цифрами: толщина среднего человеческого волоса - 80 микрон (80 миллионных долей метра). Так вот, на диаметре волоса разместится около **ста миллиардов** атомов водорода. Ой!



Ещё сравнение: давайте мысленно увеличим атом водорода до размеров московской кольцевой автомобильной дороги, положив её радиус в 15 километров. Коэффициент увеличения составит

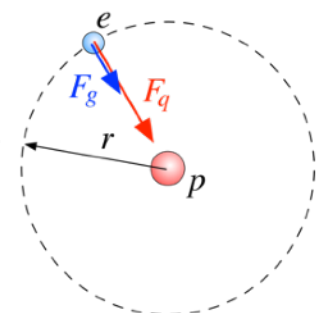
$$k = \frac{15 \cdot 10^3}{0,53 \cdot 10^{-10}} = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ раз. Тогда "протон"}$$

расположится в центре Москвы и будет иметь радиус  $\approx 0,23$  метра (станет размером со средний арбуз), а электрон на 15-километровой орбите станет размером с хорошее яблоко диаметром около 10 сантиметров. Ещё раз, ой!

Чем заполнено пространство внутри атома? Полями, удерживающими электрон на орбите.

А давайте с помощью известных нам законов *классической физики* посчитаем параметры движения электрона по орбите атома водорода. На электрон действуют две силы: сила гравитационного притяжения к протону и кулоновская сила притяжения к нему же. Посчитаем их.

$$F_g = G \frac{m_e \cdot m_p}{r^2} \approx 3,63 \cdot 10^{-47} \text{ Н}; F_q = k \frac{e^2}{r^2} \approx 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

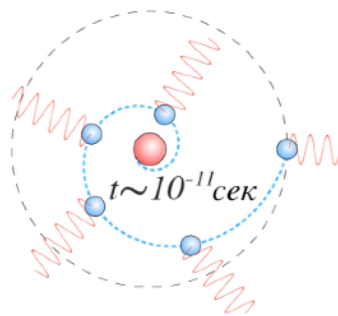


<sup>10</sup> Подобно структуре солнечной системы.

Кулоновская сила больше гравитационной в  $\approx 10^{40}$  раз! Ну об этом мы уже говорили. Посчитаем кинематику движения электрона по орбите:

- скорость  $F_q = \frac{m_e \cdot v^2}{r} \Rightarrow v = 2,18 \cdot 10^6$  м/с или 2180 км/с (электрон должен делать порядка  $10^{16}$  оборотов вокруг ядра в секунду !!!)
- центростремительное ускорение  $F_q = m_e \cdot a \Rightarrow a = 0,9 \cdot 10^{23}$  м/с<sup>2</sup> (!!!).

А коли отрицательно заряженный электрон движется с ускорением, то в соответствии с классической электродинамикой Максвелла<sup>11</sup> он должен постоянно излучать электромагнитные волны. А коли он постоянно излучает ЭМ-волны, то он постоянно теряет энергию. А коли он постоянно теряет энергию, то он должен в итоге упасть на ядро - и атом "схлопнется". И расчеты показывают, что время существования атома должно составлять порядка  $10^{-11}$  секунды. То есть по представлениям классической физики стабильного атома существовать не должно. А они существуют! Классическая физика опять спасовала!



Выход из тупика был предложен датским физиком Нильсом Бором в 1913 году, введя в теорию атома идеи квантования. Развивая идею Макса Планка о квантовании энергии частиц (излучении их отдельными порциями), Бор предположил, что и энергетические состояния электронов на атомных орбитах также квантуются.

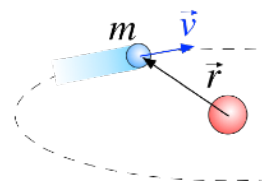
## ■ Атомная модель Бора

Бор ввёл следующие постулаты строения атома водорода:

**Первый постулат Бора** Электрон в атоме может двигаться только по определенным стационарным ("разрешенным") орбитам, каждой из которых можно приписать определенный номер  $n = 1, 2, 3, \dots$  *Движущийся по разрешенной стационарной замкнутой орбите электрон, вопреки законам классической электродинамики, не излучает энергии.*

*$n$  называется "главное квантовое число"*

Что же квантуется в атоме Бора? Квантуется момент импульса<sup>12</sup> электрона при движении его по орбите. Напомню: при вращательном движении моментом импульса вращающегося тела называется величина  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{m}\vec{v}$ .



Бор утверждал: разрешенными стационарными орбитами являются только те, для которых *момент импульса электрона кратен величине постоянной Планка:  $L_n = m_e \cdot v \cdot r_n = n \frac{h}{2\pi}$* , где  $L_n$  - момент импульса электрона при движении по  $n$ -й разрешенной орбите,  $r_n$  - радиус  $n$ -й разрешенной орбиты.

<sup>11</sup> Смотри Историю про Магнетизм.

<sup>12</sup> О моменте импульса смотри Историю про Вращение.

Почему Бор решил, что квантуется именно момент импульса? Потому, что а) размерность постоянной Планка как раз и соответствует размерности момента импульса; б) квантовать надо параметр именно вращательного движения электронов по орбитам.

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущегося электрона (а также момент импульса) может быть любой. Он находится в противоречии и с электродинамикой, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

Из классической ньютоновской кинематической формулы для электрона

$$\frac{m_e \cdot v^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2}$$

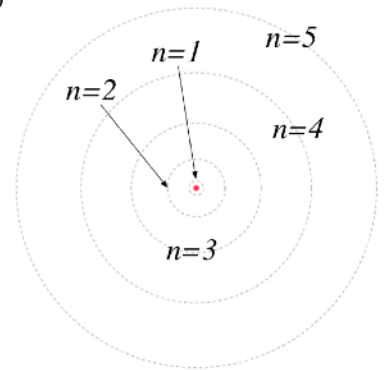
и из условия квантования момента импульса электрона вытекает

выражение для радиусов разрешенных орбит:  $r_n = \epsilon_0 \frac{h^2}{\pi \cdot m_e \cdot e^2} n^2, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$ .

Радиус первой орбиты ( $n = 1$ )  $r_1 = \epsilon_0 \frac{h^2}{\pi \cdot m_e \cdot e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10}$

и называется **первым боровским радиусом**. И тогда  $r_n = r_1 \cdot n^2$ .

Радиусы разрешенных орбит пропорциональны квадратам их номеров. Разрешенные орбиты могут быть как угодно велики. Вот они показаны на рисунке.



Определим энергию атома водорода для электронов на разрешенных стационарных орбитах. Полная энергия атома водорода в модели Бора равна сумме кинетической энергии электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром. Поскольку электрон и ядро (протон) имеют разные знаки, то потенциальная энергия взаимодействия

электрона с ядром будет **отрицательной**<sup>13</sup>. Тогда:  $E_n = \frac{m_e \cdot v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r_n}$ . И после

преобразований получаем  $E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 \cdot r_n}$  или  $E_n = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0^2} \cdot \frac{m_e \cdot e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$

Энергетическое состояние при  $n = 1$  называется **основным состоянием**:

$$E_1 = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0^2} \cdot \frac{m_e \cdot e^4}{h^2} = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ.}$$

И тогда

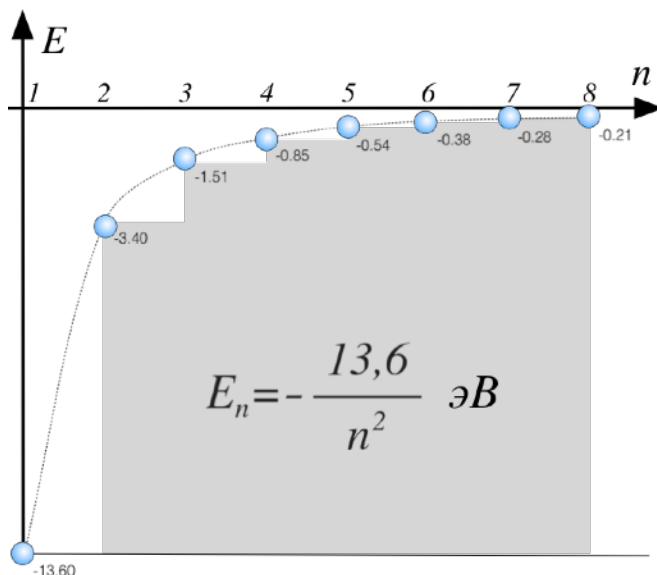
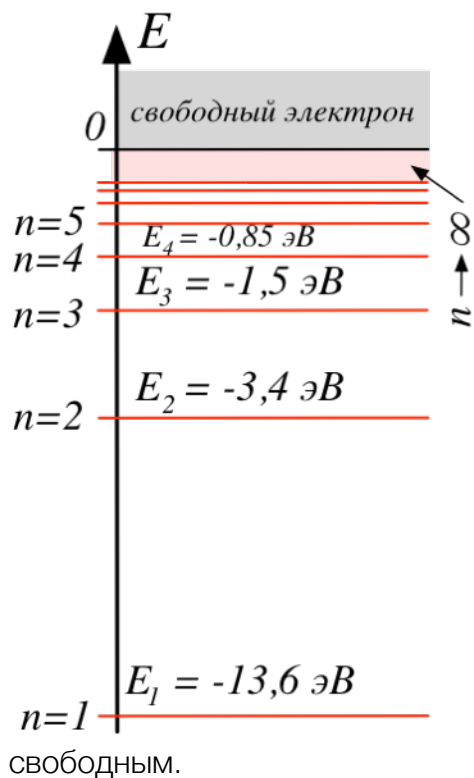
$$E_n = E_1 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

И видно, что энергетические состояния атома тоже квантуются (являются дискретными) при нахождении электрона на разных разрешенных орбитах.

*Возможные значения энергии атома водорода являются набором дискретных фиксированных величин и заключены в диапазоне от -13,6 эВ до 0.*

<sup>13</sup> Смотри Историю про Электростатику.

Вот как графически можно представить эти энергетические состояния.

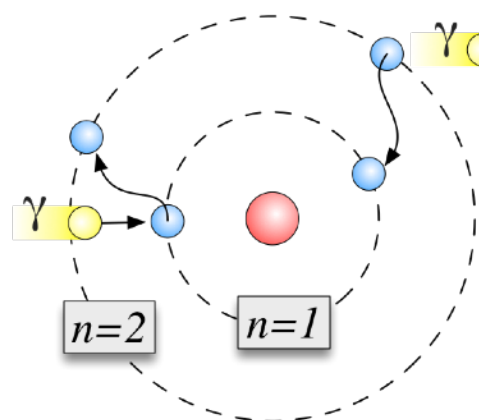


С ростом номера орбиты полная энергия атома возрастает (не забываем, что она отрицательна). И на бесконечности (при  $n = \infty$ ) она обращается в ноль и электрон становится свободным.

**Второй постулат Бора** При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (или поглощается) **один** фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний:  $E_k - E_m = h \cdot \nu_{km}$

Если Первый постулат Бора позволяет описать разрешенные стационарные орбиты электронов в атоме водорода и энергию атома этих стационарных состояний, то Второй постулат описывает переходы между этими стационарными состояниями. Во втором постулате используется планковская энергия фотона.

Согласно Второму постулату Бора электрон может излучать фотоны только при переходе с одной орбиты на другую.

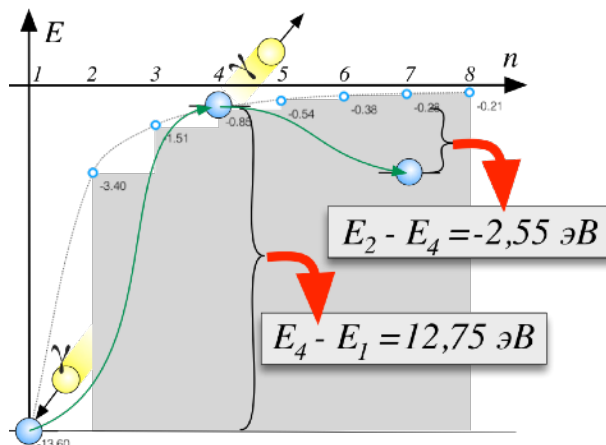


Энергетически Второй постулат Бора понятен. Рассмотрим пример. Электрон атома водорода находится на орбите первого боровского радиуса  $r_1$  (самой низкой орбите из разрешенных) и обладает энергией  $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$  (самой маленькой энергией из возможных). Если он перескочит на вторую орбиту ( $n = 2$ ), то станет обладать энергией  $E_2 = -3,4 \text{ эВ}$ , то есть он увеличит свою энергию. А за счёт чего он увеличит свою энергию? Только за счёт энергии прилетевшего к этому электрону фотона.

Если же электрон, находящийся на второй орбите и имеющий энергию  $E_2 = -3,4 \text{ эВ}$ , "захочет" перескочить на первую орбиту (о том, когда он это "захочет" - чуть ниже), то он должен понизить свою энергию до  $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ , испустив фотон с энергией, равной разности  $E_2 - E_1$ .



Точно также и для любого другого перехода: для того, чтобы электрон мог перейти со своей орбиты на более высокую (с бОльшей энергией) (чтобы он "вскарабкался" вверх по серой лесенке энергий - как на рисунке), он должен поглотить фотон с энергией, равной разности энергий орбит (с энергией, равной высоте разделяющих "ступенек" на серой лесенке энергий). На рисунке: при поглощении фотона с энергией  $E_4 - E_1 = 12,75$  эВ электрон перескочит с первой орбиты на четвёртую.



И наоборот: при понижении своей орбиты электрон испустит фотон с энергией, равной разности энергий орбит. На рисунке: при переходе с четвёртой орбиты на вторую электрон испустит фотон с энергией  $E_2 - E_4 = 2,55$  эВ.

*Атом, как и всякая физическая система, стремится к устойчивому состоянию с минимальной энергией.* Мы уже говорили, что таким **основным состоянием** для атома является положение электрона на первой орбите с минимальной энергией  $E_1 = -13,6$  эВ. Если электрон находится на первой орбите, откуда ему некуда переходить, то в этом состоянии электрон живет неограниченно долго. Таким образом объяснялась стабильность атома.

Если атому сообщить дополнительную энергию, то он может перейти в **возбужденное состояние**. Электрон при этом переходит на орбиту бОльшего радиуса. Возбуждение атомов может инициироваться различными способами, например, столкновением атомов газа в хаотическом тепловом движении, пропусканием через газ потока высокоэнергетических частиц и, наконец, поглощением атомами излучения (фотонов).

Если энергия, переданная электрону будет достаточно велика, то электрон может преодолеть силу притяжения к ядру и оторваться от атома - стать свободным электроном. Такой процесс называют **ионизацией атома**. Очевидно, что минимальная энергия, необходимая для ионизации атома водорода равна  $E_1 = -13,6$  эВ. Это значение хорошо согласуется с экспериментальными данными для энергии ионизации атома водорода.

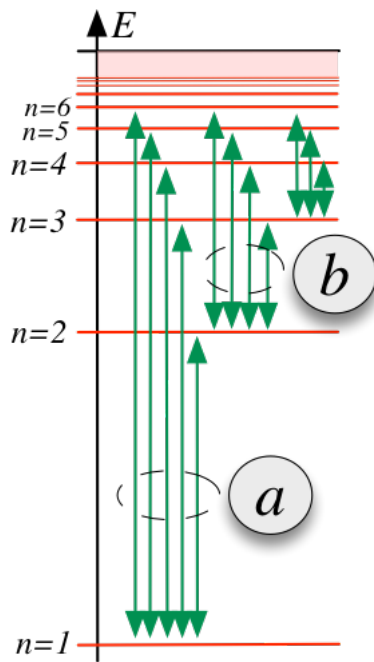
*В возбужденном состоянии атом долго находиться не может.* Как и любая физическая система, атом стремится занять состояние с наименьшей энергией. Поэтому через время порядка  $10^{-8}$  с возбужденный атом самопроизвольно переходит в состояние с меньшей энергией, испуская при переходе фотон с соответствующей энергией. Такой процесс продолжается до тех пор, пока атом не окажется в основном состоянии.



"А как быстро электрон перескакивает с одной орбиты на другую? Со скоростью света?" - спрашивает вдумчивый ученик.

Хороший вопрос. Уж со скоростью света электрон перескочить с орбиты на орбиту точно не может: у электрона ненулевая масса покоя, поэтому со скоростью света он двигаться не может. Как и большинство явлений в мире квантовой механики, процесс перескока электрона с орбиты на орбиту не так просто представить наглядно. Квантовая механика говорит: *электрон просто исчезает с одной орбиты и материализуется на другой, не пересекая пространства между ними. Этот эффект называли "квантовым скачком".*

А давайте вернёмся к формуле из Второго постулата Бора:  $E_k - E_m = h \cdot \nu_{km}$ . Перепишем её так:  $h \cdot \nu_{km} = E_1 \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ , где  $E_1$  - энергия основного состояния -13,6 эВ.  $k$  и  $m$  - натуральные числа. В зависимости от соотношения между  $k$  и  $m$  фотон поглощается или испускается при переходе  $k \rightarrow m$ . Из этой формулы следует, что так же, как возможные значения энергии состояний атома водорода являются набором фиксированных величин, так и частоты фотонов (энергии фотонов), поглощение или испускание которых электроном приводит к смене орбит, также являются набором фиксированных величин. Ух, какая длинная фраза!



Короче: **частоты фотонов, меняющие орбиты электронов, тоже фиксированы.**

Вот на рисуночке зелёными стрелочками я нарисовал возможные переходы с орбиты на орбиту. Формально, поскольку количество разрешенных орбит не ограничено, то и стрелочек надо рисовать бесконечное количество. Но я нарисовал не все. Размеры этих стрелочек соответствуют энергиям фотонов, поглощаемых / испускаемых при переходах.

Давайте посчитаем энергию и частоту фотонов, испускаемых при переходе электрона с орбит номер  $m = 2, 3, 4, 5, 6$  на первую (группа стрелочек *a*). Вот такая получается табличка: энергия фотона считается как  $E = E_m - E_1$ , частота фотона  $\nu$  выражена в терагерцах ( $10^{12}$  Гц), а  $\lambda$  - длина волны света, который

| $m$ | $E$ , эВ | $\nu$ , ТГц | $\lambda$ , нм |
|-----|----------|-------------|----------------|
| 2   | 10.20    | 2468        | 122            |
| 3   | 12.09    | 2926        | 103            |
| 4   | 12.75    | 3086        | 97             |
| 5   | 13.06    | 3161        | 95             |
| 6   | 13.22    | 3199        | 94             |

образуют такие фотоны<sup>14</sup>.

И эти длины волн относятся к **экстремальному диапазону ультрафиолетового излучения.**

А теперь посчитаем энергию и частоту фотонов, испускаемых при переходе электрона с орбит номер  $m = 3, 4, 5, 6$  на вторую (группа стрелочек *b*).

| $m$ | $E$ , эВ | $\nu$ , ТГц | $\lambda$ , нм |
|-----|----------|-------------|----------------|
| 3   | 1.89     | 457         | 656            |
| 4   | 2.55     | 617         | 486            |
| 5   | 2.86     | 692         | 433            |
| 6   | 3.02     | 731         | 410            |

И длины волны света, который образуют такие фотоны, относятся уже к **видимому свету.**

Мы вернёмся к этим табличкам, когда будем говорить о спектрах атома водорода.

<sup>14</sup> Длина волны - это макро-характеристика света как ЭМ-волны. К фотону применительно понятие частота.



## ■ Волны де Бройля

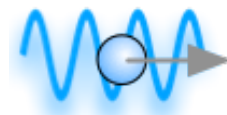
Один из фактов микромира заключается в том, что его объекты - такие как электроны или фотоны - совсем не похожи на привычные объекты макромира. Они ведут себя и не как частицы, и не как волны, а как совершенно особые образования, проявляющие и волновые, и корпускулярные свойства в зависимости от обстоятельств

Планк высказал гипотезу о том, что свет излучается и поглощается отдельными порциями - квантами. Последовавшие за тем эксперименты подтвердили эту гипотезу при объяснении явления фотоэффекта и структуры атома водорода. Эти кванты - фотоны - во многом похожи на частицы: они обладают определённой энергией и импульсом, взаимодействуют с веществом как целое. В то же время давно известны волновые свойства ЭМ излучения - они проявляются, например, в явлениях дифракции и интерференции света. Таким образом, можно говорить о двойственной природе фотона - о **корпускулярно-волновом дуализме**<sup>15</sup>.

В 1924 французский физик Луи де Бройль выступил с гипотезой о том, что корпускулярно-волновой дуализм присущ всем без исключения видам материи - электронам, протонам, атомам и т.д., причём количественные соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц те же, что и установленные ранее для фотонов. А именно, если частица имеет энергию  $E$  и импульс  $p$ , то с ней связана волна, частота которой  $\nu = \frac{E}{h}$  и длина волны  $\lambda = \frac{h}{p}$ , где  $h$  - постоянная Планка. Эти волны и получили название **волны де Бройля**.

Для человека массой 70 кг, движущегося со скоростью 5 км/ч, длина волны де Бройля составляет  $\sim 6,8 \cdot 10^{-38}$  м, что лежит за пределами доступной наблюдению области. Поэтому ясно, что волновые свойства несущественны в механике макроскопических тел. А для электронов с энергией порядка 10 эВ длина волны де Бройля  $\sim 12,4 \cdot 10^{-10}$  м, что уже соизмеримо с размерами атома водорода. То есть волны де Бройля следует учитывать в явлениях микромира при рассмотрении поведения квантовых частиц.

Гипотезу де Бройля можно выразить так: при желании можно рассматривать квантовый объект как частицу, обладающую импульсом  $p$ ; с другой стороны, ее можно рассматривать и как волну, длина которой равна  $\lambda$  и определяется соотношением  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Иными словами, волновые и



корпускулярные свойства квантовой частицы фундаментальным образом взаимосвязаны<sup>16</sup>. Волновые свойства электрона были экспериментально неоднократно подтверждены.

**Волны де Бройля и атом Бора** Что квантовал Бор для определения разрешенных орбит электронов в атоме водорода? Он квантовал момент импульса электрона при движении его по орбите. И квантовал он его для того, чтобы определить те орбиты, по которым электрон будет двигаться, не излучая.

С помощью волн де Бройля можно по-другому (эквивалентно) определить разрешенные орбиты.

<sup>15</sup> Дуализм - двойственность.

<sup>16</sup> В современной квантовой механике для описания волновых свойств частиц используется **волновая функция**. Волны де Бройля были её предвестниками.

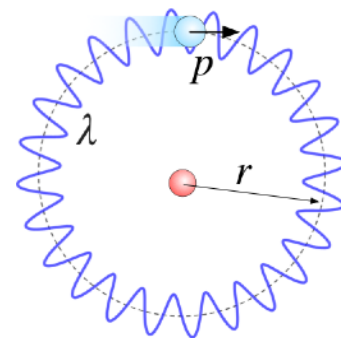
Разрешенными (стационарными) орбитами движения электрона в атоме являются те, в длину которых укладывается целое число волн де Бройля электрона:

$$2\pi \cdot r_n = n \cdot \lambda, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

А поскольку длина де-бройлевской волны выражается через

импульс электрона как  $\lambda = \frac{h}{p}$ , то  $2\pi \cdot r_n = n \cdot \frac{h}{p}$ ,  $(n = 1, 2, 3, \dots)$ .

Это приводит к тем же численным результатам для разрешённых орбит, что и формулировка Бора, но наделяет разрешённые орбиты несколько иным физическим смыслом.



Ведь если на длине орбиты будет укладываться целое число волн де Бройля, то такая волна будет *стоячей*<sup>17</sup>. А стоячие волны энергию не переносят, поэтому электрон не будет излучать. Что нам и нужно. Очень просто и физически безупречно.

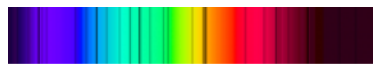


*И модель атома Бора с его постулатами, и волны де Бройля были интуитивными гипотезами на заре зарождения квантовой механики. Они хорошо объясняли некоторые явления микромира, но имели свои ограничения. Сформировавшаяся к середине 30-х годов 20-го века квантовая механика дала физически полное описание всех явлений микромира. И модель Бора и волны де Бройля "вписались" в эти объяснения либо как частные случаи, либо как приближения. Однако они сыграли важную роль в развитии физики.*

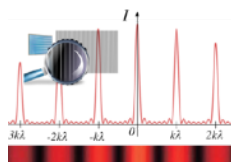
<sup>17</sup> Смотри *Историю о Колебаниях*.

## → Спектры атома водорода

Под спектром в общем смысле понимают распределение значений некоторой физической величины (энергии, частоты, массы, скорости и пр.). В Истории про Оптику мы говорили с вами о спектрах ЭМ- и, в частности, световых волн. И применительно к Оптике под спектром понимают распределение интенсивности ЭМ-волны в зависимости от частоты (длины волны).



Вот перед вами спектр солнечного излучения. Оптические приборы, которые умеют входной поток ЭМ-волны превращать в такие спектры, называются *спектрографами*: от простейшей призмы и дифракционной решетки до сложных спектроанализаторов.

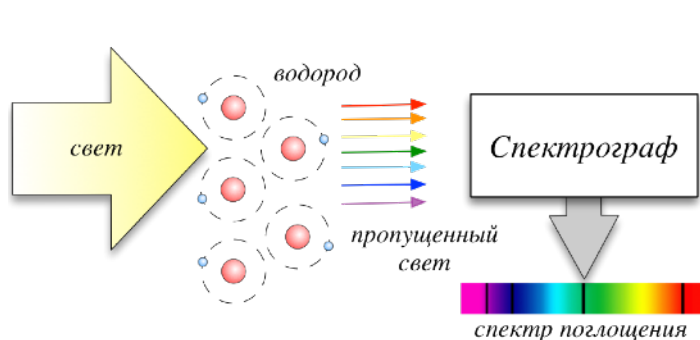


И, естественно, можно рассматривать и анализировать спектры в разных диапазонах ЭМ-волн: рентгеновском, ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и радио-диапазоне.

И ещё в Истории про Оптику мы с вами говорили о том, что все физические тела (а точнее - их атомы) испускают и поглощают ЭМ-излучение. И спектры испускаемых и поглощаемых ЭМ-волн несут важную информацию о физическом теле. Так, анализ спектров излучения Солнца или далёкой звезды позволяет сделать выводы об их химическом составе.

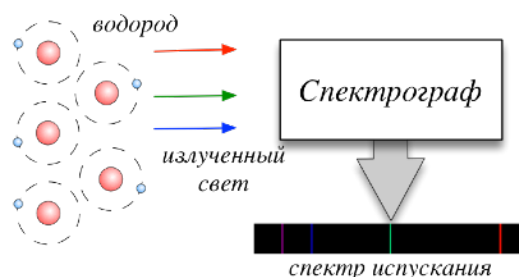
Во второй половине 19-го века, когда бурно развивались методы *спектрографии*, ученые стали рассматривать спектры чистых химических элементов. И начали они, естественно, с простейшего - водорода.

Можно рассматривать два вида спектров водорода (да и любого другого химического вещества): спектр пропускания и спектр поглощения. Вот в чём идея и в чём разница.



Будем облучать водород (для простоты будем считать водород атомарным, хоть мы и помним, что молекула водорода состоит из двух атомов) интенсивным источником белого света ("белого" для того, чтобы в нём присутствовал свет всех длин волн видимого спектра). А с другой стороны поставим спектрограф: он будет ловить прошедшие сквозь водород волны света.

Непрошедшие сквозь водород волны света (поглощённые водородом) на результирующем спектре будут отображаться в виде чёрных линий: свет данной длины волны не прошёл, значит в соответствующей этой длине волны части спектра "света нет". Так формируется *спектр поглощения*: он показывает свет каких длин волн поглотился (в нашем случае - водородом).



А есть и другой способ. Давайте просто сильно нагреем водород и будем просто наблюдать с помощью спектрографа за теми волнами, которые остывающий водород испускает (излучает). Спектрограф при этом будет формировать нам *спектр пропускания* (испускания).

Когда такие спектры водорода были впервые получены, то они вызвали массу вопросов.



спектр поглощения водорода (видимый диапазон)



спектр пропускания водорода (видимый диапазон)

- Спектры эти оказались линейчатыми (в них были дискретные спектральные линии): атом водорода поглощал и излучал вполне определенные длины волн.
- Спектры поглощения и пропускания водорода совпадали: атом водорода поглощал и излучал одни и те же длины волн.
- Точно такая же картина повторилась и в других диапазонах: ультрафиолетовом и инфракрасном.

Физика того времени не могла объяснить линейчатую структуру спектра атома водорода. Но она смогла чисто эмпирически подобрать формулу для определения поглощаемых и испускаемых частот (формула Ридберга):  $\nu = R \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ , где  $k$  и  $m$  - натуральные числа, а  $R$  - константа - **постоянная Ридберга**  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  Гц. Подставляя в эту формулу разные  $k$  и  $m$  и получишь точные частоты поглощения и испускания водорода. Но почему именно так - объяснения не было.

А вам не напоминает ли эта формула какую-нибудь другую, о которой мы недавно говорили? Например, вот эту:  $h \cdot \nu_{km} = E_1 \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right)$  [1].

Бор вспоминал: "Когда я увидел формулу Ридберга, то мне всё стало ясно". Нам же ведь тоже уже всё стало ясно?

Ну действительно: когда мы облучаем водород белым светом (собираясь определить спектр его поглощения), то фотоны света (а теперь мы говорим о фотонах, поскольку речь идёт о взаимодействии с электронами) с частотами, соответствующими формуле [1], поглощаются электронами и вызывают переход этих электронов на более высокие орбиты - атомы водорода переходят в возбуждённое состояние. То есть волны света с такими частотами поглощаются водородом и они не проходят сквозь водород: отсюда появляются чёрные линии в спектре поглощения. А волны света с другими частотами электроны "не интересуют" и они свободно проходят сквозь водород.

Когда же мы, сильно нагреем водород (то есть переведём его атомы в возбуждённое состояние) и будем наблюдать за ним остывающим (собираясь определить спектр его испускания), то атомы водорода начнут стремиться перейти в основное состояние с минимальной энергией и электроны начнут переходить с высоких орбит на первую, испуская фотоны с частотой, определяемой формулой [1]. То есть волны света с такими частотами испускаются атомом водорода.

Совпадение экспериментальных значений частот и боровских расчётных было полным. И таблички, которые мы составляли выше, такие значения частот и длин волн содержат.

=====

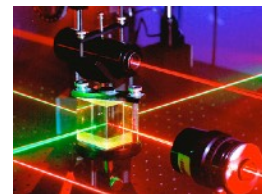
**Формулы и константы, которые надо знать для решения задач по теме  
"Модель атома водорода Бора и спектры водорода"**

|  |   |
|--|---|
| Первый боровский радиус<br>( $n = 1$ )           | $r_1 = \varepsilon_0 \frac{h^2}{\pi \cdot m_e \cdot e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$                                  |
| Радиусы разрешенных орбит<br>электронов          | $r_n = \varepsilon_0 \frac{h^2}{\pi \cdot m_e \cdot e^2} n^2, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$                                   |
|  | $r_n = r_1 \cdot n^2$   |
| Основное энергетическое<br>состояние ( $n = 1$ ) | $E_1 = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0^2} \cdot \frac{m_e \cdot e^4}{h^2} = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}$ |
| Разрешенные энергии электрона                    | $E_n = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0^2} \cdot \frac{m_e \cdot e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$      |
|  | $E_n = E_1 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$   |
| Переход электронов                               | $h \cdot \nu_{km} = E_k - E_m$  |
|  | $h \cdot \nu_{km} = E_1 \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right)$   |
| Частота и длина волны света                      | $\nu = \frac{c}{\lambda}$   |
| <b>Константы</b>                                 |   |
| Постоянная Планка                                | $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{кг} / \text{с}$   |
| Скорость света в вакууме                         | $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$   |
| Электрон-вольт $\leftrightarrow$ Джоуль          | $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \leftrightarrow 1 \text{ Дж} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$               |



## → Лазеры

Слово "лазер"<sup>18</sup> прочно вошло в нашу повседневную жизнь: лазерный проигрыватель, лазерная указка, лазерный меч из "Звёздных войн" и пр. Давайте разберемся в физике процесса.



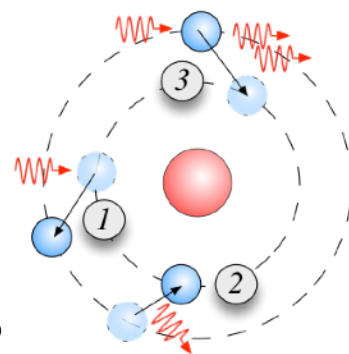
Знание атомной модели Бора нам поможет. Пусть этой модели уже больше ста лет, пусть она не на 100% квантовая, пусть она хорошо описывала только атом водорода, но идеи, лежащие в её основе, верны:

- атом любого вещества (не только водорода) стремится к минимальному энергетическому состоянию (**основному** или **стабильному** состоянию) и в этом состоянии он может находиться бесконечно долго;
- неосновные энергетические состояния атома являются **возбужденными**;
- электроны атома движутся по квантованным (разрешенным) орбитам и обладают квантованными энергиями на этих орбитах;
- переходы электронов с орбиты на орбиту связаны с поглощением/испусканием ими фотонов с энергией, равной разности энергий этих орбит.

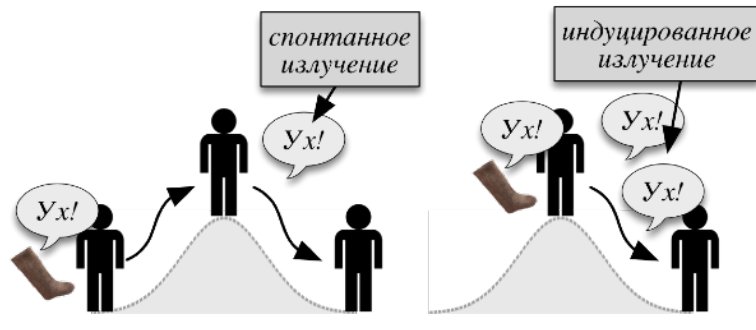
Эти принципы являются принципами квантовой механики.

Рассмотрим знакомую нам картинку.

- (1) Атом находится в основном состоянии - электрон располагается на первой орбите. Прилетает фотон с энергией, равной разности энергий второй и первой орбит. Электрон поглощает этот фотон и переходит на вторую орбиту - атом переходит в возбужденное состояние<sup>19</sup>.
- (2) Но атом может находиться в возбужденном состоянии недолго - порядка  $10^{-8}$  секунды. После чего электрон возвращается на первую орбиту, испуская фотон соответствующей энергии. Атом переходит в основное состояние. Такой "самостоятельный" возврат электрона с испусканием фотона называется **спонтанным излучением**. И мы этот процесс уже рассматривали в атоме Бора.
- (3) Но если за то короткое время, пока электрон находится на второй орбите, мы успеем облучить его фотоном с энергией, равной разности энергий второй и первой орбит, то электрон испустит **два одинаковых** фотона и перейдет на первую орбиту. И такой процесс (когда электрон успевает испустить два одинаковых фотона, возвращаясь на основную орбиту) называется **индуцированным излучением**<sup>20</sup>. Вот он-то и лежит в основе работы лазеров.



Позволю себе нестандартную аналогию понятий спонтанного и индуцированного излучений.



Вот стоит мальчишка перед небольшой ледяной горкой. Стоит себе и стоит, на горку лезть не собирается. Тут его приятель к-а-а-к наподдаст ему валенком - "Ух!" От полученной энергии наш мальчишка на горку взлетает.

<sup>18</sup> **LASER** - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - усилитель света вынужденного (индуцированного) излучения

<sup>19</sup> Переход атома в возбужденное состояние может происходить как из-за поглощения фотона с соответствующей энергией, так и из-за приобретения атомом энергии в результате взаимодействия с другими атомами или столкновения с нейтронами.

<sup>20</sup> Эйнштейн еще 20-х годах 20-го века предположил возможность индуцированного излучения.

Побалансировал-побалансировал, да и скатился вниз, издав громкое "Ух!".

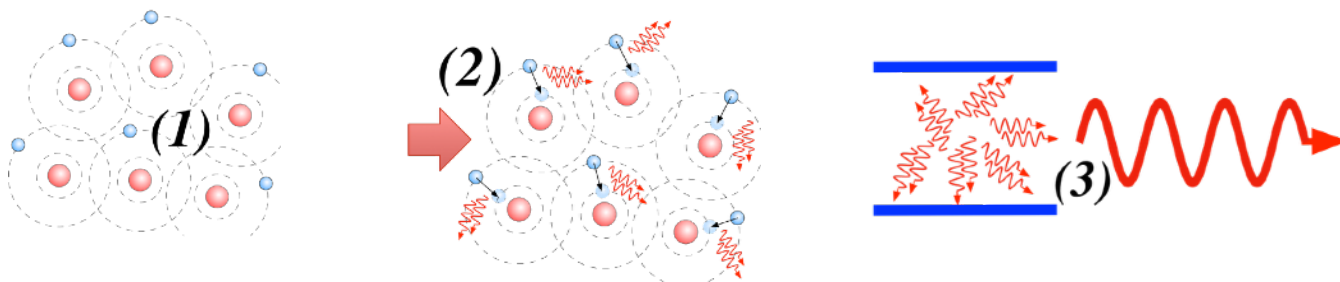
А вот вторая ситуация: тот же мальчишка вскарабкался как-то на горку, стоит и балансирует. А неугомонный приятель подкрался сзади и снова - к-а-а-к наподдаст ему валенком - "Ух!". И наш мальчишка снова катится вниз, издав "Ух!" **ДВА** раза. Вот вам пример спонтанного и индуцированного излучений.

Переходы при спонтанном излучении осуществляются неодновременно и независимо, поэтому фазы фотонов, излучаемых при этих переходах, не связаны между собой. Направление распространения излучаемого фотона и его поляризация носят случайный характер. Таким образом, спонтанное излучение является **некогерентным**.

Индуцированное излучение по своим свойствам отличается от спонтанного. Взаимодействие возбужденного атома с фотоном приводит к тому, что электрон испускает **два одинаковых** фотона. Фактически, это означает, что в ответ на воздействие первоначальной волны атом излучает волну той же частоты, фазы, поляризации, направления распространения и **удвоенной амплитуды** - то есть первоначальная волна усилилась.

Итак: **индуцированное излучение позволяет усилить первоначальную волну.**

Чтобы этот эффект усиления работал на макро-уровне, надо решить три задачи:



- (1) одновременно перевести в возбуждённое состояние очень много атомов - подготовить их к индуцированному излучению;
- (2) успеть за очень короткое время (пока все атомы находятся в возбуждённом состоянии) облучить их фотонами, спровоцировав индуцированное излучение - одновременный переход всех атомов в основное невозбуждённое состояние с испусканием по паре фотонов каждым атомом. Все испущенные фотоны будут одинаковы, но направлены они будут в разные стороны;
- (3) собрать все разнонаправленно излучённые фотоны в один луч.

Решением этих трёх задач физики занимались сорок лет - первый лазер был построен в 1960-м году.

Пара "лазерных" определений:

- вещество, атомы которого испускают индуцированное излучение, называется **рабочим телом**;
- процесс перевода большого количества атомов рабочего тела в возбуждённое состояние называется **накачкой**.

Для решения первых двух задач важно подобрать вещество - рабочее тело, атомарно-молекулярная структура которого обладала бы определёнными свойствами.

Поговорим о рубине и **рубиновом лазере** (такой лазер можно считать простейшим и его первым и построили) - наиболее распространённом и мощном импульсном лазере.

## → Рубиновый лазер

Что такое рубин?

Гуманитарий ответит: "Рубин - это драгоценный камень красного цвета. Он постоянно упоминается в стихах. Вот, например, в очень красивом романсе:



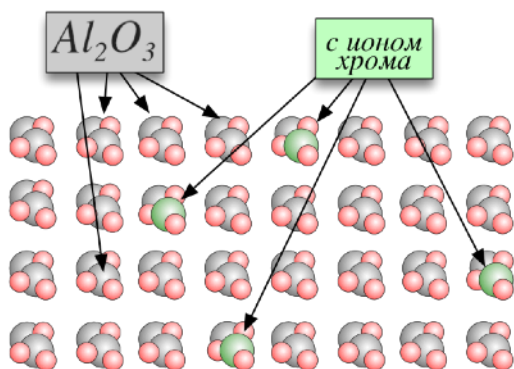
"... Нет, ни пурпурный рубин, ни аметист лиловый,  
Ни наглой белизной сверкающий алмаз  
Не подошли бы так к лучистости суровой  
Холодных ваших глаз..."<sup>21</sup>



ювелирный рубин

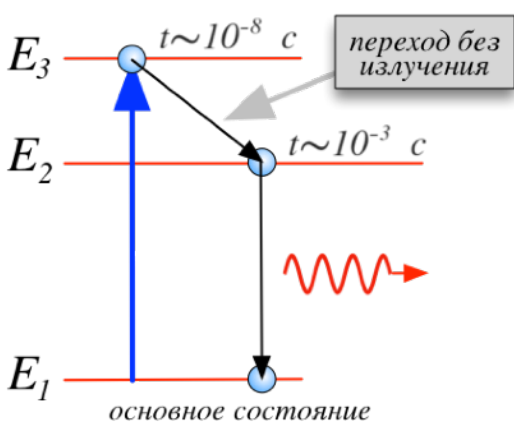
А вот что скажет технарь: "Рубин - это кристалл окиси алюминия  $Al_2O_3$ , в котором часть ( $\sim 0.05\%$ ) атомов алюминия замещена ионами хрома  $Cr^{3+}$ . Именно эти ионы хрома и придают рубину красный цвет".

необработанный рубин



Верно, но добавим ещё.

Кристаллическая решётка рубина условно выглядит вот так: поскольку количество молекул  $Al_2O_3$  с замещенными ионами хрома невелико, то они располагаются далеко друг от друга и друг с другом не взаимодействуют. Ион хрома в таких молекулах с замещением обладает замечательным свойством, которое необходимо для работы лазера. Именно ионы хрома являются генерирующими центрами в рубиновом лазере.



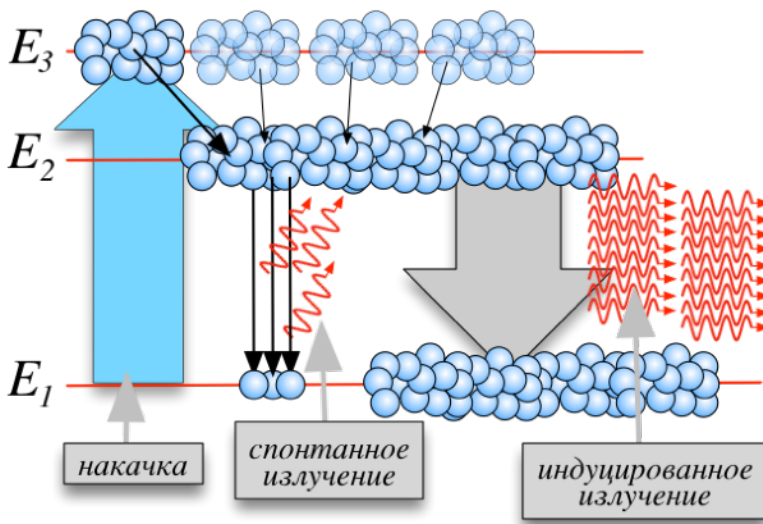
У электронов иона хрома есть три "рабочих" энергетических состояния:  $E_1$  - основное,  $E_2$  и  $E_3$ .  $E_3 > E_2 > E_1$ . Если перевести электрон из основного состояния  $E_1$  в состояние  $E_3$ , сообщив ему энергию  $E_3 - E_1$ , то в состоянии  $E_3$  электрон будет находиться короткое время  $t \sim 10^{-8}c$ . После чего он самопроизвольно перейдет в состояние  $E_2$ , причём этот переход не будет сопровождаться излучением фотона. Разность энергий  $E_3 - E_2$  будет передана электроном кристаллической решётке рубина. А вот на уровне  $E_2$  электрон может находиться в **100.000** раз дольше - порядка  $t \sim 10^{-3}c$  (этот уровень называют

"метастабильный"<sup>22</sup>). **И вот этот факт является ключевым.** После чего электрон возвращается в основное состояние, испуская фотон с энергией  $E_2 - E_1$ . Это мы рассмотрели поведение одного электрона иона хрома.

Долгий срок от формулирования идеи индуцированного излучения до построения работающего лазера (около 40 лет) объясняется тем, что физики долго искали подходящее вещество - рабочее тело. Сформировалась даже отдельная область физики - Физика Твёрдого Тела. Помимо рубина в твёрдотельных лазерах используются соединения иттрия с алюминием, фтором, ванадием, титан с сапфиром, фторид кальция и пр. Созданы также полупроводниковые лазеры, газовые лазеры, лазеры на парах металлов.

<sup>21</sup> Романс называется "Изумруд".

<sup>22</sup> "Почти стабильный".

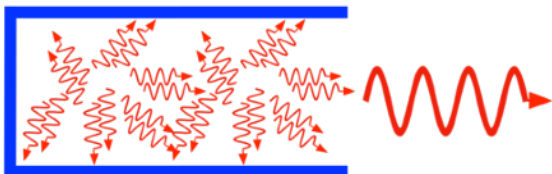


Рассмотрим теперь как используются свойства иона хрома при формировании лазерного излучения.

Мощная лампа, расположенная рядом с рубиновым стержнем, даёт яркую вспышку. Кванты света воздействуют на ионы хрома и переводят их электроны в состояние с энергией  $E_3$  - так осуществляется *накачка*. Через время  $t \sim 10^{-8}c$  эти электроны переходят на уровень  $E_2$ , не излучая фотонов. Время вспышки лампы достаточно большое (порядка  $10^{-3}c$ ), поэтому идёт массиванный "заброс"

электронов с уровня  $E_1$  на уровень  $E_3$ , откуда они довольно быстро оказываются на уровне  $E_2$ . За счёт того, что "время жизни" электронов на уровне  $E_2$  большое, то на нем скапливается очень много электронов - возникает "перенаселённость" электронов на уровне  $E_2$  (её ещё называют "инверсной населённостью").

Некоторые из электронов начинают *спонтанно* возвращаться с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ , испуская по одному фотону (это - *спонтанное излучение*). Эти фотоны воздействуют на электроны, ещё находящиеся на уровне  $E_2$  и вызывают *индуцированное излучение*: электрон с уровня  $E_2$  возвращается на уровень  $E_1$ , испуская *два* фотона. Эти два фотона воздействуют уже на два электрона, ещё находящиеся на уровне  $E_2$ , вызывая у них индуцированное излучение с испусканием четырёх фотонов и т.д. - возникает цепная реакция, приводящая к лавинообразному увеличению числа испущенных когерентных фотонов.



Ну вот, задачи (1) и (2) мы решили. Для решения задачи (3) - сбора разнонаправленных когерентных фотонов индуцированного излучения в один луч - используются оптические системы-резонаторы. Простейшим из которых является система из двух плоскопараллельных зеркал, расположенных друг от друга на расстоянии, кратном длине волны испускаемого излучения.

Рубиновый лазер является *импульсным*: работает в цикле "накачка-излучение"<sup>23</sup>. Длительность импульса составляет порядка  $10^{-3}c$ . Излучение рубинового лазера имеет характерных темно-вишневый цвет, что соответствует длине волны  $\lambda = 694$  нм. Мощность излучения в импульсе достигает  $10^6 - 10^9$  Вт. Лазерный луч можно фокусировать до диаметра 0,1 мм.

При излучении лазера, естественно, не нарушается закон сохранения энергии. Просто удаётся входящую в лазер энергию (минус теплотери) перевести в мощное когерентное излучение высокой плотности. Именно за счёт этого лазеры могут резать металл.



<sup>23</sup> Существуют лазеры непрерывного излучения.

## Задачи про лазер

> **Задача 1** (из ЕГЭ). Лазер излучает в импульсе  $N=10^{19}$  световых квантов. Средняя мощность импульса лазера  $P=1100$  Вт при длительности вспышки  $t=3 \cdot 10^{-3}$  с. Определите длину волны излучения лазера.

**Решение:** Простенькая. За один импульс выделяется энергия  $W = P \cdot t$ . Значит энергия одного кванта равна  $\frac{W}{N}$ . Она же равна  $h \frac{c}{\lambda}$ . Откуда  $h \frac{c}{\lambda} = \frac{P \cdot t}{N}$ .

> **Задача 2** (из ЕГЭ). На площадку падает зелёный свет от лазера. Лазер заменяют на другой, который генерирует красный цвет. Мощность излучения, падающего на площадку, в обоих случаях одна и та же. Как меняется в результате такой замены число фотонов, падающих на площадку в единицу времени?

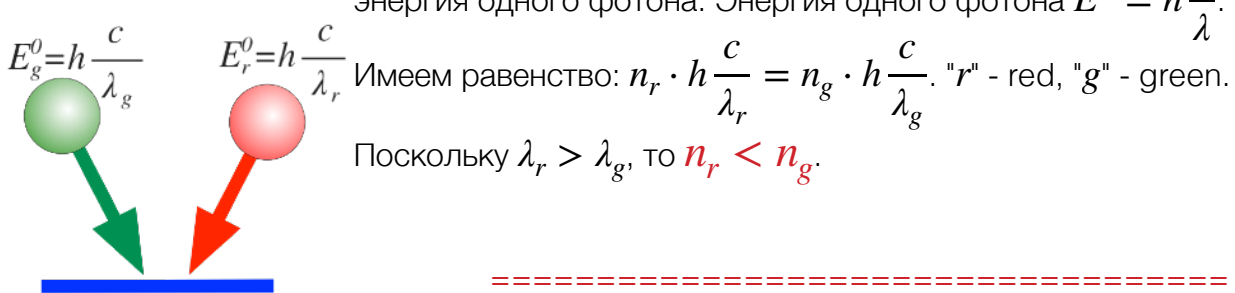
**Решение:** Простенькая. Главное - помнить, что длина волны красного света больше длины волны зеленого.

Если мощности равны в обоих случаях, то и количества падающей энергии в единицу времени равны. Количество падающей энергии в единицу времени можно выразить так:  $W^0 = n \cdot E^0$ , где  $n$  - количество фотонов, падающих на площадку в единицу времени,  $E^0$  -

энергия одного фотона. Энергия одного фотона  $E^0 = h \frac{c}{\lambda}$ .

Имеем равенство:  $n_r \cdot h \frac{c}{\lambda_r} = n_g \cdot h \frac{c}{\lambda_g}$ . "r" - red, "g" - green.

Поскольку  $\lambda_r > \lambda_g$ , то  $n_r < n_g$ .



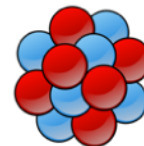
Мы говорили с вами **о поведении электронов**: свободных электронов, оторвавшихся от своих атомов в проводнике (при фотоэффекте), электронах на орбитах атомов и их переходах (в атоме водорода и при лазерном излучении).

Модель поведения электронов во всех этих ситуациях общая и довольно простая:

- если электрону сообщить определённую дополнительную энергию, облучив его фотоном, то он изменит своё состояние: либо вылетит из проводника, преодолевая энергию связи кристаллической решетки (при фотоэффекте), либо перейдёт на более высокую (более энергетическую) орбиту в атоме (как в атоме водорода и при лазерном излучении);
- если же у электрона есть "излишки" энергии, то он будет стараться их "скинуть", испуская фотоны и переходя в основное состояние.

## → Атомное ядро

А теперь поговорим об атомном ядре.



### Формальные сведения:

Атомное ядро - центральная и очень компактная часть атома, в которой сосредоточена практически вся его масса и весь положительный электрический заряд. Большинство ядер имеют форму, близкую к сферической. Ядро имеет размер  $\sim 10^{-15}$  м, что на четыре порядка меньше размера атома ( $\sim 10^{-11}$ ). Плотность вещества в ядре  $\sim 2,3 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

Ядро атома состоит из положительно заряженных *протонов* (*p*) и нейтральных *нейтронов* (*n*)<sup>24</sup>. Протоны и нейтроны вместе называются *нуклоны*<sup>25</sup>.

- масса протона  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг, протон в 1836 раз тяжелее электрона;
- заряд протона  $q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- масса нейтрона  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$  кг, нейтрон чуть-чуть тяжелее протона.

Чтобы всё время не писать "...  $\cdot 10^{-27}$  кг" для массы частиц в ядерной физике ввели маленькую единицу массы - "*атомная единица массы - аем*". Одна атомная единица массы равна 1/12 массы атома углерода.  $1 \text{ аем} = 1,661 \cdot 10^{-27}$  кг и  $1 \text{ аем} = 931,5 \text{ МэВ}$ . Тогда: масса протона  $m_p = 1,007276$  аем, а масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  аем. Правда, гораздо удобнее (сарказм)?

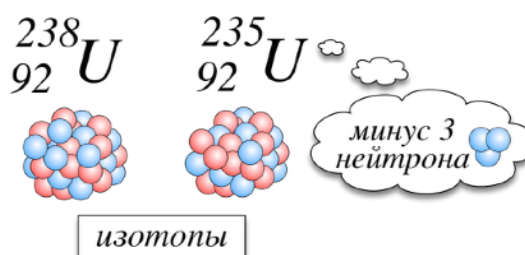
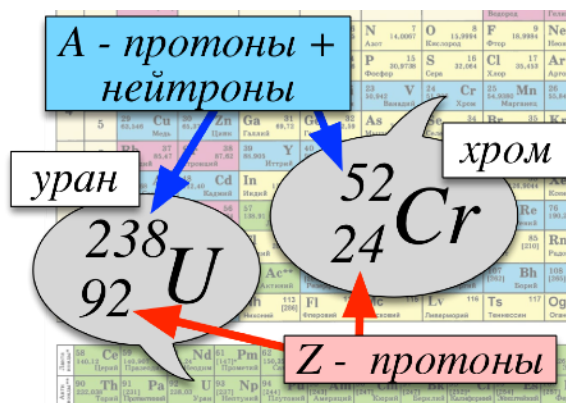
- Количество протонов в ядре - *зарядовое число Z*. *Z* - порядковый номер элемента (к которому относится атом) в таблице Менделеева - *атомный номер*. Количество протонов в ядре определяет структуру электронной оболочки нейтрального атома и, следовательно, химические свойства соответствующего элемента.
- Количество нейтронов в ядре - *изотопическое*<sup>26</sup> *число N*.
- Сумма зарядового и изотопического чисел - *массовое число A = Z + N*.

Обозначение ядер:  ${}^A_Z X$ , где *X* - символ химического элемента, *A* - массовое число, *Z* - атомный номер.

Отдельный нейтрон обозначается  ${}_0^1 n$ , отдельный протон обозначается  ${}_1^1 p$ .

У химических элементов существуют *изотопы* - разновидности атомов (и ядер), которые имеют одинаковый атомный номер, но при этом разные массовые числа. У изотопов одинаковое количество протонов и электронов, но разное количество нейтронов.

На картинке приведён пример изотопов урана:  ${}_{92}^{238} U$  - он гораздо чаще встречается в природе и он более стабилен;  ${}_{92}^{235} U$  - у него на 3 протона в ядре меньше, он менее стабилен. Уран-235 является основным материалом для производства ядерных реакторов и ядерных бомб.

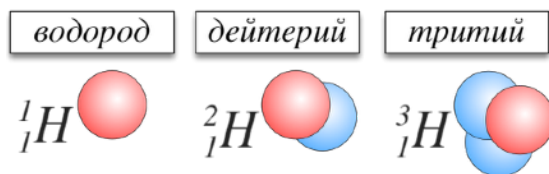


<sup>24</sup> У ядра атома обычного водорода нейтронов нет - в ядре один протон.

<sup>25</sup> "nucleus" - по-латински означает "ядро".

<sup>26</sup> От слова "изотоп".

У обычного водорода ( ${}^1_1\text{H}$ ) тоже есть изотопы: дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$  (добавились нейтроны).

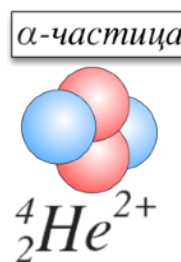


Изотопы одного и того же элемента могут быть стабильными (ядра не распадаются) и нестабильными - радиоактивными (ядра распадаются). Стабильность ядер зависит от соотношения числа нейтронов к числу протонов в них.

Оценочно можно посчитать радиус ядра по его массовому числу  $A$ :  $r \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$  м.

И ещё пара участников действий на уровне атомного ядра:

**Альфа - частица** ( $\alpha$ -частица) - это ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ : имеет положительный заряд  $+2e$ , состоит из двух протонов и двух нейтронов. Поток  $\alpha$ -частиц называют  $\alpha$ -лучами.



**Бета - частица** ( $\beta$ -частица) - это электрон или позитрон (позитрон - это античастица электрона: та же масса, но заряд - положительный  $+e$ ), испускаемые после  $\beta$ -распада<sup>27</sup>.

Ну вот, с формальностями закончено. А теперь возникает вопрос: а какие силы удерживают в ядре положительно заряженные протоны и нейтроны? Ведь кулоновские силы должны пытаться ядро разорвать. Значит действуют ещё какие-то силы.

В Истории про Силы мы говорили о том, что в природе есть четыре вида взаимодействий (сил):

- гравитационное
- электромагнитное
- слабое ядерное
- сильное ядерное

Вот табличка, поясняющая характер этих взаимодействий.

|   | Гравитационное            | Электромагнитное           | Сильное ядерное            | Слабое ядерное  |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| Воздействуют на что   | массу - энергию           | электрические заряды       | квантовую цветность        | квантовый запах |
| Воздействуют на какие частицы   | на все                    | на электрически заряженные | на протоны, нейтроны и пр. | на все          |
| Частица-переносчик взаимодействия   | гравитон (пока не открыт) | фотон                      | глюоны                     | бозоны          |
| <b>Сила действия на расстоянии (относительно электромагнитного взаимодействия):</b> |                           |                            |                            |                 |
| $10^{-15}$ м  | $10^{-41}$                | <b>1</b>                   | 25                         | 0,8             |
| $3 \cdot 10^{-15}$ м  | $10^{-41}$                | <b>1</b>                   | 60                         | $10^{-4}$       |

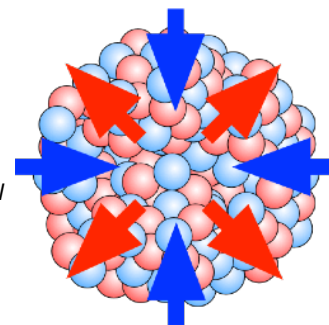
<sup>27</sup> Про бета-распад чуть позже.

### Пояснения к таблице:

- на "квантовую цветность" и "квантовый запах" не обращайте внимания;
- на расстояниях порядка  $3 \cdot 10^{-15}$  м (например, радиус ядра атома кремния) сильное ядерное взаимодействие в 60 раз сильнее электромагнитного взаимодействия; с увеличением этого расстояния сильное ядерное взаимодействие слабеет и электромагнитное становится сильнее;
- "Глюоны" и "бозоны" - это группы элементарных частиц, о них мы здесь говорить не будем. *Про элементарные частицы.* Элементарные - значит не имеющие внутренней структуры. На сегодняшний день открыто более 60 элементарных частиц. Мы уже знакомы с электроном, позитроном (античастица электрона), протоном, нейтроном, фотоном (он же - гамма-квант). Нам этого пока вполне хватит.
- **Сильное взаимодействие** является короткодействующим (будучи значительным при расстояниях порядка размера ядра, быстро убывает при увеличении этого расстояния), и не проявляется на макроскопических расстояниях. **Сильное взаимодействие - это взаимодействие притяжения** (как гравитационное). Оно не универсально и действует только между протонами и нейтронами<sup>28</sup> на расстоянии порядка  $10^{-15}$  м. По интенсивности это **самое сильное из фундаментальных взаимодействий**. Посредством этого взаимодействия нуклоны (протоны и нейтроны) объединяются в ядра. Не будь сильного взаимодействия, из всех ядер атомов остались бы только самые простейшие - ядра атома водорода, то есть протоны.
- **Слабое взаимодействие** является ещё более короткодействующим, оно начинает работать при уменьшении расстояния между частицами до  $10^{-18}$  м. Слабое взаимодействие является универсальным (как и гравитационное) - действует между всеми частицами. Слабое взаимодействие играет важную роль в цепочке ядерных реакций, происходящих в недрах звезд.



Так вот, силой, удерживающей протоны и нейтроны вместе в атомном ядре, является **сильное ядерное взаимодействие**. Ядро является ареной **противоборства двух взаимодействий: сильного ядерного, стремящегося удержать протоны и нейтроны вместе, и электромагнитного, стремящегося оттолкнуть друг от друга положительно заряженные протоны.**

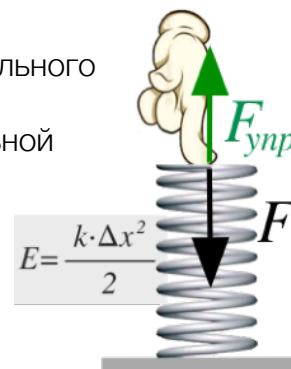


Этим противоборством объясняется стабильность или нестабильность атомных ядер: если ядро велико по размеру (в нём много протонов и нейтронов), то электромагнитное отталкивание сильнее сильного ядерного притяжения и такие ядра нестабильны - они легко распадаются. При  $Z > 82$  (после свинца в таблице Менделеева) стабильных ядер вообще не существует так как велико кулоновское отталкивание.

### ■ Энергия связи

А коли так - ядро одновременно подвержено действию сжимающего сильного ядерного взаимодействия и растягивающего электромагнитного взаимодействия, то, подобно сжатой пружине, обладающей потенциальной энергией сжатия, ядро обладает внутренней энергией<sup>29</sup>.

Вспомним формулу Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$ , говорящую о том, что энергия и масса - эквивалентны, что масса может быть преобразована в энергию, а энергия может быть преобразована в массу.

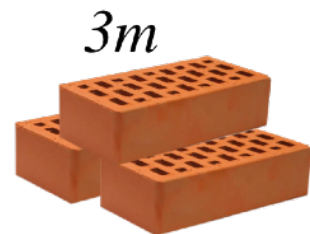


<sup>28</sup> А также ещё между некоторыми частицами.

<sup>29</sup> Поскольку эта энергия - внутренняя потенциальная, то она отрицательна.



Вот пример из области "здорового смысла": у нас есть три кирпича, каждый массой  $m$ . Мы их сначала взвесили по-отдельности, а потом, сложив в кучку, взвесили вместе. Результат совместного взвешивания равен  $3m$ . Всё верно, всё в соответствии со "здоровым смыслом".



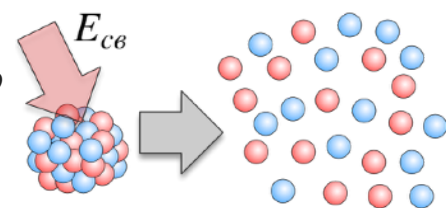
А вот другой пример: на особо точных весах мы сначала взвесили несжатую пружину, а потом - сжатую. Какая тяжелее?

"Здравый смысл" говорит: "Да какая разница? Обе пружины будут весить одинаково!" А вот формула Эйнштейна (и стоящая за ней Теория Относительности) говорит: "Больше будет весить сжатая пружина. И разность в массе будет

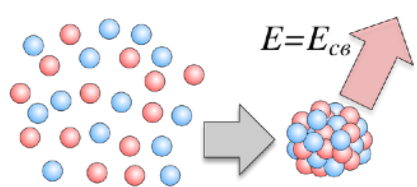


определяться как  $\Delta m \cdot c^2 = \frac{k \cdot \Delta x^2}{2}$ . То есть потенциальная энергия сжатой пружины **будет весить !!!** И множество точных экспериментов это подтверждают. "Здравый смысл" в ответ: "Ну уж и не знаю!"

А вот **энергия связи ядра** определяется не как внутренняя энергия ядра, а как **минимальная внешняя энергия, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы.**

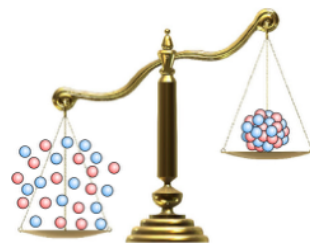


Из закона сохранения энергии следует, что **энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.**



Из этого вытекает, что **суммарная энергия отдельных протонов и нейтронов больше, чем энергия состоящего из них ядра.** А пользуясь формулой Эйнштейна, можно сказать, что **суммарная масса отдельных протонов и нейтронов больше, чем масса состоящего из них ядра:**

$M < Z \cdot m_p + N \cdot m_n$ , где  $M$  - масса цельного ядра,  $Z$  - количество протонов в ядре,  $m_p$  - масса протона,  $N$  - количество нейтронов в ядре,  $m_n$  - масса нейтрона. Разность масс  $\Delta M = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M$  называется **дефектом масс.**

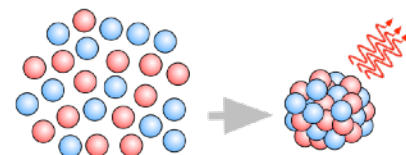


С помощью формулы Эйнштейна  $E = m \cdot c^2$  можно определить энергию, выделившуюся при образовании ядра, то есть **энергию связи ядра:**

$$E_{cb} = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M) \cdot c^2$$

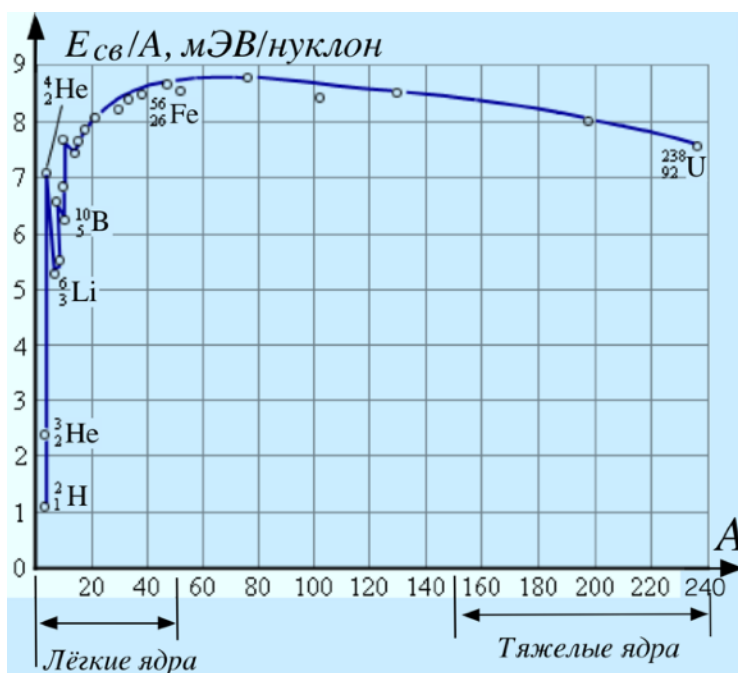
Посчитаем для примера энергию связи ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ , в состав которого входят два протона и два нейтрона. Масса ядра гелия  $M = 4,00260$  аем. Сумма масс двух протонов и двух нейтронов составляет  $2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 4,03298$  аем. Следовательно, дефект массы ядра гелия равен  $\Delta M = 0,03038$  аем. По формуле  $E_{cb} = \Delta M \cdot c^2$  получаем энергию связи ядра  $E_{cb} = 28,3$  МэВ. Это огромная величина. Образование всего одного грамма гелия сопровождается выделением энергии порядка  $10^{12}$  Дж. Примерно такая же энергия выделяется при сгорании почти целого вагона каменного угля.

При образовании ядра из частиц последние за счёт действия сильного ядерного взаимодействия устремляются друг к другу с огромным ускорением. Излучаемые при этом гамма-кванты как раз и обладают энергией связи  $E_{cb}$ .



Энергия связи ядра на много порядков превышает энергию связи электронов с атомом. Для атома водорода, например, энергия ионизации равна 13,6 эВ.

Для сравнения энергий связи ядер разных элементов используют величину *удельной энергии связи*: энергия связи ядра, делённая на количество нуклонов в ядре:  $E_{св.уд} = E_{св}/A$ .



Удельную энергию связи определяют экспериментально. На рисунке показана зависимость удельной энергии связи от количества нуклонов (массового числа  $A$ ) в ядре для разных элементов.

Как видно из графика, удельная энергия связи нуклонов у разных атомных ядер неодинакова. Для легких ядер удельная энергия связи сначала круто возрастает от 1,1 МэВ/нуклон у дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  до 7,1 МэВ/нуклон у гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Затем, претерпев ряд скачков, удельная энергия медленно возрастает до максимальной величины 8,7 МэВ/нуклон у элементов с массовым числом  $A = 50-60$ , а потом сравнительно медленно снижается у тяжелых элементов. Например, у урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  она составляет 7,6 МэВ/нуклон.

Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, то есть железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым элементам объясняется увеличением энергии кулоновского отталкивания протонов. Кулоновские силы пытаются разорвать ядро. В тяжелых ядрах связь между нуклонами ослабевает, а сами ядра становятся менее прочными (стабильными).

В случае стабильных легких ядер, где роль кулоновского взаимодействия невелика, числа протонов и нейтронов  $Z$  и  $N$  оказываются одинаковыми ( ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ). Под действием ядерных сил как бы образуются протон-нейтронные пары. Но у тяжелых ядер, содержащих большое число протонов, и из-за возрастания энергии кулоновского отталкивания для обеспечения устойчивости требуются дополнительные нейтроны.

По этому графику можно понять сколько энергии может выделяться при делении тяжёлых ядер и при синтезе (соединении) лёгких ядер.

На рисунке приведена диаграмма, показывающая число протонов и нейтронов в стабильных ядрах. У ядер, следующих за висмутом ( $Z > 83$ ), из-за большого числа протонов полная стабильность оказывается вообще невозможной.

Из графика видно, что наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра элементов средней части таблицы Менделеева.

Это означает, что существуют две возможности получения положительного энергетического выхода при ядерных превращениях:

- деление тяжелых ядер на более легкие;
- слияние легких ядер в более тяжелые.

В обоих этих процессах выделяется огромное количество энергии. В настоящее время оба процесса осуществлены практически: реакции деления и термоядерные реакции.

Оценим энергетически эти два процесса.

**Деление ядер.** Пусть, например, ядро урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  делится на два одинаковых ядра с массовыми числами 119. У этих ядер ( $A = 119$ ), как видно из графика удельных энергий связи, удельная энергия связи порядка 8,5 МэВ/нуклон. Удельная энергия связи ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  равна 7,6 МэВ/нуклон. Следовательно, при делении ядра урана выделяется энергия, равная 0,9 МэВ/нуклон или более 200 МэВ на один атом урана.

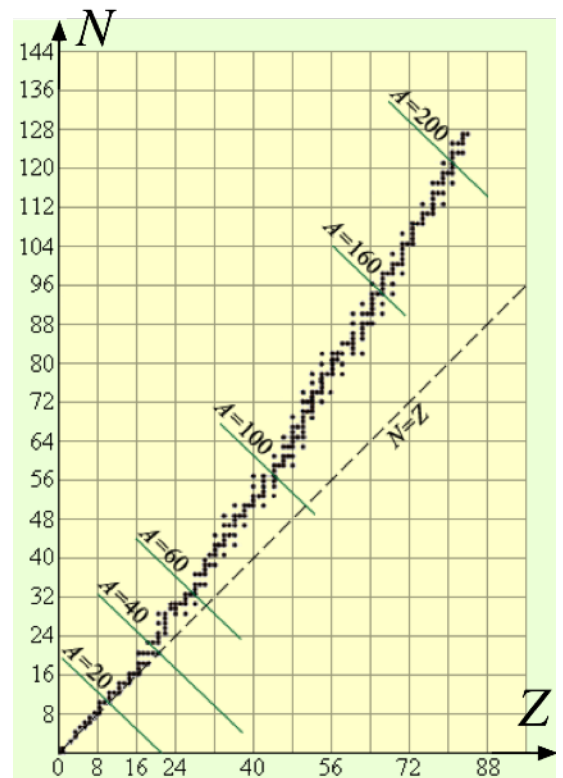
**Слияние ядер.** Пусть при некоторых условиях два ядра дейтерия  ${}_{1}^{2}\text{H}$  сливаются в одно ядро гелия  ${}_{2}^{4}\text{He}$ . Удельная энергия связи ядер дейтерия равна 1,1 МэВ/нуклон, а удельная энергия связи ядра гелия равна 7,1 МэВ/нуклон. Следовательно, при синтезе одного ядра гелия из двух ядер дейтерия выделится энергия, равная 6 МэВ/нуклон или 24 МэВ на атом гелия.



Синтез легких ядер по сравнению с делением тяжелых сопровождается примерно в 6 раз большим выделением энергии на один нуклон. Или, грубо говоря, термоядерная бомба в шесть раз мощнее ядерной бомбы того же веса.

**Энергия связи** - это общезначимое понятие. Части любой физической системы удерживаются вместе благодаря силам, их соединяющим (силы трения, силы кулоновского притяжения, силы упругости, силы сильного ядерного взаимодействия и пр.). Чтобы эти части разъединить, надо совершить работу по преодолению этих удерживающих сил.

Даже две деревяшки, сбитые вместе гвоздём, обладают энергией связи: чтобы их отделить друг от друга, надо совершить работу по преодолению сил трения деревяшек о гвоздь.



## Задачи про атомное ядро

> **Задача 1.** Определите энергию связи и удельную энергию связи в ядре атома ртути  ${}_{80}^{200}\text{Hg}$ . Масса покоя ядра равна 200,028 аем.

**Решение:**

Задачка на прямое применение формулы  $E_{cb} = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M) \cdot c^2$ .

Число протонов в ядре ртути  ${}_{80}^{200}\text{Hg}$   $Z = 80$ , число нейтронов  $N = A - Z = 200 - 80 = 120$ , всего нуклонов  $A = 200$ .

Масса протона  $m_p = 1,007276$  аем, масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  аем, 1 аем =  $1,661 \cdot 10^{-27}$  кг<sup>30</sup>,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, 1 эВ =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Дж  $\iff$  1 Дж =  $6,24 \cdot 10^{18}$  эВ.

Тогда по формуле для энергии связи имеем  $E_{cb} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M) \cdot c^2 = 1485$  МэВ, а  $E_{cb. \text{ уд}} = E_{cb} / A = 7,43$  МэВ/нуклон

> **Задача 2.** Определите энергию связи нейтрона, присоединившегося к ядру изотопа кислорода  ${}_{8}^{15}\text{O}$  ( $m_1 = 15,003076$  аем), в результате чего образовался изотоп кислорода  ${}_{8}^{16}\text{O}$  ( $m_2 = 15,994915$  аем).

**Решение:** Тут важно понимать, что отдельный нейтрон и нейтрон в ядре находятся в разных энергетических ситуациях, поэтому к ним применимо понятие дефекта массы и энергии связи.

До присоединения мы имели массу изотопа кислорода  ${}_{8}^{15}\text{O}$  ( $m_1$ ) плюс массу отдельного нейтрона ( $m_n$ ). После присоединения мы имеем массу изотопа кислорода  ${}_{8}^{16}\text{O}$  ( $m_2$ ). Дефект массы считаем как  $\Delta m = m_1 + m_n - m_2$ . Масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  аем. А энергия связи определяется как  $E_{cb} = \Delta m \cdot c^2$ . Откуда  $E_{cb} = 15,67$  МэВ.

> **Задача 3.** Вычислите энергию связи дейтерия  ${}_{1}^2\text{H}$ , трития  ${}_{1}^3\text{H}$  и гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ . Исходные данные - в табличке:

| Частица  | m, аем  | E, Мэв | Нейтральный атом            | m, аем  |
|----------|---------|--------|-----------------------------|---------|
| Электрон | 0,00055 | 0,511  | дейтерий ${}_{1}^2\text{H}$ | 2,01410 |
| Протон   | 1,00728 | 938,3  | тритий ${}_{1}^3\text{H}$   | 3,01605 |
| Нейтрон  | 1,00866 | 939,6  | гелий ${}_{2}^4\text{He}$   | 4,00260 |

**Решение:** Массу частицы или атома можно задавать не только в аем (килограммах), но и, в соответствии с формулой  $E = m \cdot c^2$ , в энергетических единицах (эВ или джоулях).

Хоть масса электронов много меньше масс протонов и нейтронов, но будем считать энергию связи для атомов в целом (с учётом электронов на орбитах) по тем же принципам: "на столе лежат" по-отдельности "ингредиенты" всех атомов - электроны, протоны, нейтроны. Считаем их массу до слияния в атом. Собираем из "ингредиентов" соответствующий атом. Его масса известна. Считаем дефект массы и энергию связи по формуле.

<sup>30</sup> Я не знаю: требует ли школа знания этих масс наизусть? Когда-то один физик упрекнул Эйнштейна в том, что он не помнил наизусть скорость звука в воздухе. На что Эйнштейн возразил: "Величина скорости звука есть в любом справочнике. Есть ли смысл забивать себе голову справочными цифрами?"

Решение задачи сведём в табличку:

|                              | <i>a</i>                     | <i>b</i>            | <i>c</i>            | <i>d</i>  | <i>e</i>                      | <i>f</i>                | <i>g</i>              |
|------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| У атома                      | Электроно<br>в на<br>орбитах | Протоно<br>в в ядре | Нейтрон<br>в в ядре | Масса<br>"ингредиентов"<br>по-<br>отдельности,<br>аеи | Масса<br>атои в<br>целом, аеи | Дефект<br>массы,<br>аеи | Энергия<br>связи, МэВ |
| дейтерия<br>${}^2_1\text{H}$ | 1                            | 1                   | 1                   | 2,01649   | 2,01410                       | 0,00239                 | 2,2                   |
| трития<br>${}^3_1\text{H}$   | 1                            | 1                   | 2                   | 3,02515   | 3,01605                       | 0,00910                 | 8,5                   |
| гелия<br>${}^4_2\text{He}$   | 2                            | 2                   | 2                   | 4,03298   | 4,00260                       | 0,03038                 | 28,3                  |

Из обозначения изотопа  ${}^A_Z\text{X}$ , где *A* - массовое число, *Z* - атомный номер следует, что

- количество протонов в атоме = *Z*;
- количество электронов в атоме равно количеству протонов в атоме = *Z*;
- количество нейтронов в атоме =  $N = A - Z$ .

Так заполняем столбцы *a*, *b*, *c*.

Столбец *d* считаем как сумму масс всех "ингредиентов" атои.

Столбец *f* - дефект масс - просто разность массы "ингредиентов" и массы атои в целом.

А результирующий столбец *g* - энергию связи - как  $E_{св} = \Delta m \cdot c^2$ .

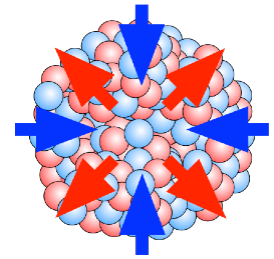


Чтобы не утонуть в преобразованиях  $\text{аеи} \leftrightarrow \text{кг}$  и  $\text{эВ} \leftrightarrow \text{Дж}$  полезно помнить численную формулу:  $1 \text{ аеи} = 931,5 \text{ МэВ}$

=====

## → Радиоактивность

Итак, ядро является ареной противоборства двух взаимодействий: сильного ядерного, стремящегося удержать протоны и нейтроны (нуклоны) вместе, и электромагнитного, стремящегося оттолкнуть друг от друга положительно заряженные протоны. Мы можем количественно оценить энергию, которой связаны нуклоны в ядре - энергию связи, и посчитать удельную энергию связи, приходящуюся на каждый нуклон. Рассматривая график энергии связи нуклонов в ядре, мы сказали, что:



- наиболее устойчивыми (стабильными) с энергетической точки зрения являются ядра элементов средней части таблицы Менделеева;
- у ядер, следующих за висмутом ( $Z > 83$ ), из-за большого числа протонов полная стабильность оказывается вообще невозможной.

Ну, о стабильных ядрах много говорить не приходится. Они "живут" очень долго и разрушить их может только значительное внешнее воздействие. Классический пример стабильного ядра - ядро атома железа  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ .

*Поговорим о нестабильных ядрах. Почему и как их нестабильность реализуется.*

### *Почему нестабильны нестабильные ядра?*

*Вот пара аналогий из окружающего мира.*

Все дети (кроме африканских - шутка) любят зимой играть в снежки и строить снеговиков и снежные крепости. Слепить руками снежок и кинуть его в товарища - большое удовольствие. И мы лепим снежки и они не



разваливаются на наших глазах. А вот если мы захотим скатать огромный снежный ком для строительства снежной крепости, то риск того, что этот ком расколется, увеличивается с его размерами. И он-таки раскалывается в конце концов на несколько кусков.

Ещё. Астрономы открыли порядка сотни *сверхмассивных* звёзд. *Это очень малый процент* по сравнению со всеми наблюдаемыми звёздами. Под сверхмассивными понимаются звёзды с массами от 150 до 10 масс Солнца. Астрономы считают, что сверхмассивные звёзды не могут иметь массу более 150 масс Солнца<sup>31</sup>. И эти сверхмассивные звёзды взрываются, раскалываясь на части - происходит, как говорят астрономы, "*вспышка сверхновой*".



К чему эти аналогии? А к тому, что в природе есть общая закономерность: у *любой физической системы (каким бы законам физики она ни подчинялась) есть свои оптимальные размеры, при которых система будет стабильна*. Закономерность эта вытекает, в первую очередь, из более общего физического принципа (с которым мы уже не раз сталкивались): *любая физическая система стремится минимизировать своё энергетическое состояние* - "отдать лишнее", говоря простым языком.

Чувствуете, куда я клоню? Правильно - к нестабильным ядрам. Вот к ним и возвращаемся.

<sup>31</sup> Хотя наблюдается *одна* звезда с массой в 315 масс Солнца. Но тут не до конца ясно: либо это ошибка в наблюдениях, либо ещё непонятная нам физика.

Давайте поговорим о **радии** - химическом элементе с нестабильным ядром, с которого и началось изучение радиоактивности<sup>32</sup> - нестабильности ядер.



Вот что нам сообщает Википедия: **Радий**  $^{226}_{88}\text{Ra}$  - блестящий металл серебристо-белого цвета. Относится к щёлочноземельным металлам, обладает высокой химической активностью. Радиоактивен. Период полураспада 1600 лет. *Добавим ещё:* в ядре 88 протонов и 138 нейтронов. Удельная энергия связи равна **7,66 МэВ/нуклон**. Радиус ядра  $\sim 143 \cdot 10^{-12}$  м. Известны 35 изотопов радия с массовыми числами от 201 до 235 - они ещё более радиоактивны: распадаются гораздо быстрее.

Будем сравнивать радий со стабильным железом  $^{56}_{26}\text{Fe}$ : в ядре 26 протонов, 30 нейтронов. Удельная энергия связи равна **8,55 МэВ/нуклон**. Радиус ядра  $\sim 126 \cdot 10^{-12}$  м. Известны три стабильных изотопа:  $^{54}_{26}\text{Fe}$  (на 2 нейтрона меньше, чем у  $^{56}_{26}\text{Fe}$  - "облегчённый вариант"),  $^{57}_{26}\text{Fe}$  и  $^{58}_{26}\text{Fe}$  (на 1 и 2 нейтрона больше, чем у  $^{56}_{26}\text{Fe}$  - "утяжелённые варианты").

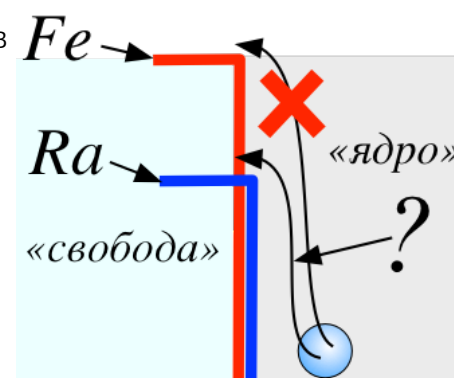
Итак, что из сравнения следует:

- нуклон (нейтрон и протон) в ядре радия на 11,5% (если сравнить удельные энергии связи) слабее привязан к ядру, чем нейтрон в ядре железа. В том числе и потому, что радиус ядра радия на 13,5% больше радиуса ядра железа - а с увеличением радиуса ядра сильные ядерные взаимодействия, ядро удерживающие, убывают быстрее, чем кулоновские силы, пытающиеся ядро разорвать;
- у радия в четыре раза больше нуклонов (протонов и нейтронов), чем у железа. Если положительно заряженные протоны взаимодействуют в ядре по принципу "каждый протон отталкивается от каждого протона" (таково свойство кулоновских сил), то у сильного ядерного взаимодействия есть **эффект насыщения**: каждый нуклон в ядре притягивается к ограниченному числу других нуклонов (обычно к шести). Этот факт тоже влияет на уменьшение удельной энергии связи нуклона в ядре радия.

Это мы объяснили почему удельная энергия связи у радия меньше, чем у железа.



Вдумчивый ученик тянет руку и спрашивает: "Это всё более-менее понятно. Но непонятно вот что: и в ядре атома радия, и в ядре атома железа нуклон удерживается сильным ядерным взаимодействием, пусть у радия послабее, чем у железа, но все-таки удерживается. И для того, чтобы "вырваться на свободу" (покинуть ядро), нуклону надо преодолеть "энергетическую ступеньку" размером в удельную энергию связи. В случае с железом нуклон это сделать не может - ядро железа стабильно. И кто же нуклону помогает эту ступеньку преодолеть в случае с радием?"



Опять в десяточку, вдумчивый ученик. В ответе на этот вопрос и кроется объяснение нестабильности ядер. Ответ на твой вопрос, вдумчивый ученик, такой: "Никто не помогает<sup>33</sup>. Нуклон сам преодолевает эту ступеньку." - "А откуда он берёт необходимую энергию?" - "А он её и не берёт" - "Тогда Ой!"

<sup>32</sup> В самом конце 19-го века французские физики Пьер и Мария Кюри открыли этот элемент и изучили его радиоактивные свойства. Подробнее об открытии радиоактивности почитайте в учебнике физики для 11-го класса.

<sup>33</sup> Мы говорим о спонтанной (самостоятельной) радиоактивности, без чьей-либо посторонней помощи.

Ядра, нуклоны - это всё микромир. Он живёт по своим законам, отличным от макромира. Законы микромира описываются квантовой механикой. Так вот, законы микромира говорят, что *у нуклона (да и у любой другой частицы) есть ненулевая вероятность преодолеть любую энергетическую ступеньку - любой энергетический барьер*. Весь вопрос в величине этой вероятности. *Чем меньше величина энергетической ступеньки, тем вероятность выше*. Процесс преодоления частицей энергетического барьера называется в квантовой механике *"туннельным эффектом"*.

Если, воспользовавшись формулами квантовой механики, аккуратно посчитать вероятность преодоления нейтроном энергетического барьера в 8,55 МэВ (как у железа), то мы получим  $\sim 10^{-34}$ , что является исчезающе малой величиной. Потому ядро железа и стабильно. А вот для нейтрона, собирающегося преодолеть барьер в 7,66 МэВ (как у радия), эта вероятность равна  $\sim 10^{-9}$  - то есть у каждого миллиардного ядра радия отрывается один нейтрон. А это уже вполне осязаемая величина.



У ядер радия (как и у нестабильных ядер других элементов с пониженной "энергетической ступенькой" - удельной энергией связи) происходит самопроизвольный отрыв нуклона вследствие квантового туннельного эффекта.

Если от ядра элемента отрывается нейтрон (несколько нейтронов), то ядро превращается в "облегченный" изотоп исходного элемента. Если от ядра отрывается протон (или несколько протонов), то такое ядро превращается в ядро другого химического элемента - элемента с меньшим атомным номером.

→ **Радиоактивностью** (или *радиоактивным распадом*) называется способность нестабильных ядер превращаться в другие ядра с испусканием различных частиц. При самопроизвольном таком превращении (без "помощи" других частиц) радиоактивность называется *естественной*. Радиоактивность - это квантово-механический процесс.

Поговорим о *естественной радиоактивности*.

Из около 3000 известных ядер (большинство из них получено искусственно) лишь 264 являются радиоактивными. Перегруженное нуклонами ядро претерпевает радиоактивный распад до тех пор, пока не превратится в стабильное ядро. Но радиоактивный распад - это не химическая реакция. Главная особенность радиоактивных превращений заключается в том, что они происходят самопроизвольно, в то время как для химических реакций в любом случае требуются какие-либо внешние воздействия. Кроме того, радиоактивные превращения протекают непрерывно и всегда сопровождаются выделением определенного количества энергии. На скорость протекания реакций радиоактивного распада внутри атомов не влияет ни температура, ни наличие электрического и магнитного полей, ни применение самого эффективного химического катализатора, ни давление, ни агрегатное состояние вещества. *Радиоактивные превращения не зависят ни от одного внешнего фактора и не могут быть ни ускорены, ни замедлены*.

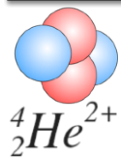


## ■ Виды радиоактивного распада

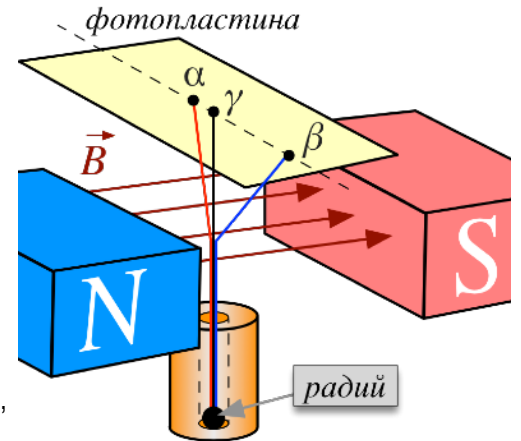
При радиоактивном распаде из нестабильных ядер вылетают не просто отдельные нуклоны. Существуют два основных вида радиоактивного распада.

Когда Пьер и Мария Кюри изучали радиоактивные свойства радия, они поместили радий в магнитное поле и на фотопластинке обнаружили следы трёх видов лучей. По отклонению этих лучей в магнитном поле можно было судить об электрическом заряде и о массе частиц, эти лучи образующих. Эти лучи назвали  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи.

**$\alpha$ -частица**

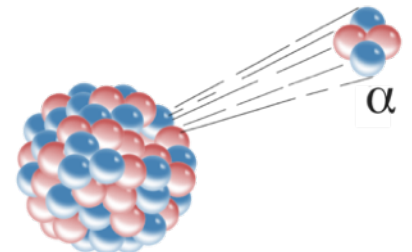


**Альфа-распад ( $\alpha$ -распад)** - это испускание  $\alpha$ -частиц. Напомню:  $\alpha$ -частица - это ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ : имеет положительный заряд  $+2e$ , состоит из двух протонов и двух нейтронов.



$\alpha$ -частицы испускаются только тяжелыми ядрами, содержащими большое число протонов и нейтронов. Прочность тяжелых ядер невысока. Для того, чтобы покинуть ядро, частица должна преодолеть ядерные силы, а для этого она должна обладать достаточной энергией.

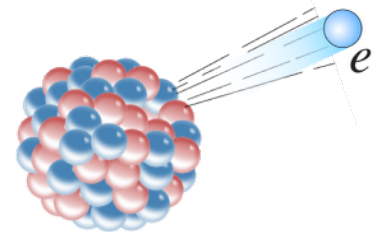
При объединении двух протонов и двух нейтронов в  $\alpha$ -частицу ядерные силы в подобном сочетании являются наиболее крепкими, а связи с другими нуклонами слабее, поэтому  $\alpha$ -частица способна "выйти" из ядра. То есть объединившимся в  $\alpha$ -частицу двум протонам и двум нейтронам **энергетически легче** покинуть нестабильное ядро<sup>34</sup>.



Вылетевшая  $\alpha$ -частица уносит положительный заряд в 2 единицы и массу в 4 единицы. В результате  $\alpha$ -распада радиоактивный элемент превращается в другой элемент, порядковый номер которого на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы, меньше.

Вот пример  $\alpha$ -распада ядра радия, в результате которого появляется ядро атома радона (тоже нестабильного):  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}^{2+}$

**Бета-распад ( $\beta$ -распад)** - это испускание ядром электрона<sup>35</sup>. "А откуда ж в ядре электрон? Ведь в нём лишь протоны и нейтроны!" - спросите вы. Дело в том, что нейтроны и протоны в распадающемся ядре "не сидят без дела". Нейтрон может превратиться в протон + электрон<sup>36</sup>. И этот появившийся электрон и покидает распадающееся ядро.



В результате бета-распада образуется новое ядро с таким же массовым числом, но с большим на единицу зарядом.

**$\gamma$ -лучи** - это испущенные ядром гамма-кванты (фотоны). Радиоактивный распад (будь то  $\alpha$ -распад или  $\beta$ -распад) всегда сопровождается выделением энергии (мы уже обсуждали, что при распаде ядра высвобождается часть энергии связи, например). Так вот  $\gamma$ -лучи и есть

<sup>34</sup> Подчеркну, что всё это происходит через механизм туннельного эффекта.

<sup>35</sup> Есть вид бета-распада, при котором испускается позитрон - античастица электрона.

<sup>36</sup> Слово "может" надо трактовать на языке квантовой механики: "есть значительная вероятность такого превращения".

поток фотонов этой высвобождающейся энергии. Частота испускаемых фотонов соответствует оптическому или рентгеновскому диапазонам волн. Испускание фотонов не приводит к потере ядром заряда, а потери массы при таком испускании ничтожны. Например, при радиоактивном распаде 100 грамм радия выделяется 15,3 Вт теплоты.

*Гораздо реже при радиоактивном распаде встречаются случаи испускания отдельного нейтрона или отдельного протона.*

Проиллюстрируем цепочку радиоактивных распадов со знакомым нам радием  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ .

- ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}^{2+}$  - ядро радия-226 испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в ядро радона-222. Испускается фотон.
- ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}^{2+}$  - ядро радона-222 испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в ядро полония-218. Испускается фотон.
- ${}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$  - ядро полония-218 испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в ядро свинца-214. Испускается фотон.
- ${}^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\text{Bi} + {}^0_1e$  - ядро свинца-214 испускает электрон ( $\beta$ -частицу) и превращается в ядро висмута-214.

*..... ещё четыре шага с испусканием  $\alpha$ -частиц, электронов и фотонов .....*

- ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$  - ядро полония-210 испускает  $\alpha$ -частицу и превращается в ядро стабильного свинца-206. Испускается один фотон.

Ядро свинца-206 является стабильным - цепочка распада закончена. В этой цепочке есть и  $\alpha$ -распад, и  $\beta$ -распад, и испускаемые фотоны ( $\gamma$ -лучи).

## ➔ Закон радиоактивного распада

А как быстро проходит радиоактивный распад? Сколько ядер распадается за секунду? Как было сказано выше, на скорость радиоактивного распада не влияют внешние условия - эта скорость определяется исключительно свойствами распадающихся ядер.

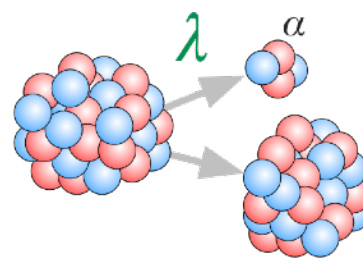
Пусть  $\lambda$  - вероятность распада ядра за одну секунду. Пусть за малый промежуток времени  $\Delta t$  количество нераспавшихся ядер  $N(t)$  изменилось (уменьшилось) на  $\Delta N < 0$  (мы как всегда  $\Delta$  считаем как "стало" минус "было"). Так как вероятность распада каждого ядра неизменна во времени, то число распадов будет пропорционально количеству ядер  $N(t)$  и промежутку времени  $\Delta t$ :  $\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$ . Эта формула означает, что

скорость  $\frac{dN}{dt}$  изменения функции  $N(t)$  прямо пропорциональна самой функции:

$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$ . Подобная зависимость возникает во многих физических задачах. Решение

этого уравнения приводит к экспоненциальному закону:  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ , где  $N_0$  - начальное число радиоактивных ядер при  $t = 0$ . **Это и есть формула закона радиоактивного распада.**

За время  $\tau = 1/\lambda$  количество нераспавшихся ядер уменьшится в  $e \approx 2,7$  раза. Величину  $\tau$  называют **средним временем жизни радиоактивного ядра.**



Для практического использования этот закон удобно записать в другом виде:

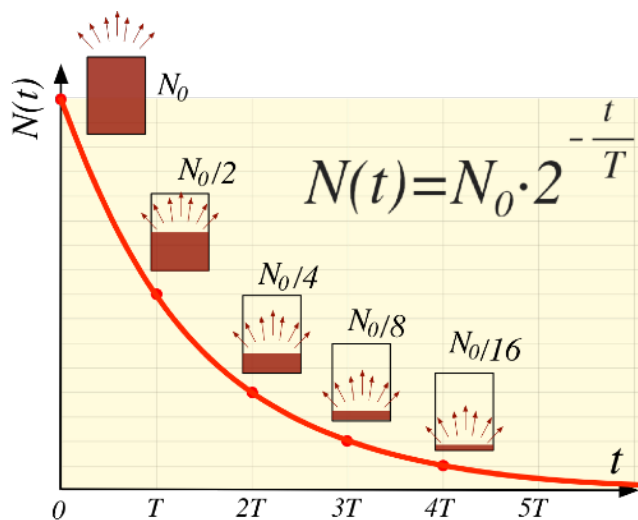
$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

$N(t)$  - это количество *неразпавшихся* (оставшихся) ядер!

Величина  $T$  называется *периодом полураспада*. Именно эта величина определяет скорость радиоактивного распада. У каждого радиоактивного химического элемента он свой.

За время  $T$  распадается половина первоначального количества радиоактивных ядер. Величины  $T$  и  $\tau$  связаны:

$T = \ln 2 \cdot \tau \approx 0,693\tau$ . То есть период полураспада примерно на 30% короче, чем среднее время жизни.



По прошествии времени, кратному периоду полураспада  $T$  ( $t = nT$ ), радиоактивных (*неразпавшихся!*) атомов останется  $N = \frac{N_0}{2^n}$ . А *разпавшихся*? А вот сколько:

$$K = N_0 - \frac{N_0}{2^n}$$

Для примера приведу периоды полураспада некоторых радиоактивных ядер:

|                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| радий ${}^{226}_{88}\text{Ra}$    | $T=1600$ лет          |
| уран ${}^{238}_{92}\text{U}$      | $T=4,4$ миллиарда лет |
| радон ${}^{222}_{86}\text{Ra}$    | $T=3,83$ дня          |
| нобелий ${}^{256}_{102}\text{No}$ | $T=8$ секунд          |



Важно помнить: закон радиоактивного распада - *статистический (вероятностный) закон*, он позволяет посчитать *среднее значение* количества неразпавшихся ядер.

Перепишем исходную формулу закона радиоактивного распада  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}}$  и выразим с её помощью число *разпавшихся* ядер:  $K(t) = N_0 - N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}}$ . Взяв производную по времени от этой функции (то есть определяя *скорость распада* - сколько ядер распадается за единицу времени), получим:

$$A(t) = K'(t) = \frac{\ln 2}{T} N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}} = \frac{\ln 2}{T} \cdot N(t).$$

Функция  $A(t) = \frac{\ln 2}{T} \cdot N(t)$  называется *активностью распада* и измеряется в *беккерелях [Бк]*. Один беккерель - это активность вещества, в котом за одну секунду распадается одно ядро.

**Задачи на радиоактивный распад** (задачи на эту тему - это "прыганье" вокруг одной формулы. И ещё надо понимать - про какие ядра идёт речь: распавшиеся или нераспавшиеся)

**> Задача 1.** В пробирке в момент времени  $t_0 = 0$  находилось некоторое количество ядер радиоактивного изотопа. Через  $t_1 = 6$  мин в пробирке осталось 3776 мкмоль нераспавшихся ядер, а через  $t_2 = 18$  мин - 236 мкмоль нераспавшихся ядер. Чему равен период полураспада исходного изотопа? Ответ приведите в минутах.

**Решение:** Закон радиоактивного распада для количеств атомов  $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$  можно точно также записать и для количества молей распадающегося вещества:  $\nu(t) = \nu_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$  - ведь число молей - это количество атомов, делённое на число Авогадро ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>).

Запишем отношение количества вещества в пробирке через  $t_1$ , к количеству вещества в

пробирке через  $t_2$ :  $\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{2^{-\frac{t_1}{T}}}{2^{-\frac{t_2}{T}}} = 2^{-\frac{t_1 - t_2}{T}}$ . Откуда

$$\frac{t_2 - t_1}{T} = \log_2 \frac{\nu_1}{\nu_2} \Leftrightarrow T = \frac{t_2 - t_1}{\log_2 \frac{\nu_1}{\nu_2}}.$$

Подставляя, получаем  $T = 3$  минуты.

**> Задача 2.** В пробирке содержатся атомы радиоактивных изотопов ванадия и хрома. Период полураспада ядер ванадия  $T_1 = 16,1$  суток, период полураспада ядер хрома  $T_2 = 27,8$  суток. Через  $t = 80$  суток число атомов ванадия и хрома сравнялось. Во сколько раз вначале число атомов ванадия превышало число атомов хрома?

**Решение:** По закону радиоактивного распада: для ванадия:  $N^{Va}(t) = N_0^{Va} \cdot 2^{-\frac{t}{T_1}}$ ; для хрома:  $N^{Cr}(t) = N_0^{Cr} \cdot 2^{-\frac{t}{T_2}}$ . По условию задачи  $N^{Va}(t) = N^{Cr}(t)$  при  $t = 80$  суток  $\Rightarrow N_0^{Va} \cdot 2^{-\frac{t}{T_1}} = N_0^{Cr} \cdot 2^{-\frac{t}{T_2}}$  при  $t = 80$  суток  $\Rightarrow \frac{N_0^{Va}}{N_0^{Cr}} = 2^{\left(\frac{t}{T_1} - \frac{t}{T_2}\right)}$  ( $t = 80$  суток).

## → Ядерные реакции

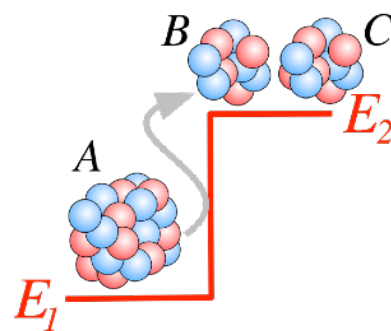
**Ядерная реакция** - это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом. Это - формальное определение. Давайте поговорим по существу.

Допустим есть у нас ядро вещества  $A$ . Протоны и нейтроны связаны в этом ядре энергией связи (об этом мы говорили выше).

Если эта энергия связи невелика, то ядро подвержено естественному радиоактивному распаду и механизм такого распада - это квантово-механический туннельный эффект, при котором нейтронам и протонам "удаётся" перешагнуть невысокую энергетическую ступеньку и оторваться от ядра. Такому радиоактивному ядру не нужны никакие внешние воздействия для распада - оно распадается "по своим внутренним причинам".

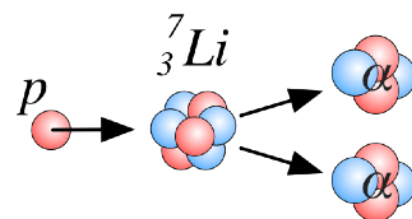
А если ядро атома вещества  $A$  стабильно, то есть энергия связи нуклонов в таком ядре велика и никакого естественного радиоактивного распада не происходит, то можно ли как-то "развалить" такое ядро, скажем, на две половинки?

Принципиальный ответ: "Да, можно". Надо понимать следующее: энергия связи ядра  $A$  меньше, чем суммарная энергия связи ядер  $B$  и  $C$ <sup>37</sup>. И чтобы ядру  $A$  стать ядром  $B$  плюс ядром  $C$ , надо преодолеть энергетическую ступеньку величиной  $E_2 - E_1$ . А для этого ядру  $A$  надо такую энергию получить извне. А получить её можно либо как кинетическую энергию от других атомов или частиц, либо как энергию фотонов. В этом состоит суть ядерных реакций.



Вот пример такой реакции: разогнанный в электрическом поле протон (ядро атома водорода) бомбардирует ядро атома лития  ${}^7_3\text{Li}$ . В результате получаются две  $\alpha$ -частицы (ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ):  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ . Ядро лития - стабильно.

Кинетической энергии протона хватает, чтобы преодолеть энергетическую ступеньку энергии связи нуклонов в ядре лития и расколоть его пополам.



Наиболее интересными для практического использования являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами. Так как нейтроны лишены заряда, они беспрепятственно могут проникать в атомные ядра и вызывать их превращения.

При ядерных реакциях выполняются все законы сохранения классической физики: импульса, энергии, момента импульса, заряда. В дополнение к этим классическим законам выполняется закон сохранения числа нуклонов - протонов и нейтронов (**барионного заряда**). Эти законы накладывают ограничения на возможность осуществления ядерной реакции. Даже энергетически выгодный процесс всегда оказывается невозможным, если сопровождается нарушением какого-либо закона сохранения.

<sup>37</sup> Чтобы устранить возможное недопонимание: энергия связи - это потенциальная энергия кулоновских сил и сил сильного ядерного взаимодействия. А поскольку силы сильного ядерного взаимодействия "побеждают" кулоновские силы, удерживая ядро в целости, то это потенциальная энергия сил притяжения. И как всякая энергия потенциального поля притяжения, она - отрицательна (нулём становится в бесконечности) - вспомните про потенциальную энергию двух разноимённых зарядов или потенциальную энергию двух гравитационных масс.

Из закона сохранения энергии следует, что сумма полной энергии частиц до реакции равна сумме полной энергии частиц после реакции. Полная энергия частицы равна её энергии покоя  $M \cdot c^2$  плюс кинетической энергии  $E$ .

Пусть у нас до ядерной реакции было две частицы и после ядерной реакции стало две частицы (как в случае  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ ). Мы можем записать уравнение энергетического баланса:  $M_1 \cdot c^2 + M_2 \cdot c^2 + E_1 + E_2 = M_3 \cdot c^2 + M_4 \cdot c^2 + E_3 + E_4$ <sup>38</sup>.

Разность суммарных кинетических энергий частиц на "выходе" и "входе" реакции  $Q = (E_3 + E_4) - (E_1 + E_2)$  называется *энергией реакции* (или энергетическим выходом реакции). Её можно также записать в виде:

$Q = [(M_1 + M_2) - (M_3 + M_4)] \cdot c^2 = \Delta M \cdot c^2$ , где  $M_1, M_2$  - массы исходных продуктов,  $M_3, M_4$  - массы конечных продуктов,  $\Delta M$  - дефект масс ядерной реакции.

Ядерные реакции могут протекать с выделением ( $Q > 0$ ) или с поглощением энергии ( $Q < 0$ )<sup>39</sup>. Во втором случае первоначальная кинетическая энергия исходных продуктов должна превышать величину  $|Q|$ , которая называется *порогом реакции*.

*Для того чтобы ядерная реакция имела положительный энергетический выход, удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов. Это означает, что величина  $\Delta M$  должна быть положительной.*

Если  $Q > 0$ , то  $Q$  - это кинетическая энергия продуктов ядерной реакции и энергия излучаемых фотонов.

## ➔ Ядерная энергия и её использование

Как человечество получало энергию для своих нужд (отопление, освещение, приведение в движение двигателей) до середины 20-го века? Правильно: жгло дрова, уголь и нефть. Дров, угля и нефти становилось всё меньше и меньше. От такого сжигания природа загрязнялась. Да и КПД такой добычи энергии был очень низок: больше половины терялось.

Эйнштейн в начале века сказал: "Ребята, есть практически неисчерпаемый источник энергии вокруг нас!" и написал свою знаменитую формулу  $E = M \cdot c^2$ . Все обрадовались и стали искать способ как бы эту энергию извлечь. То есть нужно было энергию микромира "вытащить" на макро-уровень.

## ■ Реакция ядерного деления

Сначала надеялись на естественный радиоактивный распад. Да, радиоактивный радий нагревается, распадаясь. Но для промышленных объёмов производства энергии он явно не тянул<sup>40</sup>. Вскоре стало понятно, что надо искать "правильную" ядерную реакцию.

"Правильность" её должна складываться из двух элементов:

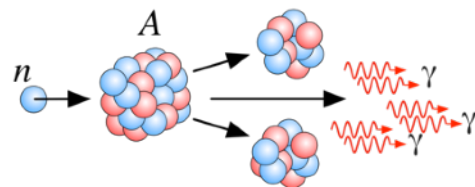
- она должна иметь положительный энергетический выход (и чем больше, тем лучше)
- и
- она должна самоподдерживаться.

<sup>38</sup> Вы прекрасно понимаете, что такое уравнение можно написать и для любого количества частиц.

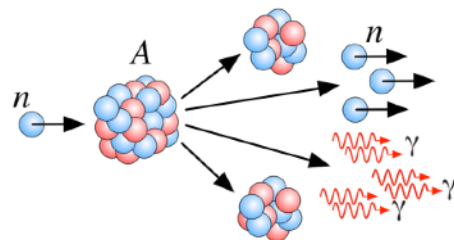
<sup>39</sup> Помните в школьной химии вы рассматривали эндотермические и экзотермические реакции. Здесь всё абсолютно то же.

<sup>40</sup> Хотя на современных космических кораблях для полётов к далёким планетам и используются источники питания на радиоактивных элементах. Но выдаваемый такими "ядерными батарейками" ток - порядка микроампера. Для зарядки аккумуляторов это нормально, но для текущего потребления явно мало.

С первым-то всё понятно, а вот второе надо пояснить. Пусть у нас есть ядерная реакция с положительным энергетическим выходом, когда ядро атома вещества  $A$ , обстрелянное быстрым нейтроном, распадается на два куска и излучает кучку фотонов. Кучка фотонов - это здорово. А как следующую кучку фотонов извлечь из следующего ядра? Снова целиться быстрым нейтроном в ядро атома вещества  $A$ ? А если не попаду? А если энергия, затрачиваемая на производство этих быстрых нейтронов, будет превышать энергию на выходе ядерных реакций? Сложно это как-то.



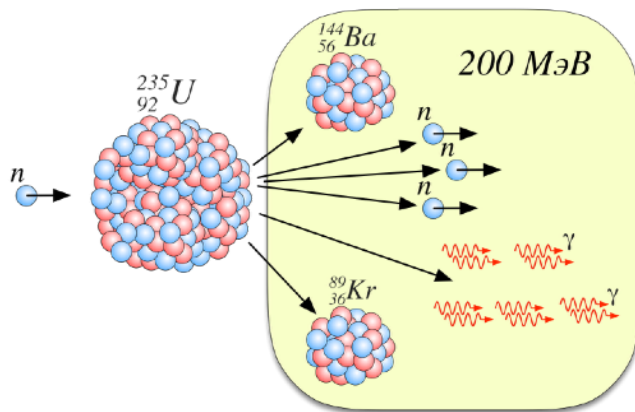
А если найти такую ядерную реакцию, в результате которой излучается и кучка фотонов и кучка быстрых нейтронов, которые сами заставят делиться следующие атомы вещества  $A$ ? Поискали-поискали физики такую реакцию и нашли.



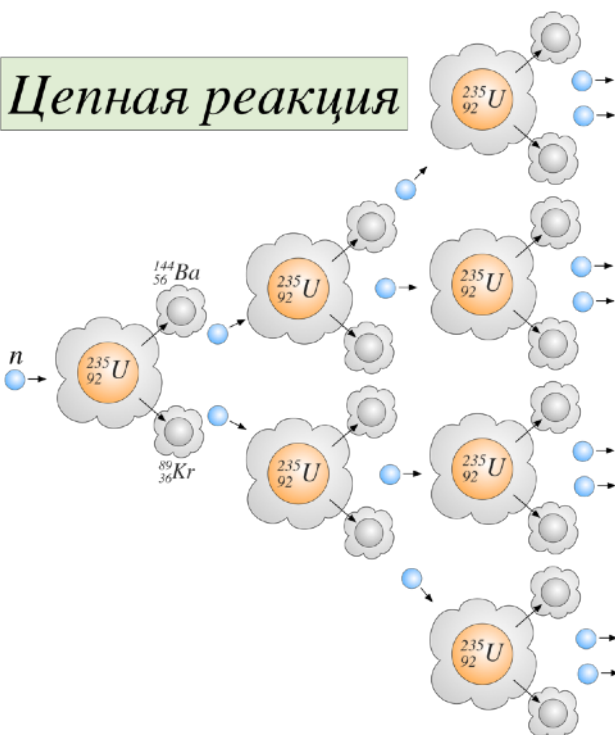
Первой из таких реакций оказалась реакция деления тяжелого нестабильного ядра изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ :



Ядро урана-235 само по себе нестабильно и подвержено радиоактивному распаду (период полураспада  ${}_{92}^{235}\text{U}$  - порядка 700 миллионов лет). Но если в такое ядро влетает нейтрон (причём нейтрон с небольшой кинетической энергией), то ядро урана-235 распадается на два ядра радиоактивных изотопов бария  ${}_{56}^{144}\text{Ba}$  и криптона  ${}_{36}^{89}\text{Kr}$  с испусканием трёх свободных нейтронов (мы уже потихоньку привыкаем к тому, что в микромире всем управляет вероятность. Так и здесь: испускается от 1 до 8 (в среднем - 2,6) свободных нейтронов) и выделением 200 мЭв энергии в виде излучения фотонов и кинетической энергии нейтронов.



### Цепная реакция



Энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, порядка 200 МэВ - это огромная величина. При полном делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется такая же энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Из-за того, что при делении одного ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется более двух свободных нейтронов, возникает **цепная реакция**, когда выделившиеся нейтроны бомбардируют следующие ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и так далее в нарастающем лавинообразном темпе.

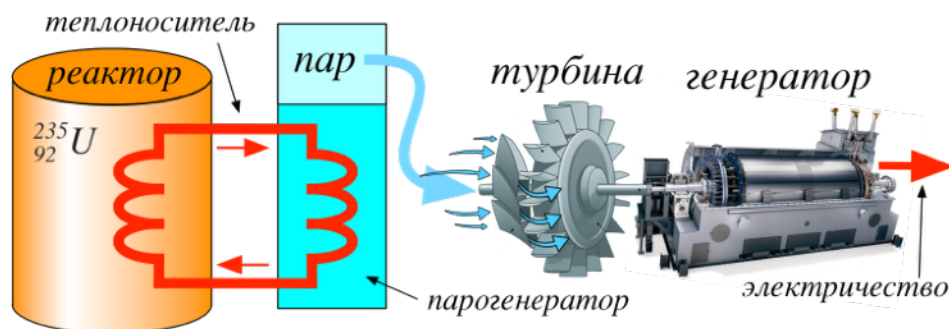
Надо понимать, что не все свободные нейтроны попадают в следующие ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  - некоторые "промахиваются". Но то, что в среднем их 2,6 штуки как раз и обеспечивает протекание цепной

реакции. И есть так называемая *критическая масса* урана-235 - минимальная масса (около 50 кг), начиная с которой цепная реакция начинает лавинообразно нарастать.

Существуют и другие ядерные реакции деления (например, деление плутония-239), приводящие к выделению больших объёмов энергии.

Как это всегда бывало в человеческой истории, энергию ядерного деления начали использовать в военных целях. Ядерные бомбы разной мощности создавали, испытывали и применяли (Хиросима-Нагасаки) с большим энтузиазмом. Ну об этом говорить что-то не хочется.

А поговорим-ка мы о мирном использовании реакций ядерного деления. Вот перед вами самая общая схема производства электроэнергии на атомной электростанции (АЭС).



Всё начинается в реакторе, где и протекает реакция деления ядер. Ядерной реакцией можно управлять: замедлять (вплоть до останова) и ускорять. Температура внутри ядерного реактора - порядка  $1200^{\circ}\text{C}$ . Ядерный реактор производит тепло (те самые 200 МэВ на делящийся атом просто разогревают *активную зону* реактора). Тепло это надо суметь забрать и преобразовать его в нужный вид энергии. Тепло забирают с помощью теплоносителя (это может быть вода, жидкий металлический натрий и пр.), который прогоняют по замкнутому контуру и который превращает воду в пар в парогенераторе. По большому счёту ядерный реактор является гигантским ядерным кипятильником. Ну а дальше - "старинным дедовским способом": пар вращает турбину, турбина вращает генератор, генератор вырабатывает электрический ток.

КПД таких систем невысок - порядка 30%. Но при тех мощностях, что современные АЭС достигают (до 5 ГВт), "и так неплохо" - себестоимость производства одного кВт/ч электроэнергии на АЭС и на ТЭС (при сжигании угля, газа и мазута) примерно одинаковы. Ядерное урановое топливо загружается в АЭС один раз в 3-5 лет<sup>41</sup>. На сегодняшний день в мире производится порядка 20% электроэнергии на атомных станциях.

Всё бы ничего, да вот одна закавыка: если по какой-то причине теряется контроль над ядерной реакцией, то реактор превращается в бомбу и, взрываясь, заражает радиоактивными отходами большие территории. Примеры тому есть: Чернобыль и Фукусима.

<sup>41</sup> На сегодняшний день разведанных запасов урановой руды хватит человечеству лет на сто. Кстати, нефти и газа хватит лет на 60. А потом что? Опять дрова?

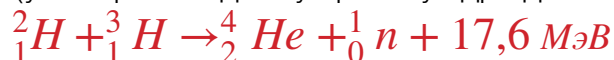


## ■ Реакция ядерного синтеза

Выше мы сказали, что существуют две возможности получения положительного энергетического выхода при ядерных превращениях: *деление тяжелых ядер* и *слияние легких ядер*. Первый случай мы рассмотрели, говоря о делении ядер урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . И с помощью ядерных реакций деления человечество научилось получать энергию для своих нужд. А как обстоят дела со вторым случаем ядерных реакций?

Реакции слияния (говорят ещё *реакции ядерного синтеза*) легких ядер носят название *термоядерных реакций*, так как они могут протекать только при очень высоких температурах. Чтобы два ядра вступили в реакцию синтеза, они должны сблизиться на расстояние действия ядерных сил порядка  $2 \cdot 10^{-15}$  м, преодолев электрическое отталкивание их положительных зарядов. Для этого средняя кинетическая энергия теплового движения молекул должна превосходить потенциальную энергию кулоновского взаимодействия. Расчет необходимой для этого температуры приводит к величине порядка  $10^8$ - $10^9$  К. Это чрезвычайно высокая температура. При такой температуре вещество находится в полностью ионизированном состоянии, которое называется *плазмой*.

Основная реакция ядерного синтеза - это реакция слияния ядер изотопов водорода дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$  (у которых к одному протону ядра добавились нейтроны)<sup>42</sup>:



В результате получается атом гелия, нейтрон и 17,6 МэВ энергии в виде излучения фотонов и кинетической энергии нейтрона (3,5 МэВ/нуклон). В расчете на один нуклон эта энергия в несколько раз превышает энергию, выделяющуюся в реакциях ядерного деления. Важно отметить, что в результате этой реакции не возникает радиоактивных продуктов (как в случае с реакцией ядерного деления).

На сегодняшний день удалось осуществить только *неуправляемую* реакцию ядерного синтеза в водородной (термоядерной) бомбе. Высокая температура, необходимая для ядерного синтеза, достигается здесь с помощью взрыва обычной урановой или плутониевой ядерной бомбы.

А вот с *управляемой* термоядерной реакцией вопрос пока не решён. И главная проблема здесь - стабильное удержание высокотемпературной плазмы для поддержания реакции. Экспериментальные установки работают, но в них пока получаемая энергия меньше энергии, затрачиваемой на поддержание реакции синтеза. Прогнозы говорят, что в течение ближайших 20-30 лет появятся термоядерные установки для промышленного производства энергии. И если это произойдёт, то мы получим практически неисчерпаемый источник энергии. И радиационная безопасность при этом гораздо выше, чем в случае реакции деления.

Но всё равно, схема для производства электроэнергии будет прежней: реактор с управляемой термоядерной реакцией, генерирующий большие объёмы тепловой энергии (ядерный кипятильник) → парогенератор → турбина → электрогенератор → электричество.

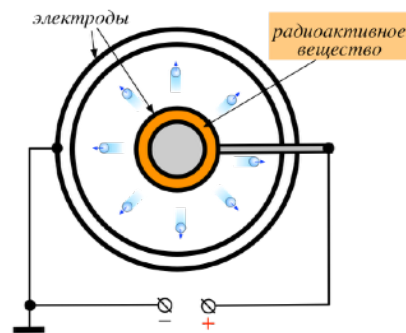


Вдумчивый ученик опять тянет руку и спрашивает: "А есть ли способы производить электричество непосредственно из ядерной реакции? Ведь поток заряженных частиц (электронов, протонов и пр.) и есть ток. И КПД в этом случае наверняка был бы выше."

<sup>42</sup> Дейтерий - это стабильный изотоп, он содержится в обычной воде: его там порядка 0,0115%. А вот тритий - радиоактивный (период полураспада - 12 лет) и его надо производить в лаборатории.

Да, такие способы есть. Но они явно не подходят для промышленного производства электроэнергии.

Выше я уже упомянул "ядерные батарейки". Принцип их работы весьма прост: радиоактивное вещество (сейчас используют тритий), подверженное  $\beta$ -распаду, испускает электроны, которые собираются на внешнем электроде. Возникает разность потенциалов между электродами.



Напряжение на электродах - порядка 3 вольт, а ток - порядка микроампера. Ток явно маловат, даже если объединить несколько таких элементов. Но зато стабильно работать такая "ядерная батарейка" может в течение 20 лет. Ждать каких-либо прорывов в этом направлении (резкого увеличения мощности) пока не приходится.



Кстати, такую батарейку можно купить через интернет. И цена вполне подходящая - 1200 долларов. Но учтите: ни зажечь лампочку фонарика, ни зарядить мобильный телефон такая батарейка не сможет.

Существуют идеи аналогичным образом использовать  $\alpha$ -частицы (положительно заряженные ядра гелия), в огромном количестве возникающие при ядерных реакциях деления. Однако дальше небольших исследований дело не пошло.

Вообще складывается довольно неутешительное зрелище, свидетельствующее о технологическом уровне развития человечества. Мы мастерски научились сжигать топливо (дерево, уголь, нефть, уран) для получения тепловой энергии, которую впоследствии с большими потерями (доходящими до 50%) превращаем в электрическую. Которую впоследствии частично снова превращаем в тепловую (для обогрева) и в механическую (опять с тепловыми потерями, доходящими до 50%).

Как только электроэнергию мы сгенерировали, так мы тут же отправляем её на потребление. Мы не умеем её запасать и хранить. "А электрические аккумуляторы?" - спросите вы. Я вас умоляю, вспомните свой мобильный телефон, который вы хотя бы раз в два дня вынуждены подзаряжать. Нынешние электрические аккумуляторы крайне неэффективны.



Вот пример в цифрах. Удельная теплоёмкость сгорания нефти в среднем равна  $4,4 \cdot 10^7$  Дж/кг. То есть если вы сожжёте один килограмм нефти, то вы получите  $4,4 \cdot 10^7$  джоулей тепла или 44 мегаджоуля. А вот хороший автомобильный аккумулятор фирмы Bosch - его параметры: напряжение 12 вольт; ёмкость 95 ампер-часов (это по сути заряд, который он хранит); масса 22,2 кг. Если по формуле  $E = \frac{q \cdot U}{2}$  посчитать энергию, которую аккумулятор хранит, а потом эту

энергию разделить на его массу, то мы получим удельную плотность хранения энергии. И для хорошего аккумулятора фирмы Bosch она составит 92,5 килоджоуля на килограмм. Это в 475 раз меньше, чем плотность хранения энергии в сырой нефти. Даже если учесть, что КПД производства электроэнергии при сжигании нефти составляет порядка 30% всё равно следует вывод: энергию выгоднее хранить в первозданном её виде - в виде сырой нефти. До эффективности Природы нам ещё далеко.



Будем надеяться, что в связи с развитием электромобилей будет прогресс и в эффективности электрических аккумуляторов.

=====

## → Элементарные частицы

Мы уже познакомились с некоторыми элементарными частицами: электроном, протоном, нейтроном, фотоном. И сказали, что их открыто много. Поговорим о них.

Мир наполнен веществом и вещество это взаимодействует. Вещество состоит из атомов, атомы состоят из электронов-протонов-нейтронов. Так же, как на макро-уровне два одинаково заряженных тела отталкиваются, кирпич гравитационно притягивается к Земле, так и на микро-уровне два электрона отталкиваются, протоны и нейтроны удерживаются в атомном ядре сильным ядерным взаимодействием - это и есть взаимодействие вещества.

Ньютон и Кулон, открывая свои законы (гравитационного и электростатического взаимодействий), не объясняли механизмы такого взаимодействия: ну притягиваются на огромных расстояниях две планеты, отталкиваются два заряженных шарика - ну и здОрово. Дальнодействие! - говорили они. Формулы давали правильную величину сил.

Электродинамика Максвелла дала разъяснение, введя понятие поля. Заряженные тела создают электромагнитное поле и это электромагнитное поле воздействует на другие заряженные тела. И Максвелл написал уравнения, описывающие это поле. С электромагнитным взаимодействием стало всё понятно.

А вот Эйнштейн в своей Общей Теории Относительности показал, что массы искривляют пространство и гравитационное взаимодействие - это стремление тел занять минимальное энергетическое положение в таком искривлённом пространстве. Формально у Эйнштейна понятие гравитационного поля (как мы привыкли понимать) совсем не обязательно<sup>43</sup>. Однако оно сохранилось в силу традиций и мы продолжаем говорить, что две массы взаимодействуют через гравитационное поле, ими создаваемое. С гравитационным взаимодействием тоже стало всё понятно.

*Что там у нас осталось из видов взаимодействий? Ага, сильное ядерное и слабое ядерное взаимодействия. И это взаимодействия микромира.*



Теория элементарных частиц и квантовая механика, их физику описывающая, пошли ещё дальше: они утверждают, что **на уровне микромира все виды взаимодействий можно описать как обмен частицами вещества специальными частицами-переносчиками конкретного вида взаимодействия**. Эта идея очень важна!

Ну вот, мы и подошли к элементарным частицам вплотную. Сразу оговорюсь: моя задача - не перечислить порой труднопроизносимые названия элементарных частиц, не сообщить их параметры, а показать идеи и принципы, которые лежат в основе теории элементарных частиц.

И сразу "быка за рога" - *основные характеристики элементарных частиц: масса, электрический заряд, время жизни, спин, магнитный момент, барионный заряд, лептонный заряд, странность, очарование, прелесть, истинность, изотопический спин, чётность, зарядовая чётность, G-чётность, CP-чётность, T-чётность, R-чётность, P-чётность*. И это только основные.

"Ой!" - тихо скажете вы и загрустите.

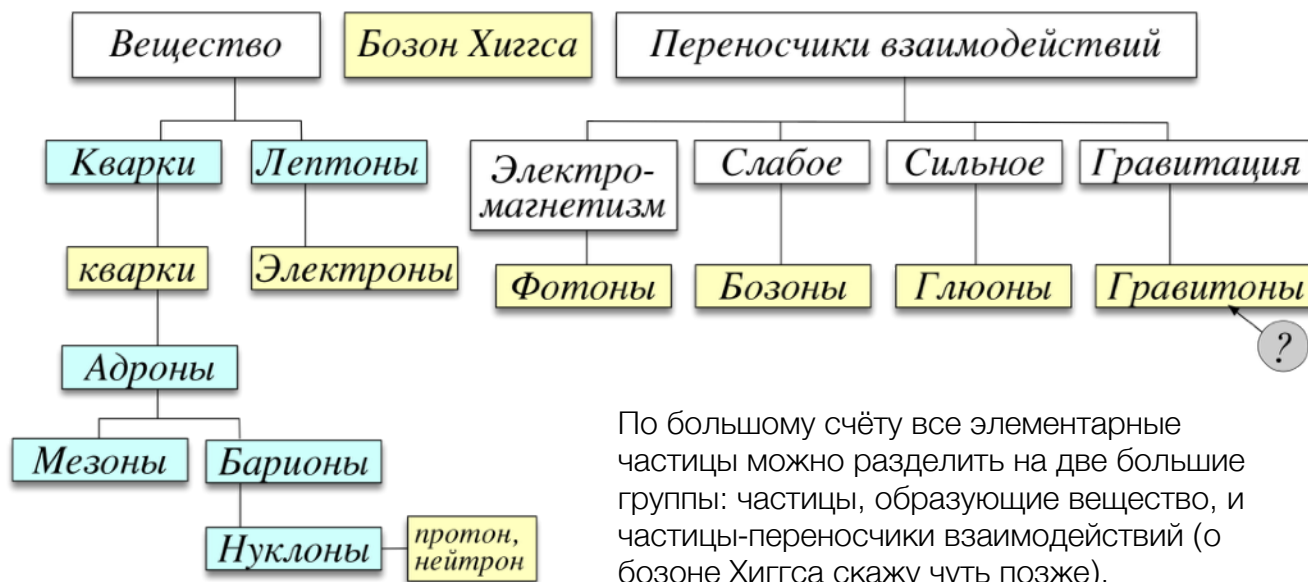
---

<sup>43</sup> Поэтому Общая Теория Относительности - это теория геометрии пространства, а не полевая теория (как электромагнетизм).

Не всё так плохо - для наших рассуждений мы будем пользоваться только уже знакомыми нам первыми четырьмя: масса, заряд, время жизни и спин<sup>44</sup>. Массы и заряды будем рассматривать в единицах массы и заряда электрона.

Вот перед вами схема с функциональной классификацией элементарных частиц. Жёлтым цветом обозначены конкретные частицы, голубым - группы частиц.

## Элементарные частицы

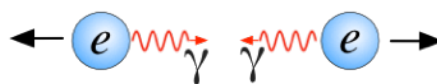


По большому счёту все элементарные частицы можно разделить на две большие группы: частицы, образующие вещество, и частицы-переносчики взаимодействий (о бозоне Хиггса скажу чуть позже).

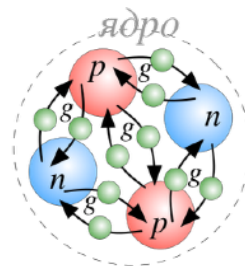
### ■ Частицы-переносчики взаимодействий

Мы знаем четыре вида взаимодействий - четыре вида частиц-переносчиков присутствуют на этой схеме. Почему у гравитона стоит вопросительный знак? Да потому, что это лишь гипотеза и гравитон не был обнаружен. Вообще, гравитация - это взаимодействие на больших расстояниях (мы уже считали, что на уровне микромира она в  $\sim 10^{40}$  раз слабее кулоновских сил). И попытки описать гравитацию средствами квантовой механики неоднократно заканчивались ничем. Но для общности картинки мы гравитон указали. Не обращайтесь на него внимания.

**Фотон** - квант электромагнитного излучения: безмассовая частица без заряда, движущаяся со скоростью света - о нём мы много говорили. Фотон является переносчиком электромагнитного взаимодействия. Например, два электрона обмениваются фотонами, в результате чего и возникает кулоновское отталкивание. Если вдаваться в большие подробности такого взаимодействия, то придётся писать уравнения квантовой механики, к которым мы с вами не готовы. Потерпите до третьего курса института.



**Глюон** (от английского *glue* - клей) - элементарная безмассовая частица без заряда - переносчик сильного ядерного взаимодействия. Благодаря обмену глюонами между протонами и нейтронами в ядре работает сильное ядерное взаимодействие, удерживающее ядро целым.



<sup>44</sup> О спине мы говорили в *Истории про Магнетизм*. Напомню: **спин** - это собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с движением (перемещением или вращением) частицы как целого. У элементарных частиц спин принимает значения: 0, 1/2, 1 и 2 (безразмерная величина).



**Бозон** (точнее - три вида из всех бозонов) - элементарная частица с большой массой и зарядом - переносчик слабого ядерного взаимодействия. Слабое ядерное взаимодействие - самое короткодействующее из всех видов взаимодействий. Оно связывает кварки внутри нуклонов (об этом чуть позже) и умеет превращать одни частицы в другие.

Вот табличка с параметрами этих частиц-переносчиков взаимодействий.

| <i>Переносчики взаимодействий</i> | <i>Масса</i> | <i>Заряд</i> | <i>Спин</i> | <i>Время жизни</i>   |
|-----------------------------------|--------------|--------------|-------------|----------------------|
| Фотон                             | 0            | 0            | 1           | стабилен             |
| Глюон                             | 0            | 0            | 1           | стабилен             |
| Бозоны слабого взаимодействия     | 157000       | -1/ 0/ 1     | 1           | $3 \cdot 10^{-25}$ с |

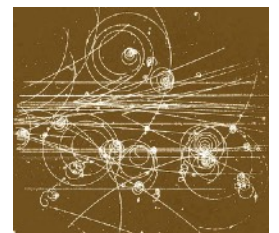
А теперь поговорим о **частицах, из которых строится вещество**.

**Лептоны** ("лептос" по гречески "легкий") - лёгкие частицы с полуцелым спином, **не участвующие в сильном и слабом взаимодействии** - то есть они не участвуют во внутриядерных процессах. И ещё очень важно: **лептоны не имеют внутренней структуры** (не то, что протон и нейтрон, состоящие из кварков).

| <i>Лептоны</i>         | <i>Масса</i> | <i>Заряд</i> | <i>Спин</i> | <i>Время жизни</i>    |
|------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------|
| Нейтрино/Анти-нейтрино | $\sim 0$     | 0            | 1 / 2       | Стабильно             |
| Электрон/Позитрон      | 1            | -1/1         | 1 / 2       | Стабилен              |
| Мюон                   | 206,8        | -1/1         | 1 / 2       | $2,2 \cdot 10^{-6}$ с |

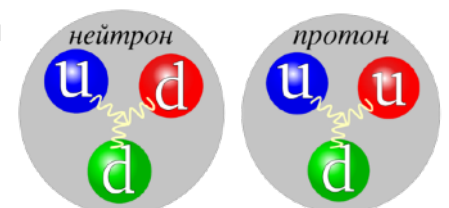
Самый знакомый нам лептон - **электрон**. Его античастица - **позитрон**.

**Нейтрино** (их три вида) - частица-спутник термоядерных реакций на Солнце. Поэтому Земля постоянно облучается потоками нейтрино.



**Кварки**. Если мы можем с вами наблюдать в пузырьковой камере следы от пролёта электронов, протонов, нейтронов и прочих частиц, то с кварками такого не получится: кварки не существуют по-отдельности - они всегда объединяются, образуя те или иные частицы. Кварки участвуют в сильных, слабых, электромагнитных и гравитационных взаимодействиях. Кварков "насчитывают" шесть штук плюс анти-кварк у каждого из шести. У кварков заряды кратны  $e/3!!!$

Нейтрон и протон, например, состоят из трёх кварков. Кварки внутри них связаны слабым ядерным взаимодействием. И из кварков формируются **составные** частицы, носящие общее название **адроны** (от греческого adros - "тяжелый"). К адронам относят частицы, существующие внутри атомного ядра.

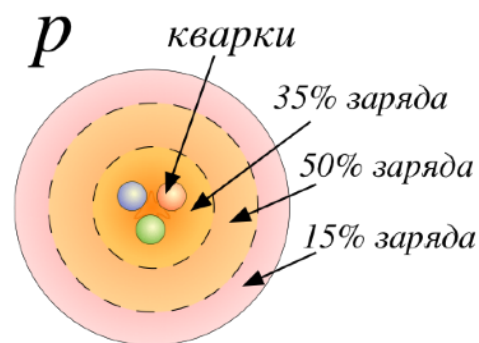


Не буду вас мучить мезонами-барионами, а перейду к рассмотрению знакомых нам **нуклонов: протонов и нейтронов**.

| Нуклоны              | Масса  | Заряд  | Спин  | Время жизни |
|----------------------|--------|--------|-------|-------------|
| Протон/Анти-протон   | 1836,1 | 1 / -1 | 1 / 2 | Стабилен    |
| Нейтрон/Анти-нейтрон | 1838,6 | 0      | 1 / 2 | 898 с       |

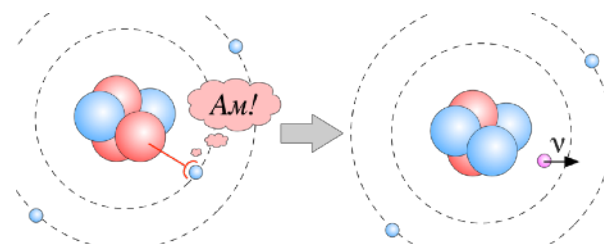
■ **Протон** (от греческого "протос" - первый, основной) - **стабильная** положительно заряженная частица - один из двух "кирпичиков" атомных ядер.

У протона сложная внутренняя структура: он состоит из тяжелой сердцевинки с высокой плотностью массы и заряда (35% всего заряда протона) и окружающей его относительно разряженной оболочки. В этой сердцевинке располагаются кварки. Давление, создаваемое кварками, составляет порядка  $10^{35}$  Па, то есть выше давления внутри нейтронных звезд. Следующий слой состоит из виртуальных<sup>45</sup> мезонов и несёт 50% электрического заряда протона, а далее простирается оболочка из других виртуальных мезонов, несущих оставшиеся 15% его заряда. А мы привыкли обозначать протон просто розовым шариком. Да в протоне живут целые миры!



У протона есть анти-частица - анти-протон, отличающаяся от протона только противоположным зарядом.

Протон, находясь в ядре, способен захватывать электрон с определенной орбиты атома. Сам протон превращается при этом в нейтрон и испускает нейтрино:  $p + e \rightarrow n + \nu$ .



Протон охотно участвует во многих других реакциях с частицами. Вот такой хитрый протон!

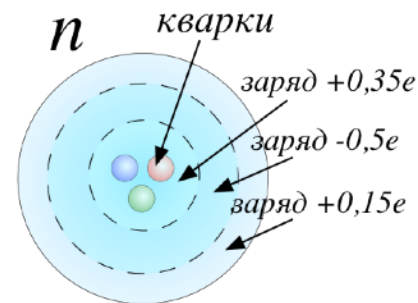
■ **Нейтрон** - второй "кирпичик" атомных ядер - частица без заряда со средним временем жизни около 900 секунд.

*Здесь надо пояснить. Когда мы говорили о радиоактивном распаде ядер, то одной из характеристик тоже являлось среднее время жизни ядра. Ядра, перегруженные нейтронами и не способные существовать целыми, распадались на части с вполне определённой скоростью. И механизмом, обеспечивающим радиоактивный распад, являлся квантовый туннельный эффект.*

*Подавляющее большинство известных элементарных частиц являются нестабильными: через определенные промежутки времени (как раз и называемым средним временем жизни частицы) они испытывают **самопроизвольные** превращения в другие частицы. И время это зависит от внутренней структуры этих частиц (а на примере протона вы можете видеть, что структура эта ой как сложна). Механизмы таких превращений определяются квантовыми процессами внутри структуры самих частиц. Поскольку все события микромира носят вероятностный характер, то среднее время жизни частицы - это средняя вероятностная величина. Стабильными (не превращающимися самопроизвольно в другие частицы) являются только четыре частицы: **фотон, электрон, протон и нейтрино**.*

<sup>45</sup> "Виртуальный" - непрерывно рождающийся и исчезающий. В этих областях постоянно "кипит бульон" из таких виртуальных частиц.

У нейтрона не менее сложная, чем у протона структура. Та же тяжёлая сердцевина с кварками с общим зарядом  $+0,35e$  и две оболочки с зарядами соответственно  $-0,5e$  и  $+0,15e$ , заполненные "кипящим бульоном" из виртуальных частиц.



"Но позвольте, какие такие заряды у оболочек? Ведь нейтрон нейтрален!" - воскликните вы.

Да, нейтрон нейтрален (имеет нулевой заряд) в целом. Но нейтрон состоит из одного кварка с зарядом  $+2/3e$  и двух кварков с зарядом  $-1/3e$ , что и придаёт его внутренней структуре неоднородность распределения заряда.

**Свободный** нейтрон (не заключённый в ядре) превращается в среднем через 900 секунд в протон, электрон и нейтрино:  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e + \nu$ . Нейтрон, заключённый в ядро атома, может быть стабильным. Но в некоторых ядрах он может распадаться аналогично - в этом и состоит  $\beta$ -распад.

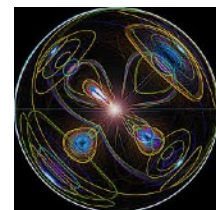
У нейтрона есть анти-частица - анти-нейтрон: он отличается от нейтрона противоположным по знаку магнитным моментом.

■ **Бозон Хиггса** - это очень тяжёлая беззарядовая короткоживущая частица.

|              | Масса  | Заряд | Спин | Время жизни            |
|--------------|--------|-------|------|------------------------|
| Бозон Хиггса | 230000 | 0     | 0    | $1,6 \cdot 10^{-22}$ с |

Почему на вышеприведённой схеме элементарных частиц он стоит особнячком? Сейчас отвечу.

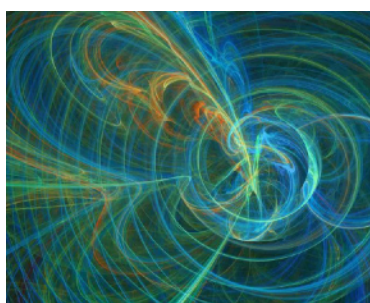
Бозон Хиггса был предсказан британским физиком Питером Хиггсом в начале 60-х годов 20-го века. И только в 2013 году с помощью Большого адронного коллайдера его удалось обнаружить. Бозон Хиггса стал на некоторое время "звездой" в газетах и интернете - с таким нетерпением все ждали его открытия.



Бозон Хиггса является квантом (переносчиком) некоторого поля Хиггса (вида электромагнитного поля), заполняющего пространство. Это поле Хиггса выполняет в микромире сверхважную функцию - *оно наделяет пролетающие через него частицы массой* (!!!). Некоторые частицы (фотон, нейтрино) способны проходить через это поле, не получая массы, в то время как другие "вязнут" в нем и массу накапливают.

Предсказание и обнаружение бозона Хиггса сделало понимание системы элементарных частиц достаточно полным.

И ещё одно важное понятие - **физический вакуум**.

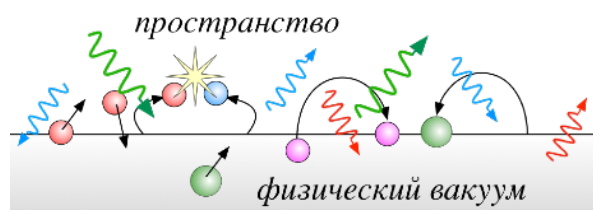


Под физическим вакуумом понимается не тот "технический вакуум", который образуется в результате откачивания воздуха из какого-либо сосуда, а особое состояние материи.

Физический вакуум - это независимая, универсальная, имеющая чрезвычайно специфические свойства физическая среда, которую ни в коем случае нельзя идентифицировать с пустым

геометрическим пространством. Физический вакуум фактически заполняет мировое пространство и определяет по сути его фундаментальные физические свойства. Согласно квантовой теории поля вакуум рассматривается не как простое отсутствие поля или частиц, а как одно из возможных их состояний.

В каждой точке пространства каждое мгновение физический вакуум рождает частицы и античастицы, которые тут же аннигилируют, испуская световые кванты, которые в свою очередь мгновенно поглощаются. В частности, было установлено, что родившийся из вакуума электрон может существовать как реальная частица лишь в течение всего  $10^{-22}$  секунд. За это время он никак не может "проявить себя", то есть вступить во взаимодействие с какой-либо другой реальной частицей.



В каждый момент времени в рассматриваемом объёме существует многообразие частиц и квантов излучения. Выше я назвал это "кипящим бульоном". Подобные "невидимые" частицы назвали "виртуальными". Они одновременно как бы существуют и не существуют. Считается, что в вакууме имеются все возможные виды элементарных частиц. Однако при обычных условиях их энергии недостаточно, чтобы вырваться в реальный мир и превратиться в частицы обычного вещества. Физический вакуум непосредственно не наблюдается, но проявление его свойств регистрируется в экспериментах.

Рассказывая об элементарных частицах, я в первую очередь хочу вам показать насколько непривычным и сложным является микромир, насколько неприменимы к нему понятия классической физики и "здоровый смысл".

Физическая теория строения и взаимодействий элементарных частиц называется **Стандартная модель**. Она многократно проверена экспериментально. Эта теория базируется на очень небольшом количестве постулатов и позволяет теоретически предсказывать свойства тысяч различных процессов в мире элементарных частиц.

**Стандартная модель** - это та граница, которая отделяет достоверно известное от гипотетического в мире элементарных частиц. Несмотря на впечатляющий успех в описании экспериментов, Стандартная модель не может считаться окончательной теорией элементарных частиц. Физики уверены, что *она должна быть частью некоторой более глубокой теории строения микромира*.

Рабочим инструментом Стандартной модели является квантовая теория поля - теория, приходящая на смену квантовой механике при скоростях, близких к скорости света. И вакуум, и то, что мы воспринимаем как отдельные частицы, и более сложные образования, которые нельзя свести к отдельным частицам - всё это описывается как разные состояния полей. Когда физики употребляют слово "частица", они на самом деле имеют в виду именно эти состояния полей, а не отдельные точечные объекты.

Стандартная модель - это, во многом, описательная теория. Она не дает ответы на многие вопросы, начинающиеся с "почему": почему частиц именно столько и именно таких? откуда взялись именно эти взаимодействия и именно с такими свойствами? почему заряд электрона именно таков? и пр. Стандартная модель объединила три вида взаимодействий: электромагнитное, сильное и слабое ядерные, но ничего не смогла сделать с гравитацией - она её не учитывает.

=====



В этой Истории я неоднократно ссылался на квантовую механику как на описывающую микромир область физики. Для полноты хочу изложить основные идеи, лежащие в её основе.

## ■ Основные идеи квантовой механики

Слово "квант" происходит от латинского *quantum* ("сколько, как много") и английского *quantum* ("количество, порция, квант"). "Механикой" издавна принято называть науку о движении материи. Соответственно, термин "квантовая механика" означает науку о движении материи порциями (квантующейся материи).

Квантовая механика часто противоречит нашим понятиям о здравом смысле. А всё потому, что здравый смысл подсказывает нам вещи, которые берутся из повседневного опыта, а в своем повседневном опыте нам приходится иметь дело только с крупными объектами и явлениями макромира, а на атомарном и субатомном уровне материальные частицы ведут себя совсем иначе. И когда выясняется, что они не подчиняются привычным правилам и их поведение противоречит нашим интуитивным понятиям о мире, нас это не просто удивляет, а шокирует.

> В повседневной жизни имеется два способа переноса энергии в пространстве - посредством частиц или волн. В обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии видимых противоречий не наблюдается. Так, баскетбольный мяч - это частица, а звук - это волна, и всё ясно.

Однако в квантовой механике всё обстоит отнюдь не так просто. Даже из простейших опытов с квантовыми объектами очень скоро становится понятно, что в микромире привычные нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц (фотонов), а элементарные частицы, такие как электрон или даже массивный протон, нередко проявляют свойства волны. В микромире объекты, которые ведут себя как частицы, при этом как бы "помнят" о своей волновой природе, и наоборот. Это странное свойство объектов микромира получило название *корпускулярно<sup>46</sup>-волнового дуализма*. Оно объективно присуще частицам микромира.

И *принцип дополнительности* гласит: если мы измеряем свойства квантового объекта как частицы, мы видим, что он ведет себя как частица. Если же мы измеряем его волновые свойства, для нас он ведет себя как волна. Оба представления отнюдь не противоречат друг другу - они именно дополняют одно другое, что и отражено в названии принципа.

И численным выражением принципа дополнительности является *соотношение де Бройля*. Одна из физических характеристик любой частицы - ее скорость. При этом физики по ряду теоретических и практических соображений предпочитают говорить не о скорости частицы как таковой, а о ее импульсе, который равен произведению скорости частицы на ее массу. Волна описывается совсем другими фундаментальными характеристиками - длиной волны или частотой. Де Бройлю же удалось сформулировать соотношение, связывающее

импульс частицы  $p$  с длиной волны  $\lambda$ , которая ее описывает:  $p = \frac{h}{\lambda}$ , где  $h$  - постоянная

Планка  $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$  м<sup>2</sup>·кг/с. Это простое соотношение гласит буквально следующее: при желании можно рассматривать квантовый объект как частицу, обладающую импульсом  $p$ ; с другой стороны, ее можно рассматривать и как волну, длина которой равна  $\lambda$ . Иными словами, волновые и корпускулярные свойства квантовой частицы фундаментальным образом взаимосвязаны.

<sup>46</sup> "Корпускула" - по-латински означает "частица".

> В макромире мы можем достоверно и однозначно определить местонахождение (координаты) любого объекта. Не важно, используем ли мы линейку, радар или любой другой метод измерения, результаты измерений будут объективными и не зависящими от положения объекта. Некоторая неопределенность и неточность возможны - но лишь в силу ограниченных возможностей измерительных приборов и погрешностей наблюдения. Чтобы получить более точные и достоверные результаты, нам достаточно взять более точный измерительный прибор. В обычном мире, измеряя положение и скорость тела в пространстве, мы на него практически не воздействуем. В идеале мы можем *одновременно* измерить и скорость, и координаты объекта абсолютно точно.

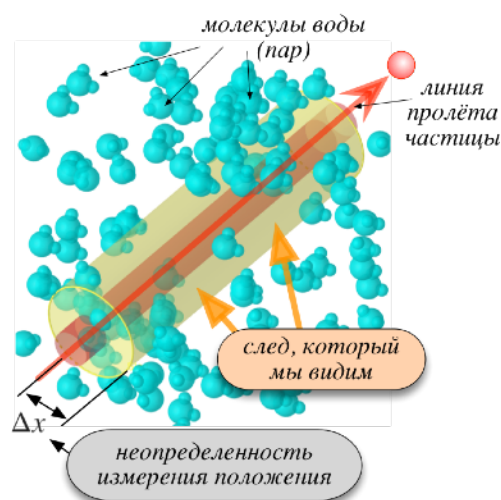
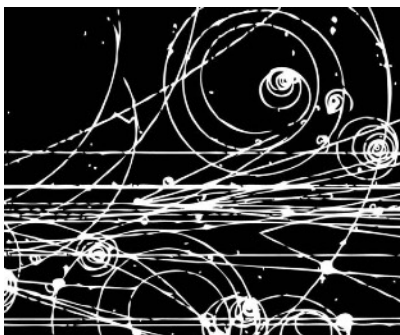
В микромире линеек и радаров нет. Иных инструментов, кроме других элементарных частиц, там тоже нет. Поэтому любое измерение параметров частицы *связано с воздействием на неё других частиц*. А коли мы воздействуем на частицу в процессе измерения её параметров, то мы эти параметры изменяем! Сам факт проведения измерения, например, местоположения частицы, приводит к изменению её скорости, причем непредсказуемому (и наоборот). То есть возникает *неопределённость* в результатах измерений. Эта неопределенность не является результатом неточности измерительного прибора, она - фундаментальна.

И описывает эти неопределенности измерений параметров частиц *соотношение (принцип) неопределенностей Гейзенберга* - удивительная по простоте формула, дающая общее описание эффекта воздействия инструментов измерения на измеряемые объекты микромира:  $\Delta x \cdot \Delta p > h$ , где  $\Delta x$  - неопределенность (погрешность измерения) пространственной координаты микрочастицы,  $\Delta p$  - неопределенность импульса частицы,  $h$  - постоянная Планка.

Термин "неопределенность пространственной координаты" как раз и означает, что мы не знаем точного местоположения частицы. Чем меньше неопределенность при измерении в отношении одной переменной (например,  $\Delta x$ ), тем более неопределенной становится другая переменная ( $\Delta p$ ), поскольку произведение двух погрешностей в левой части соотношения не может быть меньше константы в правой его части. На самом деле, если нам удастся с нулевой погрешностью (абсолютно точно) определить одну из измеряемых величин, неопределенность другой величины будет равняться бесконечности, и о ней мы не будем знать вообще ничего. Иными словами, если бы нам удалось абсолютно точно установить координаты квантовой частицы, о ее импульсе мы не имели бы ни малейшего представления; если бы нам удалось точно зафиксировать импульс частицы, мы бы понятия не имели, где она находится. На практике, конечно, физикам-экспериментаторам всегда приходится искать какой-то компромисс между двумя этими крайностями и подбирать методы измерения, позволяющие с разумной погрешностью судить и об импульсе, и о пространственном положении частиц.

Принцип неопределенностей связывает не только пространственные координаты и импульс - на этом примере он просто проявляется нагляднее всего; в равной мере принцип неопределенности связывает и другие пары взаимно увязанных характеристик микрочастиц. Так  $\Delta E \cdot \Delta t > h$ , где  $\Delta E$  - неопределенность измерения энергии микрочастицы,  $\Delta t$  - неопределенность времени, которым квантовая частица этой энергией обладала.

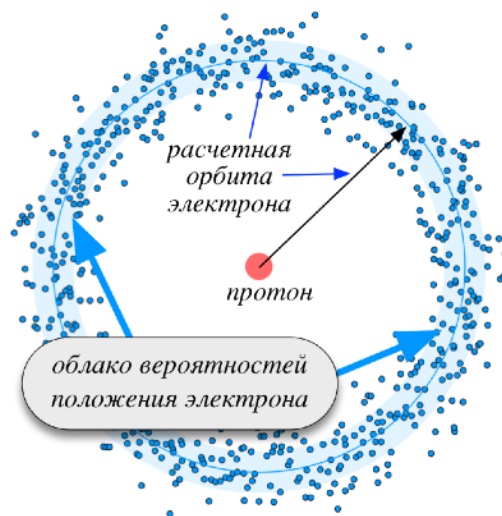
Вот иллюстрация движения частицы в пузырьковой камере. По следу частицы (по сконденсировавшимся молекулам воды) мы можем судить о положении и скорости частицы. Но неопределённость измерения как положения, так и скорости присутствует всегда.



Относительно соотношения неопределенностей важно сказать:

- ключевым в этом принципе является взаимодействие между частицей-объектом измерения и инструментом измерения, влияющим на его результаты;
- принцип не подразумевает, что какую-либо одну из двух характеристик частицы - координаты или импульс - нельзя измерить сколь угодно точно;
- принцип действует объективно и не зависит от присутствия разумного субъекта, проводящего измерения.

Соотношение неопределенностей делает квантовую механику совершенно непохожей на классическую. Здесь мы уже не можем точно определить координаты и импульс тела. Кроме того, в квантовой механике уже не существует такого понятия как траектория! Как же это себе представить. Оказывается довольно легко. В сущности, мы никогда и не наблюдаем никакой траектории, есть только взаимодействие. Например, можно лишь посчитать вероятность нахождения электрона в том или ином месте его орбиты в атоме.



Остается понять лишь один вопрос. Что происходит с макро-телами? Почему для микро-тел мы применяем квантовые законы, а для макротел классические? Все дело в малости постоянной Планка. Так соотношение неопределенностей даже для песчинки ничтожно мало, и потому, приближенно, можно говорить что ее координаты и импульс можно измерить точно. Также для песчинки существует дуализм волна-частица, но волновые свойства в ней проявляются столь слабо, что их никак нельзя обнаружить.

> Основной идеей всей квантовой механики служит то, что **всё в мире частиц описывается только вероятностно.**

Из-за соотношения неопределенностей описание объектов квантового микромира носит иной характер, нежели привычное описание объектов макромира. Вместо пространственных координат и скорости, которыми мы привыкли описывать механическое движение, в квантовой механике объекты описываются так называемой **волновой функцией**. Гребень "волны" соответствует максимальной вероятности нахождения частицы в пространстве в момент измерения. Движение такой волны описывается **уравнением**

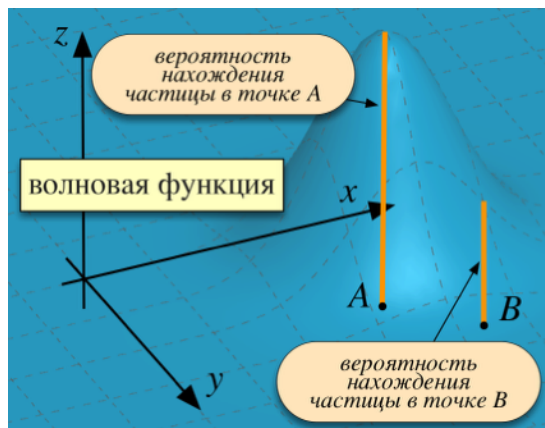
*Шрёдингера*, которое и говорит нам о том, как изменяется со временем состояние квантовой системы.

Вот так выглядит знаменитое уравнение Шредингера:

$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H}(p, q) \Psi(\vec{r}, t)$ , где  $\Psi(\vec{r}, t)$  - волновая функция как функция координат частицы и времени,  $\hat{H}(p, q)$  - оператор (функция), зависящий от массы, импульса и энергии частицы.

Как видите, уравнение Шредингера является дифференциальным уравнением. Составив такое уравнение (указав массу, импульс и энергию частицы) и решив его, мы получим волновую функцию, задающую вероятность положения частицы в любой точке пространства в любой момент времени.

На рисунке показан пример такой функции для двумерного пространства  $x, y$ .



Картина квантовых событий в микромире, рисуемая уравнением Шрёдингера, такова, что частицы уподобляются отдельным приливным волнам, распространяющимся по поверхности океана-пространства. Со временем гребень волны (соответствующий пику вероятности нахождения частицы, например электрона, в пространстве) перемещается в пространстве в соответствии с волновой функцией, являющейся решением этого дифференциального уравнения. Соответственно, то, что нам традиционно представляется частицей, на квантовом уровне проявляет ряд характеристик, свойственных волнам.

Со временем квантовая механика развилась в квантовую теорию поля.



На этом заканчиваем увлекательную Историю про Атом и Микро-мир.

