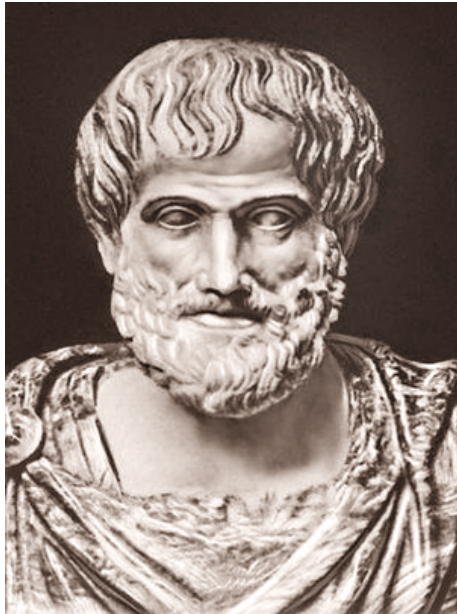


Мир атомных ядер

Структура материи

Элементарные частицы вещества. Из чего всё сделано?



Аристотель
384 – 322 гг. до н.э.



Демокрит
460 – 360 до н.э.

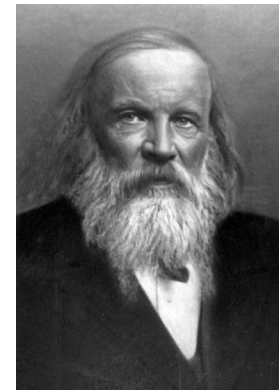


**Атом – неделимая
частица материи**



Антуан Лавуазье
1743 – 1794

Химические элементы



Д. И. Менделеев
1834 – 1907

¹ H							² He		
³ Li	⁴ Be	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
¹¹ Na	¹² Mg	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni
²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr		
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd
⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe		
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	La-Lu	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt
⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn		
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	Ac-Lr	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds
¹¹¹ Rg	¹¹² Cn	113	114	115	116	117	118		

Лантаноиды

⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Актиноиды

⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr
------------------	------------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

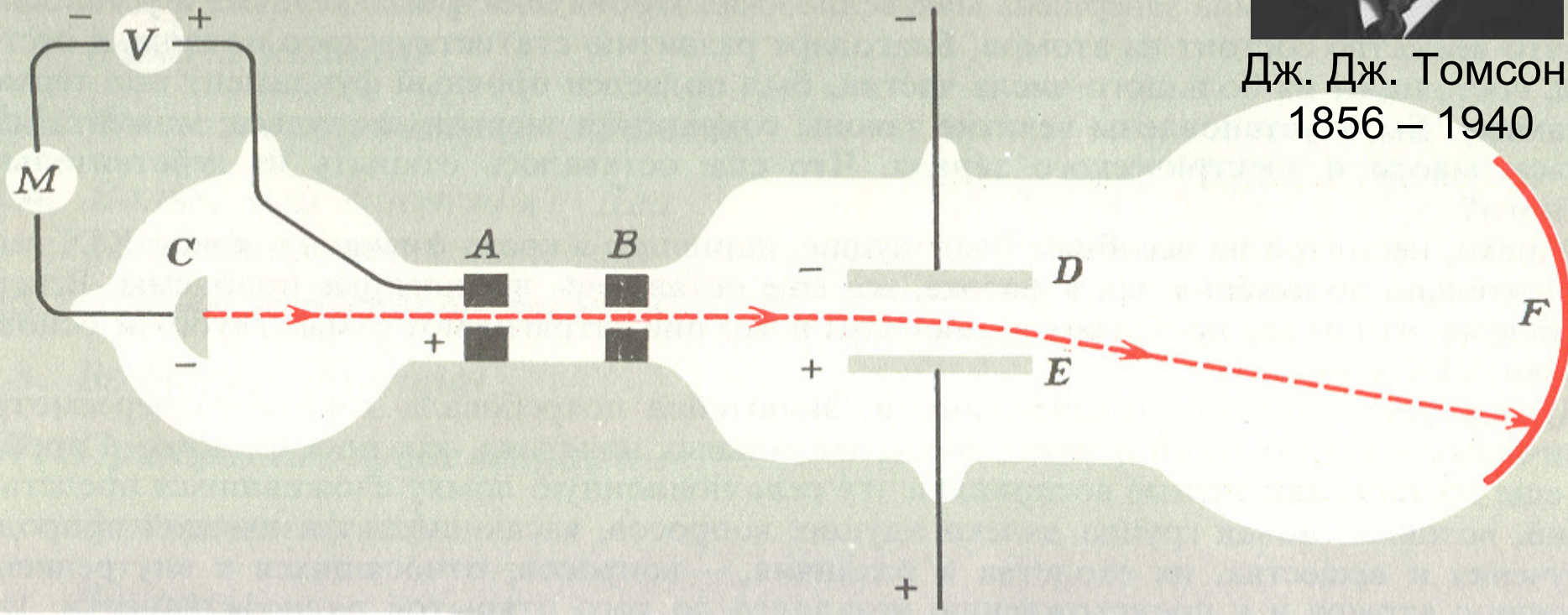
Электрон

1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома



Дж. Дж. Томсон
1856 – 1940



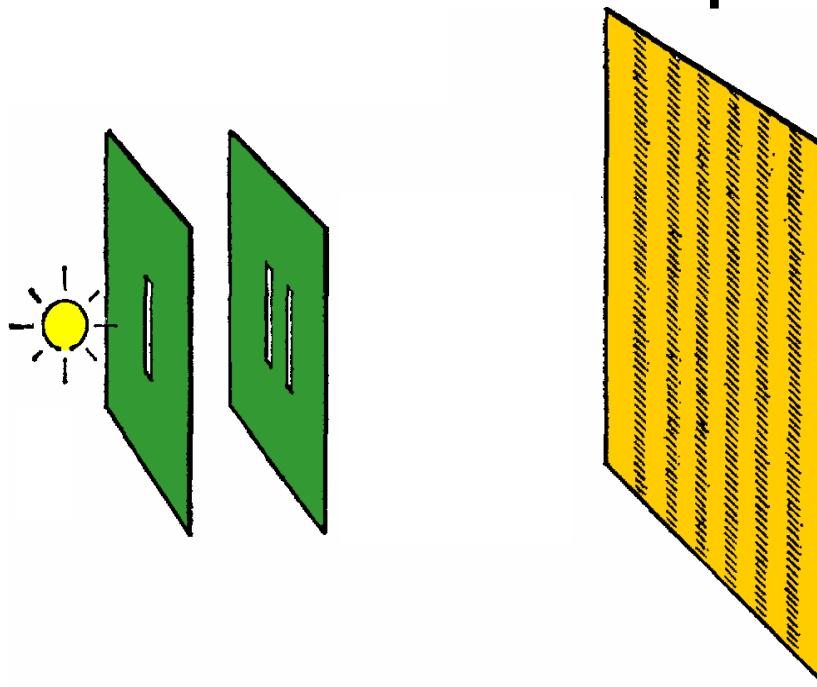
Нобелевская премия по физике

1906 г. – Дж. Дж. Томсон.

За большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов

Свет. Волна? Частица?

1801 г. Т. Юнг. Волновая теория света



В опыте Юнга свет от источника падал на непрозрачный экран с двумя близко расположенными щелями. Оказалось, что изображение на экране состоит из нескольких интерференционных полос, что наглядно демонстрируют волновую природу света. Интерференционная картина явно зависит от двух щелей порождающих две волны, которые накладываются друг на друга. Если закрыть одну из щелей интерференционная картина исчезнет.

В то же время, если заменить экран детектором, способным к регистрации отдельных частиц (например, фотопластинкой), то обнаружится, что свет, вызывающий почернение фотоземлюли в определённом месте, состоит из отдельных частиц – фотонов.

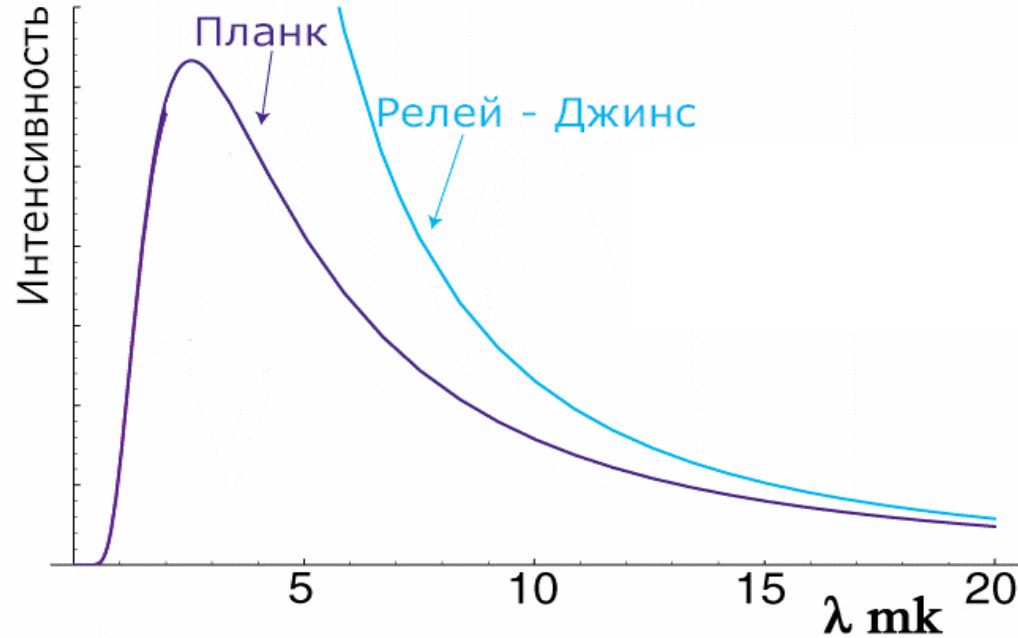
В этом проявилась волновая и корпускулярная природа света.

1900 г. М. Планк. Излучение черного тела

Распределение плотности энергии излучения в полости

$$U(T, \nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad U(T, \lambda) = \frac{8\pi h c \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$



$$\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ МэВ} \cdot \text{с}$$

Нобелевская премия по физике

1918 г. – М. Планк.

За открытие кванта энергии

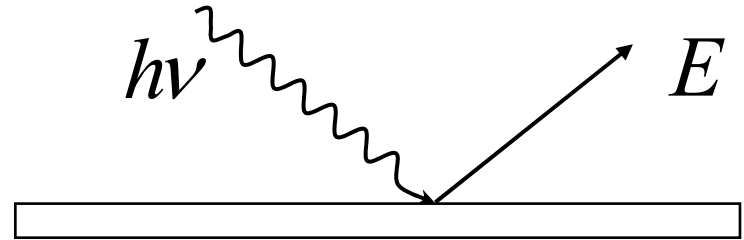
Фотоэффект

1887 г. Г. Герц, А. Столетов.

1905 г. А. Эйнштейн.

$$E = h\nu - W$$

W - работа выхода электронов



- Число высвобождаемых электронов прямо пропорционально интенсивности падающего света.
- Максимальная кинетическая энергия электронов E зависит от частоты ν и не зависит от интенсивности падающего света.
- Энергия электронов E является линейной функцией частоты падающего света ν .
- Существует граничная частота света ν_0 , ниже которой фотоэффект невозможен.

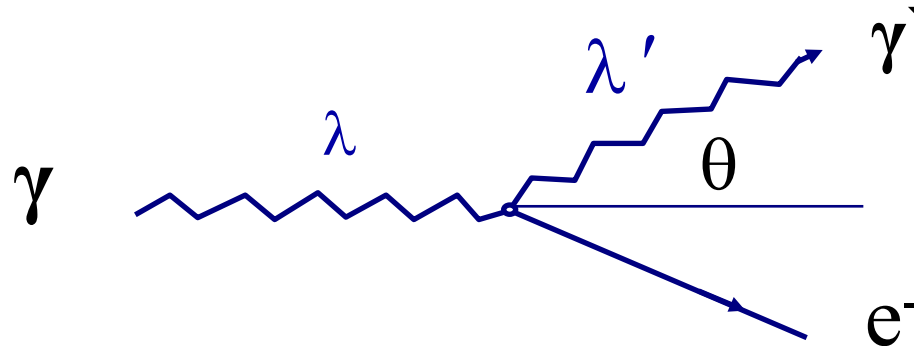
Нобелевская премия по физике

1921 г. – А. Эйнштейн.

За вклад в теоретическую физику и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта

1922 г. А. Комптон. Эффект Комптона

Упругое рассеяние фотона на свободном электроне



- В рассеянном излучении наблюдаются две длины волн — первоначальная длина волны λ и дополнительная λ'
- Длина волны λ' всегда больше λ
- Длина волны λ' зависит от угла рассеяния θ и не зависит от природы рассеивающего вещества

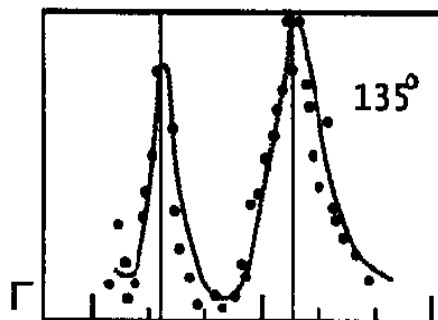
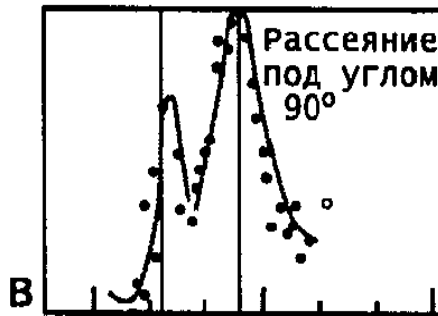
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Нобелевская премия по физике

1927 г. – А. Комптон.

За открытие эффекта, названного его именем

Эффект Комптона



Длина волны

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

Зависимость интенсивности комптоновского рассеяния от длины волны рассеянного фотона. Пики слева на всех графиках отвечают фотонам с исходной длиной волны, которые рассеиваются на сильно связанных электронах с эффективной массой, равной массе атома.

Волновые свойства частиц

1924 г. Луи де Бройль. «Когда закончилась первая мировая война, я много размышлял о квантовой теории и о корпускулярно-волновом дуализме. Именно тогда меня осенила блестящая идея. Корпускулярно-волновой дуализм Эйнштейна носит всеобщий характер и распространяется на все объекты».

Соотношения де Бройля

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

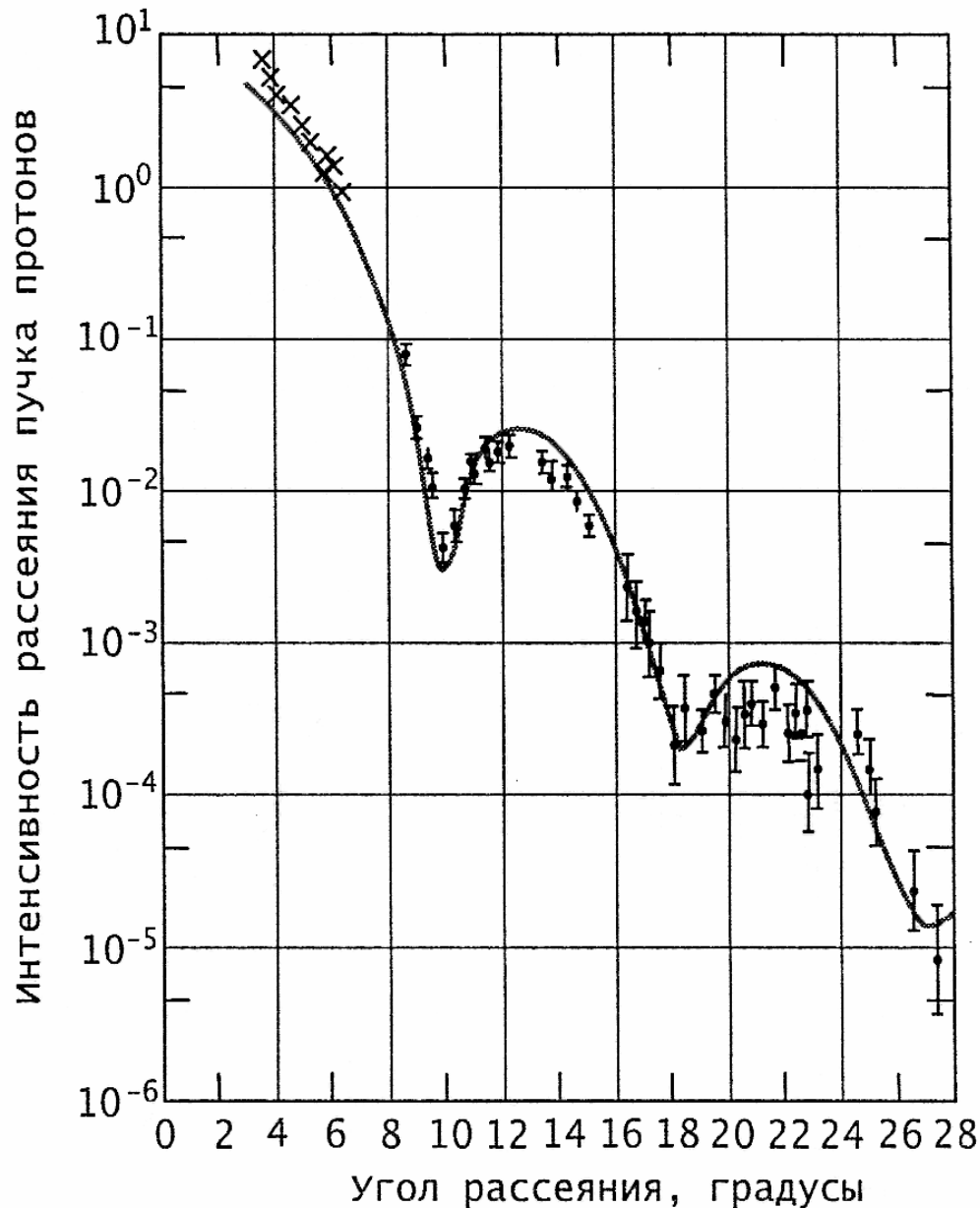
В случае фотонов аналогичные соотношения следуют из условия квантовая энергии и релятивистской связи между энергией и импульсом для частиц с нулевой массой покоя.

$$E = cp = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



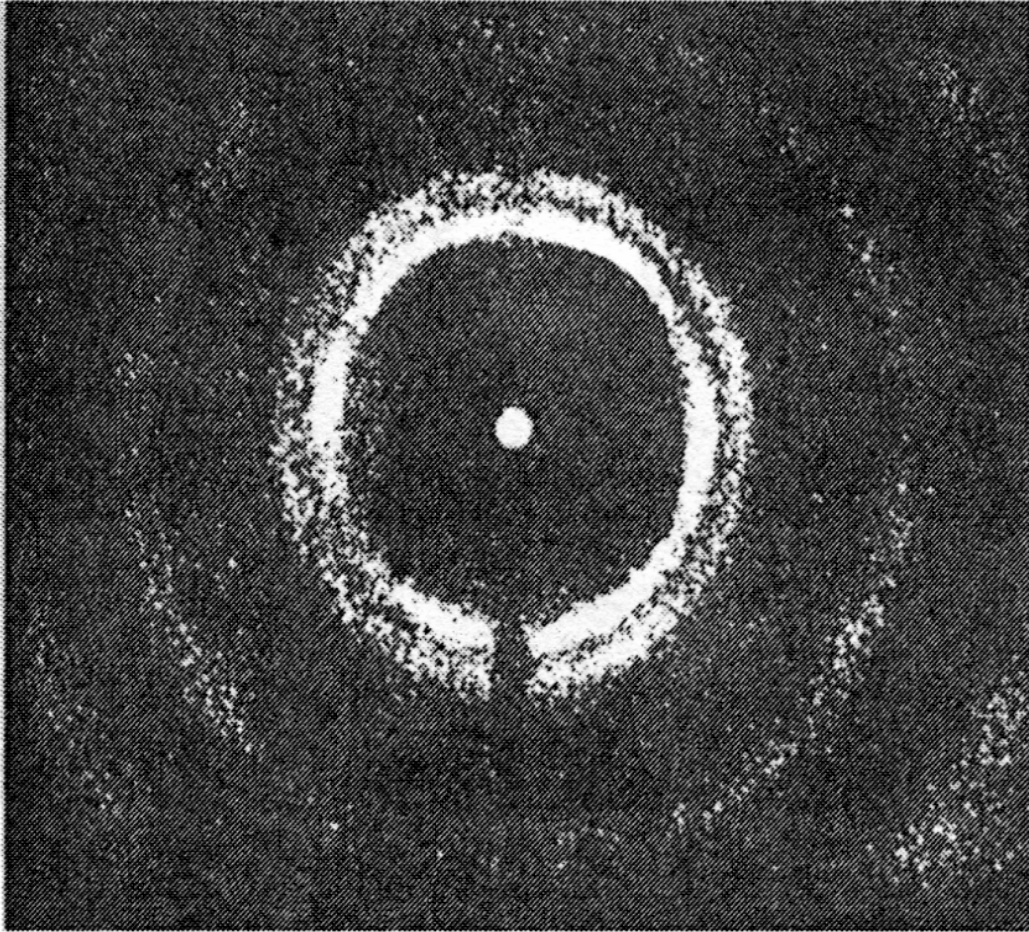
Л. Де Бройль
1892 – 1987

Рассеяние электронов на атомном ядре



Ядра являются рассеивателями с размерами порядка 10^{-13} см. На данном рисунке показано, что рассеяние протонов с энергией 1 ГэВ на ядре кислорода дает дифракционную картину, сходную с картиной дифракции на щели.

Рассеяние нейтронов с энергией $E < 1$ кэВ на атомных ядрах

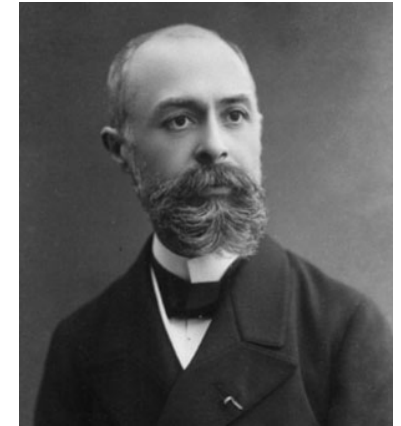
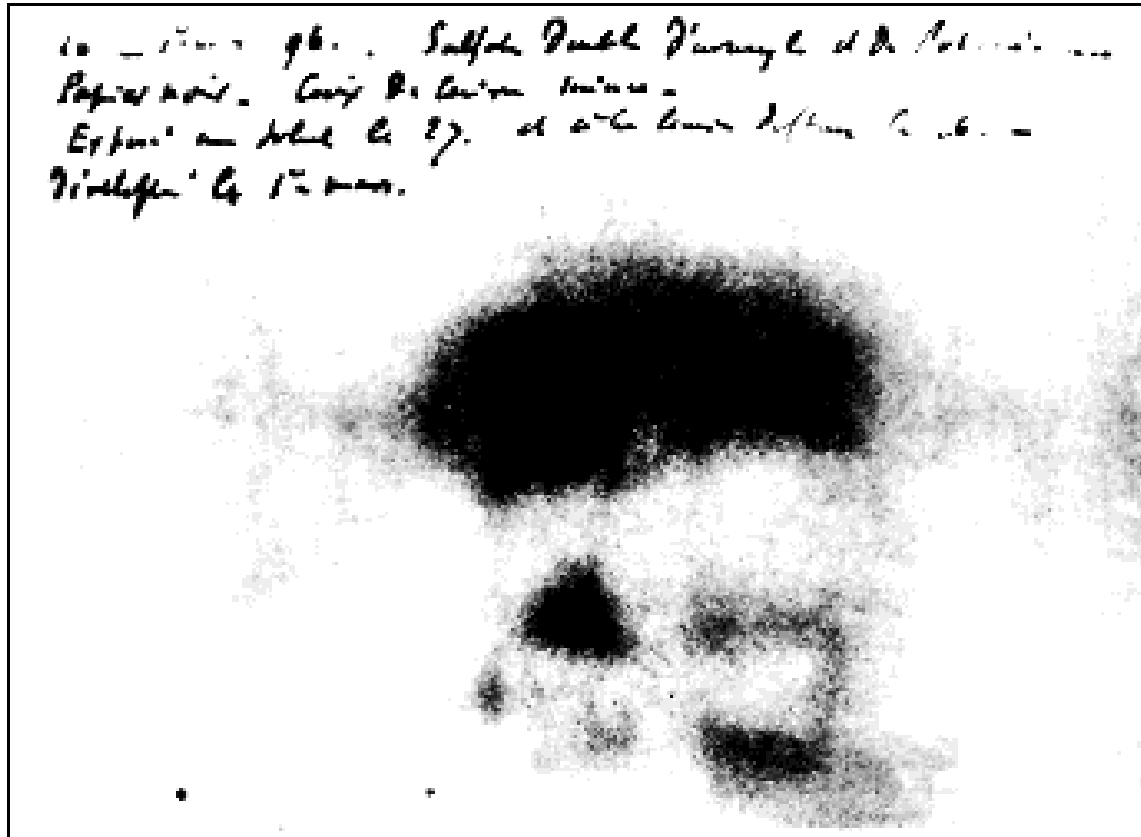


$$\sigma = \pi(R + \lambda)^2$$

Дифракционная картина при рассеянии нейтронов с энергией 0,0568 эВ (длина волны де Бройля составляет 0,120 нм) на поликристаллической мишени из меди. Обратим внимание на сходство дифракционных картин для рентгеновских лучей, электронов и нейтронов.

Радиоактивность

1896 – Открытие радиоактивности



А. Беккерель
1852 – 1908

Нобелевская премия по физике

1903 г. – А. Беккерель.

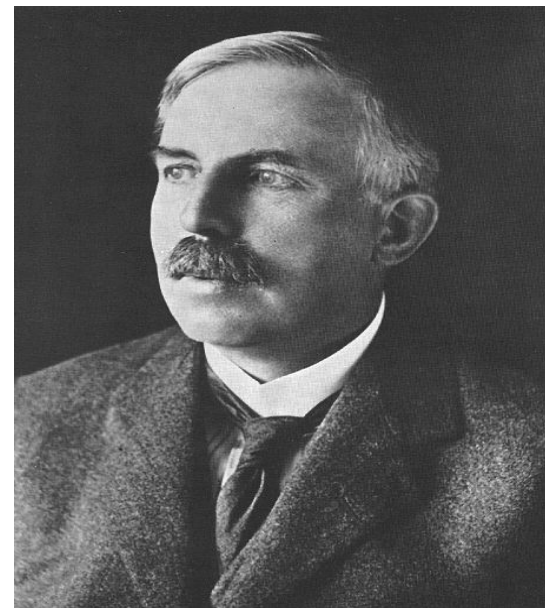
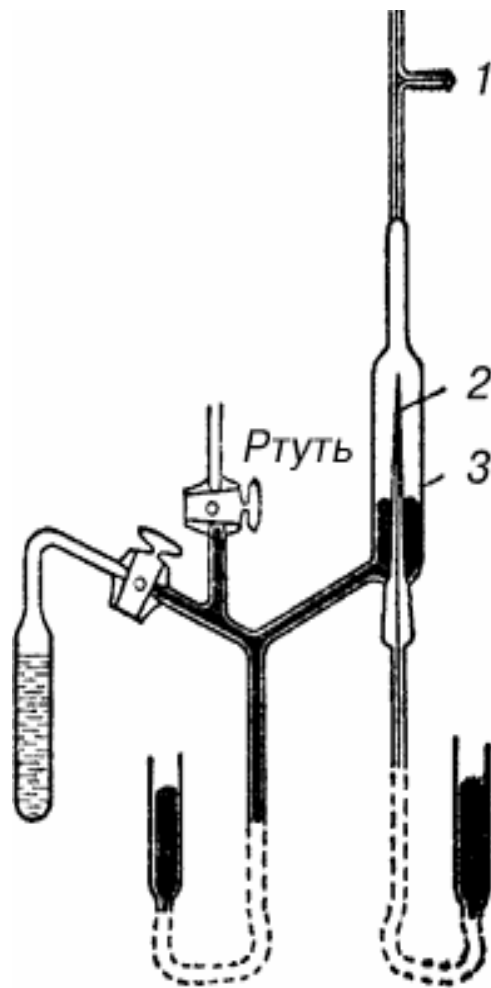
За открытие радиоактивности

1903 г. – П. Кюри, М. Кюри-Склодовская.

За исследования радиоактивности

1899 г.

Э. Резерфорд открыл, что уран излучает положительно заряженные α -частицы и отрицательно заряженные β -частицы.



Эрнест Резерфорд
1871 - 1937

Нобелевская премия по химии

1908 г. - Э. Резерфорд

За исследования по превращению элементов и за химические исследования радиоактивных веществ.

1900 г.

П. Виллард открыл гамма-лучи при распаде изотопов урана.



**П. Виллард
1860 - 1934**

Классификация электромагнитных волн

<i>Название</i>	<i>Длина волны, м</i>	<i>Частота, Гц</i>
радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
микроволны	$3 - 3 \cdot 10^{-4}$	$10^8 - 10^{12}$
инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
гамма-излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

1911 г. Э. Резерфорд. Атомное ядро

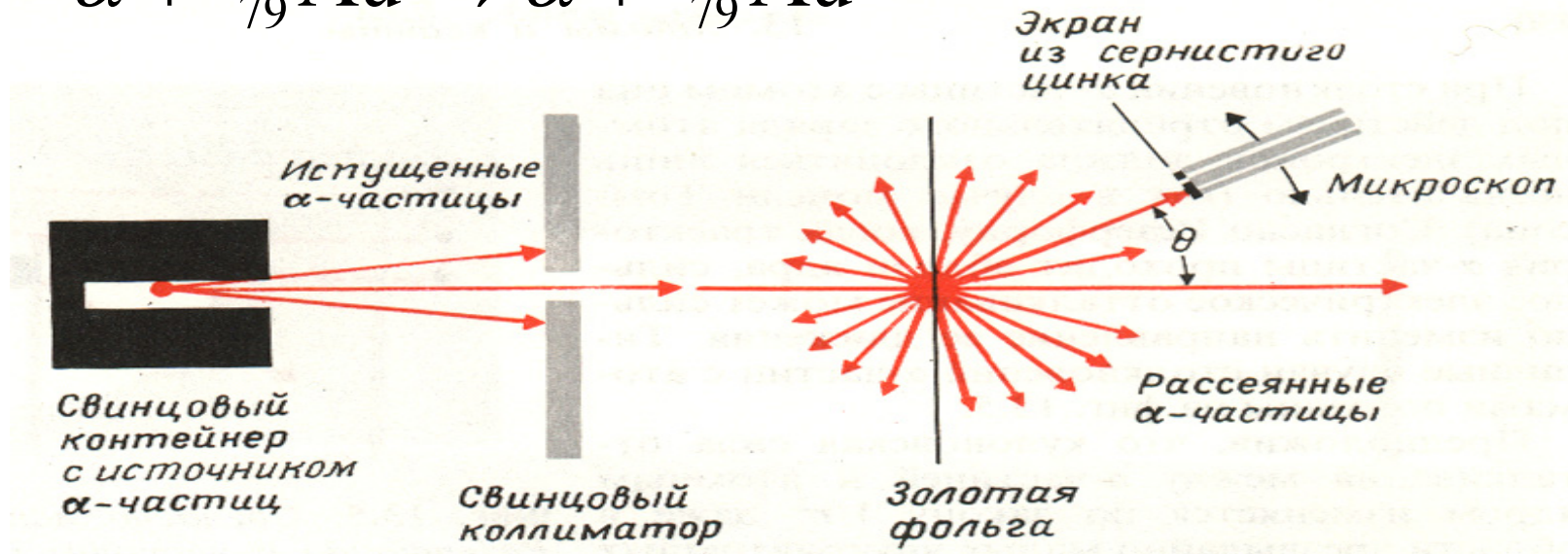
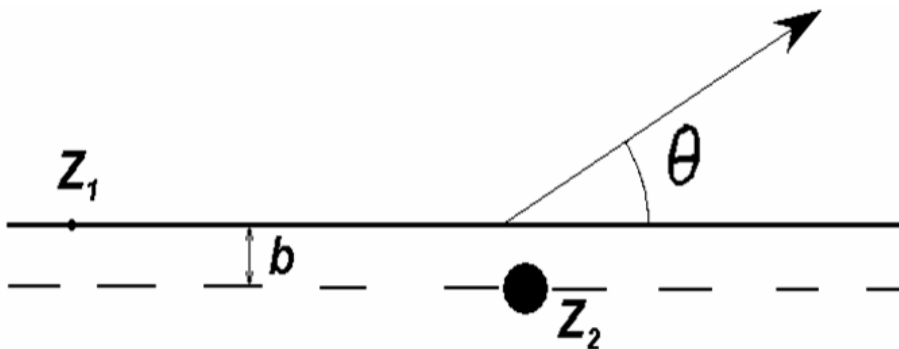


Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц



$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bE}$$

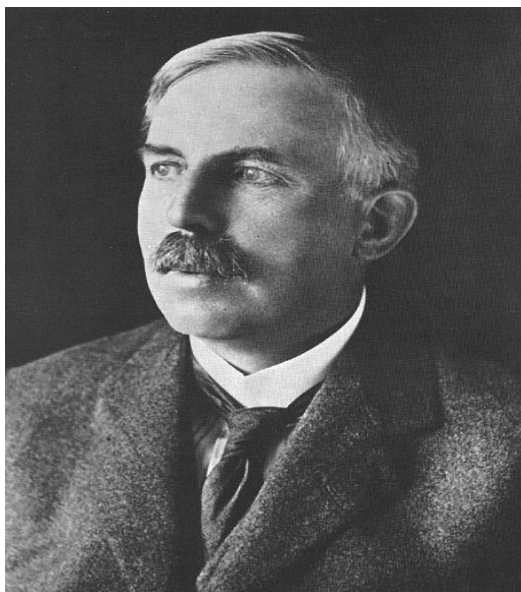
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Из опытов по рассеянию α -частиц следовало, что масса атома практически полностью сосредоточена в небольшой центральной части атома – атомном ядре.

Строение атома



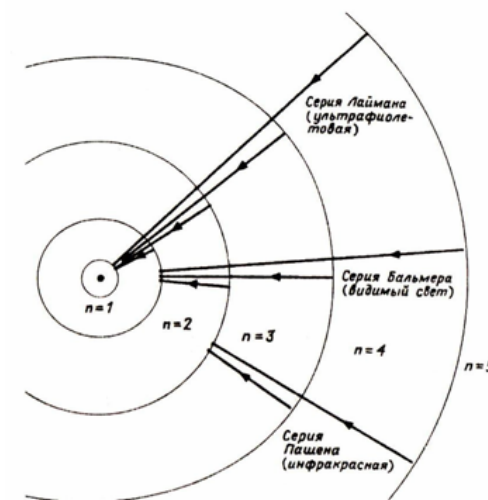
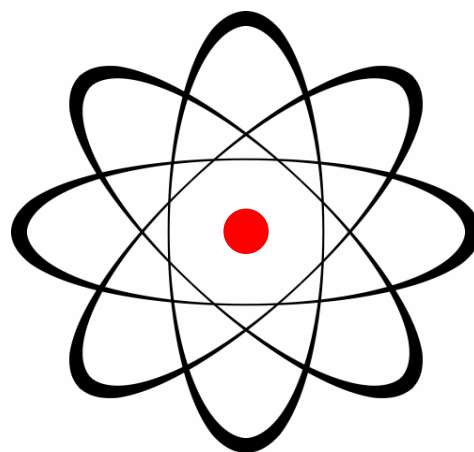
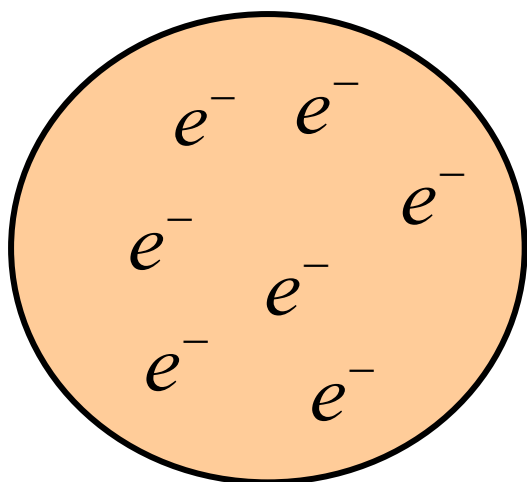
Дж. Дж. Томсон
1856 - 1940



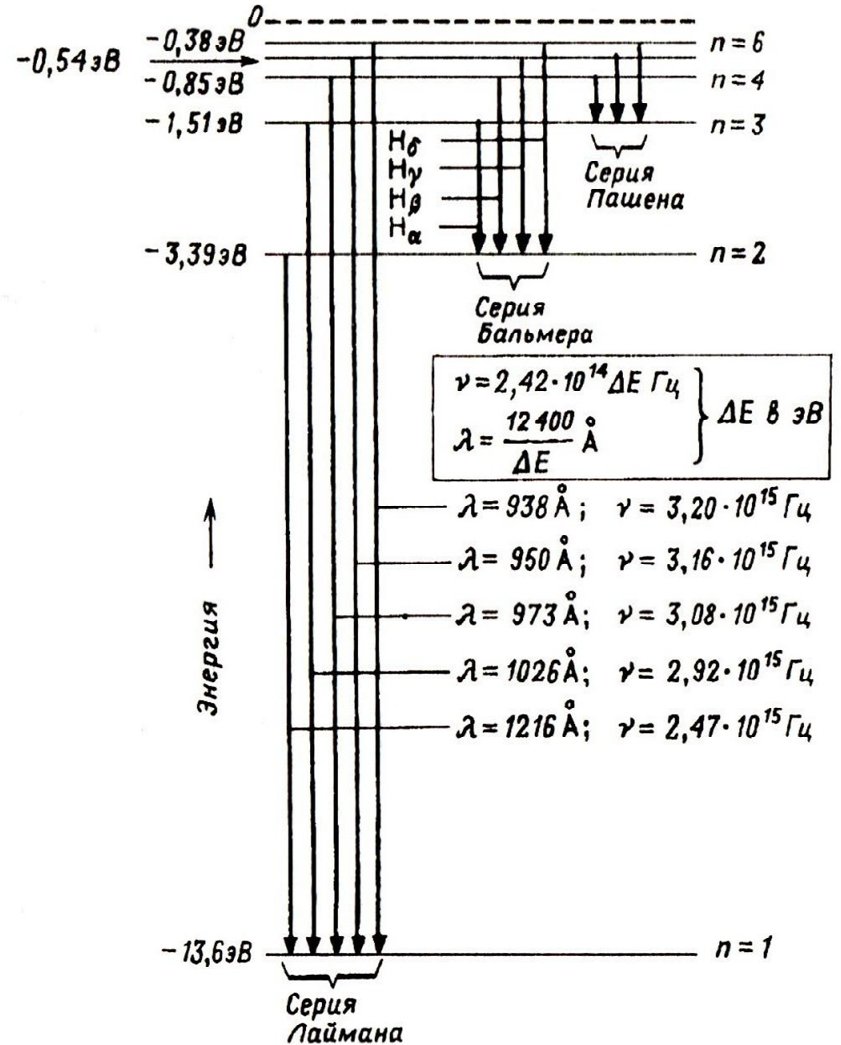
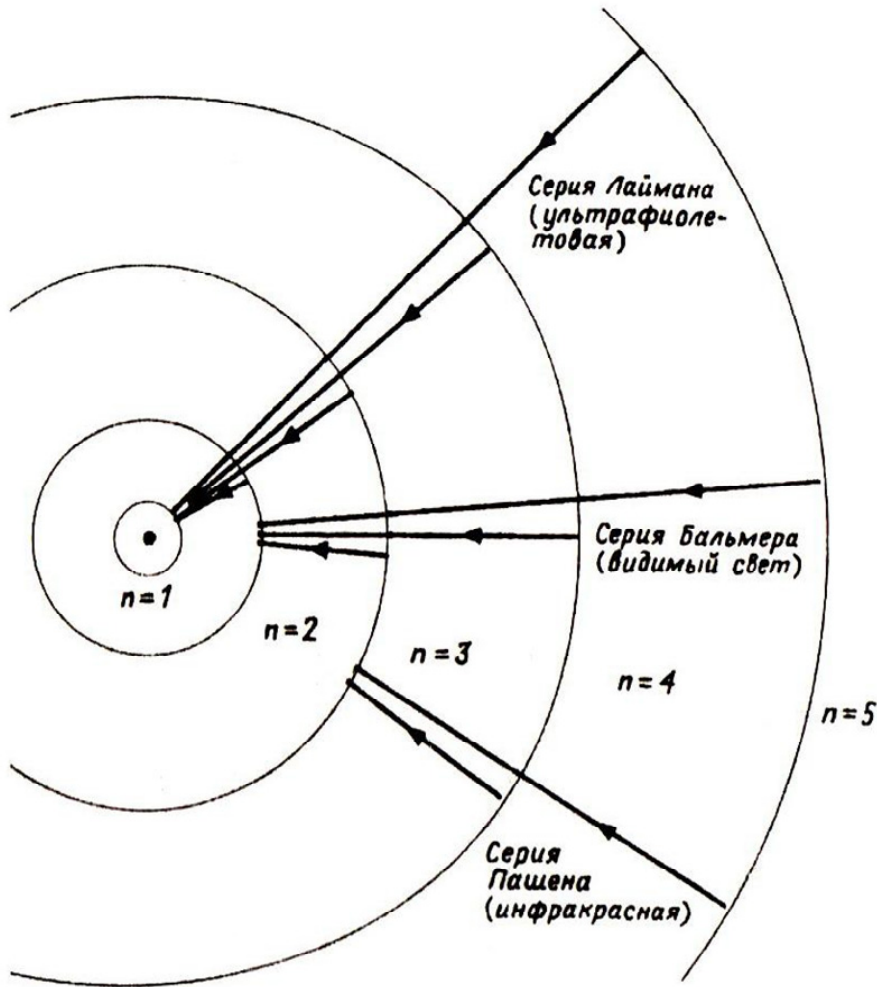
Эрнест Резерфорд
1871 - 1937



Нильс Бор
1885 - 1962



Модель Бора. Атом Водорода



Состояние

Модель Бора

Модель, предложенная Бором, впервые позволила удовлетворительно объяснить закономерность строения атома. Основные постулаты модели Бора:

1. Электрон равномерно вращается вокруг атомного ядра по круговой орбите под действием кулоновских сил в соответствии с законами Ньютона.
2. Разрешенными орбитами электрона являются только те, для которых момент импульса электрона равен $n\hbar$.
3. При движении электрона по стационарной орбите атом не излучает энергию.
4. При переходе с орбиты с энергии E_i на другую орбиту с энергией E_f ($E_i > E_f$) излучается фотон, имеющий энергию $h\nu = E_i - E_f$.

Нобелевская премия по физике

1922 г. - Н. Бор.

За работы по исследованию структуры атомов и их излучения

Модель Бора

Движение по круговой орбите. Частота обращения f

$$F = \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad f = \frac{v}{2\pi r} = \left(\frac{Ze^2}{4\pi^2 m} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{r^{3/2}}$$

Условие стационарной орбиты. Квантование углового момента

$$L = mvr_n = n\hbar, \quad r_n = \frac{n\hbar}{mv} = \frac{n^2\hbar^2}{mZe^2}$$

Боровский радиус $n=1, Z=1$ $r_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0,529 \text{ \AA}$

Полная энергия электрона E тоже квантуется

$$E = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \frac{Ze^2}{2r_n} - \frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{Ze^2}{2r_n} = -\frac{mZ^2e^4}{2\hbar^2n^2}$$

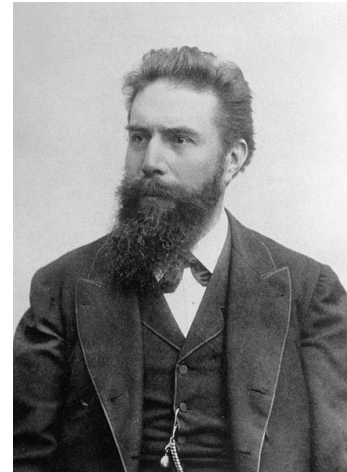
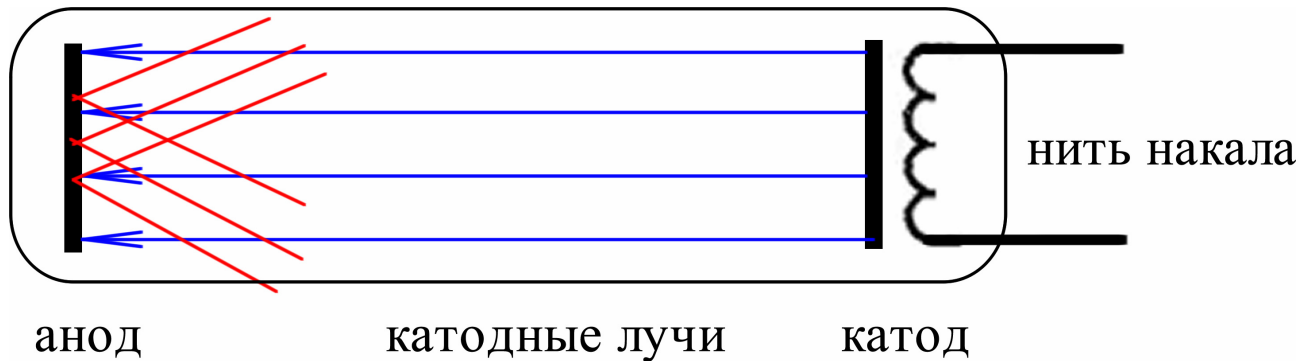
Энергия электрона на 1-ой боровской орбите.

Основное состояние $E_0 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ}$

Энергия переходов ($n_f \rightarrow n_i$) $\hbar\omega = -\frac{mZ^2e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$

Постоянная Ридберга $R = \frac{E_0}{hc} = 1,097 \cdot 10^9 \text{ см}^{-1}$

1895 г. Рентгеновские лучи



В. Рентген
1845 – 1923

1895 г. В. Рентген открыл X-лучи, впоследствии названные его именем. Рентген обнаружил, что когда катодные лучи падают на стекло трубки или на мишень, внутри трубки возникает излучение, которое проникает через непрозрачные для обычного света материалы, воздействует на флюоресцирующие материалы и фотопластины.

Длина волны рентгеновского излучения $3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$ м.

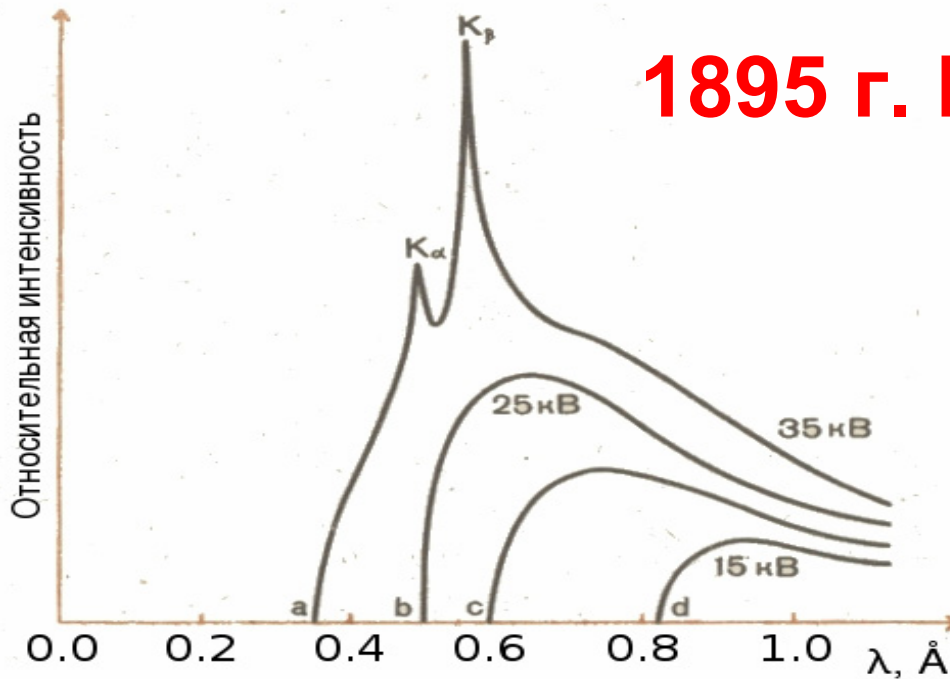
Длина волны видимого излучения $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$ м.

Нобелевская премия по физике

1901 г. - В. Рентген.

За открытие лучей, названных его именем

1895 г. Рентгеновские лучи

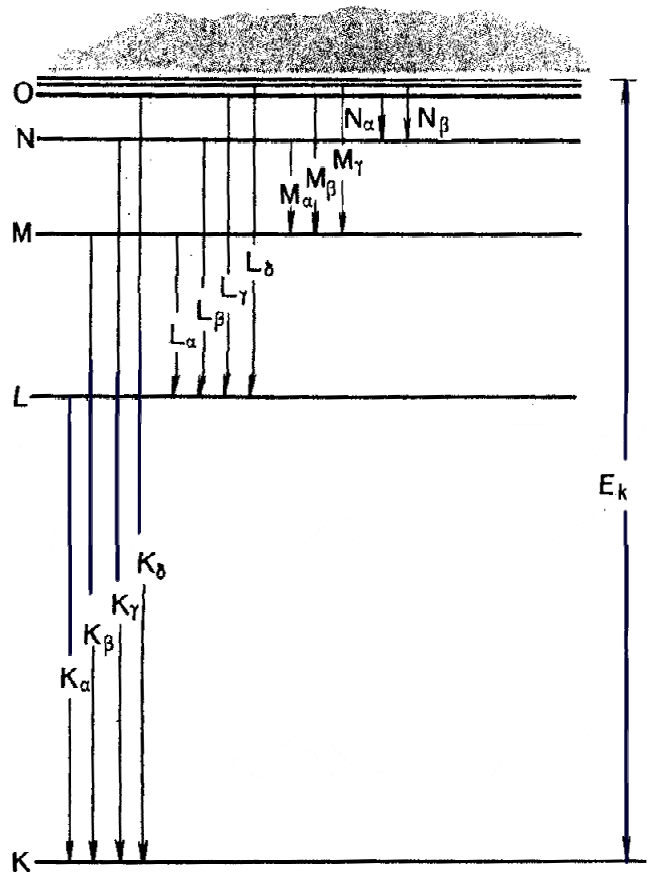


Рентгеновские лучи возникают при взаимодействии быстрых электронов с кулоновским полем атомного ядра. Это излучение называют тормозным. Максимальная энергия рентгеновского излучения $h\nu_{\max}$ тормозного спектра определяется энергией электронов eV

$$h\nu_{\max} = eV.$$

Наряду с тормозным спектром в рентгеновском спектре наблюдаются дискретные линии, зависящие от вещества анода, в который ударяет пучок быстрых электронов. Быстрые электроны выбивают электроны из внутренних оболочек атомов материала анодов. Образующиеся при этом вакансии заполняются менее связанными электронами атомов. Высвобождающаяся энергия в виде дискретных линий в спектре характеризует строение атомных оболочек.

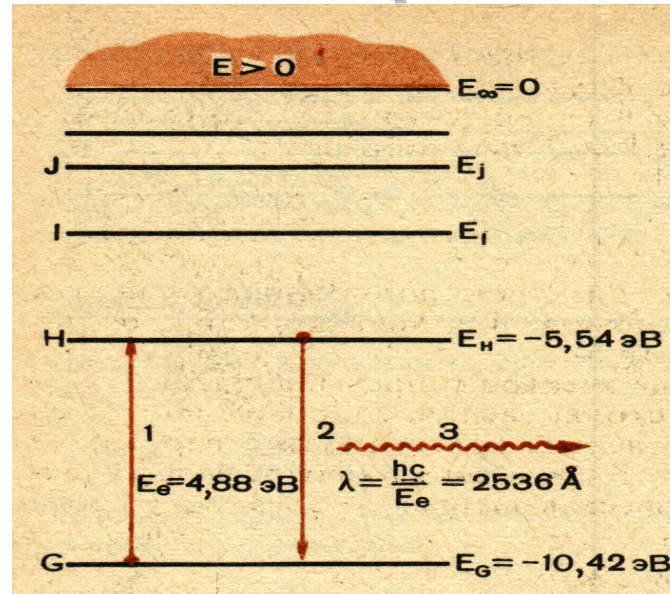
Рентгеновский спектр



Характеристический рентгеновский спектр зависит от материала анода. Электроны в атоме заполняют последовательно K, L, M, N оболочки. Электроны K оболочки расположены наиболее близко к атомному ядру и связаны наиболее сильно. Затем последовательно располагаются более слабо связанные L, M, N оболочки.

Когда падающие на анод электроны выбивают электроны из K оболочки, вакансии в K оболочке заполняются за счёт переходов электронов из верхних менее связанных оболочек. Если вакансию в оболочке K заполняет электрон из оболочки L, в спектре возникает линия K_α . При переходе электрона из M оболочки на вакансию в K оболочке в спектре возникает линия K_β . Таким образом, при переходах с оболочек L, M, N на K оболочку испускается дискретный спектр рентгеновских линий K_α , K_β , K_γ , K_δ , ... Если падающие на анод электроны выбивают электроны из L, M, O, ... оболочек, то при заполнении вакансий электронами более высокорасположенных оболочек образуются линии L_α , L_β , L_γ ... M_α , M_β , M_γ .

1913 г. Опыт Франка-Герца

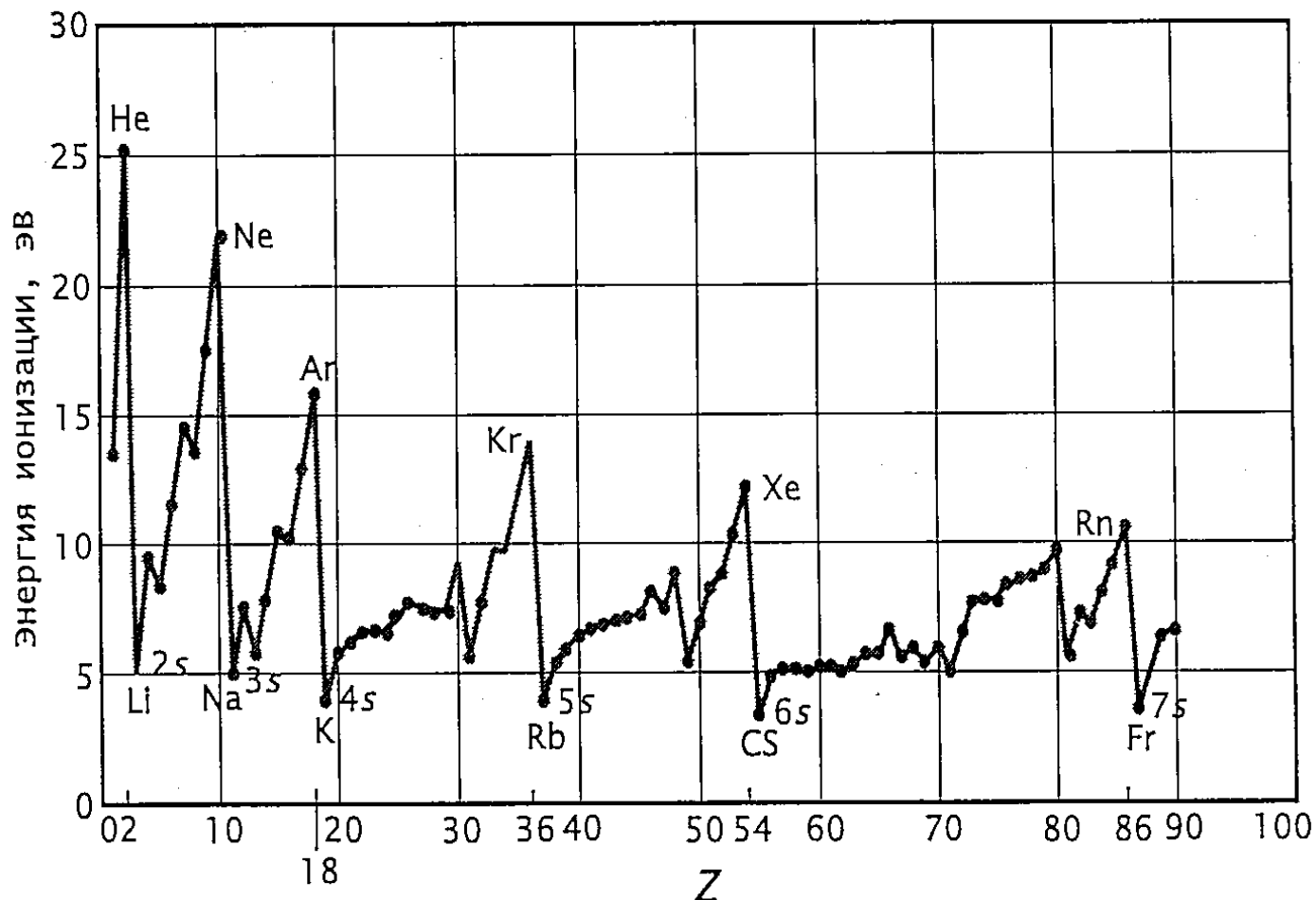


В 1913 г. Франк и Герц поставили эксперимент, в котором наблюдалась дискретная структура атомных уровней. Энергии связи внешних электронов в тяжелых атомах составляют несколько эВ. На рисунке показаны уровни энергии валентных электронов атома ртути. Энергия электронов основного состояния $E_0 = -10,42 \text{ эВ}$. Энергия первого возбужденного состояния $E_h = -5,54 \text{ эВ}$. Энергия перехода между этими состояниями

$$E = E_h - E_0 = -5,54 \text{ эВ} - (-10,42) \text{ эВ} = 4,88 \text{ эВ}.$$

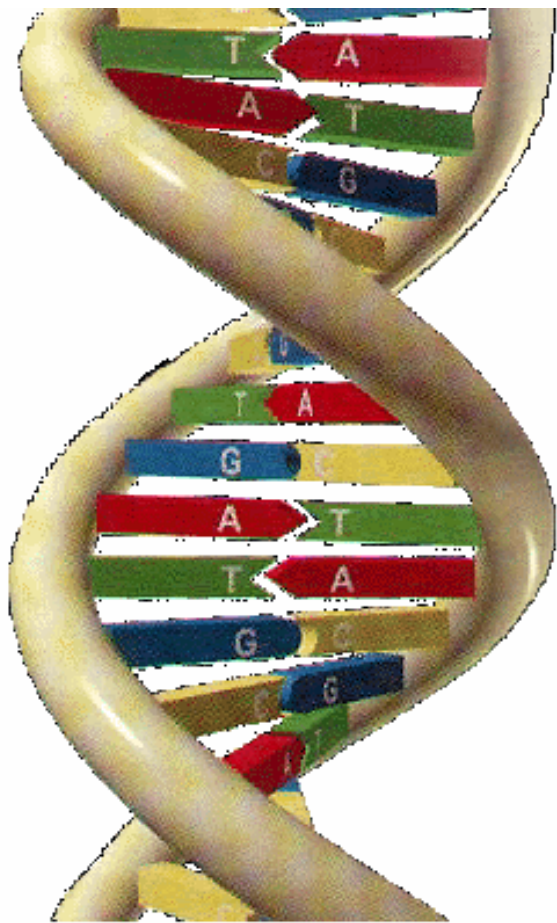
Если энергия пучка медленных электронов, проходящего через пары ртути, меньше 4,88 эВ, то столкновения электронов пучка с атомами ртути будут упругими, т.е. без передачи энергии. Если энергия пучка электронов превышает 4,88 эВ, то происходят неупругие столкновения с передачей части энергии электрону атома ртути, сопровождающиеся переходами электронов атома ртути в первое возбужденное состояние. Поэтому в зависимости анодного тока от ускоряющего потенциала будут наблюдаться характерные максимумы и минимумы, соответствующие дискретным уровням энергии, на которых находятся внешние электроны атома ртути.

Потенциал ионизации атома

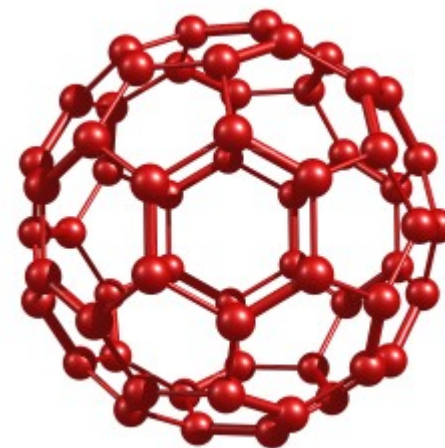


Зависимость первой энергии ионизации (она соответствует энергии связи в атоме самого удаленного электрона) от Z вплоть до $Z = 90$. Энергия возрастает с увеличением Z , пока оболочка не оказывается заполненной (что соответствует $Z = 2, 10, 18, 36, 54$ и 86). Следующий электрон должен оказаться на более высокой оболочке (более удаленной от ядра), т. е. слабее связанным. Ионизационный потенциал (в В) численно равен энергии ионизации (в эВ).

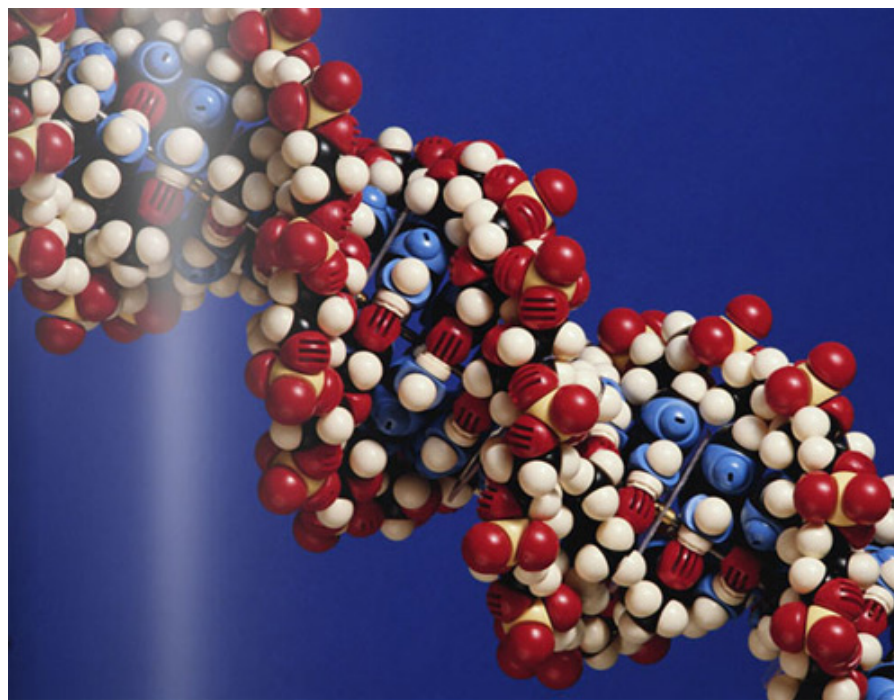
Физика и химия



Молекула ДНК человека



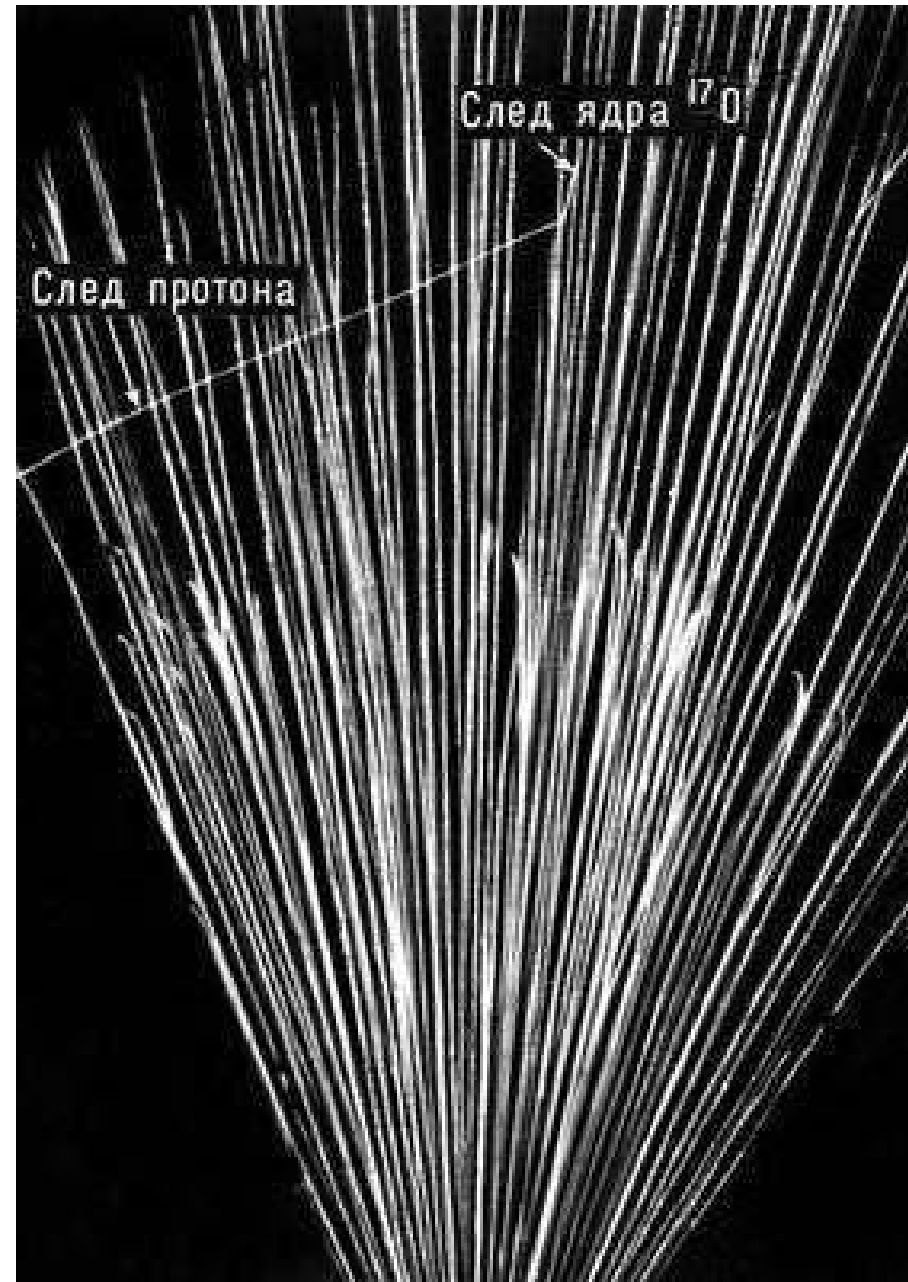
Фуллерен



1919 г.

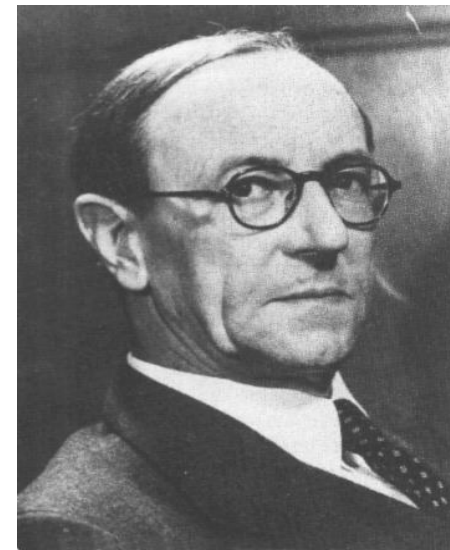
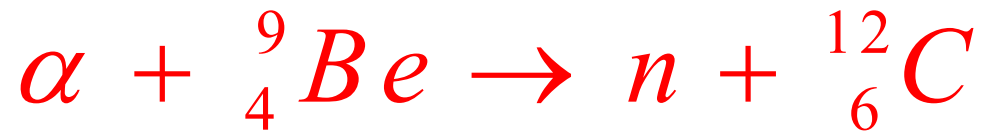
Открытие протона

Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ и доказал наличие в атомном ядре протонов.

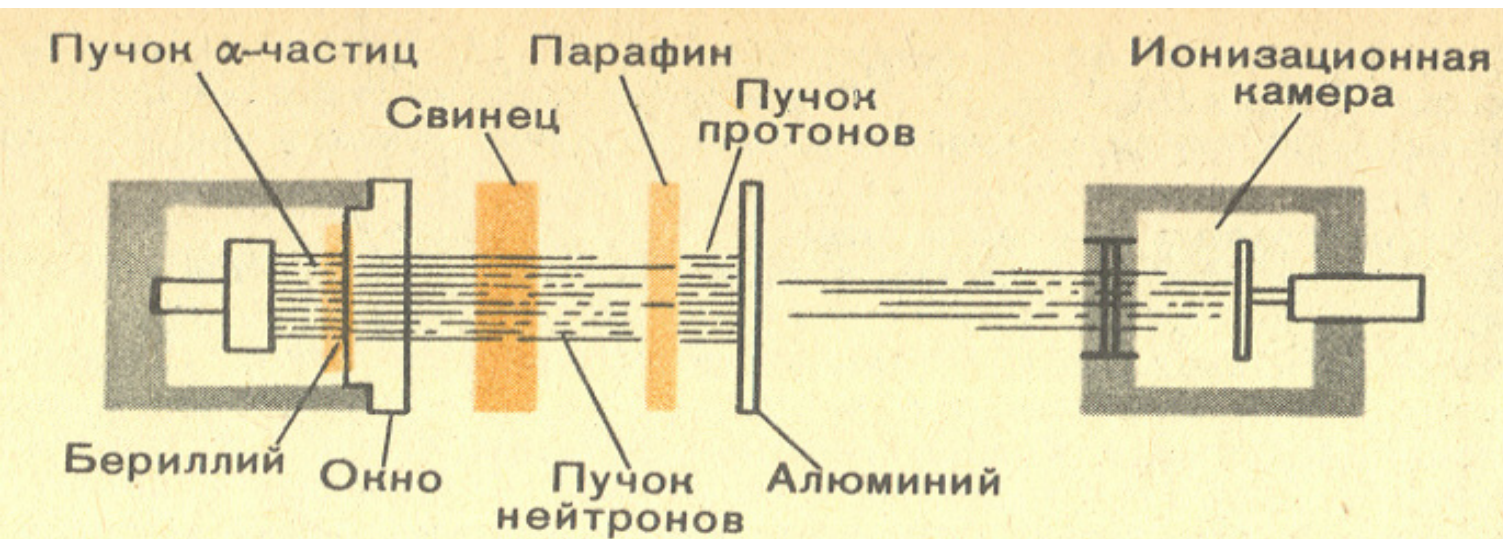


Открытие нейтрона

1932 г.



Дж. Чедвик
1891 - 1974

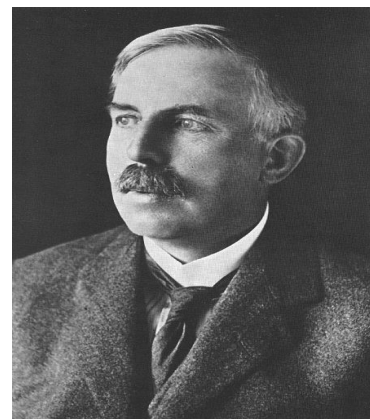
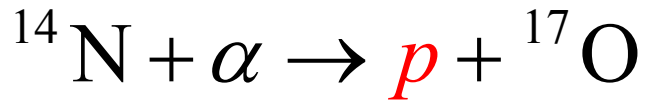


Нобелевская премия по физике

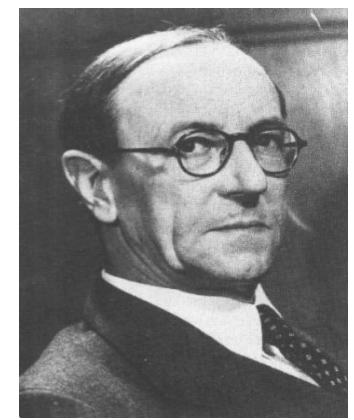
1935 г. – Дж. Чедвик

За открытие нейтрона

1919 г. Э. Резерфорд

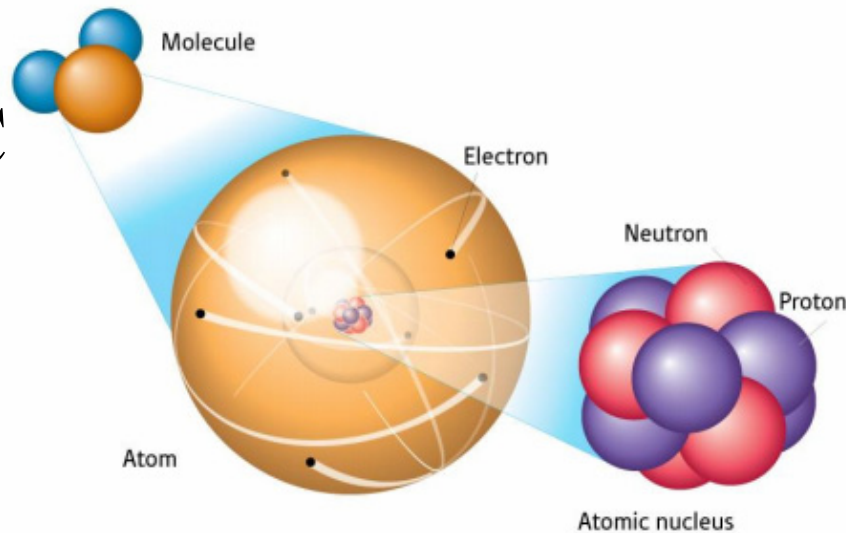
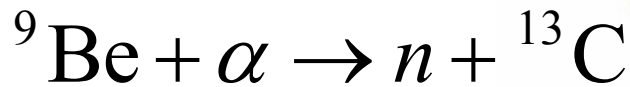


Э. Резерфорд
1871 - 1937



Дж. Чедвик
1891 - 1974

1932 г. Дж. Чедвик



²⁰⁸₈₂Pb

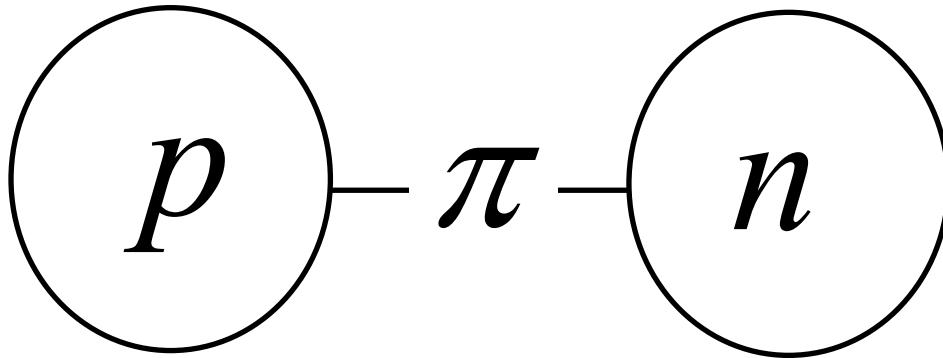
Z = 82
N = 126
A = 208

Z – заряд ядра, число протонов в ядре
N – число нейтронов в ядре
A = N + Z – массовое число

Что удерживает протоны и нейтроны в атомном ядре

1935 г.

Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.



Хидэки Юкава
1907 - 1981

Нобелевская премия по физике

1949 г. – Х. Юкава

За предсказание существования мезонов на основе теоретической работы по ядерным силам

Ускорители



$$E_{\text{порог}} = \frac{(m_i - m_1 - m_2)(m_i + m_1 + m_2)}{2m_2} c^2$$



$$E_{\text{порог}} = E_1 + E_2$$

1947 Странные частицы



Нобелевская премия по физике

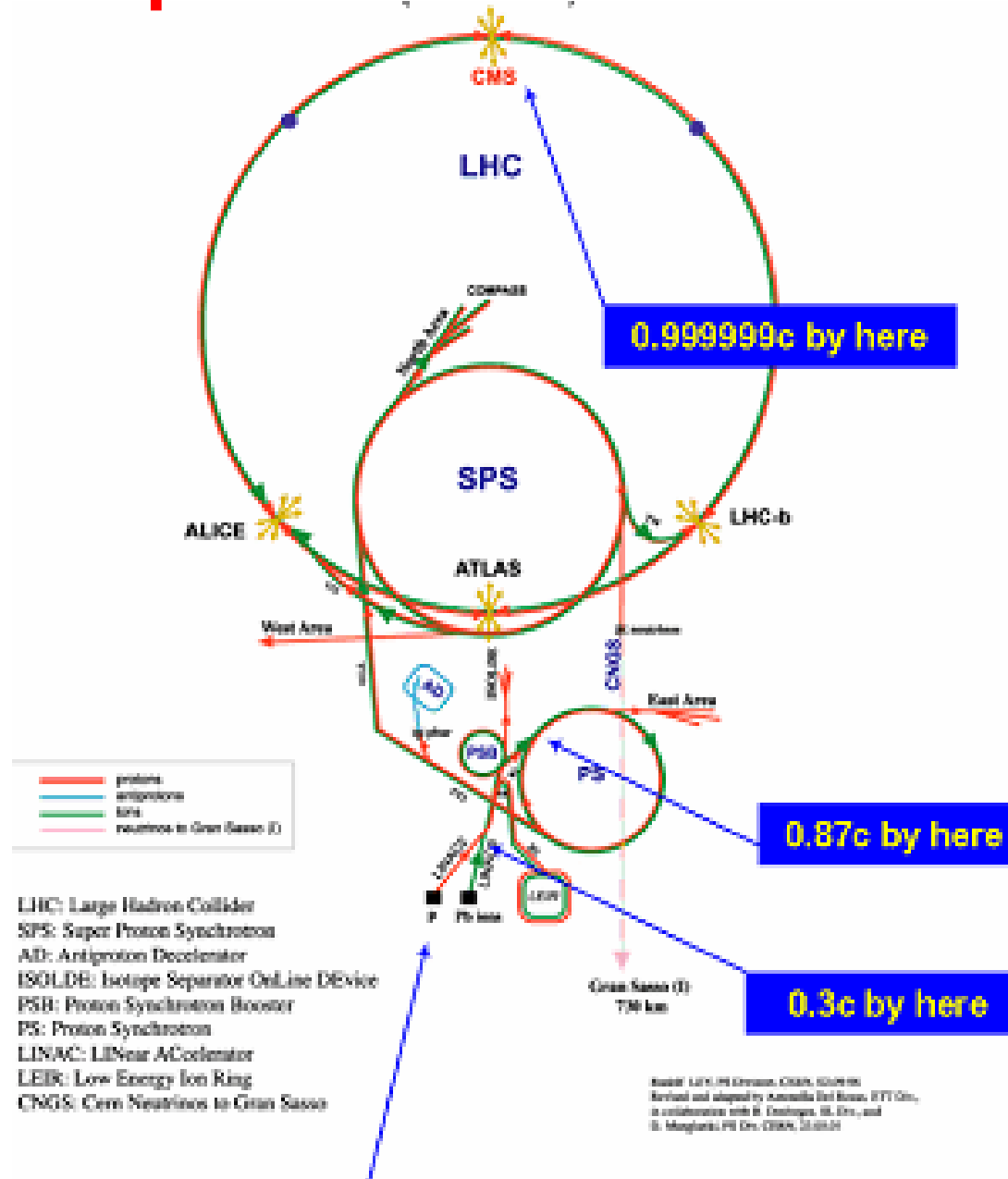
1960 г. – Д. Глезер.

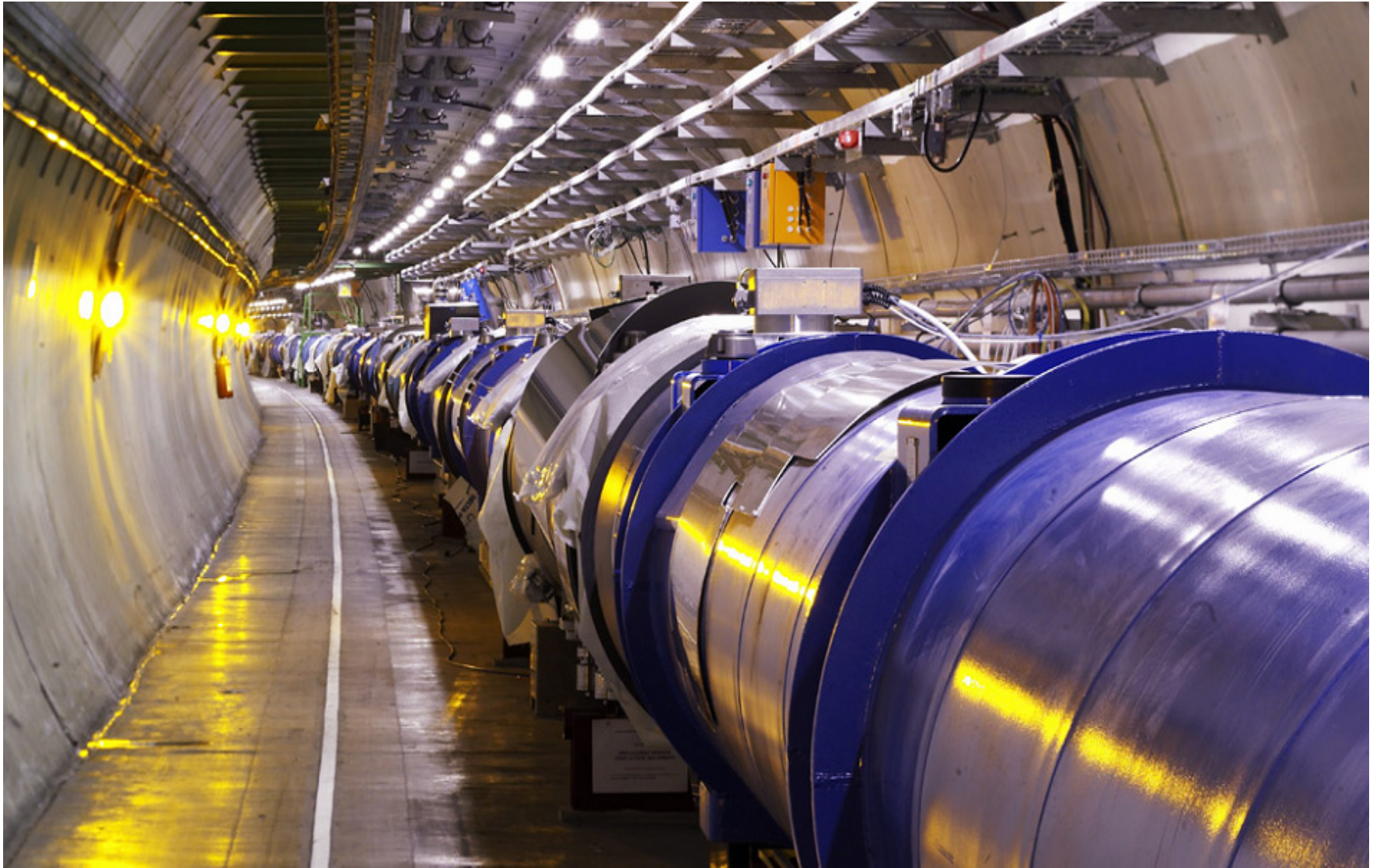
За изобретение пузырьковой камеры

Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e, ν_μ		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

Ускорительный комплекс ЦЕРН





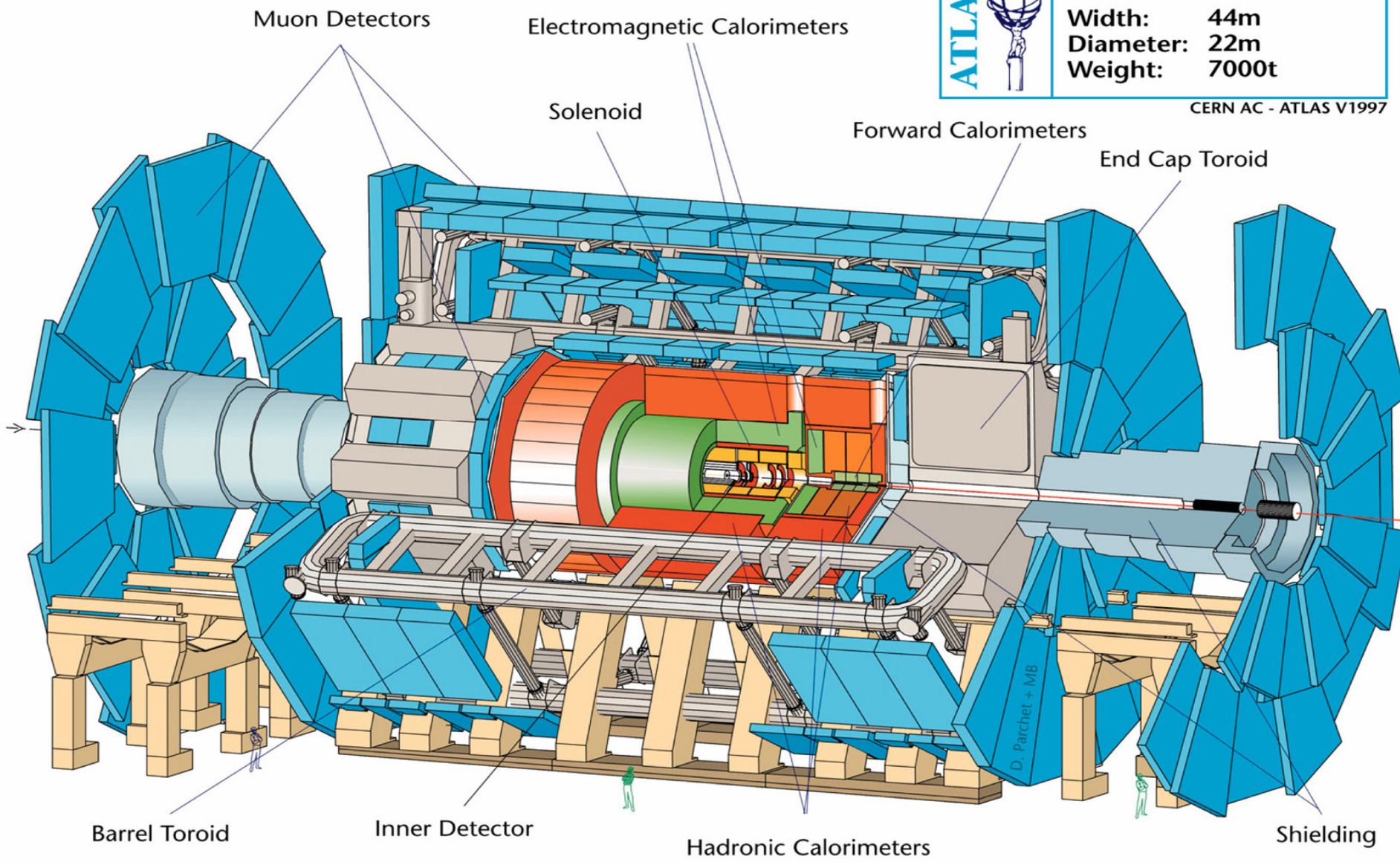
Длина тоннеля – 27 км

Детектор ATLAS



Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



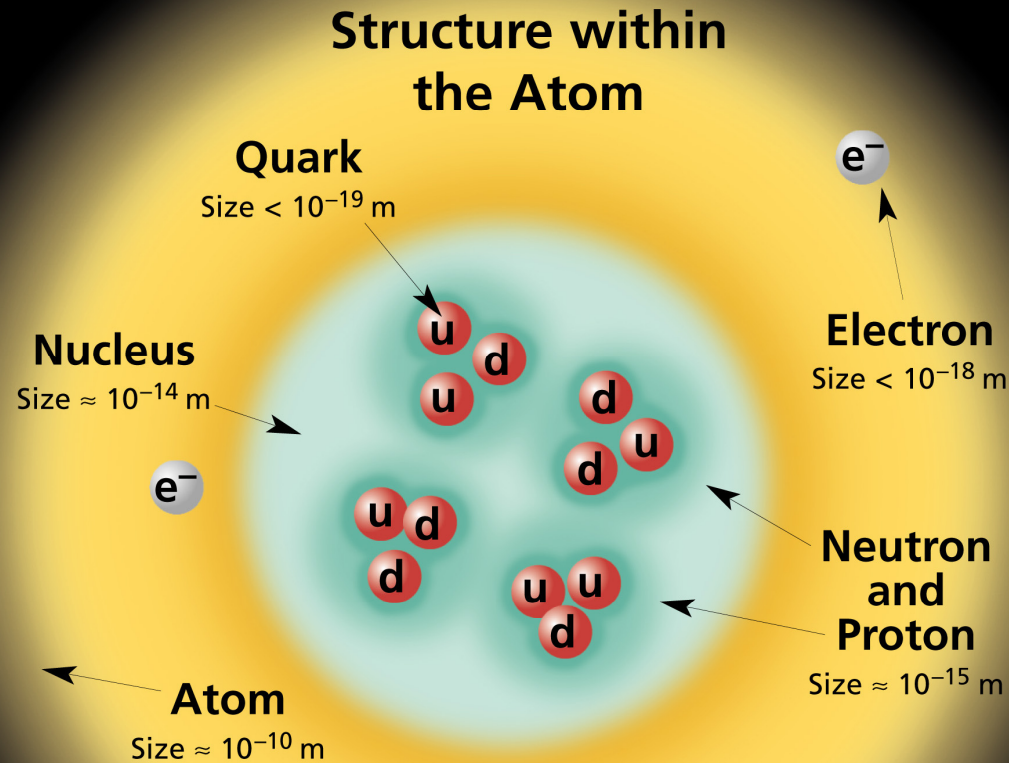
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

АТОМЫ. ЯДРА. Кварки



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

u

c

t

d

s

b

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

H – бозон Хиггса

Лептоны и кварки связаны в обычной материи. А-

Строение материи

Вещество

Молекула

Атом

Атомное ядро – электрон

Протон, нейтрон

Частицы (π , K , Λ , Σ ...)

Кварки, лептоны

Переносчики взаимодействий (γ , g , W^\pm , Z)