

Как это было **100** лет тому назад

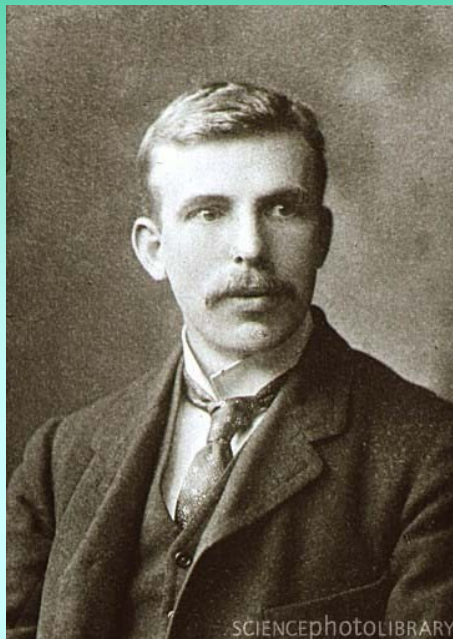
Л.И. Пономарев

Курчатовский институт

Дубна, 10 марта 2011

1911

Рождение ядра



Эрнест Резерфорд
(1871 – 1937)

В **субботу 11 марта 1911 г.** на заседании Манчестерского философского общества Эрнест Резерфорд сделал доклад **«Рассеяние α - и β -лучей и структура атома».**

В этот день слушатели узнали, что атом устроен подобно солнечной системе: в центре атома – ядро, вокруг которого вращаются планеты – электроны.

Phyl. Mag., 1911, May, ser.6, **21,669-698**

LXXIX. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.* By Professor E. RUTHERFORD, F.R.S., University of Manchester*.

§ 1. IT is well known that the α and β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden † on the scattering of α rays indicate that some of the α particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about $\cdot 00004$ cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1.6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles traversing a gold-foil of this thickness was about $0^\circ\cdot 87$. A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an α particle being deflected through 90° is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the α particles for various angles of large deflexion does not follow the probability law to be expected if such large deflexions are made up of a large number of small deviations. It seems reasonable to suppose that the deflexion through a large angle is due to a single atomic encounter, for the chance of a second encounter of a kind to produce a large deflexion must in most cases be exceedingly small. A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.

Recently Sir J. J. Thomson § has put forward a theory to

* Communicated by the Author. A brief account of this paper was communicated to the Manchester Literary and Philosophical Society in February, 1911.

† Proc. Roy. Soc. lxxxii. p. 495 (1909).

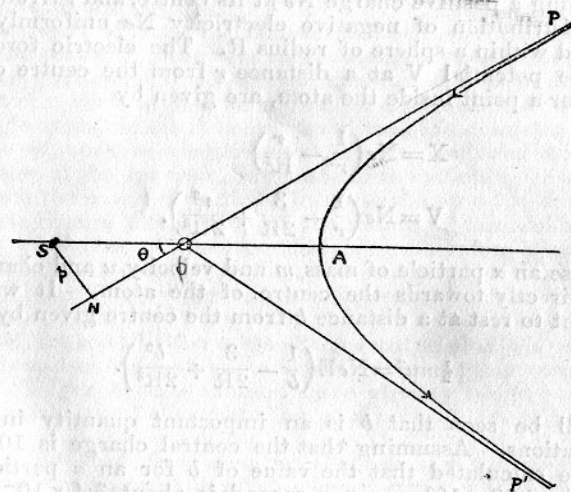
‡ Proc. Roy. Soc. lxxxiii. p. 492 (1910).

§ Camb. Lit. & Phil. Soc. xv. pt. 5 (1910).

the central charge, that the field due to the uniform distribution of negative electricity may be neglected. In general, a simple calculation shows that for all deflexions greater than a degree, we may without sensible error suppose the deflexion due to the field of the central charge alone. Possible single deviations due to the negative electricity, if distributed in the form of corpuscles, are not taken into account at this stage of the theory. It will be shown later that its effect is in general small compared with that due to the central field.

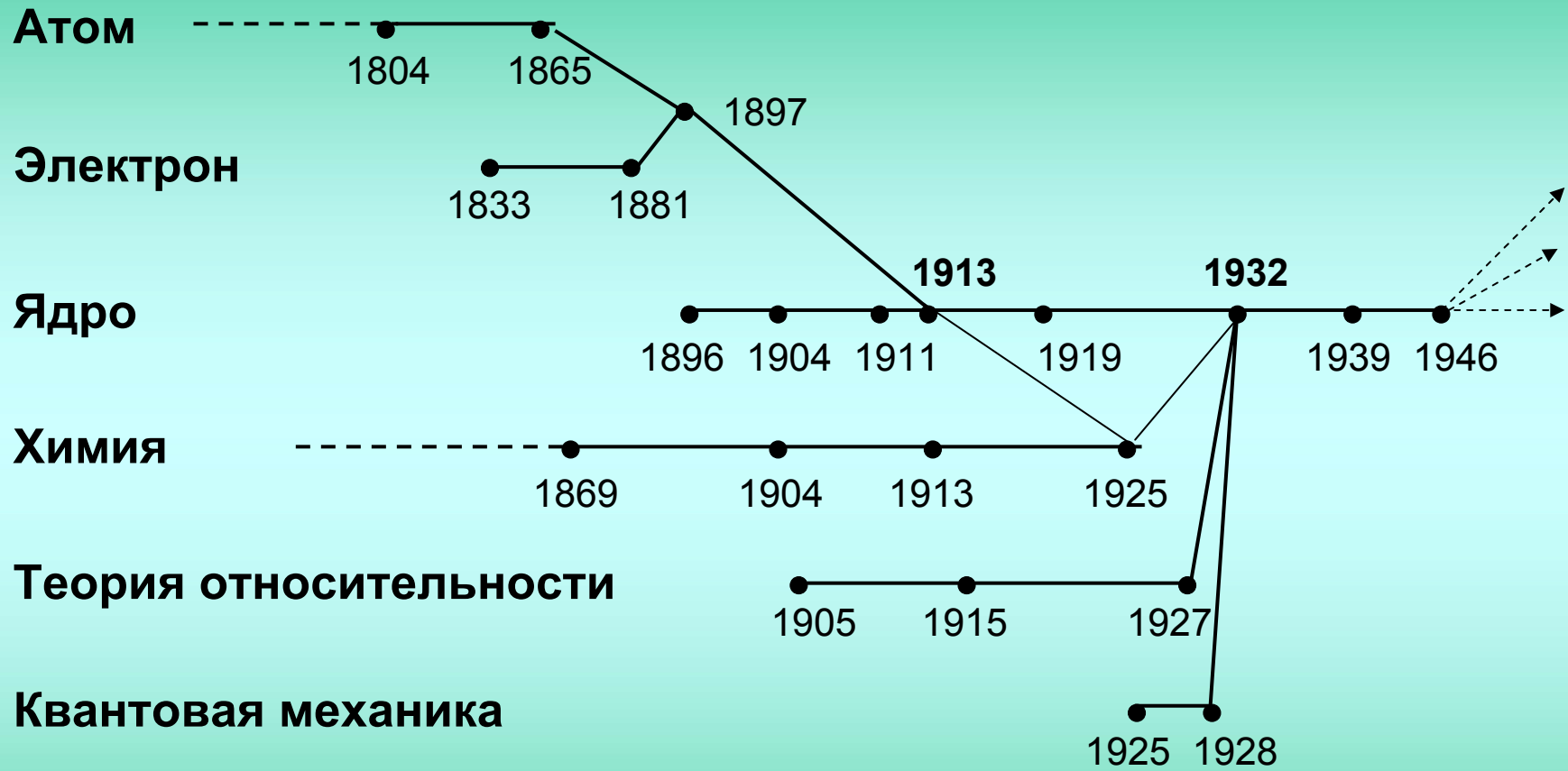
Consider the passage of a positive electrified particle close to the centre of an atom. Supposing that the velocity of the particle is not appreciably changed by its passage through the atom, the path of the particle under the influence of a repulsive force varying inversely as the square of the distance will be an hyperbola with the centre of the atom S as the external focus. Suppose the particle to enter the atom in the direction PO (fig. 1), and that the direction of motion

Fig. 1.



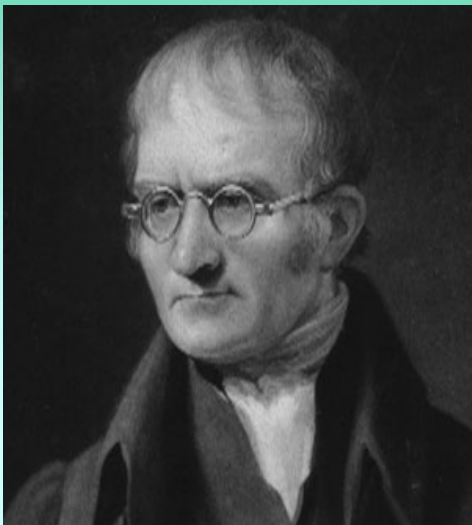
on escaping the atom is OP' . OP and OP' make equal angles with the line SA , where A is the apse of the hyperbola. $p = SN =$ perpendicular distance from centre on direction of initial motion of particle.

Истоки



1804

За сто лет до ядра



Джон Дальтон
(1776 – 1844)

За 7 лет до лекции Резерфорда, 20 мая 1904 г. Манчестерское философское общество отметило 100-летний юбилей атомной теории: его президентом в свое время был Джон Дальтон, который в в **1808 г.** издал знаменитую книгу **«Новая система химической философии»**, где впервые было четко сформулировано соответствие между понятиями «атом» и «химический элемент».

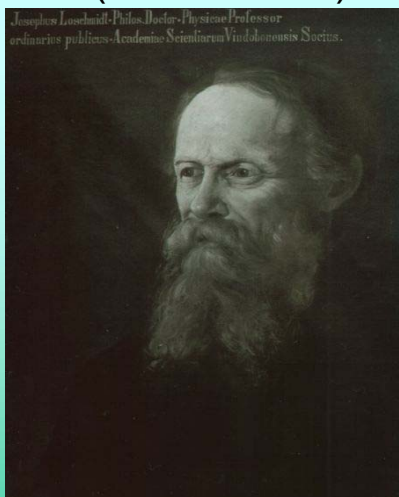
Он ввел новую величину - **атомный вес** – число, равное отношению массы атома любого элемента к массе атома водорода.

1811

Число Авагадро



Амадео Авогадро
(1776 - 1856)



Иозеф Лошмидт
(1821 - 1895)

$$N_A = 6,02214179(30) \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$$

Грамм-атом любого газа занимает одинаковый объем

$$V_m = 22413,996(39) \text{ см}^3 \text{ при } 0^\circ\text{C и } 1 \text{ атм.}$$

Число Лошмидта (1865 г.)

$$N_L = 2,6867774(47) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$N_A = N_L \cdot V_m$$

1833

Закон электролиза



Майкл Фарадей
(1791 - 1867)

Постоянная Фарадея:

$$F = 96\,485,3399(24) \text{ Кулонов/моль}$$

При электролизе на выделение 1 грамм-атома любого одновалентного элемента надо затратить **F** кулонов электричества.

1881

Заряд электрона



Герман Гельмгольц
(1821 - 1894)

$$e = F/N_A = 1,602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{ Кул}$$

Зернистое строение электричества.

1897

Масса электрона



Дж. Дж. Томсон
(1856 -1940)

$$m_e = 9,10938215(45) \cdot 10^{-28} \text{ г} =$$
$$= 0,510998910(13) \text{ МэВ}$$

1904



Хантаро Нагаока
(1865 - 1950)

Планетарная модель атома Ядерный потенциал

π - мезон

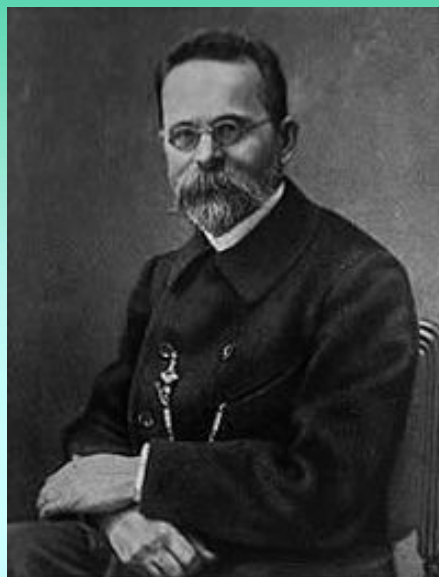
$$V(r) \sim \frac{e^{-m_{\pi} r}}{r}$$

$$m_{\pi} \approx 280m_e$$

1887

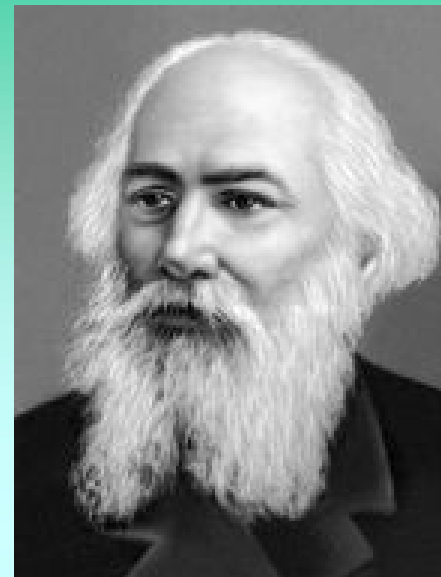


Петр Лебедев
(1866 - 1912)



Николай Морозов
(1854 - 1946)

1879, 1902



Николай Бекетов
(1826 - 1911)

Термин **ядро – nucleus** использовал уже Фарадей в 1844 г. (в смысле – центр атома) и Бекетов в 1902 г. Но утвердился он только в 1920 г. (до этого часто использовали слово **kernal**)

1907

Профессор Г. Пелла
«Электричество»
Учебник

Г. Пелла: «...Атом не является неделимой частичкой материи. Испускание света, дающего спектральные линии, характерные для каждого рода атомов, указывает уже на разнородность атомов. Можно было бы предположить, что атом состоит из очень большого числа корпускул, которые притягиваются к какому-нибудь центру, как планеты притягиваются к Солнцу...

Чтобы атом был нейтрален, необходимо, чтобы положительный электрический заряд, который, как мы предположили, находится в центре атома, был равен по абсолютному значению сумме отрицательных зарядов корпускул, вращающихся вокруг него...

Словом, все световые, электрические, тепловые и механические явления можно объяснить, допустив существование двух различных материй: корпускулы, или отрицательного электрона, и положительного электрона, о котором нам почти ничего не известно.

Центральный положительный заряд атома состоит из совокупности положительных электронов, число которых изменяется в зависимости от рода атома, но остается вполне определенным для каждого рода атомов...

Лишне было бы доказывать красоту этой теории, которая дает возможность объяснить все известные до сих пор явления и позволяет связать столько явлений и законов, не имевших, казалось, ничего общего между собой».

1913

Заряд ядра и номер элемента



Ван ден Брук
(1870 – 1926)

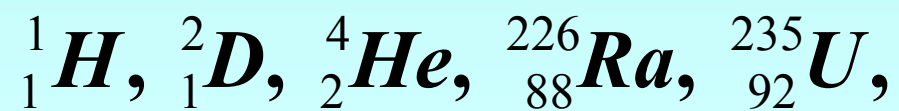
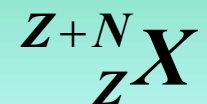
Заряд Z ядра равен порядковому номеру элемента в Периодической таблице Д.И. Менделеева.

1913

ИЗОТОПЫ



Фредерик Содди
(1877 – 1956)



1913



Нильс Бор
(1885 – 1962)

Атом Бора

$$mvr = n\hbar$$

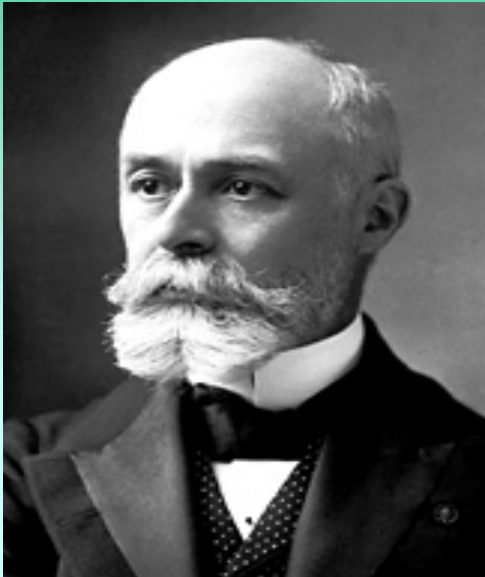
$$h\nu = E_k - E_n$$

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

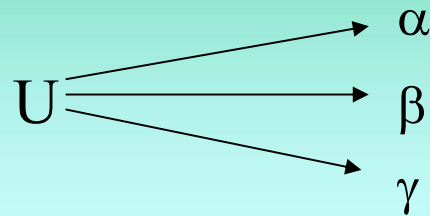
$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} \cdot n^2$$

1896

Открытие радиоактивности

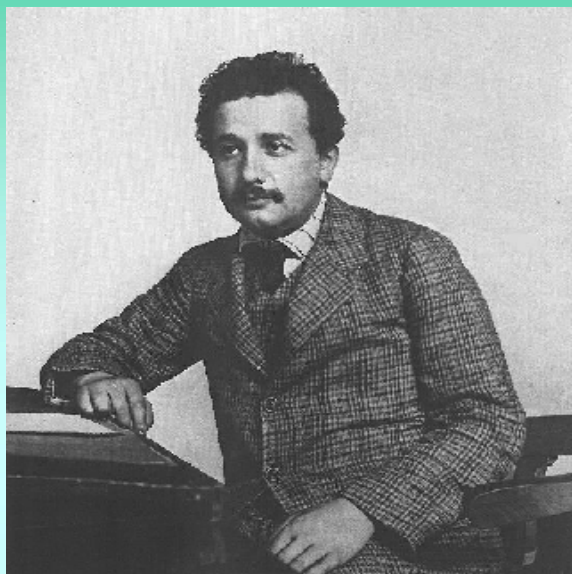


Анри Беккерель
(1852 - 1908)



1905

Потенциальная энергия материи



Альберт Эйнштейн
(1879 - 1955)

$$E_0 = mc^2$$

1913



Поль Ланжевен
(1872 - 1946)

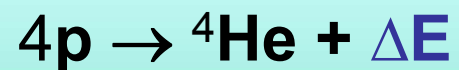
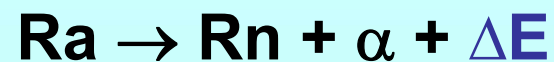


Артур Эддингтон
(1882 - 1944)

Энергия радиоактивного распада

Энергия связи ядра

Энергия звезд



1915

Дефект массы



W. D. Harkins

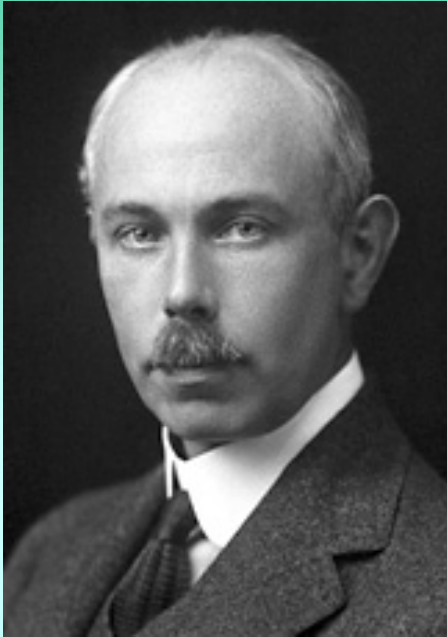
Уильям Харкинс
(1873 – 1951)

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

1927

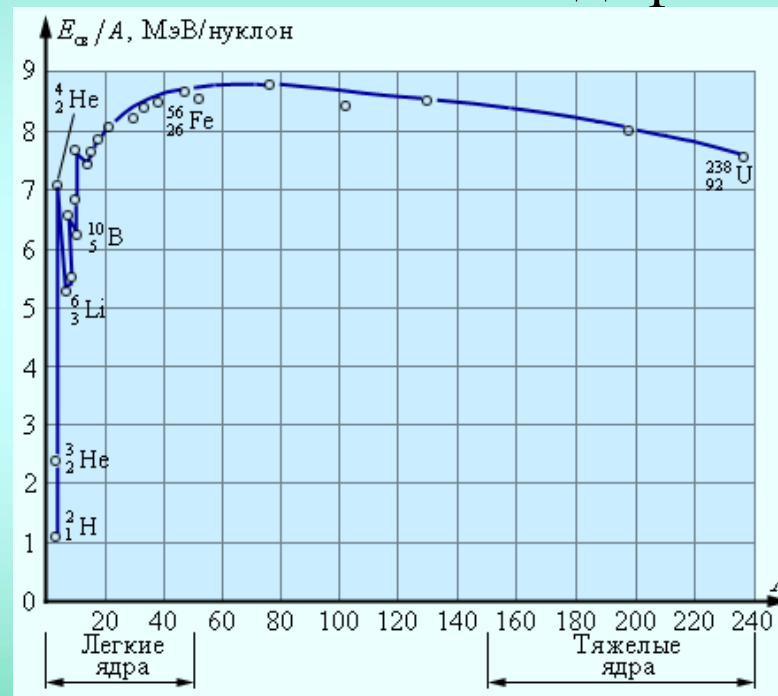
Энергия связи ядер



Френсис Астон
(1877 – 1945)

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

↓
дефект массы



Нарушение 8^й аксиомы Эвклида
«**Целое больше своих частей**»

1924



Вольфганг Паули
(1900 – 1958)

1927



Figure 2.1 From left: Yoshio Nishina (1890–1951), David M. Dennison (1900–1976), Werner Kuhn (1899–1963), Ralph de Laer Kroenig (1904–1995), Bidu Bhushan (B.B.) Ray in Copenhagen, 1925.

Дэвид Деннисон
(1900 -1976)

Спин ядра

Сверхтонкая структура спектров излучения атомов.

Структура вращательных спектров молекул.

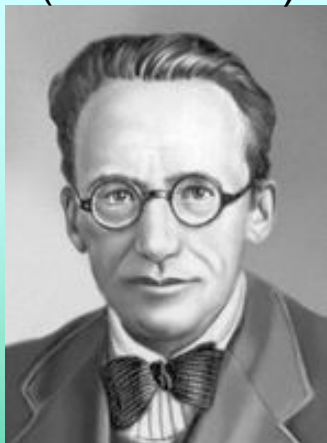
Спин протона

1925-1927

Рождение квантовой механики



Вернер Гейзенберг
(1901 - 1976)



Эрвин Шредингер
(1887 - 1961)

Новые понятия:

- дуализм волна-частица;
- соотношение неопределенностей;
- спин;
- симметрия и статистика;
- принцип суперпозиции;
- вероятностная интерпретация;
- конфигурационное пространство.

1928

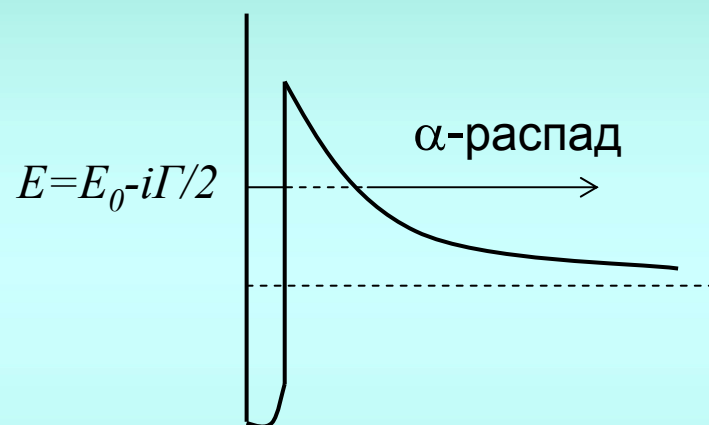


Георгий Гамов
(1904 – 1968)

α -распад

$$N = N_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

$$\tau = \hbar/\Gamma$$

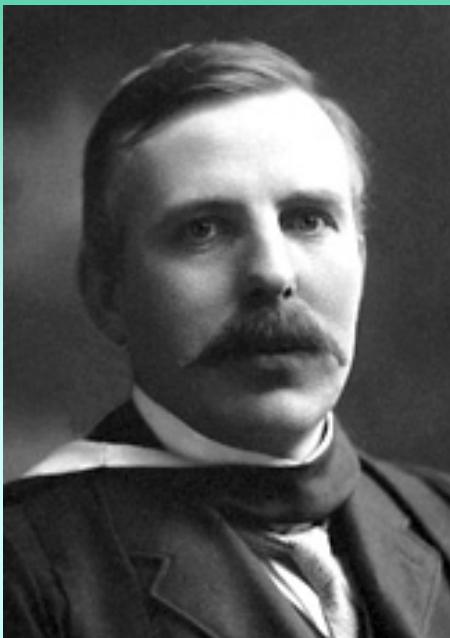


Закон Гейгера-Неттола (1909 г.)

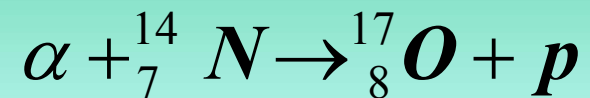
$$\ln \tau = \frac{D}{\sqrt{E_0}} + C$$

1919

Ядерные реакции



Эрнест Резерфорд
(1871 – 1937)



Протон – ядро атома водорода

1931



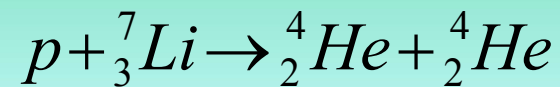
Джон Кокрофт
(1897 - 1967)

Эрнест Уолтон
(1903 - 1995)

Эрнест Резерфорд
(1871 - 1937)

Ускоритель протонов

Реакция:



(E=0,12 МэВ)

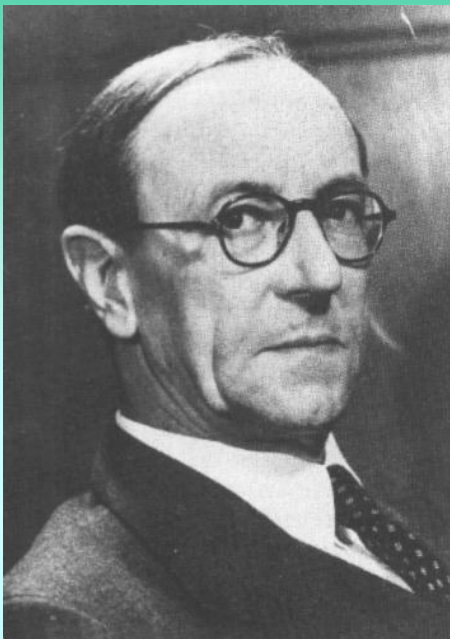
(E=17 МэВ)

В которой в чистом виде была проверена
формула Эйнштейна

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

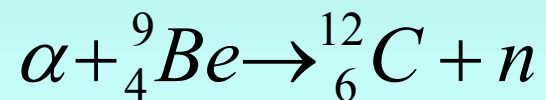
1932

Нейтрон



Джеймс Чэдвик
(1891 – 1974)

Чэдвик из анализа экспериментов Боте и супругов Жоли-Кюри установил, что они наблюдали новую частицу **нейтрон** в реакции



1932



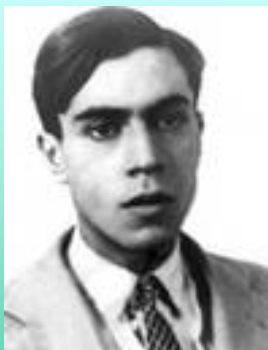
Berühmte Physiker im Gespräch: Prof. Dr. Iwanenko (links), Prof. Dr. Dirac (Mitte), Prof. Dr. W. Heisenberg (rechts)

Дмитрий Иваненко

(1904 – 1994)

Вернер Гейзенберг

(1901 – 1978)



Этторе Майорана

(1906 – 1938)

Протонно-нейтронная модель ядра

Нейтрон – элементарная частица, а не связанное состояние протона и электрона.

Ядро – связанное состояние нуклонов - протонов и нейтронов.

Изотопический спин: $T_z = \pm 1/2$

1932

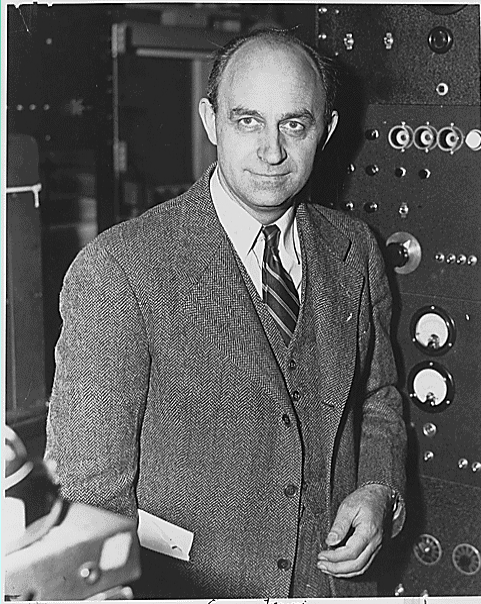
Дейтерий



Гарольд Юри
(1893 – 1981)

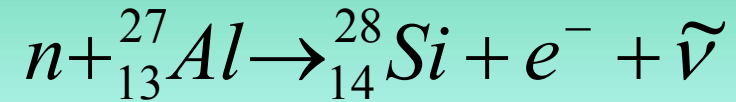
Простейшее связанное состояние протона и нейтрона с энергией связи $\Delta E = 2,2$ МэВ

1934



Энрико Ферми
(1901 – 1954)

Медленные нейтроны



Ферми и его команда получили таким способом
47 новых радиоактивных изотопов



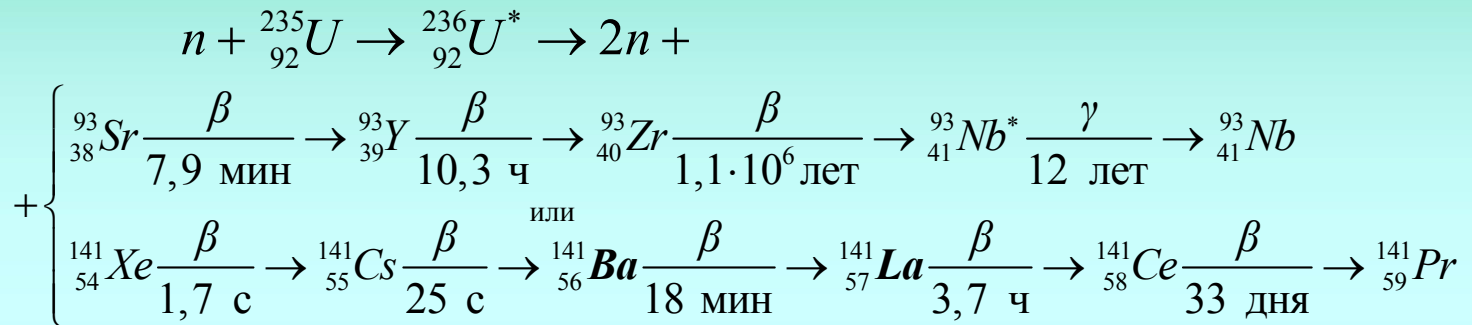
1938

Деление ядра

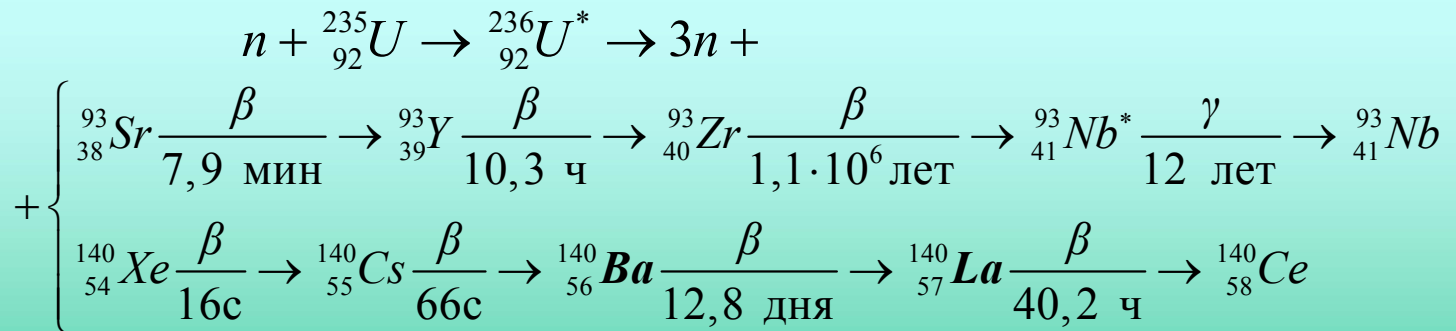
Радиохимики установили, что при облучении урана нейтронами образуются **Va** и **La**



Отто Ган
(1879 – 1968)
Лизе Майтнер
(1878 – 1968)



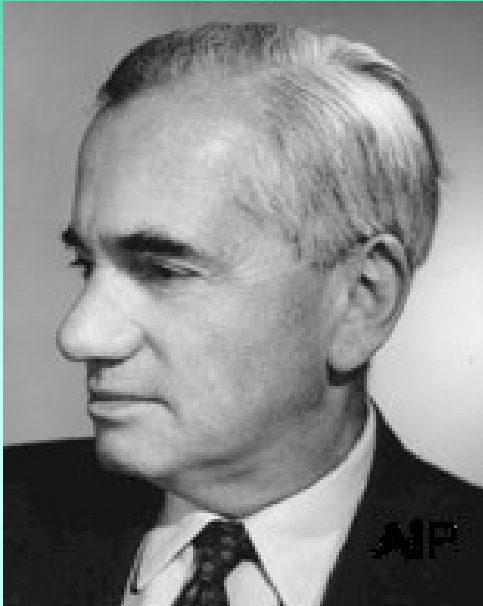
или



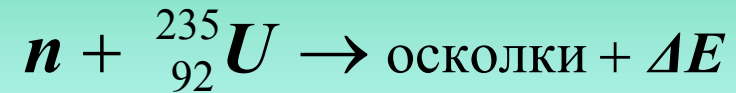
Отто Ган
Фриц Штрассман
(1902 - 1980)

1939

Объяснение и доказательство деления



Отто Фриш
(1902 – 1980)



$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = \Delta E_1 \cdot 235 = (8,5 - 7,6) \cdot 235 \approx 200 \text{ МэВ}$$

1936

Капельная модель ядра

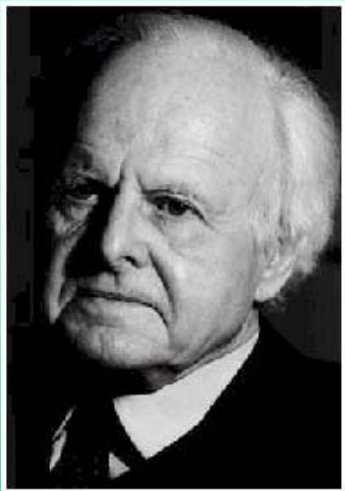


Нильс Бор
(1885 – 1962)

Ядро - заряженная, несжимаемая жидкость.
Его форма зависит от деформации.

Формула Вайцеккера

$$E = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma Z^2 A^{-1/3} - \varepsilon \left(\frac{A}{2} - Z \right) A^{-1} + \chi A^{-3/4}$$



Фридрих Вайцеккер
(1912 – 2007)

1939

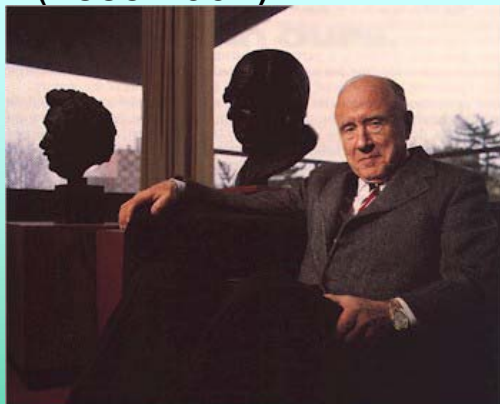
Теория деления ядер

на основе капельной модели ядра.

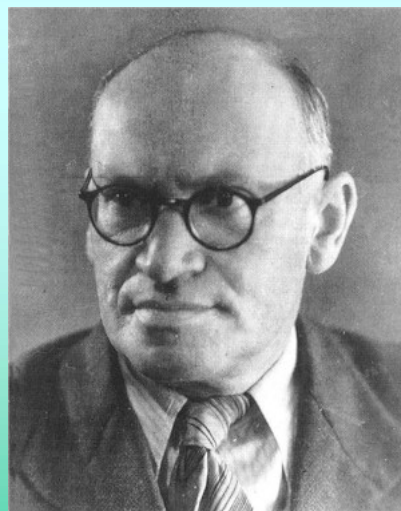
Потенциальный барьер деления (аналогия с α -распадом)



Нильс Бор
(1885-1962)



Джон Уилер
(1911-2008)



Яков Френкель
(1894-1952)

Ядерная энергия

В этих огромных сооружениях добывается энергия из ядер атомов, размеры которых
 $\sim 10^{-12}$ см



Белоярская АЭС



Взрыв ядерной бомбы

~ 1 г ядерного вещества трансформируется в энергию взрыва

1930

Нейтрино



Вольфганг Паули
(1900 – 1958)

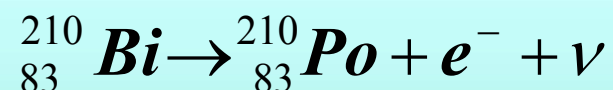
В 1914 г. Дж. Чэдвик обнаружил, что в β -распаде



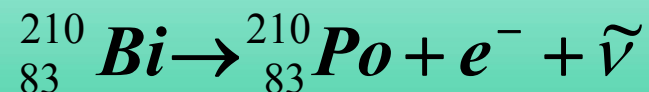
энергия электрона непостоянна.

Бор усомнился в справедливости закона сохранения энергии в микромире.

Паули возражал и предположил, что реакция имеет вид:



В 1956 г. схема распада была установлена окончательно:



1934

Теория β -распада



Энрико Ферми
(1901 – 1954)

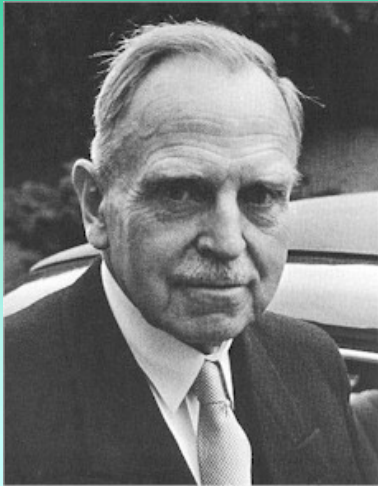
Электроны, позитроны, нейтрино *не содержатся* в ядре – они *рождаются* в процессе распада ядра.

Это – следующий шаг в теории, которая не использует наглядных образов, как в α -распаде.

1921

Изомерия ядер

^{234}Pa , ^{79}Br , $^{180\text{m}}\text{Ta}$, ^{178}Hf



Отто Ган
(1879 – 1968)



Игорь Курчатов
(1903 – 1960)

Начало ядерной физики в России

1940

Спонтанное деление

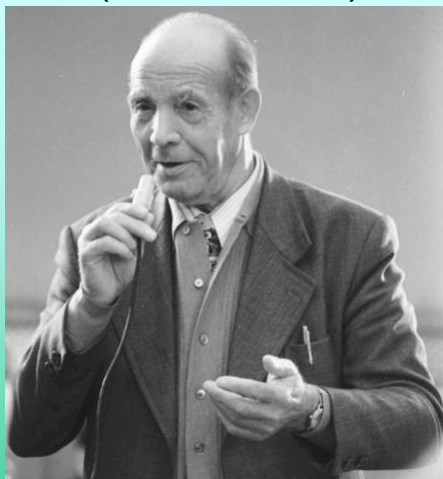


Георгий Флеров
(1913 – 1990)

$$T_{1/2}(^{238}\text{U})_{\alpha} = 14 \text{ млрд. лет}$$

$$T_{1/2}(^{235}\text{U})_{\alpha} = 0,7 \text{ млрд. лет}$$

$$T_{1/2}(^{238}\text{U})_{\text{спонт.дел.}} \approx 10^6 \text{ млрд. лет}$$

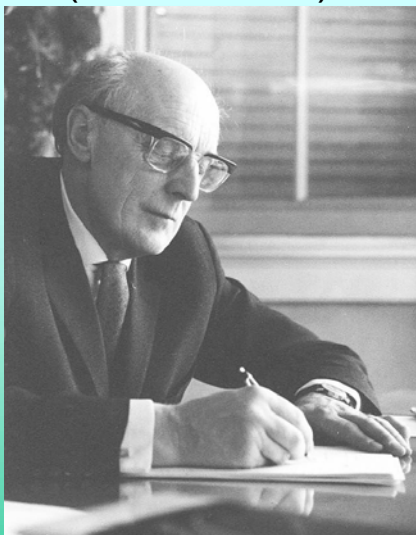


Константин Петржак
(1907 – 1998)

1948



Мария Гепперт-Майер
(1906 – 1972)



Ханс Йенсен
(1907 -1973)

Оболочечная структура ядра

В атоме электроны группируются в оболочки. Для кулоновского потенциала в оболочке n помещается $2n^2$ электронов. В ядре протоны и нейтроны также группируются в оболочки. Для осцилляторного потенциала с учетом спинов протона и нейтрона размеры их оболочек (магические числа) соответственно равны:

n : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184, 196

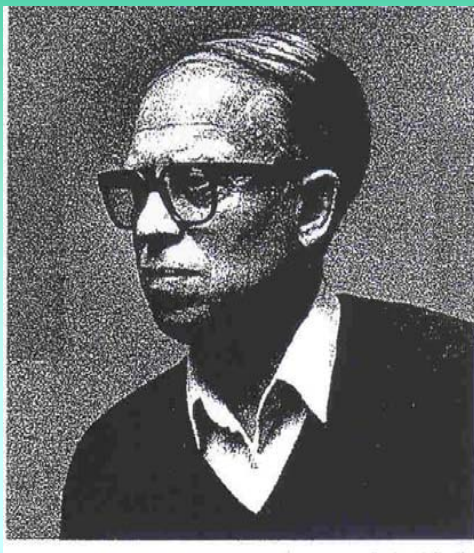
p : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126

Например, ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ - дважды магическое ядро (аналог атомов благородных газов).

Или ${}_{114}^{298}\text{X}$ - на островах стабильности.

1962

Изомеры формы



Сергей Поликанов
(1926 - 1994)

^{242m}Am → Спонтанное деление



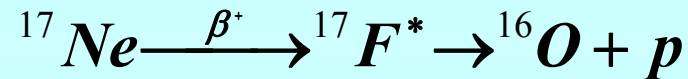
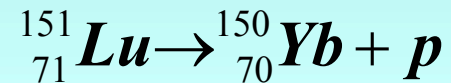
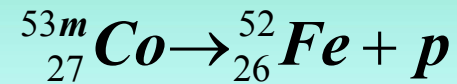
В.М. Струтинский (1967 г.)

Протонная радиоактивность

1982

Дармштадт

Дубна



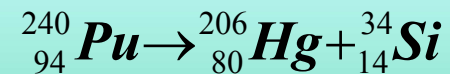
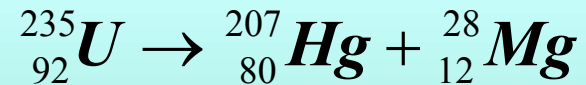
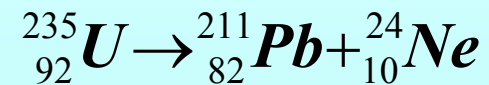
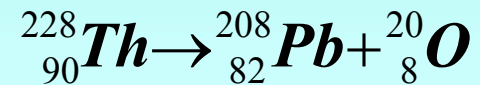
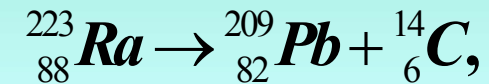
2^x протонная радиоактивность



Кластерная радиоактивность

1982

Oxford



$$\frac{Ra(C)Pb}{Ra(\alpha)Rn} \approx 10^{-9}$$

Атомное ядро и химия

1869



Дмитрий Менделеев
(1834 - 1907)

При монотонном увеличении заряда ядра химические свойства элементов меняются периодически.

Физические – тоже зависят от характеристик ядра: орто/пара водород, ферромагнетизм, сверхтонкая структура спектров и т.д.

${}_{30}\text{Zn}$	- металл
${}_{48}\text{Cd}$	- легкоплавкий металл
${}_{80}\text{Hg}$	- жидкий металл
${}_{112}\text{Cn}$	- газообразный металл

Границы Периодической системы

Mendeleev periodic table of the elements (2010)

1																18																																																																																																																																																																																																																																																	
IA																VIII A																																																																																																																																																																																																																																																	
1																2																																																																																																																																																																																																																																																	
H 1.00794 Hydrogen																He 4.0026 Helium																																																																																																																																																																																																																																																	
2			3													4			5			6			7			8			9			10			11			12			13			14			15			16			17			18																																																																																																																																																																																																							
Li 6.941 Lithium			Be 9.01218 Beryllium			B 10.811 Boron			C 12.011 Carbon			N 14.0067 Nitrogen			O 15.9994 Oxygen			F 18.9984 Fluorine			Ne 20.1797 Neon			Al 26.981539 Aluminum			Si 28.0855 Silicon			P 30.97376 Phosphorus			S 32.066 Sulfur			Cl 35.4527 Chlorine			Ar 39.948 Argon			K 39.0983 Potassium			Ca 40.078 Calcium			Sc 44.95591 Scandium			Ti 47.88 Titanium			V 50.9415 Vanadium			Cr 51.9961 Chromium			Mn 54.93805 Manganese			Fe 55.845 Iron			Co 58.93320 Cobalt			Ni 58.6934 Nickel			Cu 63.546 Copper			Zn 65.39 Zinc			Ga 69.723 Gallium			Ge 72.61 Germanium			As 74.92159 Arsenic			Se 78.96 Selenium			Br 79.904 Bromine			Kr 83.80 Krypton			Rb 85.4678 Rubidium			Sr 87.62 Strontium			Y 88.90585 Yttrium			Zr 91.224 Zirconium			Nb 92.90638 Niobium			Mo 95.94 Molybdenum			Tc 98 Technetium			Ru 101.07 Ruthenium			Rh 102.90550 Rhodium			Pd 106.42 Palladium			Ag 107.8682 Silver			Cd 112.411 Cadmium			In 114.818 Indium			Sn 118.710 Tin			Sb 121.757 Antimony			Te 127.60 Tellurium			I 126.90447 Iodine			Xe 131.29 Xenon			Cs 132.90543 Cesium			Ba 137.327 Barium			La 138.9055 Lanthanum			Hf 178.49 Hafnium			Ta 180.9479 Tantalum			W 183.84 Tungsten			Re 186.207 Rhenium			Os 190.23 Osmium			Ir 192.22 Iridium			Pt 195.08 Platinum			Au 196.96654 Gold			Hg 200.59 Mercury			Tl 204.3833 Thallium			Pb 207.2 Lead			Bi 208.98037 Bismuth			Po [209] Polonium			At [210] Astatine			Rn [222] Radon			Fr [223] Francium			Ra [226] Radium			Ac [227] Actinium			Rf [261] Rutherfordium			Db [262] Dubnium			Sg [266] Seaborgium			Bh [264] Bohrium			Hs [265] Hassium			Mt [268] Meitnerium			Ds [269] Darmstadtium			Rg [272] Roentgenium			Cn [277] Copernicium			113			114			115			116			117			118		

Лантаноиды Lanthanides

58																59																60																61																62																63																64																65																66																67																68																69																70																71															
Ce 140.116 Cerium																Pr 140.90765 Praseodymium																Nd 144.24 Neodymium																Pm [145] Promethium																Sm 150.36 Samarium																Eu 151.965 Europium																Gd 157.25 Gadolinium																Tb 158.92534 Terbium																Dy 162.50 Dysprosium																Ho 164.93032 Holmium																Er 167.26 Erbium																Tm 168.93421 Thulium																Yb 173.04 Ytterbium																Lu 174.967 Lutetium															

Актиноиды Actinides

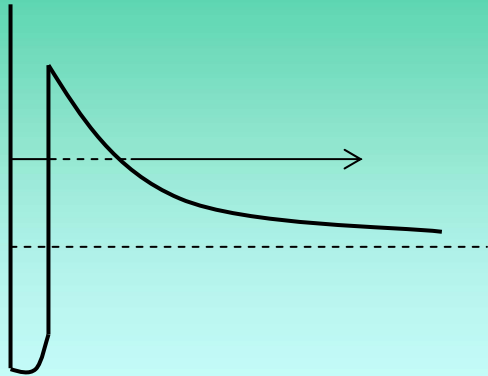
90																91																92																93																94																95																96																97																98																99																100																101																102																103															
Th 232.0381 Thorium																Pa 231.03688 Protactinium																U 238.02891 Uranium																Np [237] Neptunium																Pu [244] Plutonium																Am [243] Americium																Cm [247] Curium																Bk [247] Berkelium																Cf [251] Californium																Es [252] Einsteinium																Fm [257] Fermium																Md [258] Mendelevium																No [259] Nobelium																Lr [262] Lawrencium															

1															
H 1.00794 Hydrogen															

14																15																16																17																18															
Si 28.0855 Silicon																P 30.97376 Phosphorus																S 32.066 Sulfur																Cl 35.4527 Chlorine																Ar 39.948 Argon															



Характеристики ядер



Ядро $\rightarrow \gamma, e^-, e^+, n, p, \alpha, C, Mg, Si \dots$

Заряд: $Z \cdot e$

Размер: $10^{-13} - 10^{-12}$ см

Форма: ?

Физическое пространство

Потенциал

Симметрия

Конфигурационное пространство

Момент

Спин

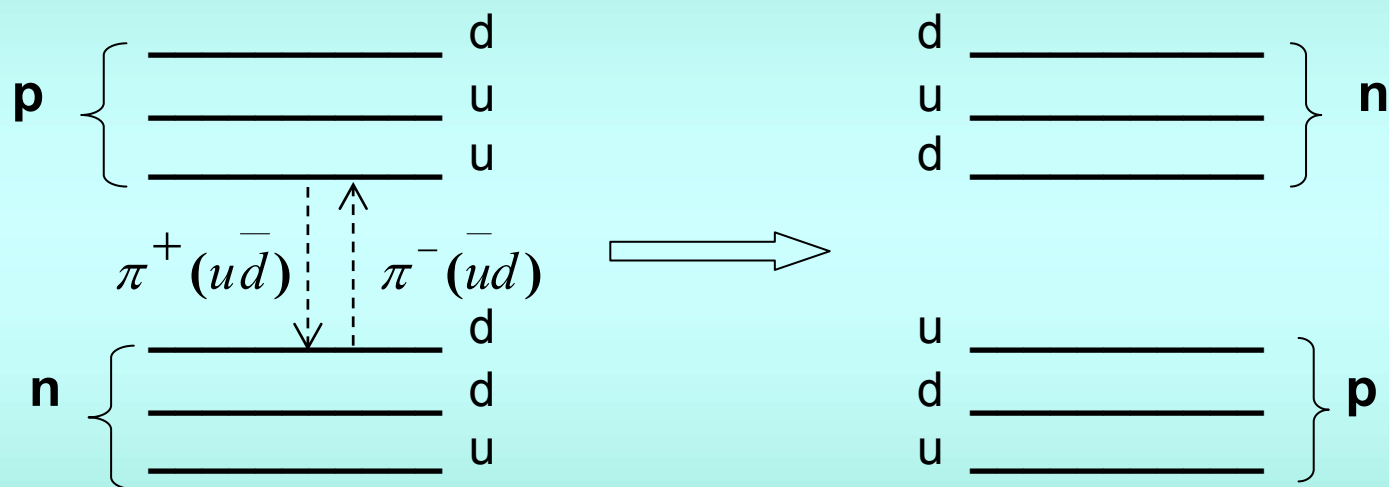
Изотопический спин

Пространство представлений

Кварковая модель ядерных сил

$$u = 2/3,$$

$$d = -1/3$$



Дейтрон

Ядерные силы – **обменные**, подобно химической связи атомов в молекулах.

К сожалению, никто из нас не узнает, как будет
выглядеть ядро еще через 100 лет.

С праздником!