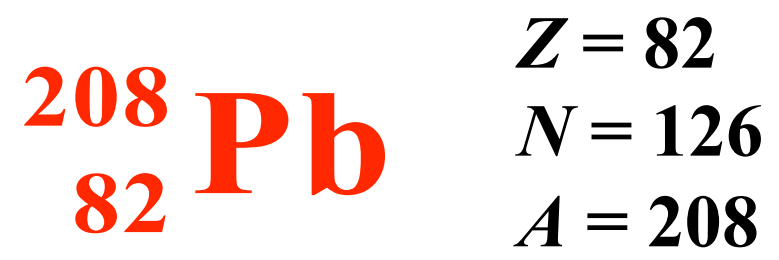
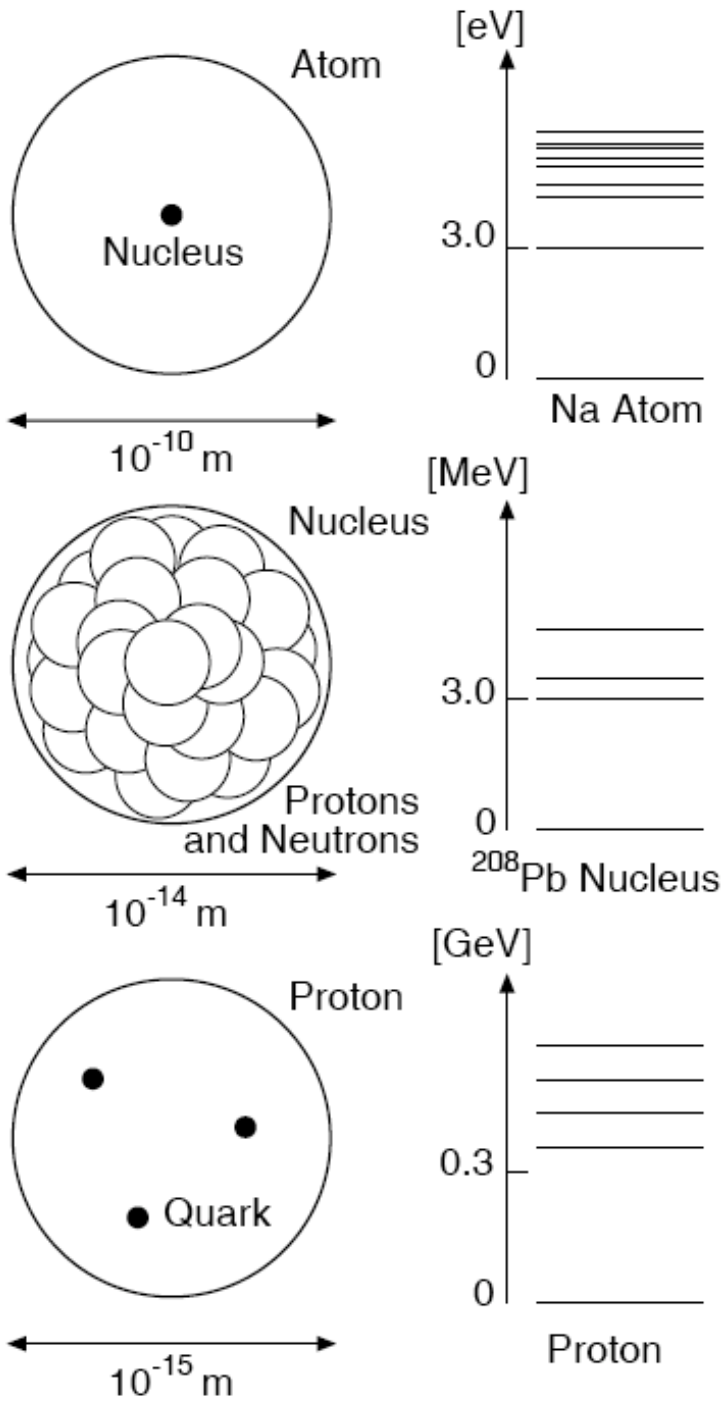




Микромир и Вселенная 2019

Атомные ядра



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

		Заряд, q_e	Масса, МэВ/c^2
Электрон	e	-1	0,511
Протон	p	+1	938,3
Нейтрон	n	0	939,6
“Нейтрино”	ν	0	0

Элементарный заряд $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

1 эВ (электрон-Вольт) – энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов 1 Вольт

1 кэВ (кило) = 10^3 эВ

1 МэВ (мега) = 10^3 кэВ = 10^6 эВ

1 ГэВ (гига) = 10^3 МэВ = 10^9 эВ

1 ТэВ (тера) = 10^3 ГэВ = 10^{12} эВ

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

2006 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Изначальный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43 Tc technetium [98.9063]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.29(6)
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.227(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]
87 Fr francium [223.0197]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103	104 Rf rutherfordium [261.12]	105 Db dubnium [268.13]	106 Sg seaborgium [271.13]	107 Bh bohrium [278]	108 Hs hassium [277.15]	109 Mt meitnerium [276.15]	110 Ds darmstadtium [281.16]	111 Rg roentgenium [280.16]	112 Cn copernicium [285.17]	113 Uut ununtrium [284.18]	114 Fl flerovium [289.19]	115 Uup ununpentium [288.19]	116 Lv livermorium [293]	117 Uus ununseptium [294]	118 Uuo ununoctium [294]

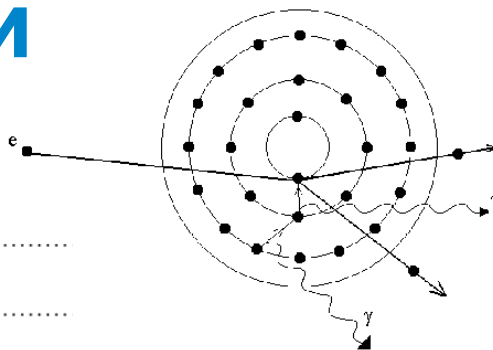
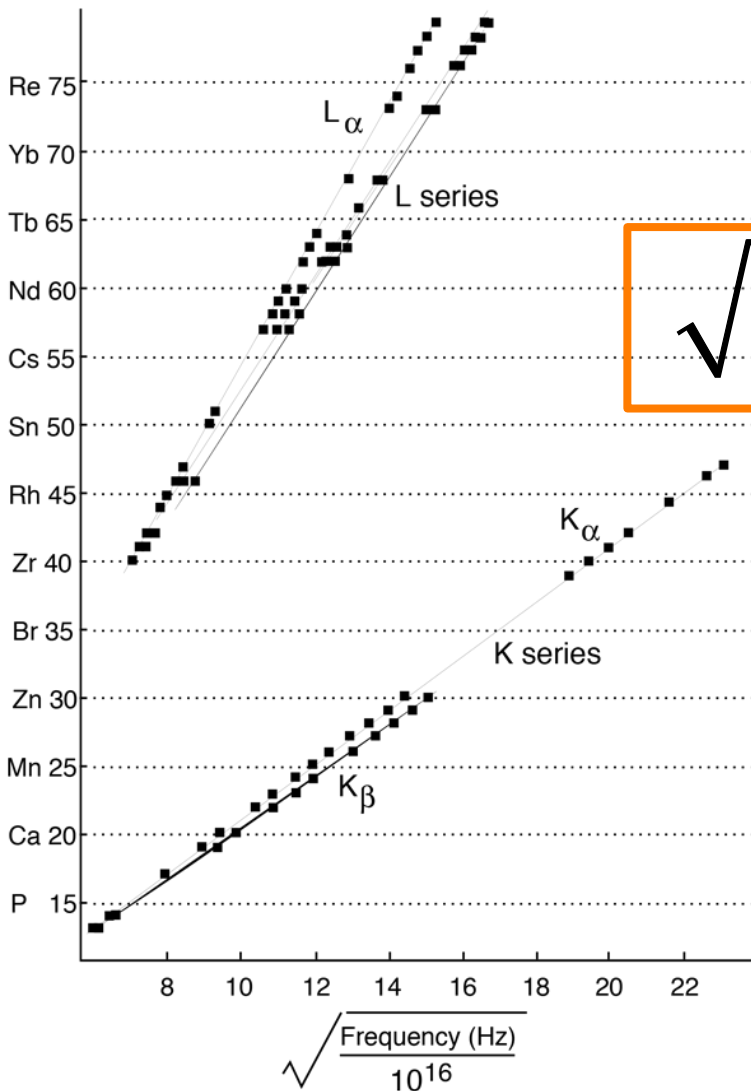
* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	58 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03688(2)	92 U uranium 238.02891(3)	93 Np neptunium [237.0432]	94 Pu plutonium [244.0642]	95 Am americium [243.0614]	96 Cm curium [247.0704]	97 Bk berkelium [247.0703]	98 Cf californium [251.0796]	99 Es einsteinium [252.0829]	100 Fm fermium [257.0951]	101 Md mendelevium [258.0986]	102 No nobelium [259.1009]	103 Lr lawrencium [262.11]

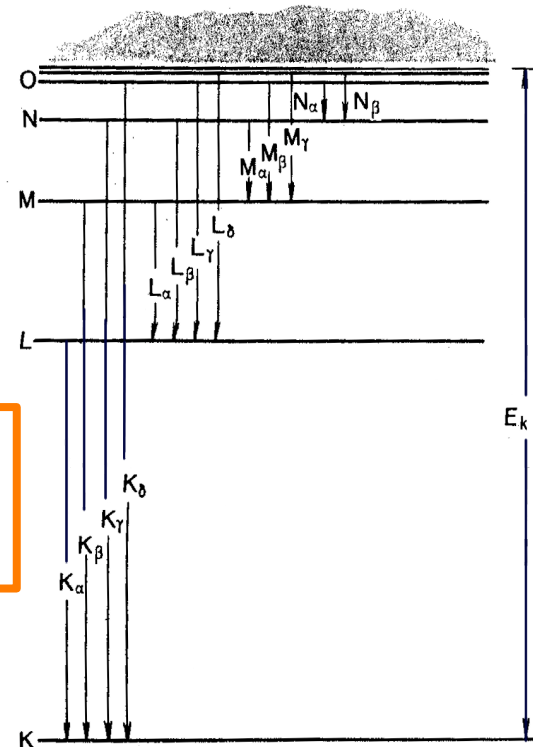
** Actinoids

Микромир и Вселенная.
Атомные ядра

Закон Мозли



$$\sqrt{\nu} = AZ - b$$



Модель Бора:

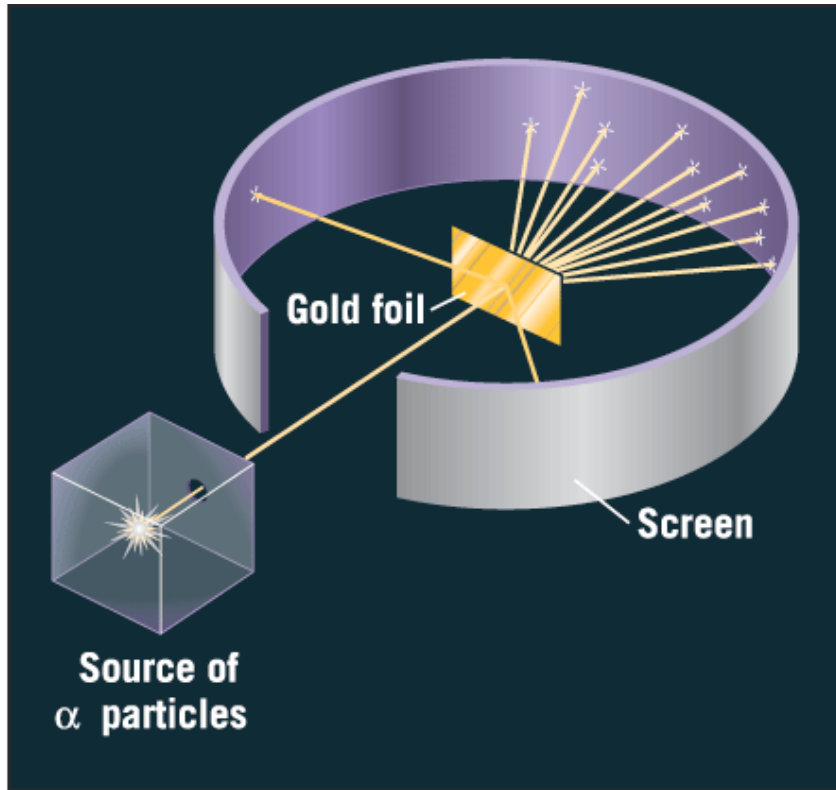
$$E_n \approx -\frac{mc^2 \alpha^2}{2} \frac{(Z - s_n)^2}{n^2}$$

$$E_\gamma = h\nu = E_n^{(i)} - E_n^{(f)}$$

$$\nu = -\frac{mc^2 \alpha^2}{2h} (Z - s_n)^2 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

Adapted from Moseley's original data (H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 27:703, 1914)

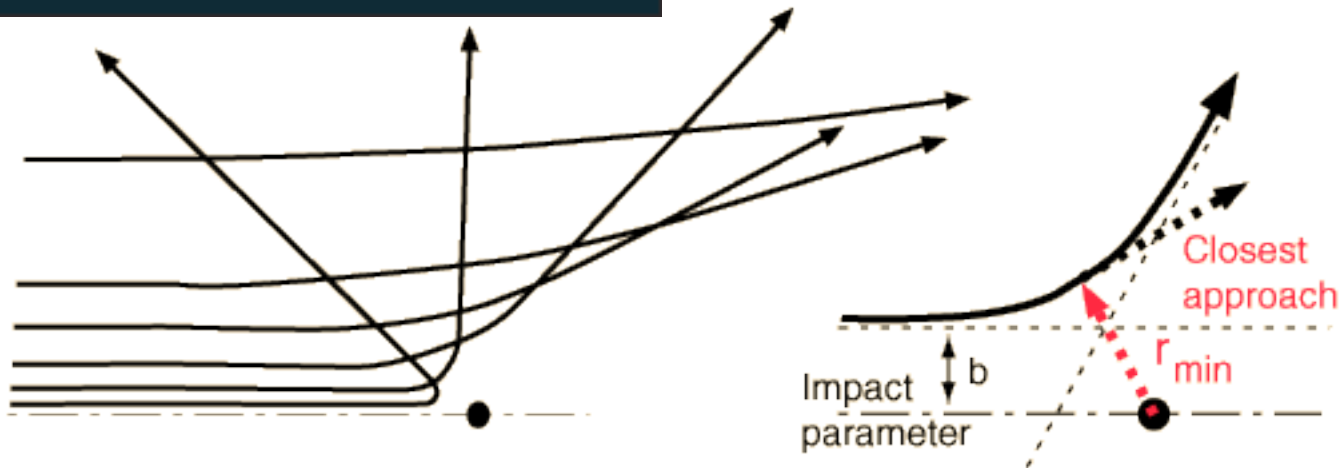
1911 г. Опыты по рассеянию α -частиц



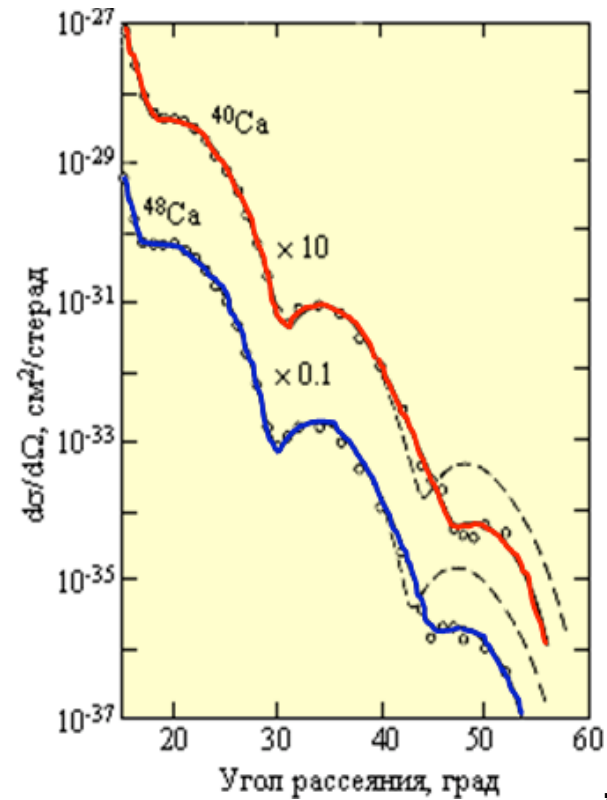
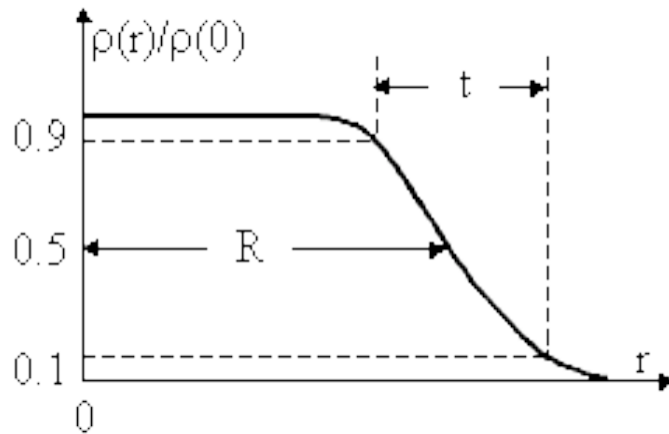
Упругое рассеяние альфа-частиц



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



Размер ядра



$$R = 1,2 A^{1/3}$$

$$t = 2,5 \text{ фМ}$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R)/a]}$$

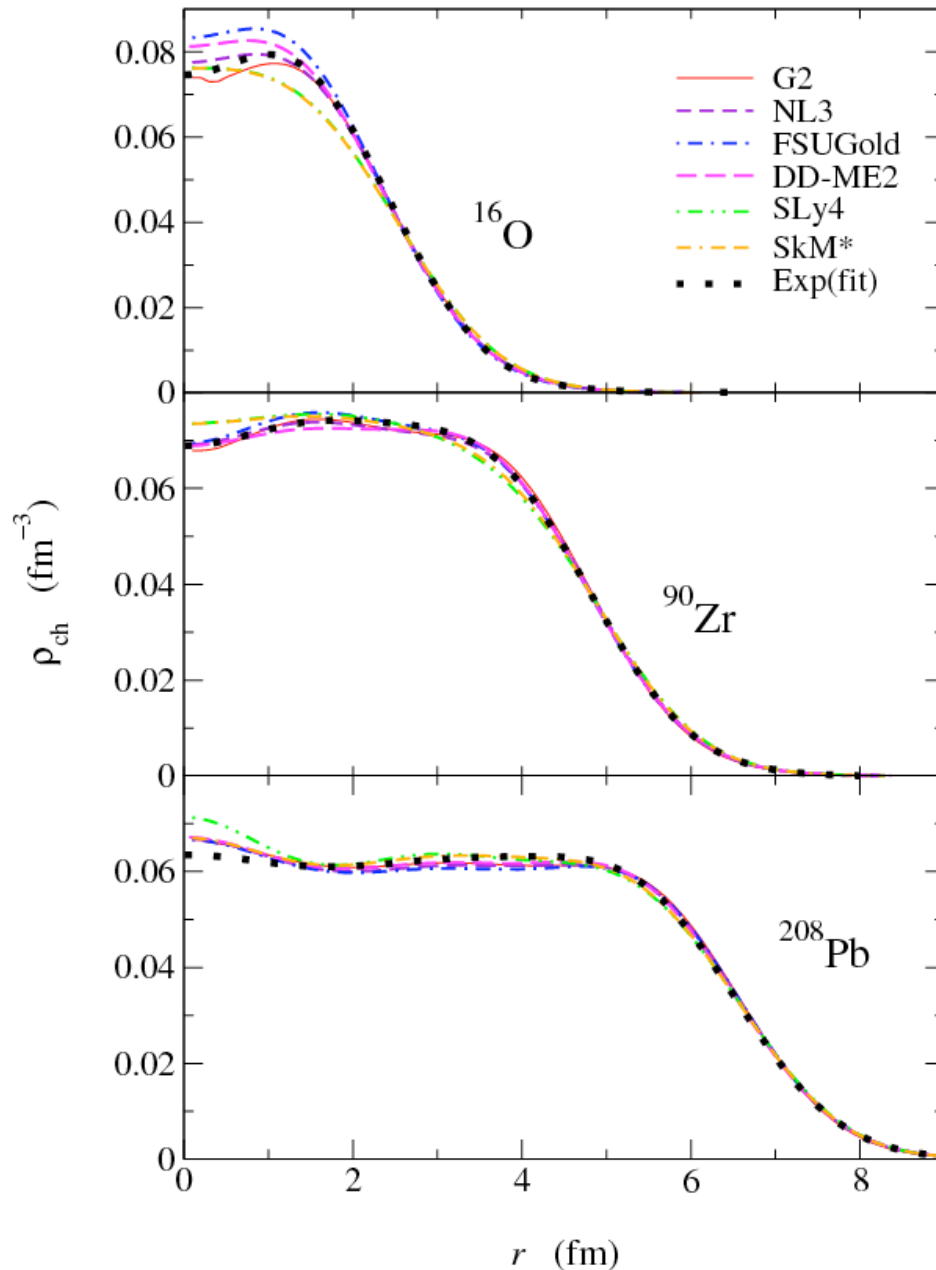
ρ_0 — плотность ядерной материи в центре ядра,

R — радиус ядра — расстояние, на котором плотность ядерной материи спадает в два раза,

t — параметр диффузности (спад плотности от $0.9 \rho_0$ до $0.1 \rho_0$).

$$t = 4,4a.$$

Размер ядра



Основные методы определения радиуса ядра:

- Определение радиуса α -радиоактивных ядер по энергии испускания α -частиц (теория Гамова)
- Энергии связи зеркальных ядер
- Рассеяние быстрых нейтронов (изменение потока нейтронов с толщиной мишени)
- Рентгеновское излучение мезоатомов
- Рассеяние быстрых электронов

Атомная единица массы. Дефект массы

Атомная единица массы (а.е.м.) равна 1/12 массы атома углерода ^{12}C .

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6582 \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

ИЛИ

$$E = mc^2 = 931,44 \text{ МэВ.}$$

Разность Δ между массой атома в атомных единицах массы и его массовым числом называется дефектом массы

$$M_{\text{ядра}} = A \cdot u + \Delta - Z \cdot m_e c^2$$

Энергия связи атомного ядра



Энергия связи ядра $B(A, Z)$ – минимальная энергия, которую необходимо затратить для того, чтобы разделить атомное ядро на отдельные составляющие его нейтроны и протоны.

$$M(A, Z)c^2 + B(A, Z) = Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2$$

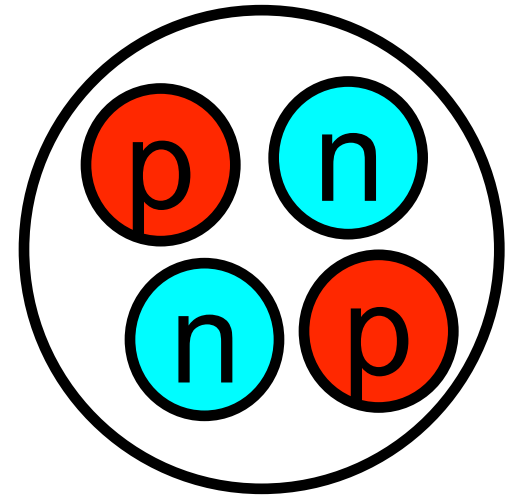
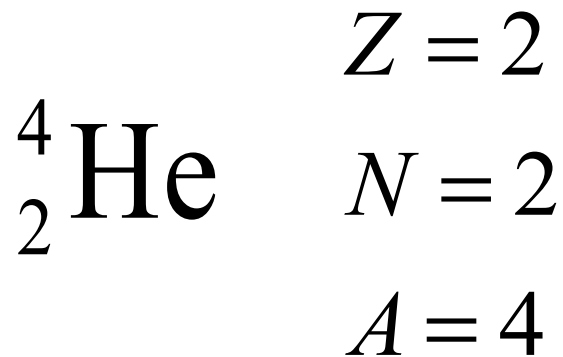
$$M(A, Z)c^2 = Z \cdot m_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - B(A, Z)$$

Удельная энергия связи ядра – энергия связи, приходящаяся на один нуклон

$$\varepsilon = B(A, Z)/A \sim 8 \text{ МэВ}$$

Энергия связи атомного ядра

α -частица – ядро атома гелия



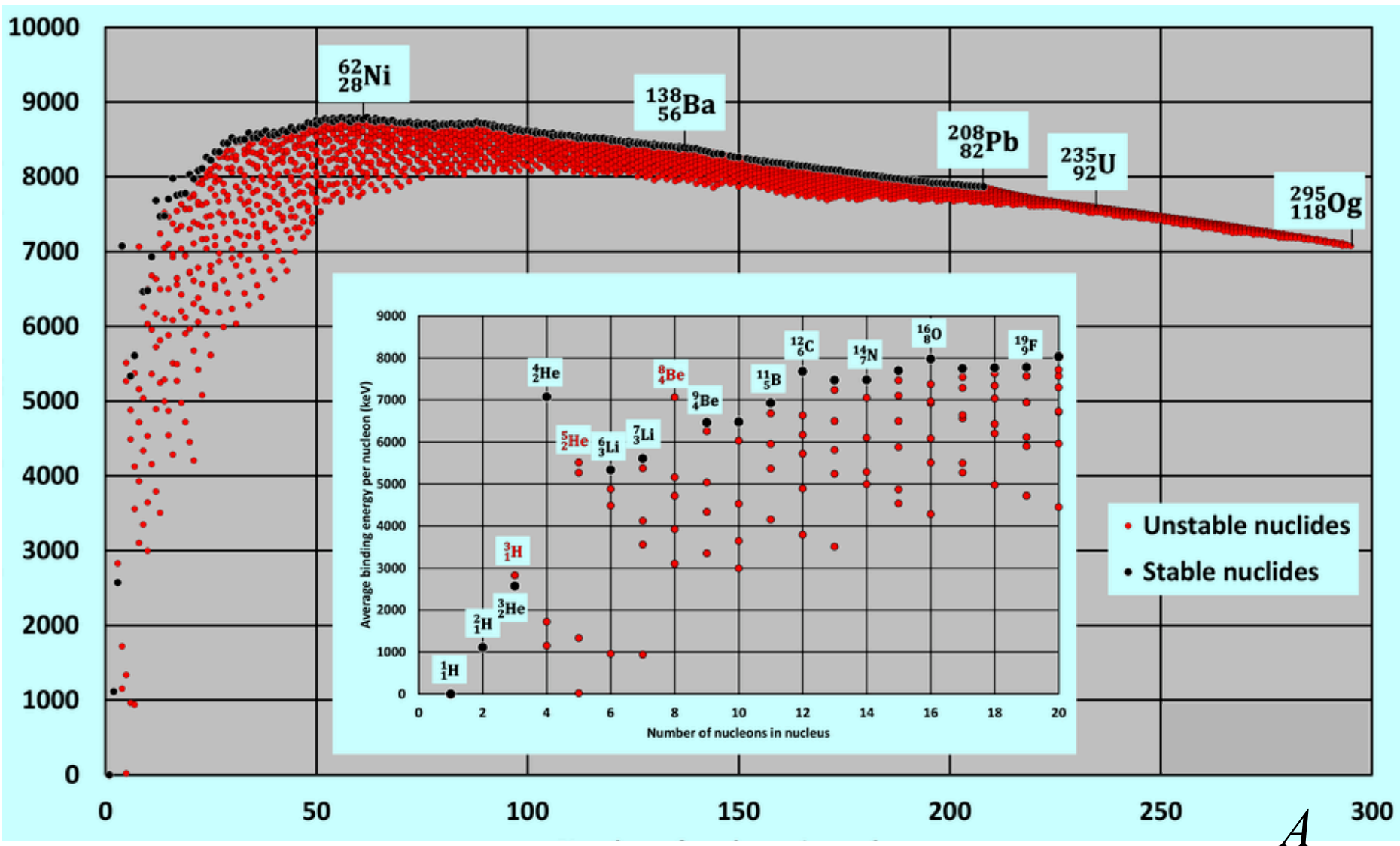
Источником энергии, выделяющейся на Солнце, является образование ядра ${}^4\text{He}$ при слиянии 4 протонов.



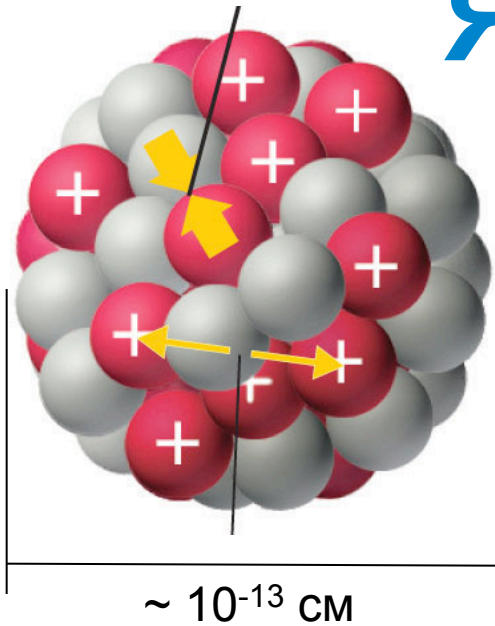
Масса ядра ${}^4\text{He}$ на 0,6% меньше суммы масс четырёх протонов и двух позитронов. В результате синтеза ${}^4\text{He}$ выделяется энергия $E \approx 25$ МэВ.

Удельная энергия связи

$$\frac{B(A,Z)}{A}, \text{ кЭВ}$$



Ядерные силы



Какие силы связывают протоны и нейтроны в атомные ядра?

1. Сильное взаимодействие между нуклонами

$$\frac{F_{NN}}{F_{Coul}} \sim 40$$

2. Конечность радиуса действия ядерных сил

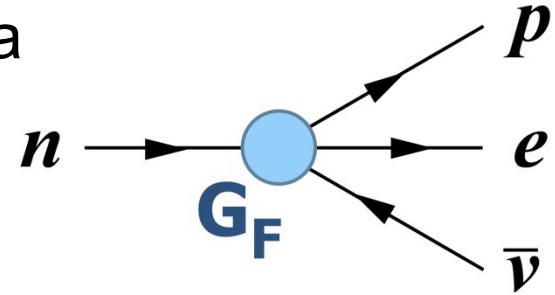
$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

Теория Ферми

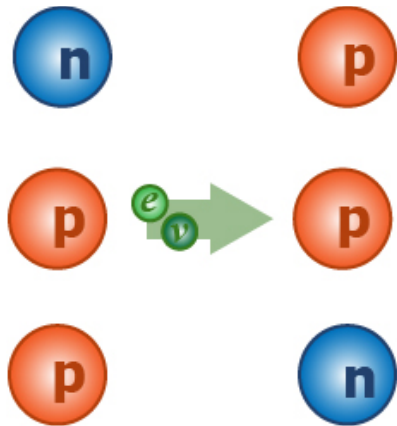
1934 – Э. Ферми. Теория β -распада

$$\tau_n \approx \frac{1}{G_F^2} \frac{1}{(m_n - m_p)^5} \sim 885,7 \text{ сек}$$

$$G_F \sim \frac{10^{-5}}{m_p^2} - \text{константа } \mathbf{слабого} \text{ взаимодействия}$$



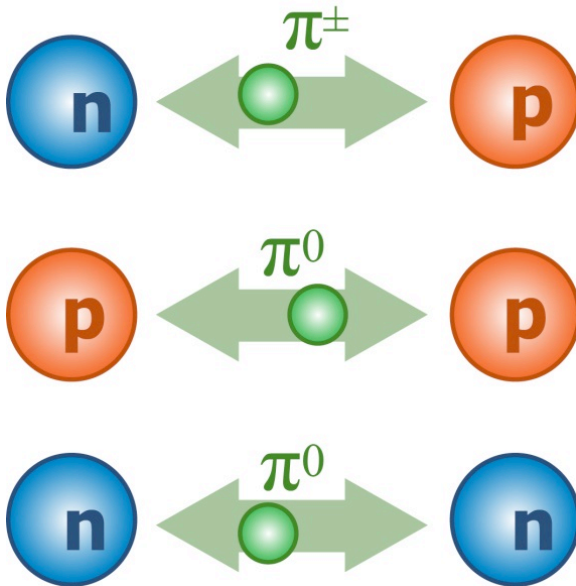
Для $E_\nu \sim 1 \text{ МэВ}$ $\sigma_\nu \sim 10^{-43} \text{ см}^2$, $L_\nu \sim 10^{20} \text{ см}$



Для ядерных сил
радиус взаимодействия

$$r_{NN} \sim \frac{hc}{m_e} \sim 10^3 \text{ ФМ}$$

Теория Юкавы



1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

$$m_\pi \sim 200 m_e$$

1937 г. К. Андерсон, С.Неддермейер. Открытие мюона.

$$Q_\mu = q_e; \quad m_\mu = 200 m_e \quad J=1/2$$

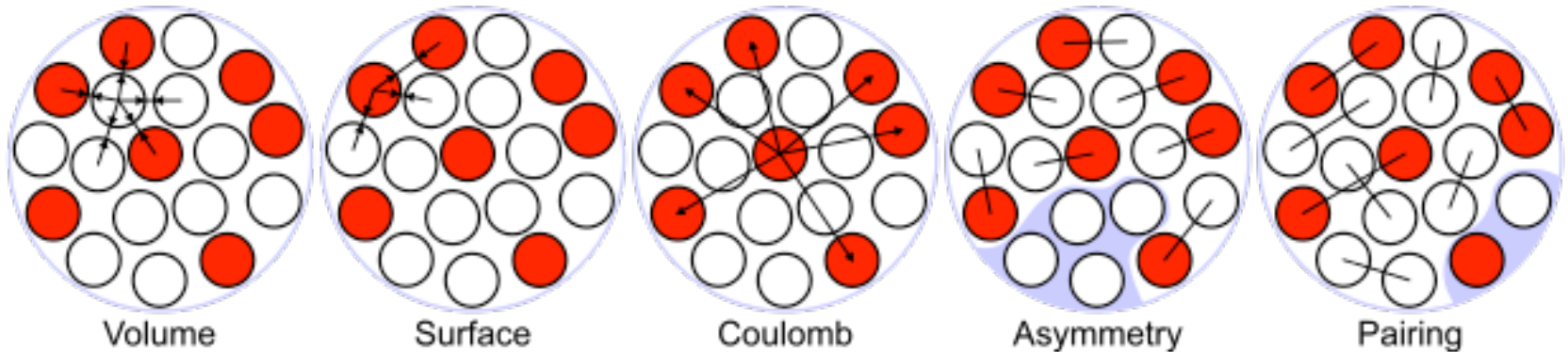
1947 г. С.Пауэлл. Открытие заряженных пионов.

$$Q_\pi = \pm q_e; \quad m_\pi = 140 \text{ МэВ} \quad J=0$$

Модель жидкой капли

1935 г Формула Бете-Вайцзеккера

$$B(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A} + \zeta A^{-3/4}$$



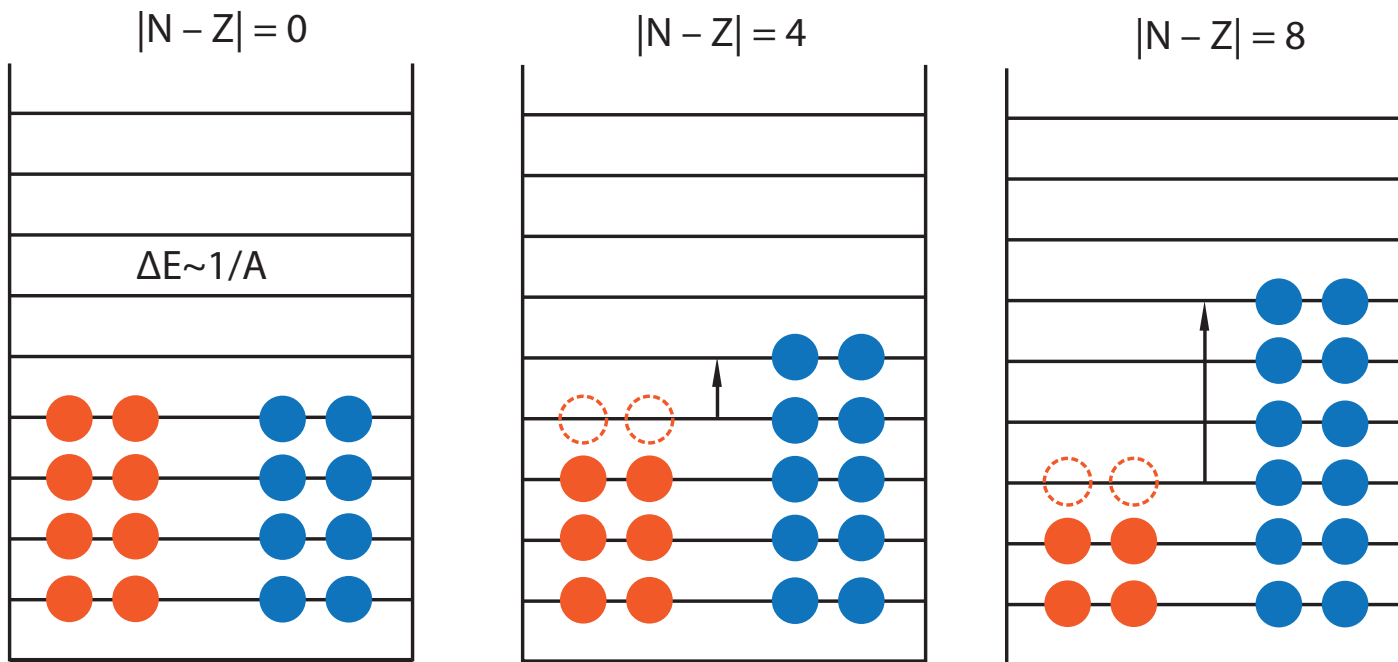
$$\alpha = 15.56 \text{ MeV}$$

$$\gamma = 0.7 \text{ MeV}$$

$$\beta = 17.23 \text{ MeV}$$

$$\delta = 23.285 \text{ MeV}$$

Модель жидкой капли. Энергия симметрии.



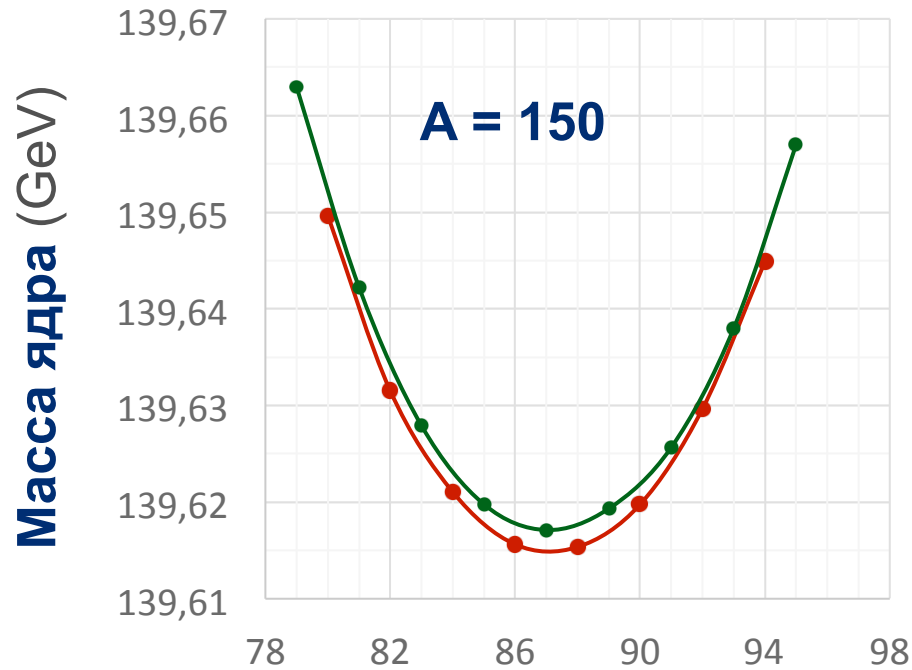
$$E = 2\Delta E + 2 \cdot 3\Delta E + e^x = 2\Delta E(1 + 3 + 5 + \dots + 2n - 1),$$

$$n = \frac{N-Z}{4} \text{ - число пар}$$

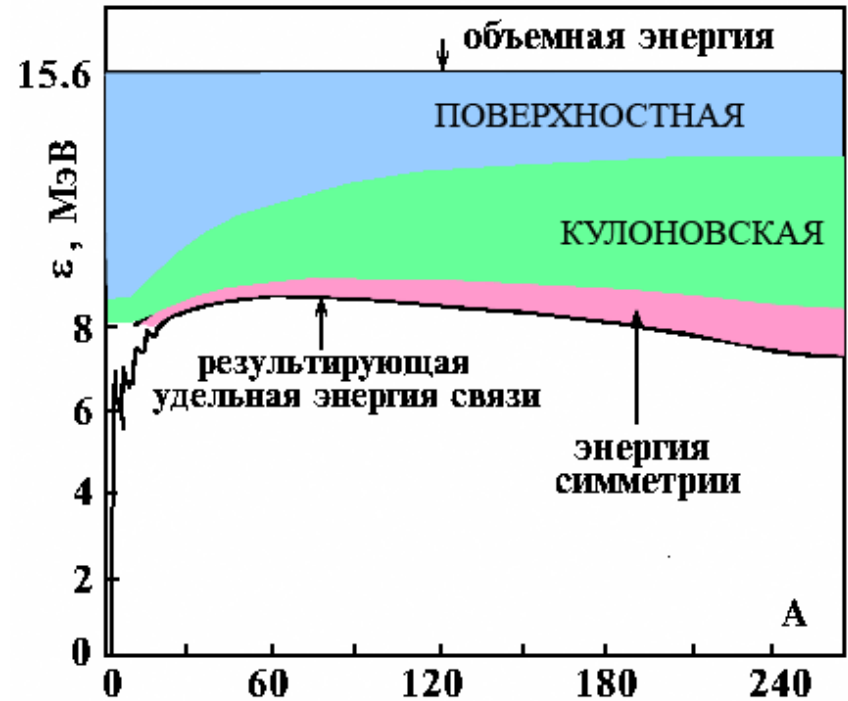
$$E = 2\Delta E n^2 \sim \frac{(N-Z)^2}{A}$$

Модель жидкой капли

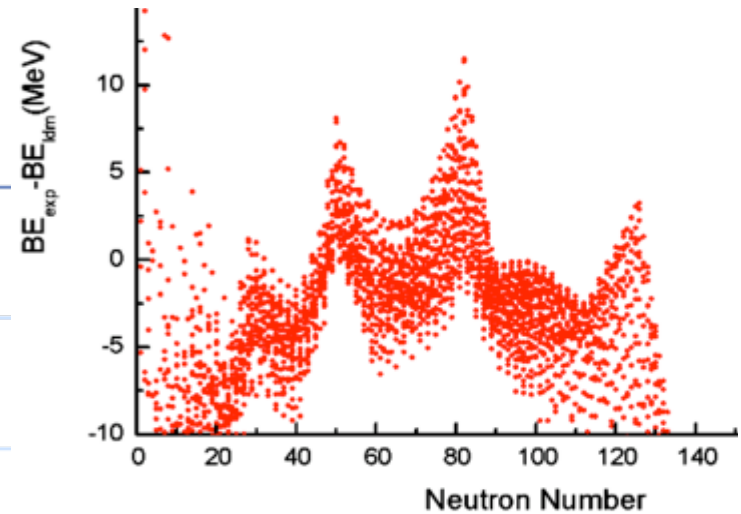
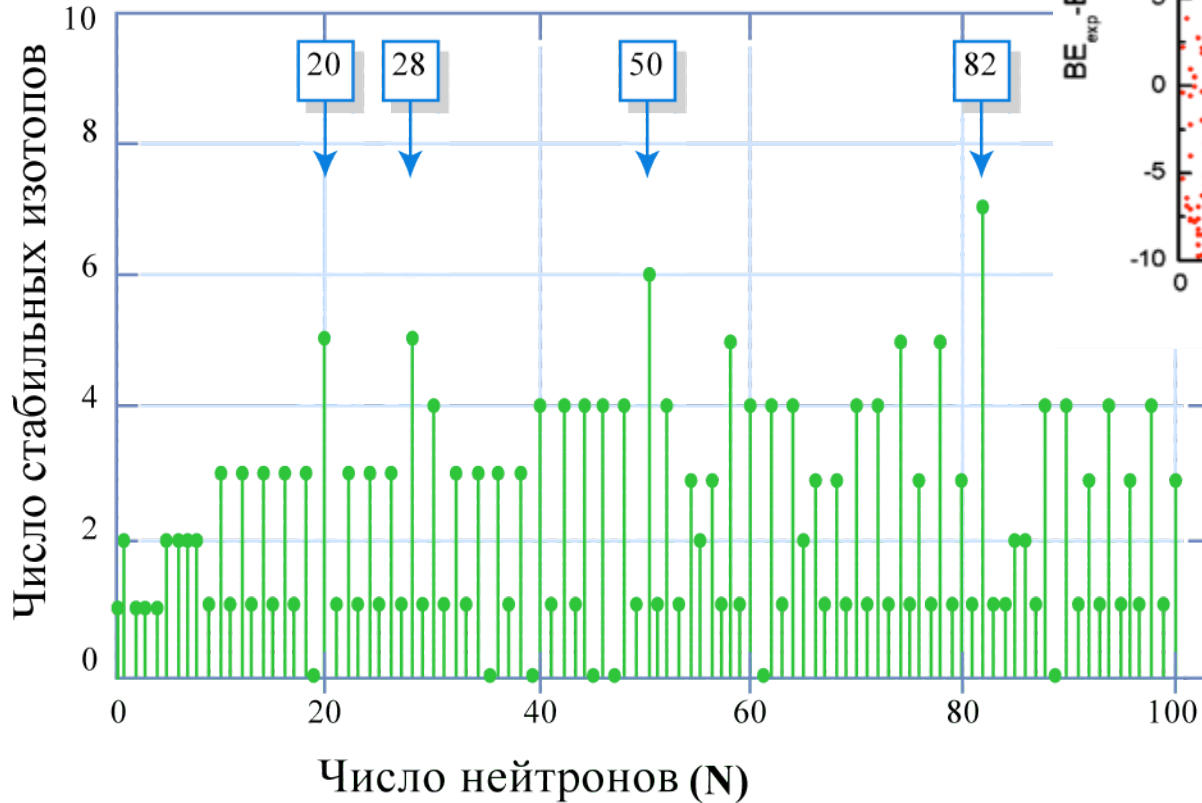
Парная энергия



$$\zeta = \begin{cases} 34 \text{ MeV} & \bullet \text{ even- even} \\ 0 & \bullet \text{ odd- odd} \\ -34 \text{ MeV} & \bullet \text{ even- odd} \\ & \bullet \text{ odd- even} \end{cases}$$



Распространенность ИЗОТОПОВ



Магические числа

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Спин ядра J

Атомное ядро в каждом состоянии характеризуется **полным моментом количества движения J** . Этот момент в системе покоя ядра называется **спином ядра**.

$$\vec{J} = \sum_A \vec{s}_i + \sum_A \vec{l}_i = \sum_A \vec{j}_i$$

Чётно-чётные ядра в основном состоянии имеют $J = 0$. Это указывает на взаимную компенсацию моментов нуклонов в основном состоянии ядра – особое свойство межнуклонного взаимодействия – спаривание тождественных нуклонов.

Четность ядра P

Четность ядра P как системы нуклонов определяется произведением четностей отдельных нуклонов p_i

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdots p_A$$

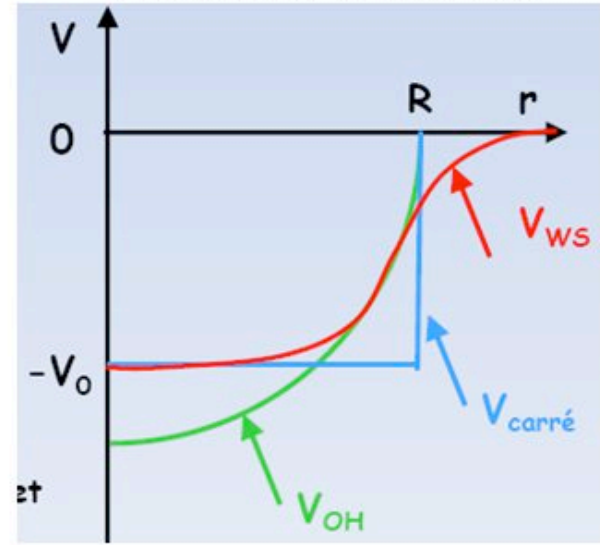
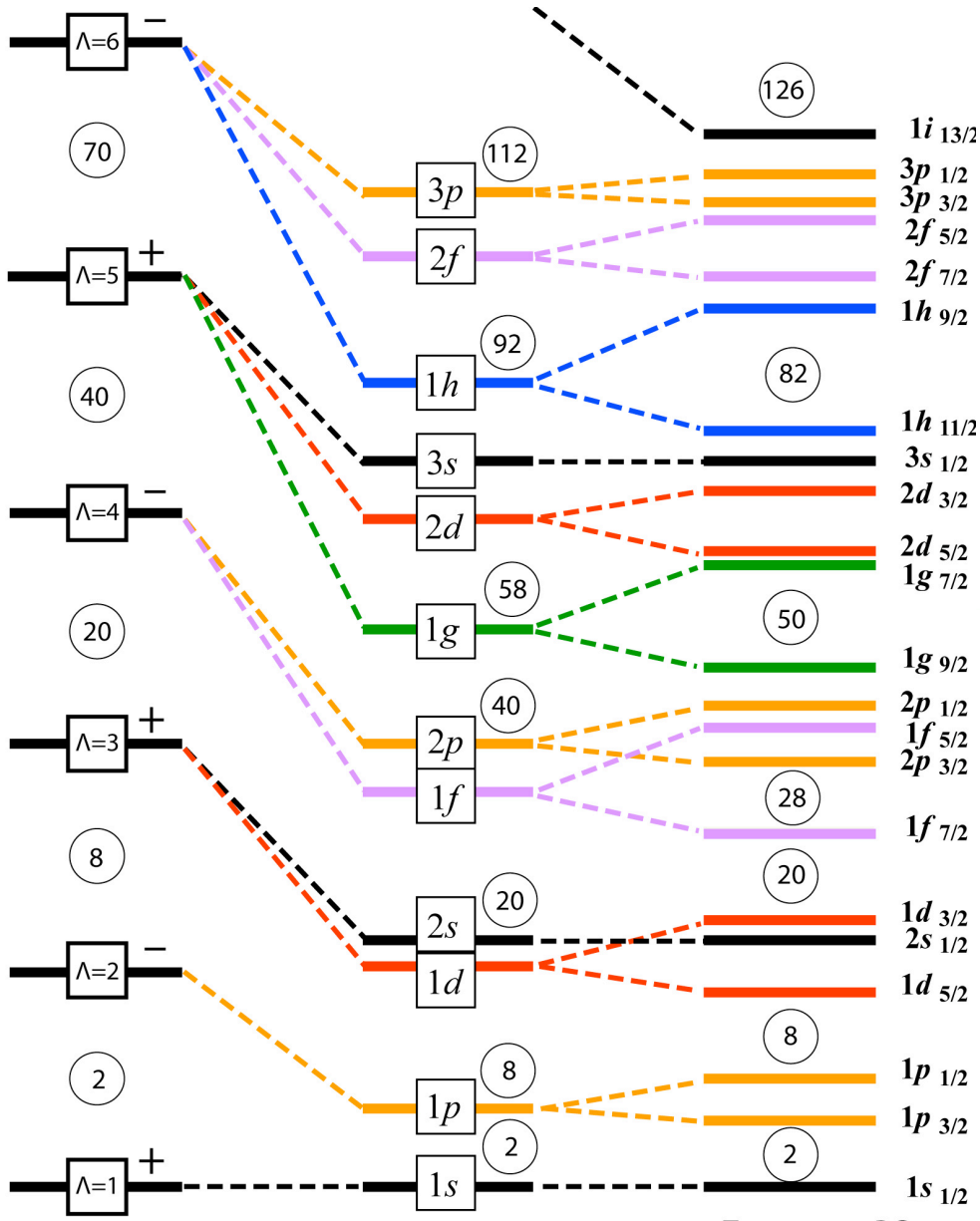
$$p_i = \pi_i p_i = \pi_i \cdot (-1)^{l_i}$$

Внутренняя четность нуклона $\pi_i = +1$.

Четность сферически симметричного ядра определяется произведением орбитальных четностей нуклонов

$$P = (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} \dots (-1)^{l_A} = (-1)^{\sum l_i}$$

Одночастичная модель оболочек



Прямоугольная яма

$$V = \begin{cases} -V_0, & r < R \\ 0, & r > R \end{cases}$$

Осцилляторный потенциал

$$V = -V_0 + \frac{1}{2} m \omega^2 r^2$$

Потенциал Вудса-Саксона

$$V = -\frac{V_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

Магнитный момент ядра

Величина магнитного дипольного момента ядра μ определяет его энергию E взаимодействия с магнитным полем H .

Магнитный дипольный момент ядра имеет орбитальную и спиновую компоненты

$$\vec{\mu}_я = \mu_0 \sum_{i=1}^A (g_l^i \vec{l}_i + g_s^i \vec{s}_i)$$

Магнитный момент протона

$$\mu_p = +2,79\mu_0$$

Магнитный момент нейтрона

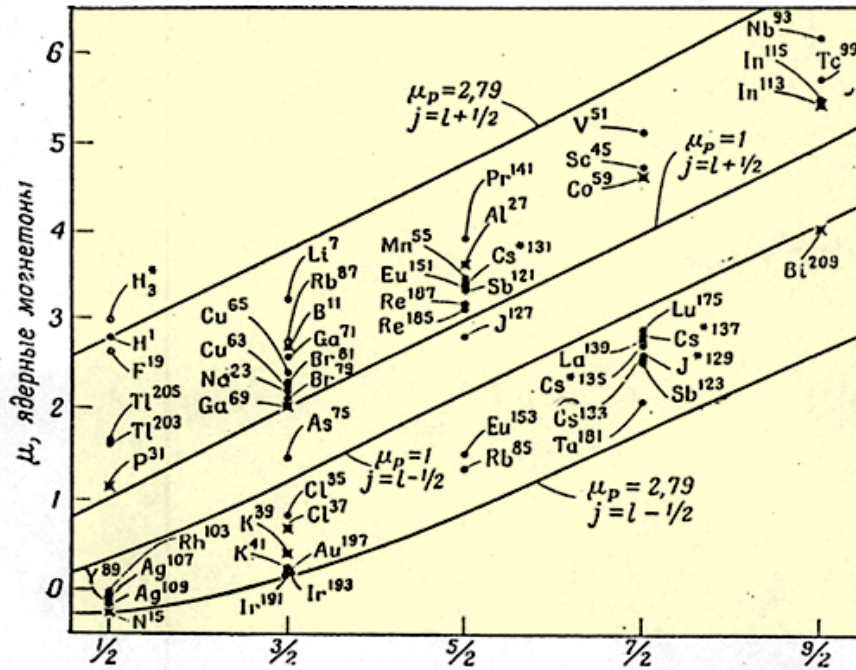
$$\mu_n = -1,91\mu_0$$

$$\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 3.15 \cdot 10^{-18} \frac{\text{МэВ}}{\text{Гаусс}}$$

Магнитный момент ядра

$$\vec{\mu} = \left(\sum_A g_l \vec{l}_i + \sum_A g_s \vec{s}_i \right) \mu_0 \quad g_l = \begin{cases} 1 & p \\ 0 & n \end{cases} \quad g_s = \begin{cases} 2 \cdot (2,79) & p \\ 2 \cdot (-1,91) & n \end{cases}$$

Магнитные моменты ядер



Магнитный момент ядра

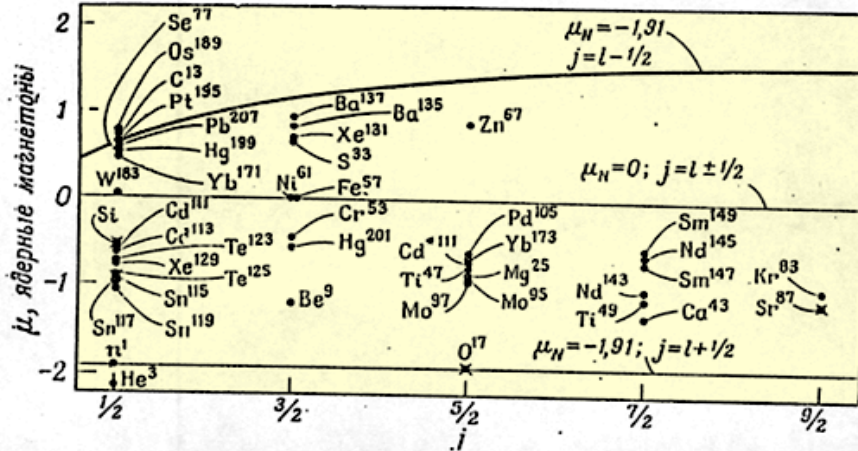
$$\mu = gJ\mu_{\text{Я}}$$

J – спин ядра

Гиромагнитный множитель нуклона

$$g_j = g_l \pm \frac{g_s - g_l}{2l + 1}$$

$$j = l \pm 1/2$$



В одночастичной модели ядра магнитный момент нечётных ядер обусловлен магнитным моментом неспаренной нечётной частицы.

Изоспин атомных ядер

Изоспин системы A нуклонов

$$\vec{I} = \sum_{\alpha=1}^A \vec{I}_{\alpha} .$$

В ядре A нуклонов, каждый из которых имеет изоспин $I = \frac{1}{2}$.

Поэтому возможные значения изоспина

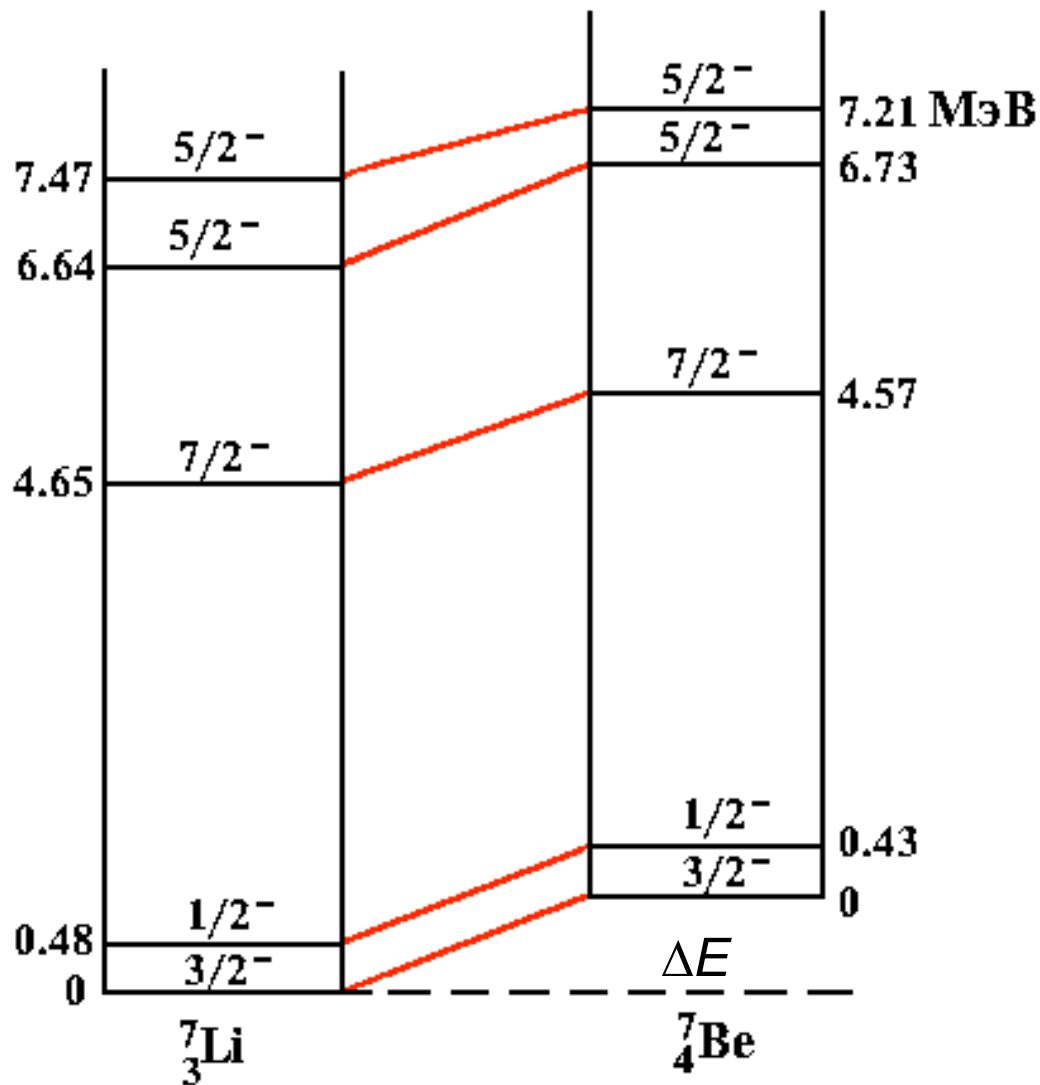
$$\left| \frac{Z - N}{2} \right| \leq I \leq \frac{A}{2} .$$

Все состояния ядра имеют проекцию изоспина $I_3 = \frac{Z - N}{2}$.

Изоспин ядра в основном состоянии I_{gs} имеет минимальное возможное значение

$$I_{gs} = |I_3| = \left| \frac{Z - N}{2} \right| .$$

Аналоговые состояния ядер ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$



Издублеты ($I = 1/2$) уровней ядер ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^7_4\text{Be}$

Возбужденные состояния

Оболочечная модель:
Состояния нуклонов в
потенциальной яме

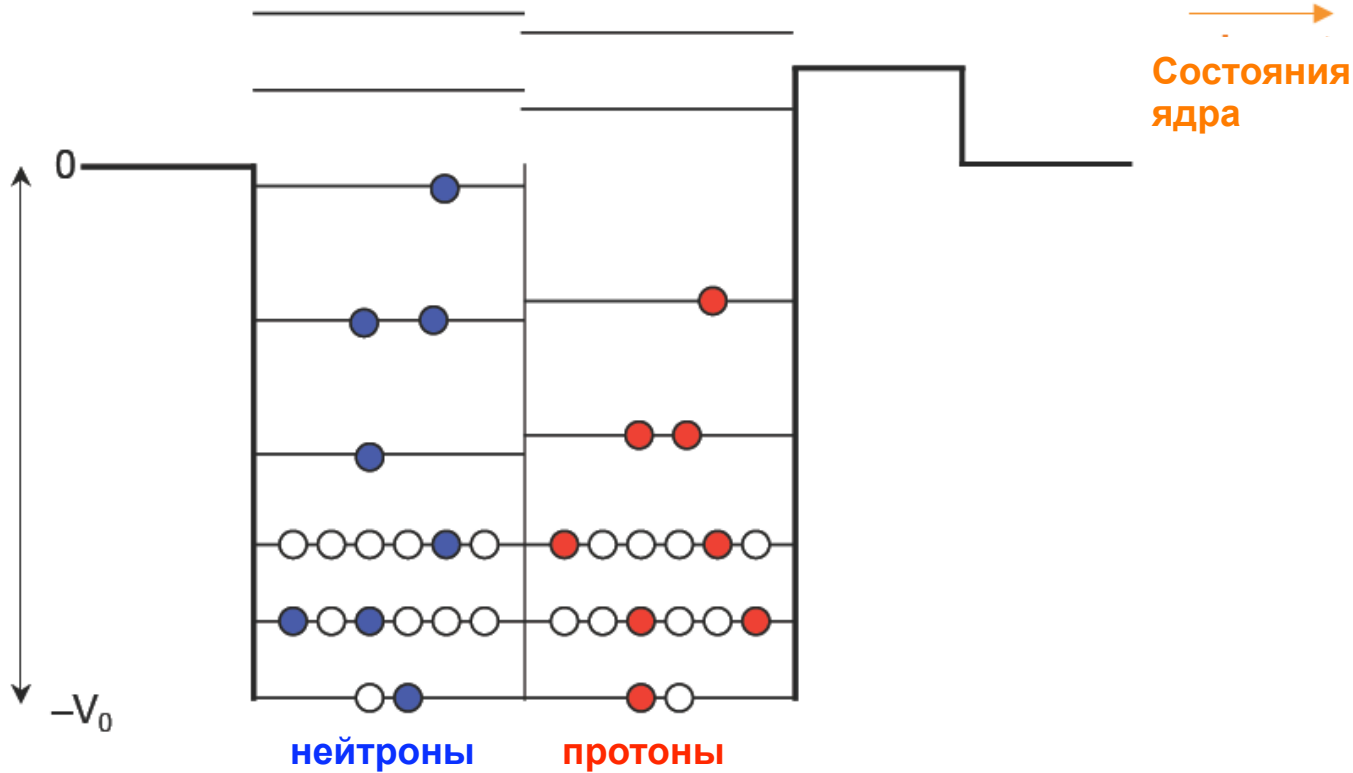
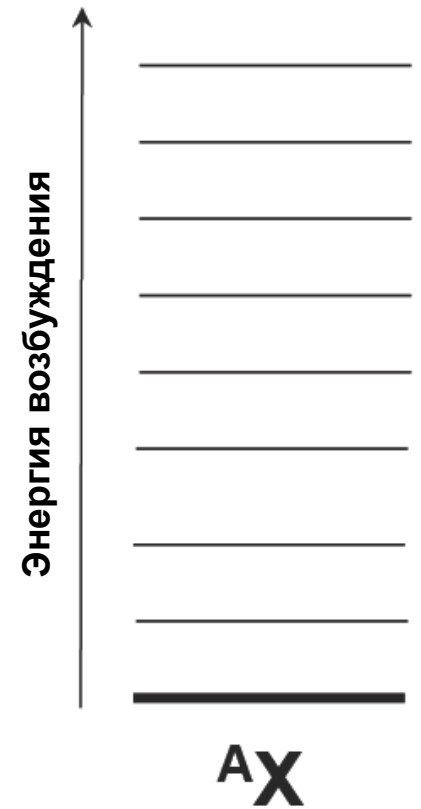
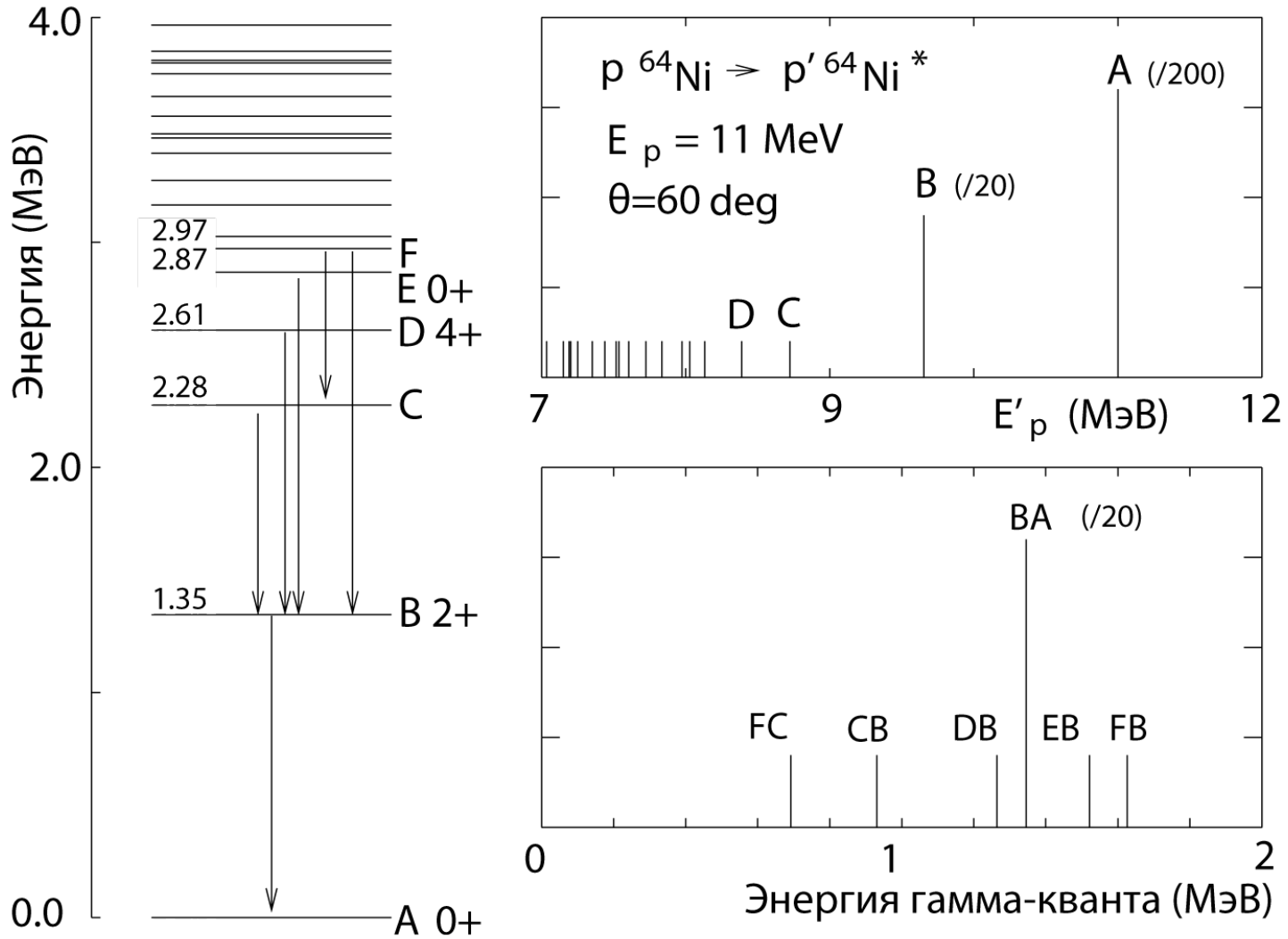


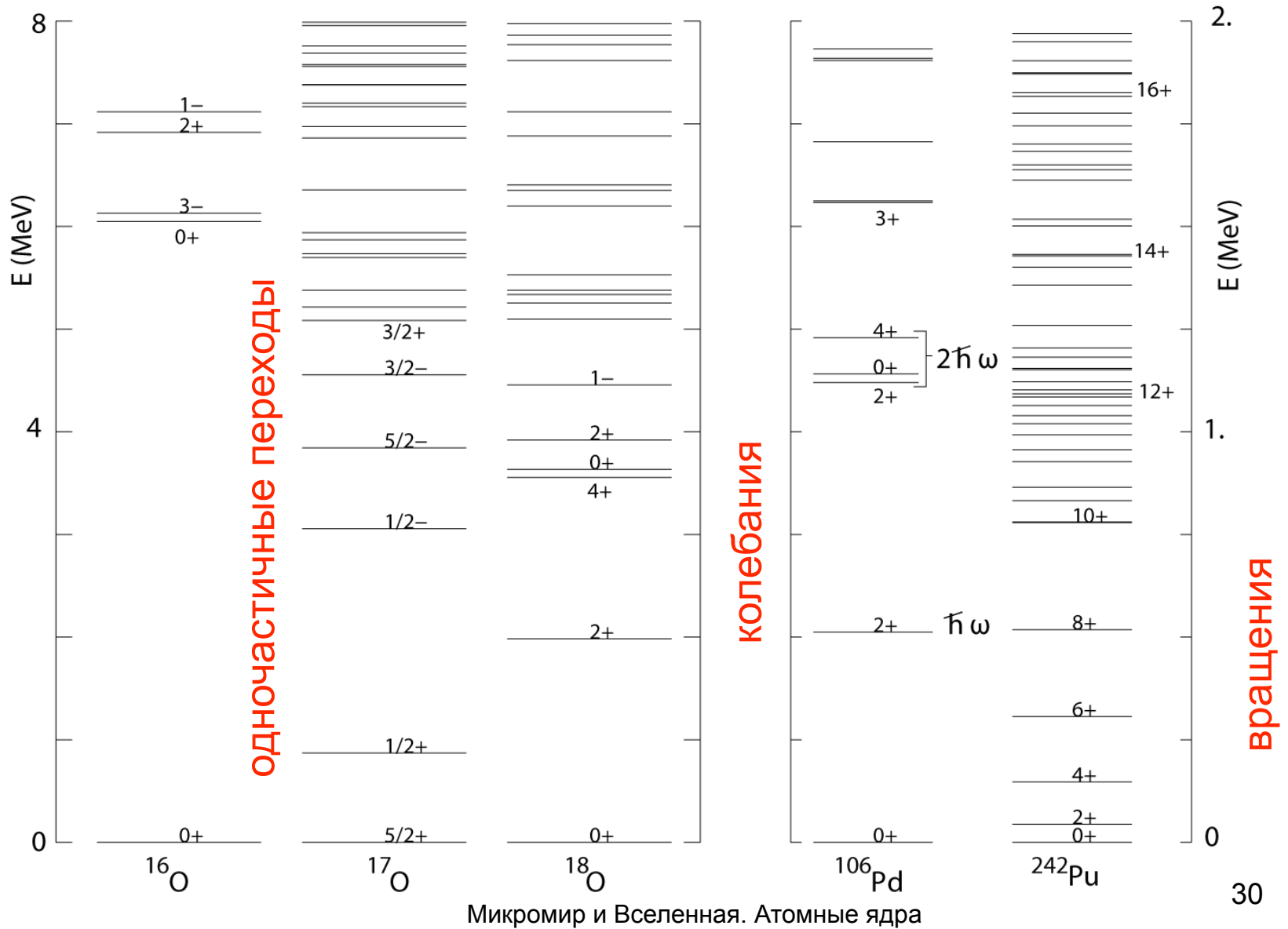
Схема уровней:
Возбужденные
состояния ядра



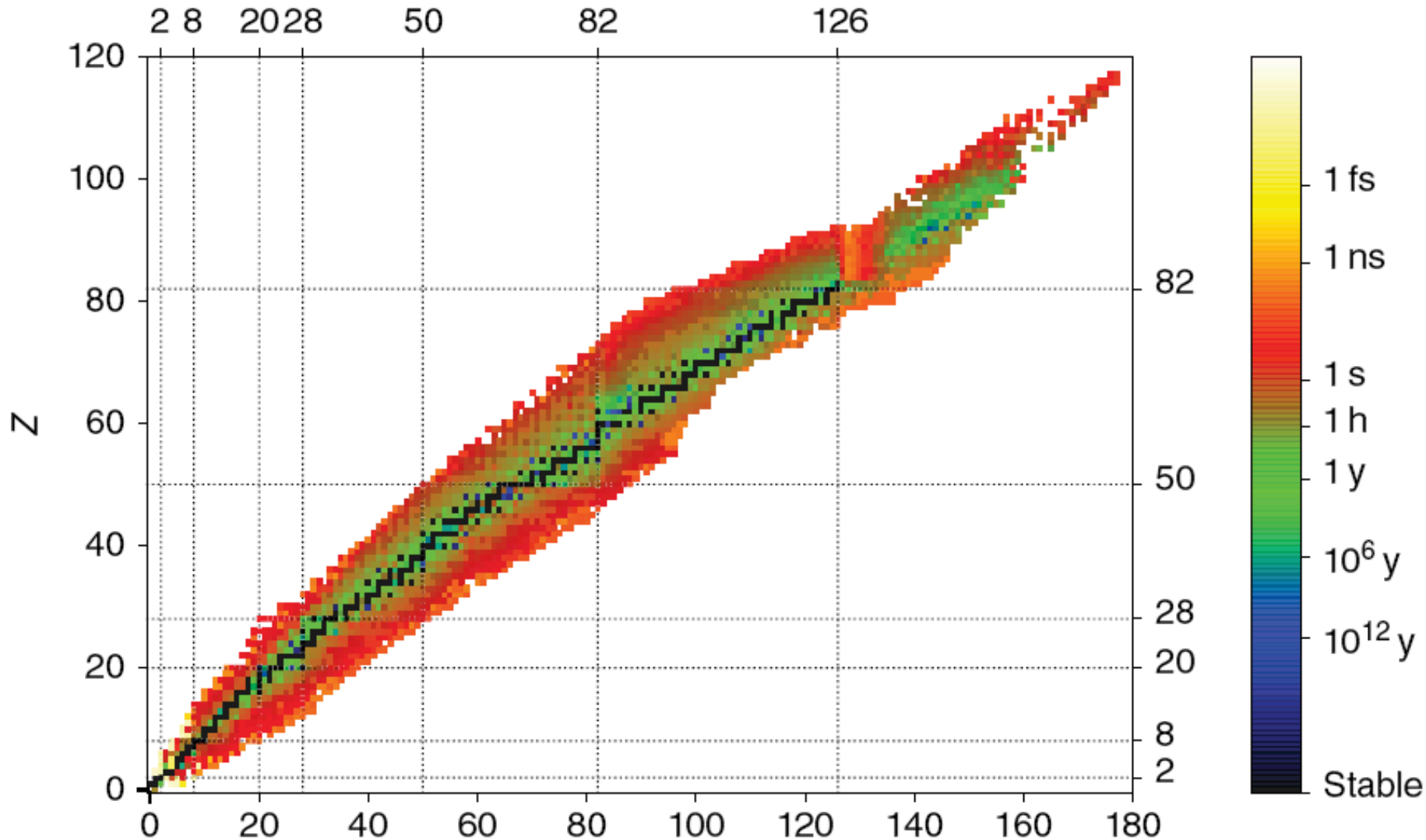
Возбужденные состояния



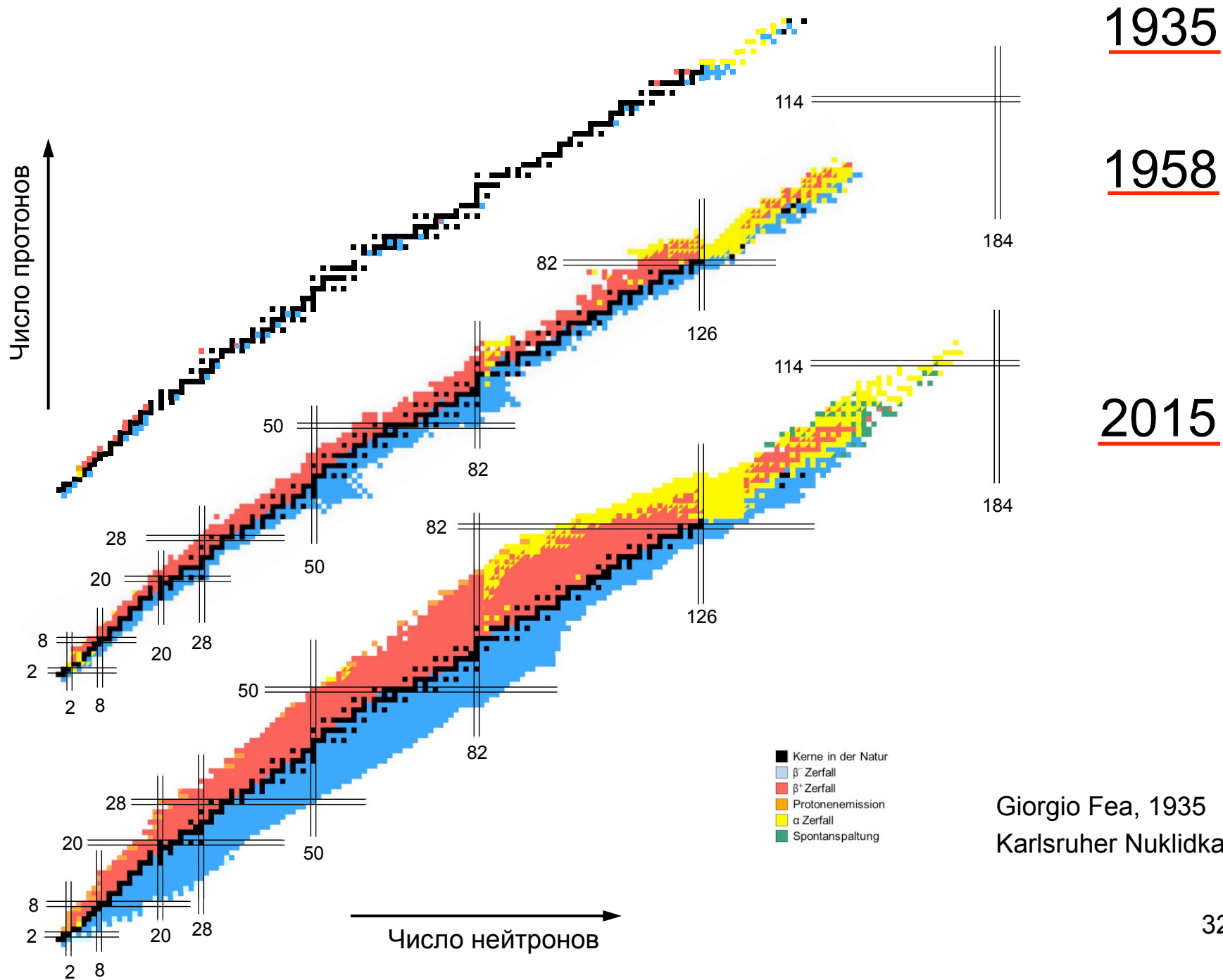
Возбужденные состояния



Период полураспада



Известно ~300 стабильных ядер N и ~3500 радиоактивных ядер.
Это только часть радиоактивных ядер. Всего их может быть ~7000.



Giorgio Fea, 1935
Karlsruher Nuklidkarte