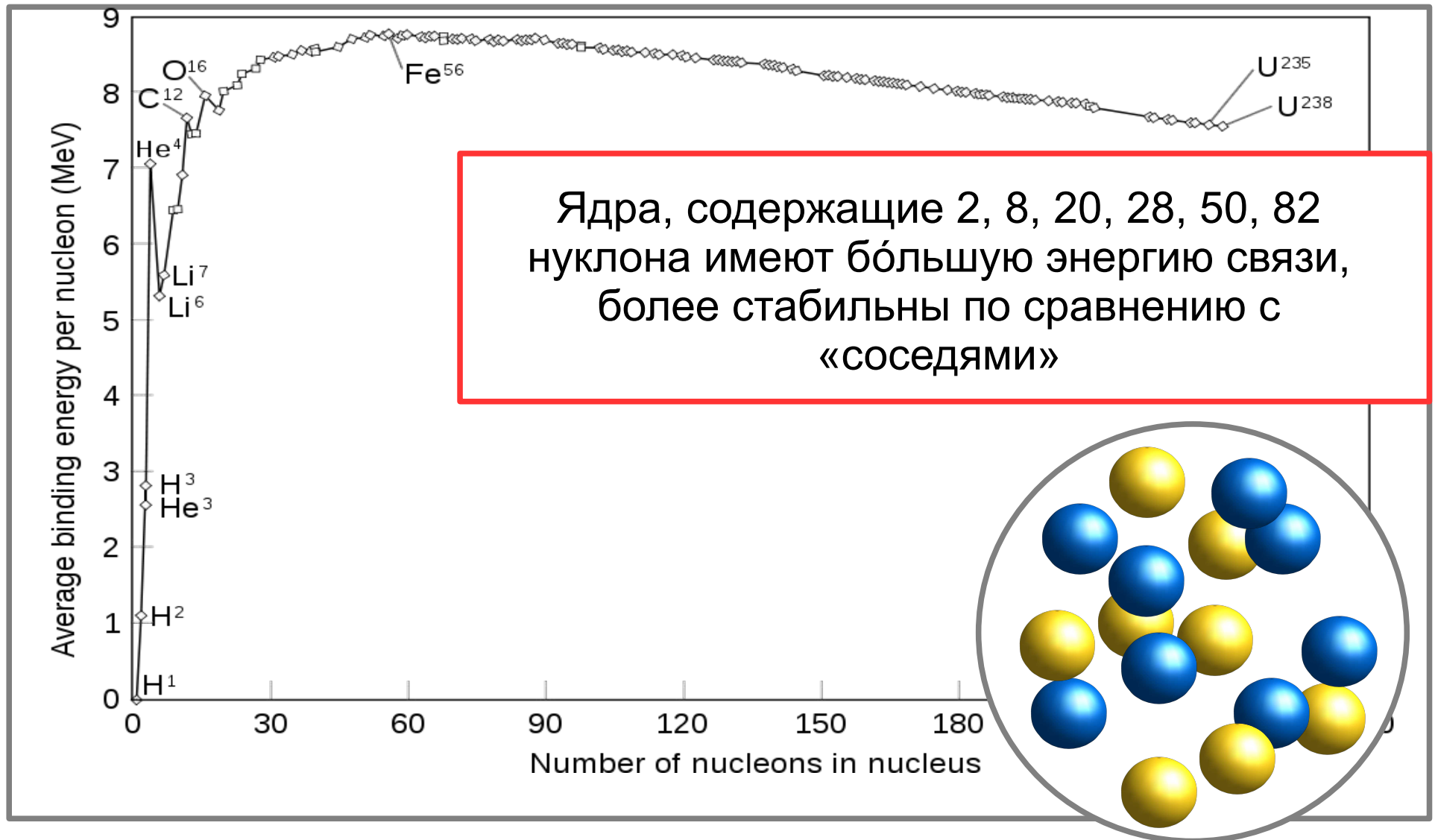


Лекция 11.

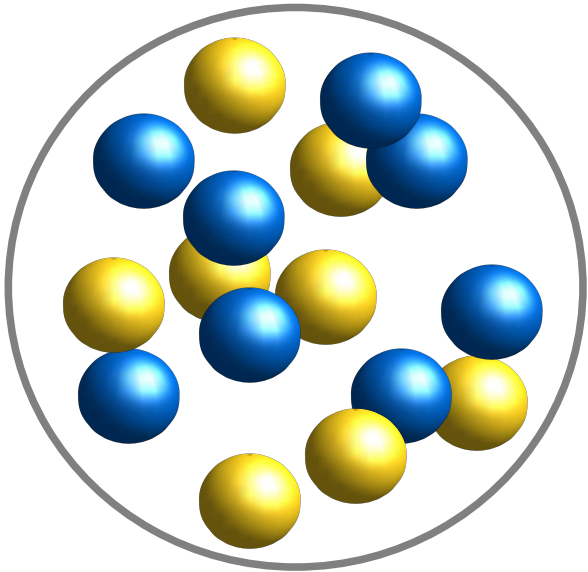
Оболочечная модель ядра.
Одночастичные и коллективные
возбуждения ядер.
Распады ядер.

Часть 1. Оболочечная модель

"Магические числа"



Оболочечная модель

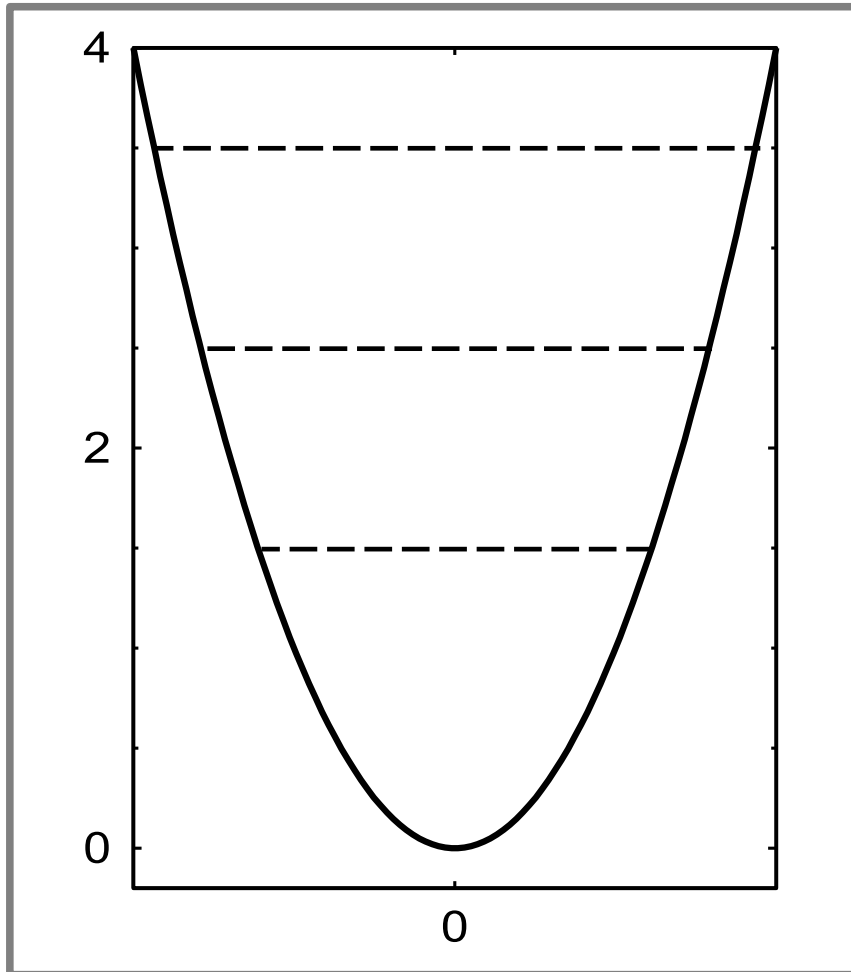


Майер, Енсен
(1963)



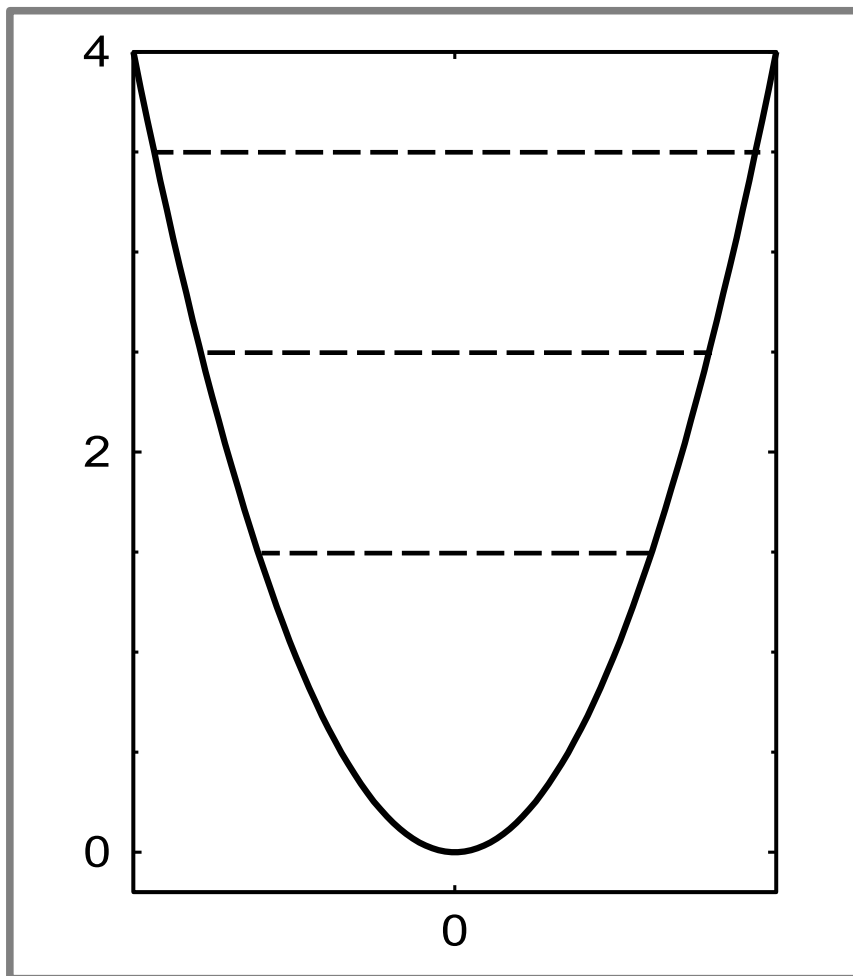
Один нуклон в “эффективном поле”
других нуклонов. Минимум
потенциальной энергии в центре.
Простейшая модель –
параболический потенциал

Трёхмерный осциллятор: декартовы координаты



$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{k r^2}{2}$$

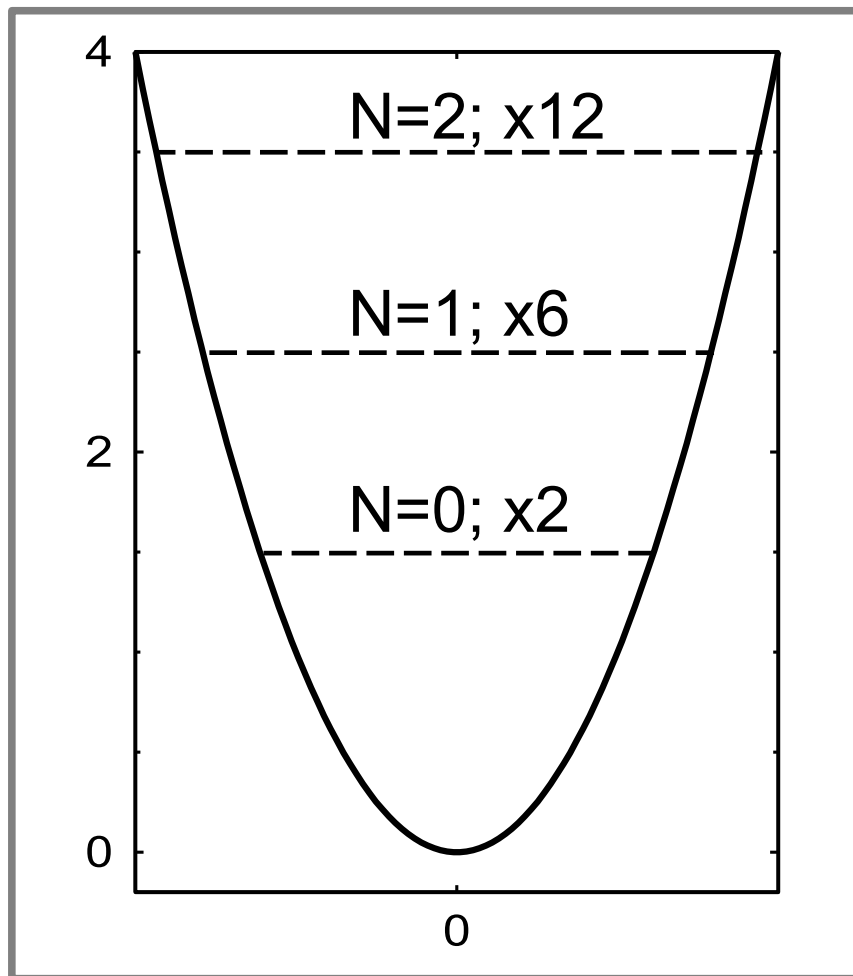
Трёхмерный осциллятор: декартовы координаты



$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{k r^2}{2}$$

$$E_n = \hbar \omega \left(N + \frac{3}{2} \right)$$
$$N = n_x + n_y + n_z$$

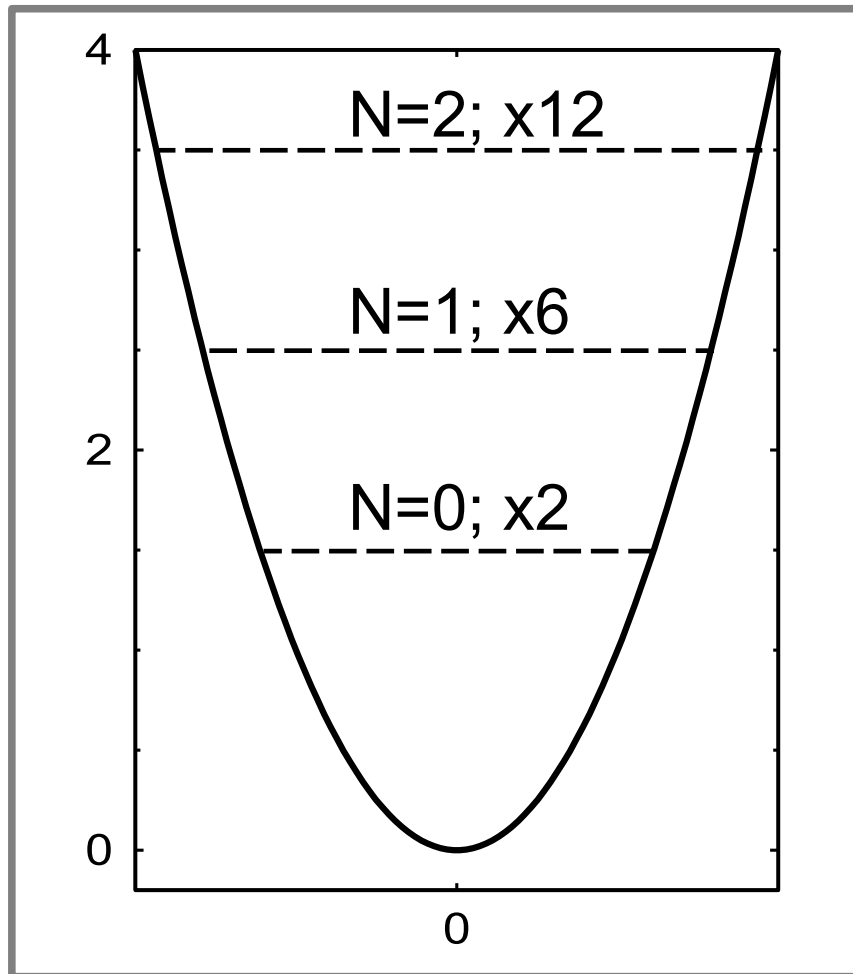
Трёхмерный осциллятор: декартовы координаты



$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{k r^2}{2}$$

$$E_n = \hbar \omega \left(N + \frac{3}{2} \right)$$
$$N = n_x + n_y + n_z$$

Трёхмерный осциллятор: декартовы координаты



$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{k r^2}{2}$$

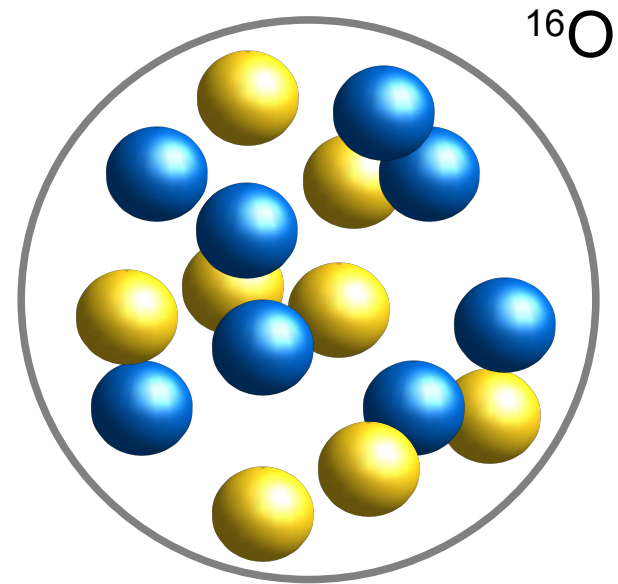
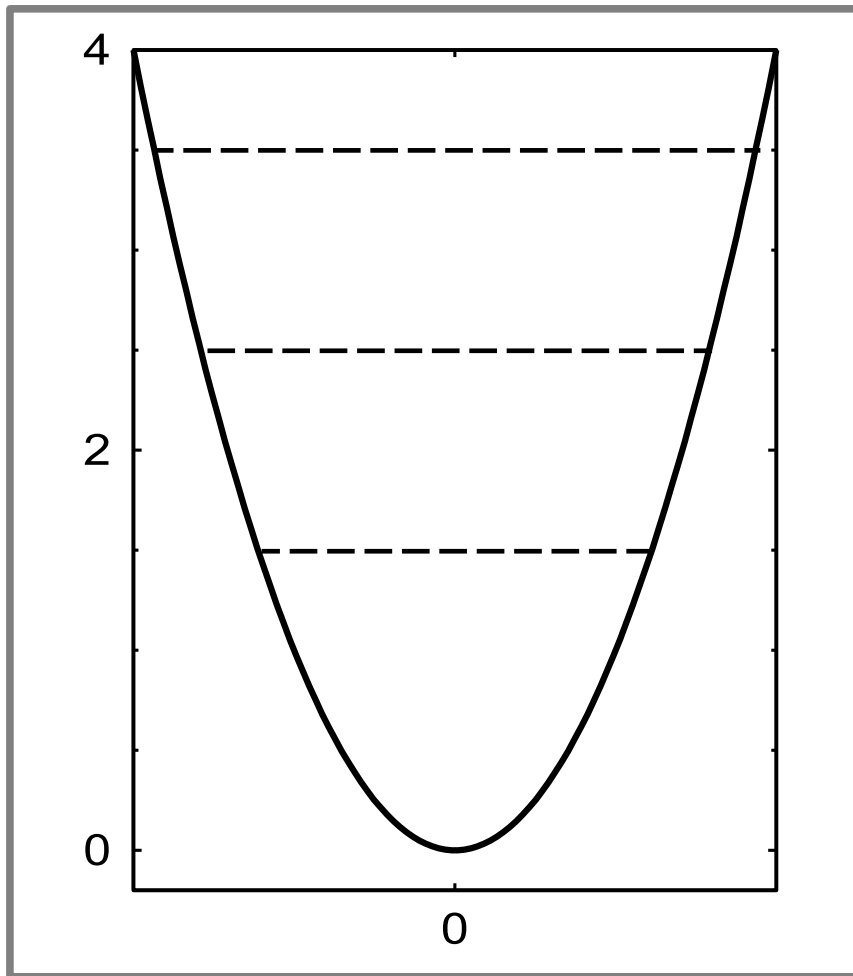
$$E_n = \hbar \omega \left(N + \frac{3}{2} \right)$$

$$N = n_x + n_y + n_z$$

с учётом спина кратность
вырождения $(N+1)(N+2)$

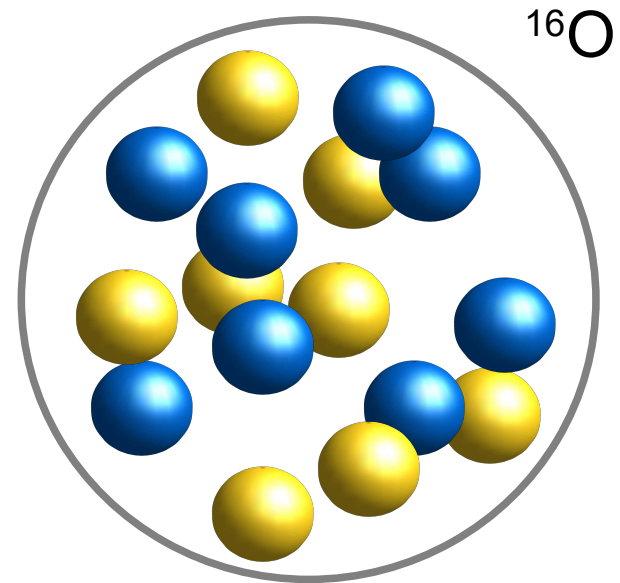
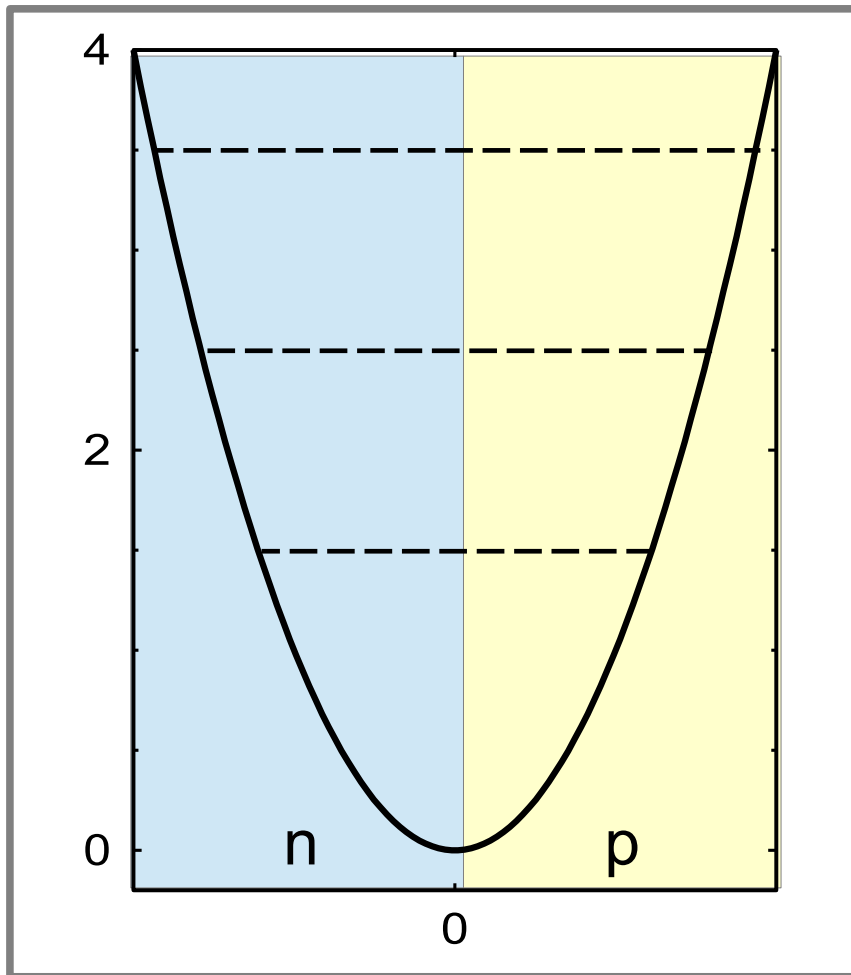
Заполнение состояний в оболочечной модели

МОДЕЛИ



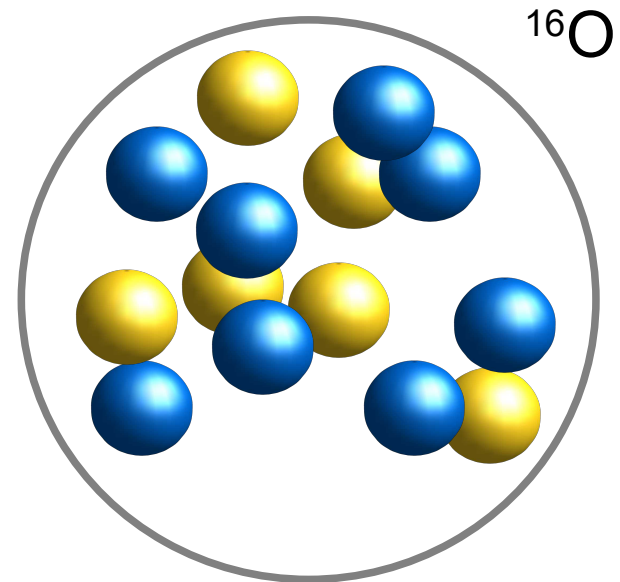
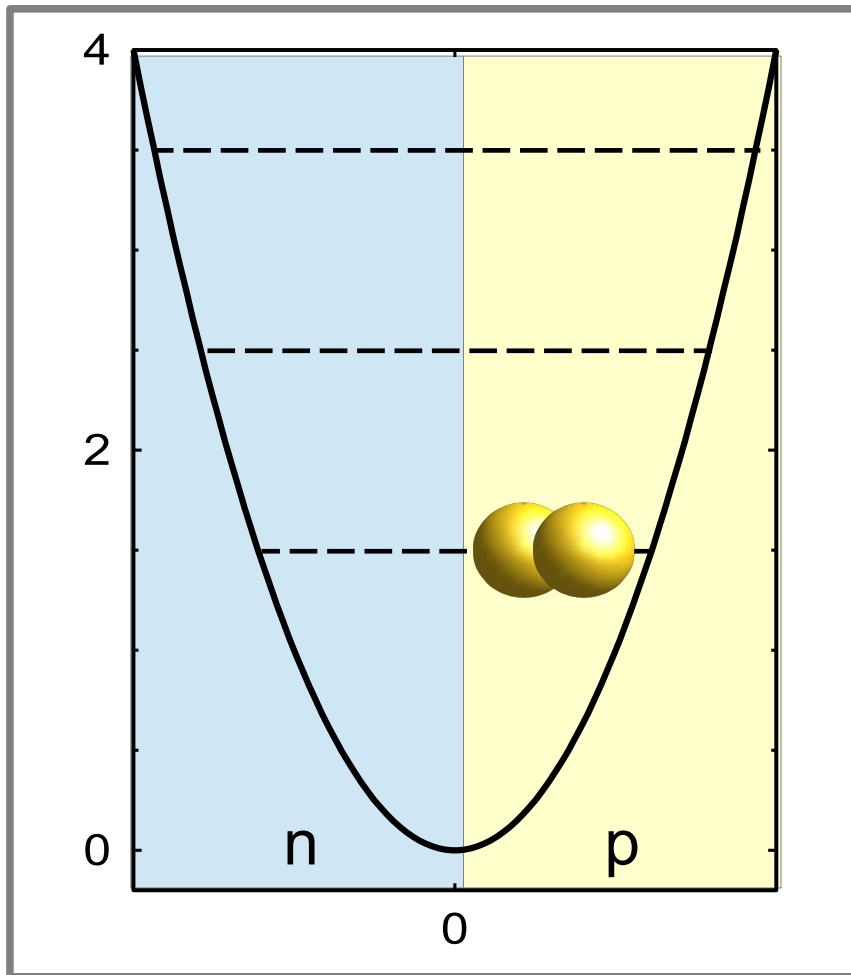
Заполнение состояний в оболочечной модели

МОДЕЛИ



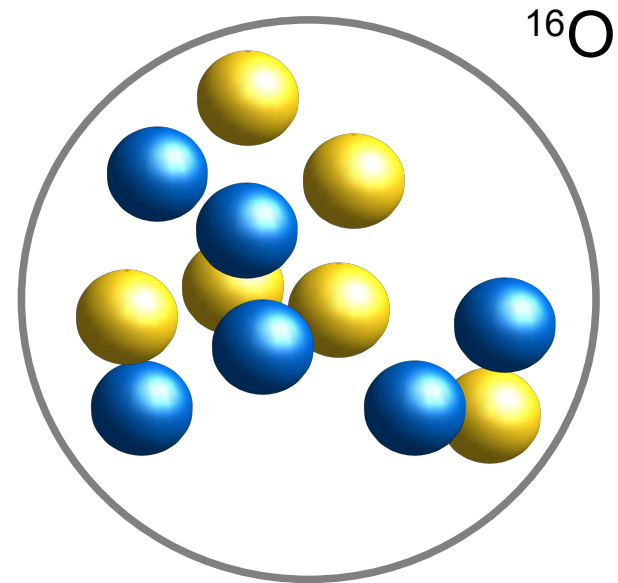
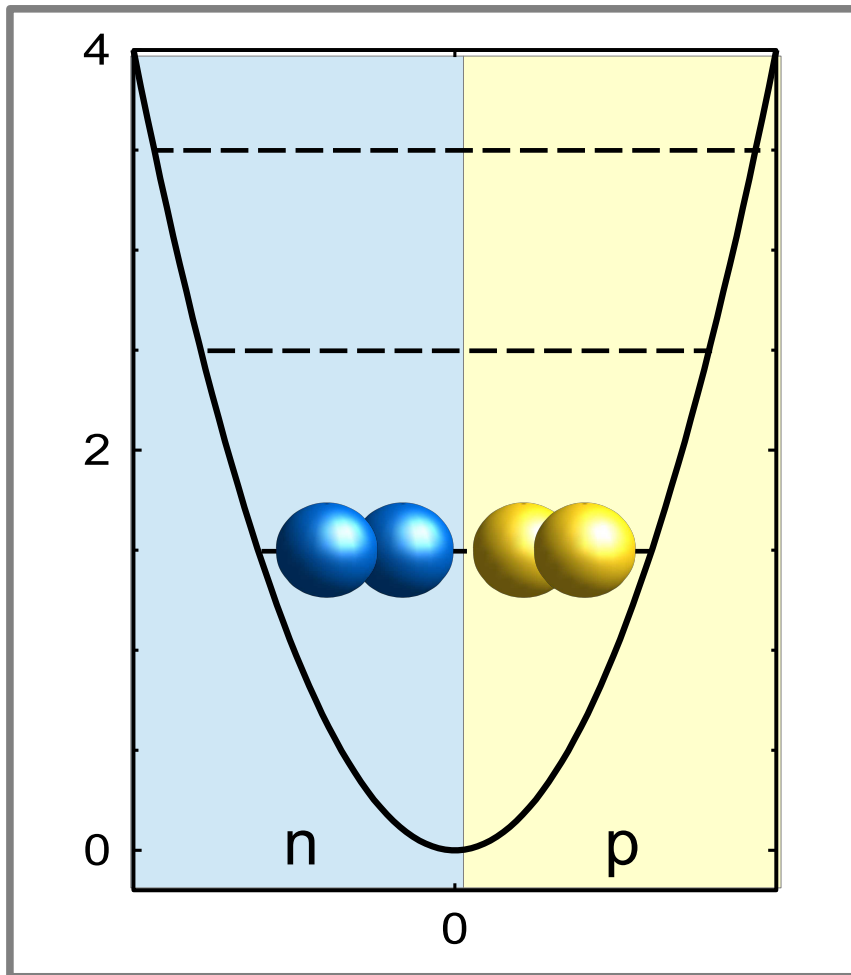
Заполнение состояний в оболочечной модели

МОДЕЛИ



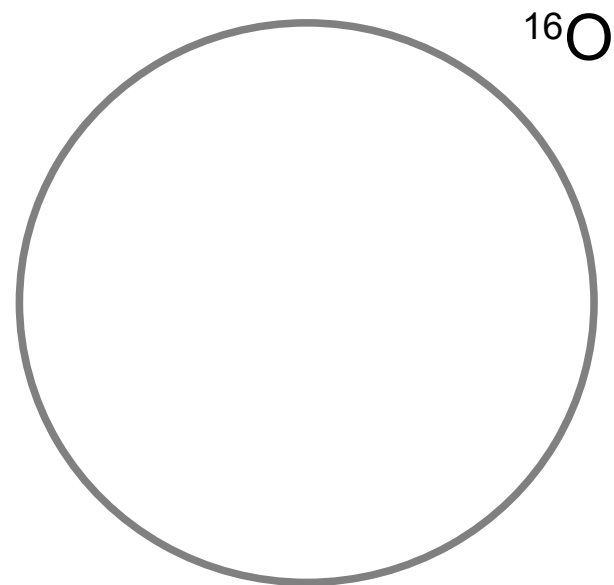
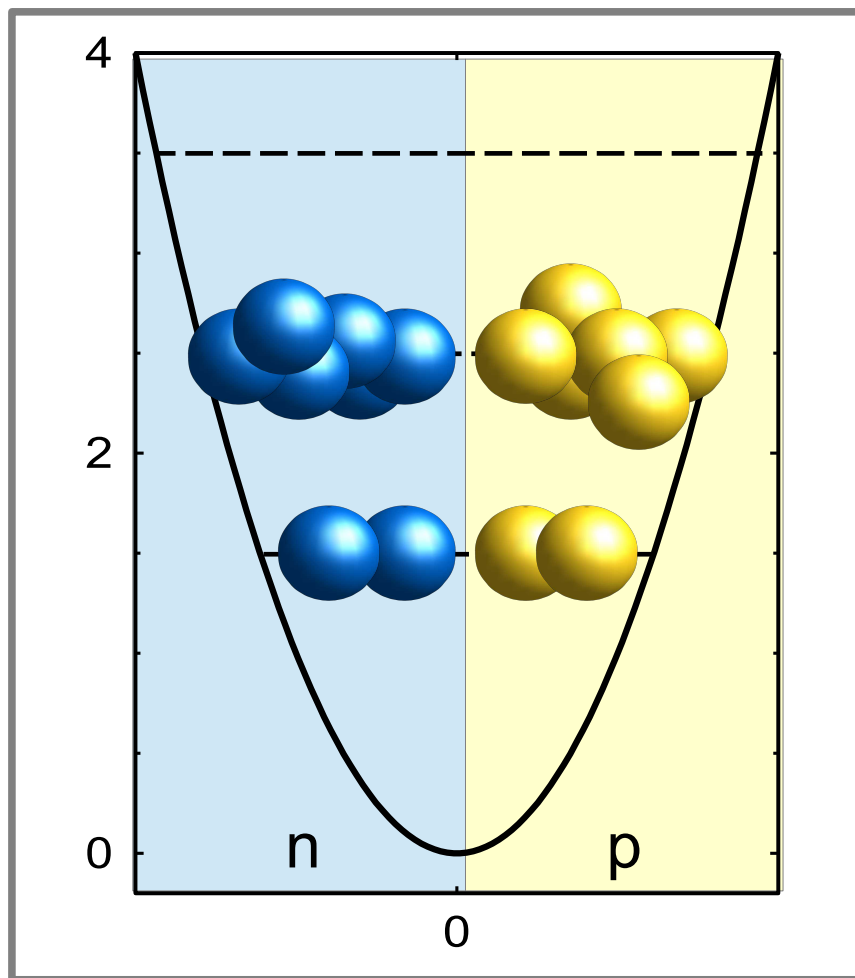
Заполнение состояний в оболочечной модели

МОДЕЛИ

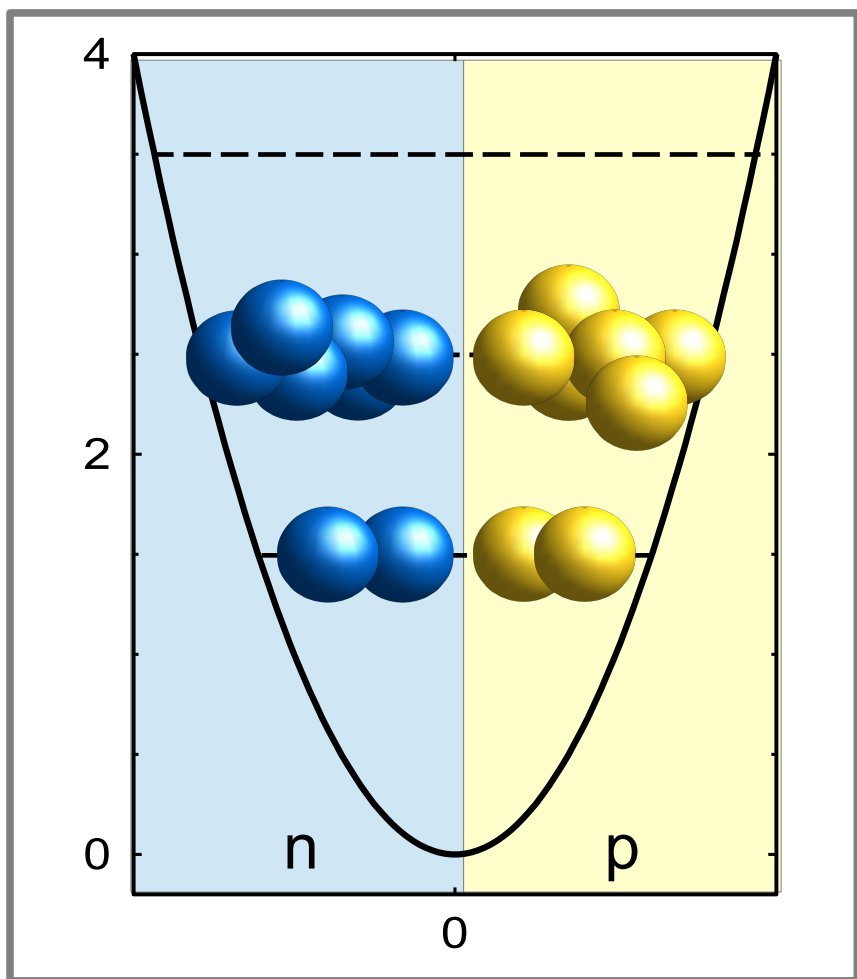


Заполнение состояний в оболочечной модели

МОДЕЛИ

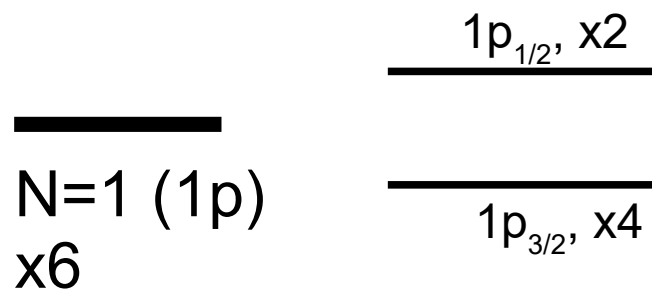


Заполнение состояний в оболочечной модели

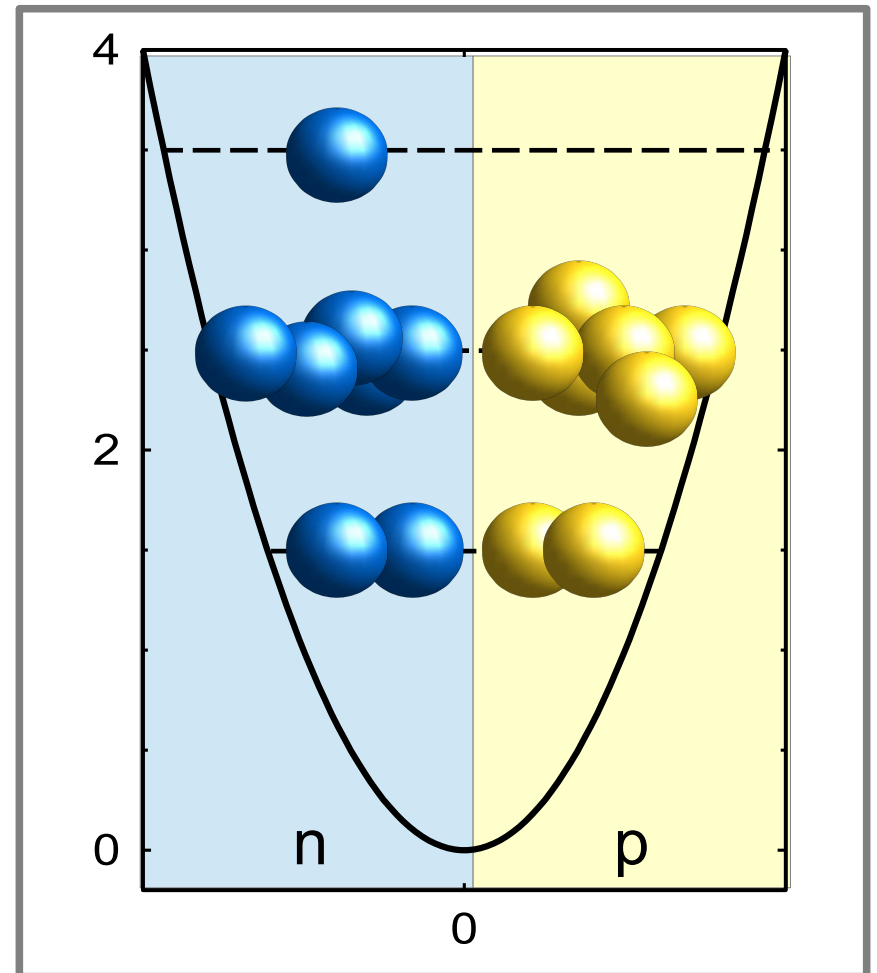
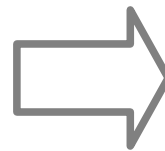
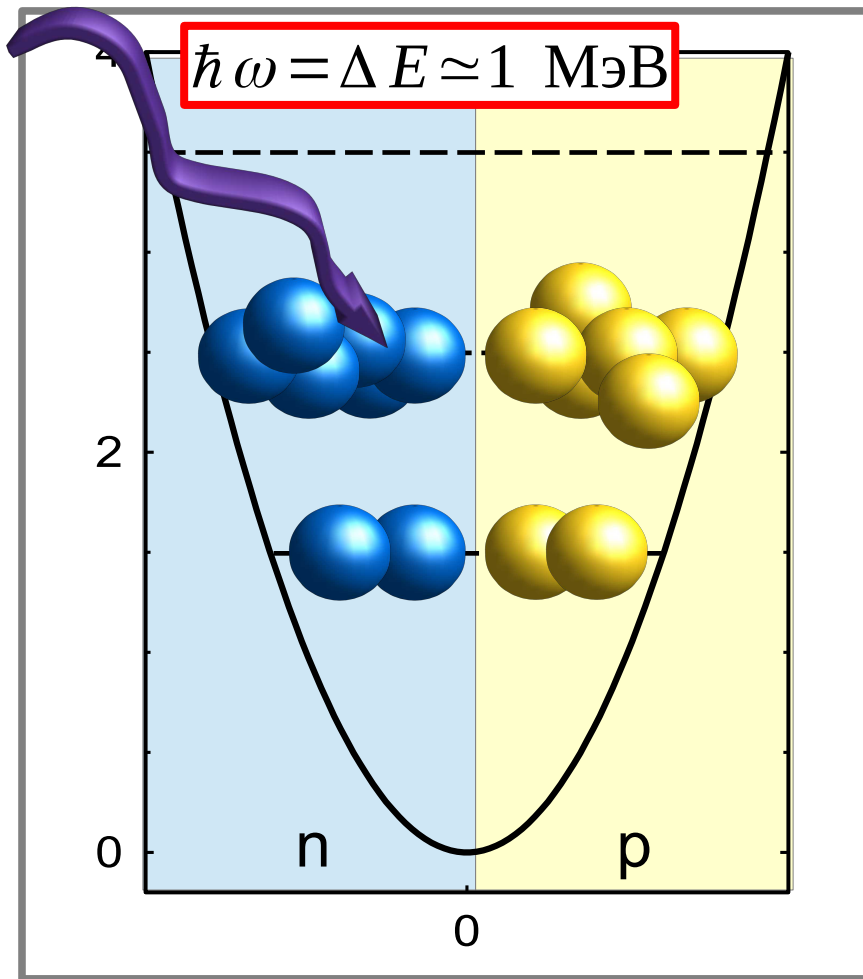


гелий-4, кислород-16, кальций-40: полное заполнение оболочек, максимум удельной энергии связи

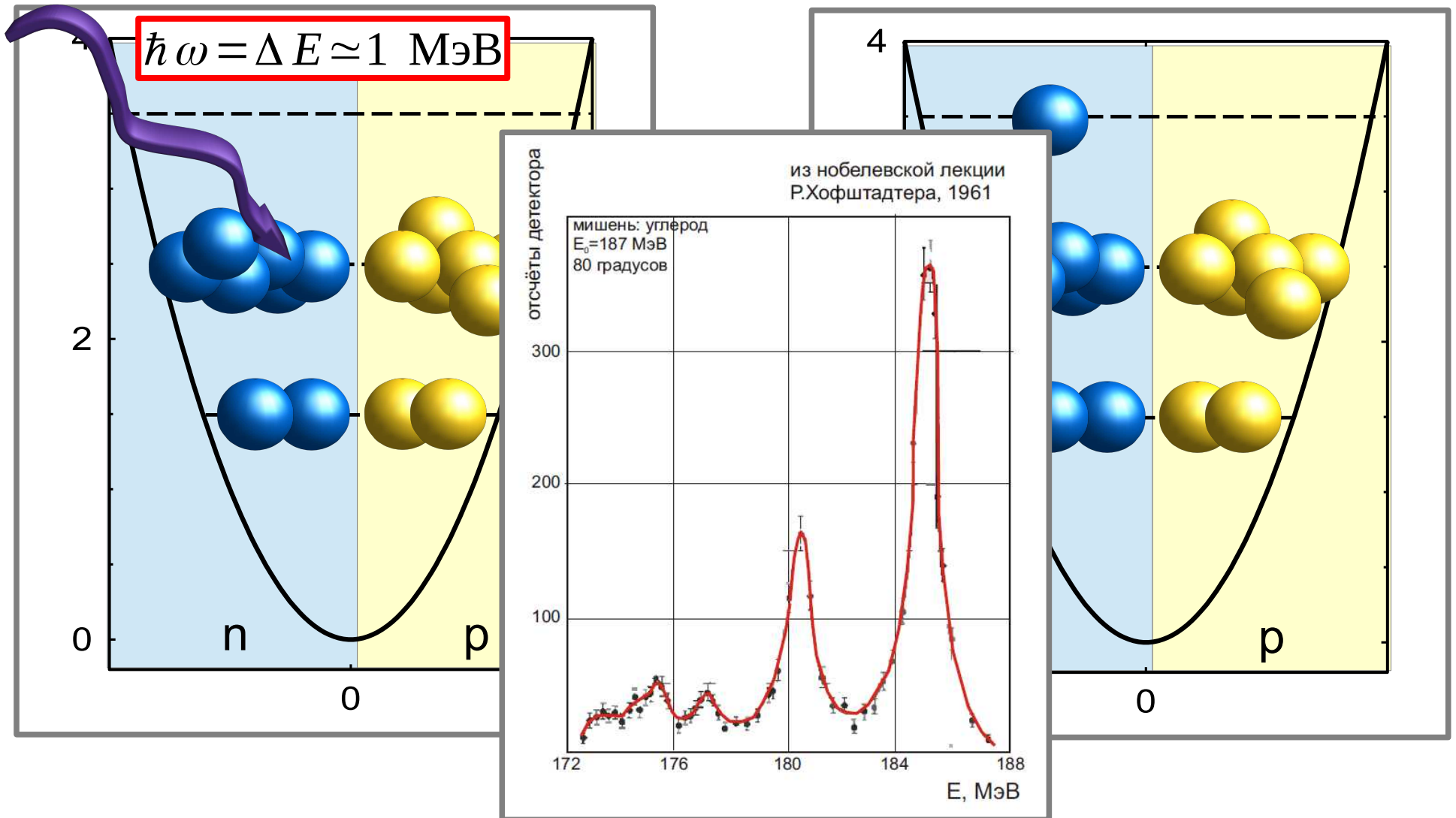
углерод-12? Проявление “тонкой структуры”:



Одночастичные возбужденные состояния ядра

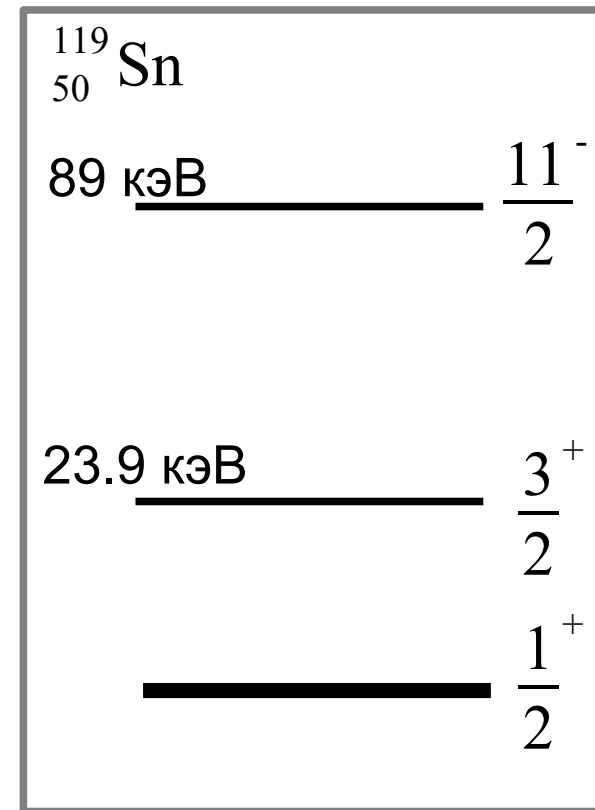
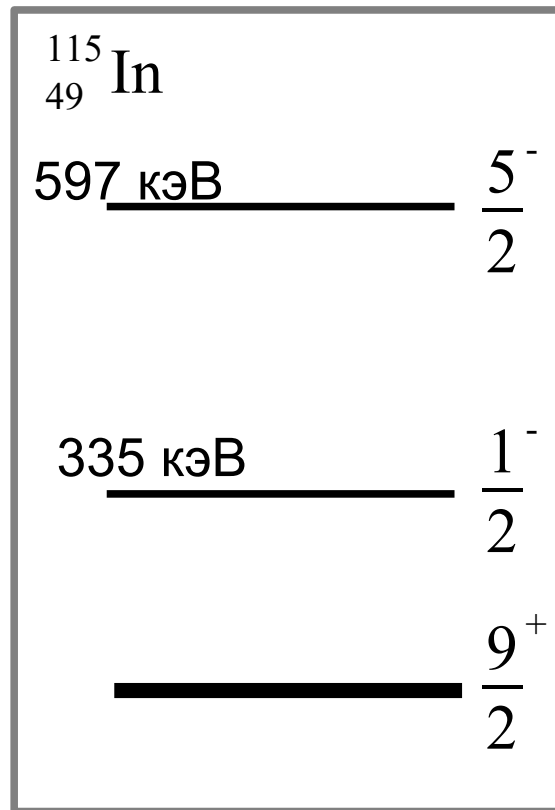
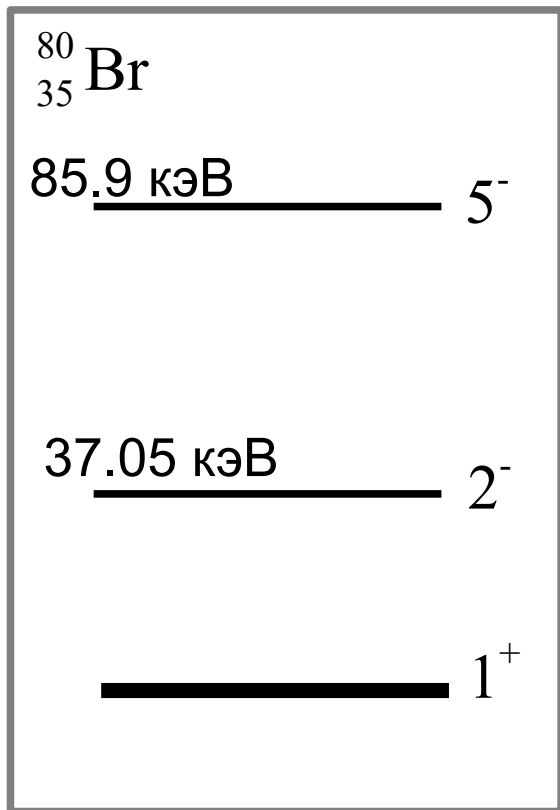


Одночастичные возбужденные состояния ядра

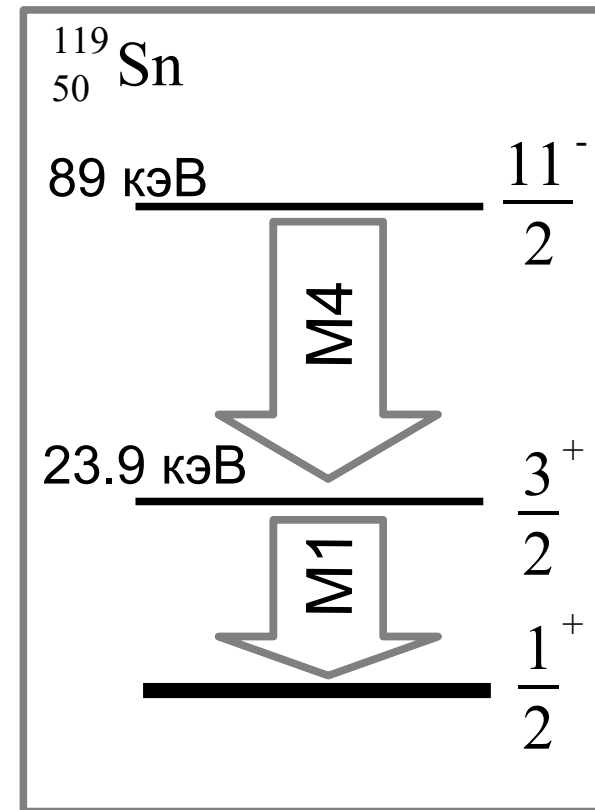
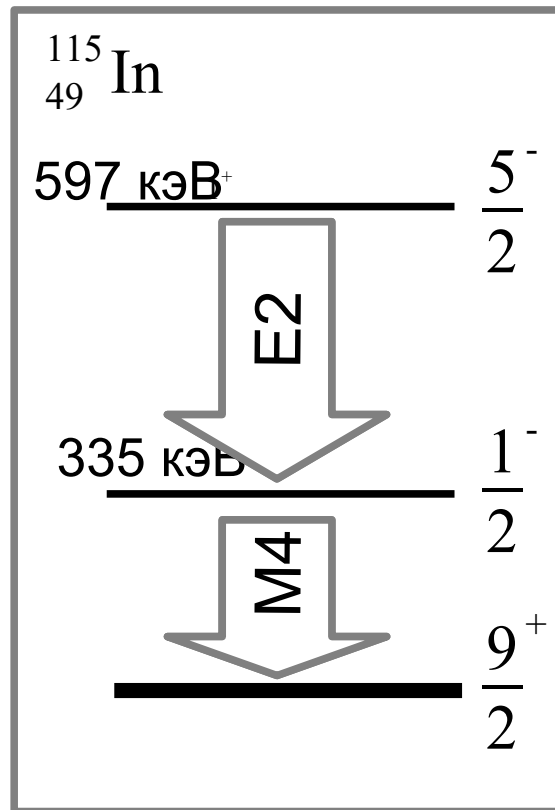
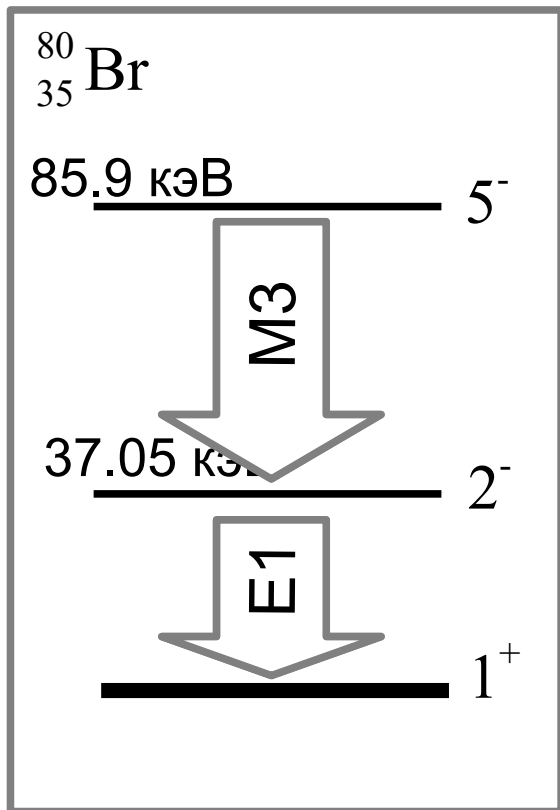


Часть 2. Одночастичные и многочастичные возбуждения ядер

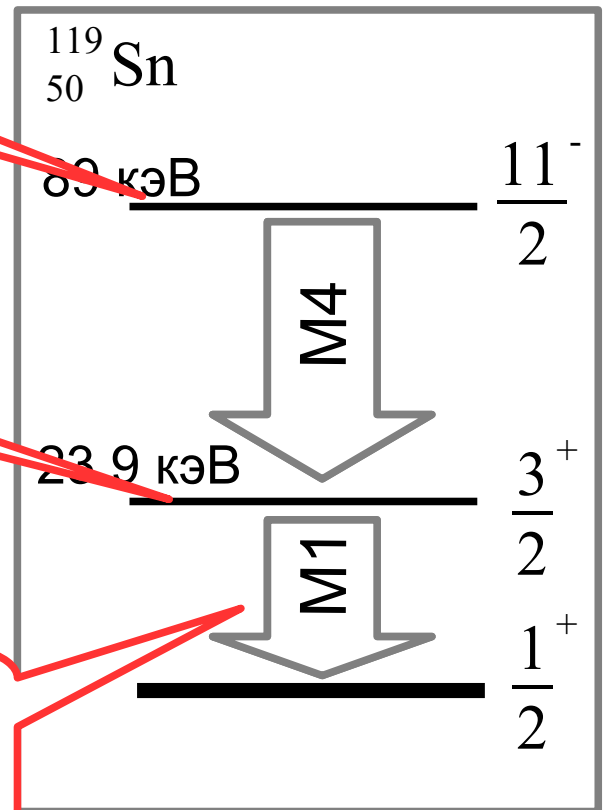
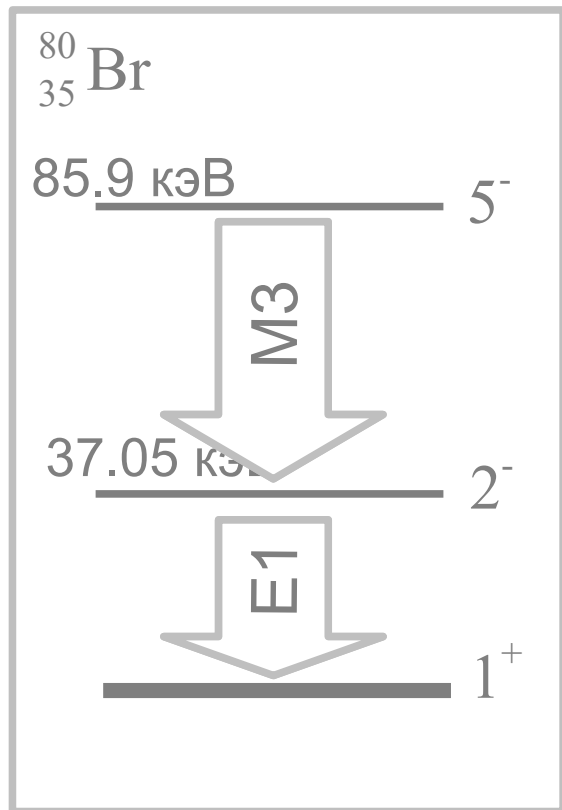
Гамма-излучение и гамма-изомеры



Гамма-излучение и гамма-изомеры



Гамма-излучение и гамма-изомеры



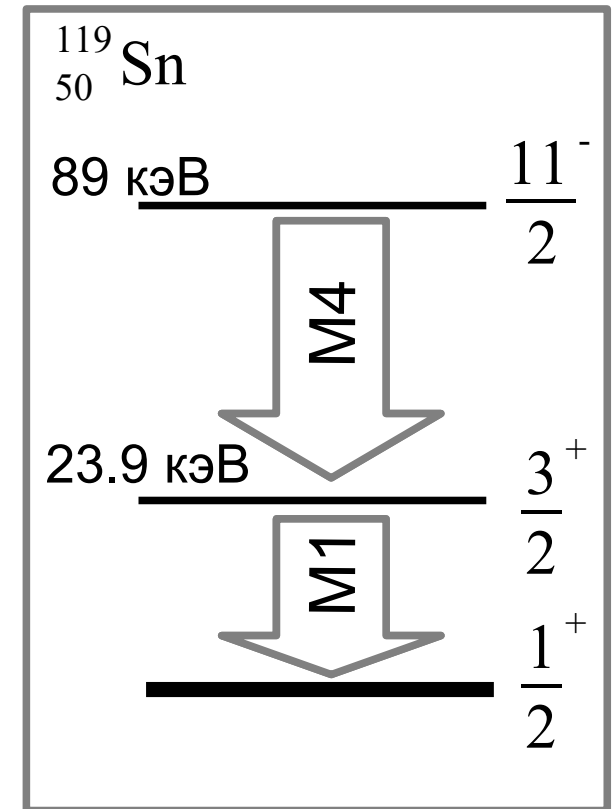
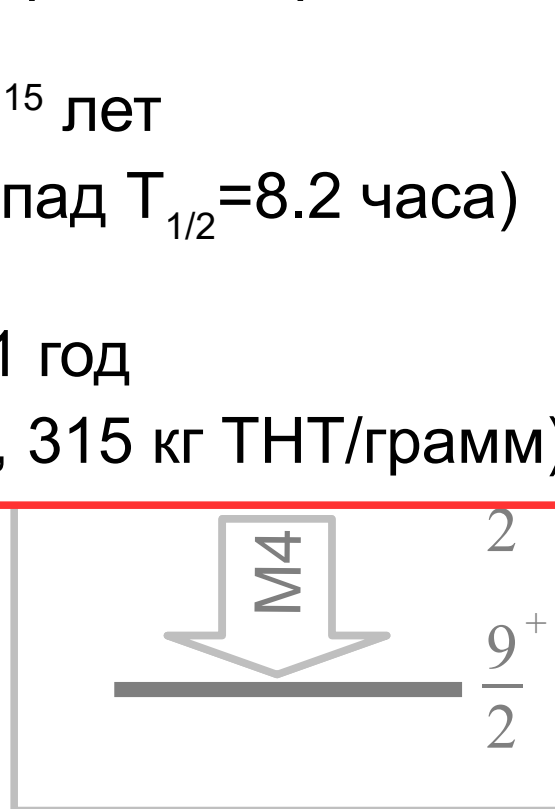
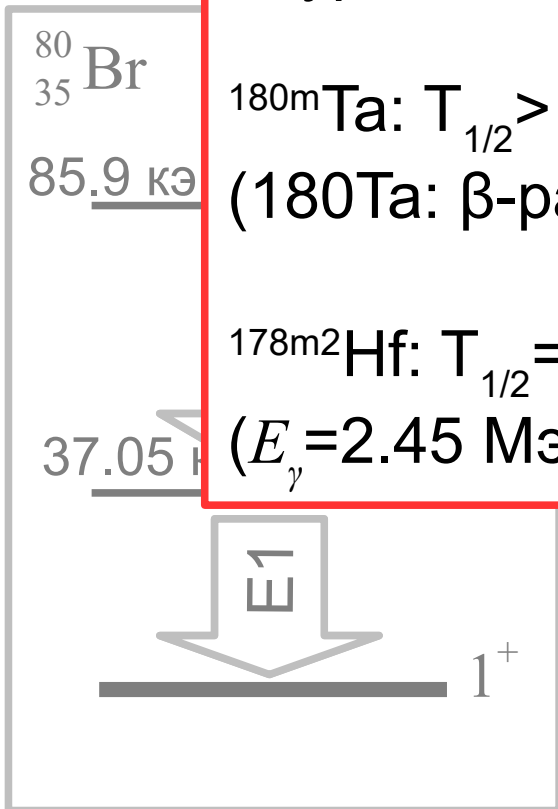
$\chi K_{\alpha} : 25.3 \text{ кэВ}$
 $\chi K_{\beta} : 28.6 \text{ кэВ}$

Гамма-излучение и гамма-изомеры

«Курьёзы» мира изомеров:

$^{180\text{m}}\text{Ta}$: $T_{1/2} > 10^{15}$ лет
 (^{180}Ta : β -распад $T_{1/2} = 8.2$ часа)

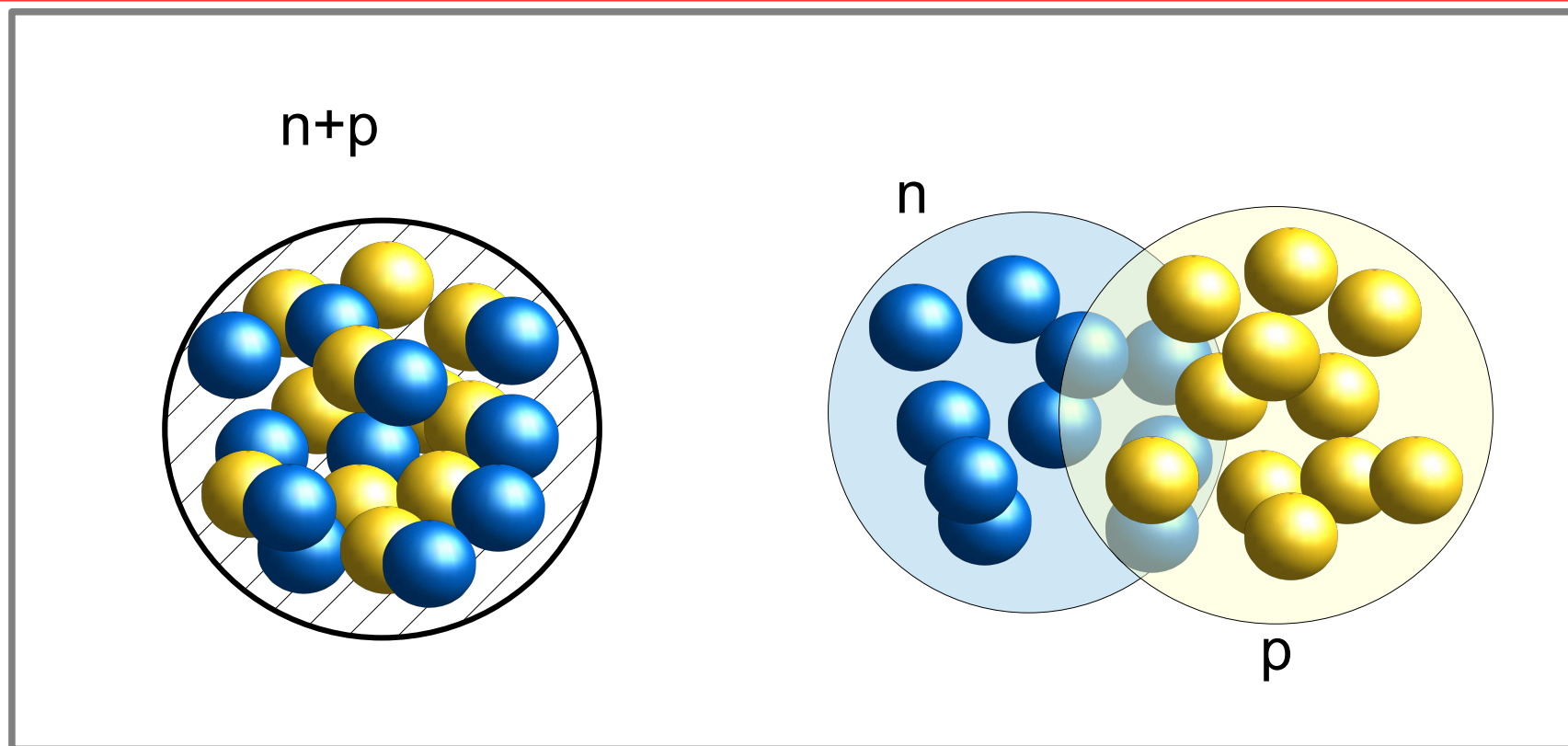
$^{178\text{m2}}\text{Hf}$: $T_{1/2} = 31$ год
 ($E_{\gamma} = 2.45$ МэВ, 315 кг ТНТ/грамм)



Коллективные возбужденные состояния

Гигантский резонанс

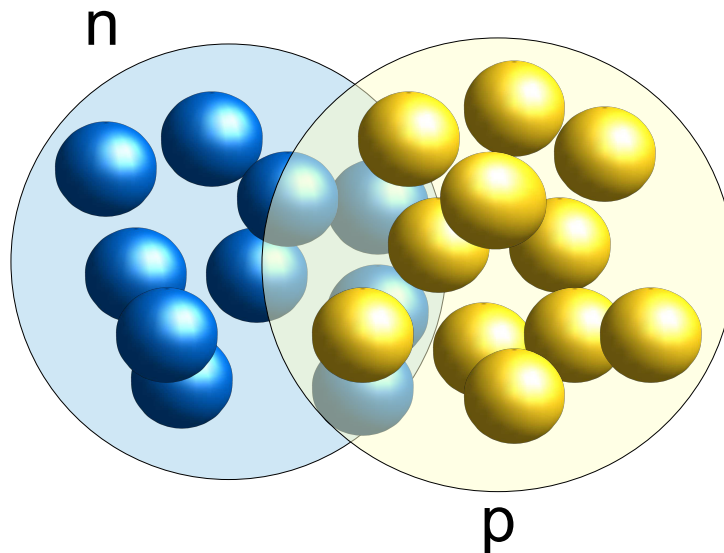
(подробно - Ишханов и Капитонов «Гигантский дипольный резонанс атомных ядер»,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/gdr/index.html>):



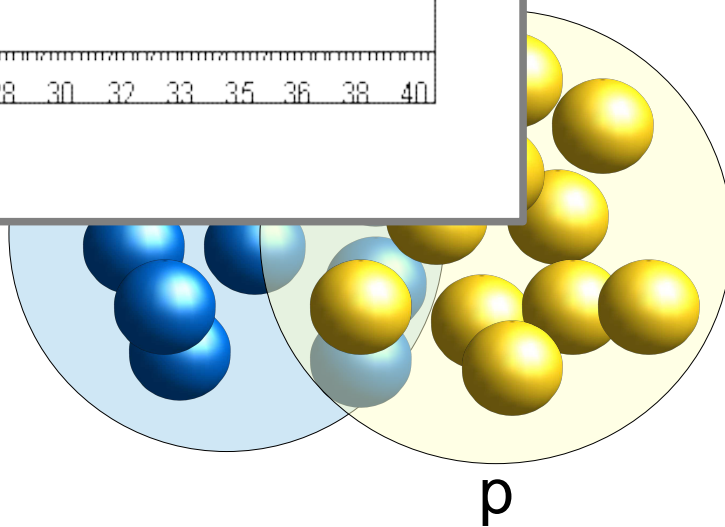
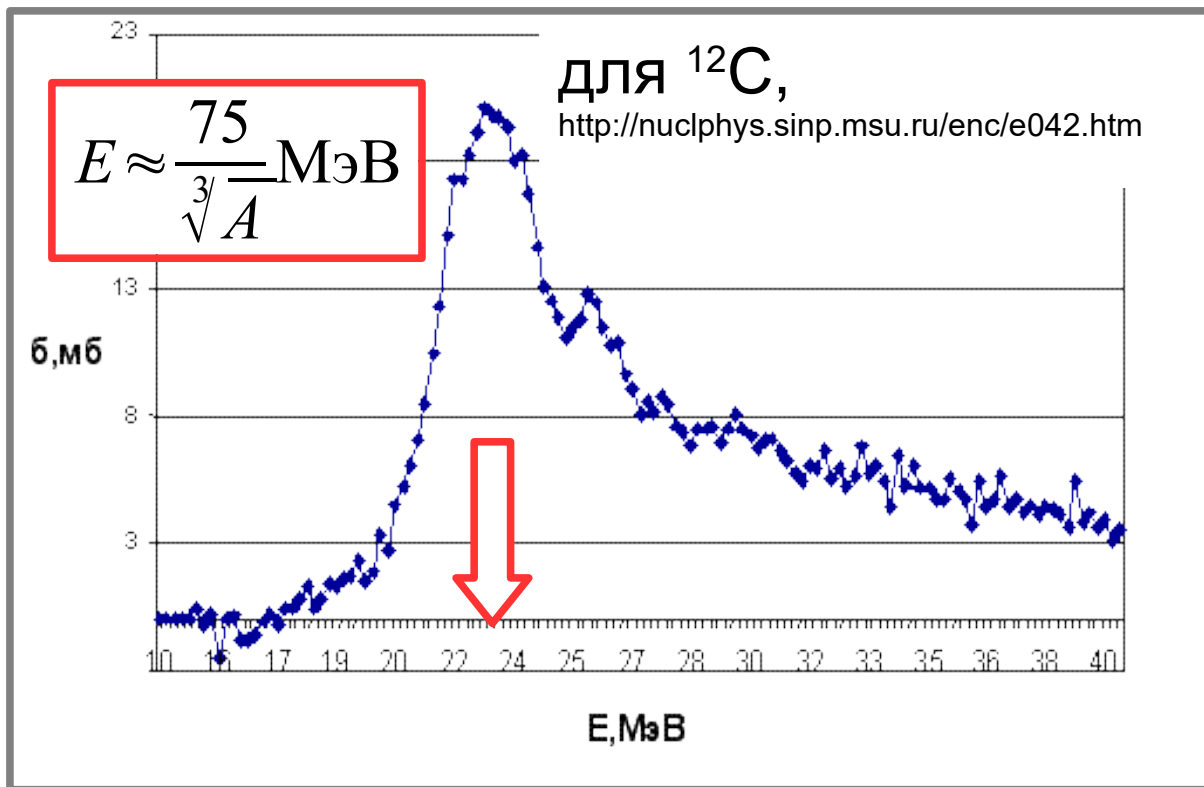
Коллективные возбужденные состояния

Гигантский дипольный резонанс:

- сильное взаимодействие играет роль «пружины»
- колебание всех протонов = колебание дипольного момента ядра

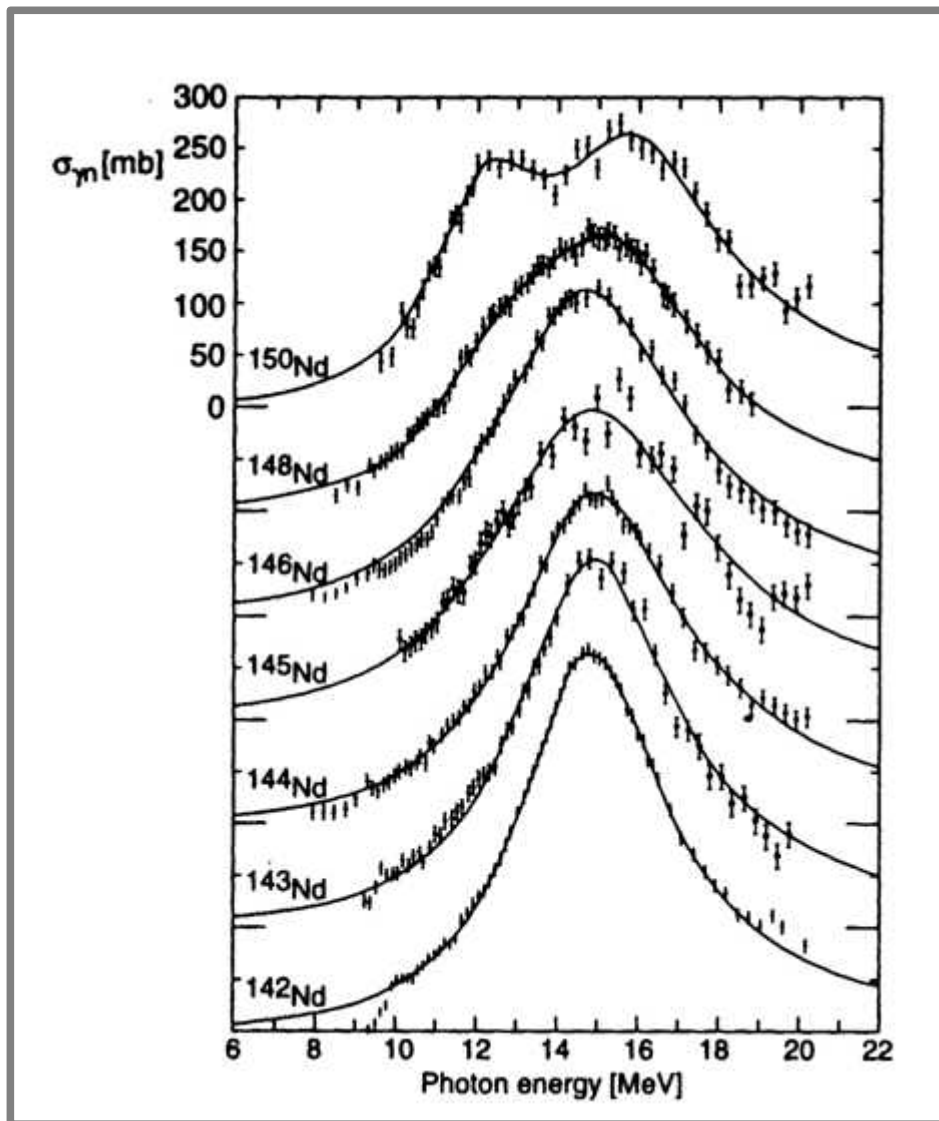


Коллективные возбужденные состояния

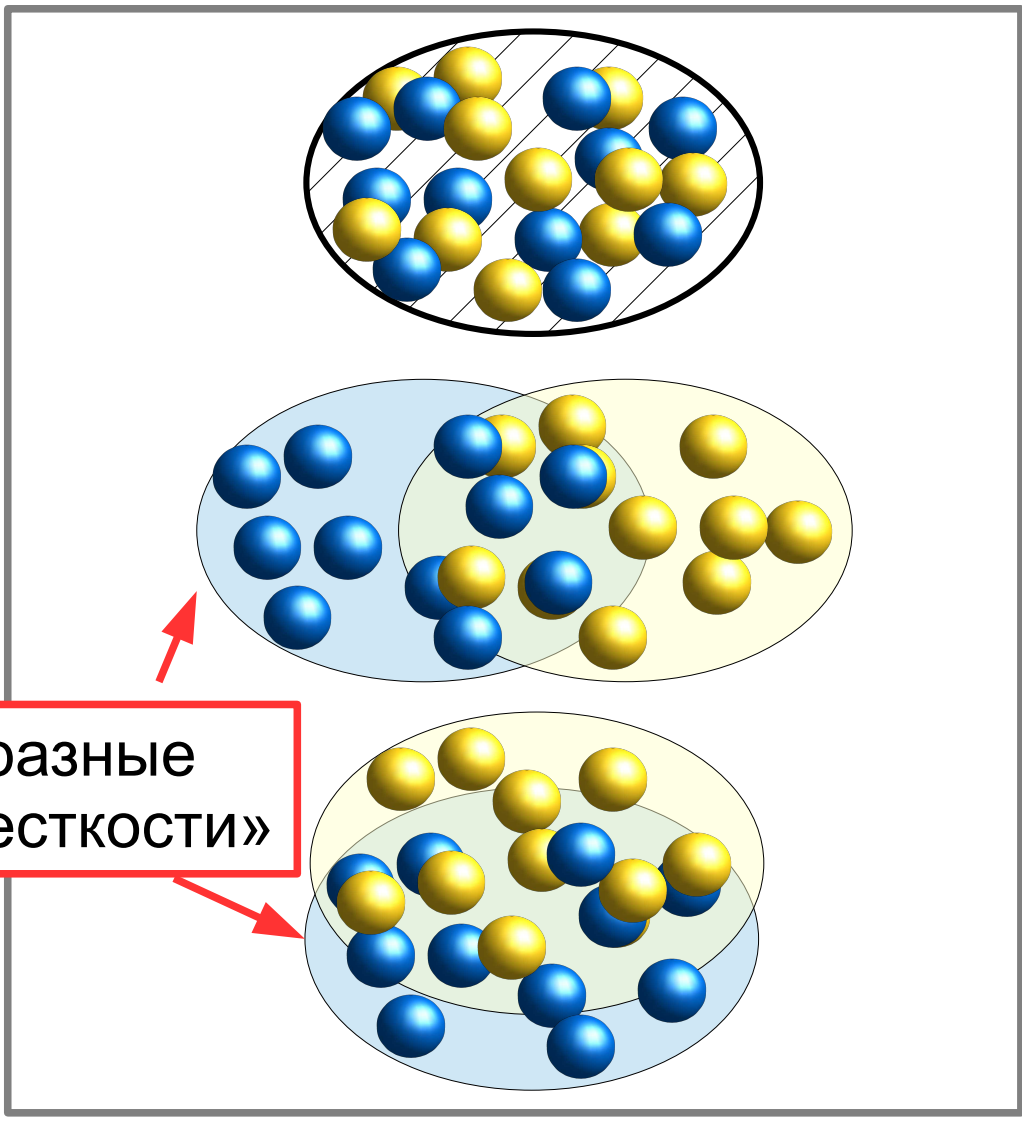
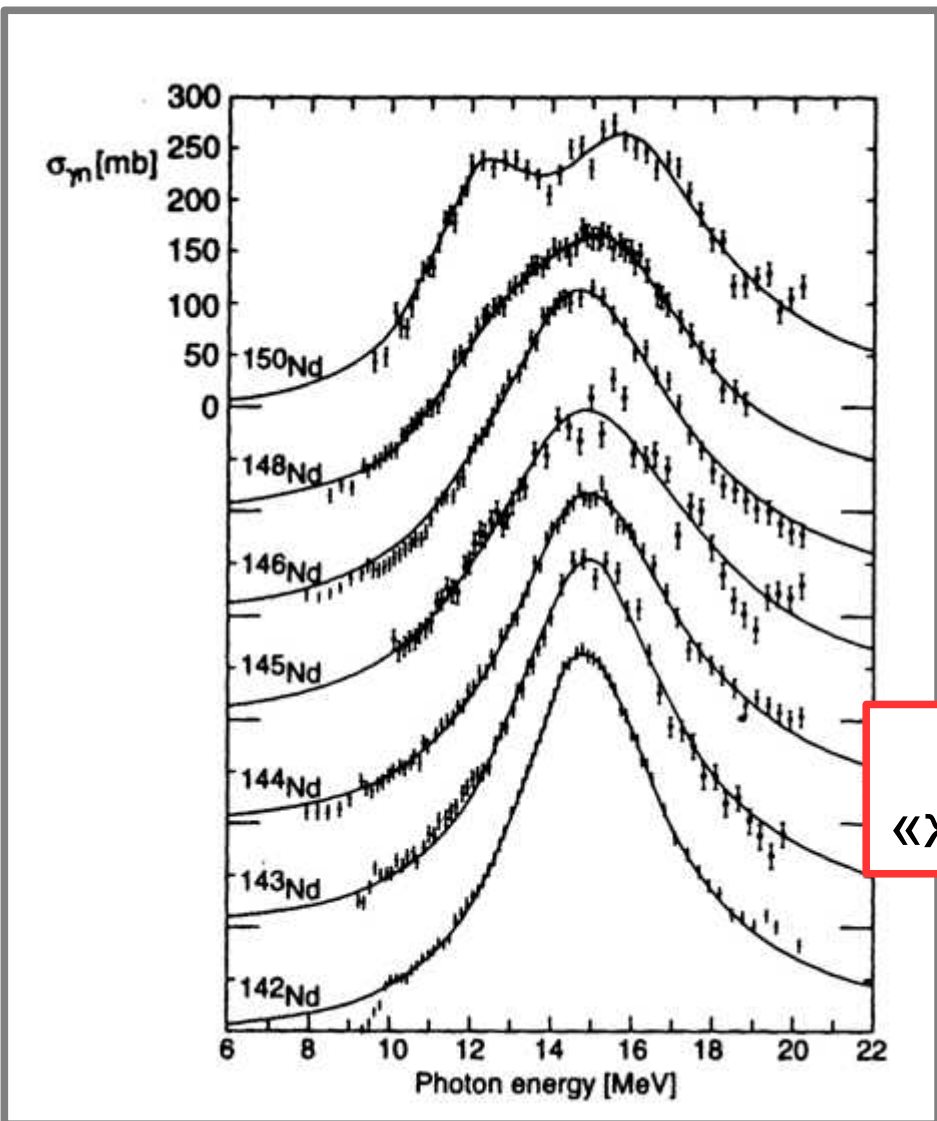


Проявление несферичности некоторых ядер

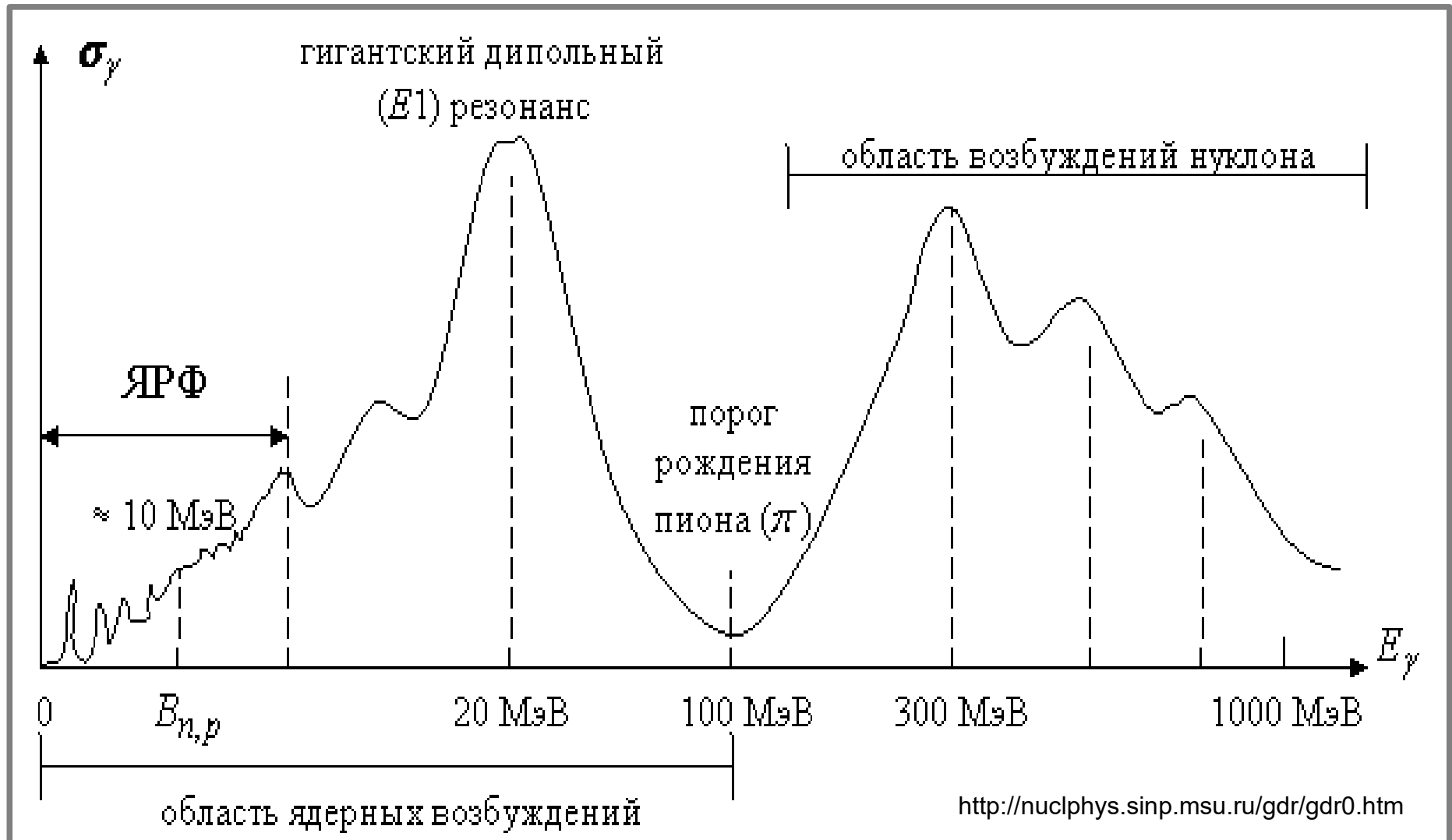
ядер



Проявление несферичности некоторых ядер

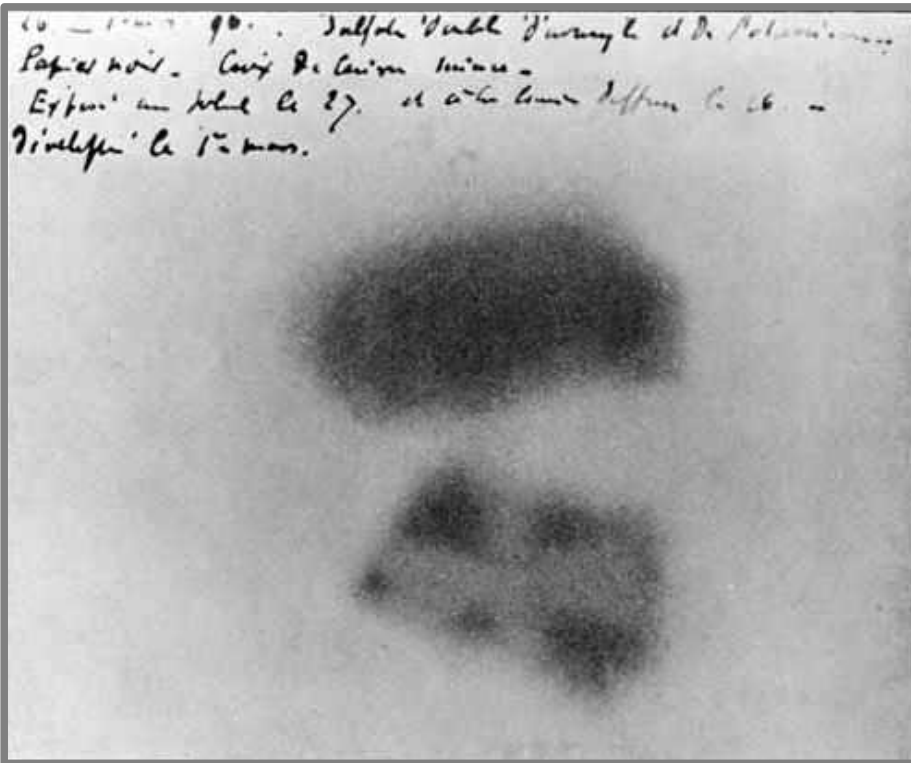


Полный гамма-спектр



Часть 3. Радиоактивность: виды распадов и их основные свойства.

Немного из истории



Рубеж 19-20 веков:
Склодовская-Кюри, Беккерель,
Резерфорд и др...

«Эманации» урановых руд:

- три вида излучения: альфа, бета и гамма-излучение.
- Альфа-частицы=ядра атомов гелия, бета-частицы=электроны.
- Возникают новые химические элементы

wikipedia.org, Henri Becquerel (английская версия),
http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel

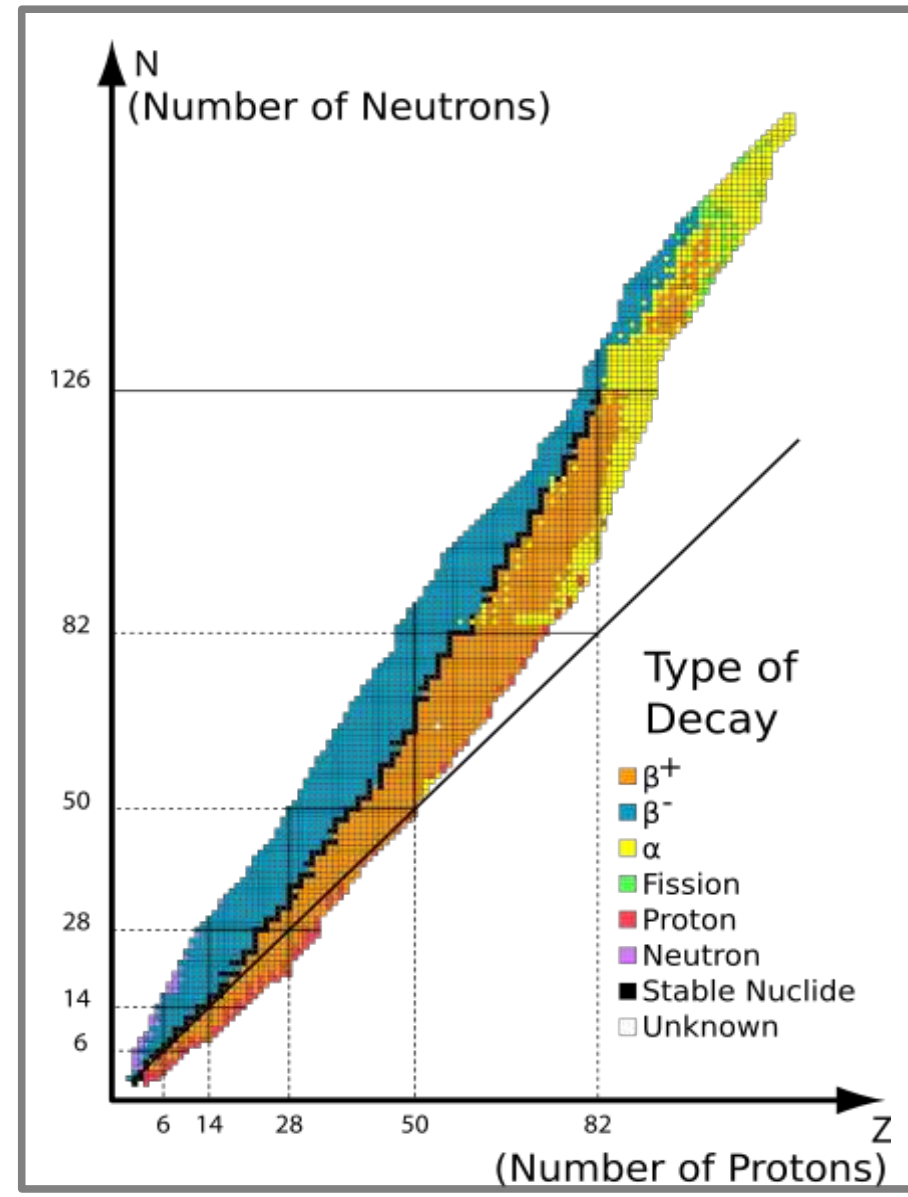
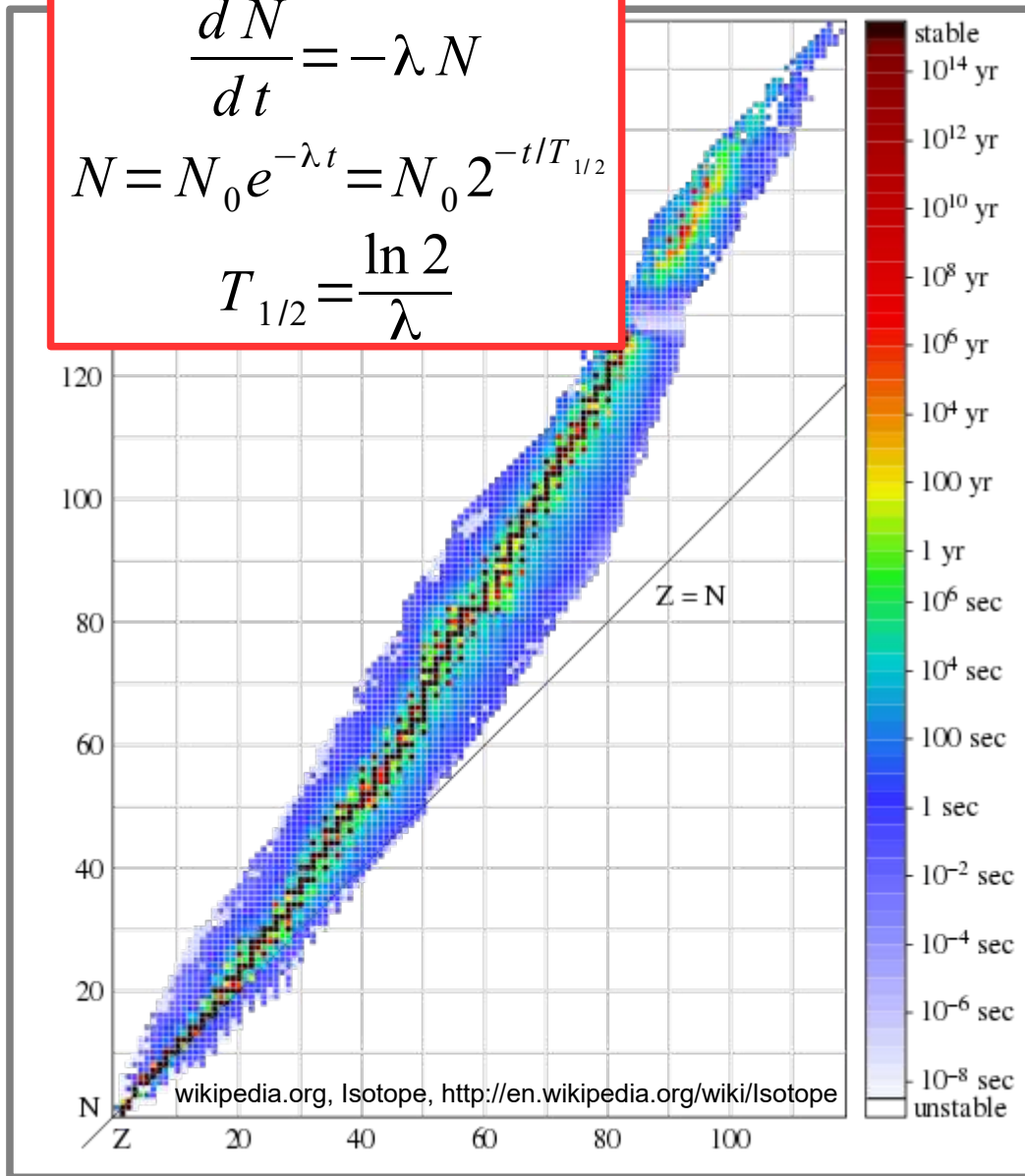
Закон радиоактивного распада и период полураспада

wikipedia.org, Beta decay,
http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay

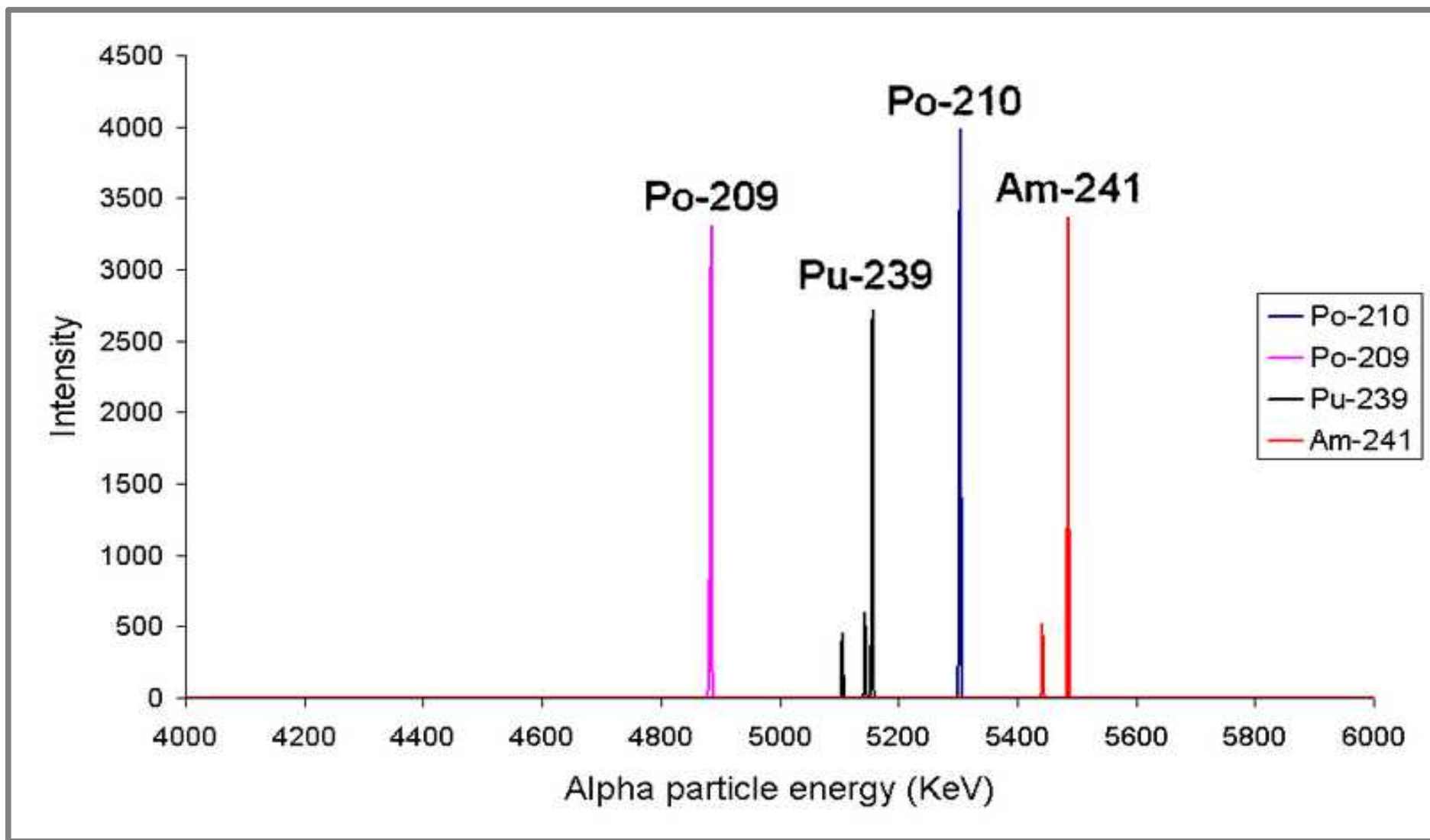
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



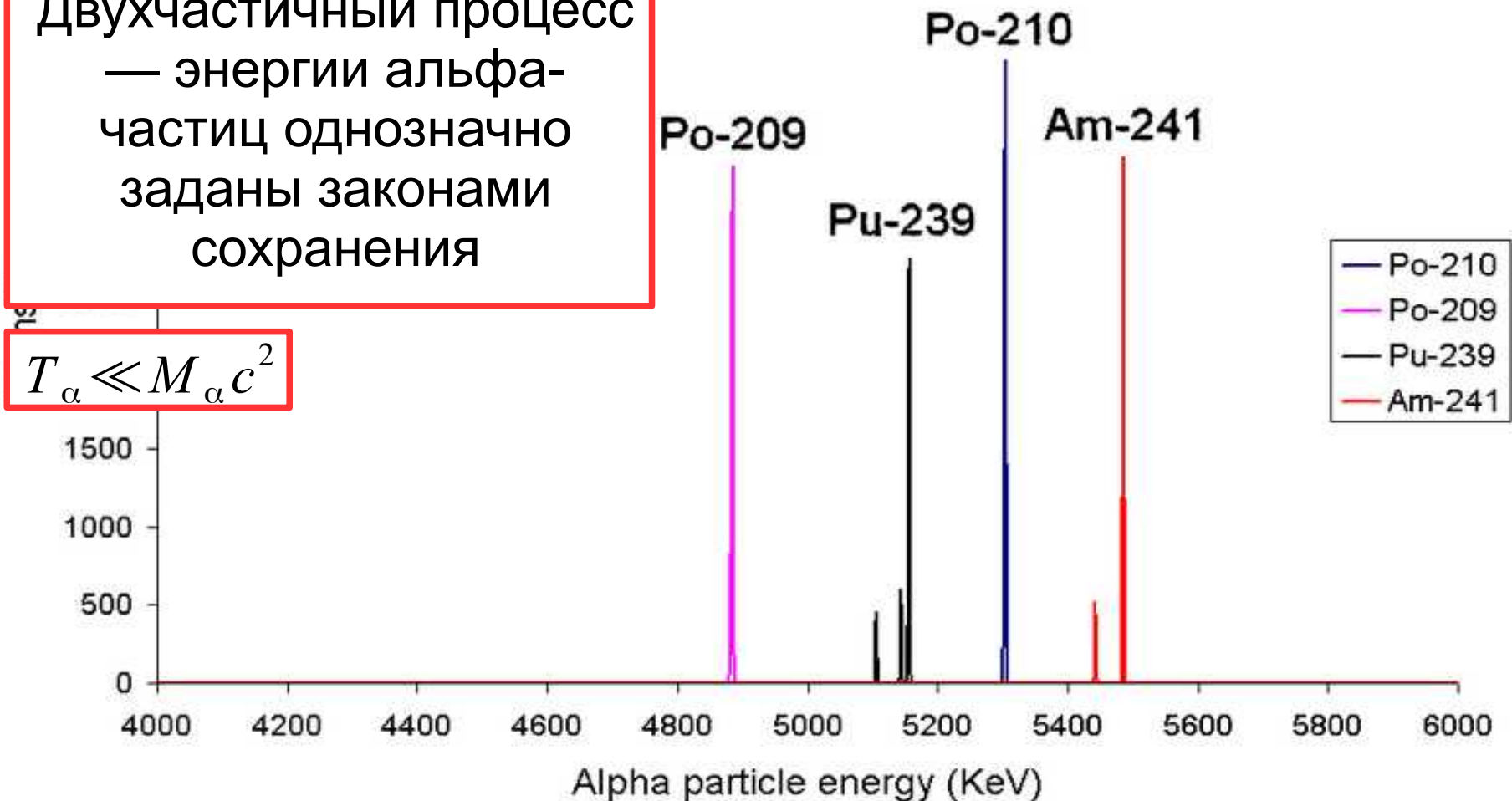
Спектр альфа-распада



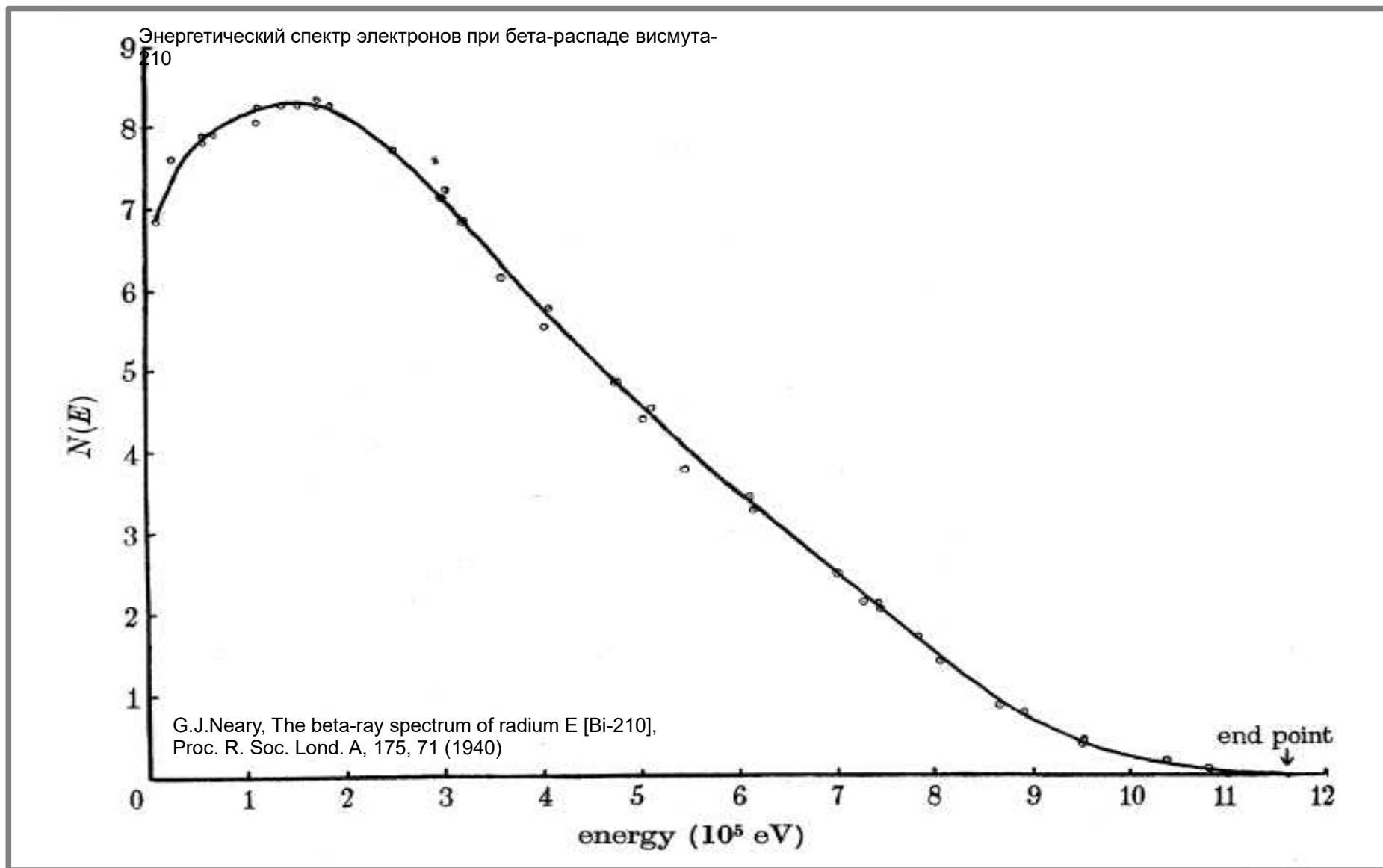
Спектр альфа-распада

Двухчастичный процесс
— энергии альфа-
частиц однозначно
заданы законами
сохранения

$$T_{\alpha} \ll M_{\alpha} c^2$$

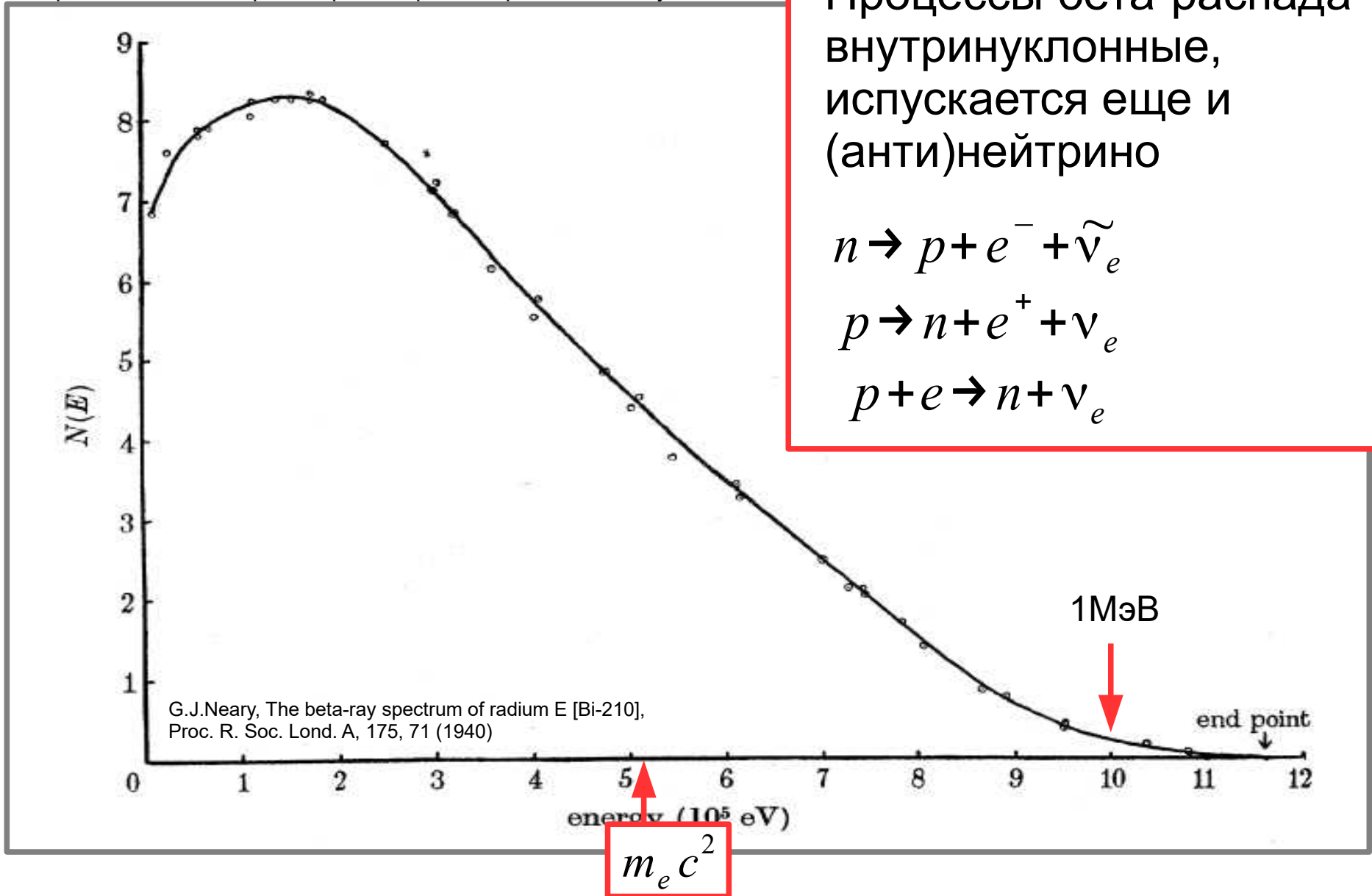


Спектры бета-распада

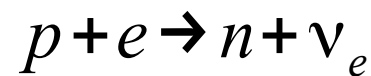
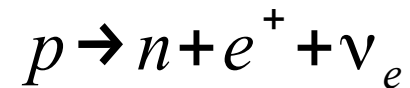
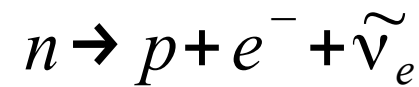


Спектры бета-распада

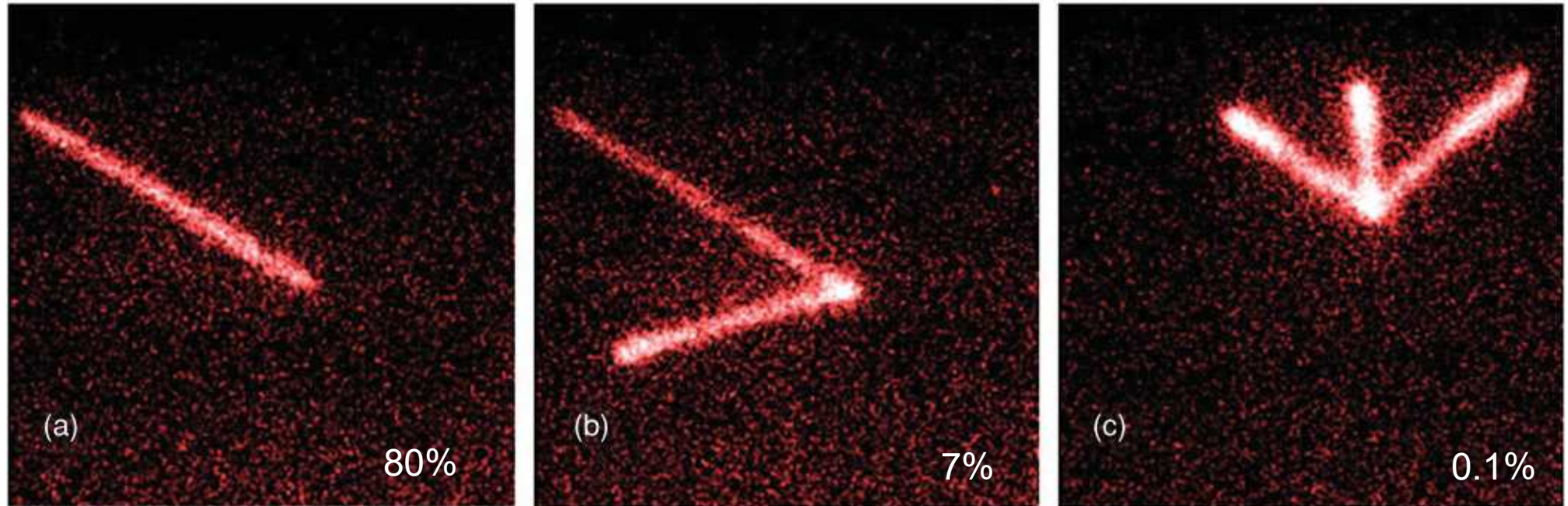
Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210



Процессы бета-распада
внутриядерные,
испускается еще и
(анти)нейтрино



Экзотические распады: протонная и нейтронная эмиссия

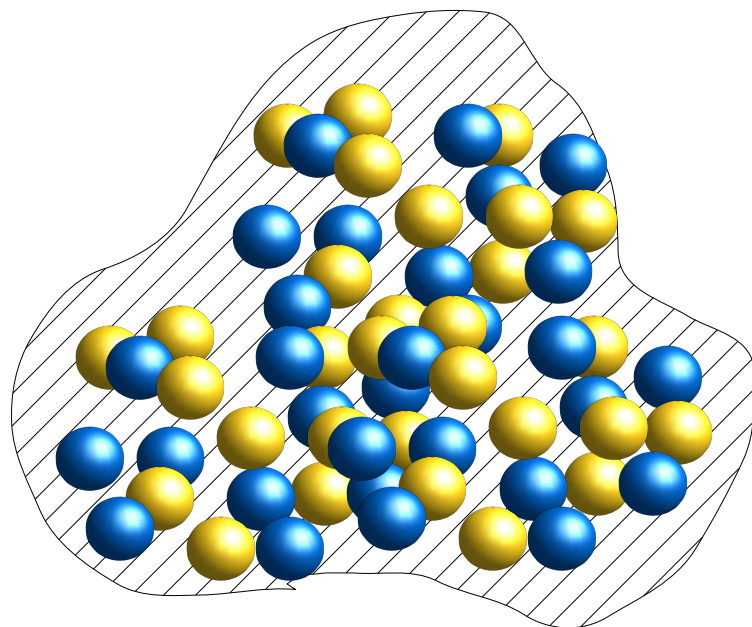


Оставленные в детекторе следы однопротонного (a), двухпротонного (b) и трёхпротонного (c) распадов образующегося после позитронного распада хрома-43 ядра ванадия-43. Из статьи M. Pomorski, *et al.* β -delayed proton emission branches in Cr43, Phys. Rev. C, (2011)

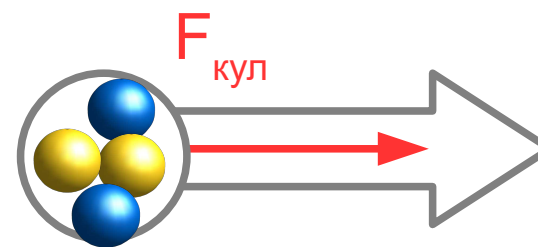
бомбардировка никелевой мишени ионами никеля:
образующийся хром-43 нестабилен, $T_{1/2} = 20$ мксек («обычный» изотоп хром-52)
превращается (позитронный бета-распад) в ванадий-43 в сильно
возбужденном состоянии

Часть 4. Альфа-распад

Закон Гейгера-Неттола

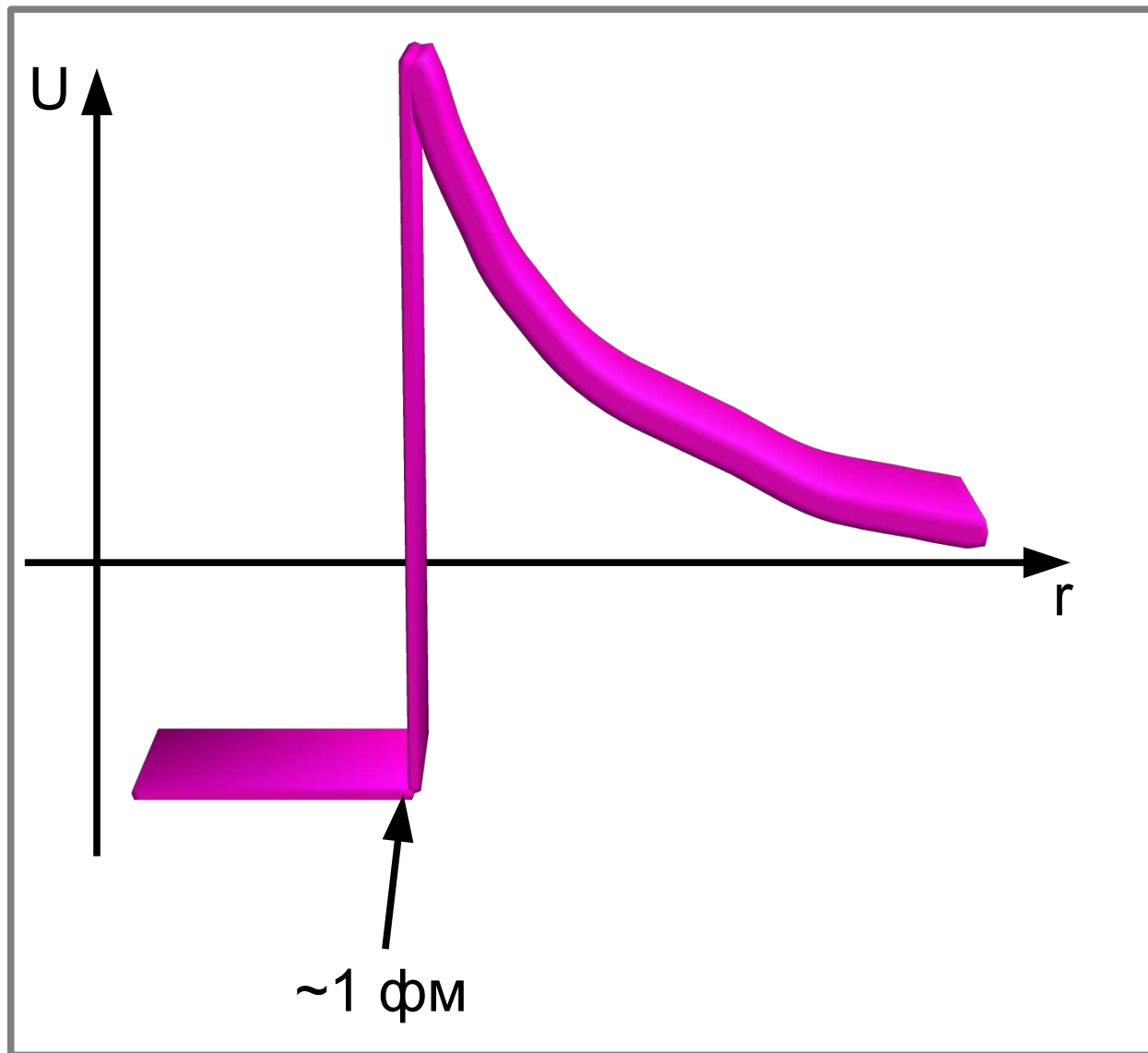


$+Ze$

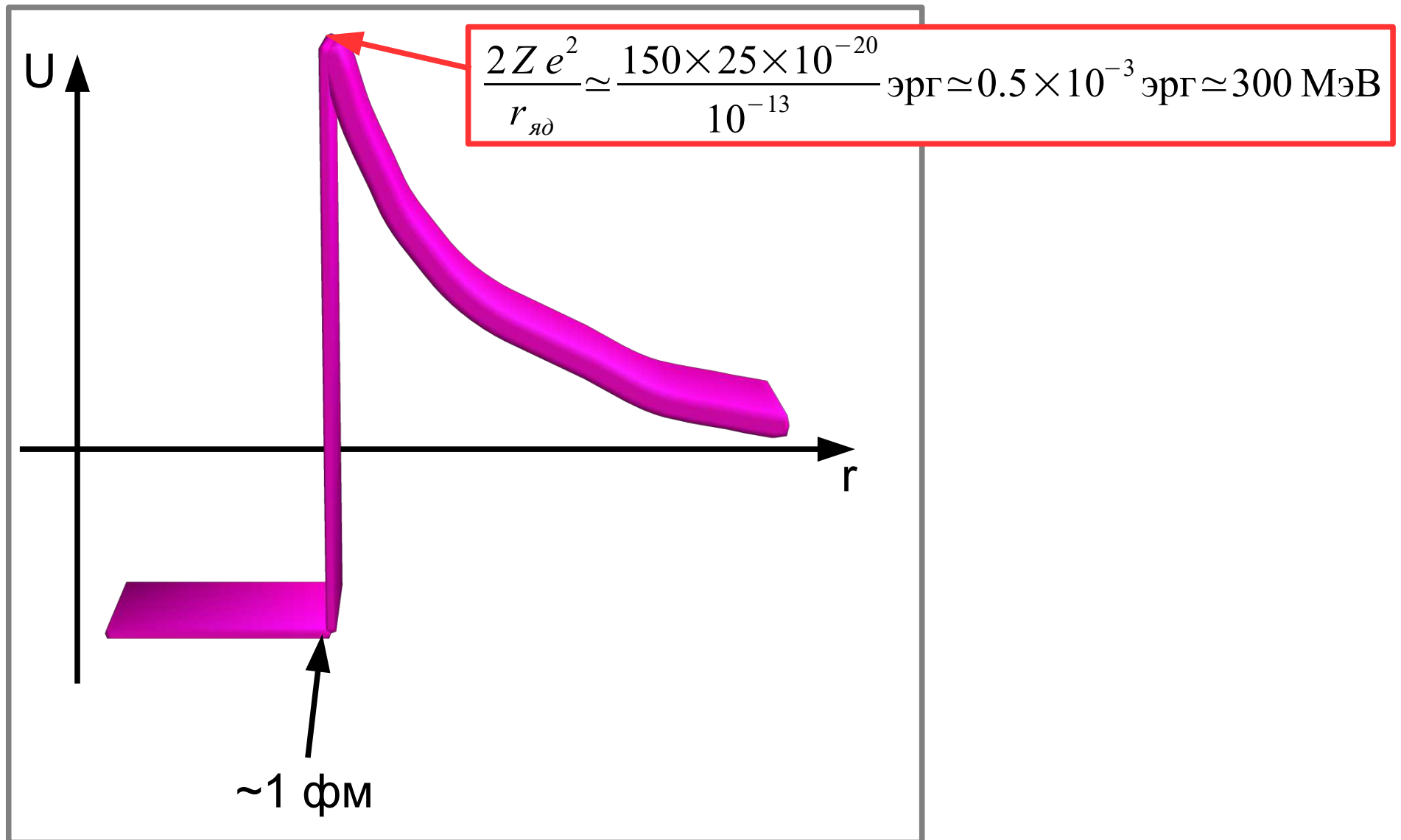


$+2e$

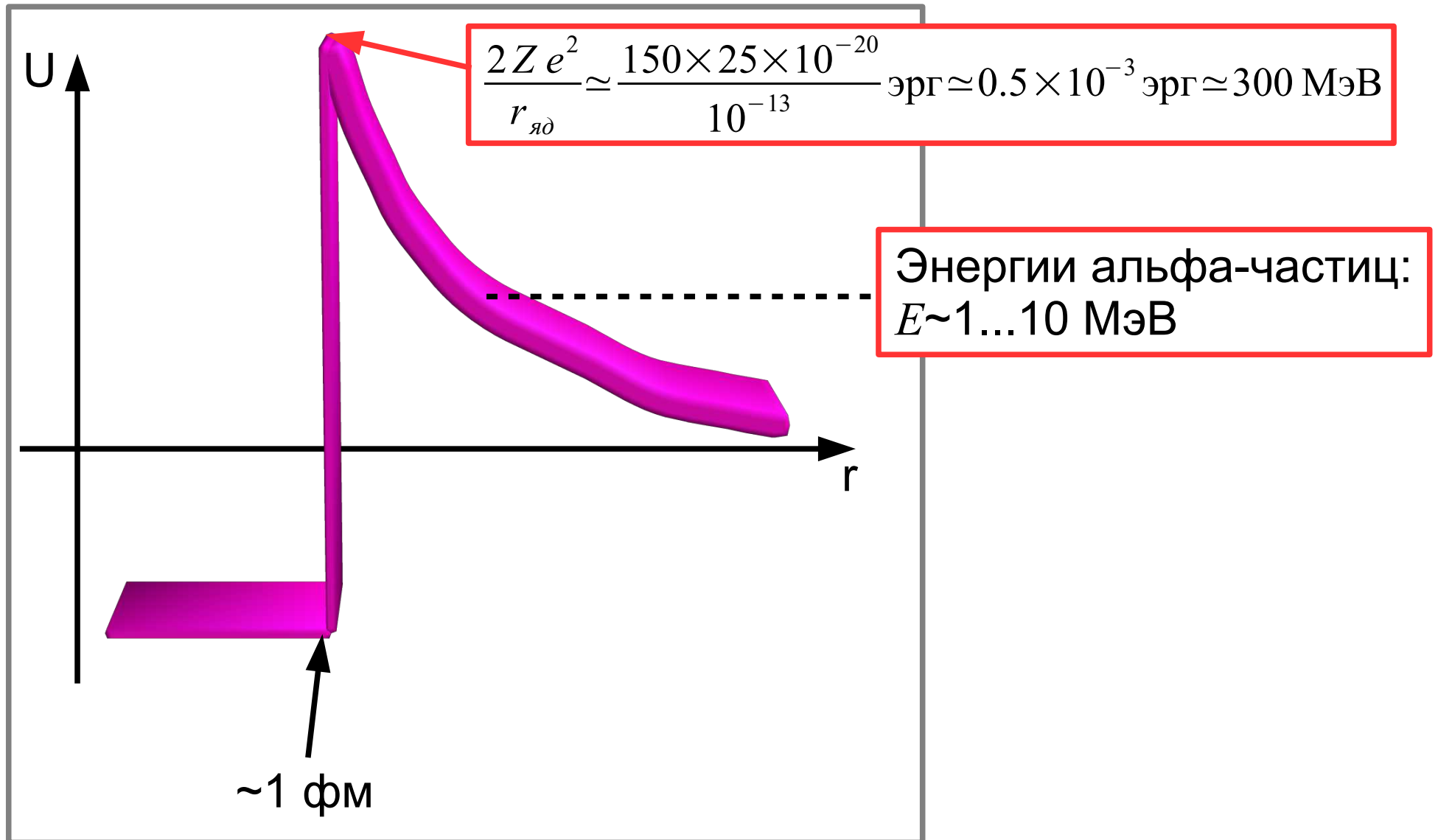
Закон Гейгера-Неттола



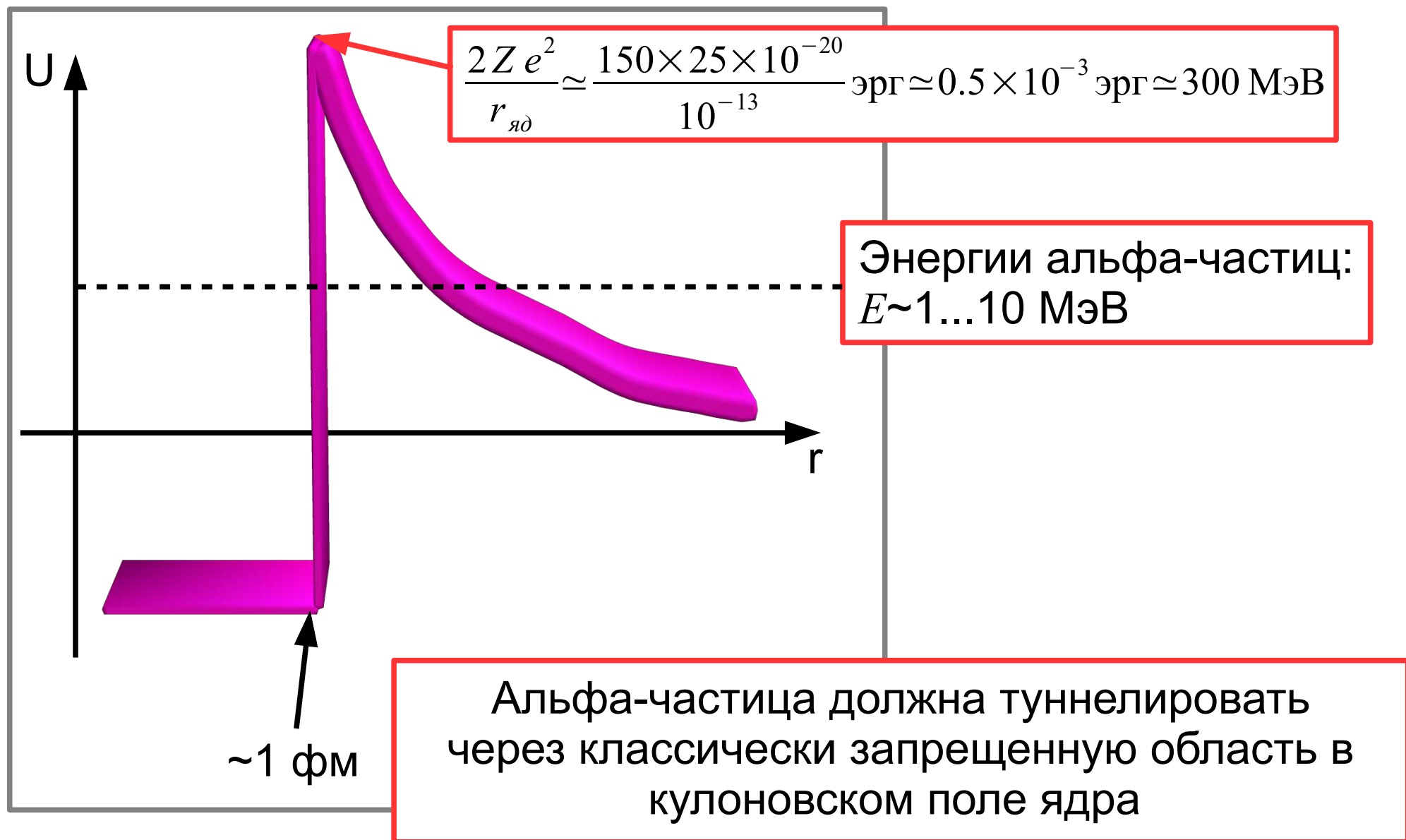
Закон Гейгера-Неттола



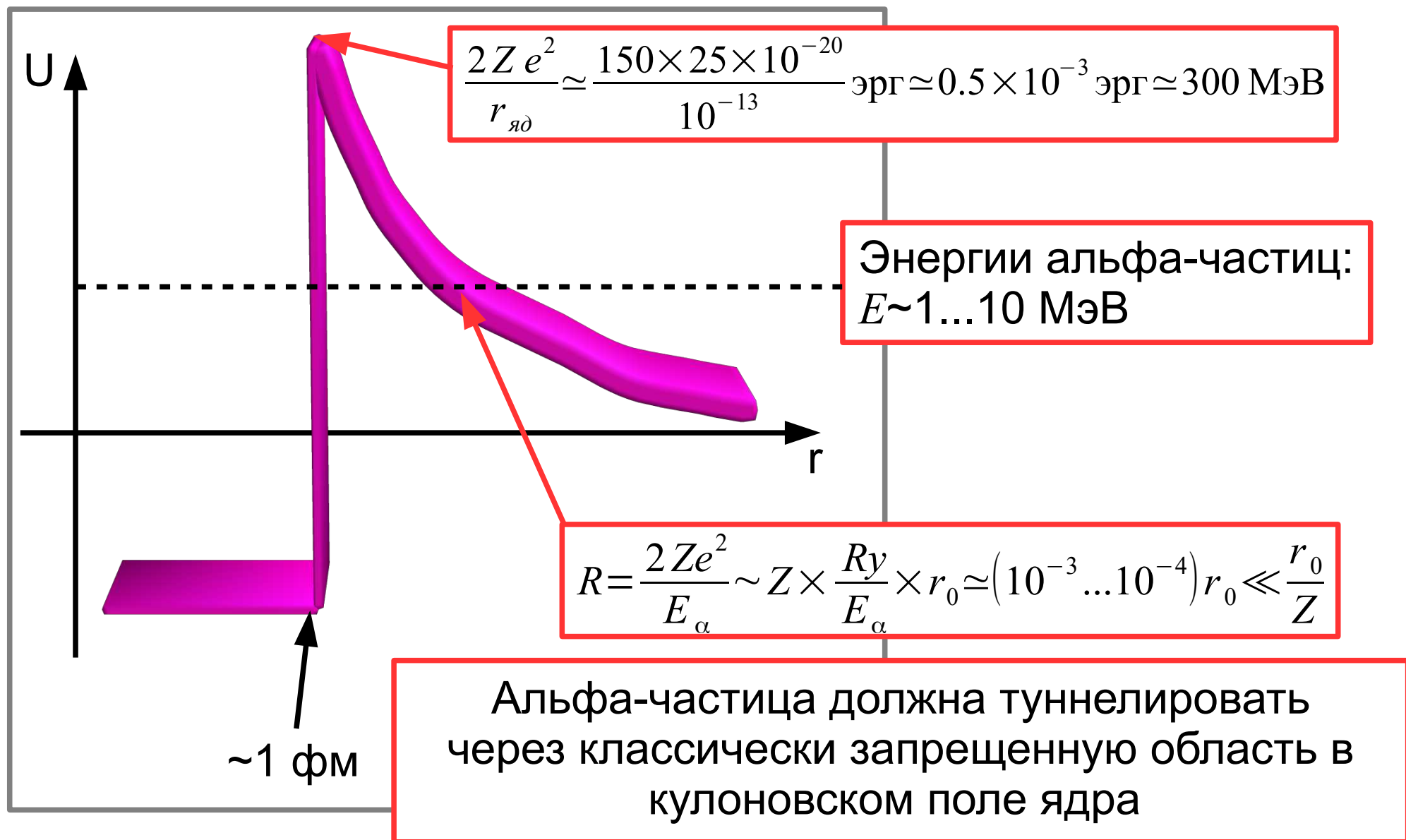
Закон Гейгера-Неттола



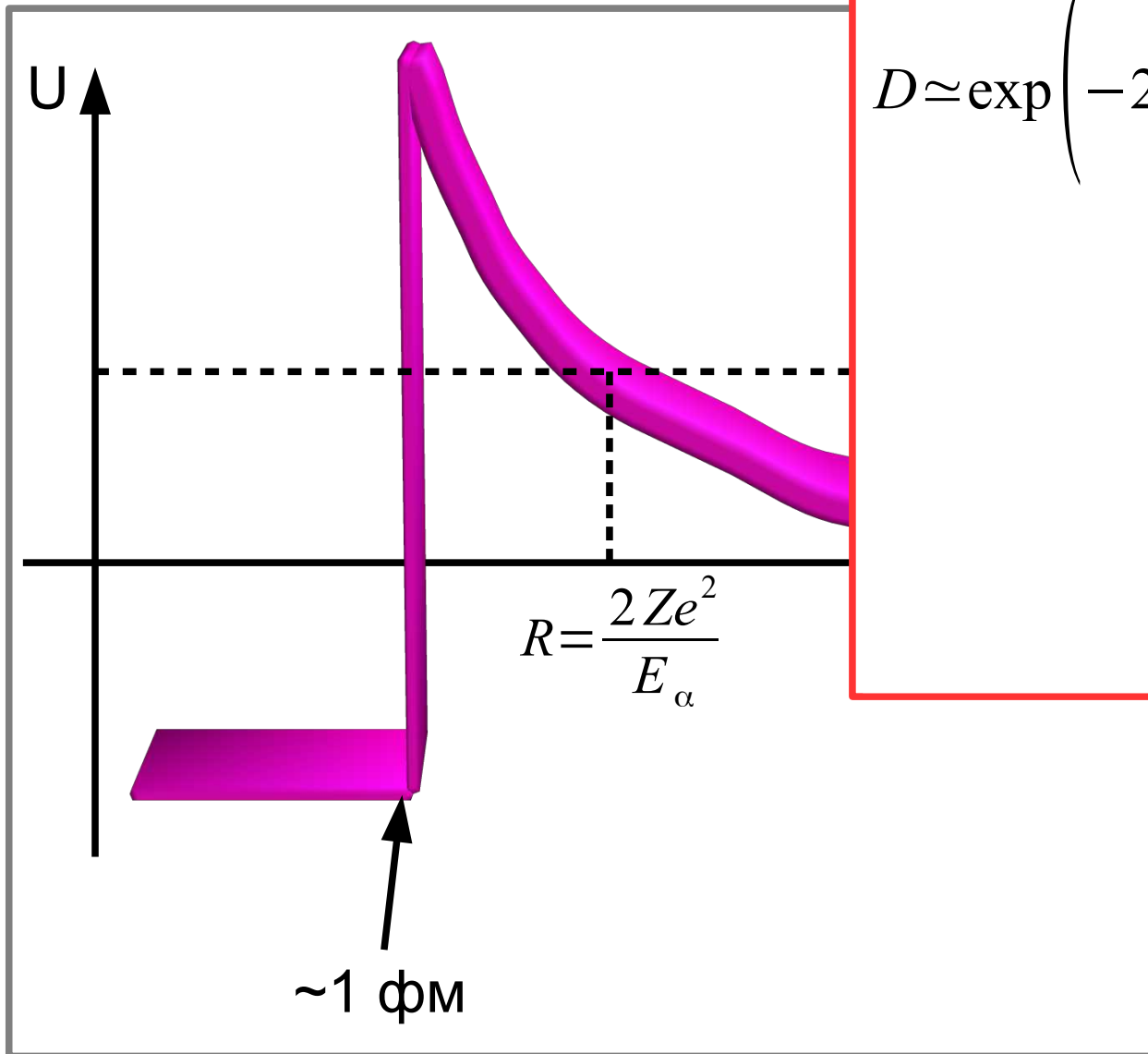
Закон Гейгера-Неттола



Закон Гейгера-Неттола

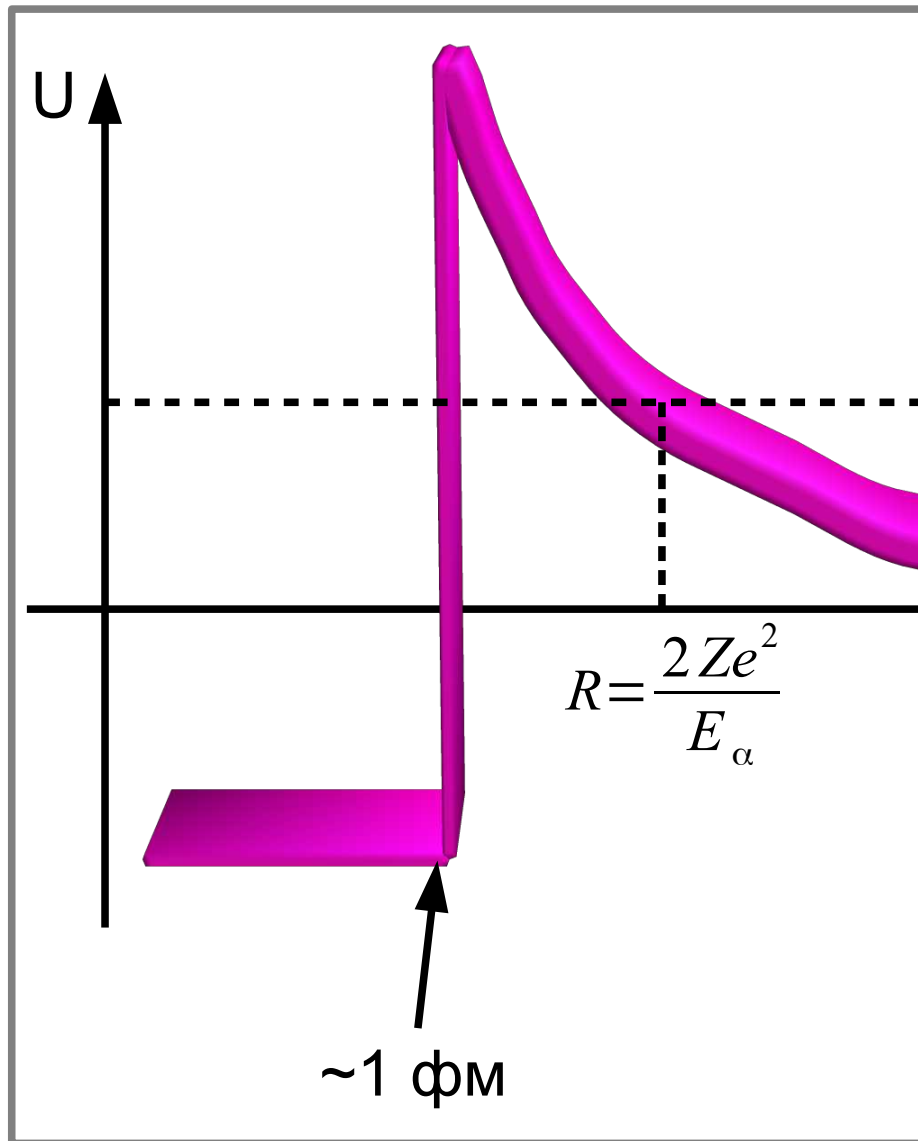


Закон Гейгера-Неттола



$$D \simeq \exp \left(-2 \int_{r_{\text{яд}}}^R \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\frac{2Ze^2}{r} - E \right)} dr \right) \approx$$

Закон Гейгера-Неттола



$$D \simeq \exp \left(-2 \int_{r_{\text{яд}}}^R \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\frac{2Ze^2}{r} - E \right)} dr \right) \approx$$

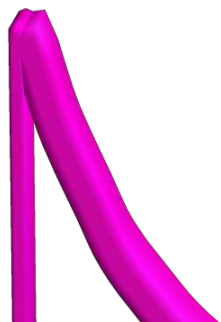
$$\approx \exp \left(-4 \sqrt{\frac{4mZe^2}{\hbar^2}} \sqrt{R} \right) = \exp \left(\frac{AZ}{\sqrt{E_\alpha}} \right)$$

$$\ln D \propto -\frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad T_{1/2} \propto 1/D$$

$$\ln T_{1/2} = a \frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}} + b$$

Закон Гейгера-Неттола

U

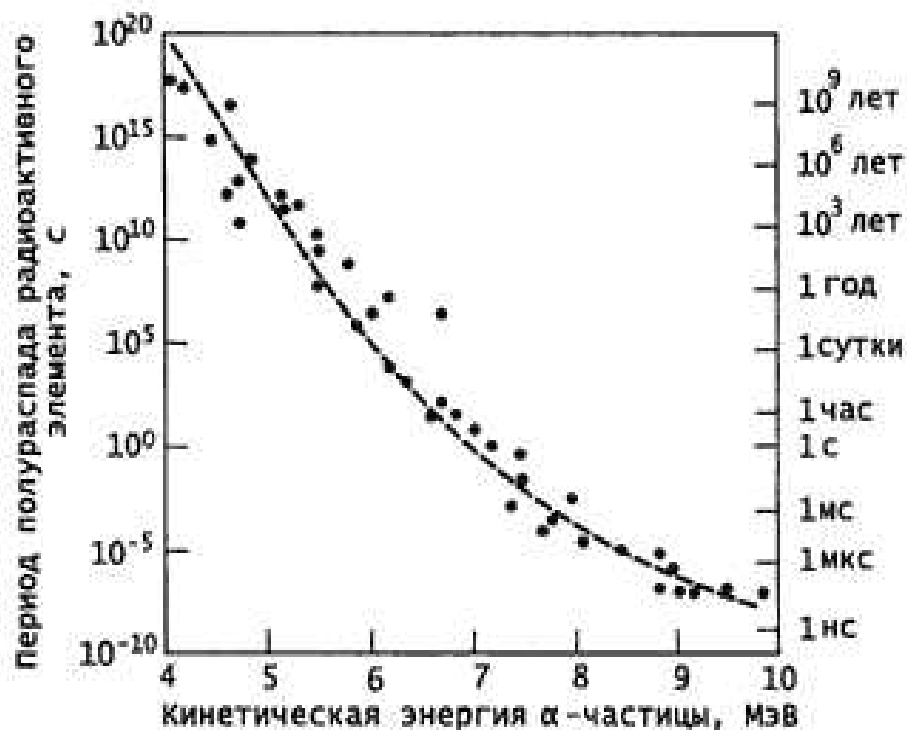


$$D \simeq \exp \left(-2 \int_{r_{яд}}^R \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\frac{2Ze^2}{r} - E \right)} dr \right) \approx$$

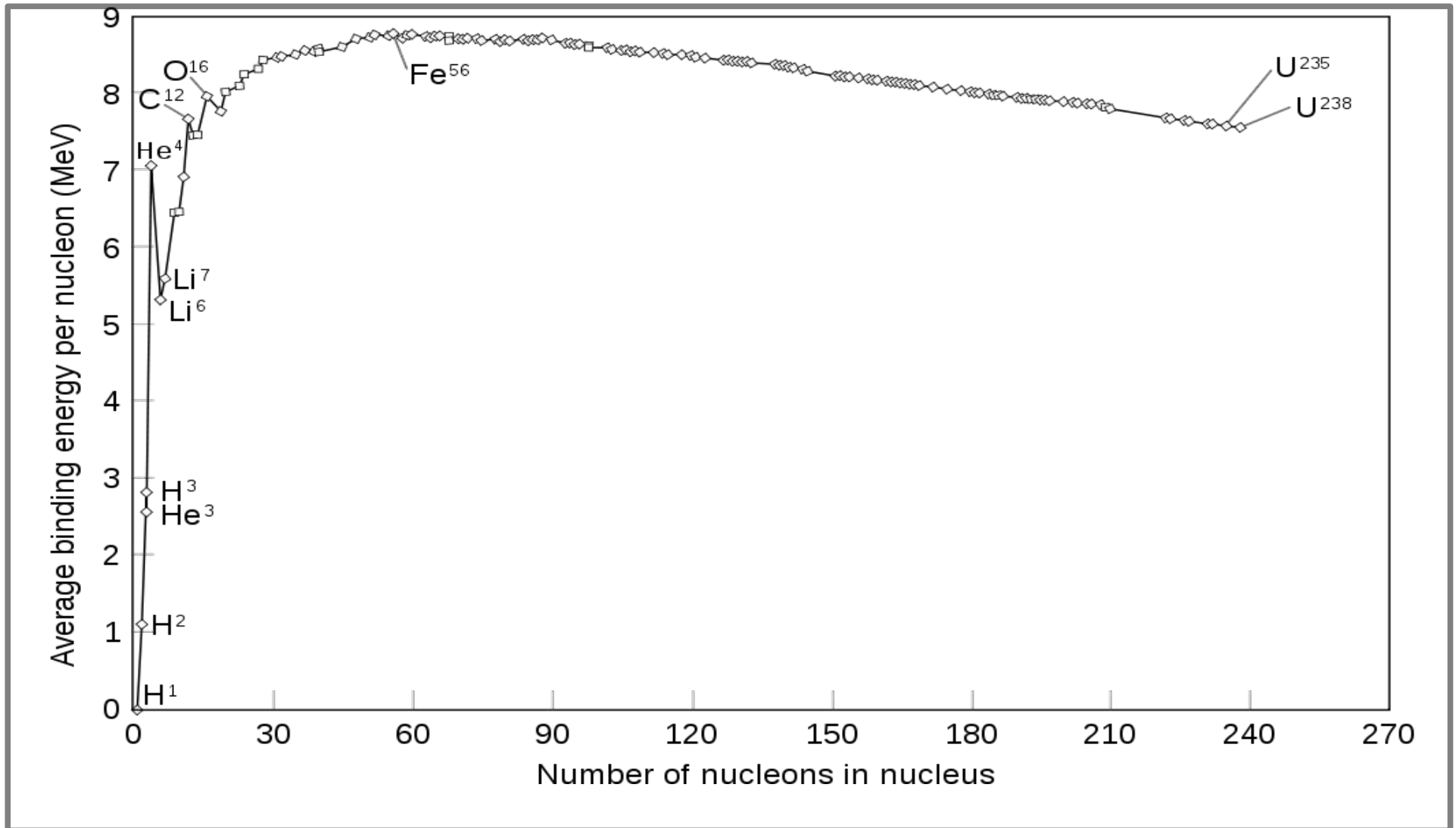
$$\approx \exp \left(-4 \sqrt{\frac{4mZe^2}{\hbar^2}} \sqrt{R} \right) = \exp \left(\frac{AZ}{\sqrt{E_\alpha}} \right)$$

$$\ln D \propto -\frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad T_{1/2} \propto 1/D$$

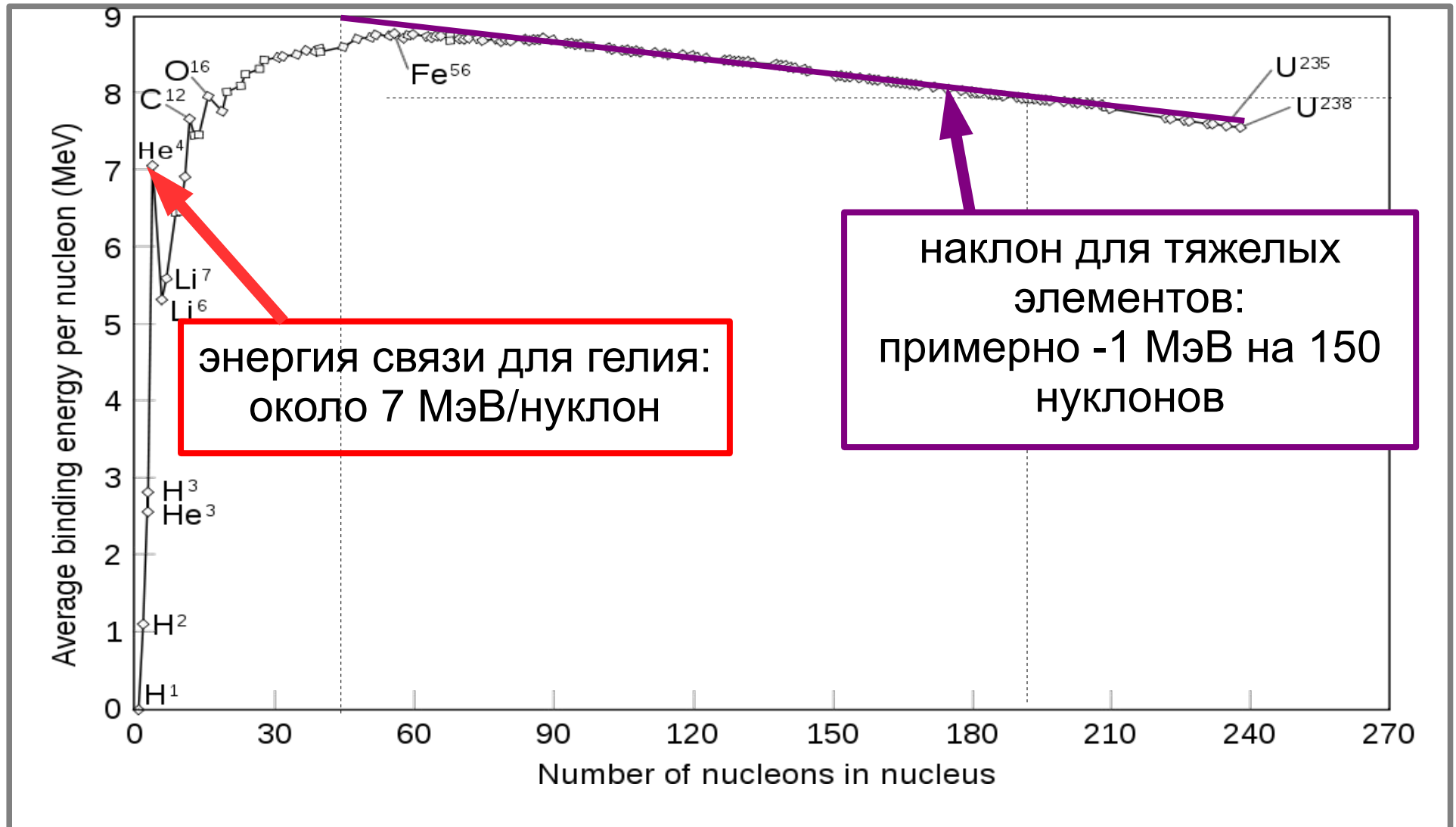
$$\ln T_{1/2} = a \frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}} + b$$



Энергетическая выгода распада



Энергетическая выгода распада



Альфа-распад. Почему именно гелий?

$$(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + (4, 2)$$

vs.

$$(A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + (1, 1)$$

Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

Альфа-распад. Почему именно гелий?

$$(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + (4, 2)$$

vs.

$$(A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + (1, 1)$$

Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

$$E_{св}(A, Z) < E_{св}(A-1, Z-1) + E_{св}(1, 1)$$

Альфа-распад. Почему именно гелий?

$$(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + (4, 2)$$

vs.

$$(A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + (1, 1)$$

Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

$$E_{св}(A, Z) < E_{св}(A-1, Z-1) + E_{св}(1, 1)$$
$$A \times 8 \text{ МэВ} < (A-1) \times \left(8 \text{ МэВ} + \frac{1}{150} \text{ МэВ} \right)$$

$$8 \text{ МэВ} < \frac{A}{150} \text{ МэВ}$$

$$A > 1200$$

Альфа-распад. Почему именно гелий?

$$(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + (4, 2)$$

vs.

$$(A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + (1, 1)$$

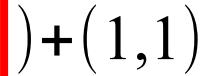
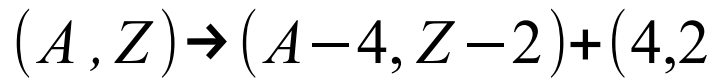
Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

$$\begin{aligned} E_{св}(A, Z) &< E_{св}(A-4, Z-2) + E_{св}(4, 2) \\ A \times 8 \text{ МэВ} &< (A-4) \times \left(8 \text{ МэВ} + \frac{4}{150} \text{ МэВ} \right) + \\ &\quad \boxed{+28 \text{ МэВ}} \\ 4 \text{ МэВ} &< \frac{4A}{150} \text{ МэВ} \\ A &> 150 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{св}(A, Z) &< E_{св}(A-1, Z-1) + E_{св}(1, 1) \\ A \times 8 \text{ МэВ} &< (A-1) \times \left(8 \text{ МэВ} + \frac{1}{150} \text{ МэВ} \right) \\ 8 \text{ МэВ} &< \frac{A}{150} \text{ МэВ} \\ A &> 1200 \end{aligned}$$

Альфа-распад. 1

й?



Для выгодного распада слева больше,

$$E_{св}(A, Z) < E_{св}(A-4, Z-2) + E_{св}(4, 2)$$

$$A \times 8 \text{ МэВ} < (A-4) \times (8 \text{ МэВ} + \frac{4}{150} \text{ МэВ})$$

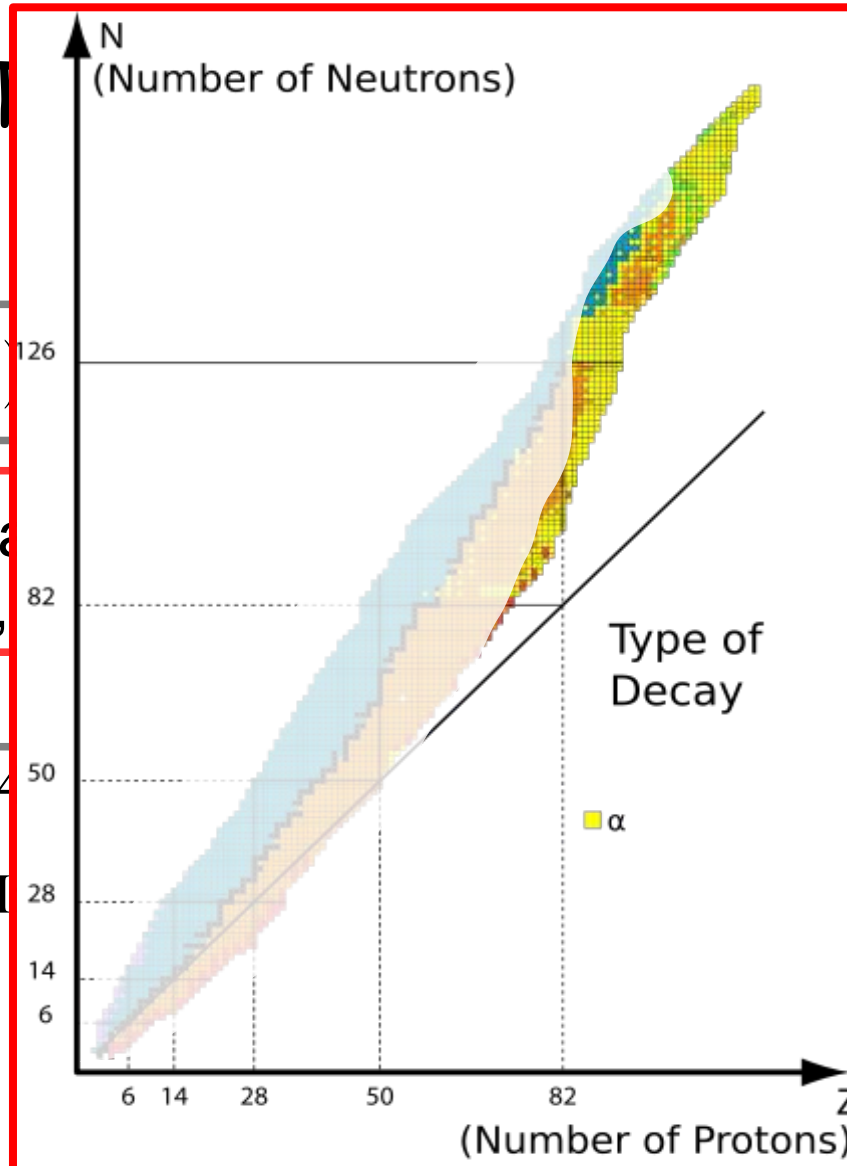
$$+28 \text{ МэВ}$$

$$4 \text{ МэВ} < \frac{4A}{150} \text{ МэВ}$$

$$A > 150$$

$$1) + E_{св}(1, 1)$$

$$\text{В} + \frac{1}{150} \text{ МэВ})$$



МэВ

A > 1200

Большая энергия связи в гелии снижает порог, хоть и требует участия многих частиц...

Часть 5. Виды бета-распадов

Бета-распады

Процессы без изменения массового числа ядра, но с изменением зарядового (взаимные превращения протонов и нейтронов — внутринуклонные процессы):

Бета-распады

Процессы без изменения массового числа ядра, но с изменением зарядового (взаимные превращения протонов и нейтронов — внутринуклонные процессы):

- электронный бета распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^{-}$
- позитронный бета-распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z-1) + e^{+}$
- К-захват: $(A, Z) + e^{-} \rightarrow (A, Z-1)$

Бета-распады

Процессы без изменения массового числа ядра, но с изменением зарядового (взаимные превращения протонов и нейтронов — внутринуклонные процессы):

- электронный бета распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^-$
 - позитронный бета-распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z-1) + e^+$
 - К-захват: $(A, Z) \rightarrow (A, Z-1) + \nu_e$
- $$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$
$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

Бета-распады

Процессы без изменения массового числа ядра, но с изменением зарядового (взаимные превращения протонов и нейтронов — внутринуклонные процессы):

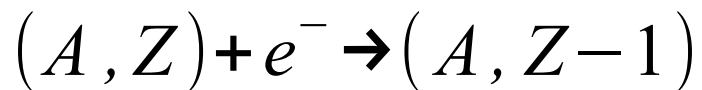
- электронный бета распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^{-}$
- позитронный бета-распад: $(A, Z) \rightarrow (A, Z-1) + e^{+}$
- К-захват: $(A, Z) + e^{-} \rightarrow (A, Z-1)$

Не путать с процессами внутренней конверсии:



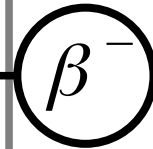
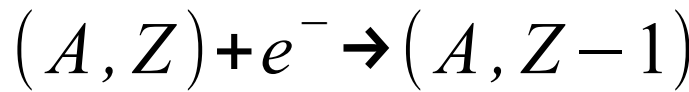
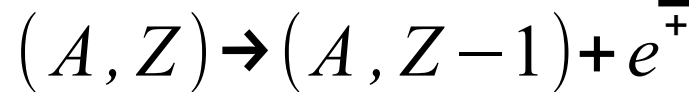
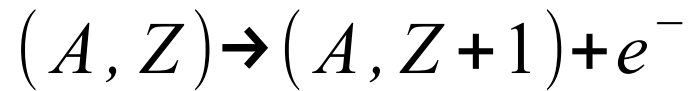
Энергетическое условие выгодности бета-распада

$$\Delta M c^2 = (M_n - M_p) c^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$



Энергетическое условие выгодности бета-распада

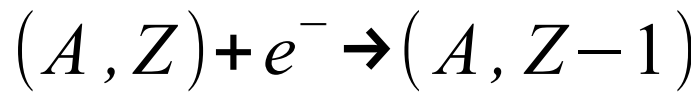
$$\Delta M c^2 = (M_n - M_p) c^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$



$$\begin{aligned}
 & N M_n c^2 + Z M_p c^2 - E_{\text{св}}(A, Z) > \\
 & > (N-1) M_n c^2 + (Z+1) M_p c^2 - \\
 & \quad - E_{\text{св}}(A, Z+1) + m_e c^2 \\
 & E_{\text{св}}(A, Z) < E_{\text{св}}(A, Z+1) + \Delta M c^2 - m_e c^2
 \end{aligned}$$

Энергетическое условие выгодности бета-распада

$$\Delta M c^2 = (M_n - M_p) c^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$



β^-

β^+

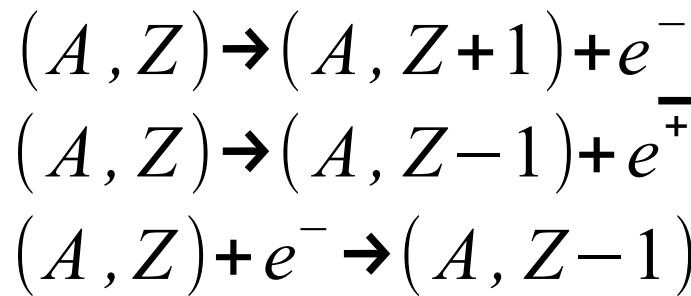
$$N M_n c^2 + Z M_p c^2 - E_{cв}(A, Z) > (N-1) M_n c^2 + (Z+1) M_p c^2 - E_{cв}(A, Z+1) + m_e c^2$$

$$E_{cв}(A, Z) < E_{cв}(A, Z+1) + \Delta M c^2 - m_e c^2$$

$$E_{cв}(A, Z) < E_{cв}(A, Z-1) - \Delta M c^2 - m_e c^2$$

Энергетическое условие выгодности бета-распада

$$\Delta M c^2 = (M_n - M_p) c^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$



β^-

β^+

K

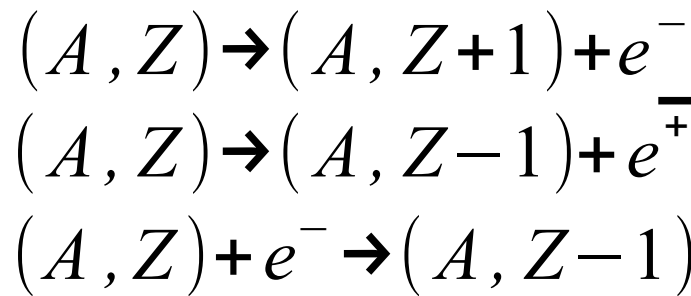
$$\begin{aligned} N M_n c^2 + Z M_p c^2 - E_{cb}(A, Z) &> \\ &> (N-1) M_n c^2 + (Z+1) M_p c^2 - \\ &\quad - E_{cb}(A, Z+1) + m_e c^2 \\ E_{cb}(A, Z) &< E_{cb}(A, Z+1) + \Delta M c^2 - m_e c^2 \end{aligned}$$

$$E_{cb}(A, Z) < E_{cb}(A, Z-1) - \Delta M c^2 - m_e c^2$$

$$E_{cb}(A, Z) < E_{cb}(A, Z-1) - \Delta M c^2 + m_e c^2$$

Энергетическое условие выгодности бета-распада

$$\Delta M c^2 = (M_n - M_p) c^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$



β^-

β^+

K

$$\begin{aligned} N M_n c^2 + Z M_p c^2 - E_{cb}(A, Z) &> \\ &> (N-1) M_n c^2 + (Z+1) M_p c^2 - \\ &\quad - E_{cb}(A, Z+1) + m_e c^2 \\ E_{cb}(A, Z) &< E_{cb}(A, Z+1) + \Delta M c^2 - m_e c^2 \end{aligned}$$

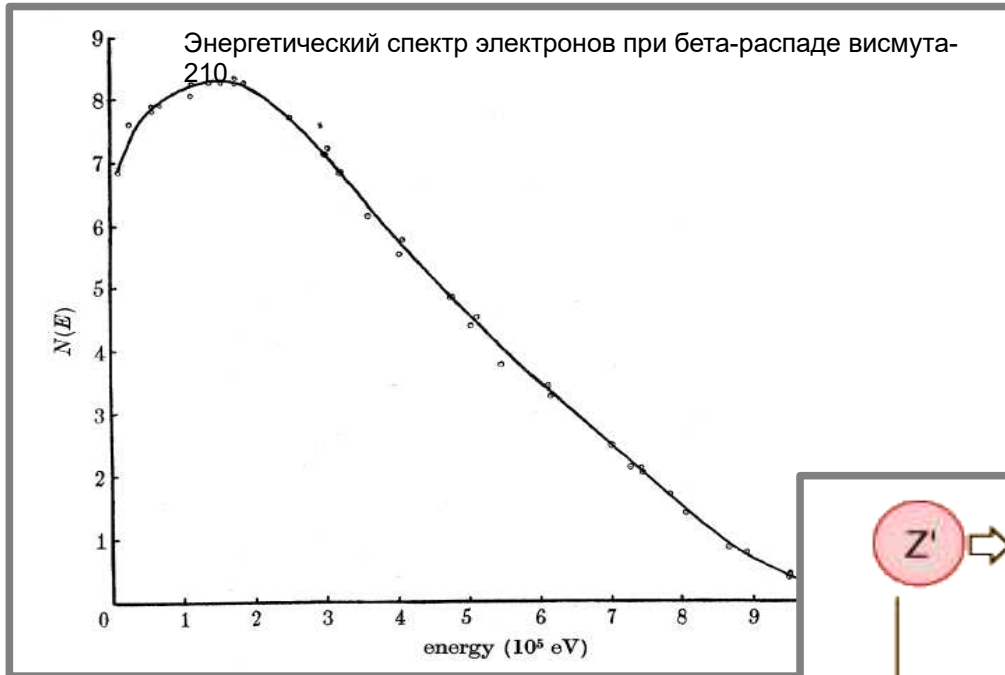
$$E_{cb}(A, Z) < E_{cb}(A, Z-1) - \Delta M c^2 - m_e c^2$$

$$E_{cb}(A, Z) < E_{cb}(A, Z-1) - \Delta M c^2 + m_e c^2$$

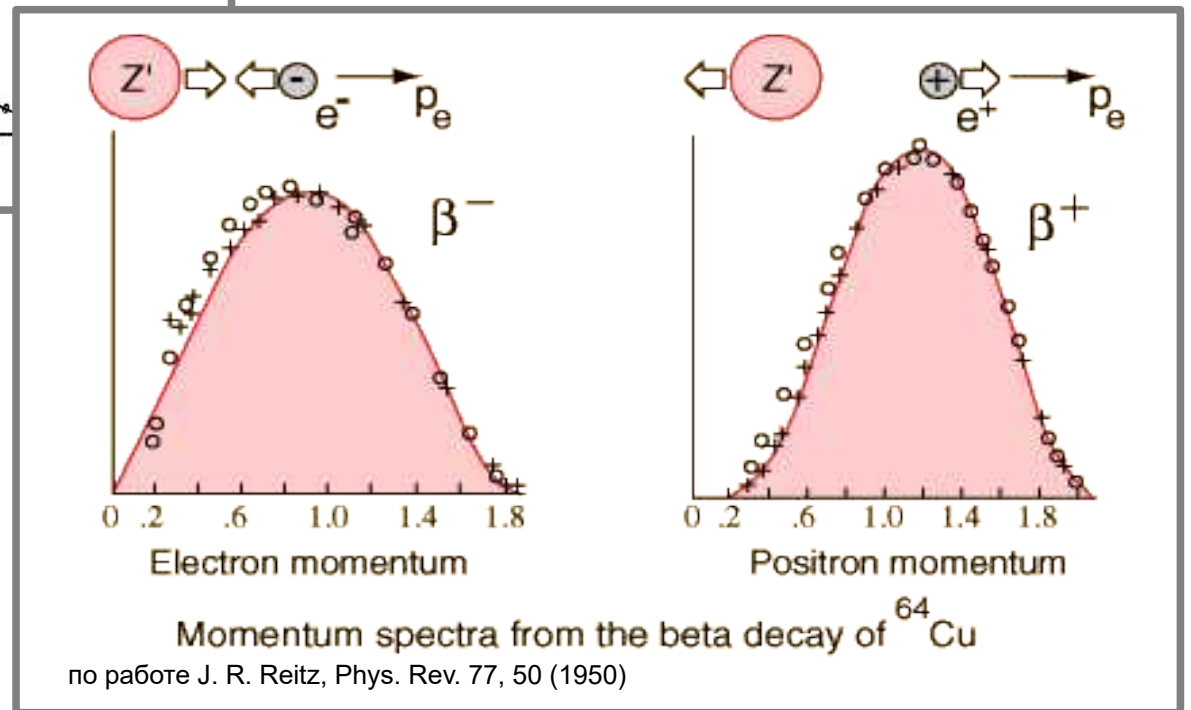
Сu-64:

- (39%) Zn-64 (электронный)
- (17%) Ni-64 (позитронный)
- (43%) Ni-64 (К-захват)

Спектры бета-распада



G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210],
Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 (1940)

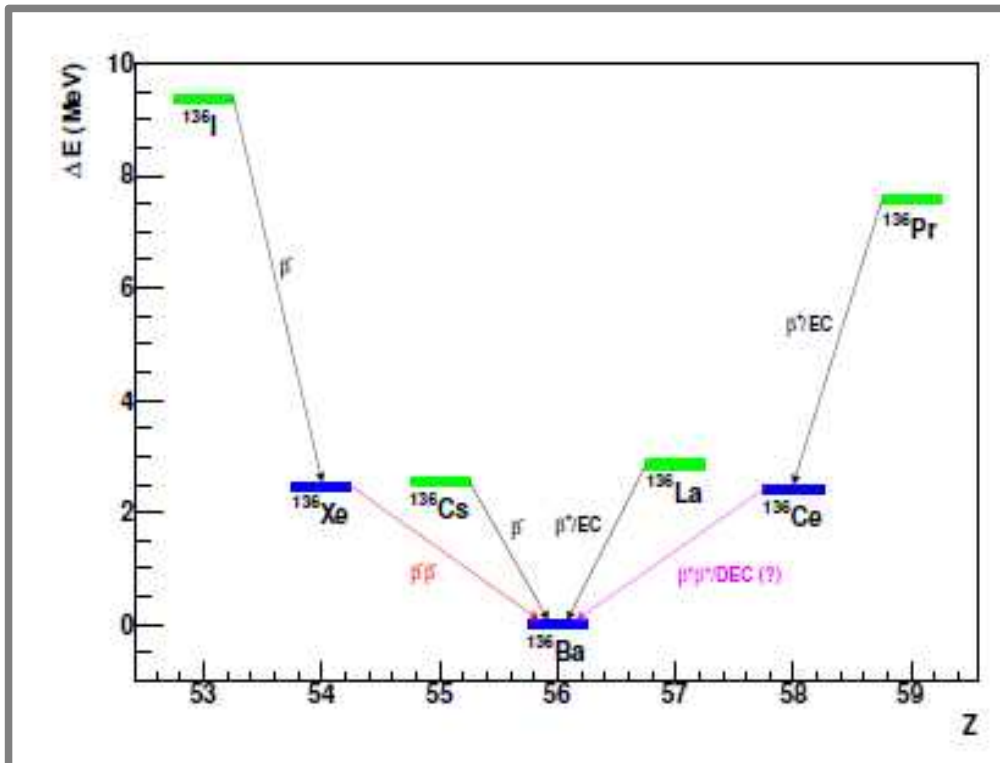


Двойной бета-распад

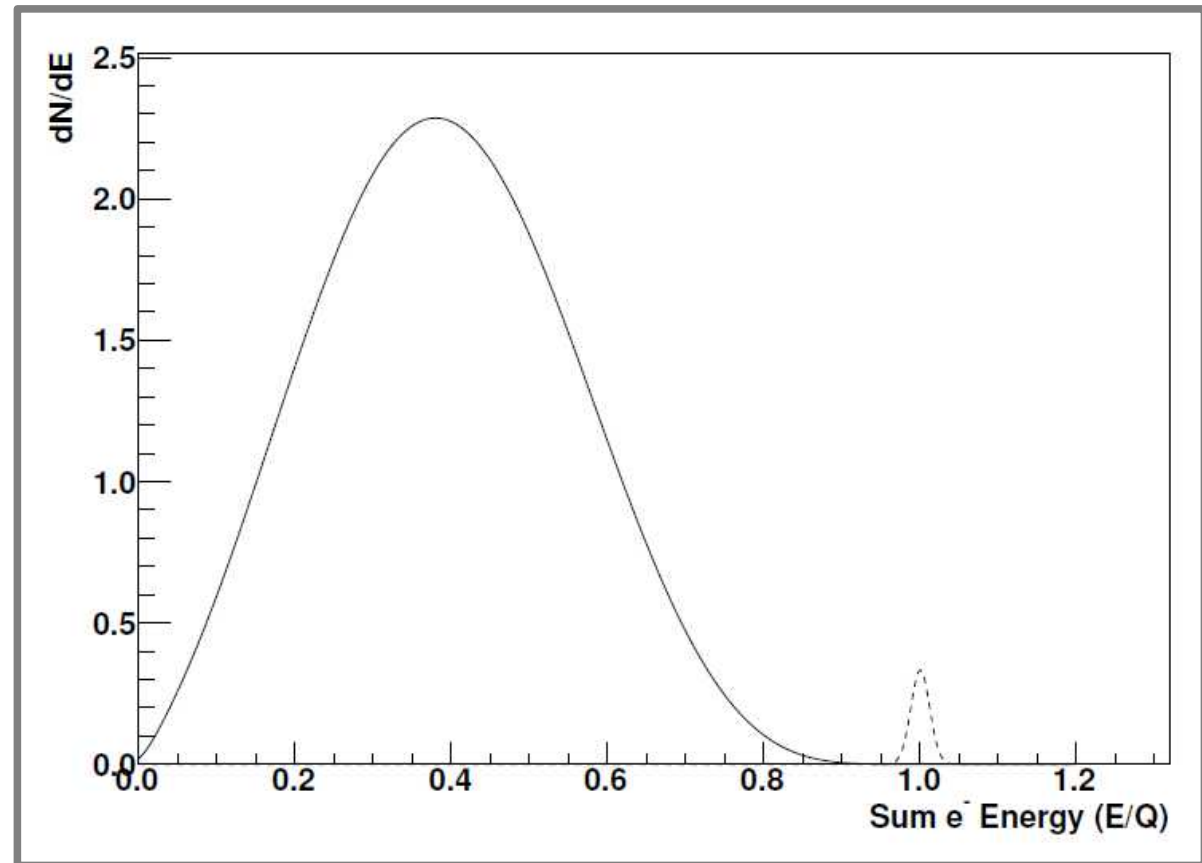
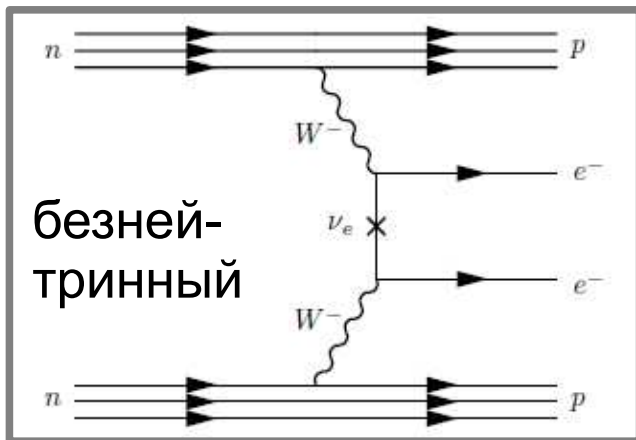
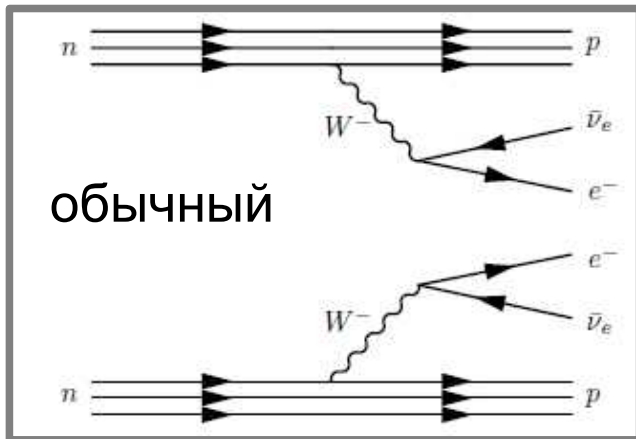
^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Gd ,
 ^{128}Te , ^{130}Te , ^{130}Ba , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U

если «нормальный» бета-распад энергетически невыгоден:

все известные случаи — чётно-чётные ядра!



Гипотеза: Безнейтринный двойной бета распад



Сравнение спектров суммарной энергии электронов в «обычном» двойном бета распаде (сплошная) и гипотетическом безнейтринном бета-распаде (пунктир)

Часть 6. Изотопная датировка

Изотопная датировка

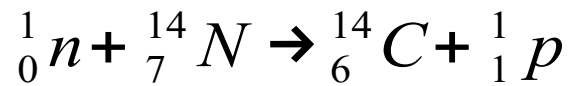
Радиоуглеродный анализ (до ~10,000 лет)

Либби
(химия,
1960)



Геологическая датировка (до миллиардов лет):
гелиевый и аргоновый методы
рубидий-стронциевая датировка

“Аксиоматика” радиоуглеродного метода

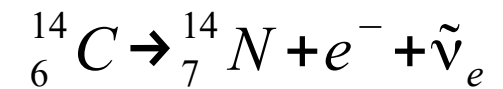


7.5 кг/год

всего: 75 тонн С-14

образование углерода-14 в атмосфере
под действием космических лучей

Углерод-14 распадается с периодом
полураспада 5730 лет



Идеальная ситуация:

$$\frac{N_{14}}{N_{12}} = \left(\frac{N_{14}}{N_{12}} \right)_{t=0} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Поправки и калибровки

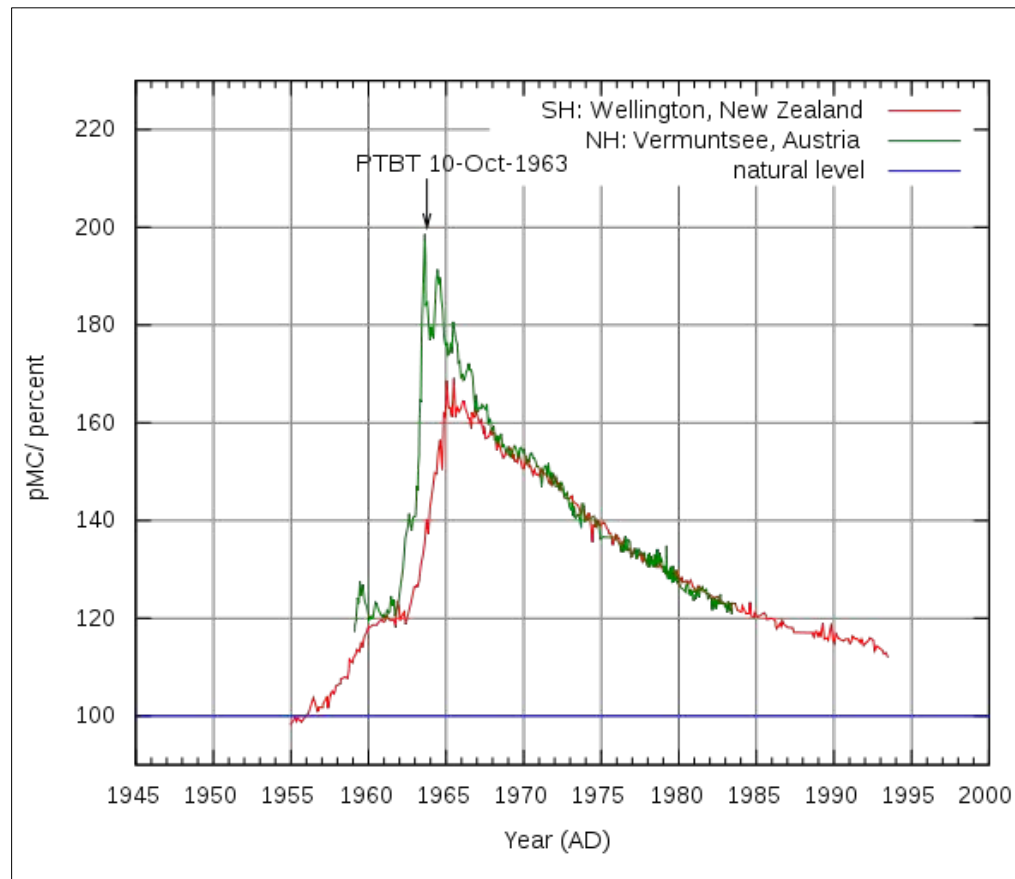
Антропогенный фактор:

- 1) Сжигание “старого” углерода
- 2) Ядерные испытания

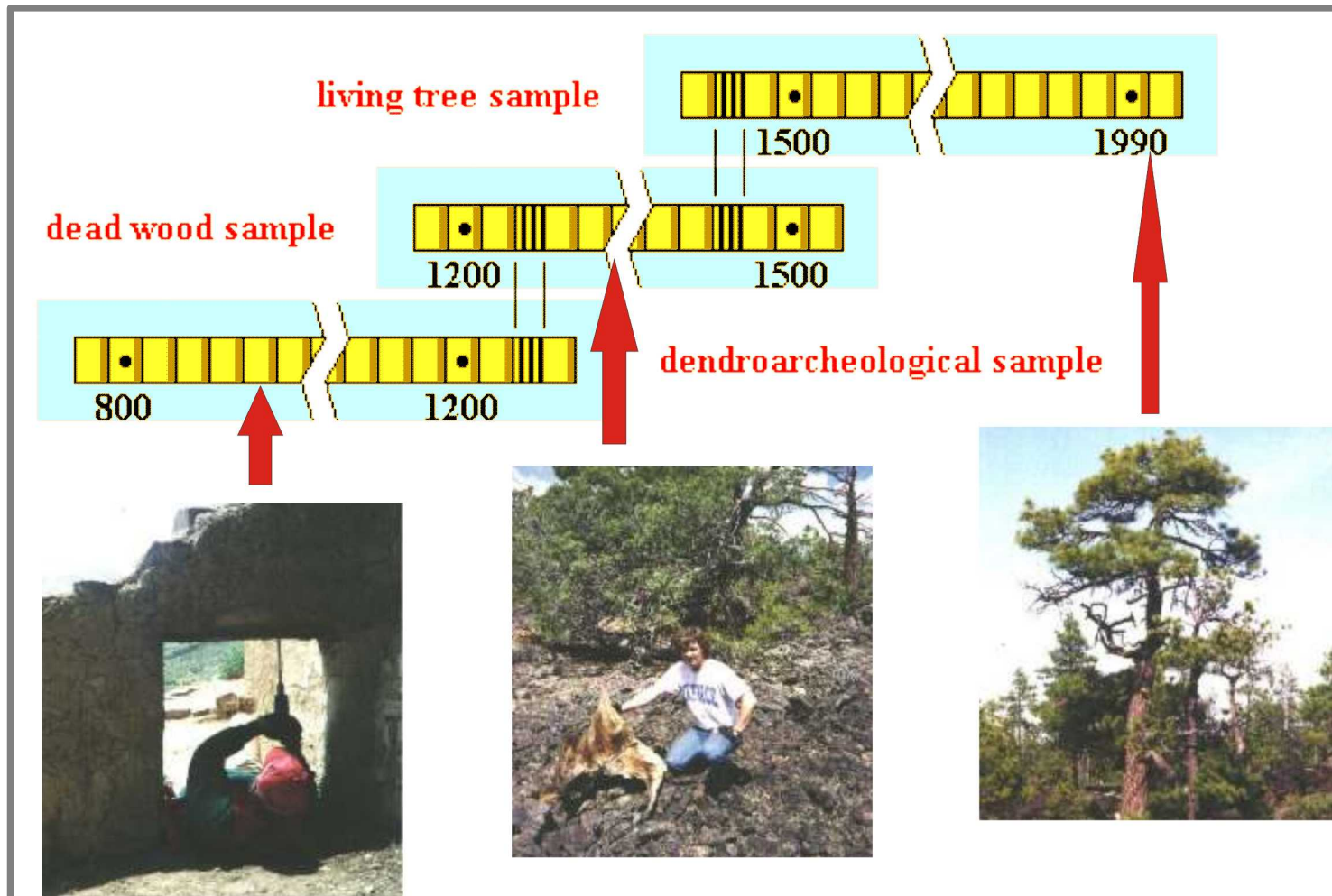
Природные факторы:

- 1) Изменения природного фона (скорости образования углерода-14)
- 2) особенности локального распределения (широта, близость моря итд.)

wikipedia.org, Radiocarbon dating, http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating



Дендрохронология



Геологическая датировка

Шкала времен – миллионы и миллиарды лет,
радиоуглеродный метод – слишком “быстрый”!

Геологическая датировка

Шкала времен – миллионы и миллиарды лет, радиоуглеродный метод – слишком “быстрый”!

Простейшее: накопление гелия (Резерфорд) и аргона-40 в минералах.

Практически используется калий-аргоновый метод, в том числе на марсоходе (<https://mars.nasa.gov/news/nasa-curiosity-first-mars-age-measurement-and-human-exploration-help/>, результат: возраст пород от 3.9 до 4.6 млрд.лет)

калий-40 (период полураспада 1.248 млрд.лет) с вероятностью 11% распадается в стабильный аргон-40 (позитронный бета-распад), с вероятностью 89% - в стабильный кальций-40 (электронный бета распад) . В природе — 0.01%

Рубидий-стронциевый метод

$^{87}\text{Rb} \Rightarrow ^{87}\text{Sr}$ (48.81 млрд.лет).

Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.

Рубидий-стронциевый метод

$87\text{Rb} \Rightarrow 87\text{Sr}$ (48.81 млрд.лет).
Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.

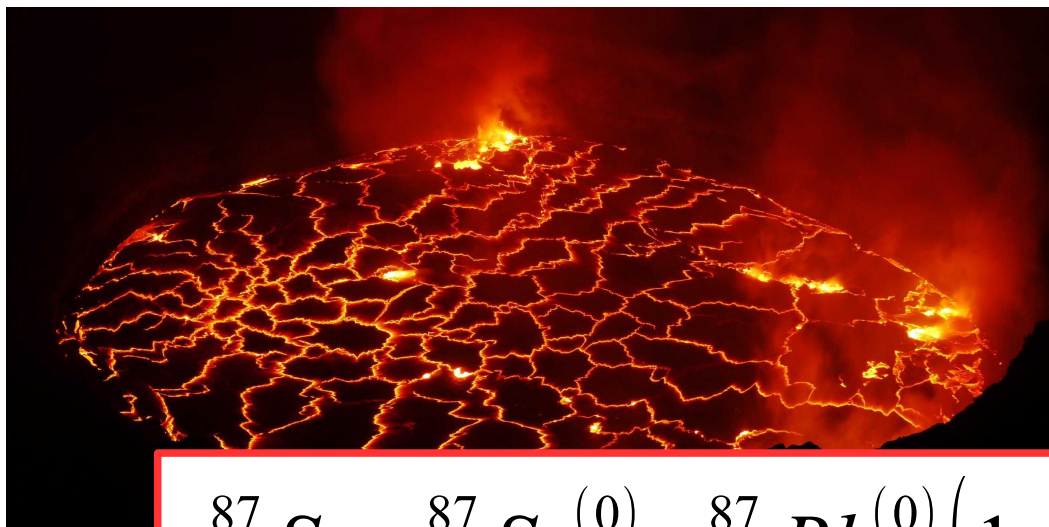


<https://www.thesun.co.uk/news/5183176/volcano-explorer-lava-lake-italy-etna-stromboli/>

На времени формирования горной породы из расплава проявляется кристаллизационное фракционирование (рубидиевые соединения кристаллизуются несколько дольше), изотопное фракционирование для стронция не существенно.

Рубидий-стронциевый метод

$^{87}\text{Rb} \Rightarrow ^{87}\text{Sr}$ (48.81 млрд.лет).
Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.



<https://www.italy-etna.com>

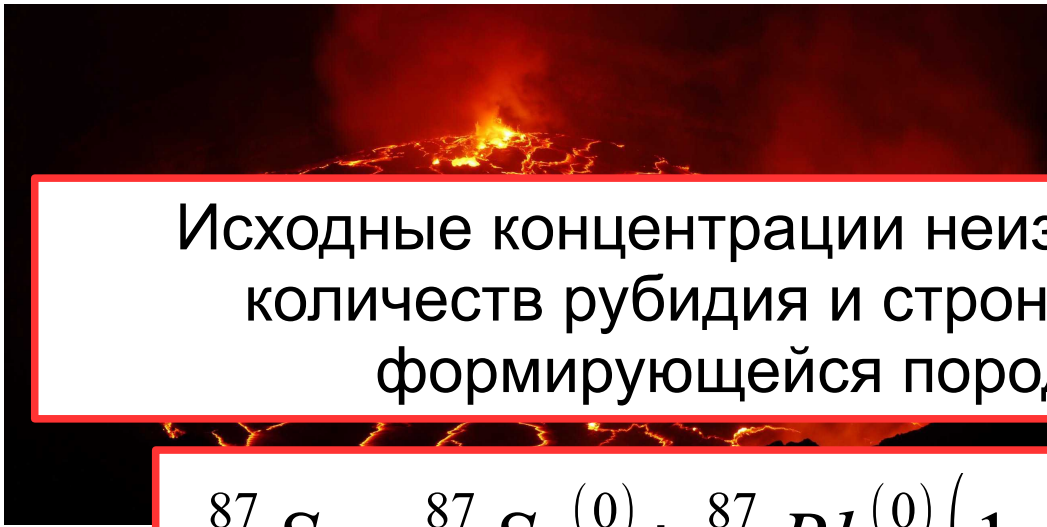
$$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}^{(0)} + ^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

На времени формирования горной породы из расплава проявляется кристаллизационное фракционирование (рубидиевые соединения существуют несколько изотопное фракционирование для которого не существенно.

Рубидий-стронциевый метод

$^{87}\text{Rb} \Rightarrow ^{87}\text{Sr}$ (48.81 млрд.лет).
Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.



На времени формирования горной породы из расплава

Исходные концентрации неизвестны, но отношение количеств рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное

рубидиевые соединения зуются несколько изотопное ирование для не существенно.

$$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}^{(0)} + ^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

«Математика» рубидий-стронциевого метода

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left(2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

↑
измеряем
сейчас

↖ ↗
постоянно в
серии образцов

«Математика» рубидий-стронциевого метода

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left(2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

↑
измеряем
сейчас

←
постоянно в
серии образцов

«Математика» рубидий-стронциевого метода

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left(1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

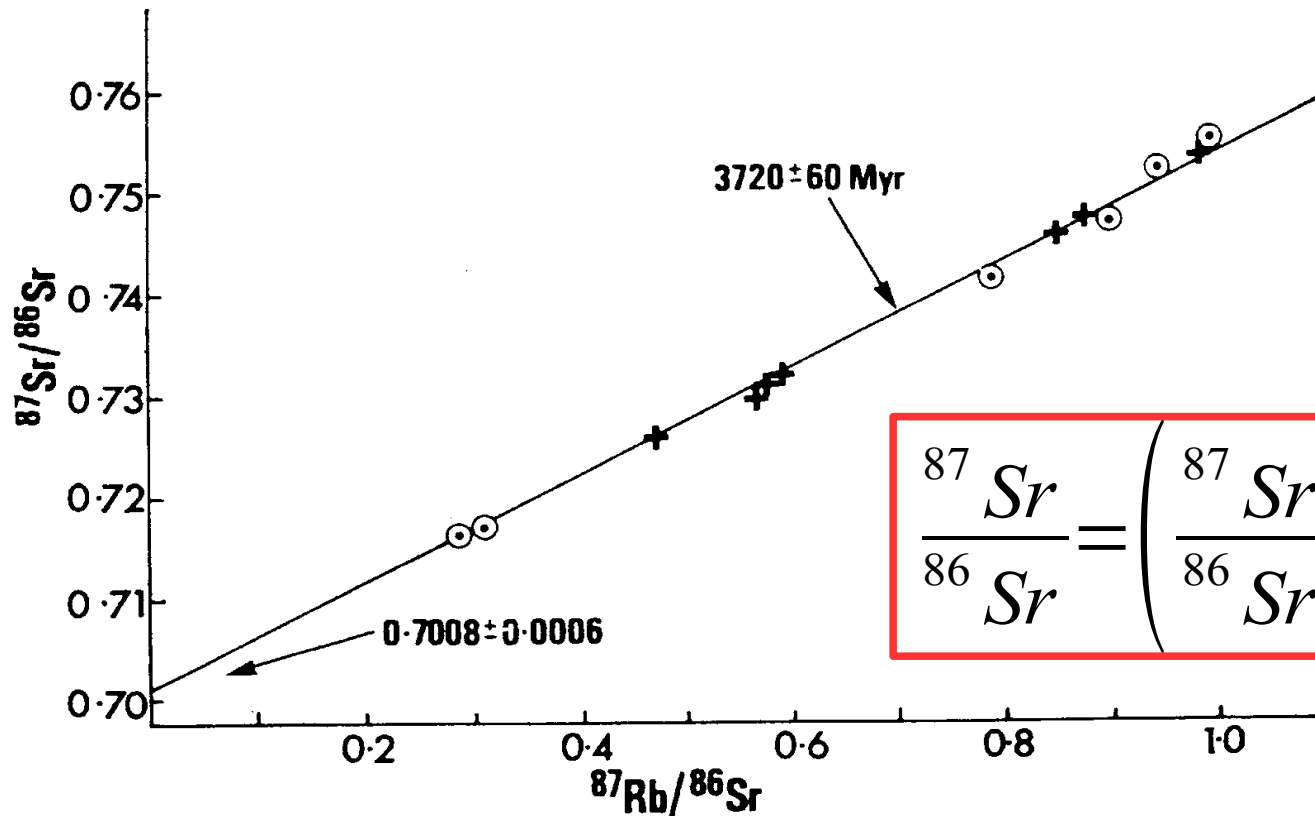
$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left(2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

↑
измеряем
сейчас

**Построенная по серии
(с разным стартовым составом рубидия и
стронция) зависимость должна быть
прямой!!!**

Примеры применения

Fig. 2 Rb–Sr whole rock isochron plot for Amitsoq gneisses from Isua. \odot , Gneissic veins cutting supracrustals (Group 1, Table 1) and Gneisses far away from contact with supracrustals (Group 2, Table 1). +, Gneisses from near contact with supracrustals (for full details and analytical data, see ref. 6).



$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left(2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

Ещё примеры (Sm-Nd)

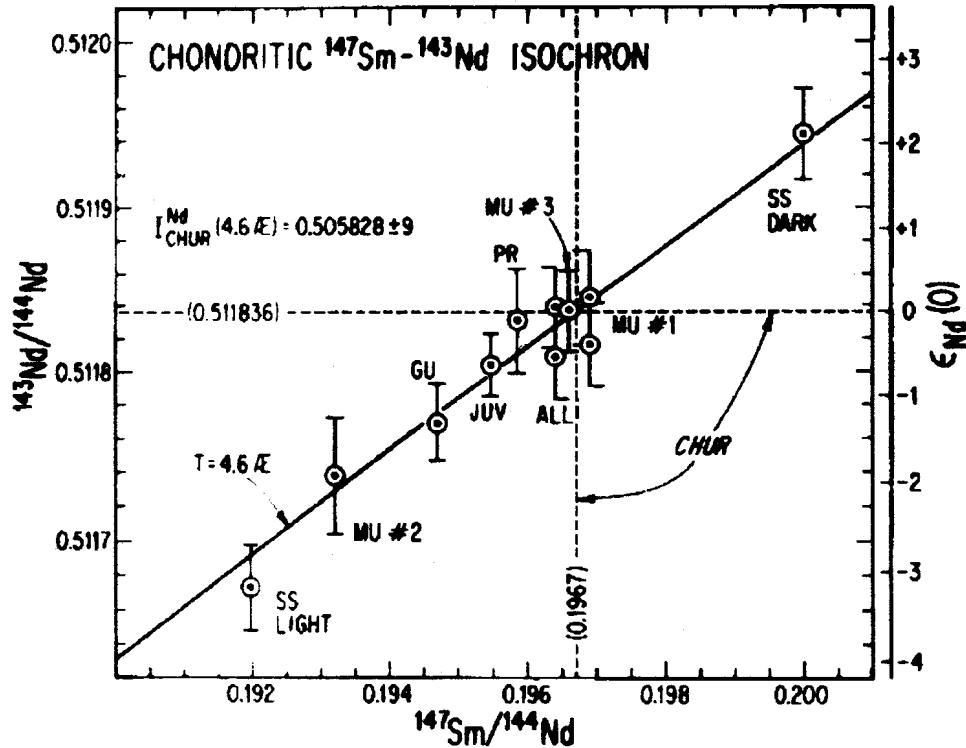
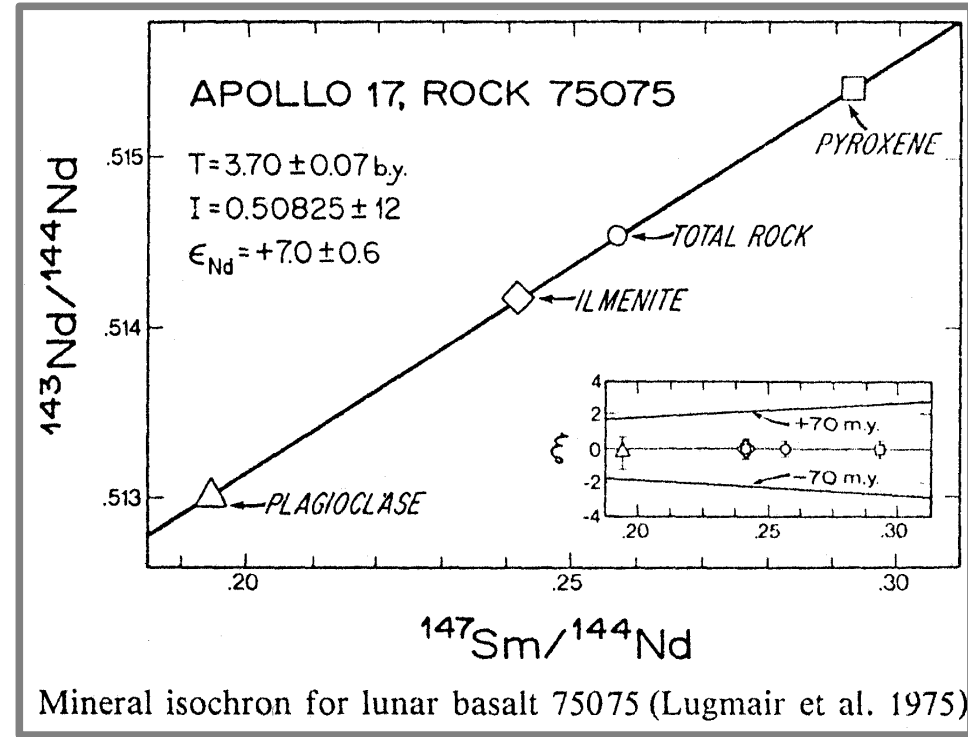


Fig. 2. Sm-Nd evolution diagram for chondrite samples and Juvinas. A reference line with a slope of 4.6 AE is shown. The dashed lines represent the new values selected for average chondrites (CHUR).

Jacobsen S.B., Wasserburg G.J., Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139 (1980)



Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология., http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология

Основное на лекции

