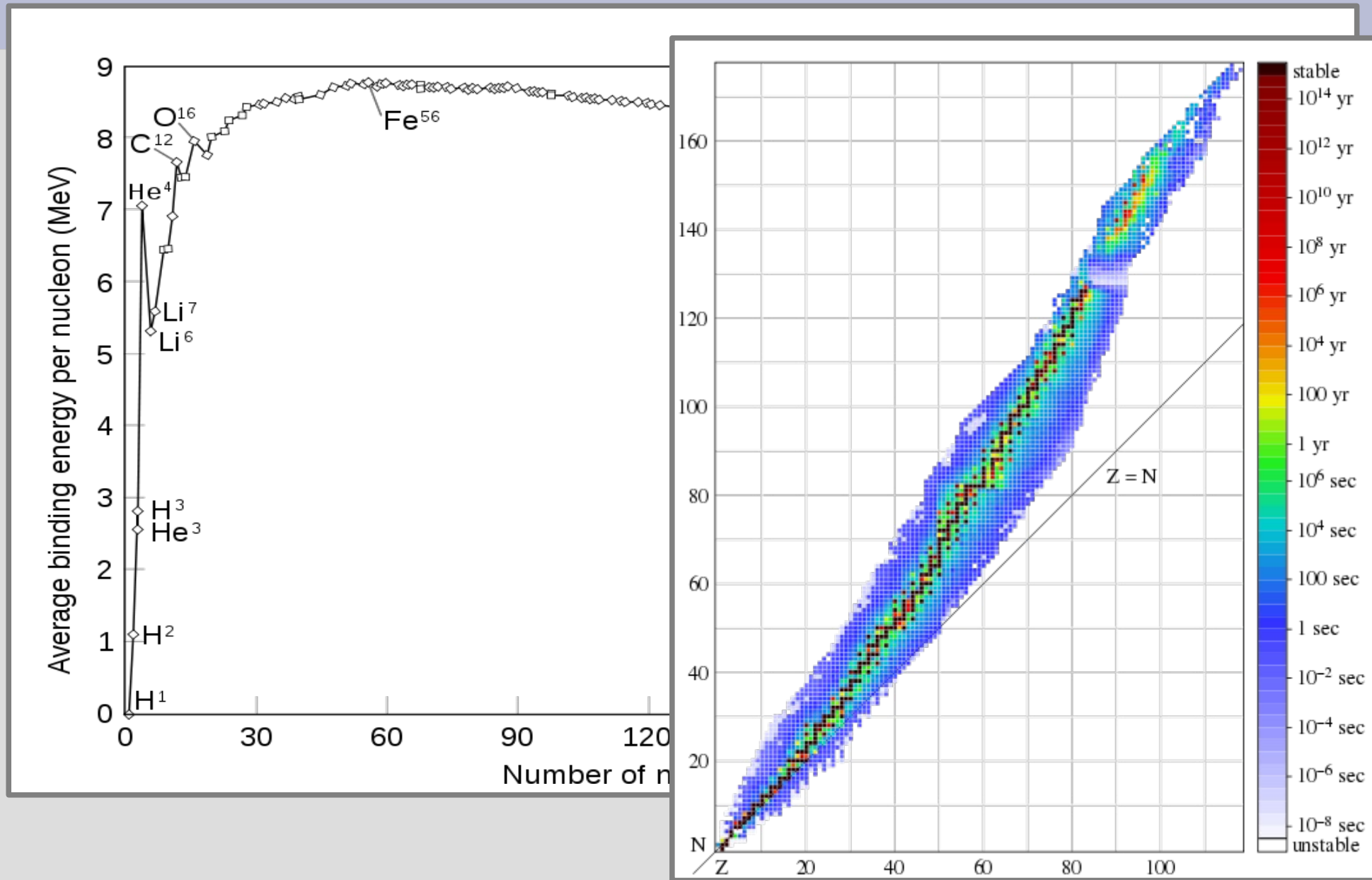


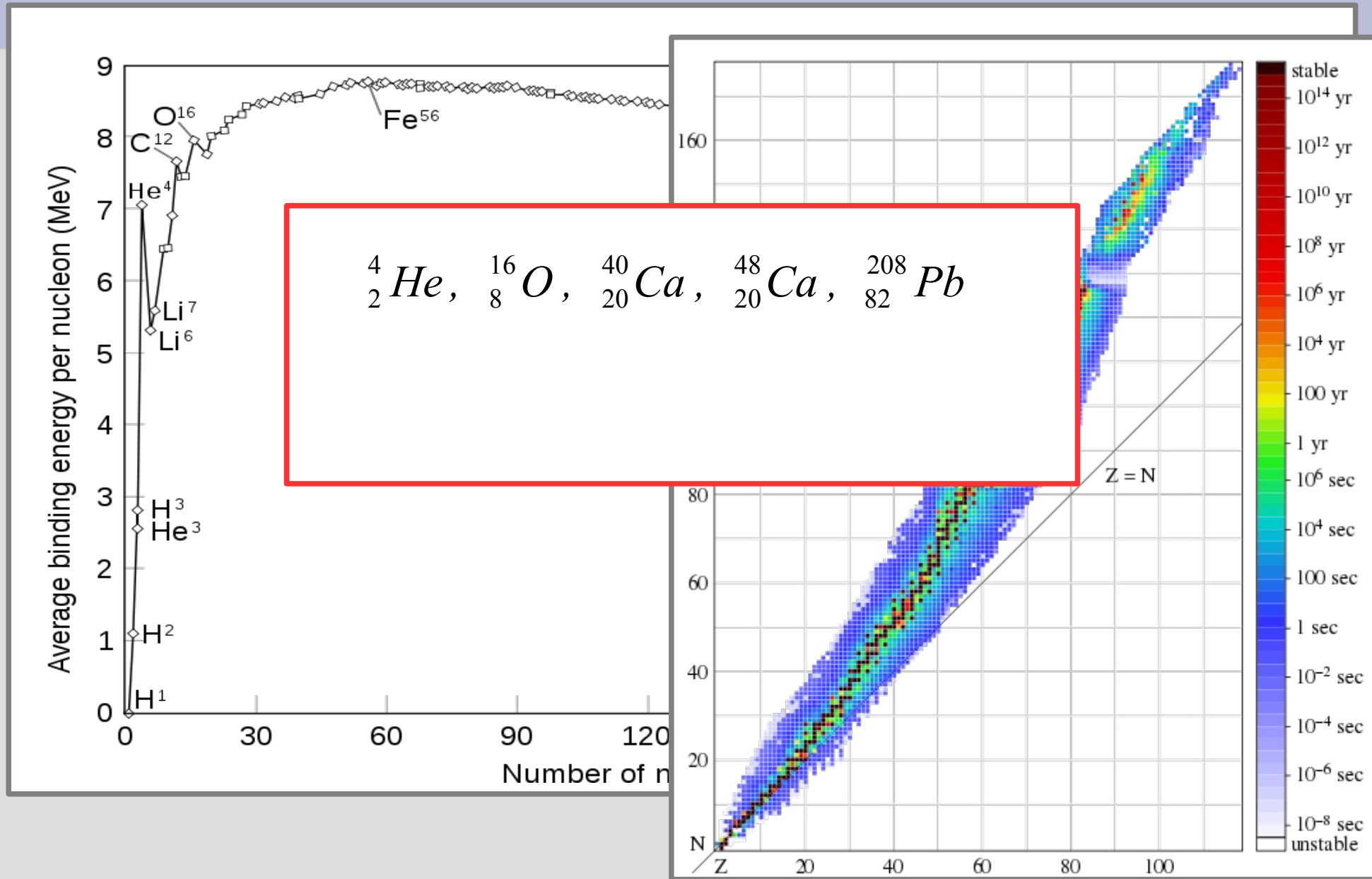
Лекция 11.

Оболочечная модель строения ядра,
«магические» ядра. Возбужденные
состояния ядер. Реакции распада.

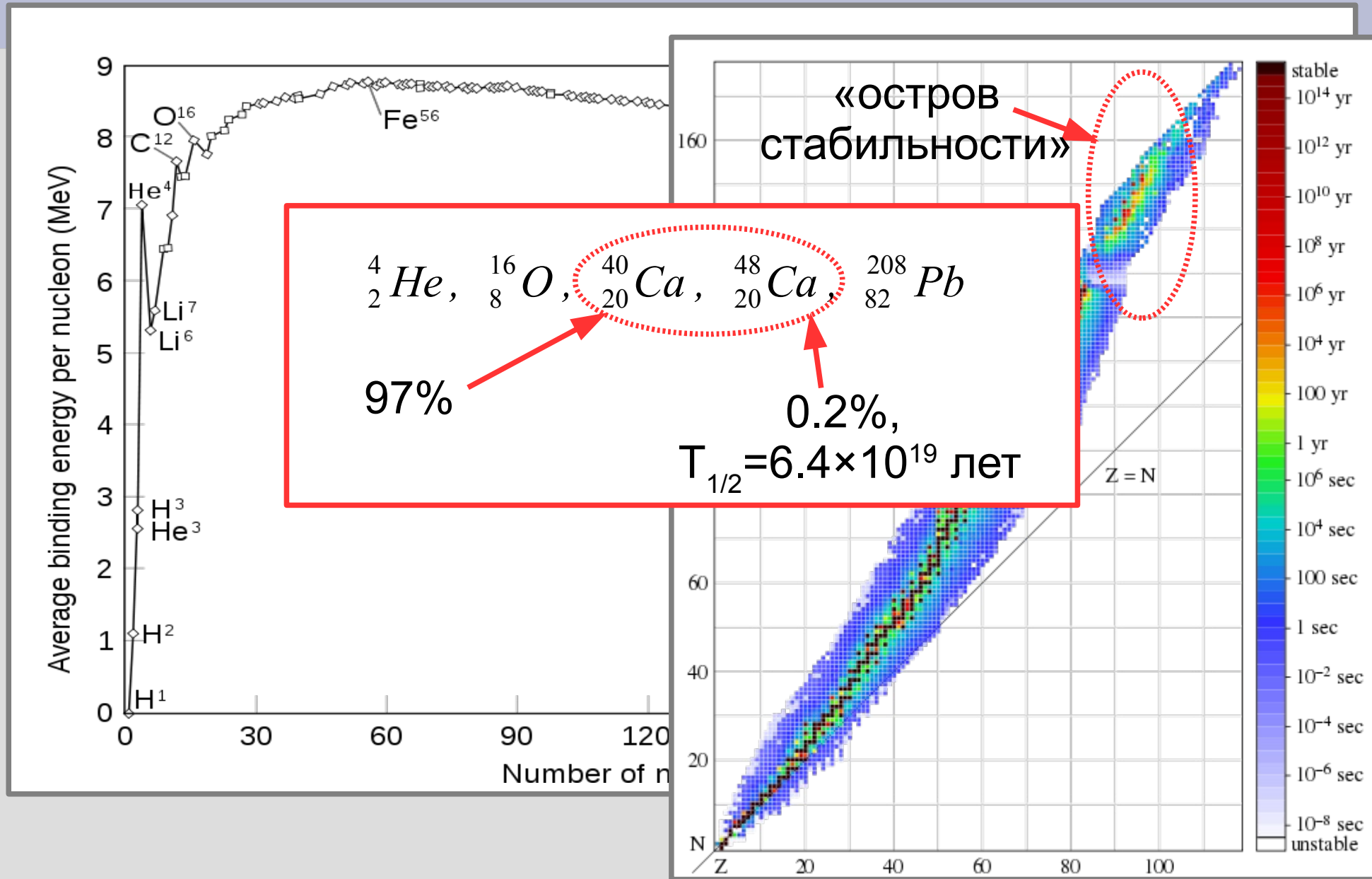
«Магические» ядра



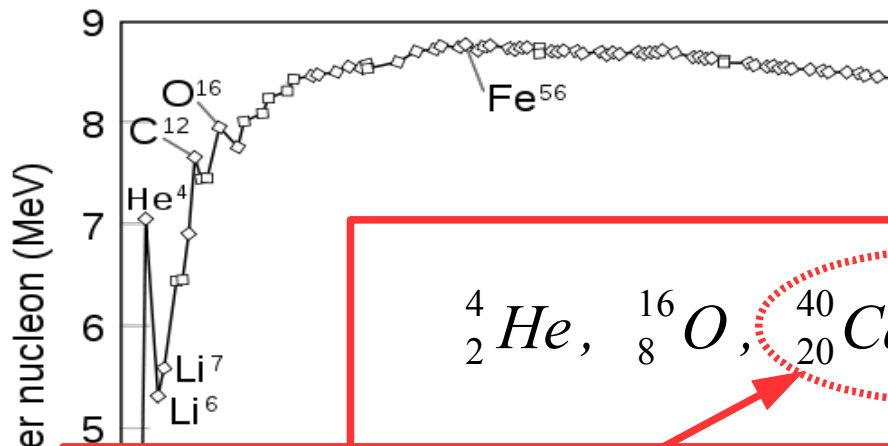
«Магические» ядра



«Магические» ядра



«Магические» ядра



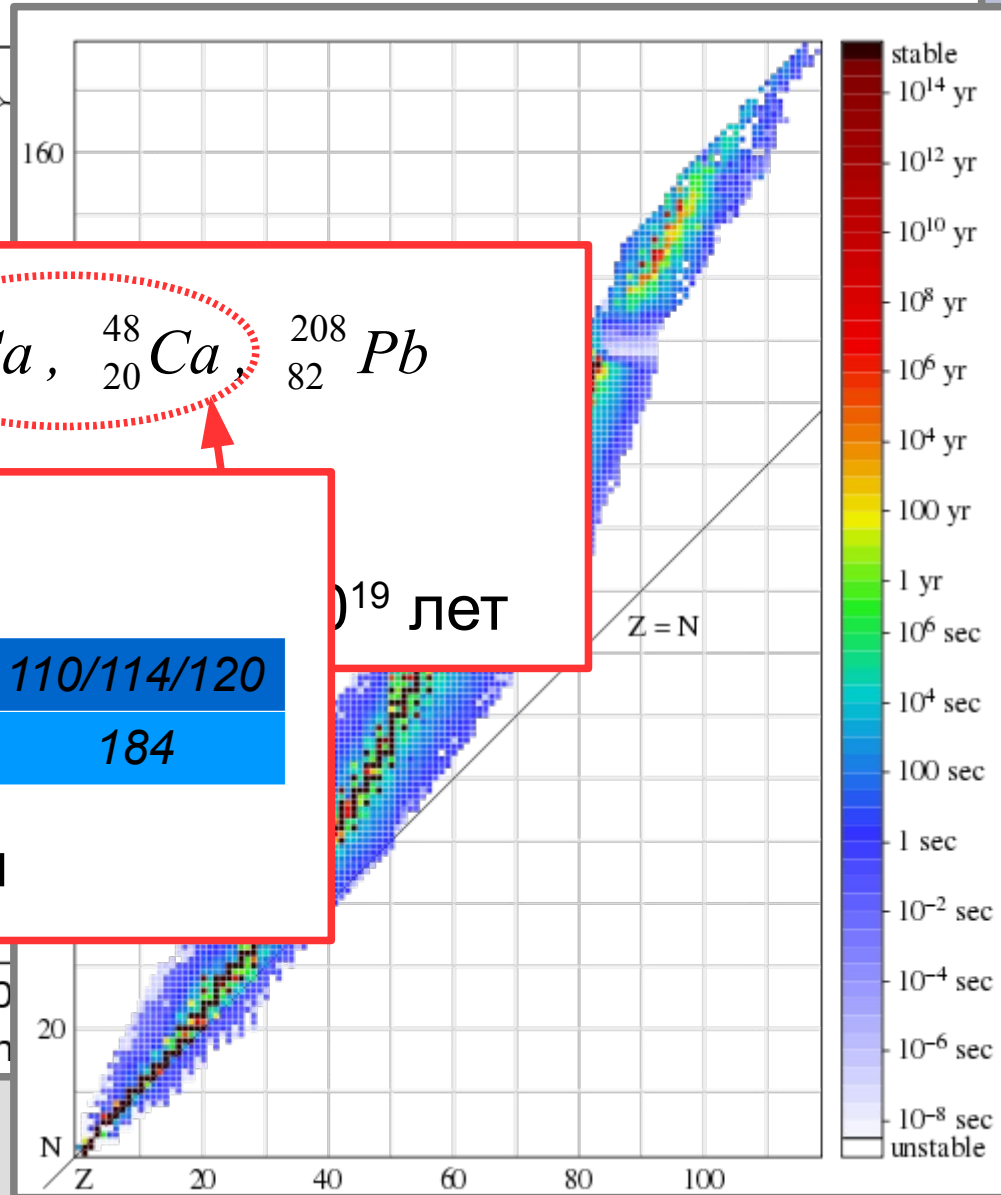
${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$

«Магические числа»

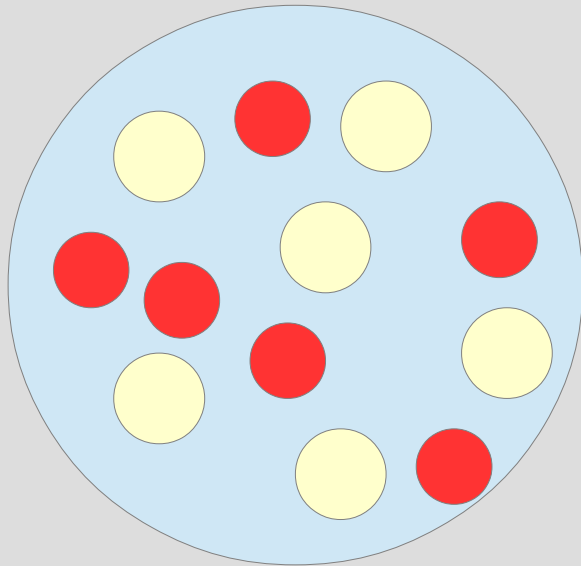
Z	2	8	20	28	50	82		110/114/120
N	2	8	20	28	50	82	126	184

максимумы энергии связи

19 лет



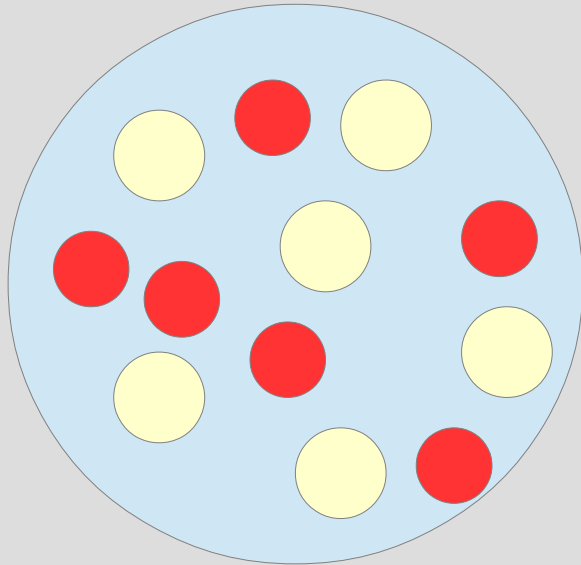
Оболочечная модель, "магические числа"



Майер, Енсен
(1963)



Оболочечная модель, “магические числа”

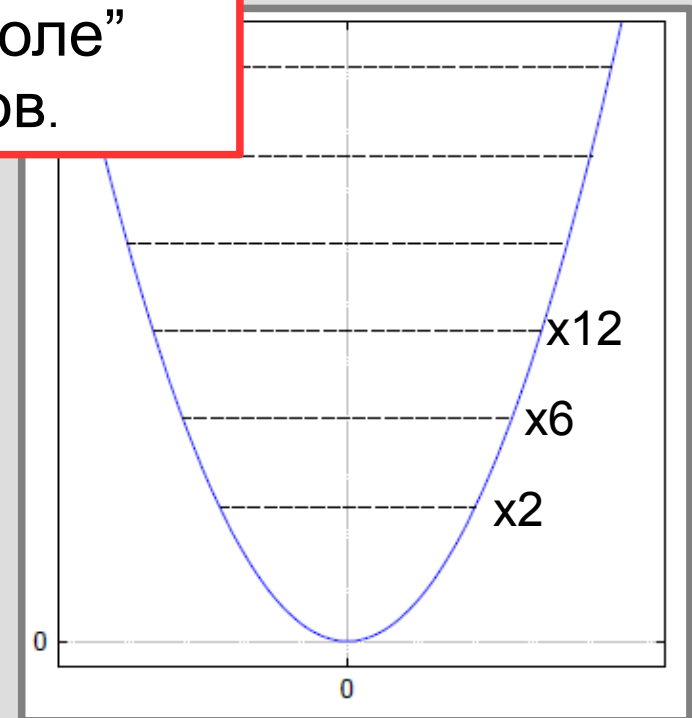


Майер, Енсен
(1963)



Один нуклон в
“эффективном поле”
других нуклонов.

$$U_{eff} = k \frac{r^2}{2}$$
$$E_n = \hbar \omega \left(N + \frac{3}{2} \right)$$



Трёхмерный осциллятор в сферических координатах

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + U(r) \Psi + \frac{\hbar^2}{2mr^2} \hat{l}^2 \Psi = E \Psi$$

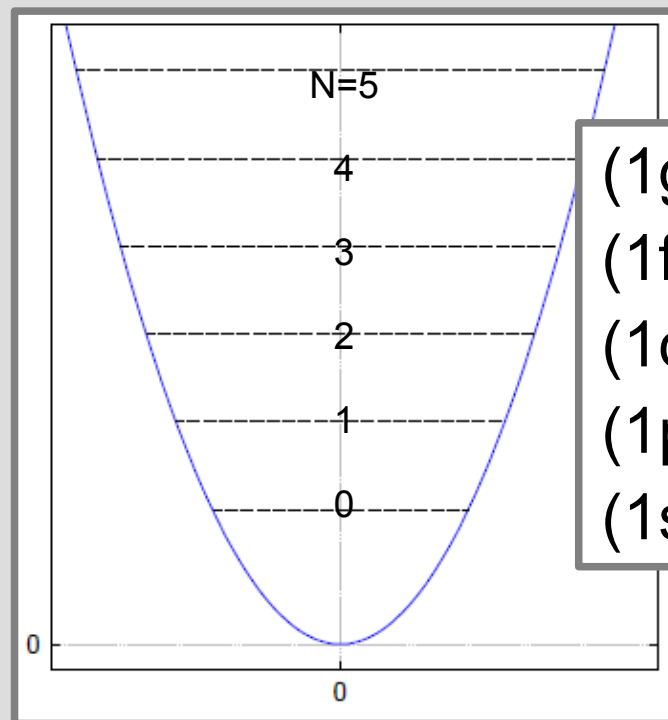
$$\Psi = \frac{\xi(r)}{r} \times Y_{lm}(\Theta, \phi)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \xi'' + \left(U(r) + \frac{l(l+1)}{r^2} \right) \xi = E \xi$$

$$\Psi(r, \Theta, \phi) = \Psi_{n_r, l, m}$$

$$E = E(n_r, l)$$

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



(1g, 2d, 3s)
 (1f, 2p)
 (1d, 2s)
 (1p)
 (1s)

вырождение по L для строго гармонического осциллятора

Оболочечная модель. "магические"

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

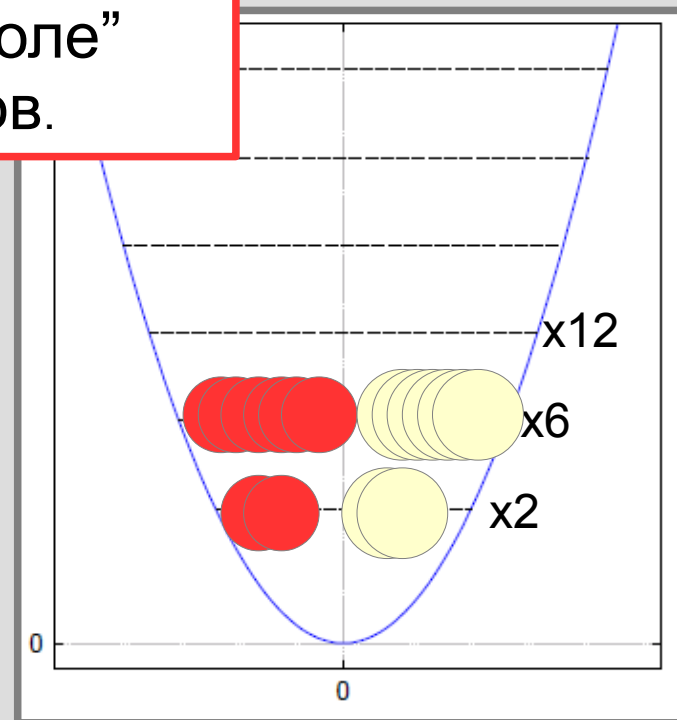
:

Майер, Енсен
 (1963)



ОН В
 м поле"
 ОНОВ.

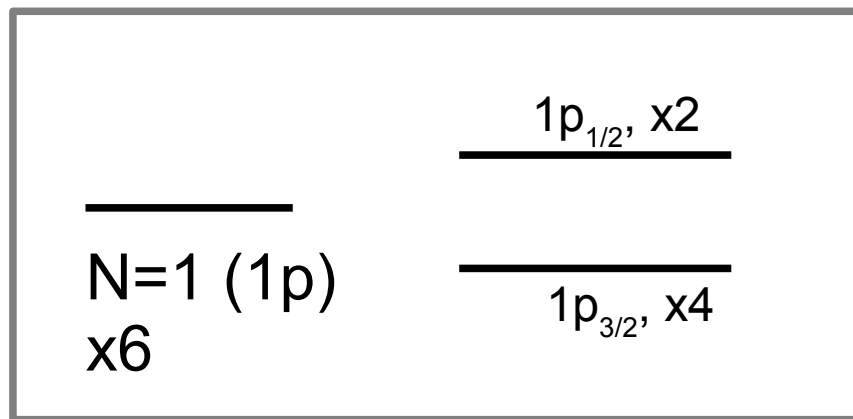
$$E_n = n\omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$



Оболочечная модель. “магические

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

углерод-12? Проявление “тонкой
 структуры”:

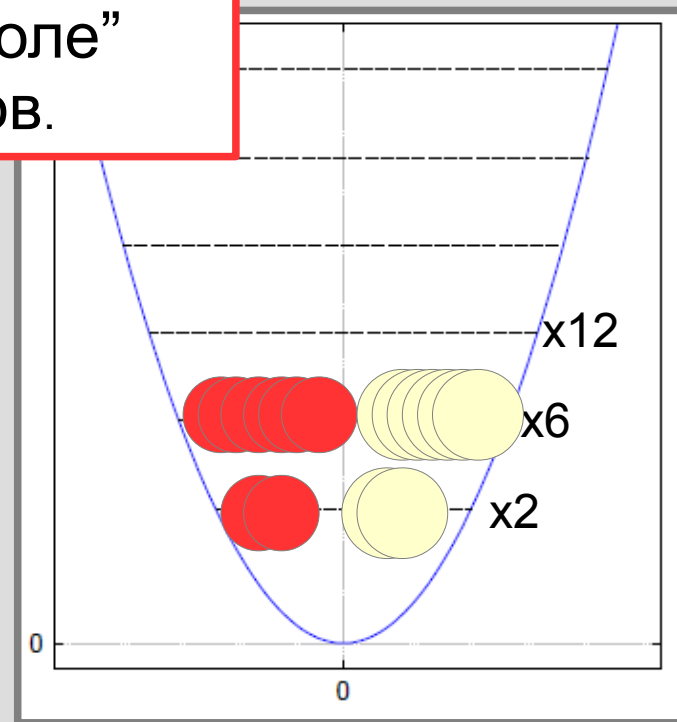


$$E_n = n\omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

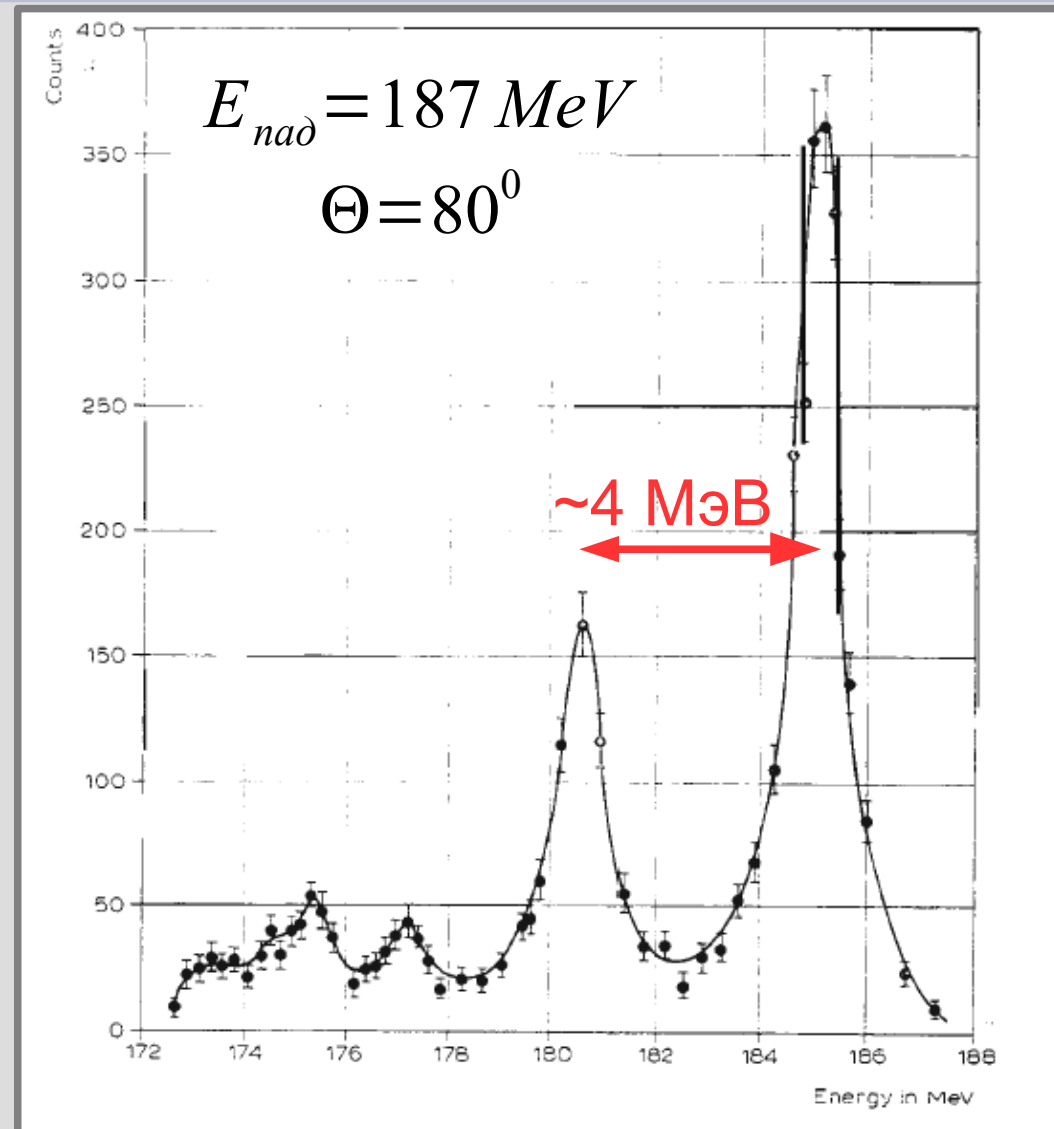
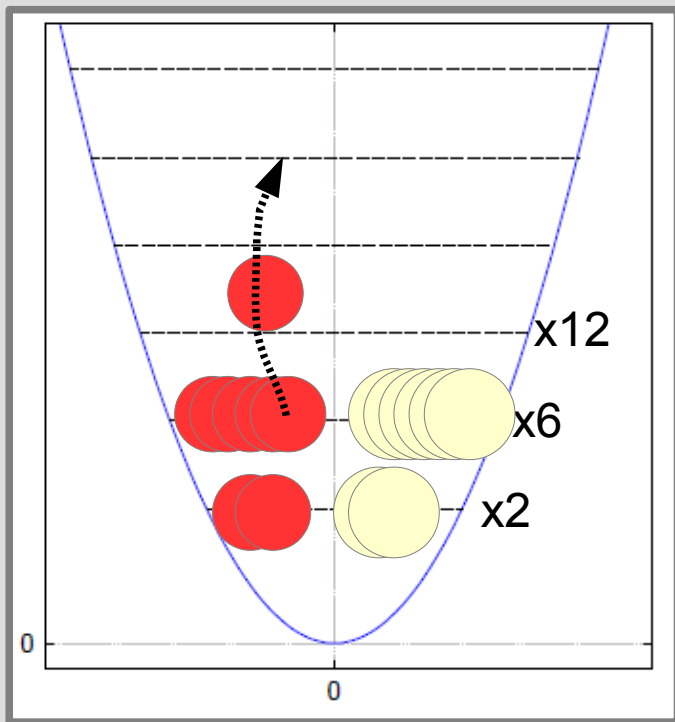
Майер, Енсен
 (1963)



ОН В
 м поле”
 ОНОВ.



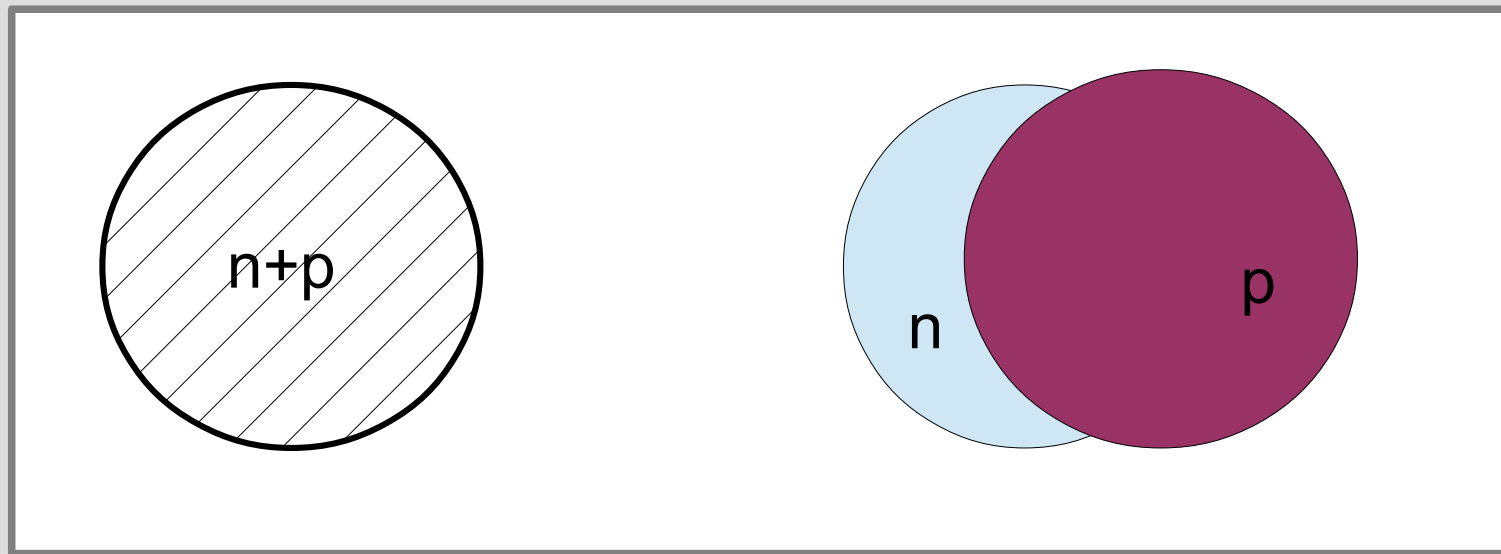
Одночастичные возбужденные состояния ядра



Коллективные возбужденные СОСТОЯНИЯ

Гигантский резонанс

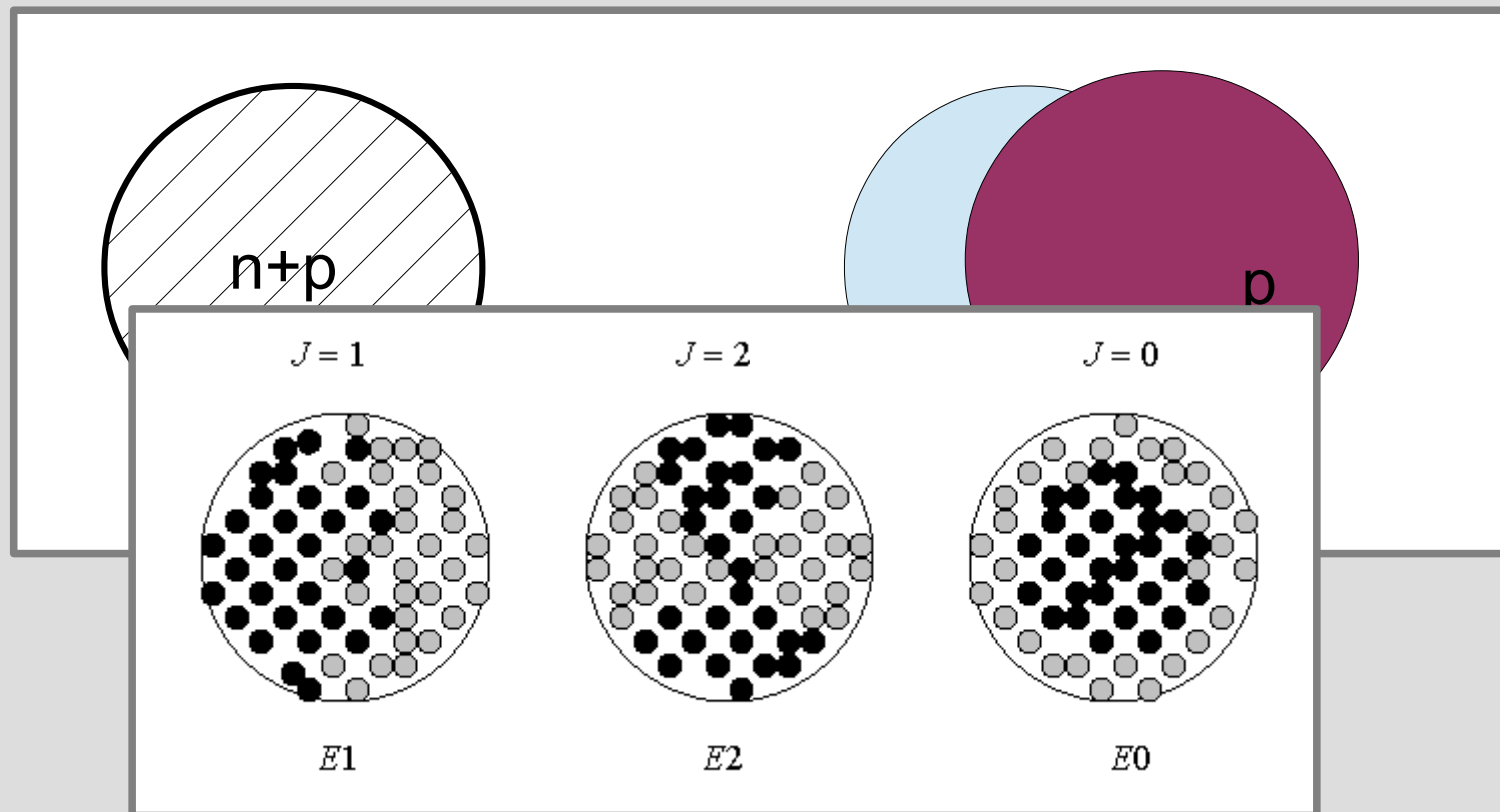
(подробно - Ишханов и Капитонов «Гигантский дипольный резонанс атомных ядер»,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/gdr/index.html>):



Коллективные возбужденные СОСТОЯНИЯ

Гигантский резонанс

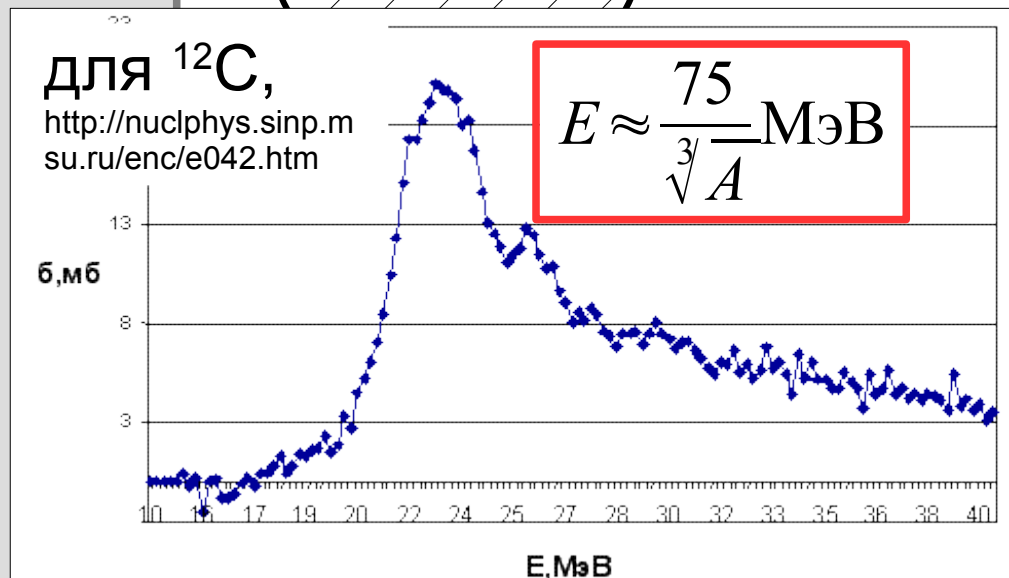
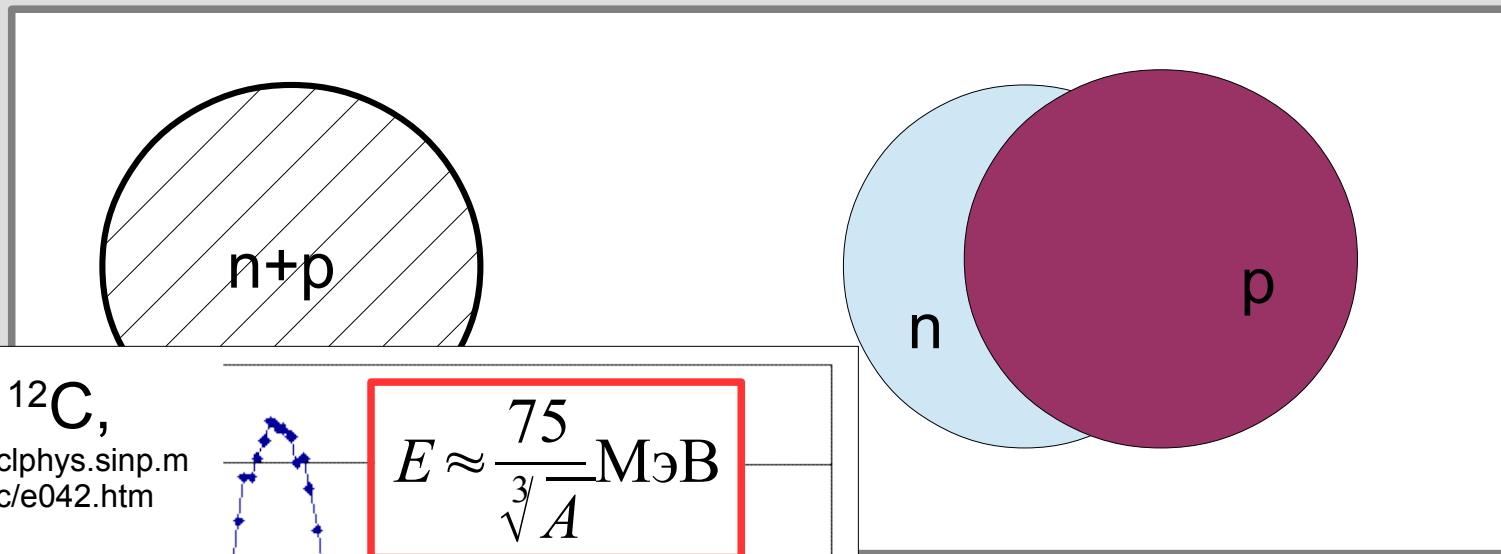
(подробно - Ишханов и Капитонов «Гигантский дипольный резонанс атомных ядер»,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/gdr/index.html>):



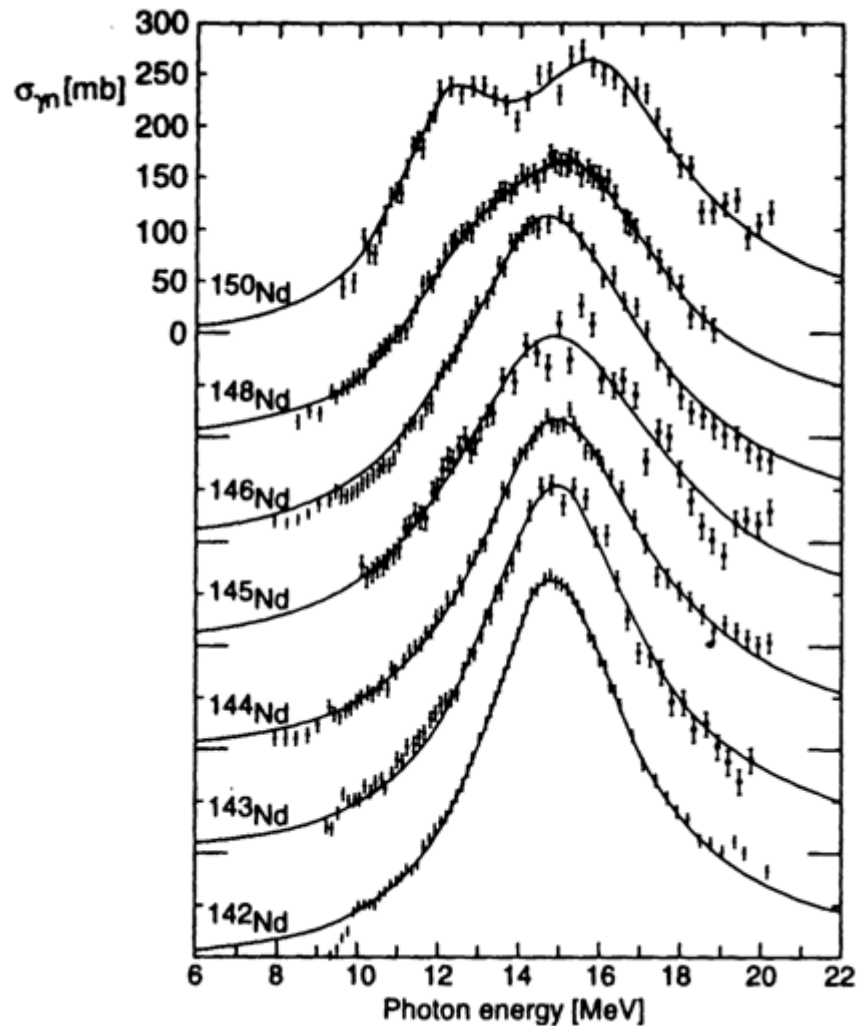
Коллективные возбужденные СОСТОЯНИЯ

Гигантский резонанс

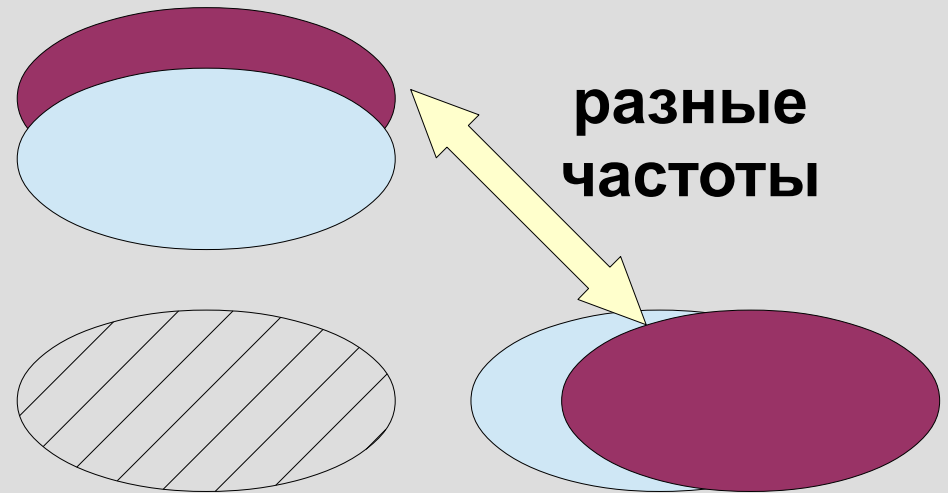
(подробно - Ишханов и Капитонов «Гигантский дипольный резонанс атомных ядер»,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/gdr/index.html>):



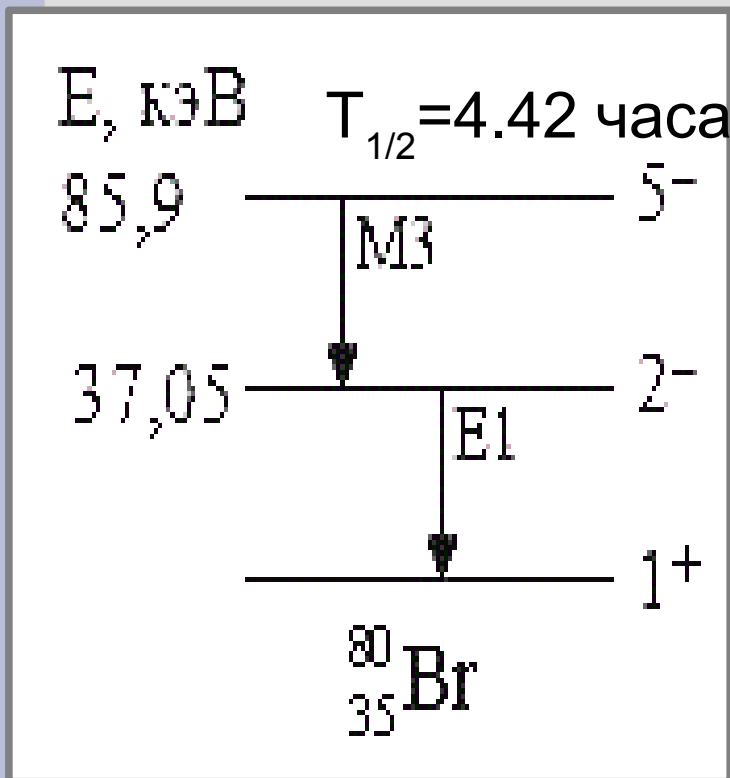
Несферичность некоторых ядер



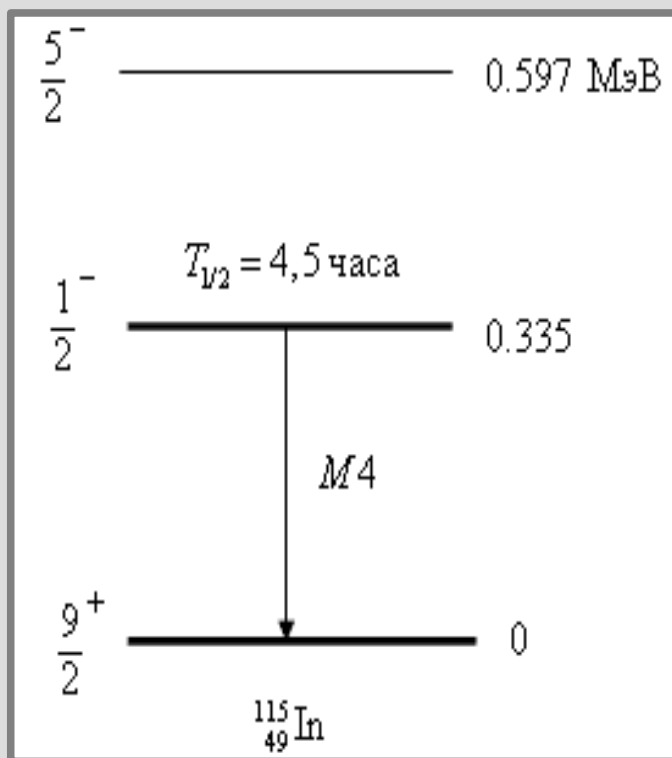
Эксперимент:
расщепление гигантского
дипольного резонанса для
изотопов неодима.



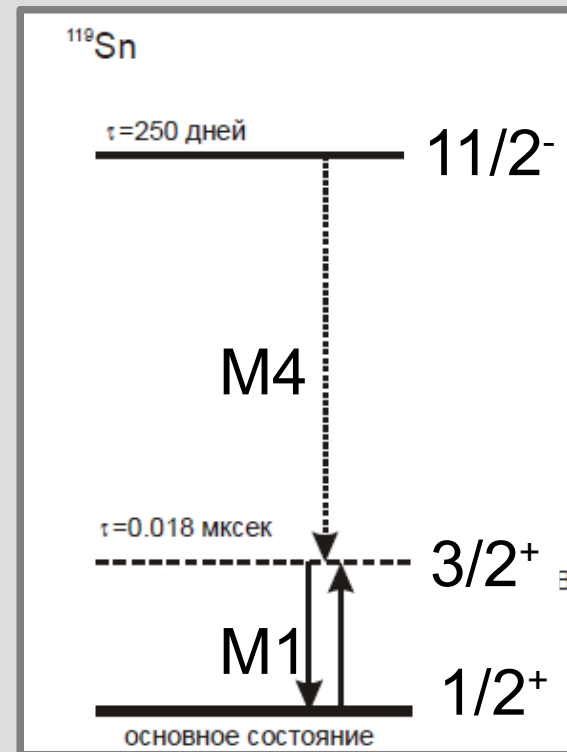
Гамма-излучение и гамма-изомеры



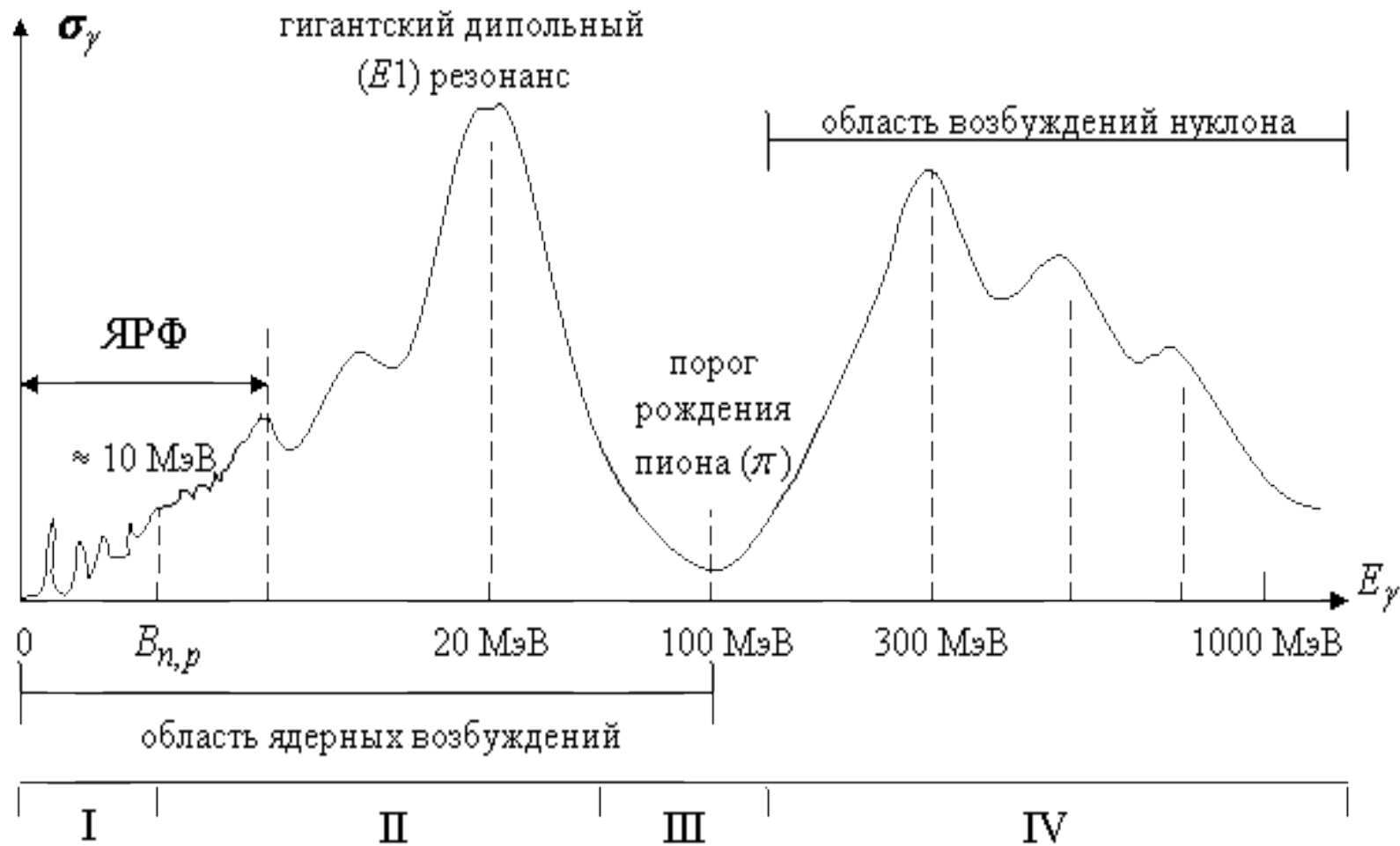
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/en/c/e060.htm>



<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract06.htm>



Полный гамма-спектр



Радиоактивность: Немного из истории

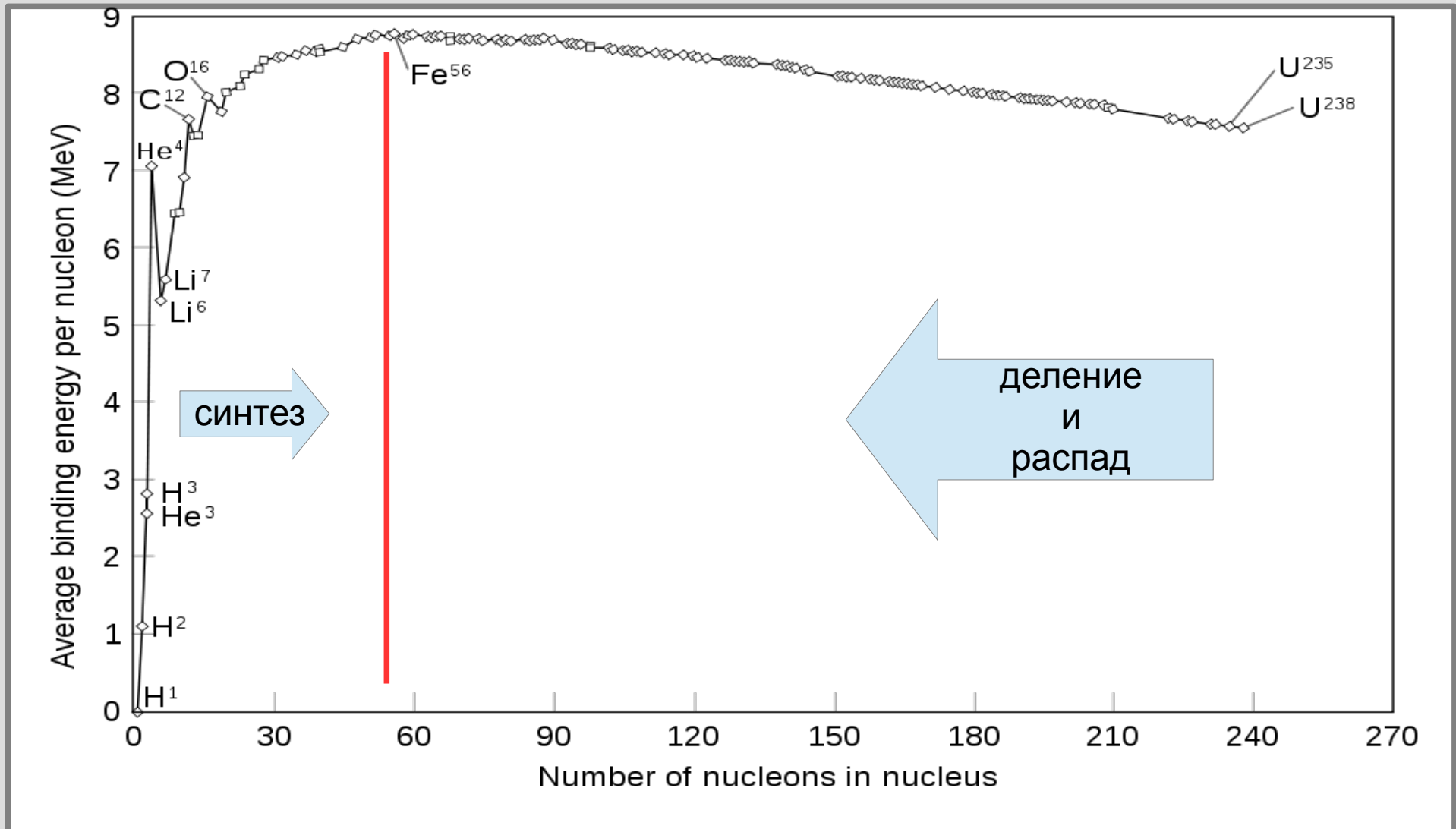
Рубеж 19-20 веков: Склодовская-Кюри, Беккерель, Резерфорд и др...



«Эманации» урановых руд

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

Ядерные реакции

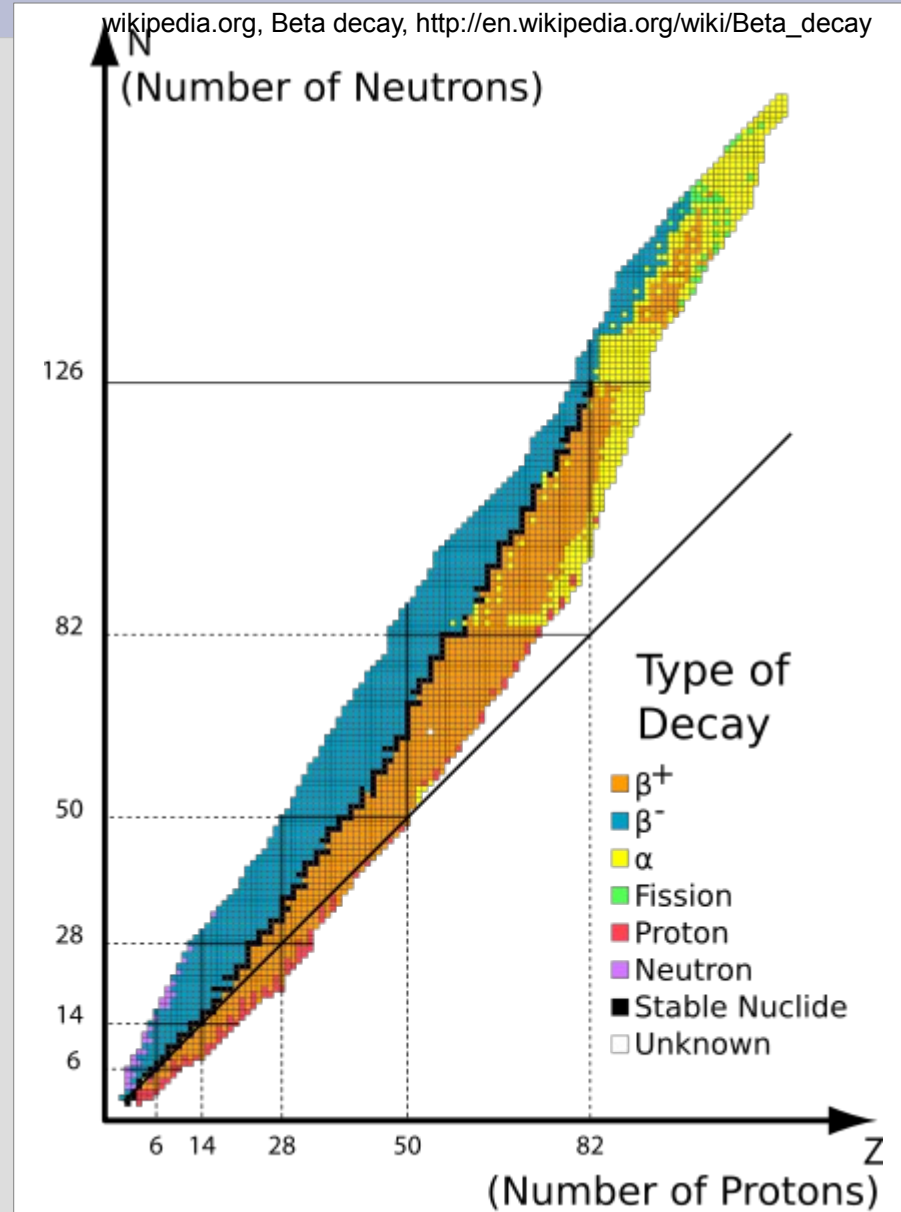
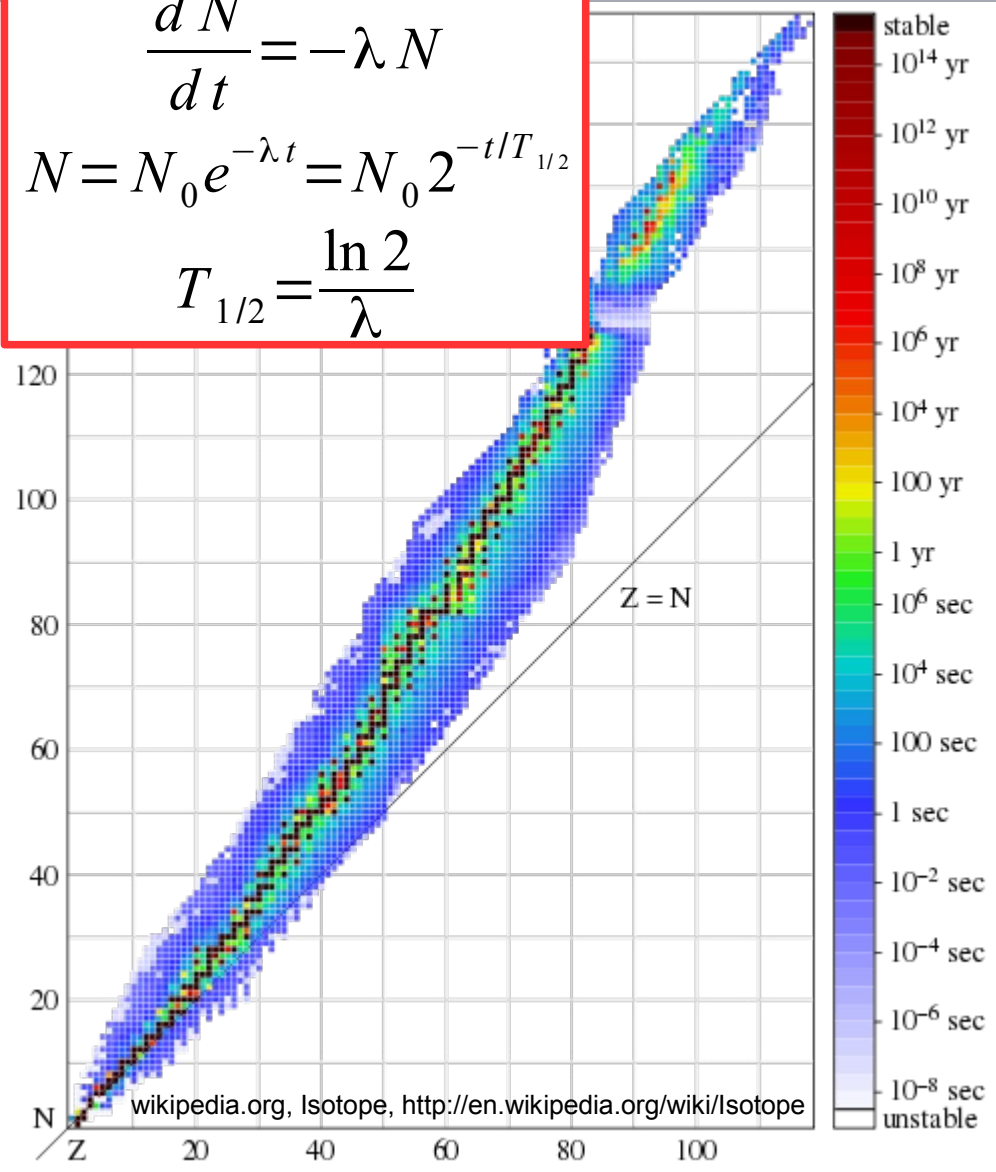


Закон радиоактивного распада и период полураспада

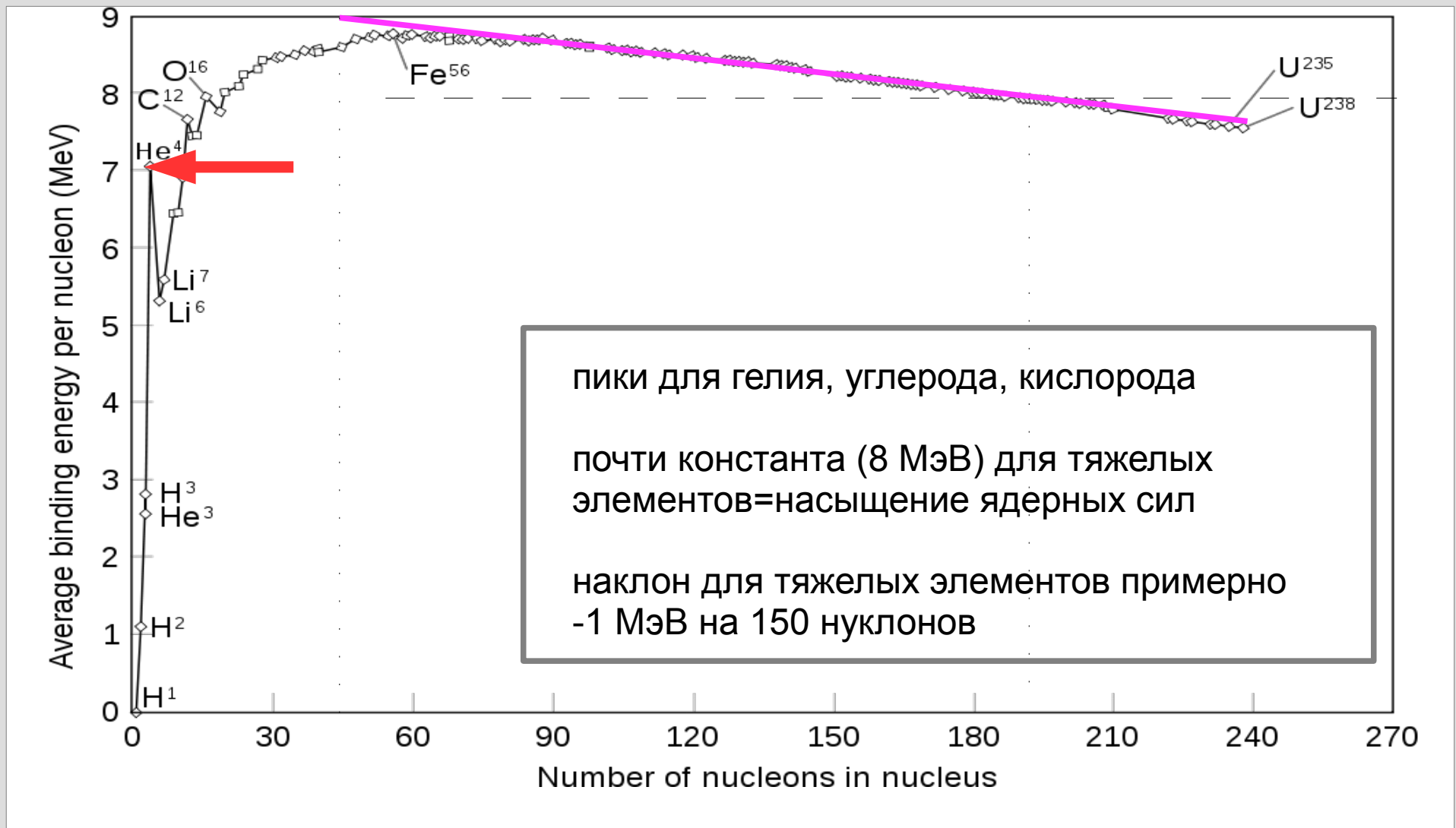
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

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

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



Энергетическая выгода распадов



Альфа-распад. Почему именно гелий?



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

Альфа-распад. Почему именно гелий?

$$(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + (4, 2) \quad \text{vs.} \quad (A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + (1, 1)$$

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?



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

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

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

Альфа-распад. Почему именно гелий?



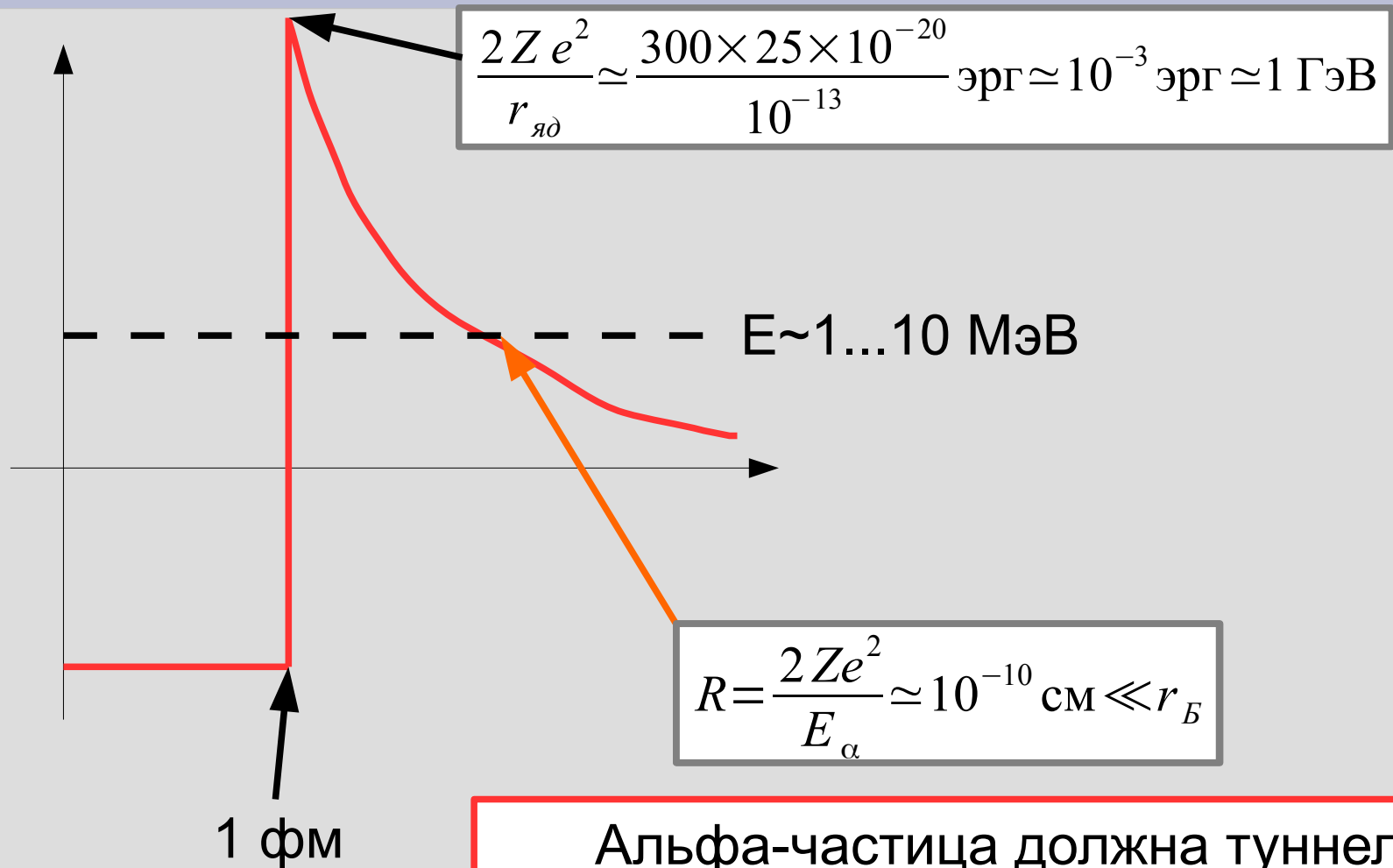
Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

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

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

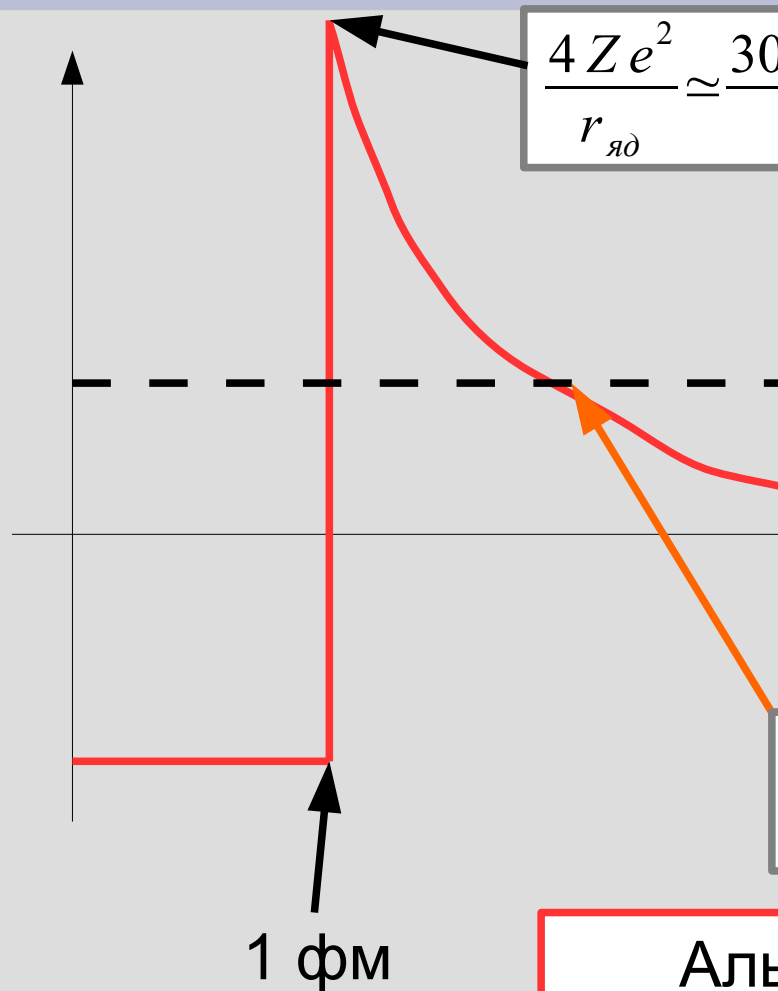
Большая энергия связи в гелии снижает порог, хоть и требует участия многих частиц...

Альфа-распад. Закон Гейгера-Неттола



Альфа-частица должна туннелировать через классически запрещенную область в кулоновском поле ядра

Альфа-распад. Закон Гейгера-



$$D \approx \exp \left(-2 \int_{r_{яд}}^R \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\frac{4Ze^2}{r} - E \right)} dr \right) \approx$$

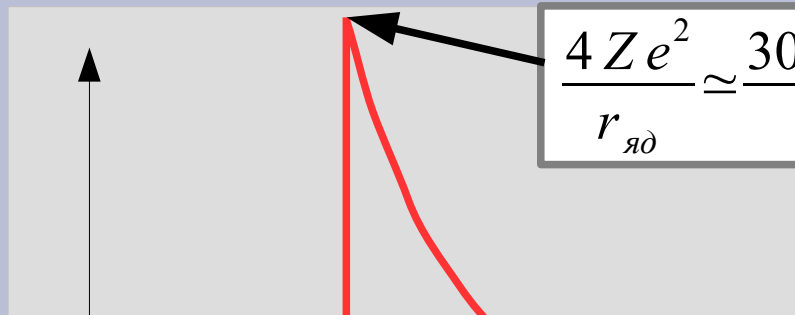
$$\approx \exp \left(-4 \sqrt{\frac{8mZe^2}{\hbar^2}} \sqrt{R} \right)$$

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

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

Альфа-частица должна туннелировать через классически запрещенную область в кулоновском поле ядра

Альфа-распад. Закон Гейгера-

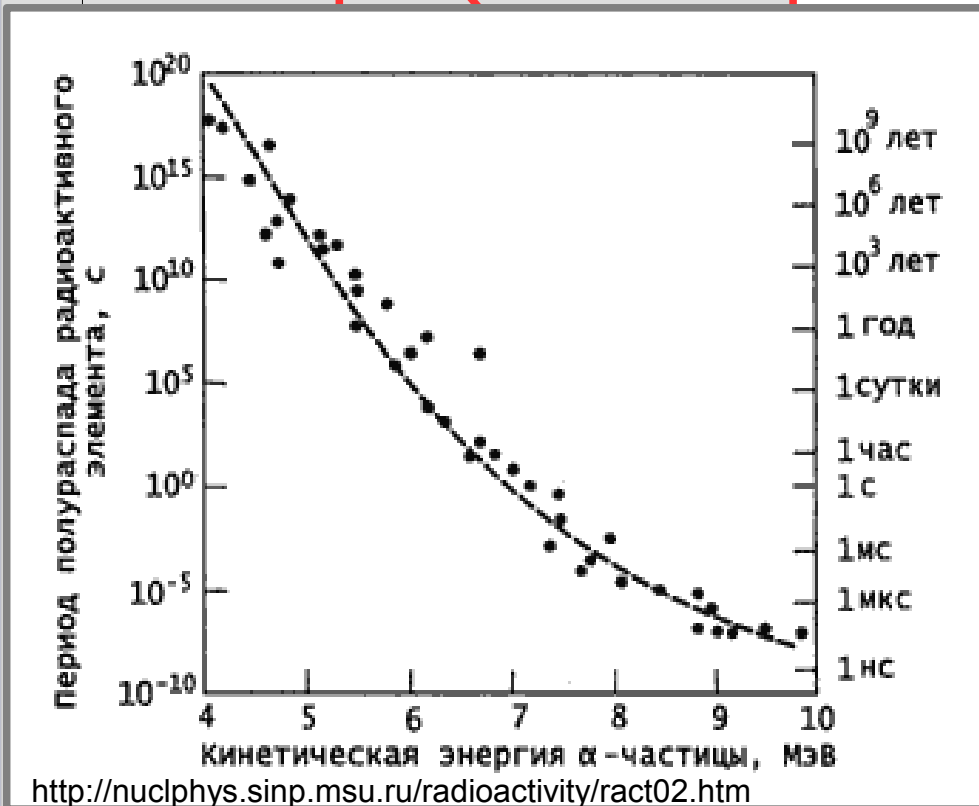


$$D \approx \exp \left(-2 \int_{r_{яд}}^R \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left(\frac{4Ze^2}{r} - E \right)} dr \right) \approx$$

$$\approx \exp \left(-4 \sqrt{\frac{8mZe^2}{\hbar^2}} \sqrt{R} \right)$$

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

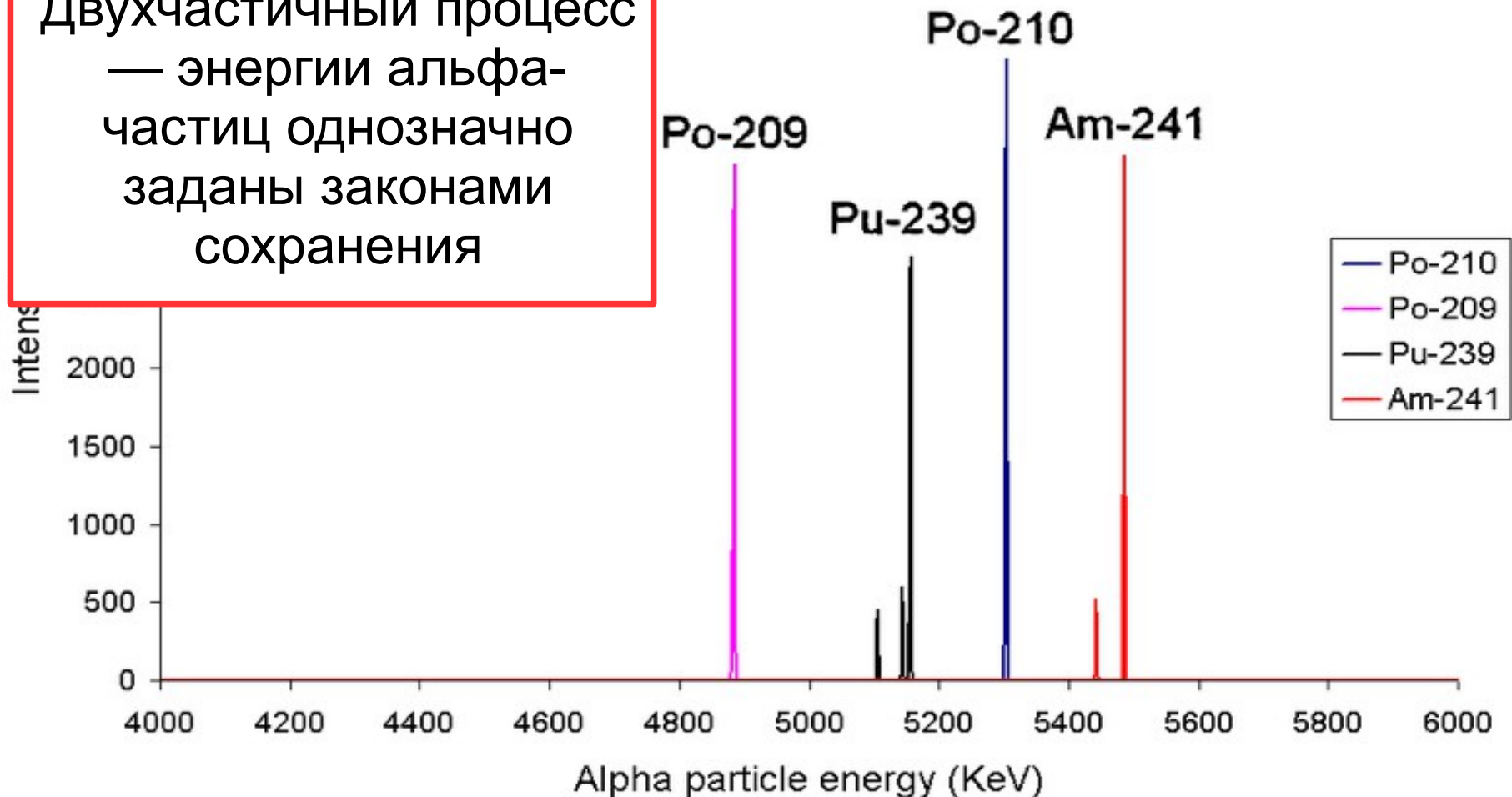
$$\ln T_{1/2} = a \frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}} + b$$



стица должна туннелировать
мически запрещенную область в
лоновском поле ядра

Спектр альфа-распада

Двухчастичный процесс
— энергии альфа-
частиц однозначно
заданы законами
сохранения



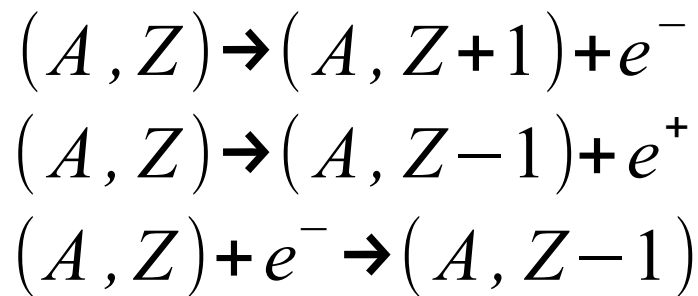
Бета-распады

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: $(A, Z) + e^{-} \rightarrow (A, Z-1)$

Энергетическое условие выгодности бета-распада

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



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

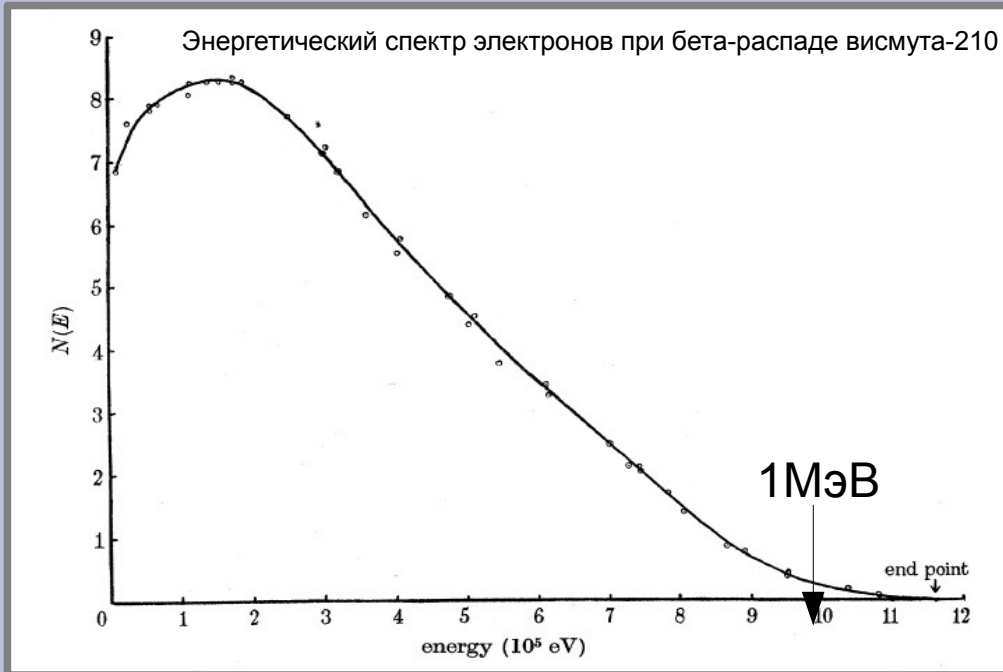
$$E_{cb}(A, Z) < E_{cb}(A, Z-1) - \Delta M c^2 - m_e c^2$$

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

Сu-64:

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

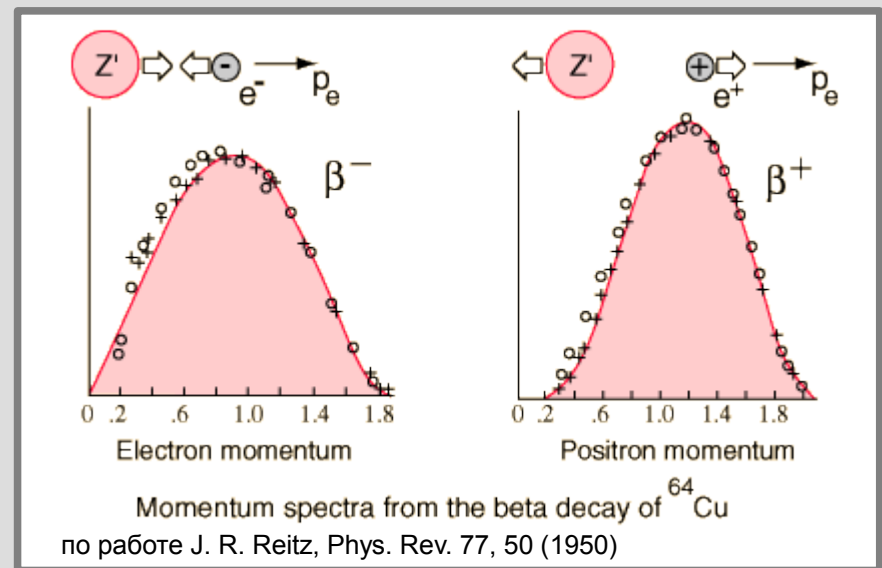
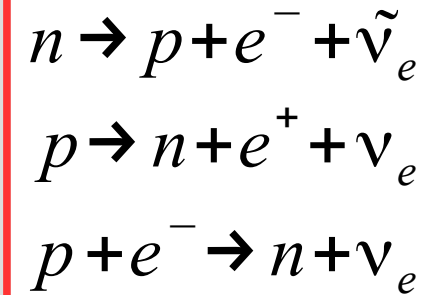
Спектры бета-распада



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

Cu-64:

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



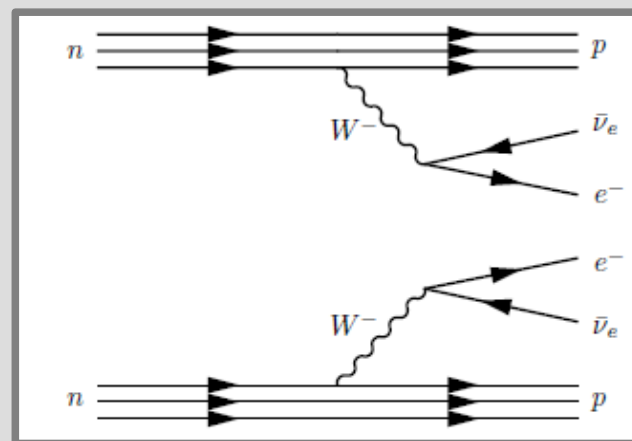
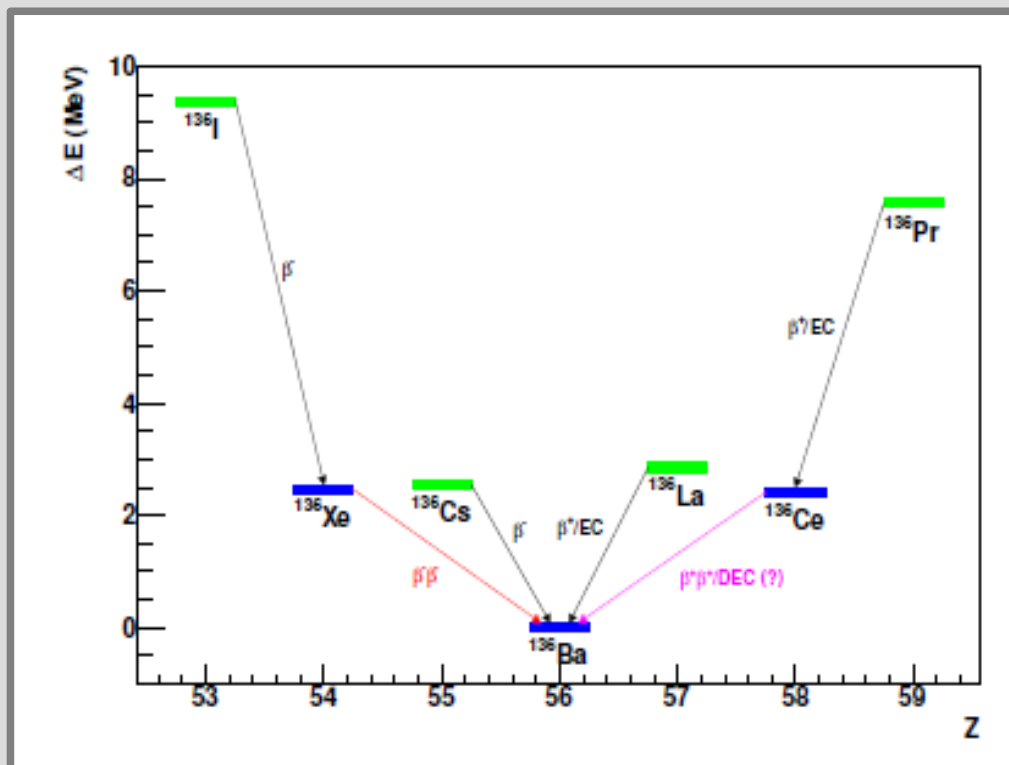
Двойной бета-распад

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

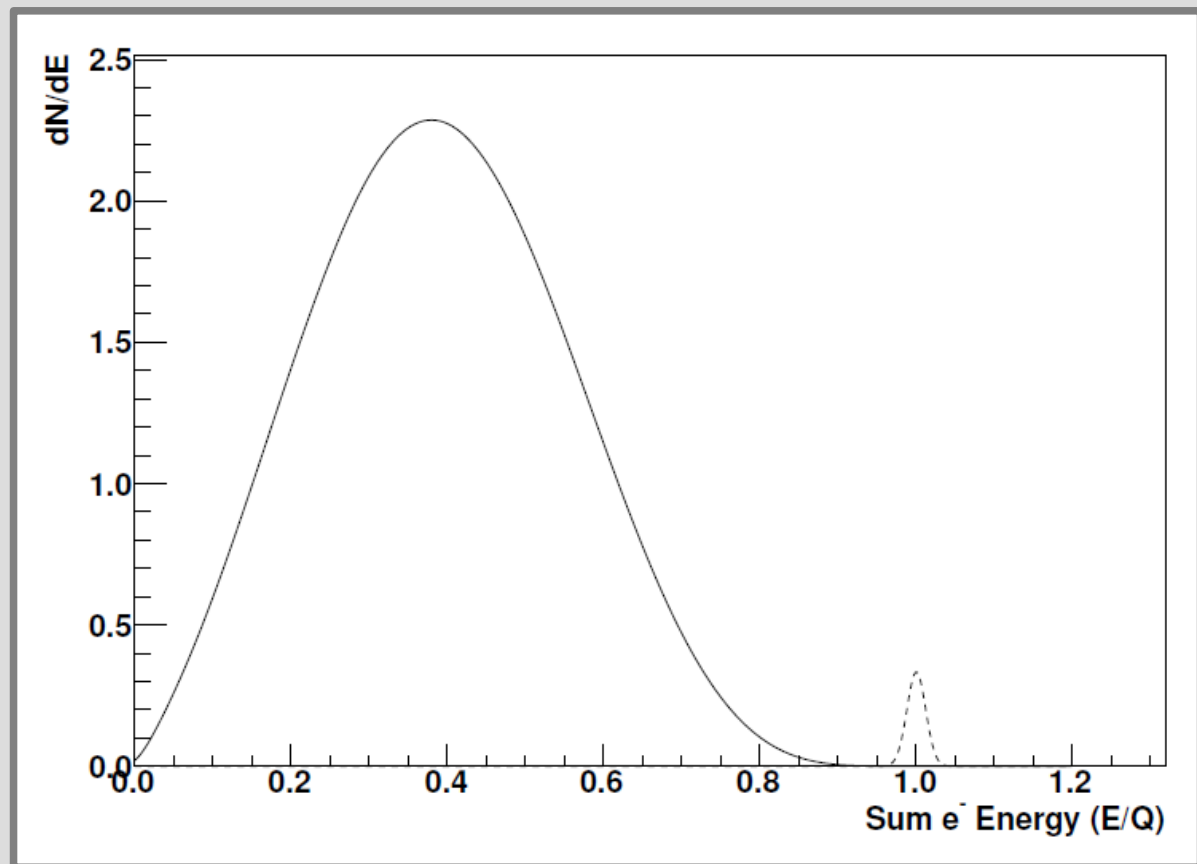
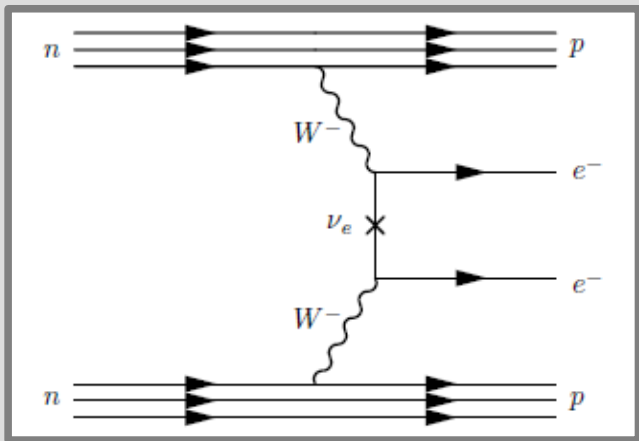
если «нормальный» бета-распад энергетически невыгоден:

все известные случаи — чётно-чётные ядра!

Ca-48 — дважды магическое ядро

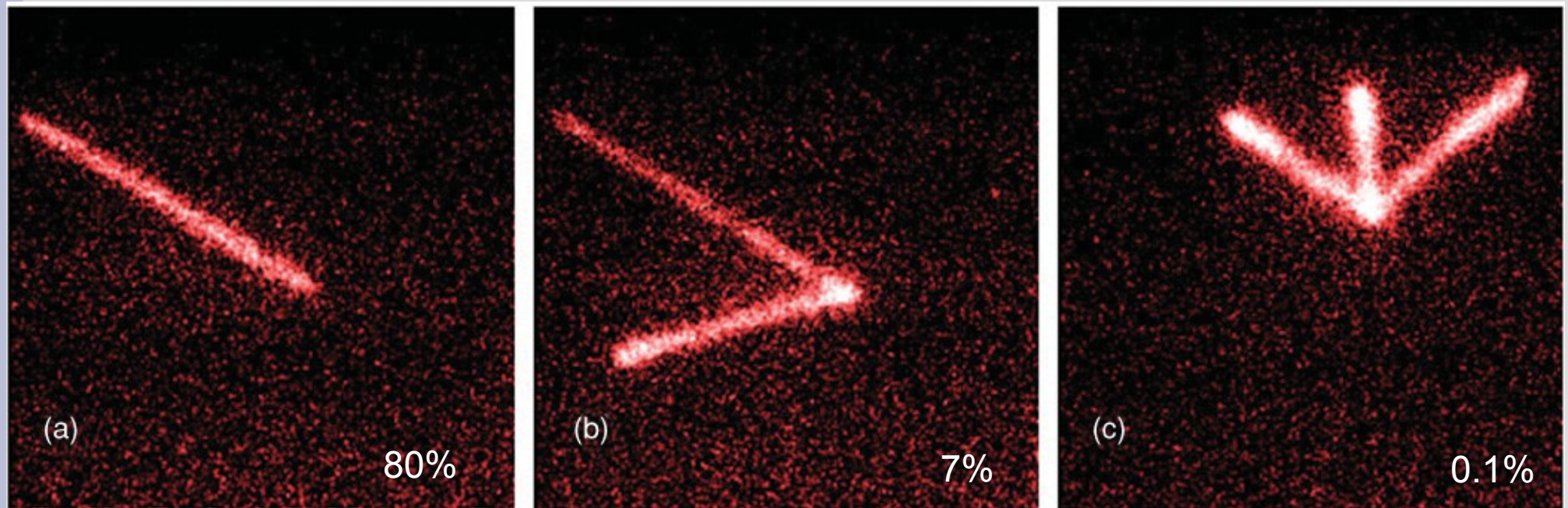


Гипотеза: Безнейтринный двойной бета распад



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

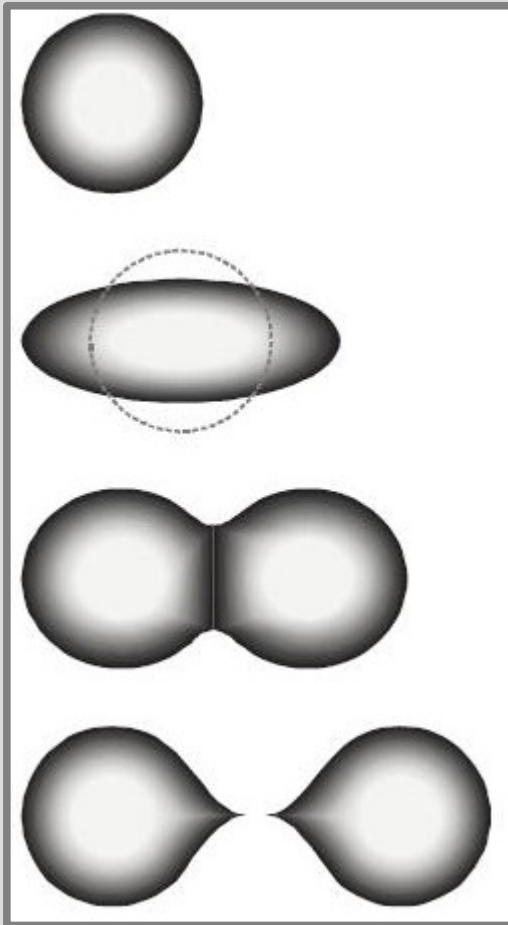
Экзотические распады: протонная и нейтронная эмиссия



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 («обычный» изотоп хром-52), с $T_{1/2} = 20$ мксек превращается (позитронный бета-распад) в ванадий-43 в сильно возбужденном состоянии

Спонтанное деление ядер



wikipedia.org, Nuclear
fission,
[http://en.wikipedia.org/wiki/
/Nuclear_fission](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission)

$$E_S = -\beta A^{2/3} \quad \text{проигрываем}$$

$$E_K = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad \text{выигрываем}$$

более 50 – мгновенное
деление

$$\frac{E_K}{E_S} \propto \frac{Z^2}{A} \quad 50 \dots 17 \text{ — возможность}$$

вынужденного деления

менее 17 –
стабильность к
делению

Основное на лекции

