

# Лекция 10.

Ядро атома: основные  
экспериментальные факты.

Модели строения ядра.

Возбуждения ядер.

# Литература по физике ядра

- **Ядерная физика в Интернете**

*<http://nuclphys.sinp.msu.ru>*

*<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>*

- Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин  
**Частицы и атомные ядра**

*<http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/ikyu.htm>*

- В.В.Варламов, Н.Г.Гончарова, Б.С.Ишханов  
**Физика ядра и банки ядерных данных**

*<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/>*

# Способы изучения ядер и частиц

## «Наблюдение»

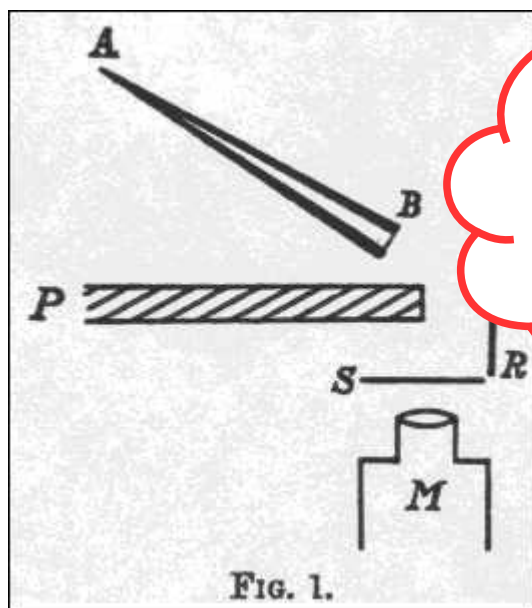
- масс-спектроскопия
- радиоактивные распады
- спектроскопия гамма-излучения, мессбауэровская спектроскопия, ЯМР
- ....

## «Активный эксперимент»

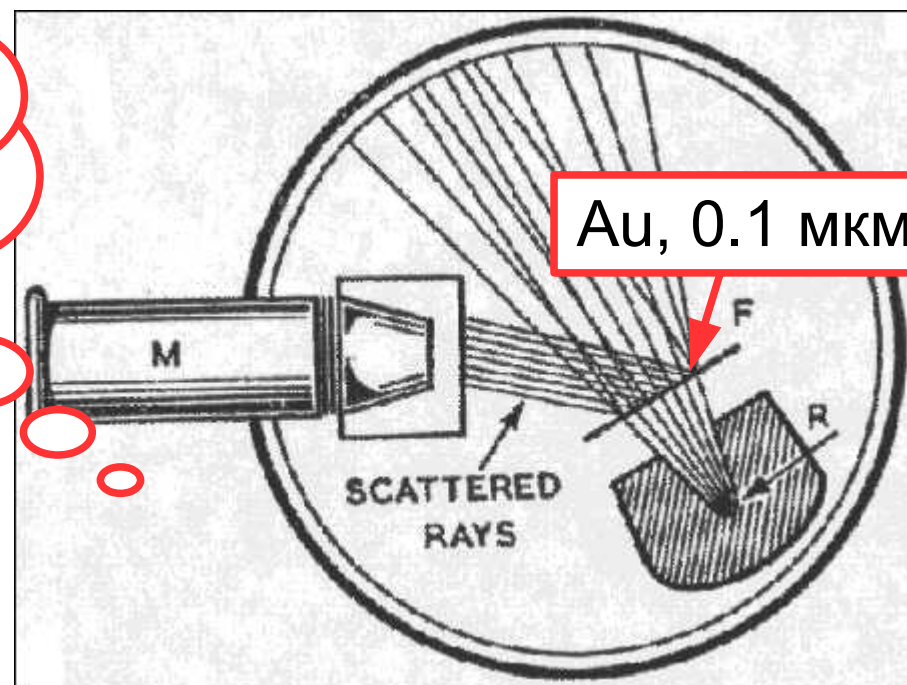
- рассеяние частиц
- ускорительные эксперименты
- ....

Часть 1: Эксперименты,  
устанавливающие размеры и  
структуру ядра

# Опыты Резерфорда (Гейгера-Марсдена)



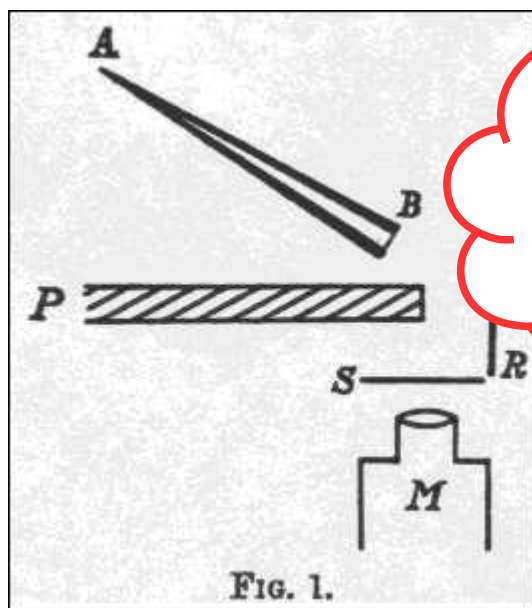
1:10,000 частиц  
отклонение на  
большие углы!



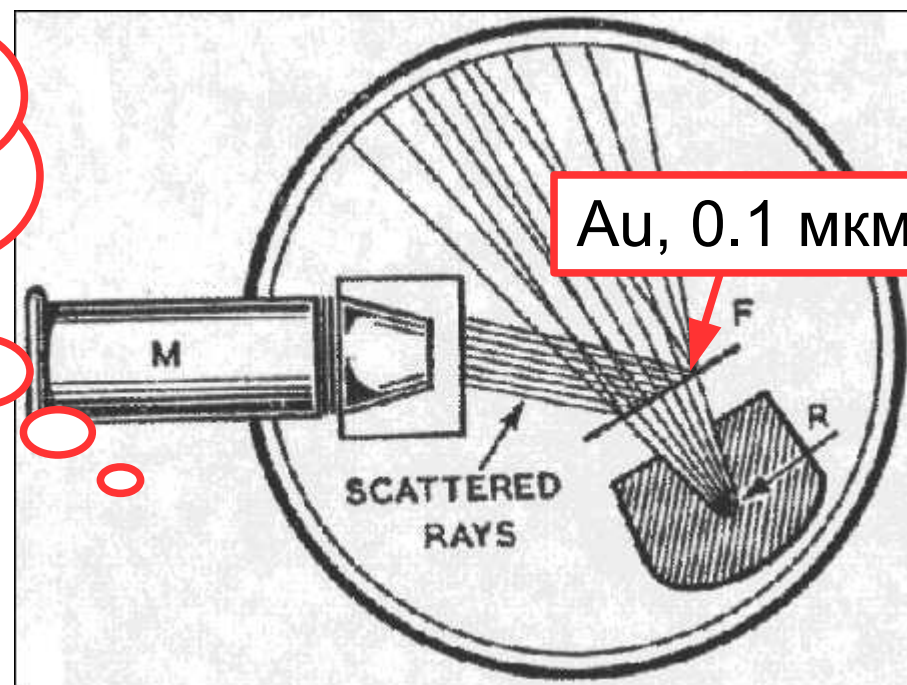
Опыт Гейгера-Марсдена (по статье H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ - Particles., 1909). AB - трубка с источником альфа-частиц, P - свинцовый экран, RR - отражающая фольга, S - сцинтиляционный экран, M - микроскоп.

Разновидность опыта Резерфорда R - источник радиации, F - фольга, M - микроскоп с сцинтилирующим экраном. chemteam.info, Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, 2016, <http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>

# Опыты Резерфорда (Гейгера-Марсдена)



1:10,000 частиц  
отклонение на  
большие углы!

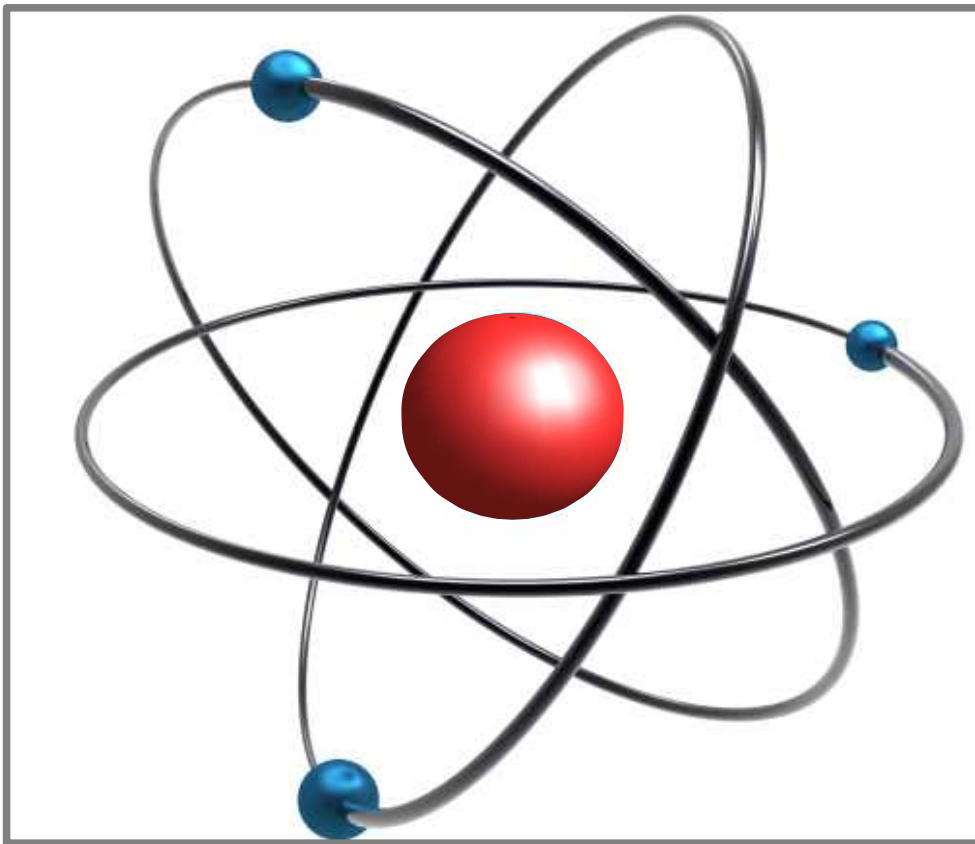


Опыт Гейгера-Марсдена (по статье H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ - Particles., 1909). AB - трубка с источником альфа-частиц, P - свинцовый экран, RR - отражающая фольга, S - сцинтиляционный экран, M - микроскоп.

Разновидности опыта Резерфорда Р. источник

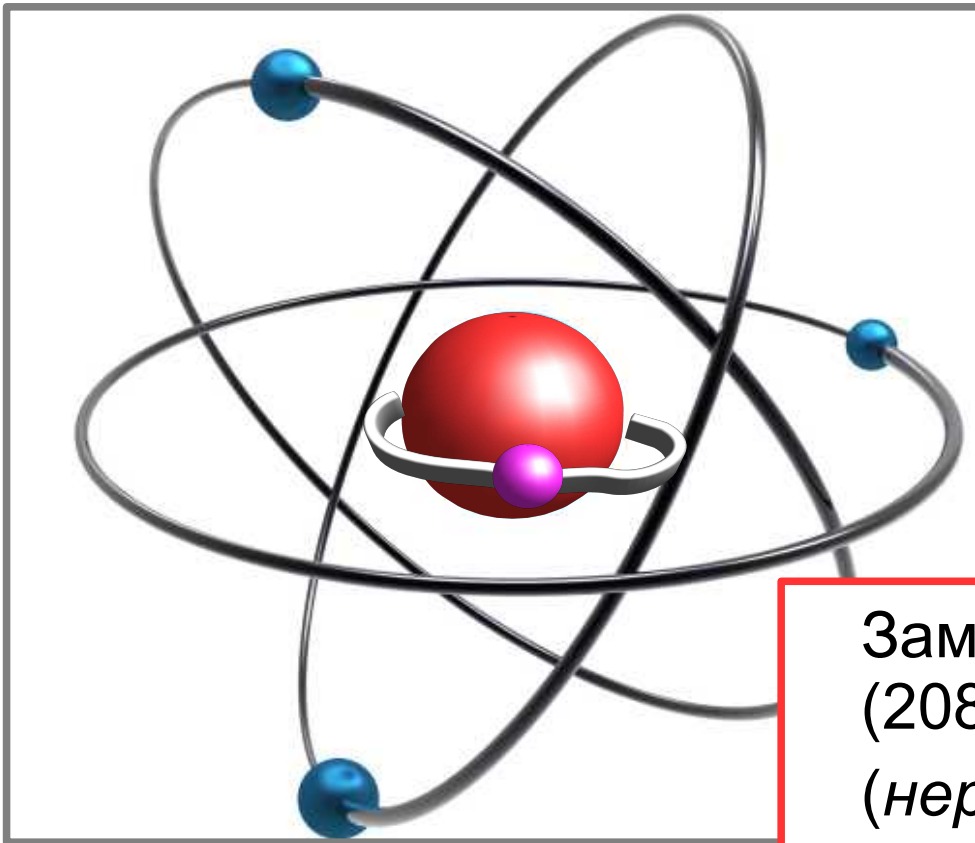
Резерфорд:  
Массивное точечное ядро,  
рассеяние в кулоновском поле  
ядра

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами



$$r_0 = \frac{\hbar^2}{Z m e^2}$$
$$Ry = \frac{1}{2} Z^2 m c^2 \alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{m Z^2 e^4}{\hbar^2}$$

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами



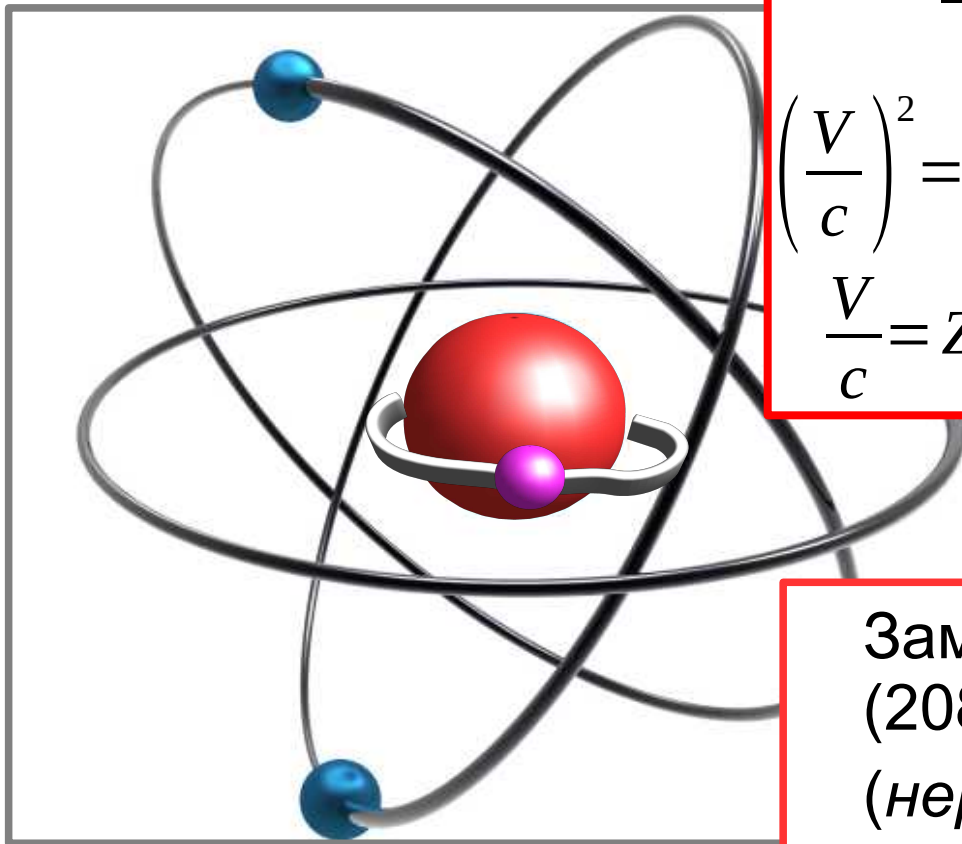
$$r_0 = \frac{\hbar^2}{Z m e^2}$$
$$Ry = \frac{1}{2} Z^2 m c^2 \alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{m Z^2 e^4}{\hbar^2}$$

Замена **электрона** на **мюон**  
( $208 m_e$ ), Pb ( $Z=82$ )  
(нерелятивистская оценка):

$$r_0^{(\mu)} \simeq 3.1 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$
$$E_{\text{нерел}}^{(\text{Pb})} (2p \rightarrow 1s) = 14.3 \text{ МэВ}$$



# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами



$$\frac{mV^2}{R} = \frac{Ze^2}{R^2}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = \frac{Ze^2/R}{mc^2} = Z^2 \frac{e^4}{\hbar^2 c^2}$$

$$\frac{V}{c} = Z\alpha = {}_{(\text{Pb})} \frac{82}{137} \simeq 1$$

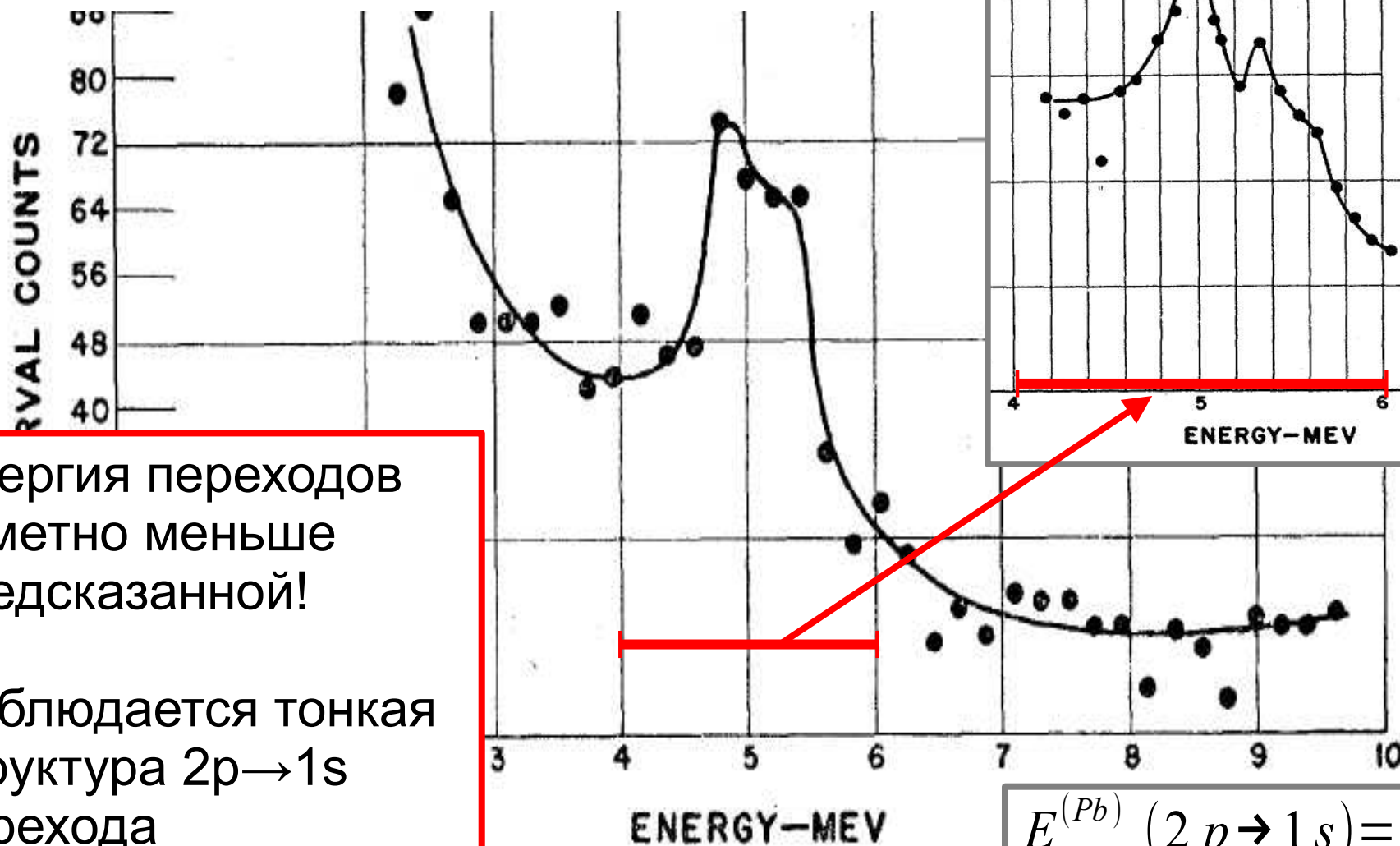
Замена **электрона** на **мюон**  
( $208 m_e$ ), Pb ( $Z=82$ )  
(нерелятивистская оценка):

$$r_0^{(\mu)} \simeq 3.1 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

$$E_{\text{нерел}}^{(\text{Pb})} (2p \rightarrow 1s) = 14.3 \text{ МэВ}$$

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами

Эксперимент (Fitch, Rainwater 1953):



Энергия переходов заметно меньше предсказанной!

Наблюдается тонкая структура  $2p \rightarrow 1s$  перехода

$$E_{\text{перел}}^{(Pb)}(2p \rightarrow 1s) = 14.3 \text{ МэВ}$$

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами

Релятивистская теория,  
точечное ядро, Pb:

$$E_{\text{рел}}(1s) = 21.3 \text{ МэВ} \quad (E_{\text{нерел}}(1s) = 19.0 \text{ МэВ})$$

$$E_{\text{рел}}\left(2p_{\frac{3}{2}} \rightarrow 1s\right) = 16.4 \text{ МэВ}$$

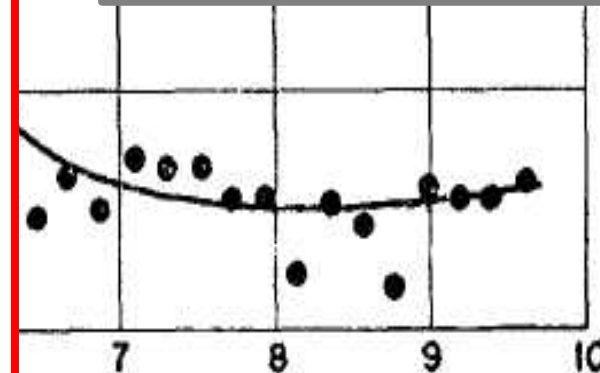
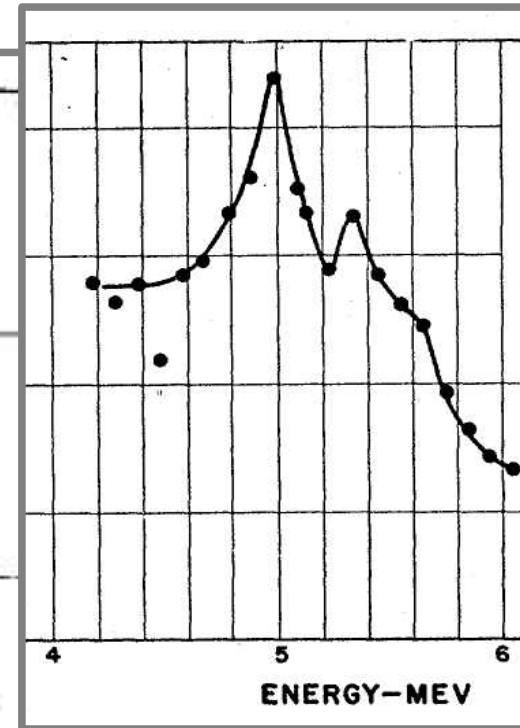
$$E_{\text{рел}}\left(2p_{\frac{1}{2}} \rightarrow 1s\right) = 15.9 \text{ МэВ}$$

Релятивистская теория, однородно  
заряженное ядро  $r=5.6$  фм, Pb:

$$E_{\text{рел}}(1s) = 10.1 \text{ МэВ}$$

$$E_{\text{рел}}\left(2p_{\frac{3}{2}} \rightarrow 1s\right) = 5.48 \text{ МэВ}$$

$$E_{\text{рел}}\left(2p_{\frac{1}{2}} \rightarrow 1s\right) = 5.30 \text{ МэВ}$$



# Рассеяние электронов на ядре

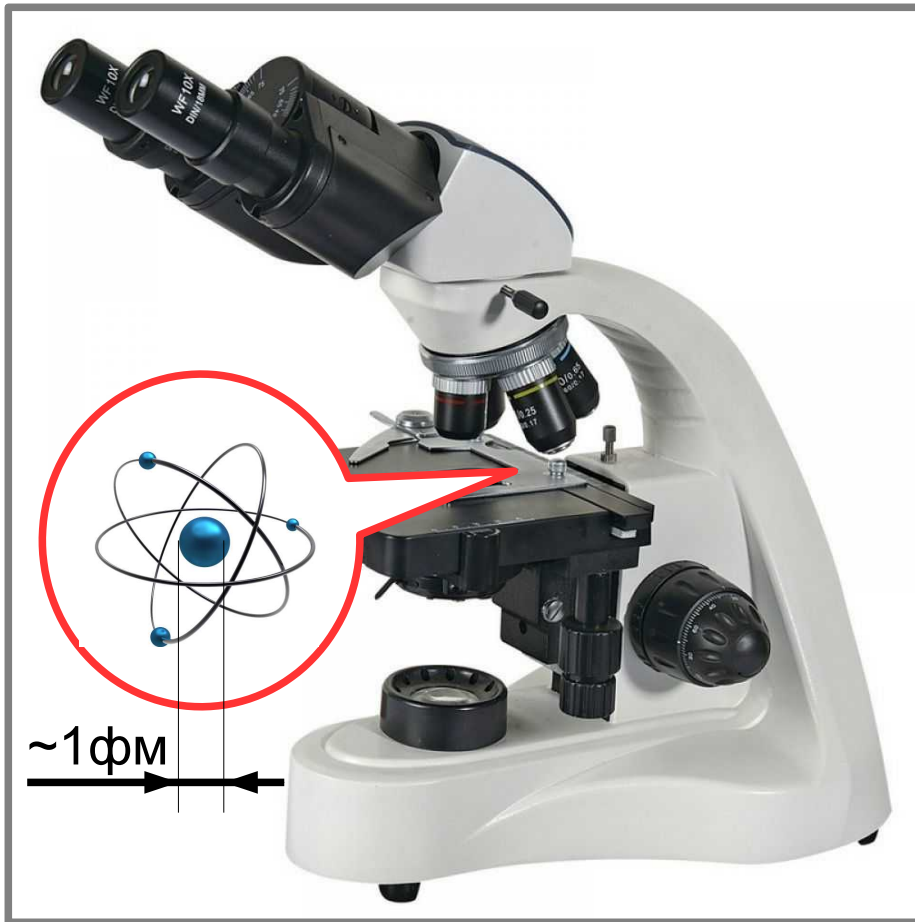
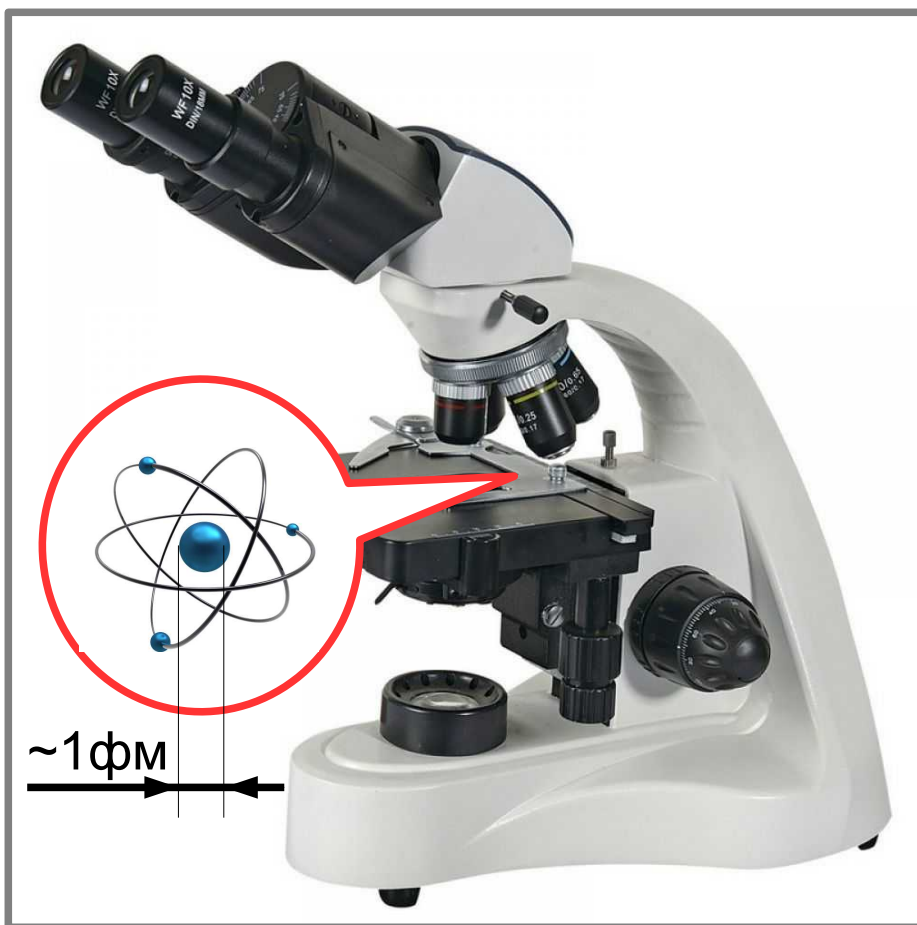


фото микроскопа с сайта <https://astrolinza.ru>

# Рассеяние электронов на ядре



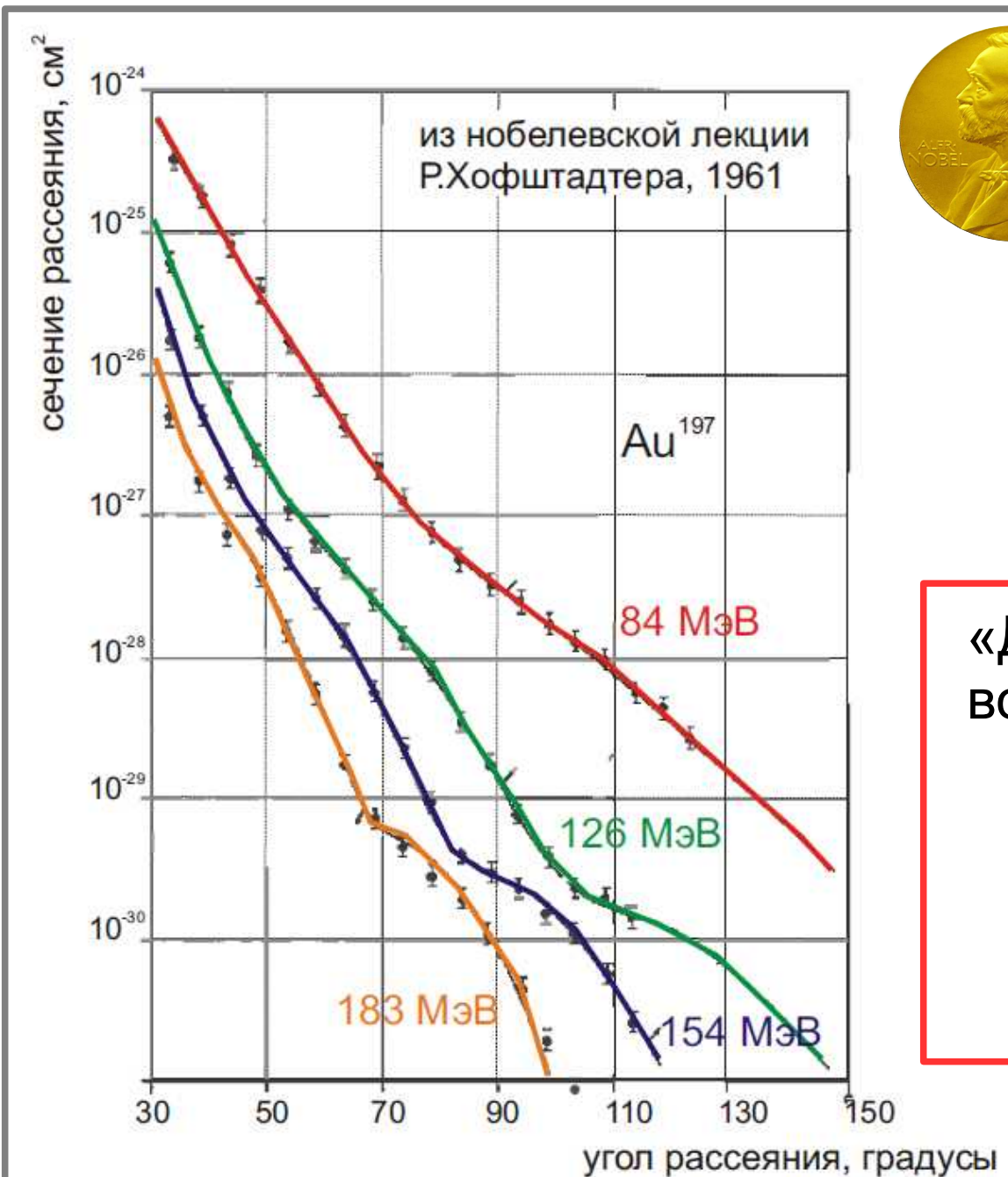
ультрарелятивистский предел:

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc} \frac{mc^2}{E} = \Lambda_c \frac{mc^2}{E}$$

$$\frac{E}{mc^2} \approx 10^3$$

Для “микроскопа” с разрешением 1 фм нужны электроны с энергией около 1 ГэВ

# Рассеяние электронов на ядре

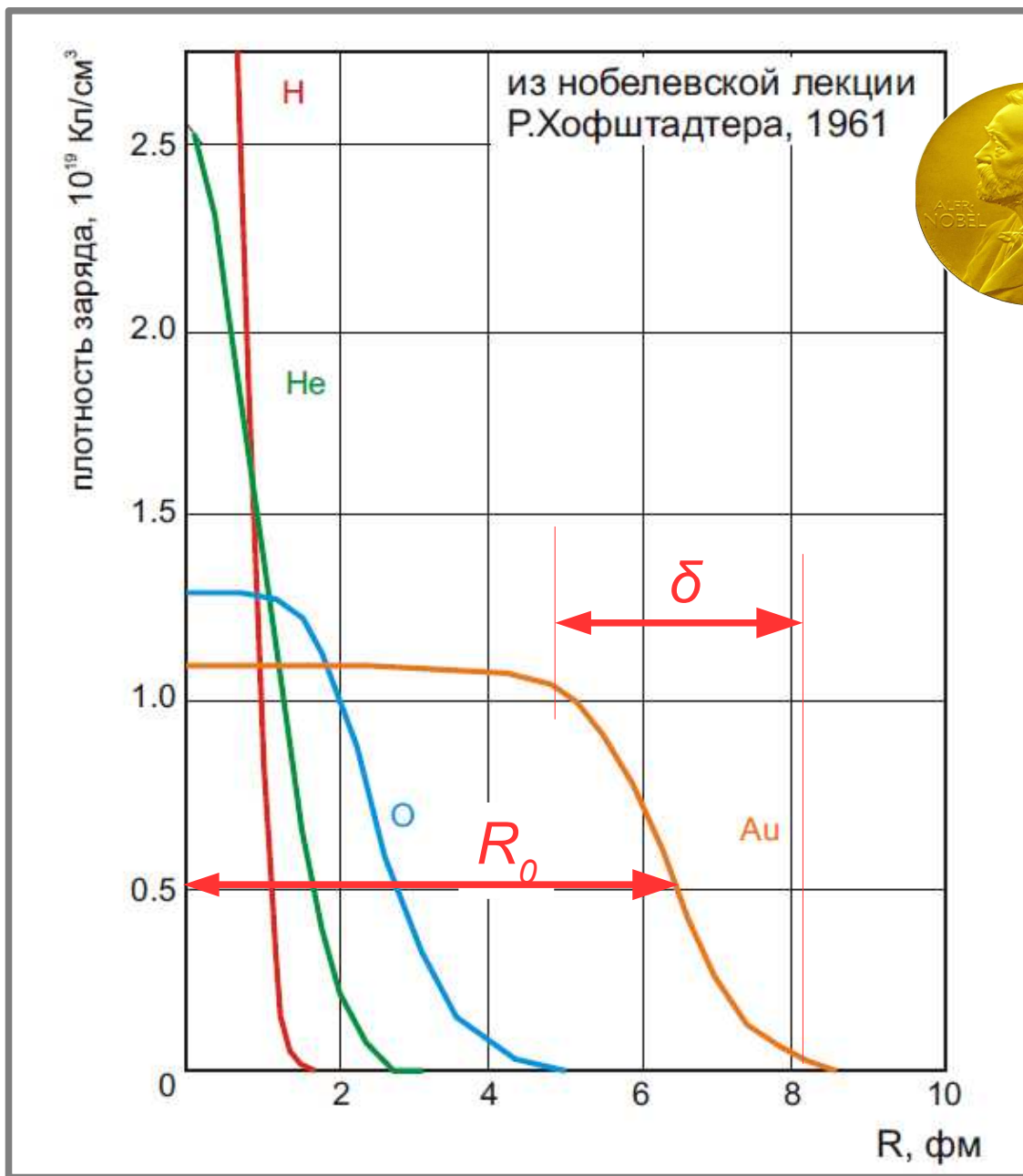


«Дифракция на круге»  
возникает при:

$$E \simeq 100 \text{ МэВ}$$

$$\lambda \simeq \Lambda \frac{mc^2}{E} \simeq 10 \text{ фм}$$

# Размеры ядра



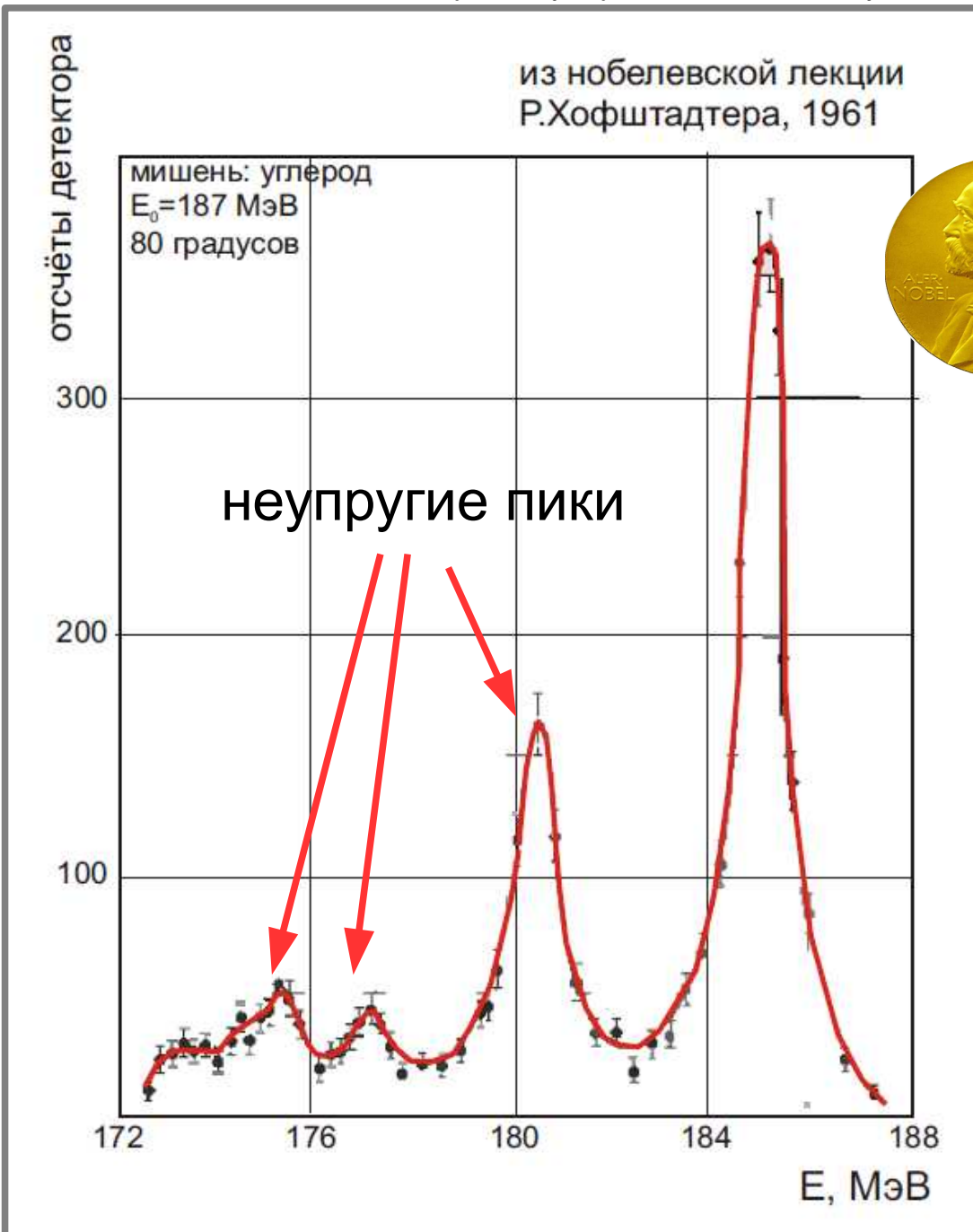
Размер ядра соответствует модели “несжимаемого вещества”

$$R_0 \approx 1.1 \dots 1.3 \sqrt[3]{A} \text{ фм}$$

$$\delta \approx 2.4 \text{ фм}$$

«Не элементарность» протона — есть размер, т.е. есть что-то внутри!!!

# Неупругие процессы в ядре



Масштаб  
внутриядерных энергий  
1...10 МэВ



Откуда известно о протонах и  
нейтронах внутри ядра...

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)

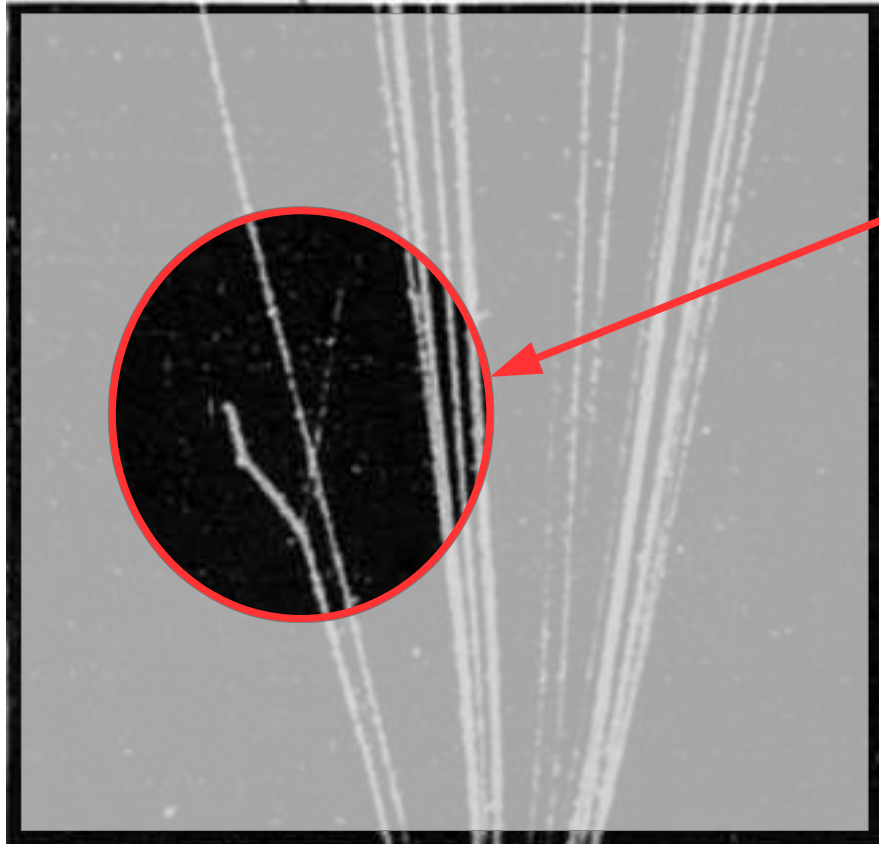


Резерфорд (1908, химия)  
Содди (1921, химия)  
Блэккет (1948, физика)

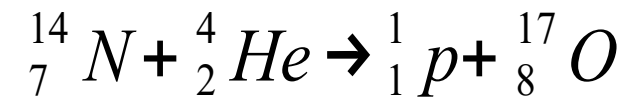
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A , 107, 349 (1925)

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)



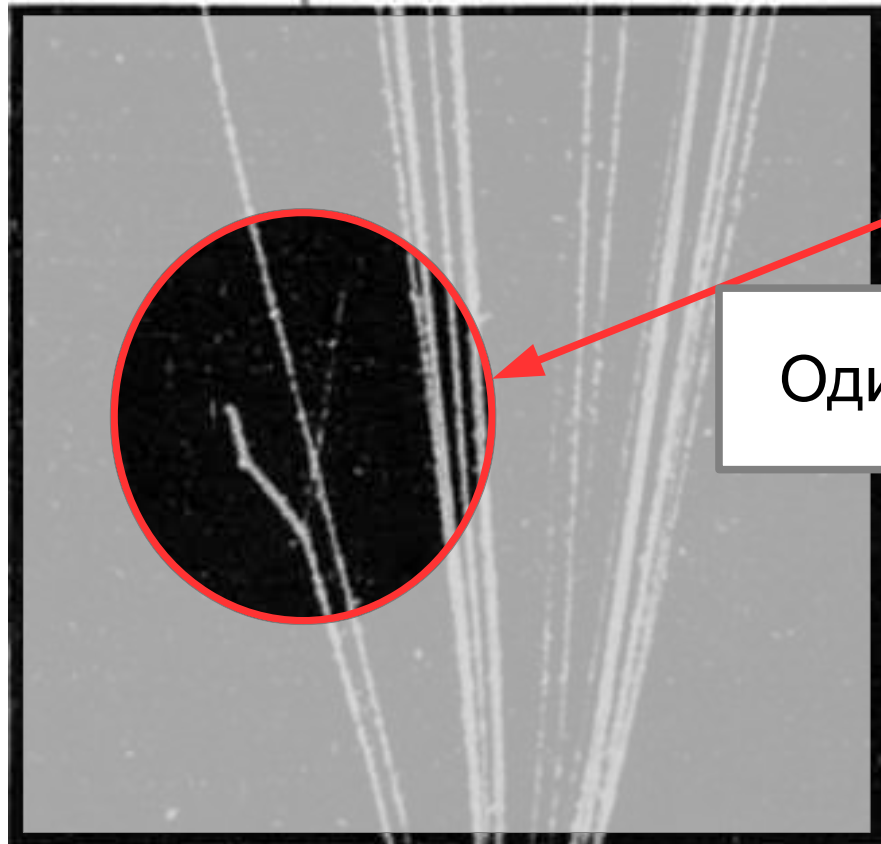
Из атома азота выбит протон (тонкий след)



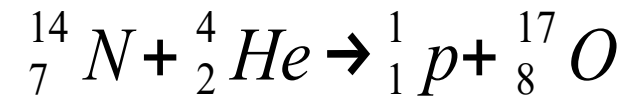
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A , 107, 349 (1925)

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)



Из атома азота выбит протон (тонкий след)

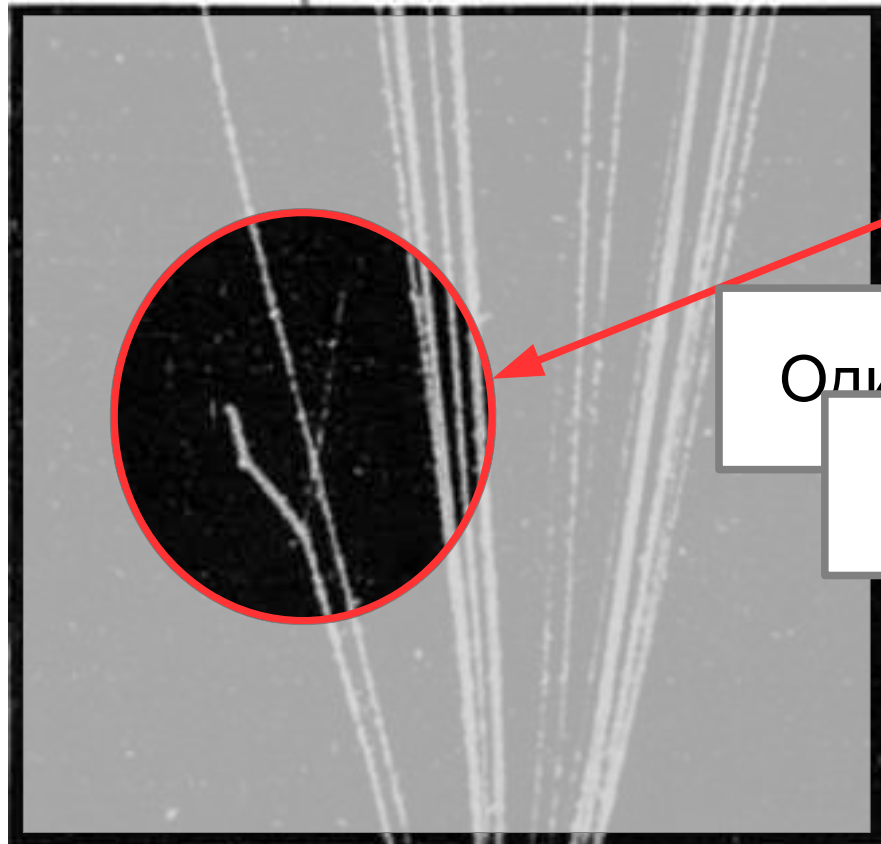


Один год эксперимента

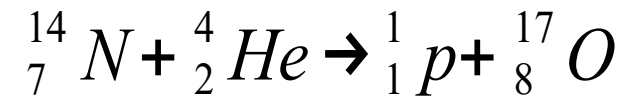
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



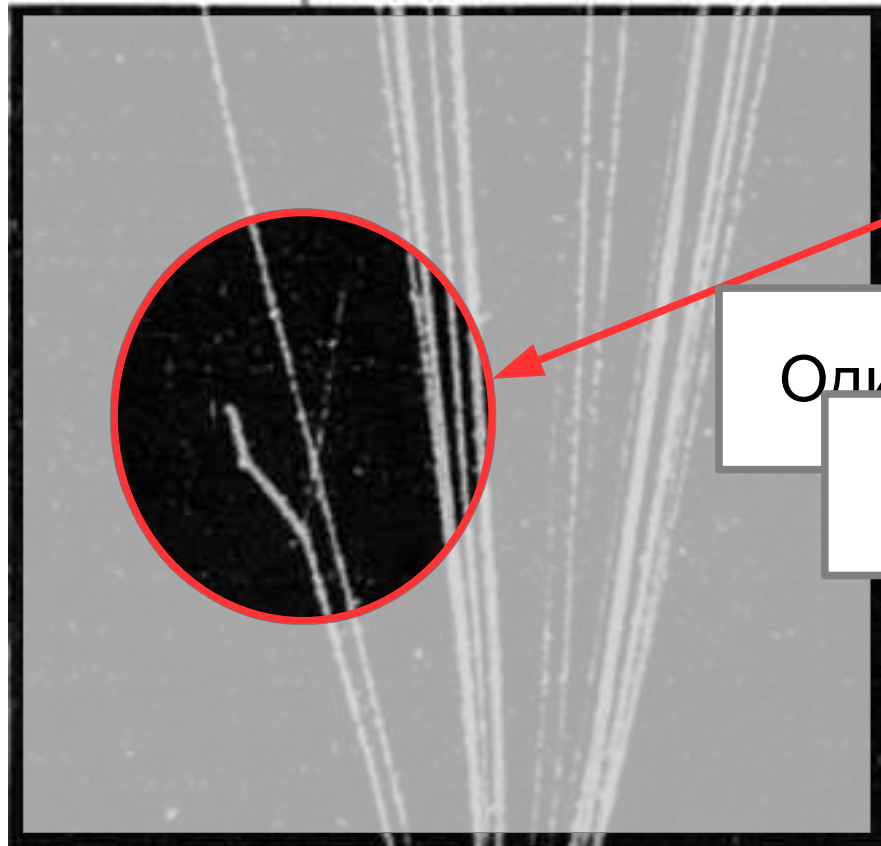
Один год эксперимента

23,000 фотографий

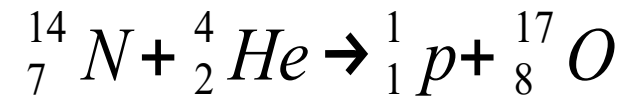
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



Один год эксперимента

23 000 фотографий

400,000 треков

Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

# Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)

Из атома азота выбит протон (тонкий след)

$$N + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{17}_8\text{O}$$

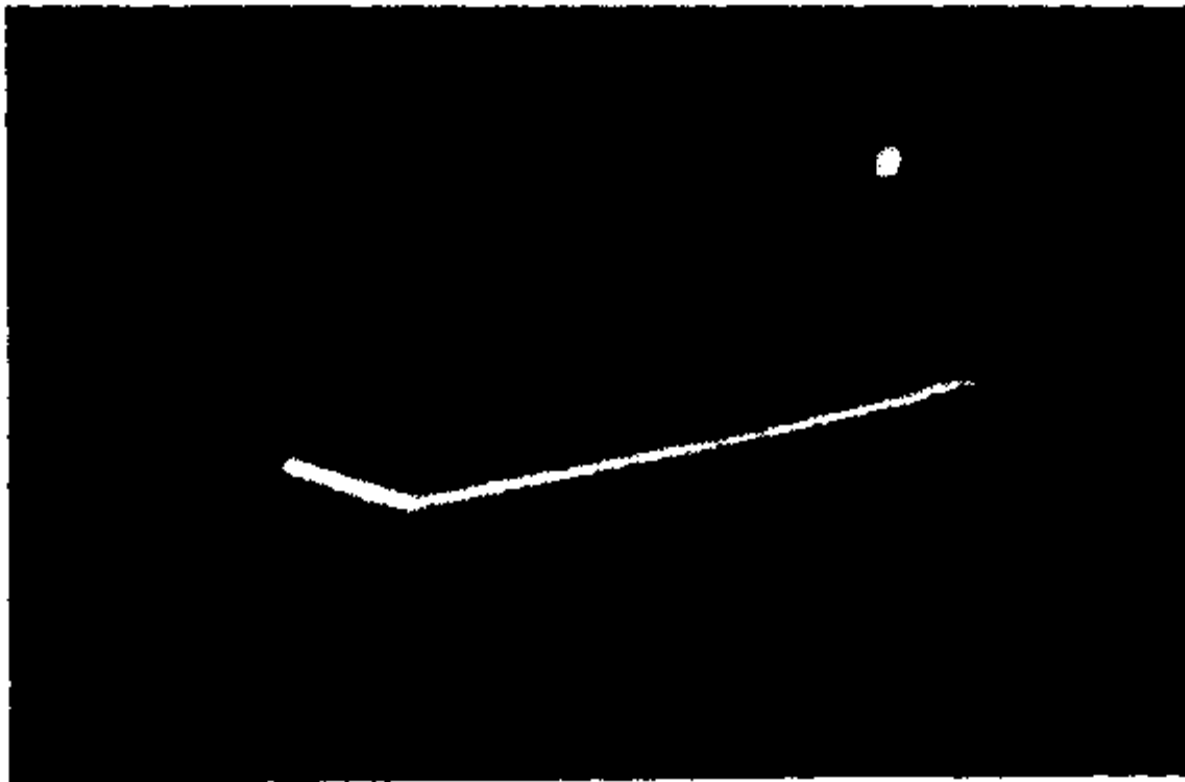
эксперимента  
фотографий  
400,000 треков

**8 НУЖНЫХ СОБЫТИЙ**

Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

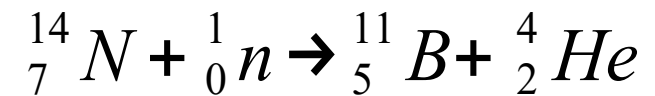
P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

# Существование нейтронов в ядре

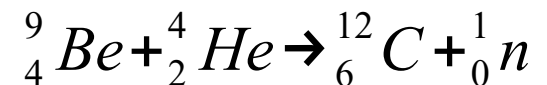


Трэки частиц, образовавшихся при расщеплении азота нейтроном. Трек нейтрального нейтрона не виден. Из нобелевской лекции Чедвика

Чедвик (1935)



источник нейтронов:  
бомбардируемая альфа-  
частицами бериллиевая  
фольга





# Опыты Ф.Астона (масс-спектропия)

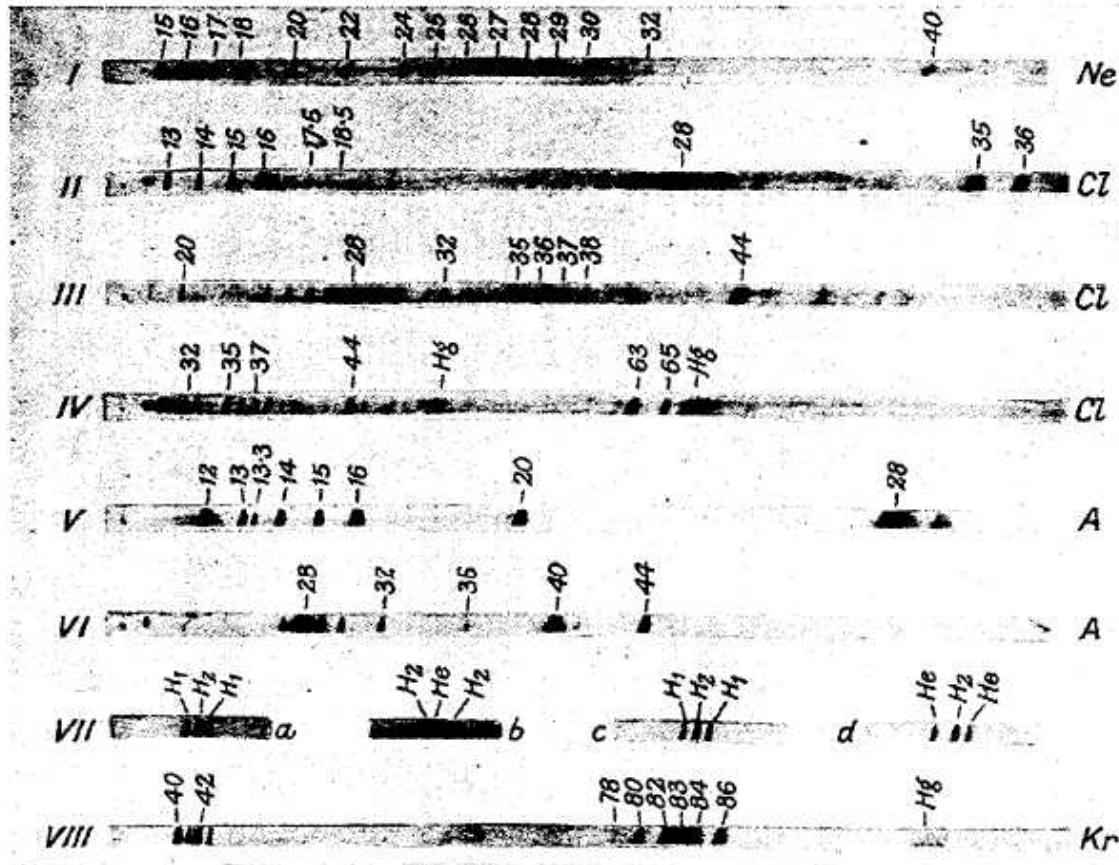


Fig. 2. Typical mass spectra.

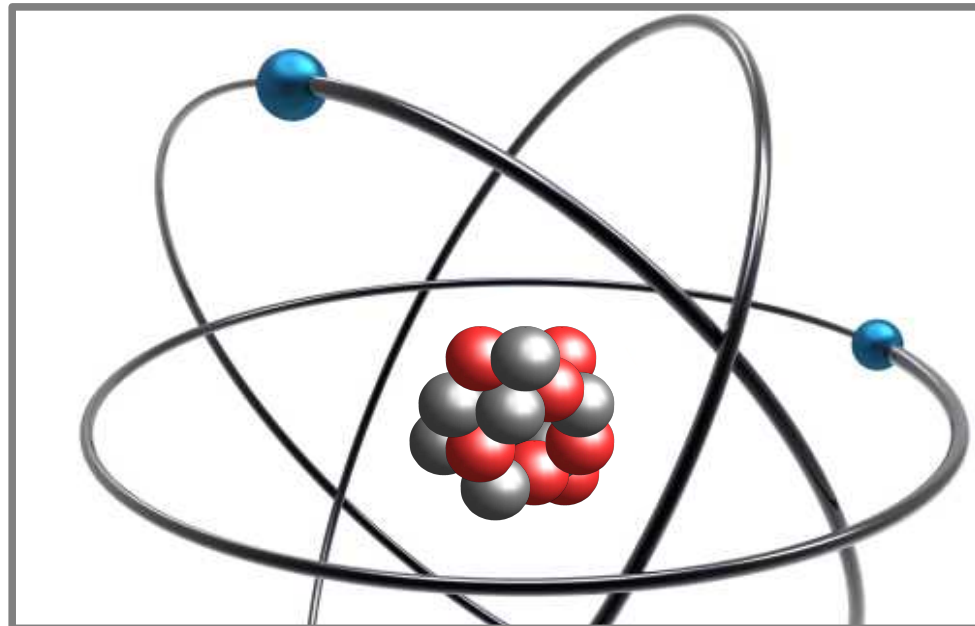
Ф.Астон (1922,  
химия)



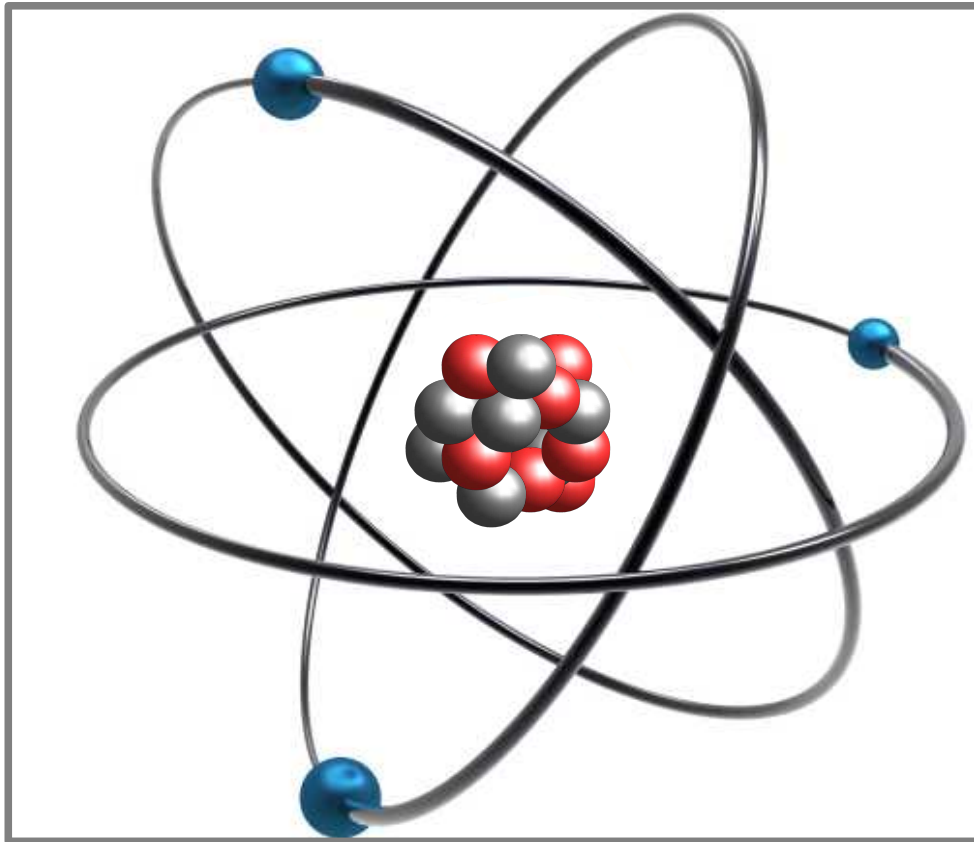
- 1) Атомные веса атомов примерно кратны массе атома водорода
- 2) У большинства элементов существуют натуральные изотопы

# Промежуточные выводы

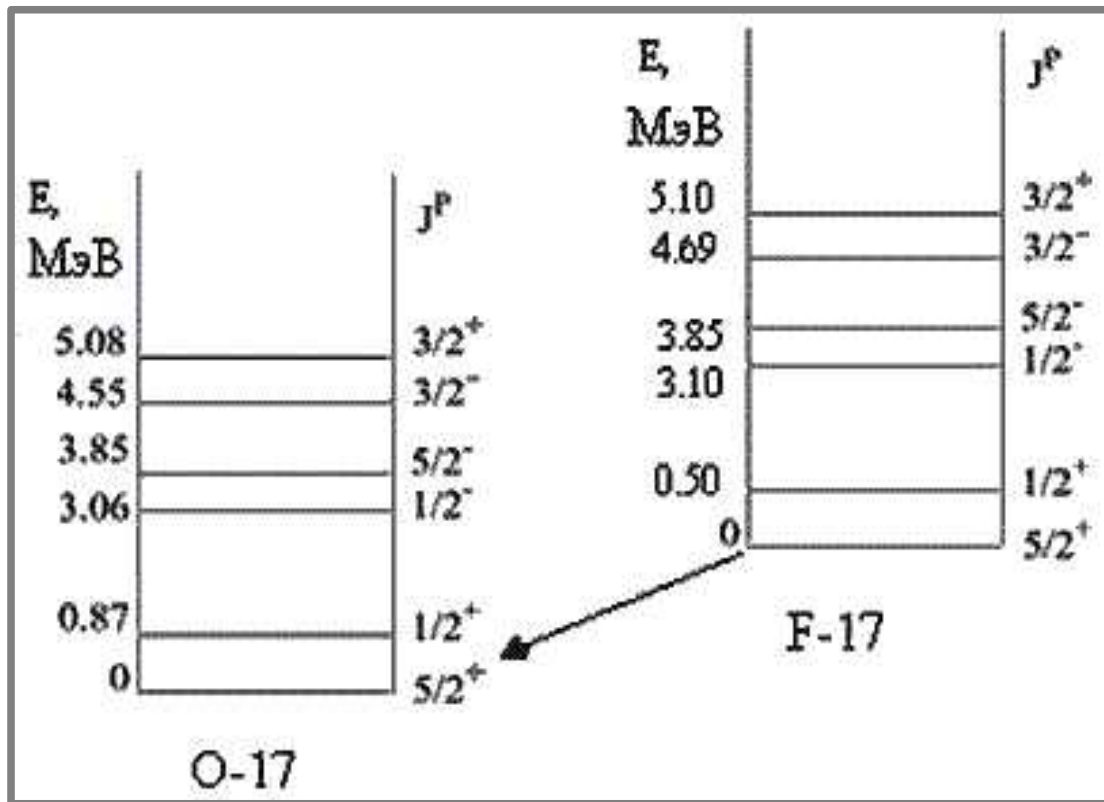
- Ядро состоит из протонов и нейтронов
- Протоны и нейтроны формируют в ядре несжимаемое «ядерное вещество»
- Размер ядра порядка фемтометра ( $10^{-15}$  м,  $10^{-13}$  см)
- Внутриядерные энергии ~МэВ



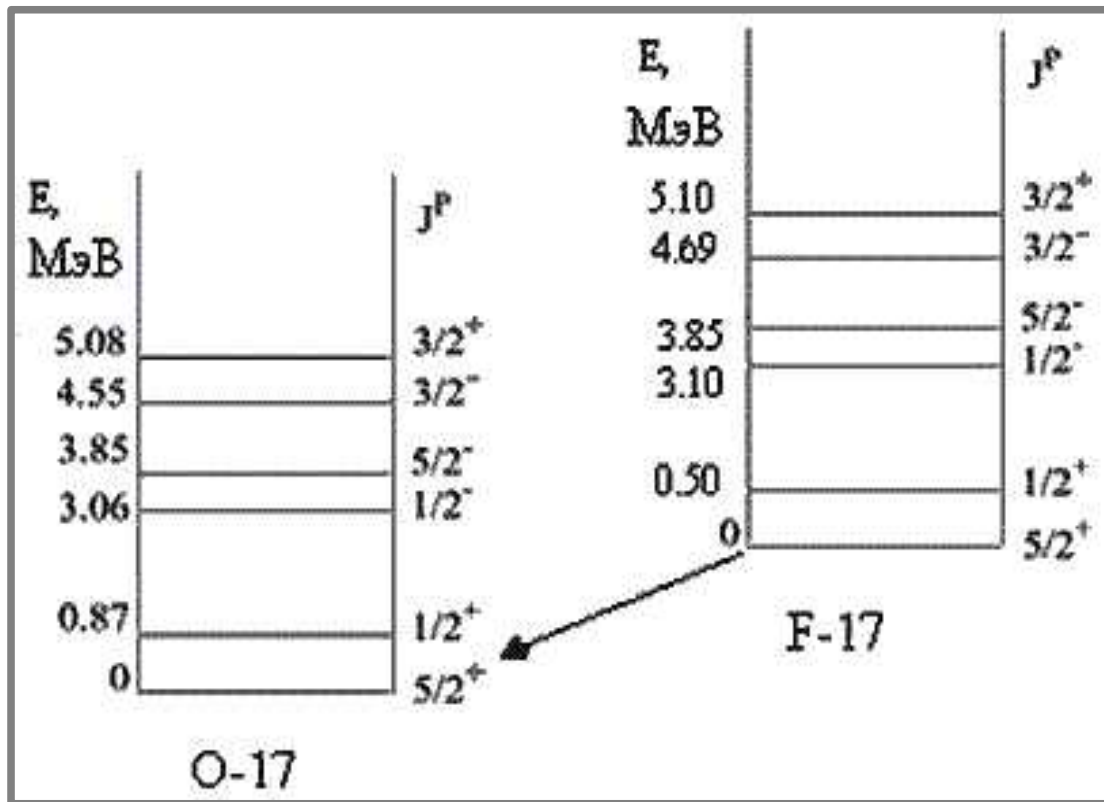
# Часть 2. Ядерные силы. Модель Юкавы.



# Спектры зеркальных ядер

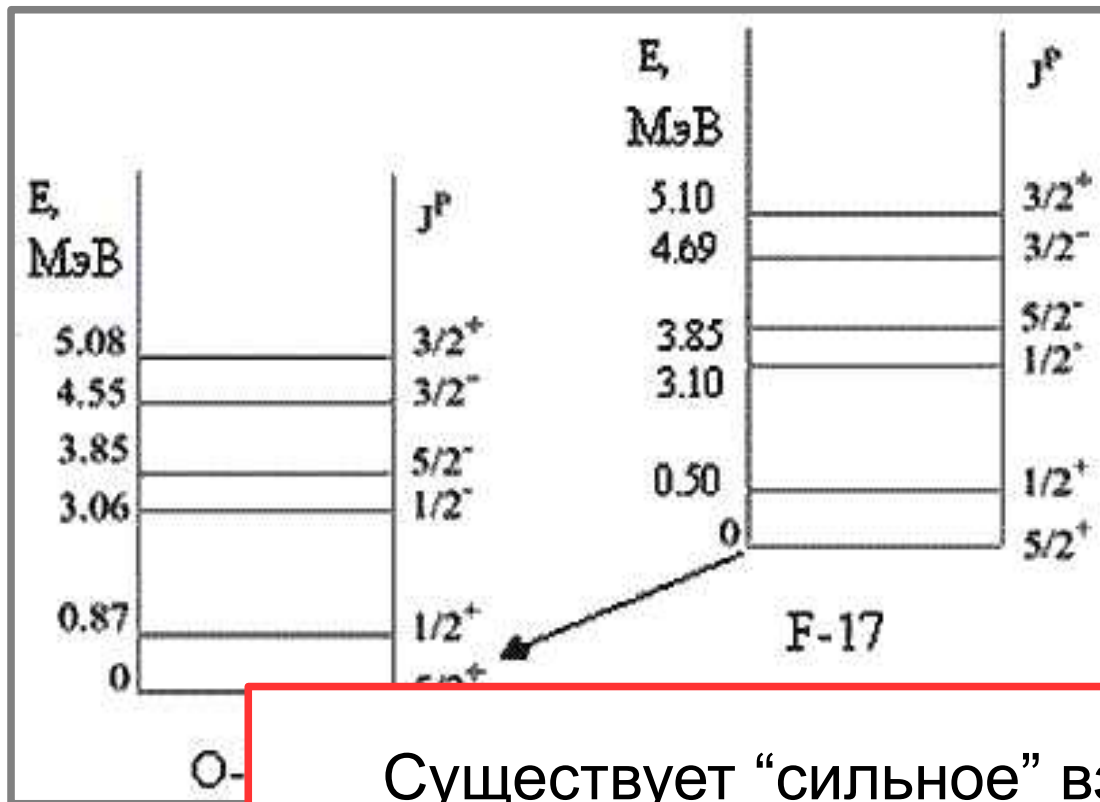


# Спектры зеркальных ядер



- Масштаб энергий ~МэВ
- Структура уровней слабо зависит от типа нуклона
- Спины состояний ядер могут сильно отличаться — возможно излучение фотонов высокой мультипольности

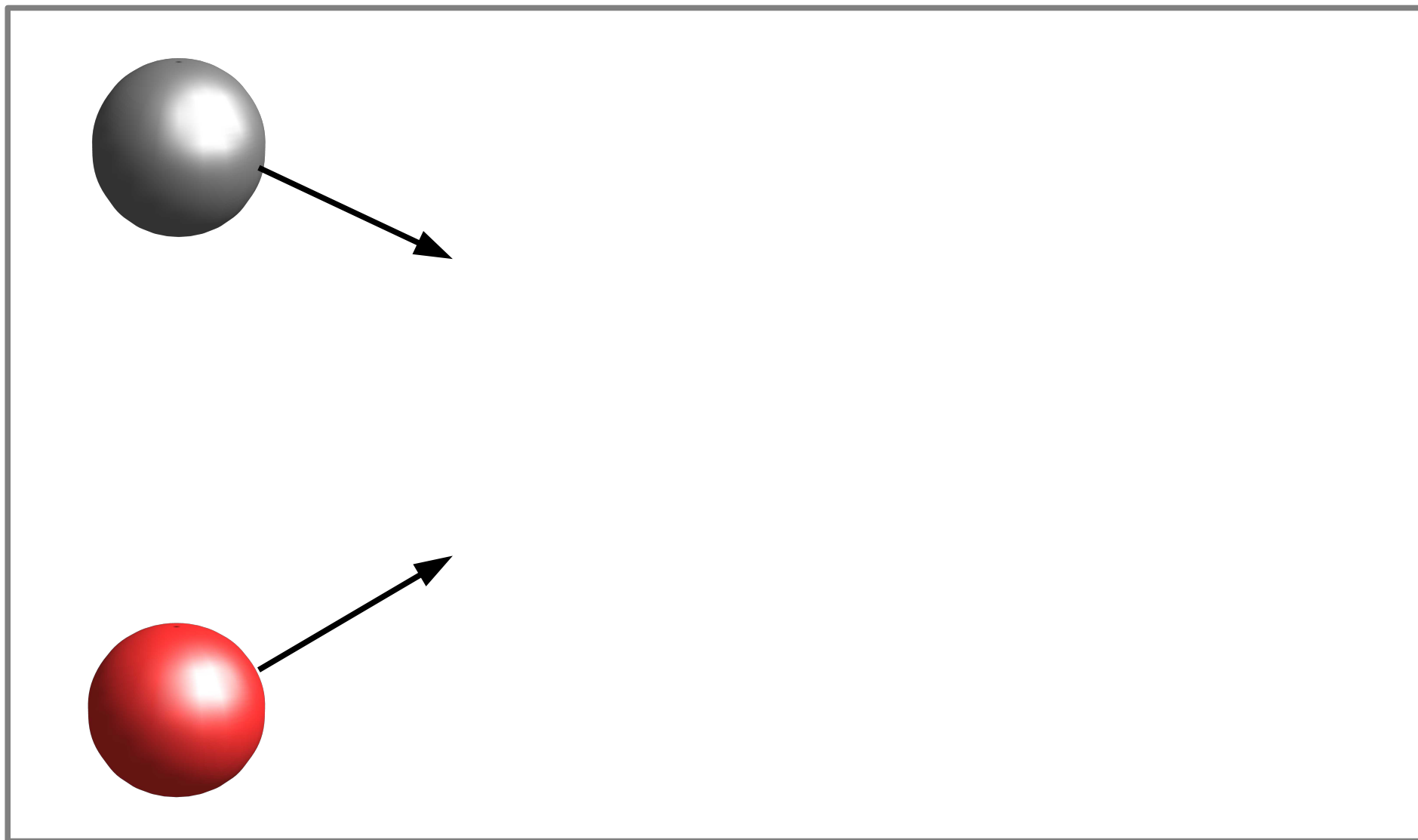
# Спектры зеркальных ядер



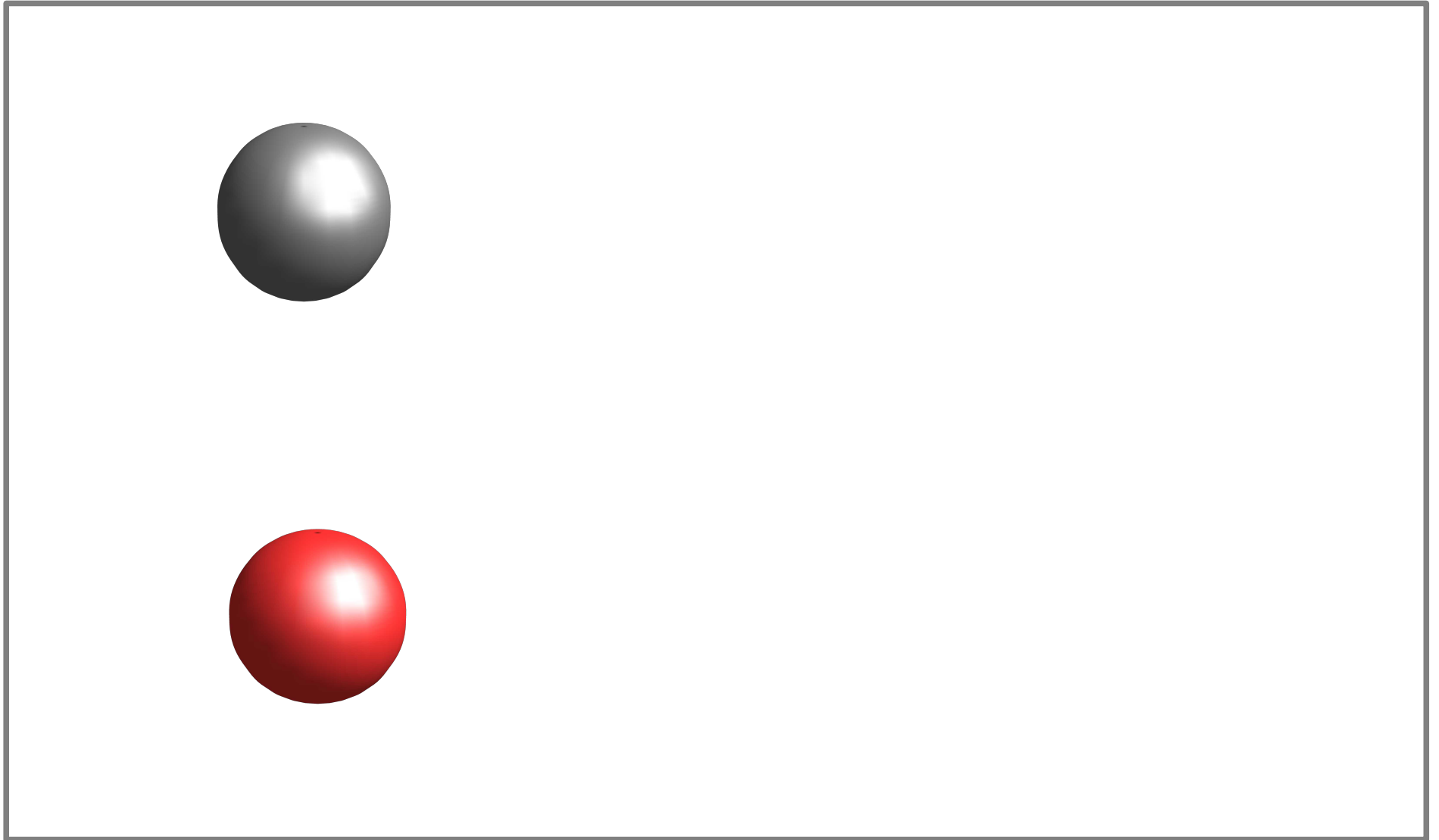
- Масштаб энергий ~МэВ
- Структура уровней слабо зависит от типа нуклона
- Спины состояний ядер могут сильно отличаться —

Существует “сильное” взаимодействие, которое превзойдёт кулоновское отталкивание протонов и сможет связать в ядре нейтральные нейтроны

# Взаимодействие через обмен частицами

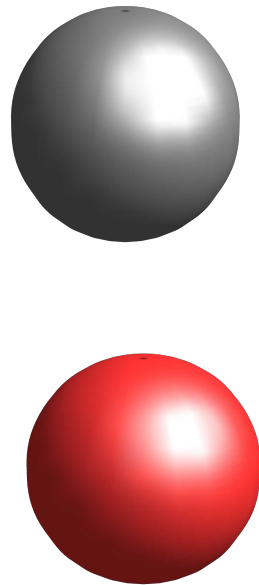


# Взаимодействие через обмен частицами

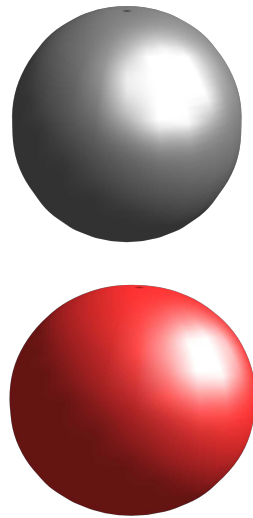




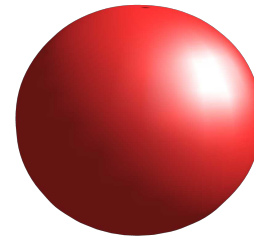
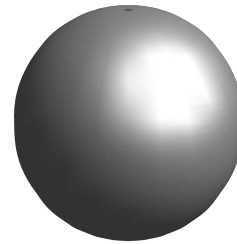
# Взаимодействие через обмен частицами



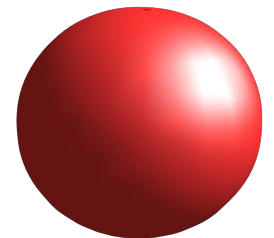
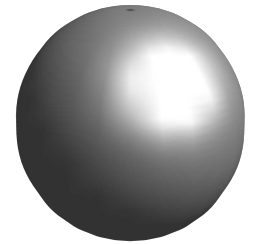
# Взаимодействие через обмен частицами



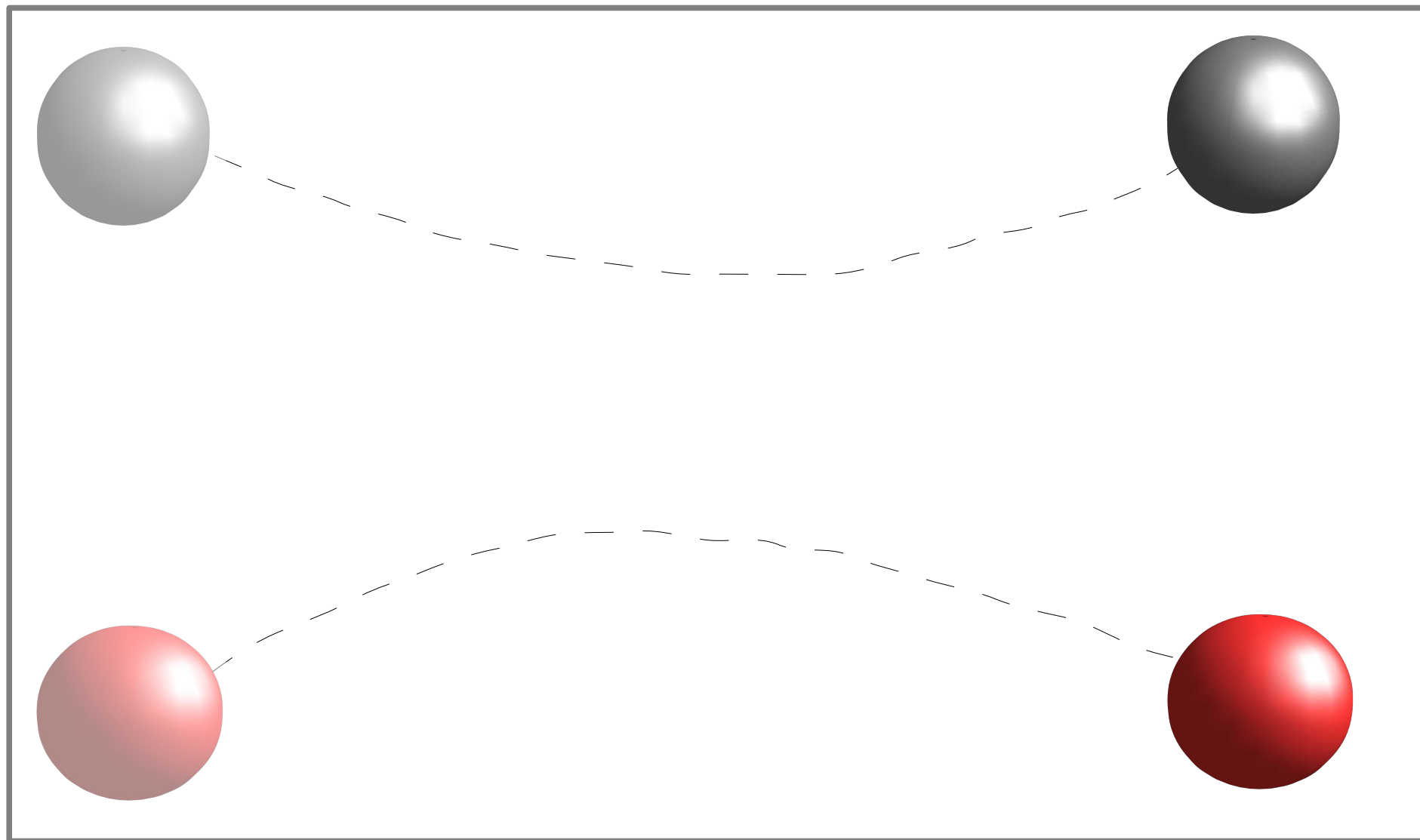
# Взаимодействие через обмен частицами



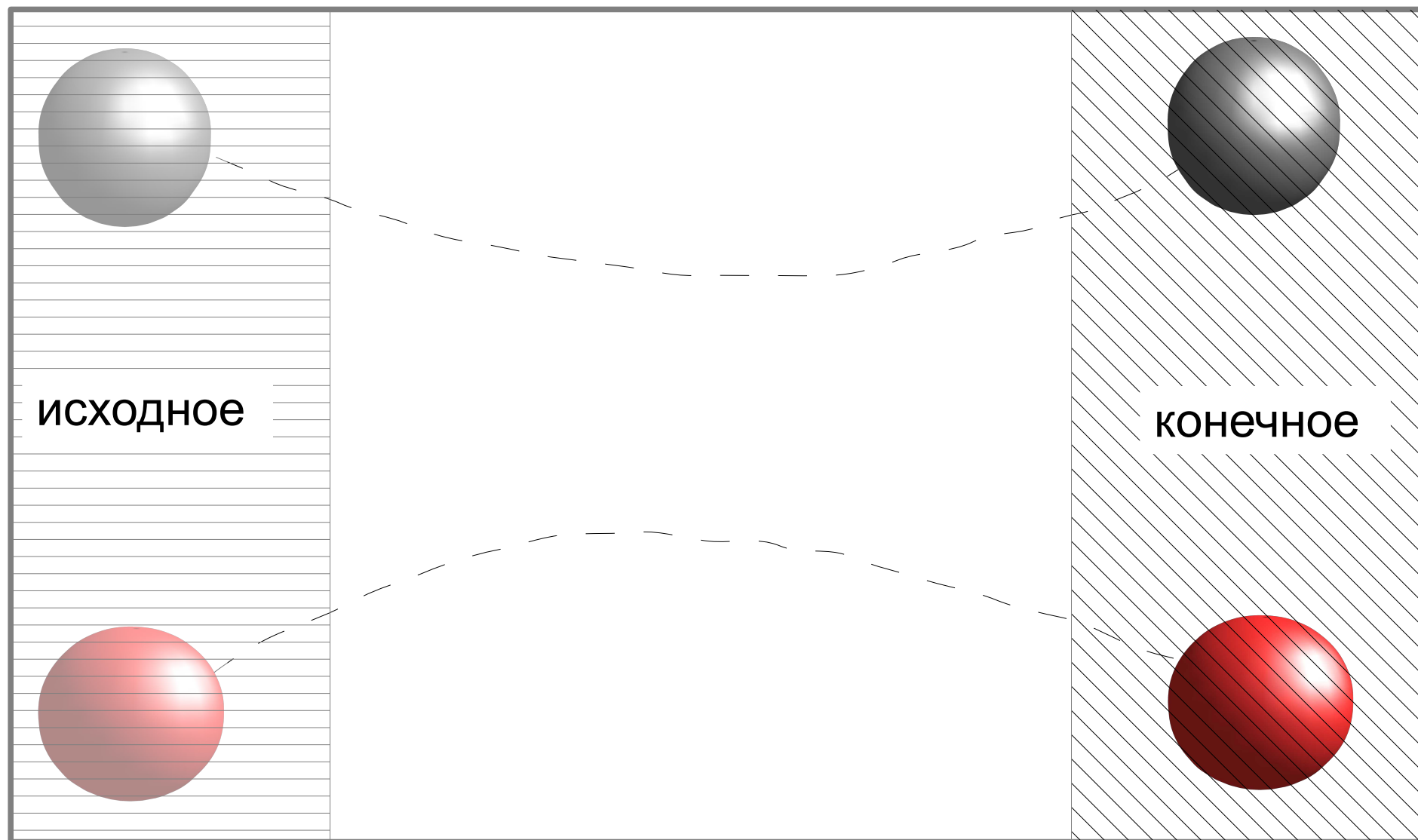
# Взаимодействие через обмен частицами



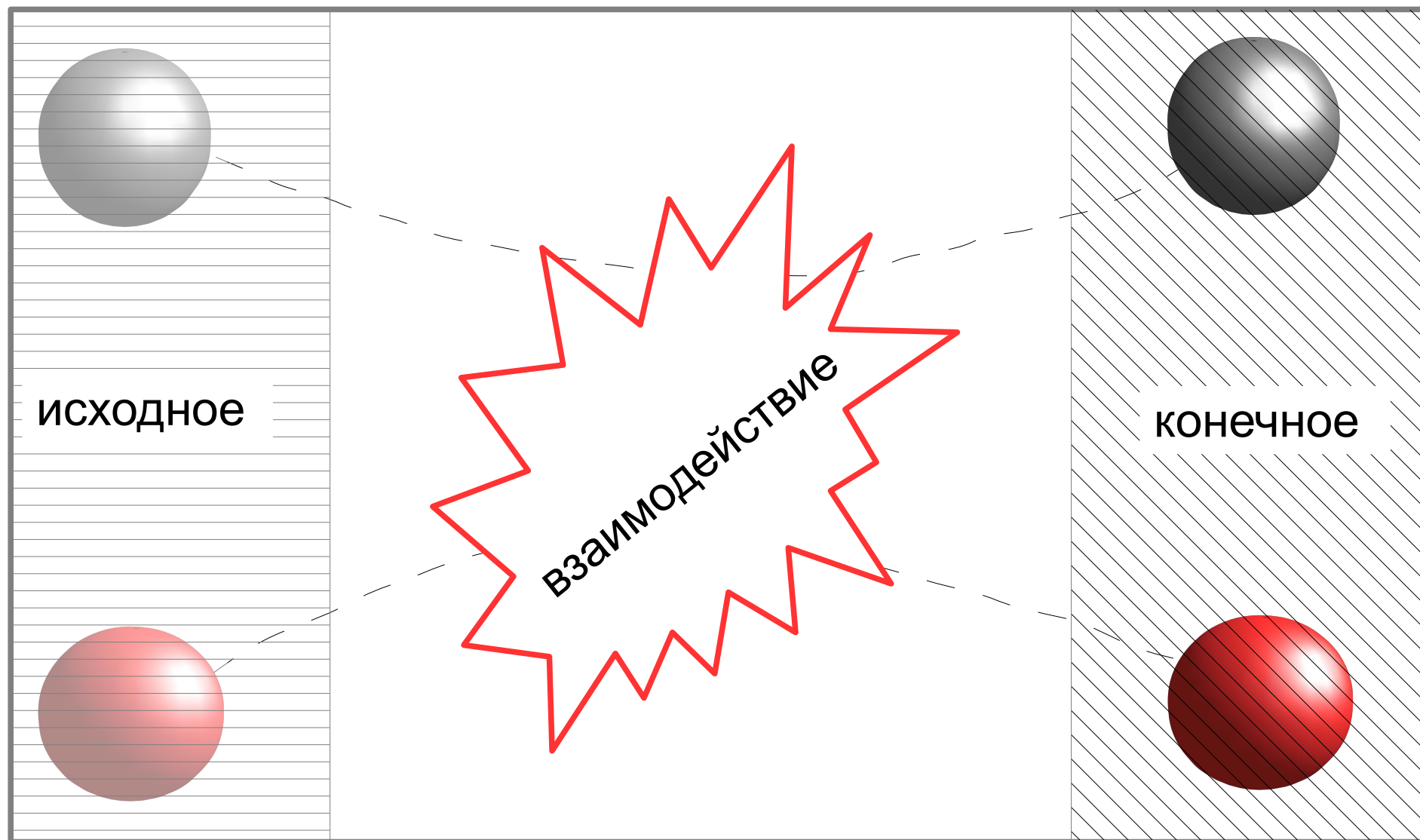
# Взаимодействие через обмен частицами



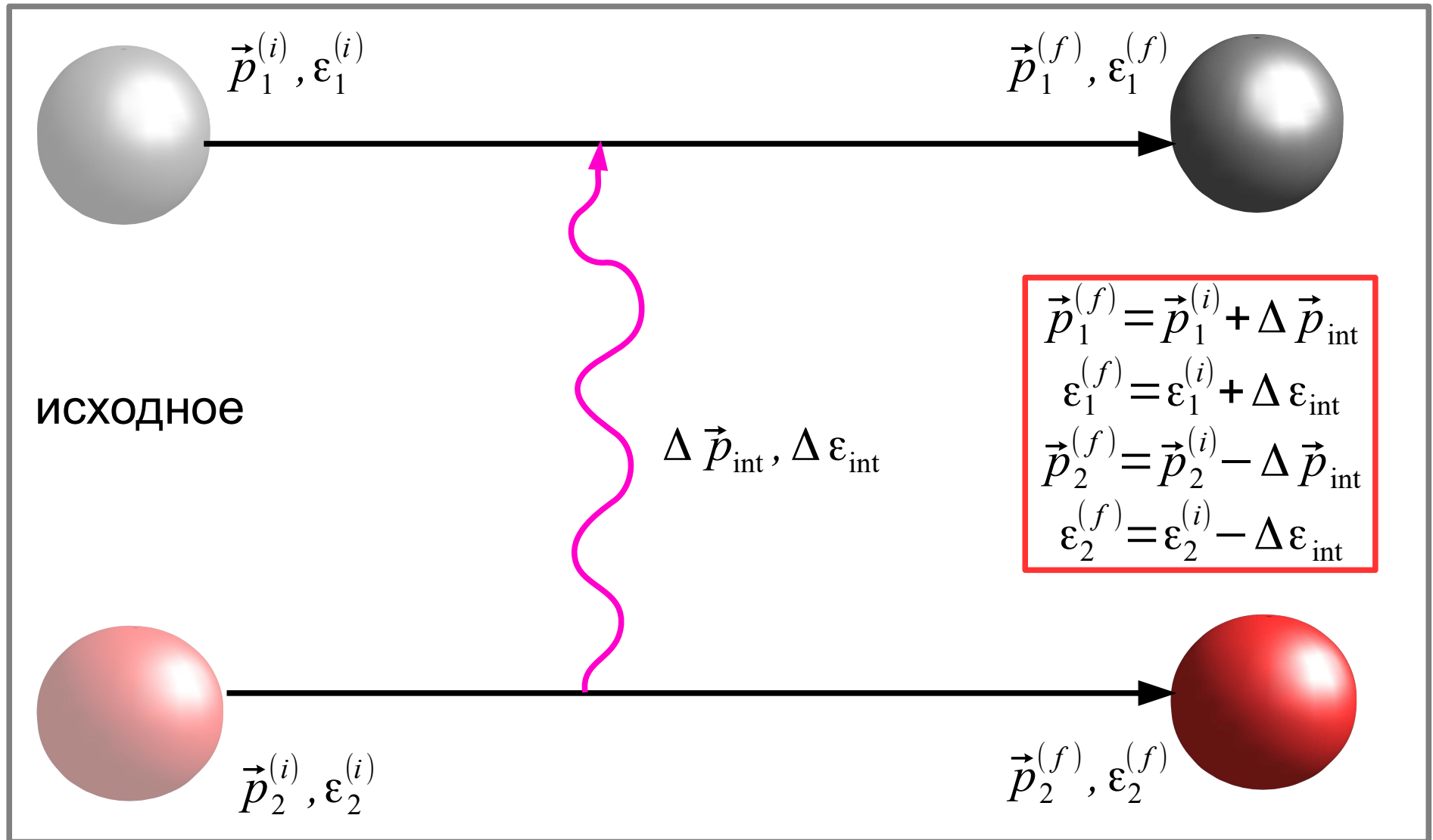
# Взаимодействие через обмен частицами



# Взаимодействие через обмен частицами

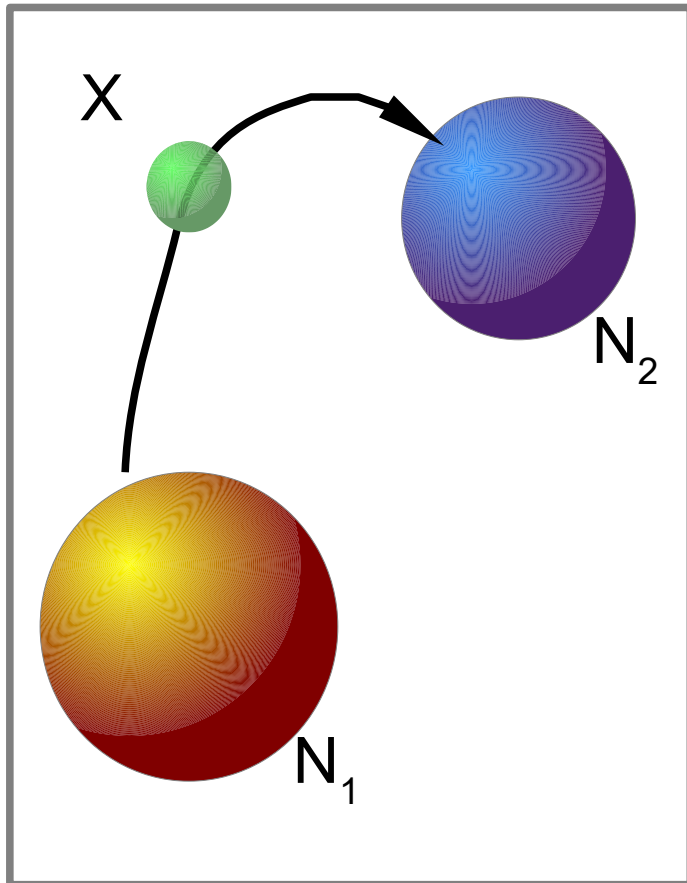


# Взаимодействие через обмен частицами





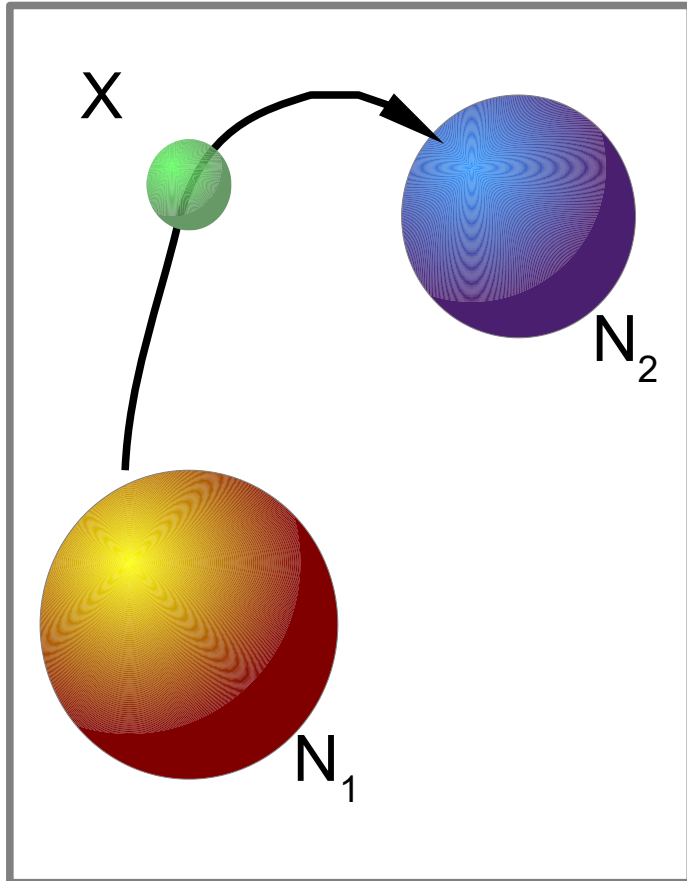
# Модель ядерных сил Юкавы



Юкава  
(теория, 1949)  
Поул  
(обнаружение  
мезонов, 1947)



# Модель ядерных сил Юкавы

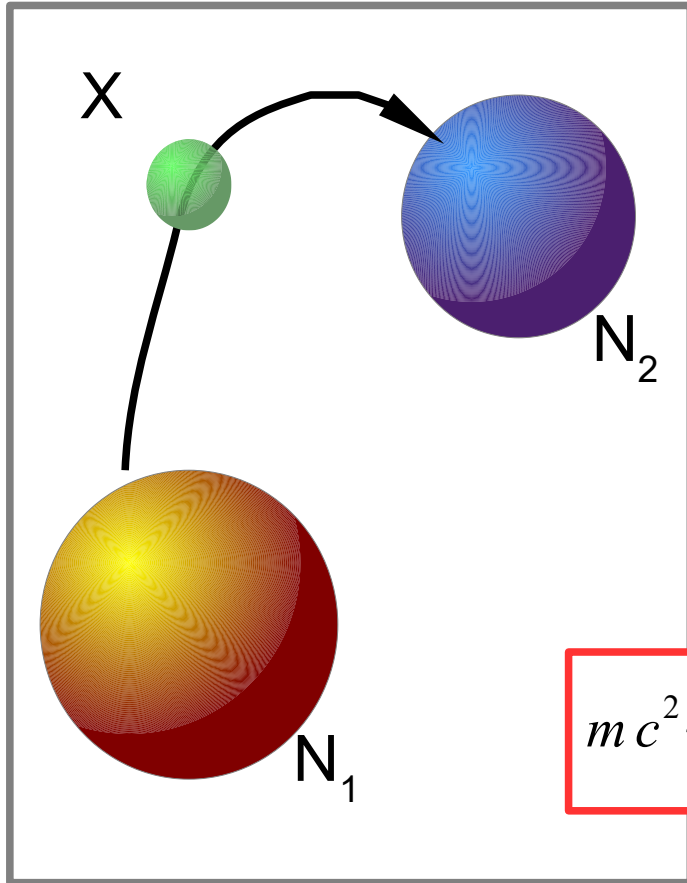


$$\Delta E \times \tau \sim \hbar$$
$$\Delta E = m c^2$$
$$L \sim c \tau \sim \frac{\hbar c}{m c^2}$$

Юкава  
(теория, 1949)  
Поул  
(обнаружение  
мезонов, 1947)



# Модель ядерных сил Юкавы



$$\Delta E \times \tau \sim \hbar$$

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

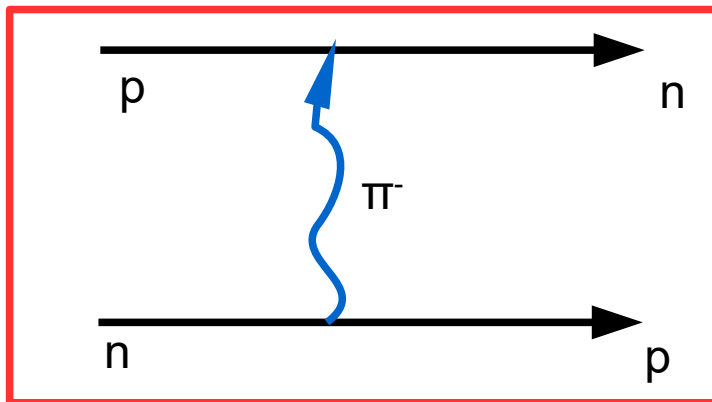
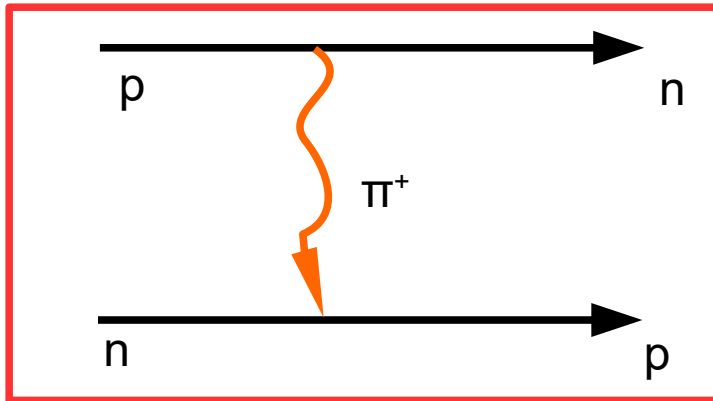
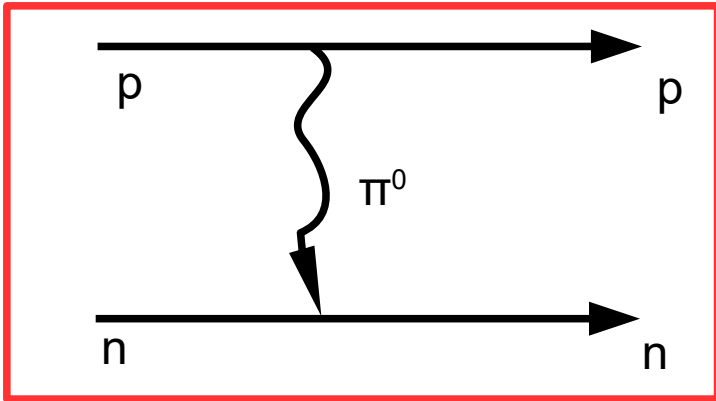
$$L \sim c \tau \sim \frac{\hbar c}{m c^2}$$

Юкава  
(теория, 1949)  
Поуэл  
(обнаружение  
мезонов, 1947)



$$m c^2 \sim \frac{\hbar c}{L} \sim \frac{10^{-27} \times 10^{10}}{10^{-13}} \text{ эрг} = 10^{-4} \text{ эрг} \sim 10^8 \text{ эВ} = 100 \text{ МэВ}$$

# $\pi$ -мезоны: перенос сильного взаимодействия между нуклонами



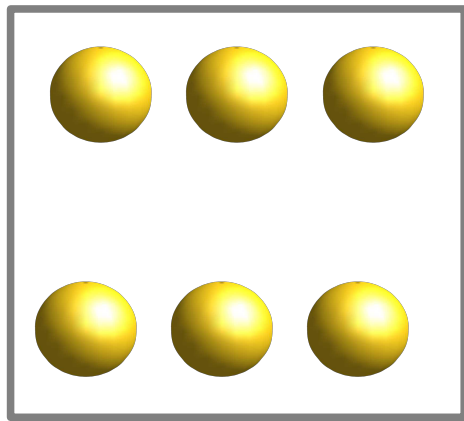
$$m_{\pi}c^2 = \begin{cases} 139.6 \text{ МэВ} (\pi^{\pm}) \\ 135.0 \text{ МэВ} (\pi^0) \end{cases}$$

$$T = \begin{cases} 26 \text{ нсек} (\pi^{\pm}) \\ \sim 10^{-7} \text{ нсек} (\pi^0) \end{cases}$$

$$\frac{\hbar}{m_{\pi}c^2} \simeq 10^{-23} \text{ сек} = 10^{-14} \text{ нсек}$$

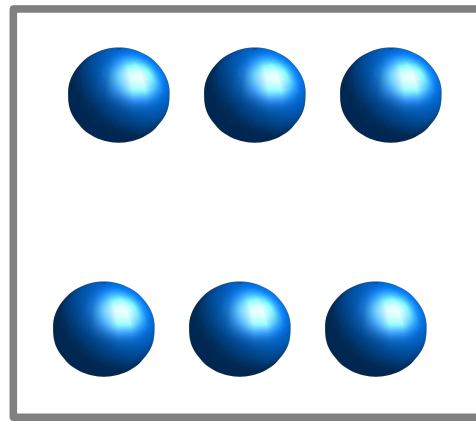
# Часть 3. Энергия связи ядра. Капельная модель.

# Энергия связи ядра



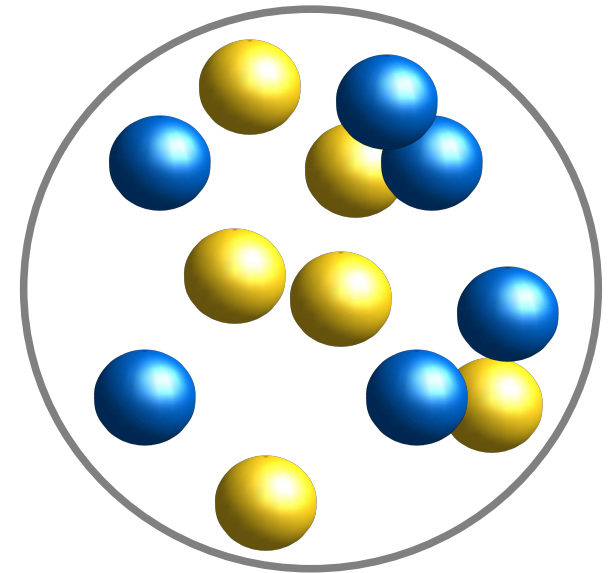
6p

+



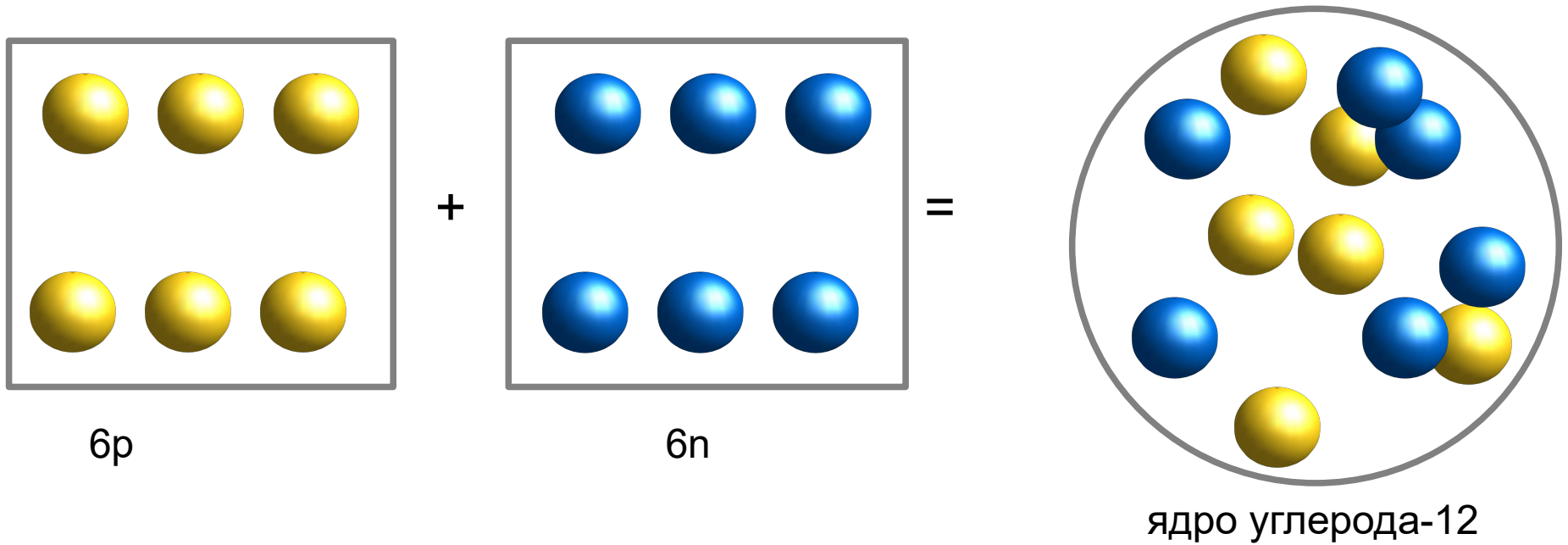
6n

=



ядро углерода-12

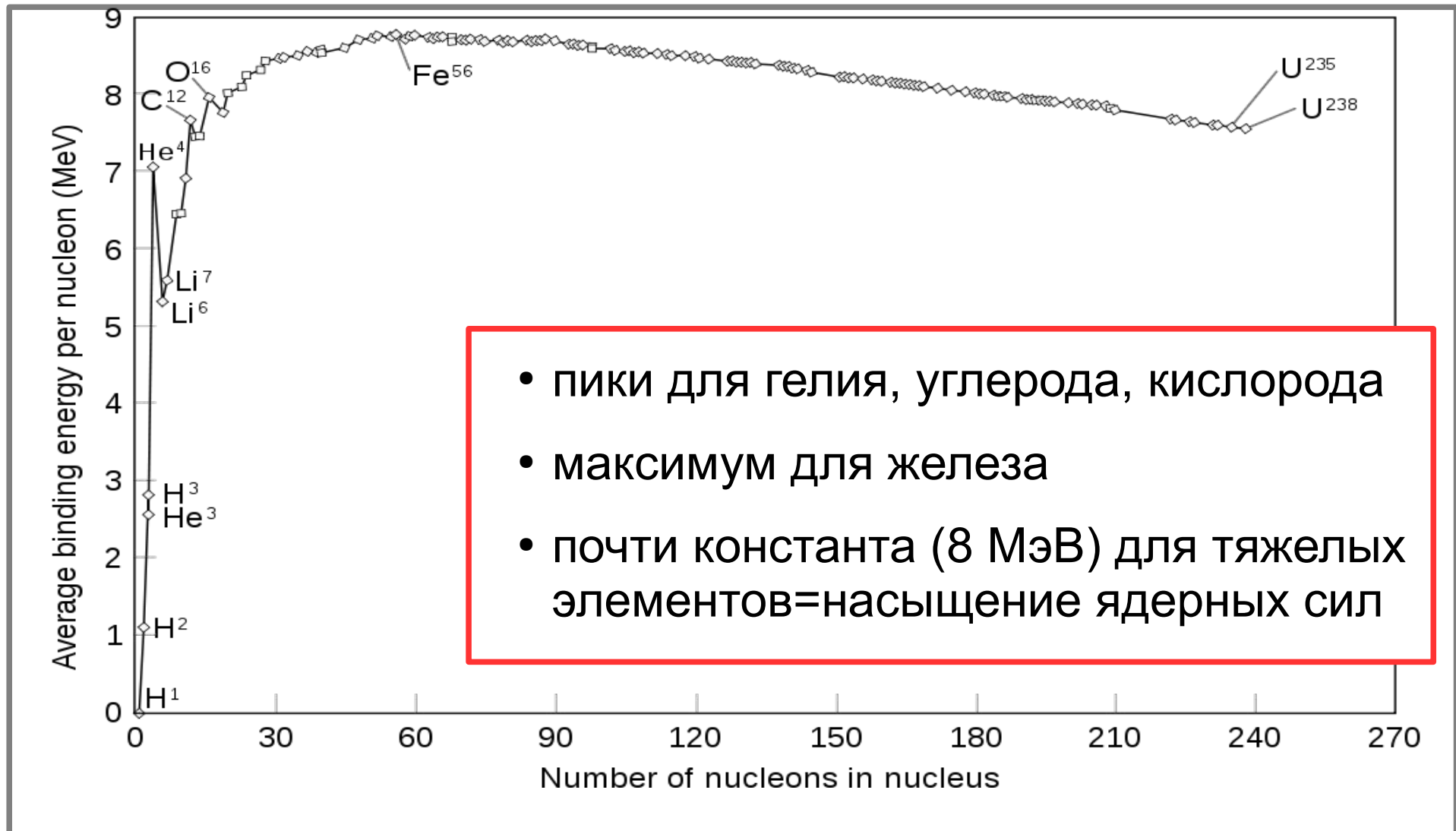
# Энергия связи ядра



$$M_{\text{ядра}} c^2 + E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n) c^2$$
$$E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n - M_{\text{ядра}}) c^2 > 0$$

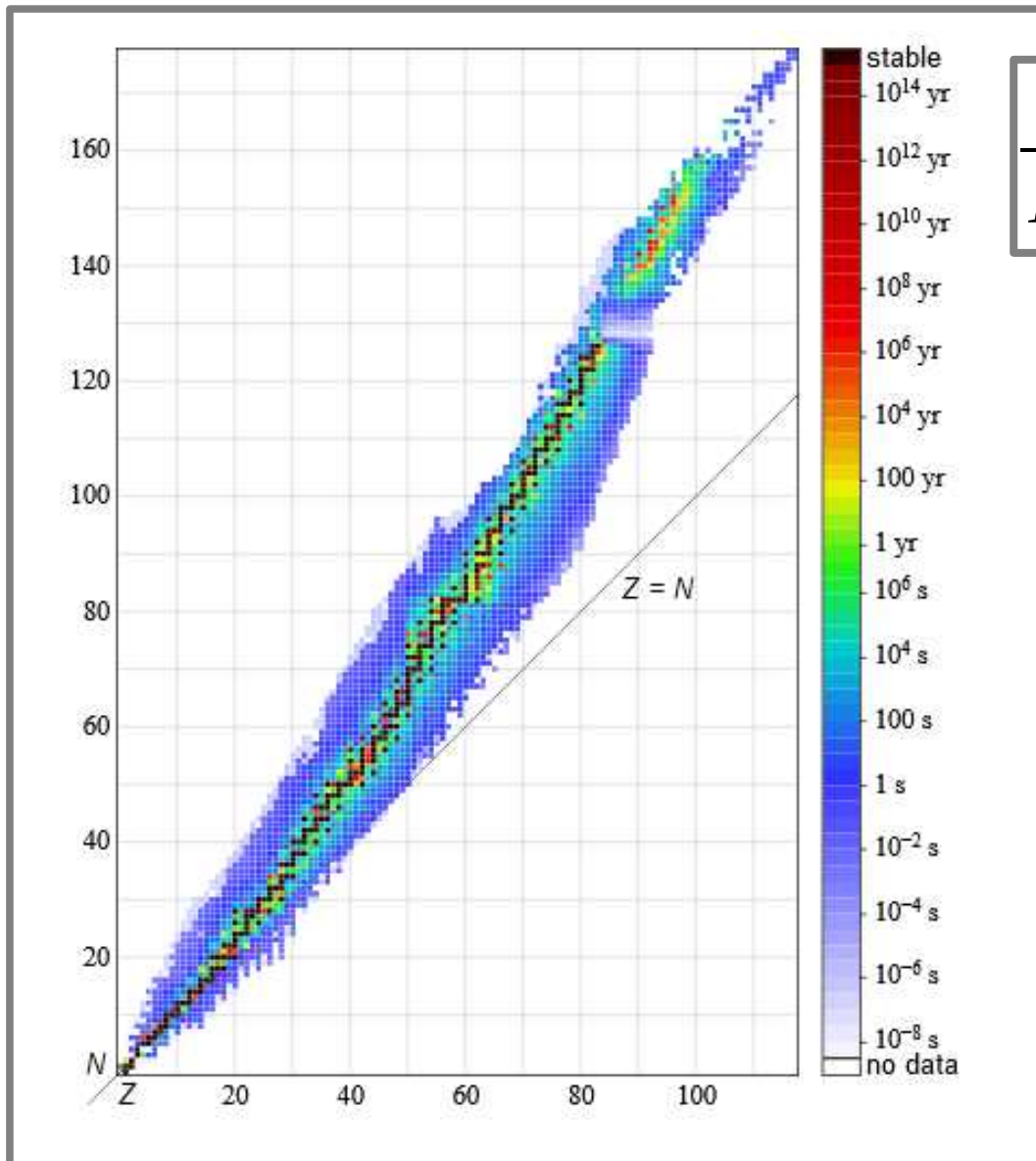
чем больше  $E_{\text{св}}$   
тем «крепче» ядро

# Удельная энергия связи (на нуклон)



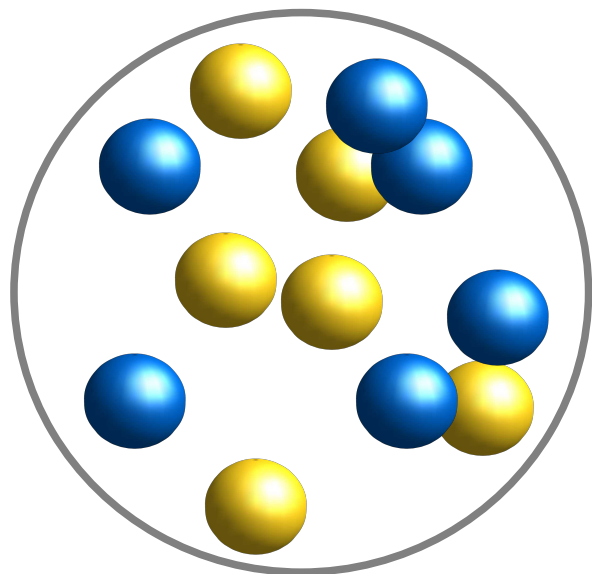


# Стабильность изотопов (экспериментальные данные)

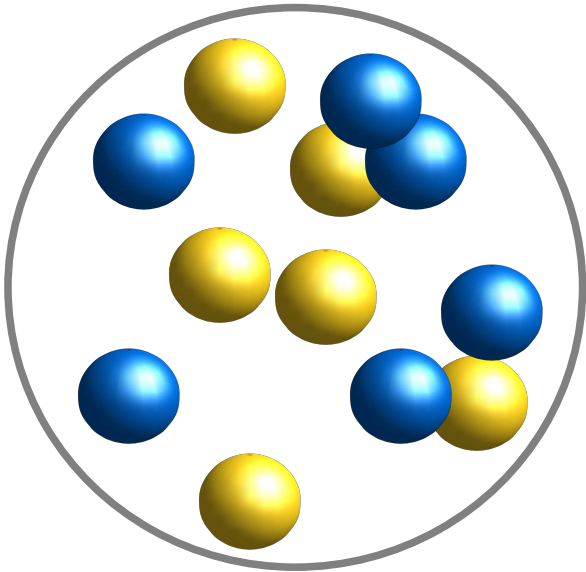


$$\frac{N}{N_0} = 2^{-t/T_{1/2}}$$

# Капельная модель, формула Вайцзекера



# Капельная модель, формула Вайцзекера



$$E_V = \alpha A$$

насыщение ядерных сил

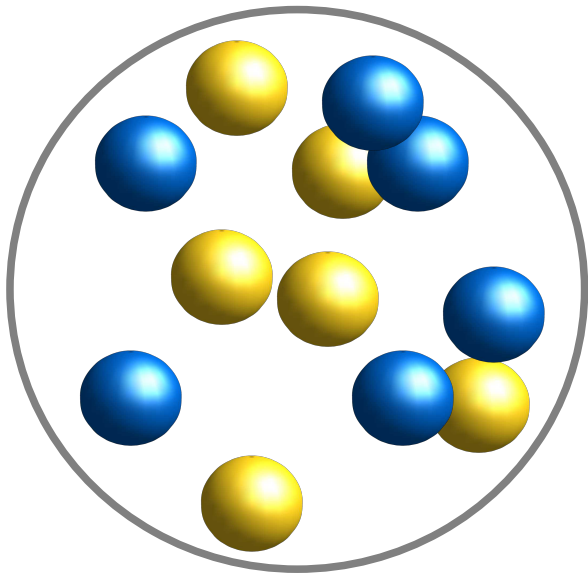
$$E_S = -\beta A^{2/3}$$

поверхность

$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

отталкивание протонов

# Капельная модель, формула Вайцзекера



$$E_V = \alpha A$$

насыщение ядерных сил

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

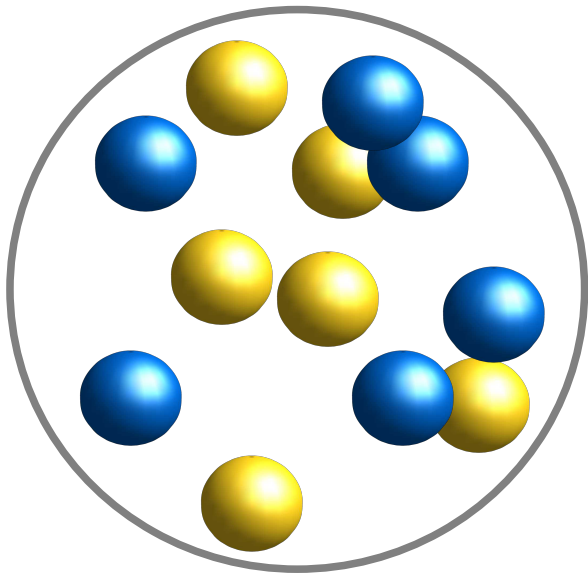
поверхность

$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

отталкивание протонов

эти слагаемые делают наиболее устойчивыми перегруженные нейтронами ядра

# Капельная модель, формула Вайцзекера



$$E_V = \alpha A \quad \text{насыщение ядерных сил}$$

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

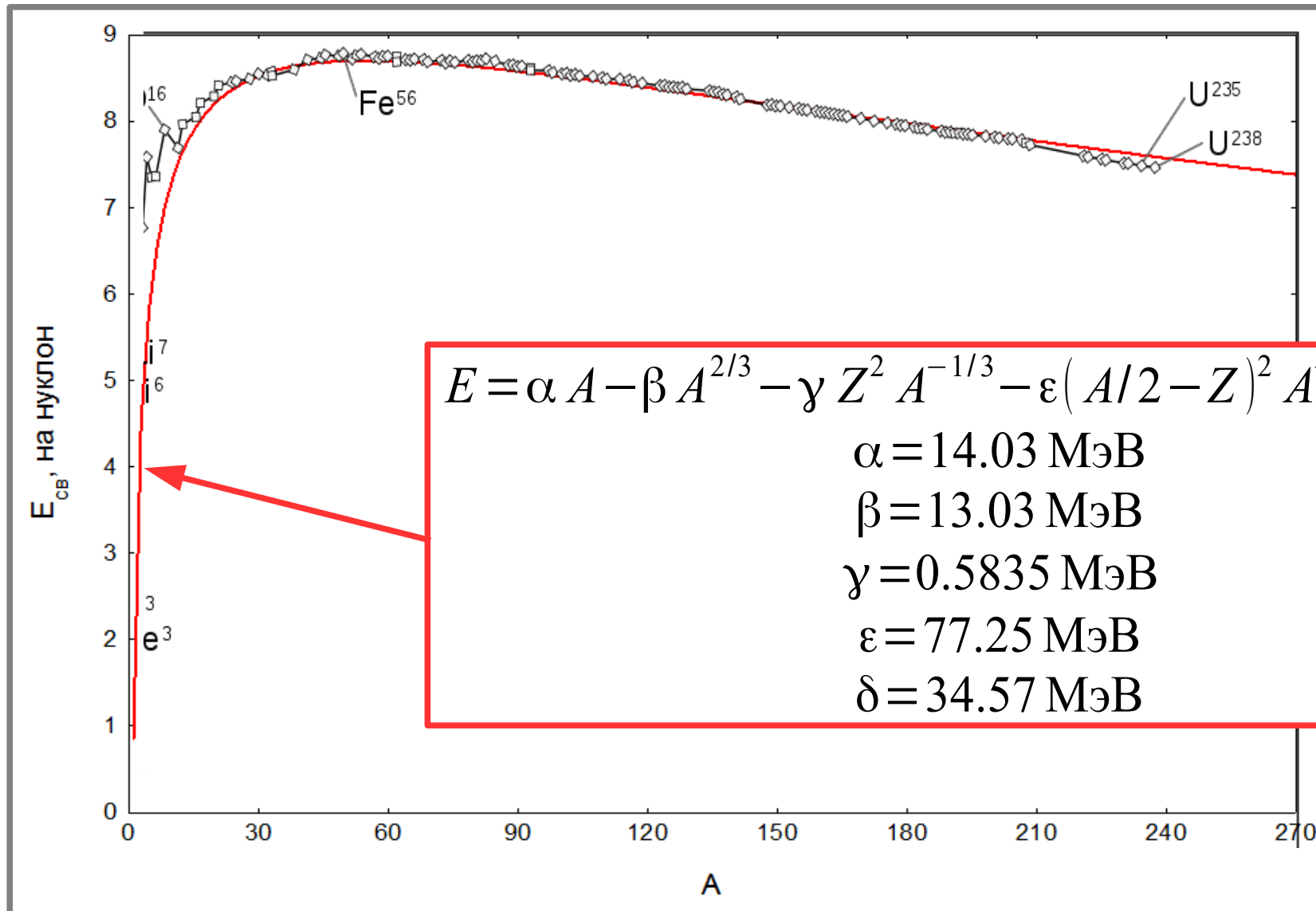
$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad \text{отталкивание протонов}$$

квантовые эффекты:

$$E_{\text{сим}} = -\varepsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A}$$

$$E_{\text{четн}} = k \frac{\delta}{A^{3/4}}, \quad k = \{0, \pm 1\}$$

# Капельная модель, формула Вайцзекера

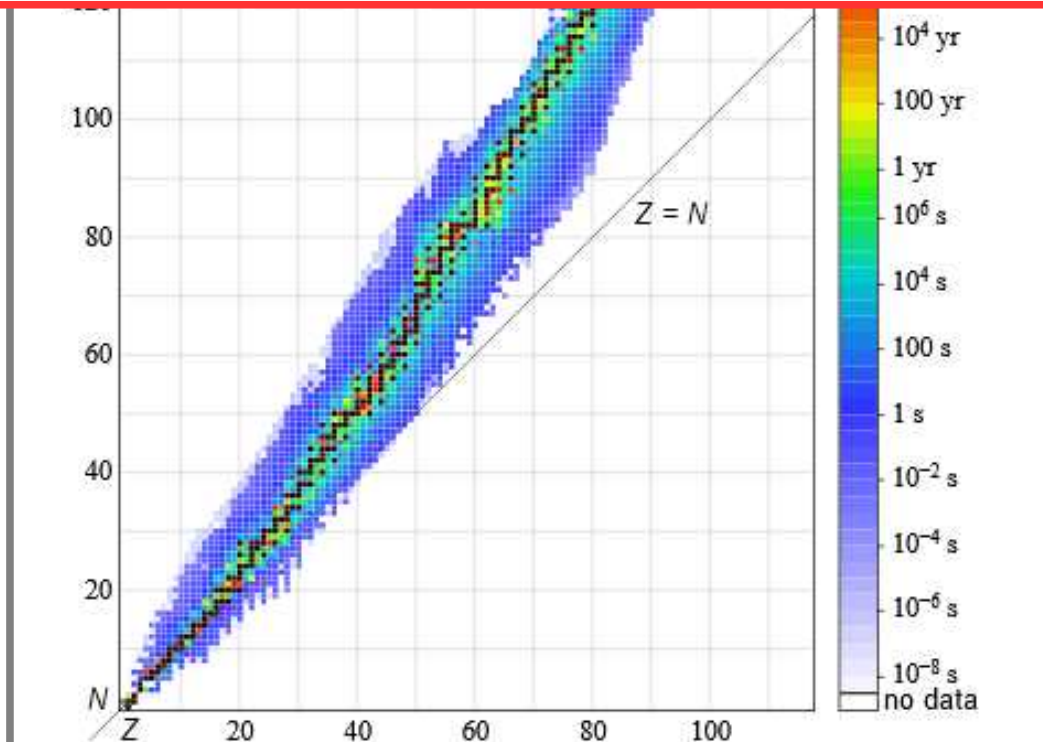


# “Долина стабильности”

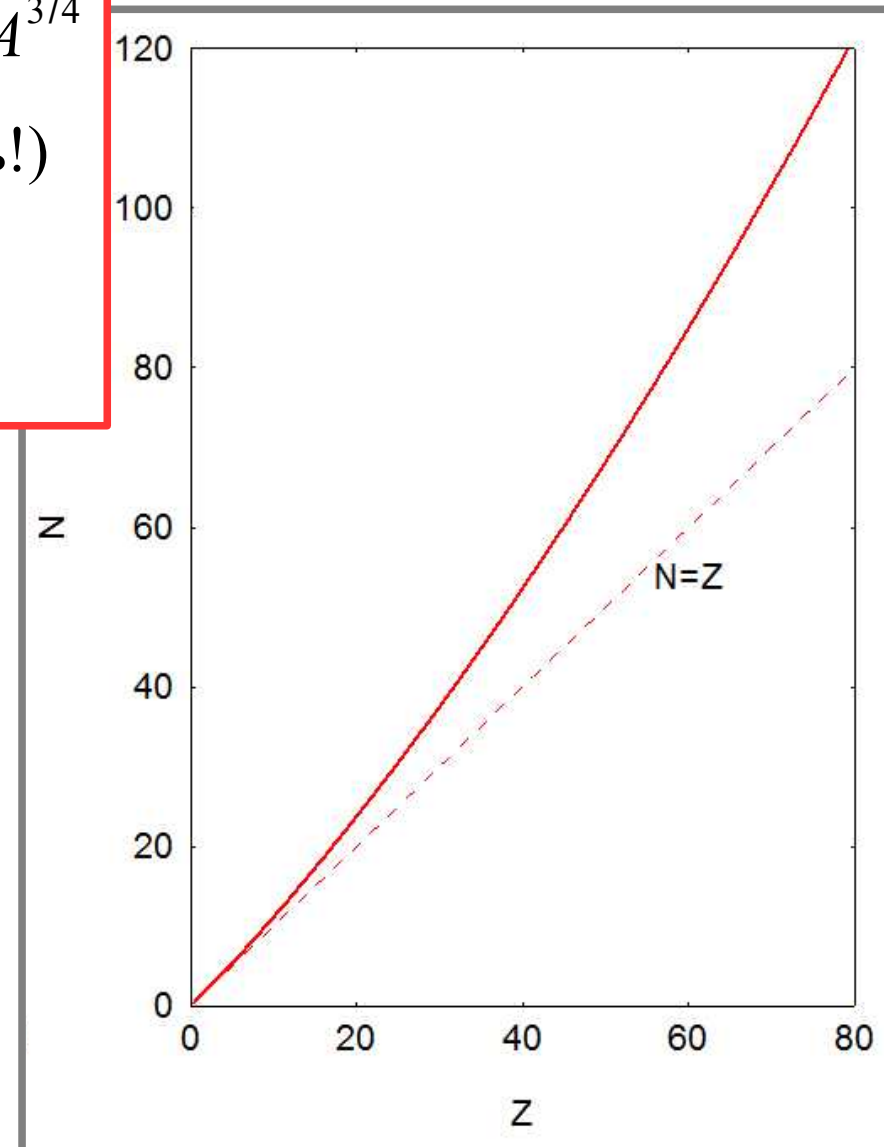
$$E_{cv} = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + k \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$2\gamma \frac{Z}{A^{1/3}} - \varepsilon + 2\varepsilon \frac{Z}{A} = 0 \quad (\text{не меняя чётность!})$$

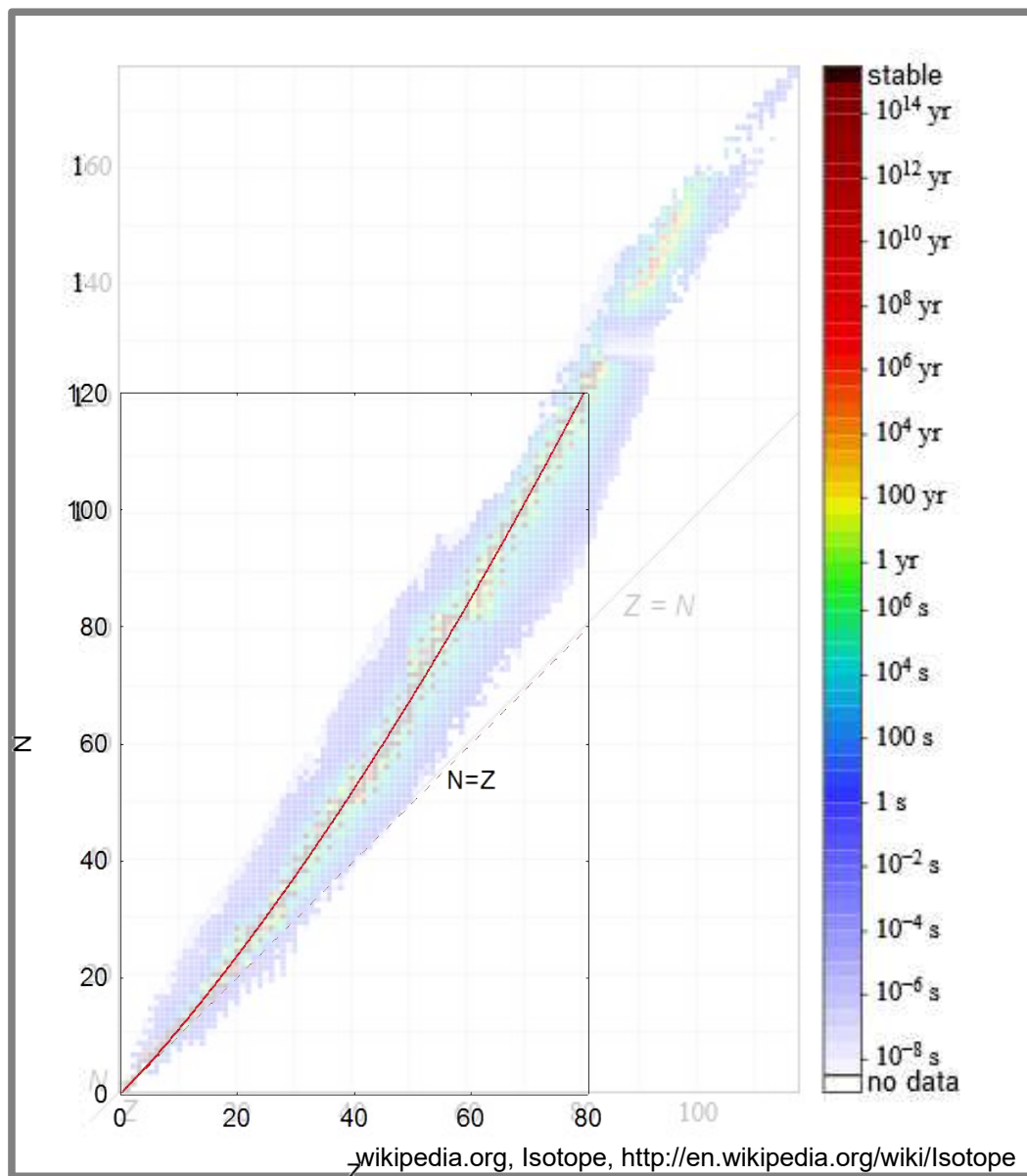
$$Z = \frac{A}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\varepsilon} A^{2/3}} \approx \frac{A}{2} \times \frac{1}{1 + 0.0075 A^{2/3}}$$



wikipedia.org, Isotope, <http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>

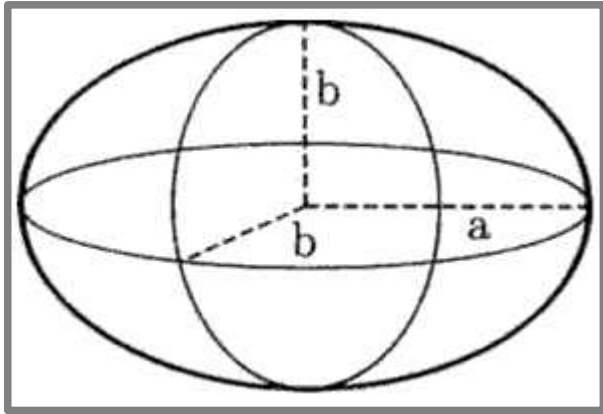


# “Долина стабильности”





# УСТОЙЧИВОСТЬ «КАПЛИ»



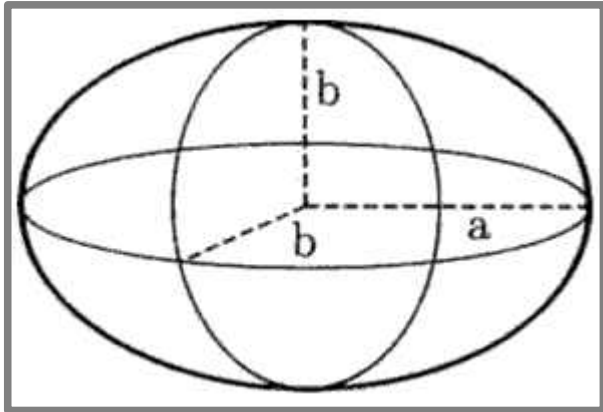
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/ndb101.htm>

$$V = \text{const}, a = R(1 + \xi), b = R(1 - \xi/2)$$

$$E_S = -\beta A^{2/3} \left( 1 + \frac{2}{5} \xi^2 \right)$$

$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left( 1 - \frac{1}{5} \xi^2 \right)$$

# Устойчивость «капли»



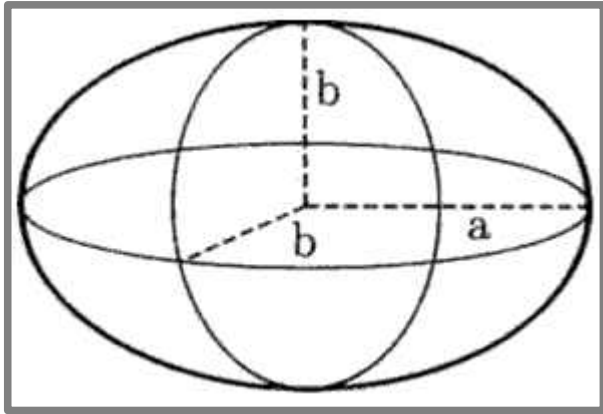
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/ndb101.htm>

$$V = const, a = R(1 + \xi), b = R(1 - \xi/2)$$

$$E_S = -\beta A^{2/3} \left( 1 + \frac{2}{5} \xi^2 \right) \quad \text{НЕ ВЫГОДНО}$$

$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left( 1 - \frac{1}{5} \xi^2 \right) \quad \text{ВЫГОДНО}$$

# Устойчивость «капли»



<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/ndb101.htm>

Условие  
неустойчивости

$$V = \text{const}, a = R(1 + \xi), b = R(1 - \xi/2)$$

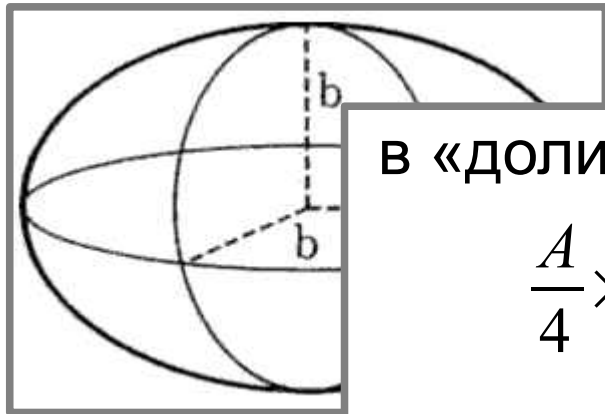
$$E_S = -\beta A^{2/3} \left( 1 + \frac{2}{5} \xi^2 \right) \quad \text{НЕ ВЫГОДНО}$$

$$E_C = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left( 1 - \frac{1}{5} \xi^2 \right) \quad \text{ВЫГОДНО}$$

$$\Delta E = \gamma \frac{\xi^2}{5} A^{2/3} \left( \frac{Z^2}{A} - 2 \frac{\beta}{\gamma} \right) > 0$$

$$\frac{Z^2}{A} > 45$$

# Устойчивость «капли»



<http://nuclphys.sinp.m>

$$V = const, a = R(1 + \xi), b = (1 - \xi/2)$$

В «долине стабильности»

$$\frac{A}{4} \times \frac{1}{(1 + 0.0075 A^{2/3})^2} > 45$$

$$\frac{A}{(1 + 0.0075 A^{2/3})^2} > 180$$

$$A > 330; Z > 120$$

$$\left(1 + \frac{2}{5} \xi^2\right)$$

не выгодно

$$\left(1 - \frac{1}{5} \xi^2\right)$$

выгодно

$$\left(-2 \frac{\beta}{\gamma}\right) > 0$$

для Fl:  $Z=114, A=289$

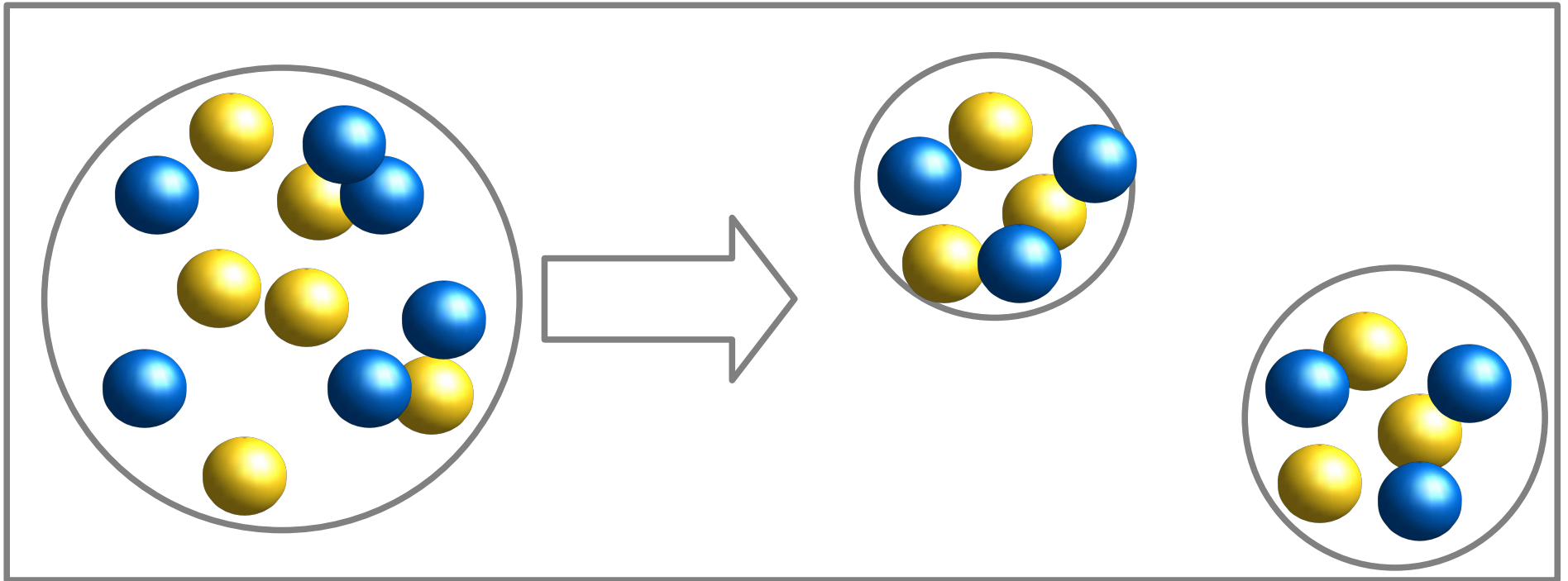
$$\frac{Z^2}{A} = 45$$

$$\frac{Z^2}{A} > 45$$

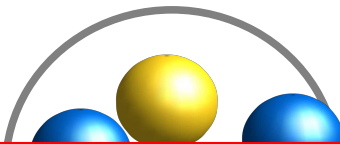
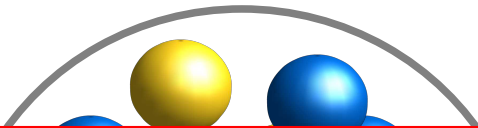
для U:  $Z=92, A=238$

$$\frac{Z^2}{A} = 35$$

# Обобщение: устойчивость ядер к распаду

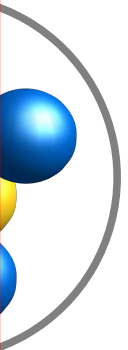


# Обобщение: устойчивость ядер к распаду

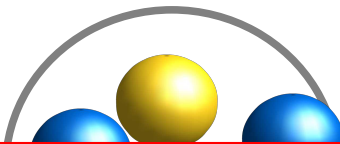
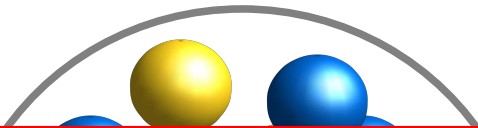


распад на два равных осколка,  
четность не учитываем

$$\alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma Z^2 A^{-1/3} - \varepsilon (A/2 - Z)^2 A^{-1} \text{ vs.}$$


$$2 \left( \alpha \frac{A}{2} - \beta \frac{A^{2/3}}{2^{2/3}} - \gamma Z^2 \frac{A^{-1/3}}{2^{5/3}} - \frac{\varepsilon}{2} (A/2 - Z)^2 A^{-1} \right)$$


# Обобщение: устойчивость ядер к распаду



распад на два равных осколка,  
четность не учитываем

$$\cancel{\alpha A} - \beta A^{2/3} - \gamma Z^2 A^{-1/3} - \cancel{\varepsilon (A/2 - Z)^2 A^{-1}} \text{ vs.}$$

$$2 \left( \cancel{\alpha \frac{A}{2}} - \beta \frac{A^{2/3}}{2^{2/3}} - \gamma Z^2 \frac{A^{-1/3}}{2^{5/3}} - \cancel{\frac{\varepsilon}{2} (A/2 - Z)^2 A^{-1}} \right)$$


# Обобщение: устойчивость ядер к распаду

распад на два равных осколка,  
четность не учитываем

$$\cancel{\alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma Z^2 A^{-1/3} - \varepsilon (A/2 - Z)^2 A^{-1}} \text{ vs.}$$

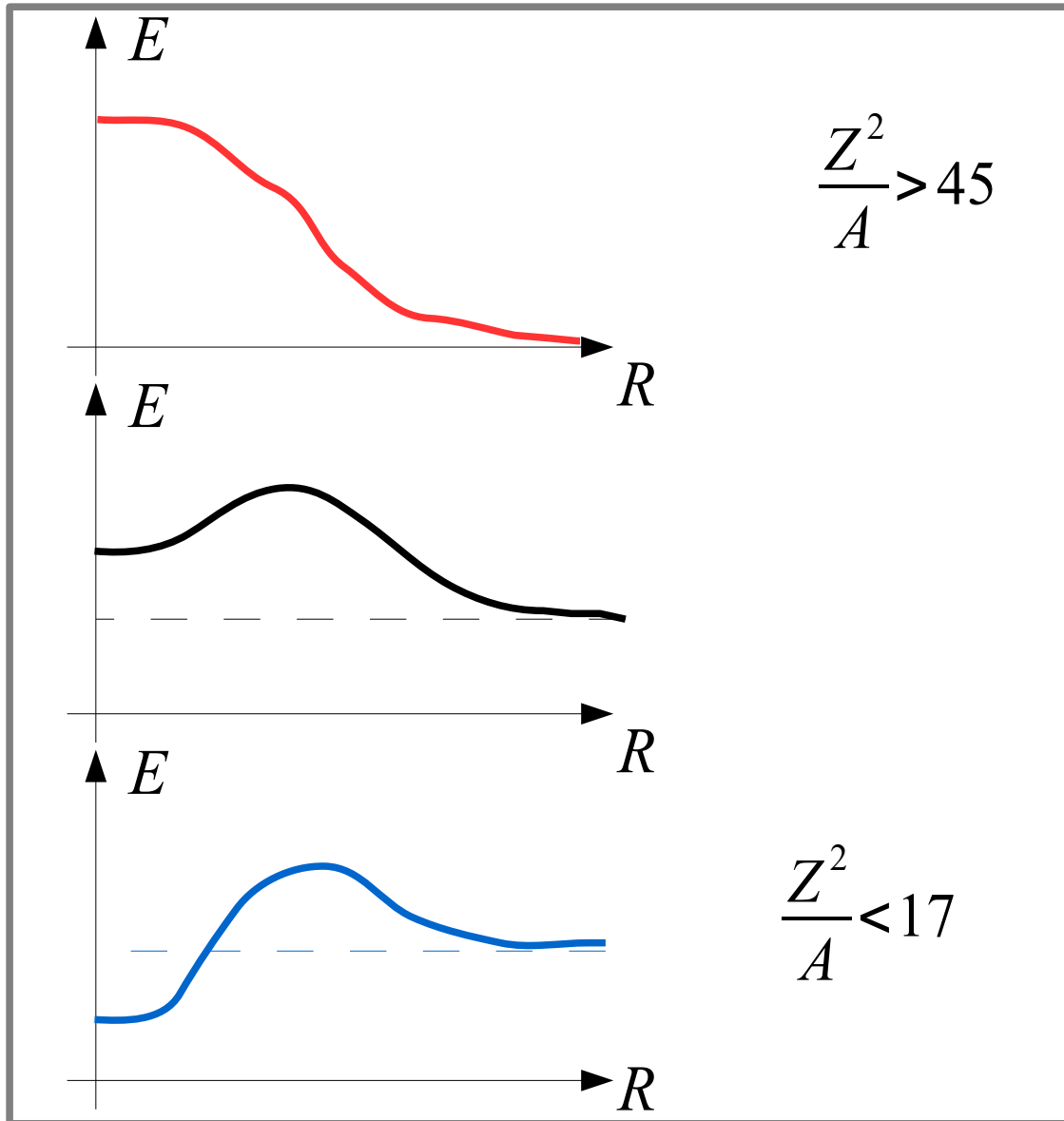
$$2 \left( \cancel{\alpha \frac{A}{2} - \beta \frac{A^{2/3}}{2^{2/3}} - \gamma Z^2 \frac{A^{-1/3}}{2^{5/3}} - \frac{\varepsilon}{2} (A/2 - Z)^2 A^{-1}} \right)$$

$$(2^{1/3} - 1) \text{ vs. } \frac{\gamma}{\beta} \frac{Z^2}{A} \left( 1 - \frac{1}{2^{5/3}} \right)$$

$$8 \text{ vs. } \frac{Z^2}{A}$$



# Обобщение: устойчивость ядер к распаду



# Обобщение: устойчивость ядер к распаду

