

## Лекция 10.

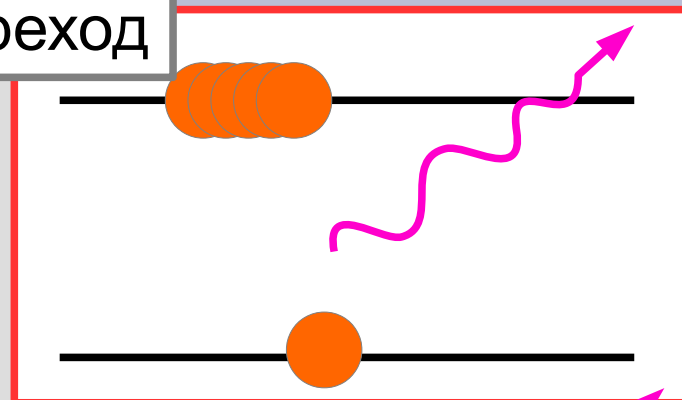
**Строение ядра атома: основные  
экспериментальные факты.**

**Модели строения ядра.**

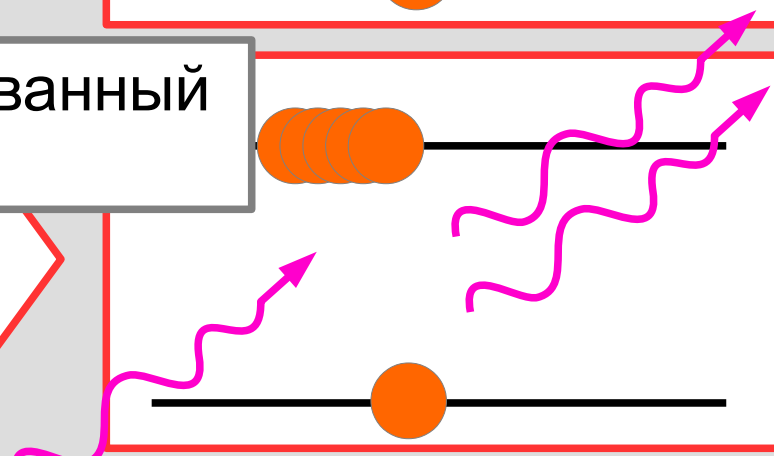
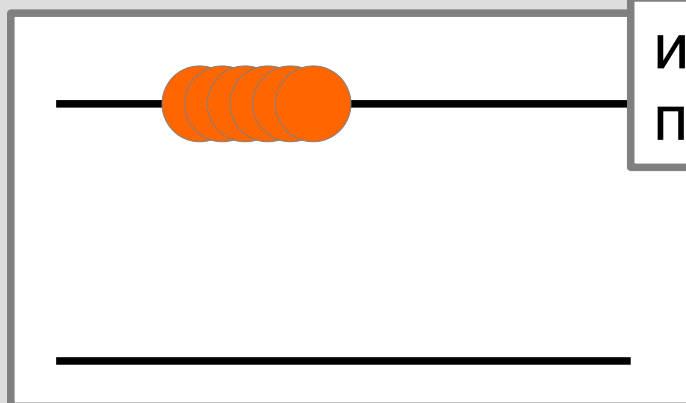
**Возбуждения ядер.**

# Спонтанные и индуцированные

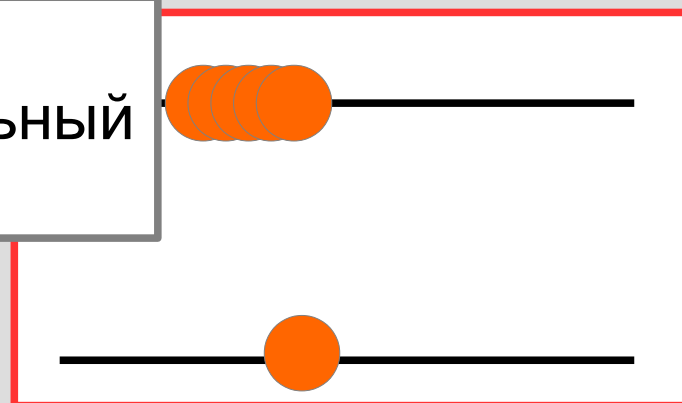
спонтанный переход



индуцированный переход

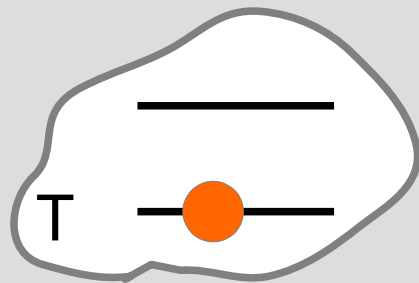


спонтанный  
безызлучательный  
переход



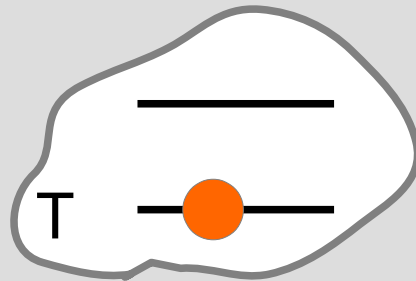
# Если спонтанные переходы только излучательные...

$N$  фотонов



# Если спонтанные переходы только излучательные...

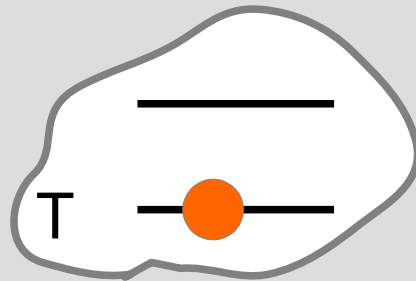
$N$  фотонов



$$n_1 (N w_{инд}) = n_2 [(N-1) w_{инд} + w_{сп}]$$

# Если спонтанные переходы только излучательные...

$N$  фотонов



$$n_1 (N w_{инд}) = n_2 [(N-1) w_{инд} + w_{сп}]$$

удобный предел

$$T \rightarrow \infty:$$

$$n_1 = n_2$$

$$w_{инд} = w_{сп}$$

эти вероятности от  
температуры  
НЕ ЗАВИСЯТ

**Лекция 10.**

**Строение ядра атома: основные  
экспериментальные факты.**

**Модели строения ядра.**

**Возбуждения ядер.**

# Литература по физике ядра

- **Ядерная физика в Интернете**  
*<http://nuclphys.sinp.msu.ru/>*
- **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

## «Наблюдение»

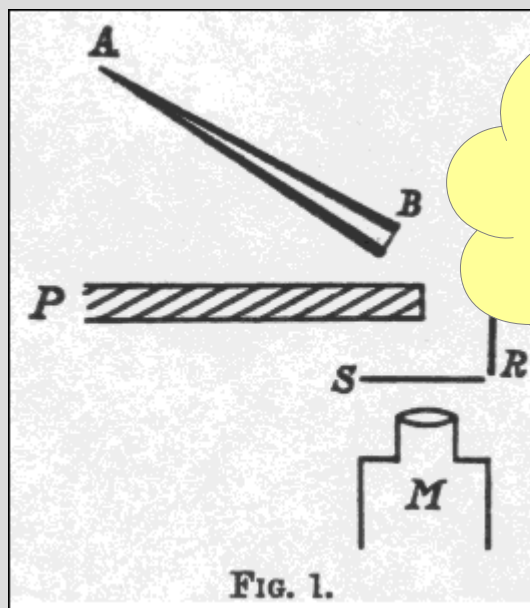
- масс-спектроскопия
- радиоактивные распады
- спектроскопия гамма-излучения, мессбауэровская спектроскопия, ЯМР
- ....

## «Активный эксперимент»

- рассеяние частиц
- ускорительные эксперименты
- ....

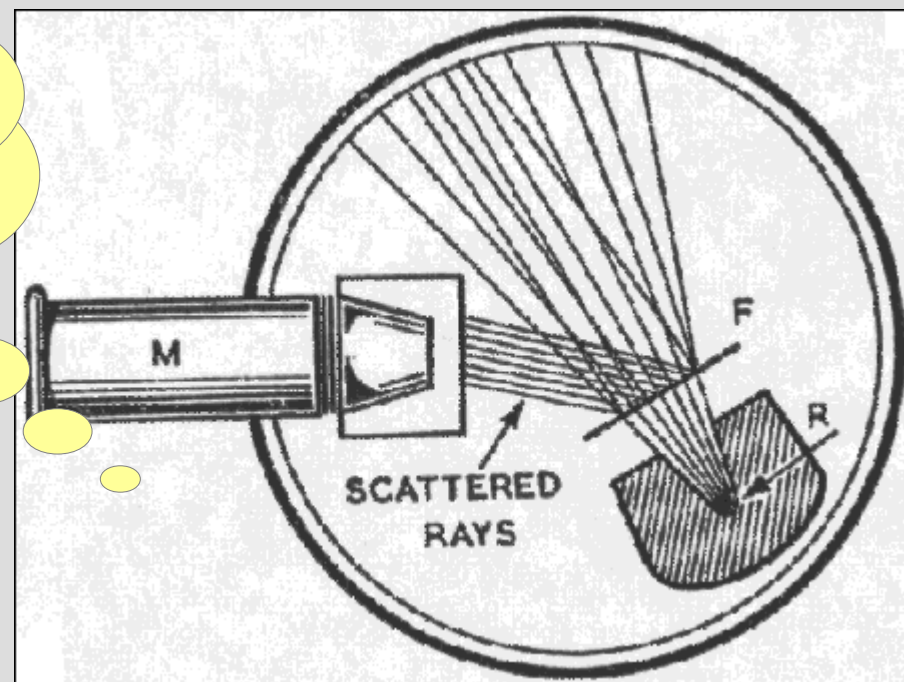


# Опыты Резерфорда (Гейгера-Марседена)



1:10,000 частиц  
отклонение на  
большие углы!

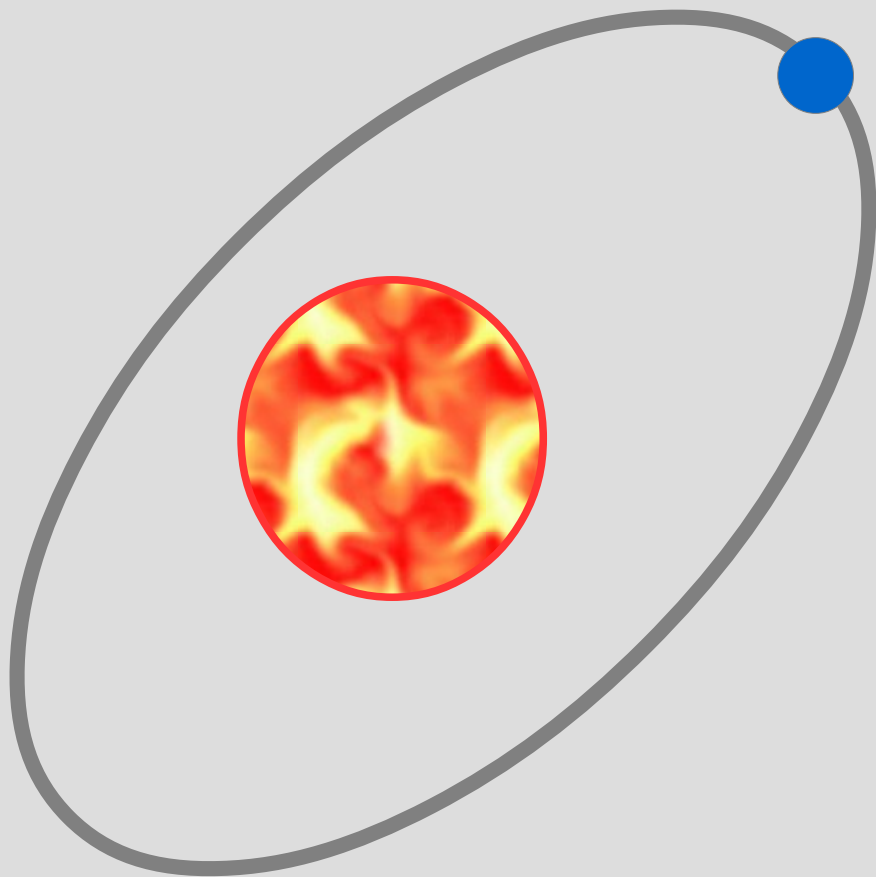
Опыт Гейгера-Марседена (по статье H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ -Particles., 1909). AB - трубка с источником альфа-частиц, P - свинцовый экран, RR - отражающая фольга, S - сцинтиляционный экран, M - микроскоп.



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>

В опытах изучалось рассеяние альфа-частиц на фольге из разных материалов (Al, Fe, Cu, Ag, Sn, Pt, Au, Pb). Золото оказалось наиболее удобным материалом, так как позволяло изготавливать однородную очень тонкую фольгу до 0.086 мкм.

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами



точечное ядро

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{Z m e^2}$$

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

# Размеры ядра: эксперименты с мюонными атомами

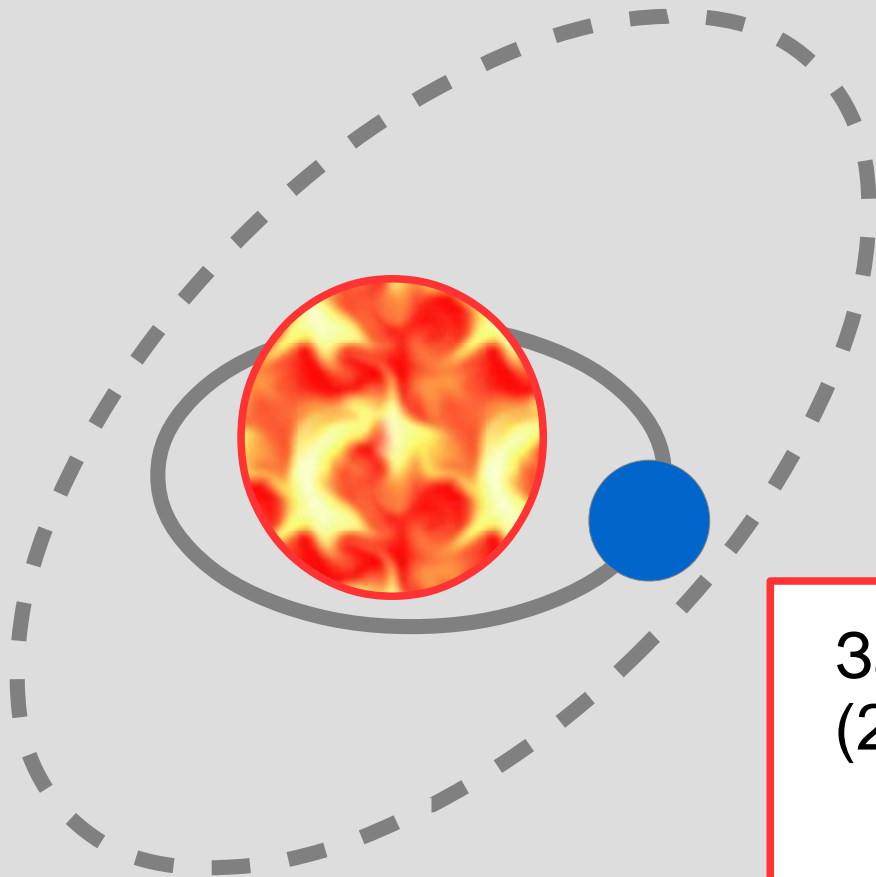
точечное ядро

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{Z m e^2}$$

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

Замена электрона на мюон  
( $208 m_e$ ),  $Z \sim 50 \dots 80$ :

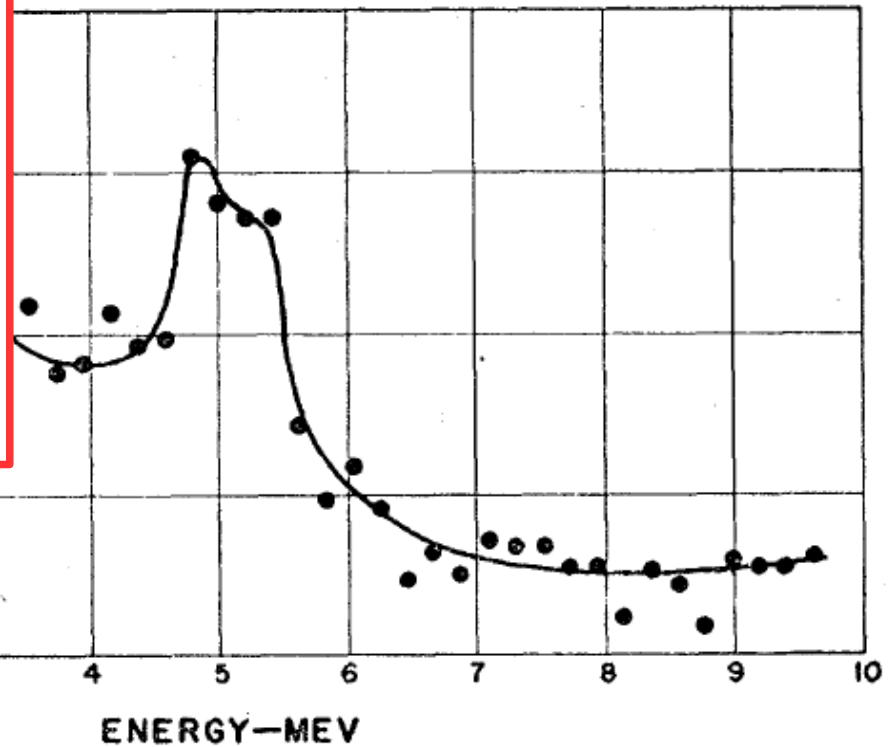
$$E \simeq 10 \text{ MeV}$$



Эксперимент (Fitch, Rainwater 1953):

$$\text{Pb} \quad E_{\text{теор}}(2p \rightarrow 1s) = 16.41 \text{ MeV}$$

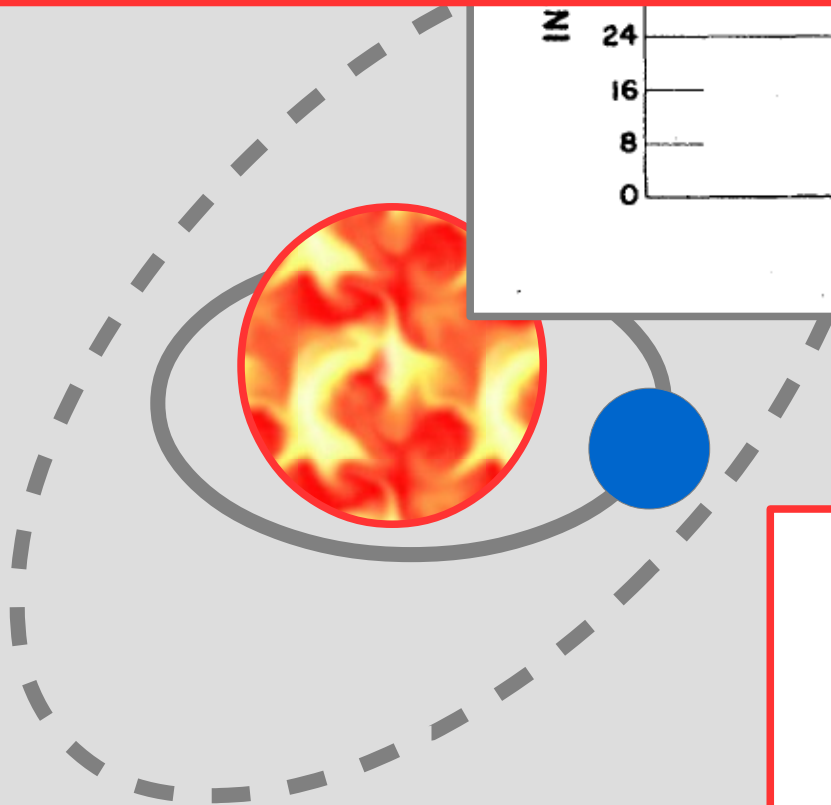
$$E_{\text{эксп}}(2p \rightarrow 1s) = 6.02 \text{ MeV}$$



$$Ry = \frac{1}{2} mc^2 \alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{m Z^2 c^2}{\hbar^2}$$

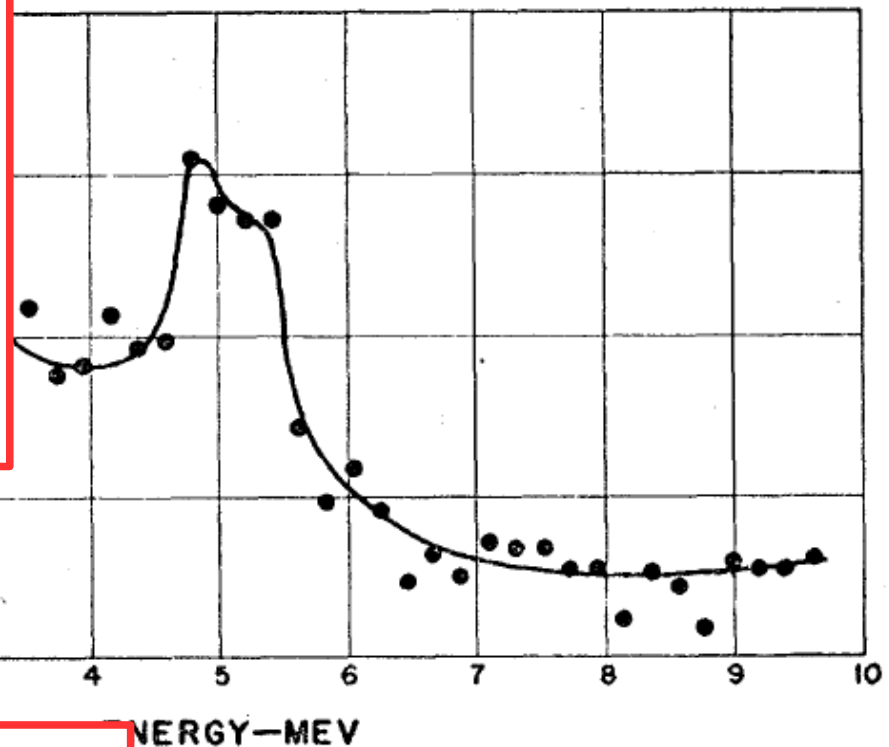
Замена электрона на мюон  
( $208 m_e$ ),  $Z \sim 50 \dots 80$ :

$$E \simeq 10 \text{ MeV}$$



Эксперимент (Fitch, Rainwater 1953):

Pb  $E_{теор} (2p \rightarrow 1s) = 16.41 \text{ MeV}$   
 $E_{эксп} (2p \rightarrow 1s) = 6.02 \text{ MeV}$



Объясняется неточечностью заряда ядра.

Размер «заряженной сферы»

$$r_{яд} = 1.2 \times 10^{-15} \text{ М}$$

$$\frac{1}{2} mc^2 \alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{m Z^2 e^4}{\hbar^2}$$

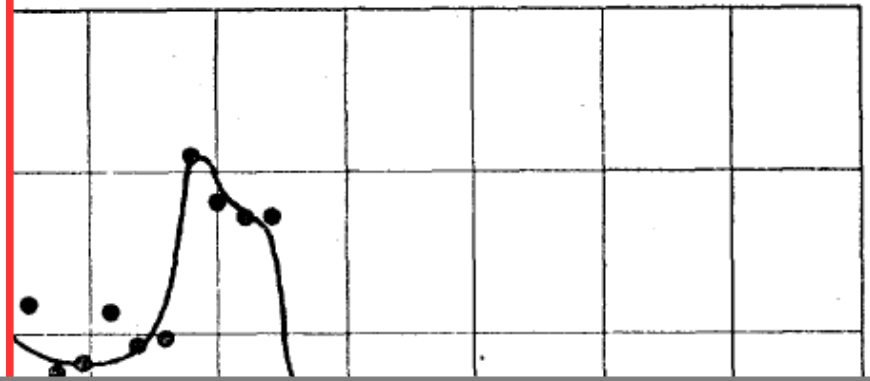
электрона на мюон  
50...80:

0 MeV

Эксперимент (Fitch, Rainwater 1953):

$$\text{Pb} \quad E_{\text{теор}}(2p \rightarrow 1s) = 16.41 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{эксп}}(2p \rightarrow 1s) = 6.02 \text{ MeV}$$



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

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

Объясняется неточностью заряда ядра.

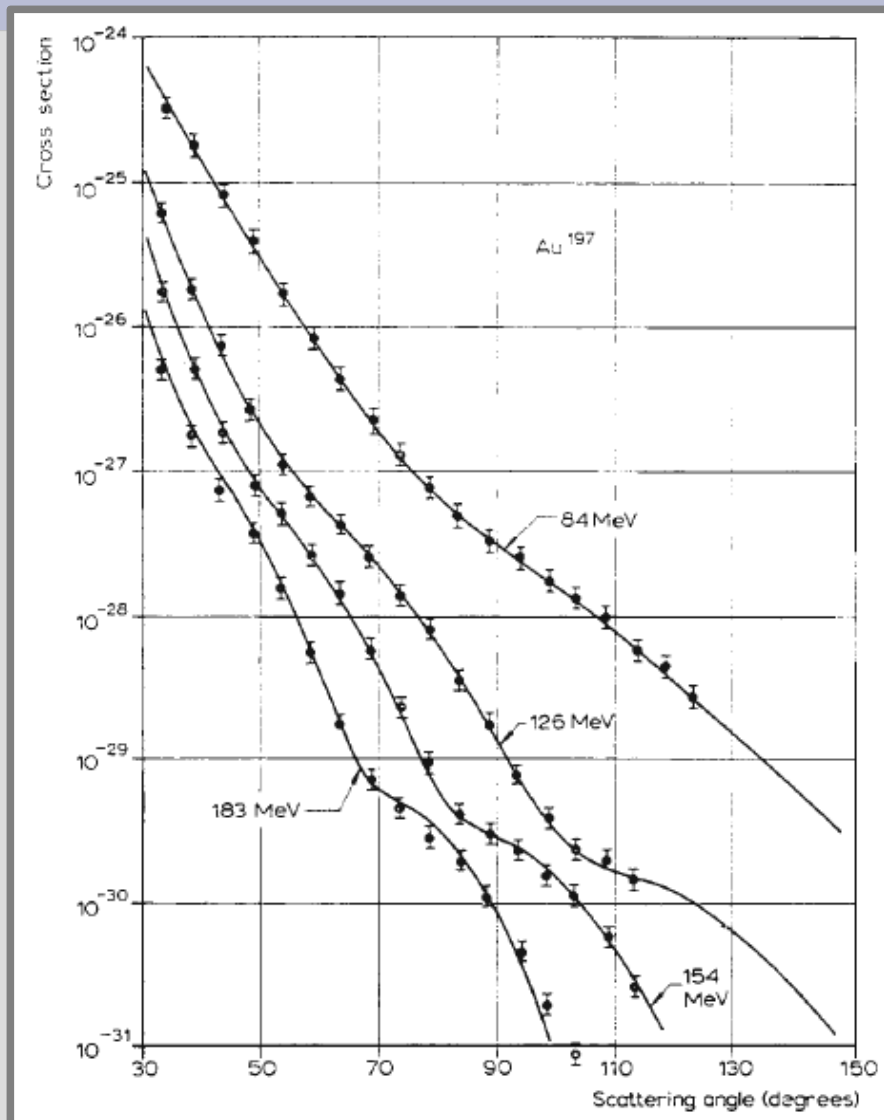
Размер «заряженной сферы»

$$r_{\text{яд}} = 1.2 \times 10^{-15} \text{ м}$$

электрона на мюон  
50...80:

$$10 \text{ MeV}$$

# Дифракция электронов на ядре



Хофштадтер (1961)

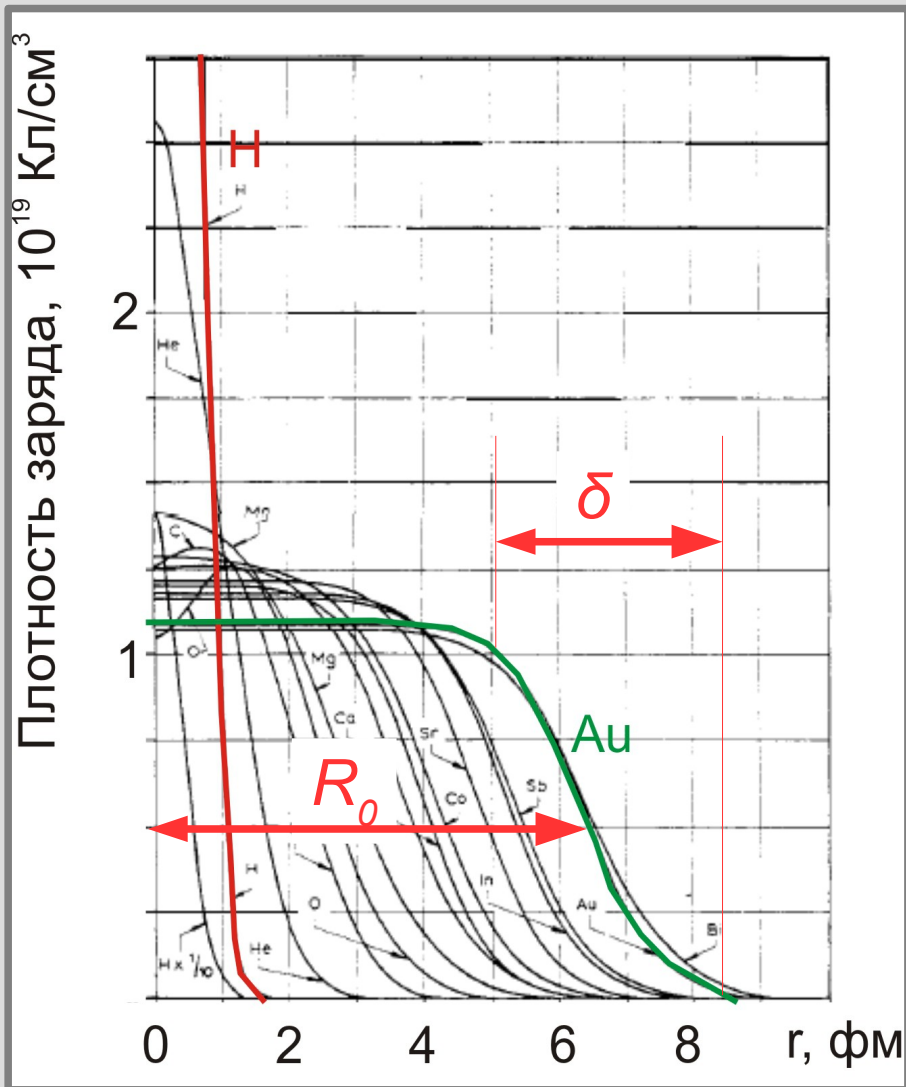


Аналогия — дифракция на отверстиях/круге.

С уменьшением длины волны развивается дифракционная картина...

# Размеры ядра

Хофштадтер (1961)



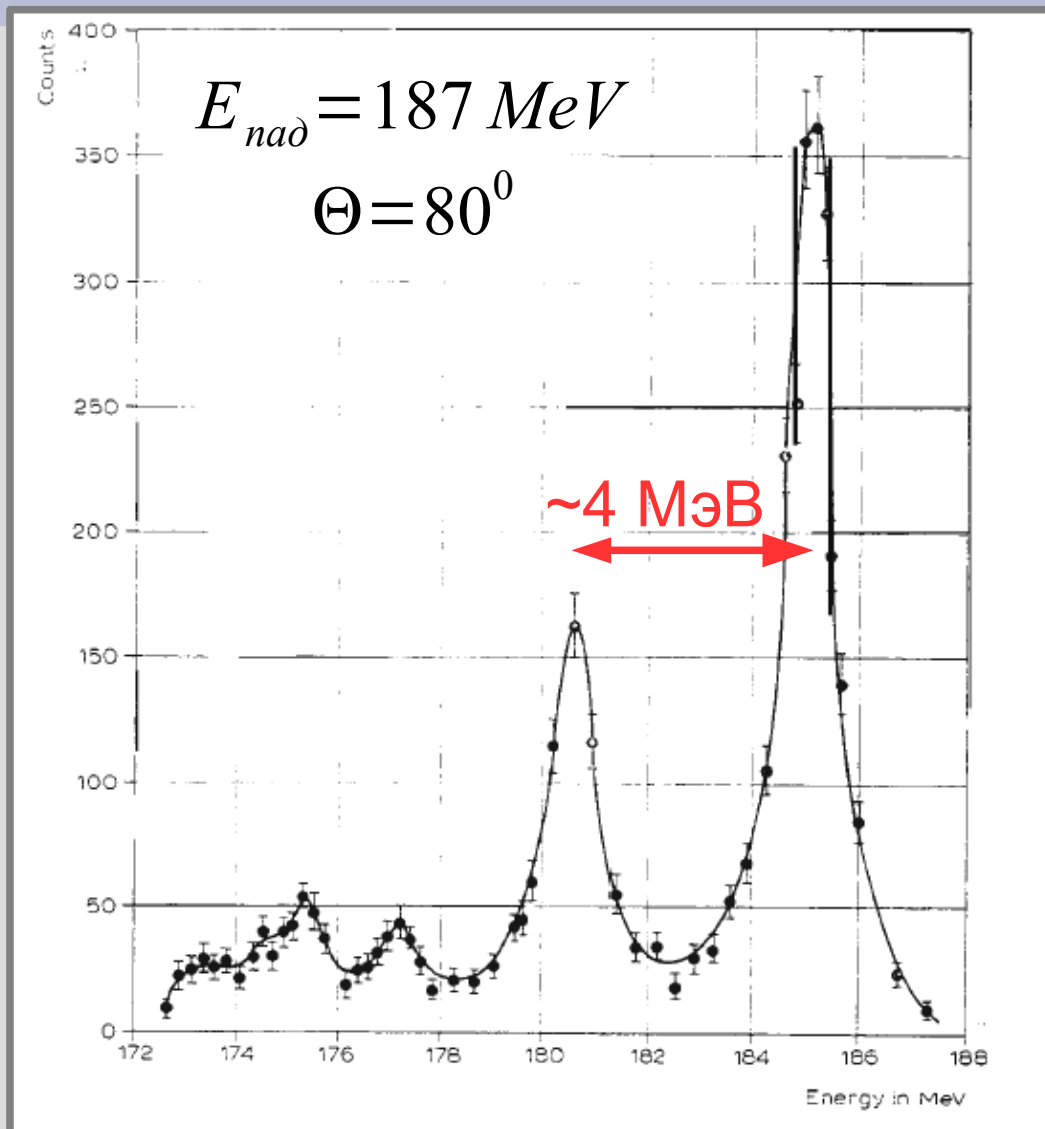
Размер ядра соответствует модели “несжимаемого вещества”

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

$$\delta \approx 2.4 \text{ фм}$$



# Неупругие процессы в ядре

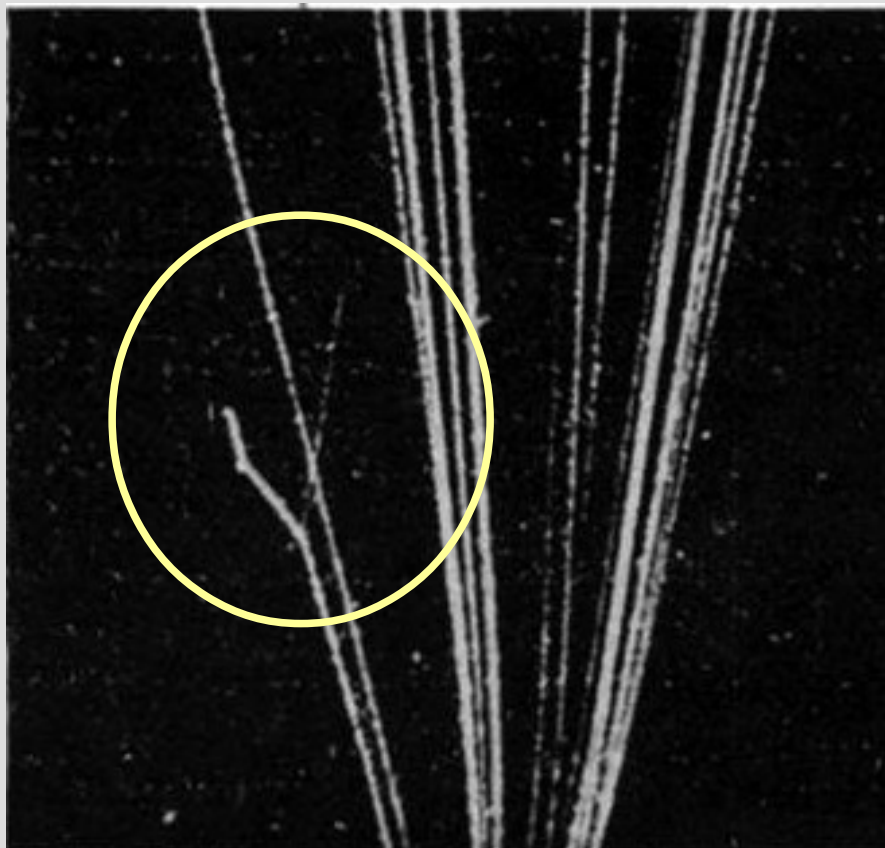


Хофштадтер (1961)

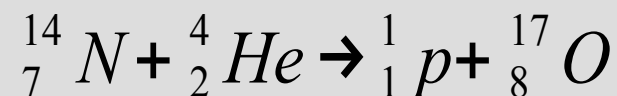


Масштаб  
внутриядерных энергий  
1...10 МэВ

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



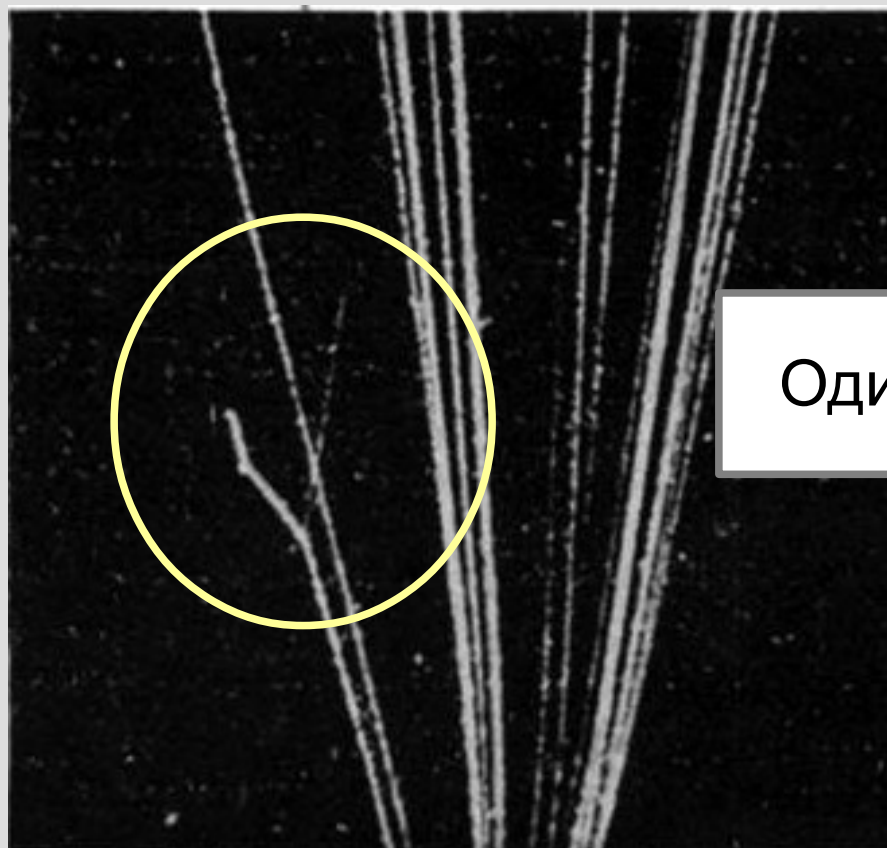
Из атома азота выбит протон (тонкий след)



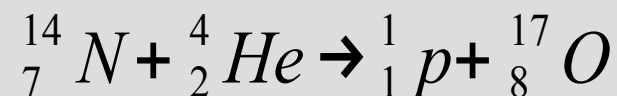
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.  
P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

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



Из атома азота выбит протон (тонкий след)

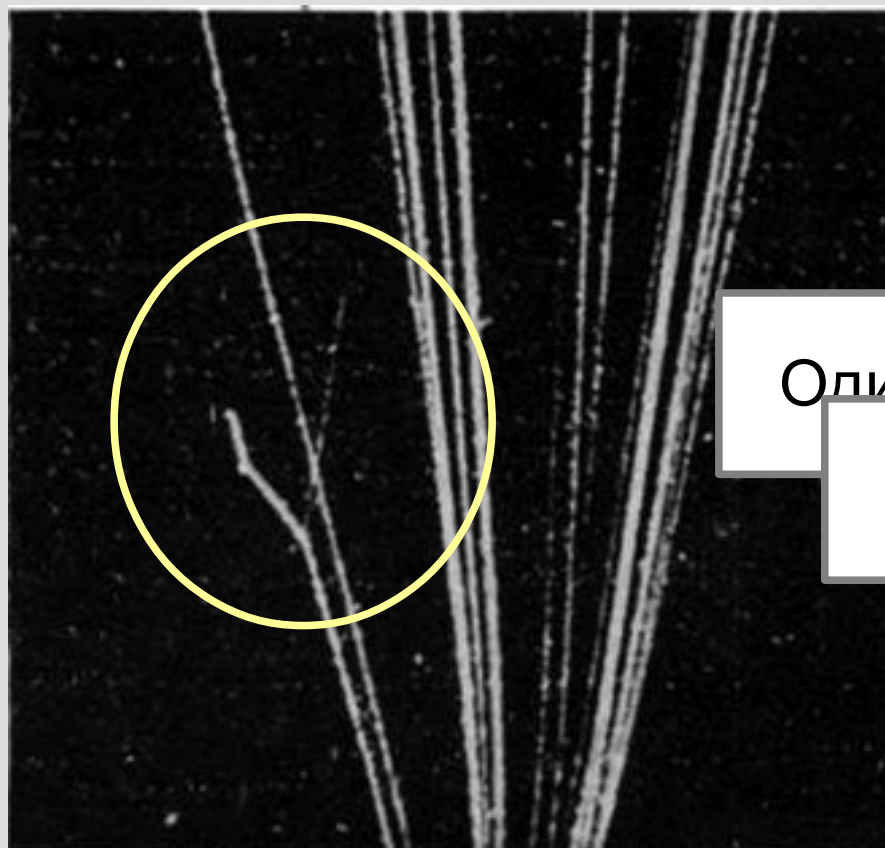


Один год эксперимента

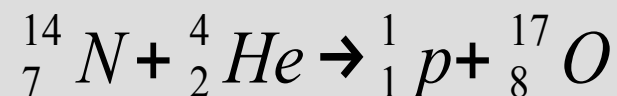
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.  
P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

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



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



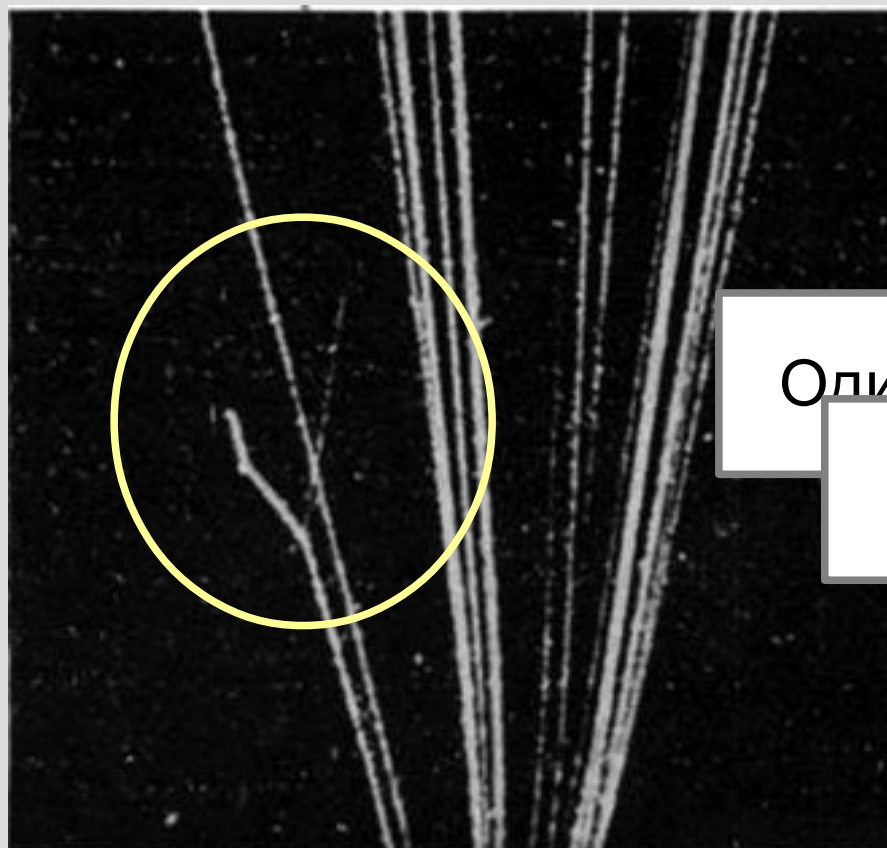
Один год эксперимента

23,000 фотографий

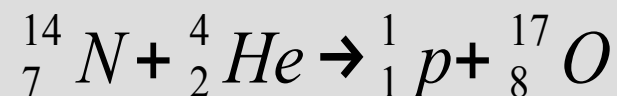
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.  
P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

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



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



Один год эксперимента

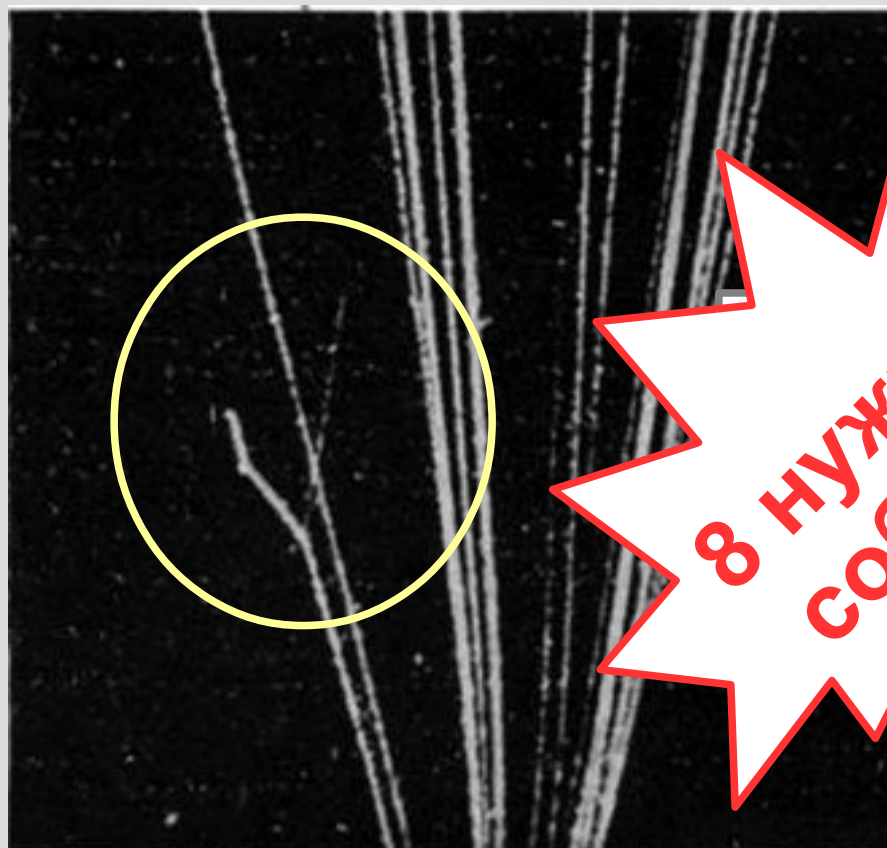
23 000 фотографий

400,000 треков

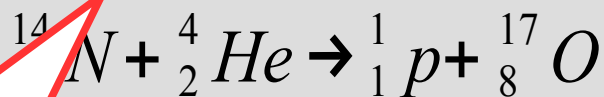
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.  
P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

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



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



**8 НУЖНЫХ СОБЫТИЙ**

эксперимента

фотографий

400,000 треков

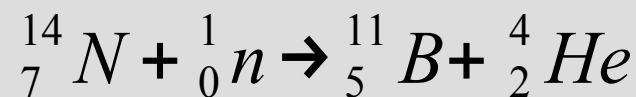
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

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

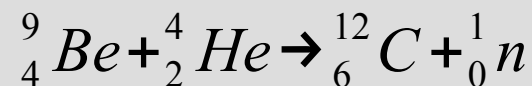
Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

# Существование нейтронов в ядре

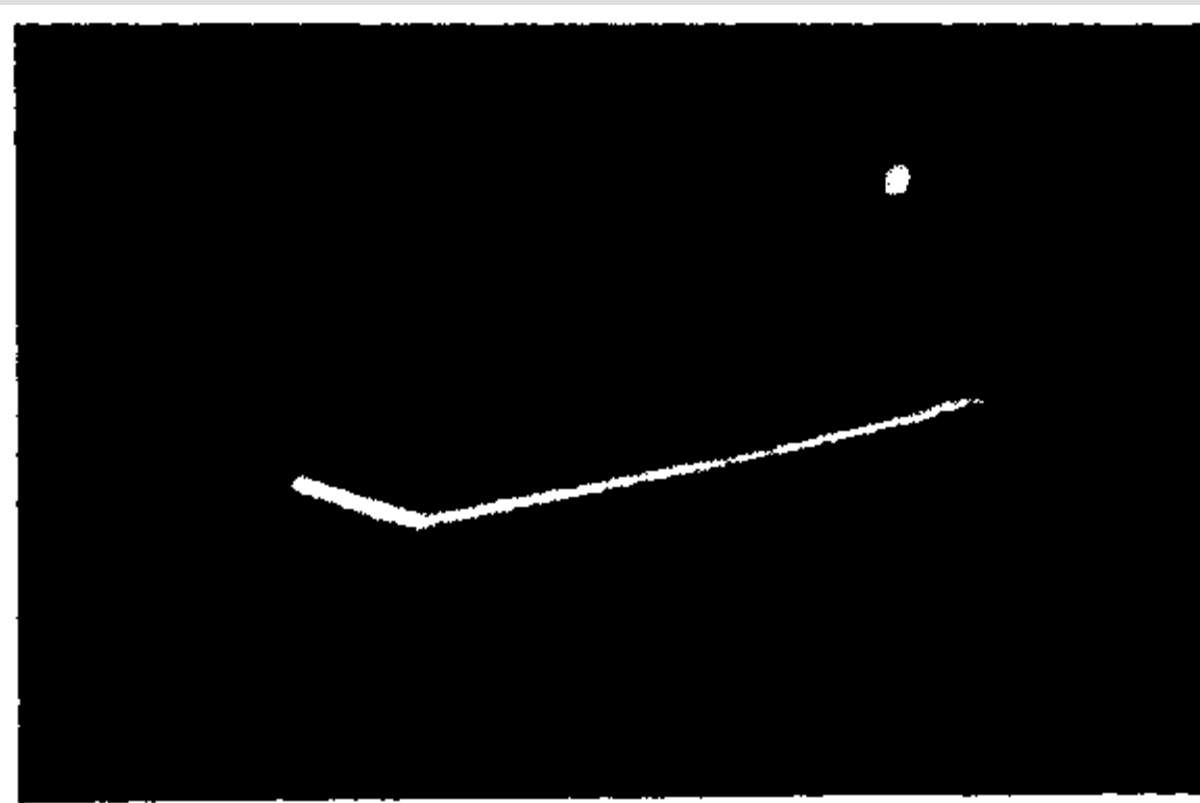
Чедвик (1935)



источник нейтронов:  
бомбардируемая альфа-  
частицами бериллиевая  
фольга



*ранее было обнаружено нейтральное  
“бериллевое излучение” с большой  
проникающей способностью,  
способное выбивать протоны из  
парафина*



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

# Опыты Ф.Астона (масс-спектропия)

Ф.Астон (1922)

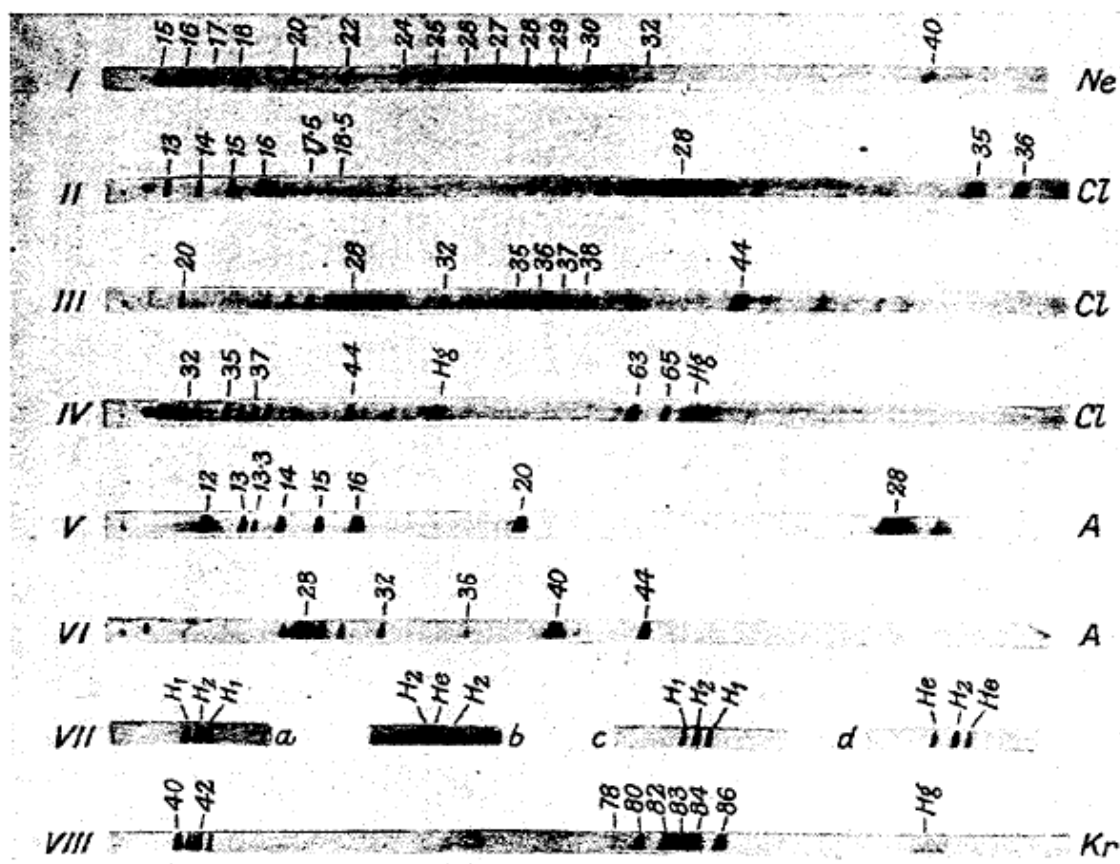


Fig. 2. Typical mass spectra.

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

Из нобелевской лекции Ф.Астона



# Гипотеза Астона о строении ядра (одна неправильная гипотеза...)

*«Нейтральный атом элемента с атомным номером  $N$  имеет ядро, содержащее  $K+N$  протонов и  $K$  электронов, и вокруг этого ядра вращаются  $N$  электронов»*

# Гипотеза Астона о строении ядра (одна неправильная гипотеза...)

«Нейтральный атом элемента с атомным номером  $N$  имеет ядро, содержащее  $K+N$  протонов и  $K$  электронов, и вокруг этого ядра вращаются

Известные энергии ядерных излучений  $\sim$ МэВ. Такой электрон нечем удерживать!

неверно

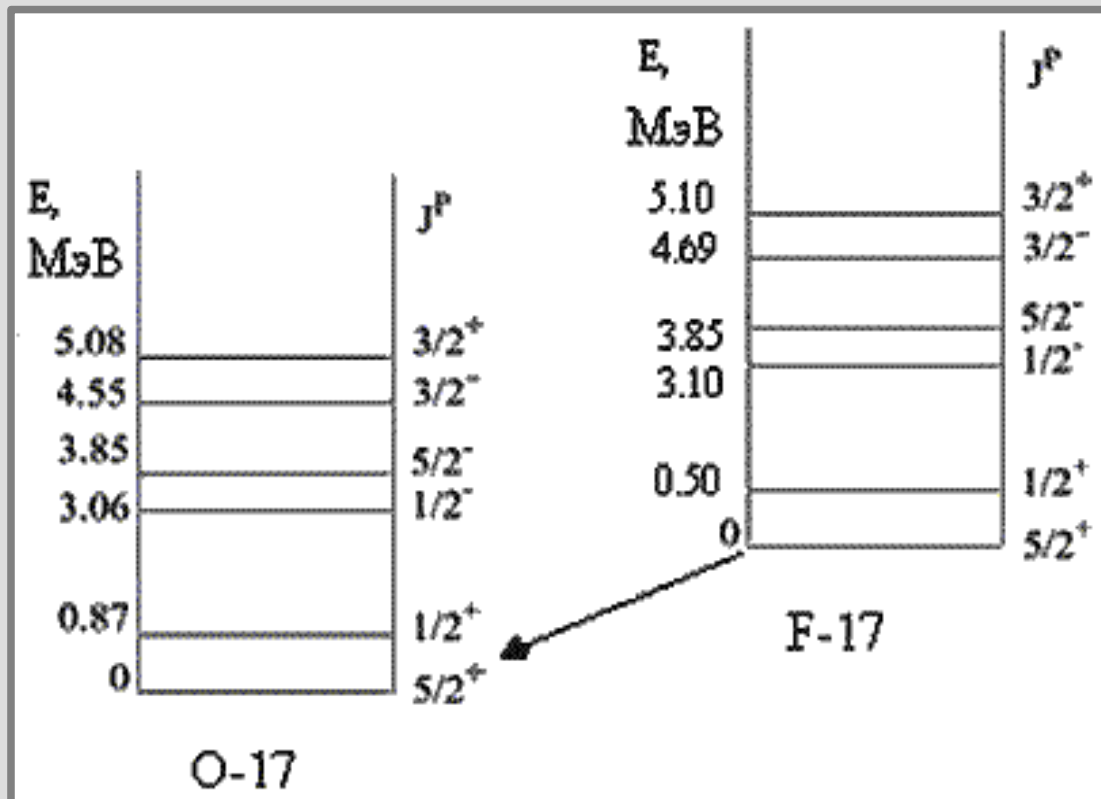
если электрон локализован на ядерном размере (фм), то

$$\Delta p \Delta x \simeq \hbar$$

классика  $K \sim \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{m r_{\text{яд}}^2} \simeq Ry \left( \frac{r_0}{r_{\text{яд}}} \right)^2 \sim 10 \text{ ГэВ} \gg mc^2$

ультрарелятив.  $K \sim pc \sim \frac{\hbar c}{r_{\text{яд}}} \simeq 3 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \sim 100 \text{ МэВ}$

# Спектры зеркальных ядер



- Масштаб энергий  $\sim$ МэВ
- Структура уровней слабо зависит от типа нуклона
- Спины состояний ядер могут сильно отличаться — возможно излучение фотонов высокой мультпольности

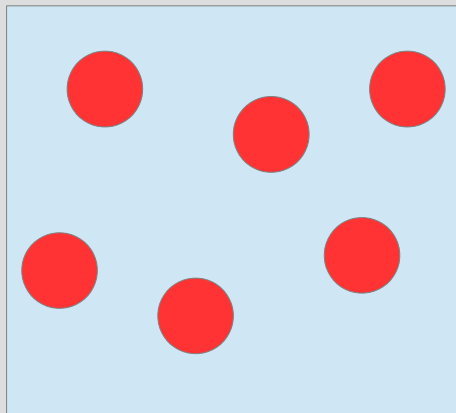
# Промежуточный вывод

Ядро имеет размер порядка фемтометров

Ядро состоит из протонов и нейтронов

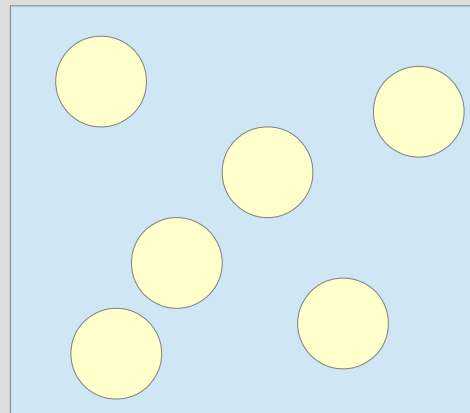
Нужно “сильное” взаимодействие, которое превзойдёт кулоновское отталкивание протонов и сможет связать в ядре нейтральные нейтроны

# Энергия связи ядра



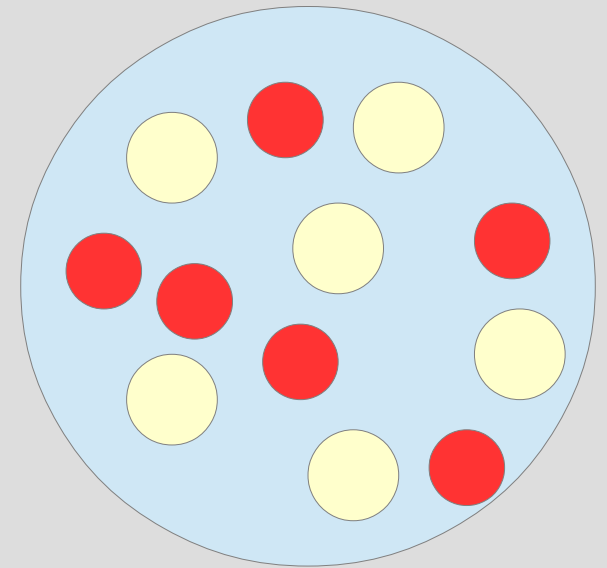
6p

+



6n

=



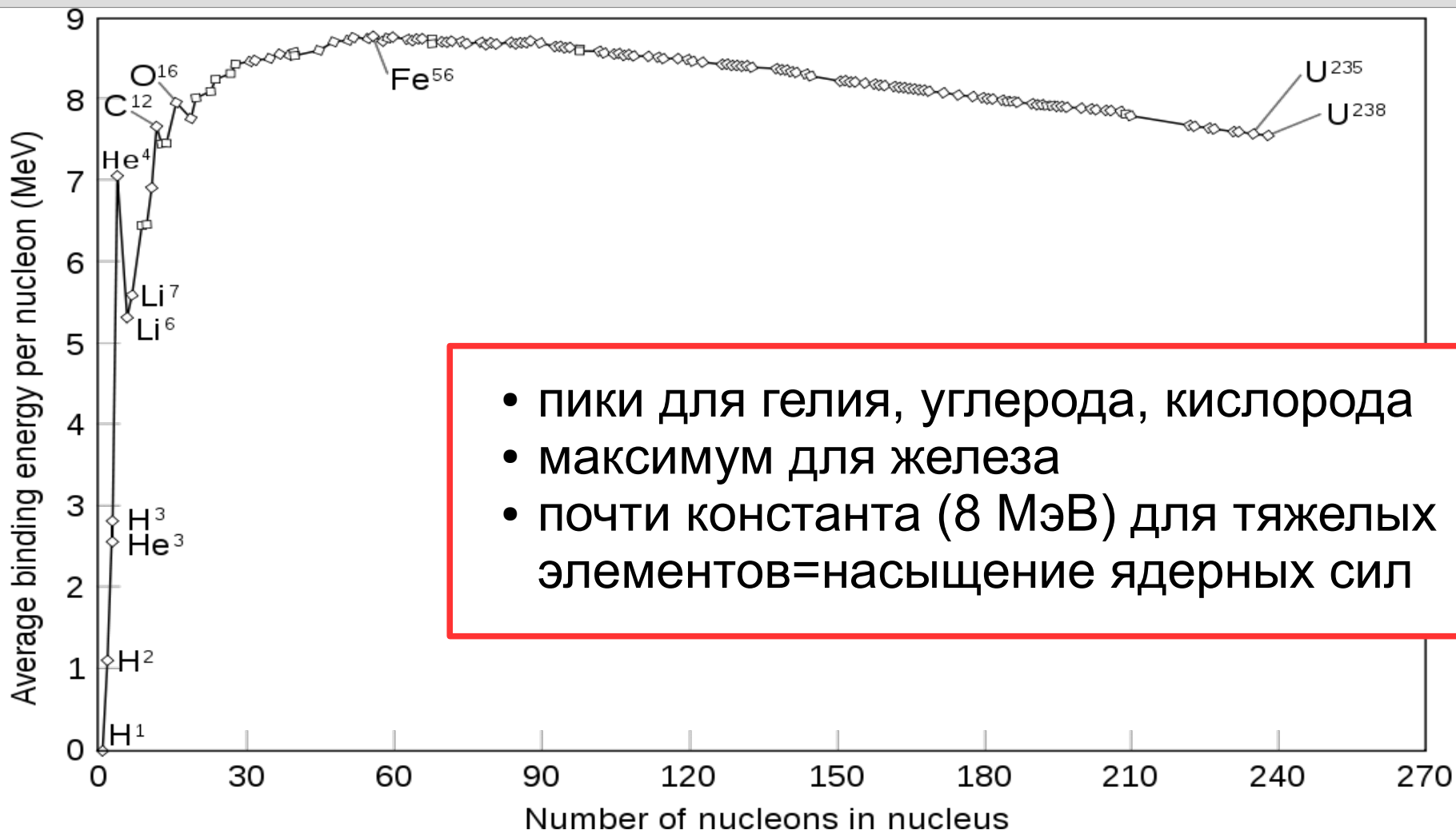
ядро углерода-12

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

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

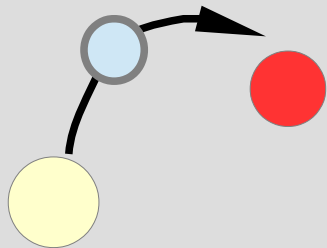
чем больше  $E_{\text{св}}$   
тем «крепче» ядро

# Удельная энергия связи (на нуклон)



- пики для гелия, углерода, кислорода
- максимум для железа
- почти константа (8 МэВ) для тяжелых элементов=насыщение ядерных сил

# Модель ядерных сил Юкавы



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

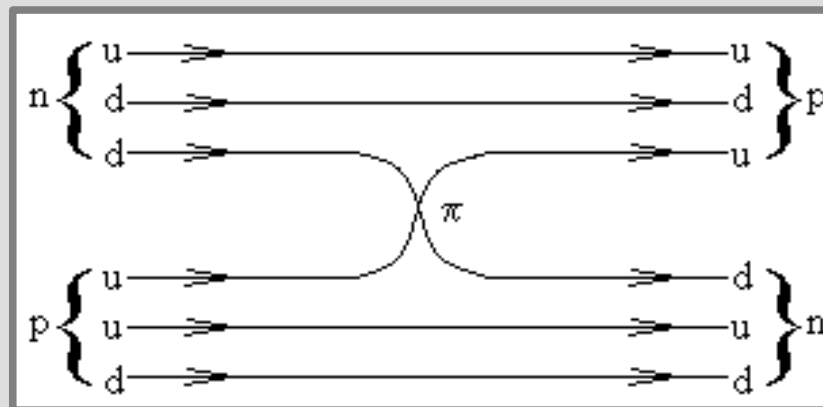
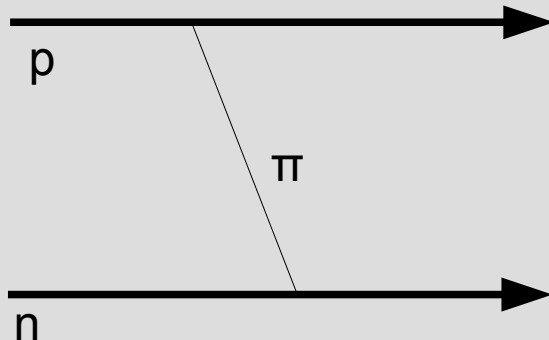
$$\Delta E = mc^2$$

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

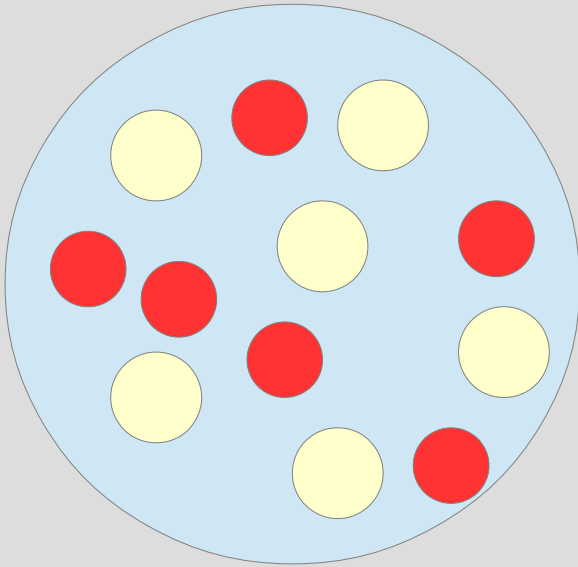
Юкава  
(теория, 1949)  
Поуэл  
(обнаружение  
мезонов, 1947)



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



# Капельная модель, формула Вайцзекера



квантовые  
эффекты

Если нуклонов много – похоже на каплю жидкости!!!

$$E_V = \alpha A$$

насыщение ядерных сил

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

поверхность

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

отталкивание протонов

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

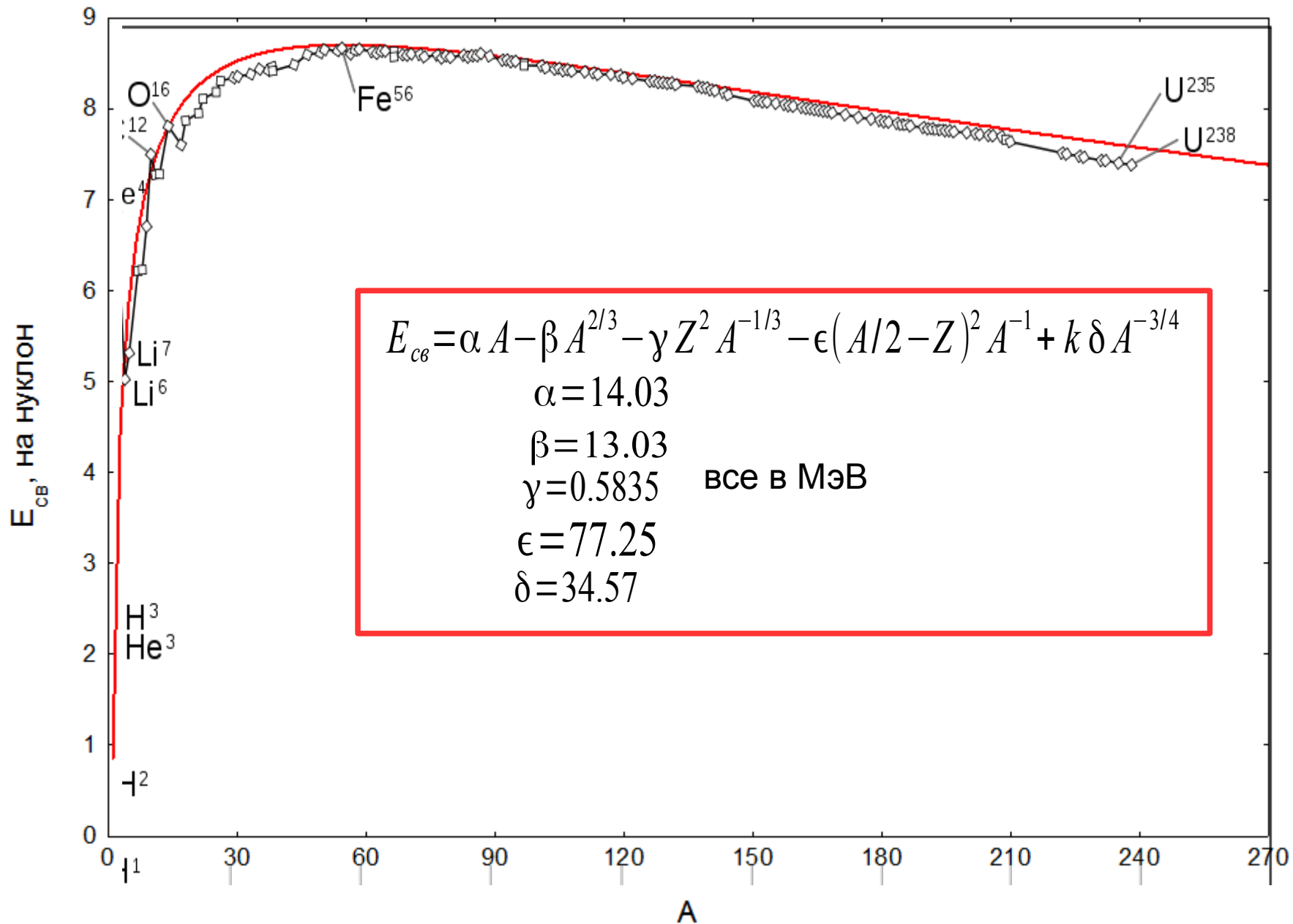
эквивалентность протонов и нейтронов в сильном взаимодействии

$$E_{\text{спар}} = k \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$k=1$  для чётно-чётных ядер,  $k=0$  для чётно-нечётных и  $k=-1$  для нечётно-нечётных ядер



# Капельная модель, формула



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

$\alpha = 14.03$   
 $\beta = 13.03$   
 $\gamma = 0.5835$     все в МэВ  
 $\epsilon = 77.25$   
 $\delta = 34.57$

СТИ!!!

ЗИ:

НЫХ  
И

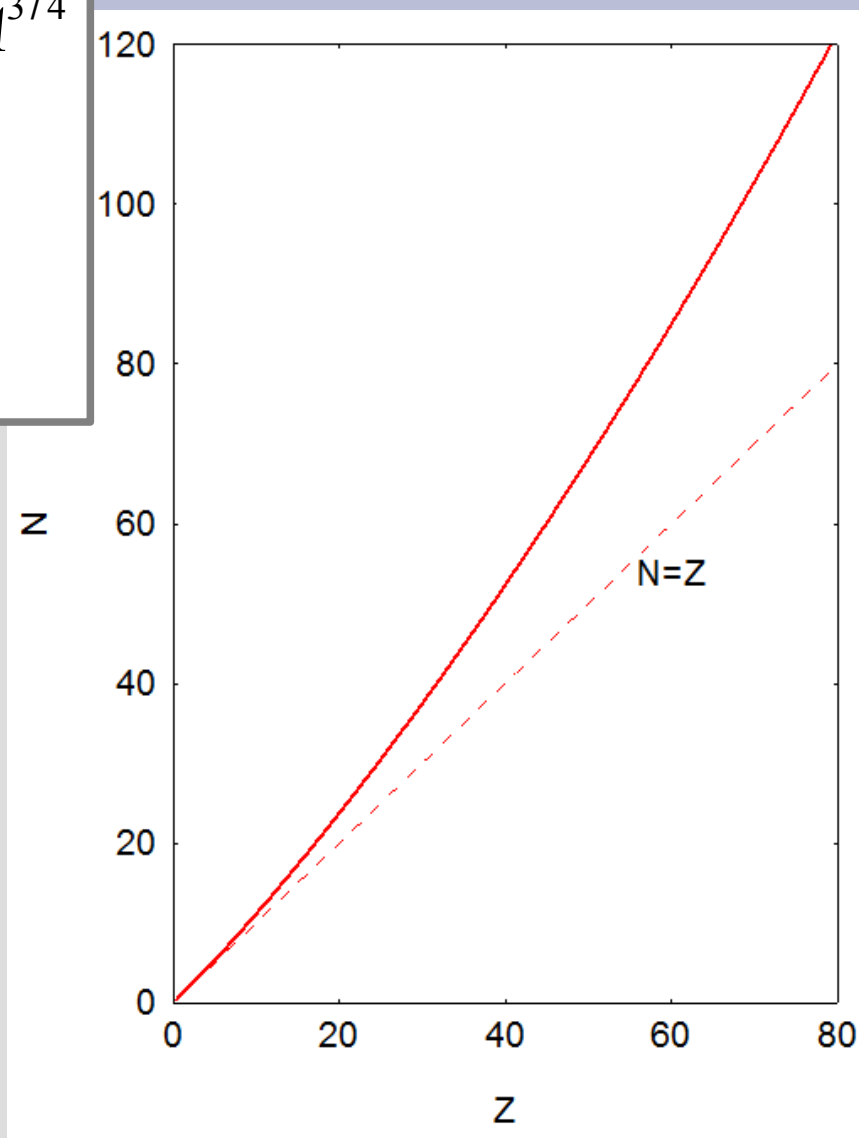
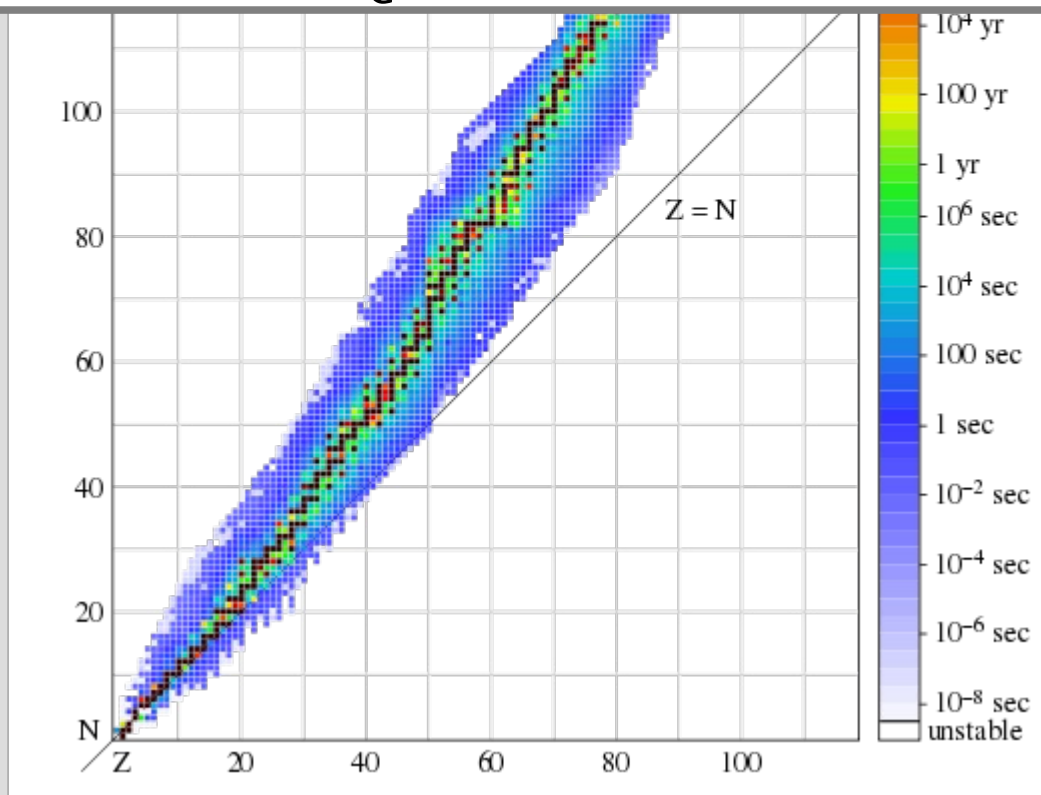
р, k=0  
для

# “Долина стабильности”

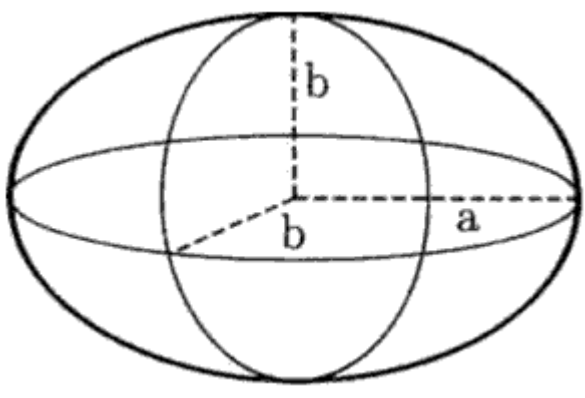
$$E_{cv} = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \epsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + k \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$2\gamma \frac{Z}{A^{1/3}} - \epsilon + 2\epsilon \frac{Z}{A} = 0$$

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



# Устойчивость «капли»



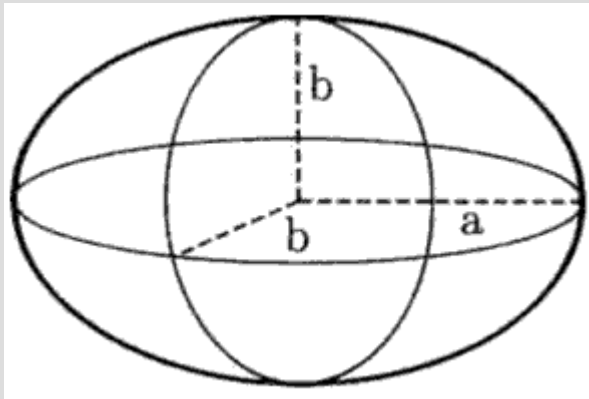
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/ndb101.htm>

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

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

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

# Устойчивость «капли»



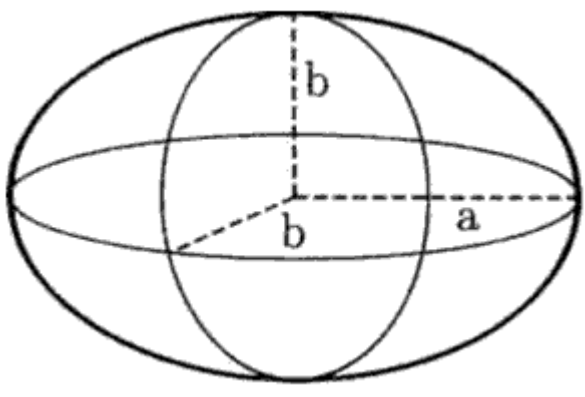
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/ndb101.htm>

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

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

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

# Устойчивость «капли»



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

Условие  
неустойчивости

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

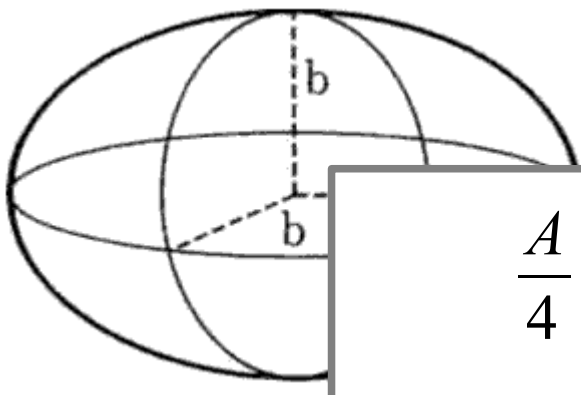
$$E_S = -\beta A^{2/3} \left( 1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) \quad \text{НЕ ВЫГОДНО}$$

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

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

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

# Устойчивость «капли»



<http://nuclphys.sinp.m>

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

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

НЕ ВЫГОДНО

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

ВЫГОДНО

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

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

$$A > 330$$

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

для Fl:  $Z=114, A=289$

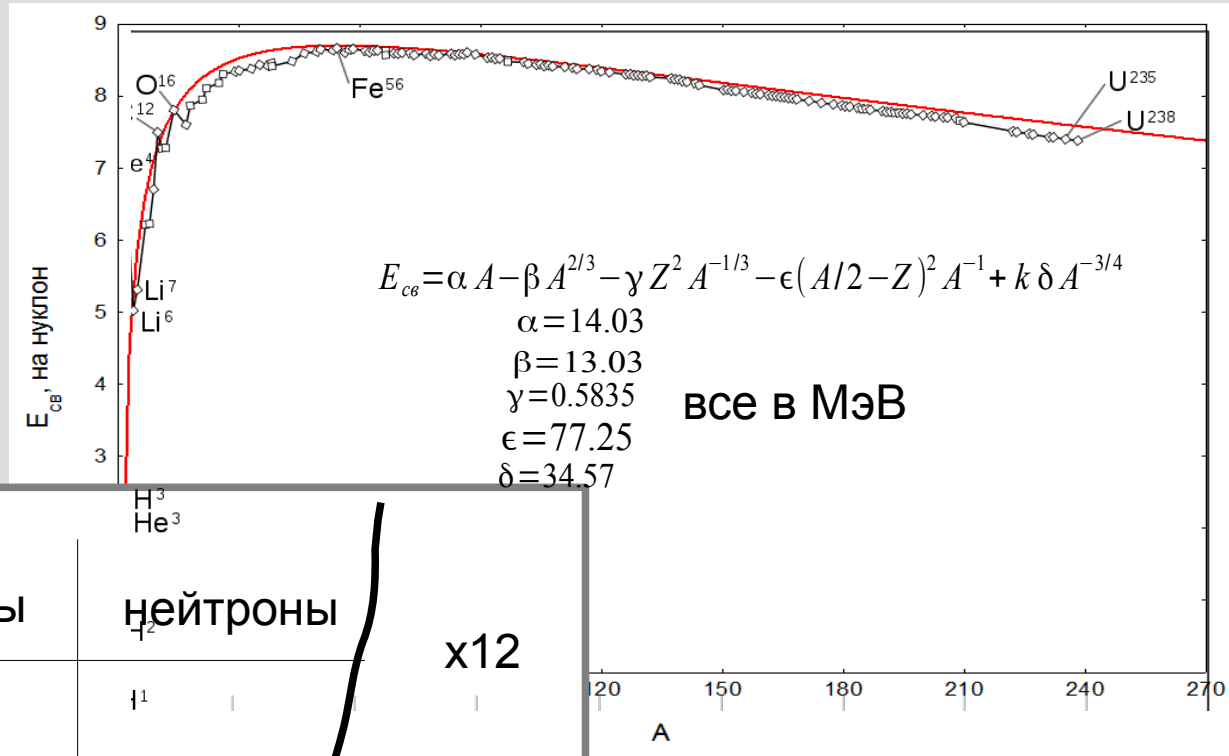
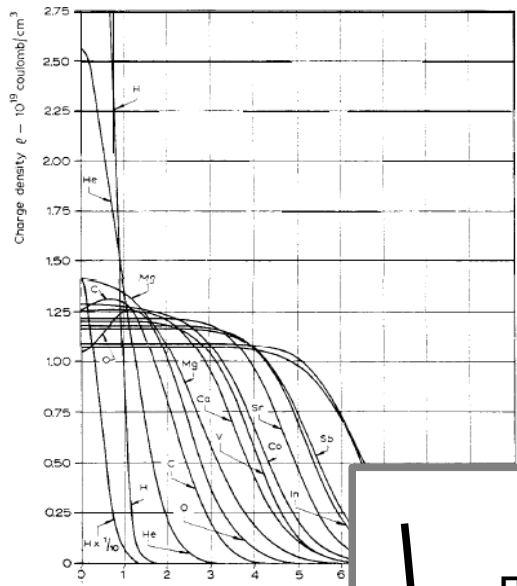
$$\frac{Z^2}{A} = 45$$

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

для U:  $Z=92, A=238$

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

# Основное на лекции



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

