

# **Лекция 11.**

## **Строение ядра. Модели строения ядра.**

## Способы изучения ядер

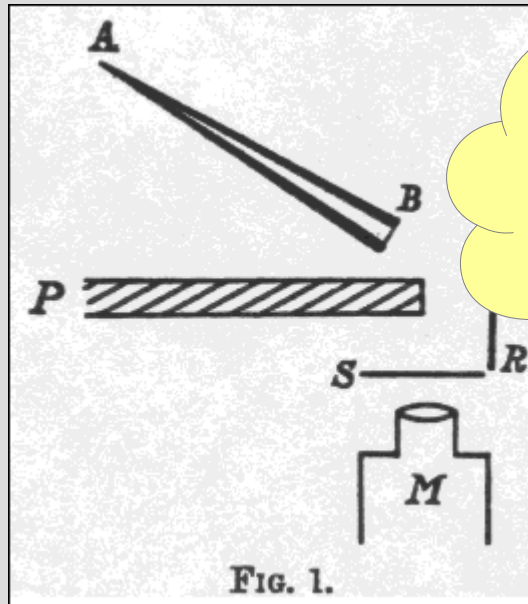
### «Наблюдение»

- масс-спектро스코пия
- радиоактивные распады
- спектроскопия гамма-излучения
- ....

### «Активный эксперимент»

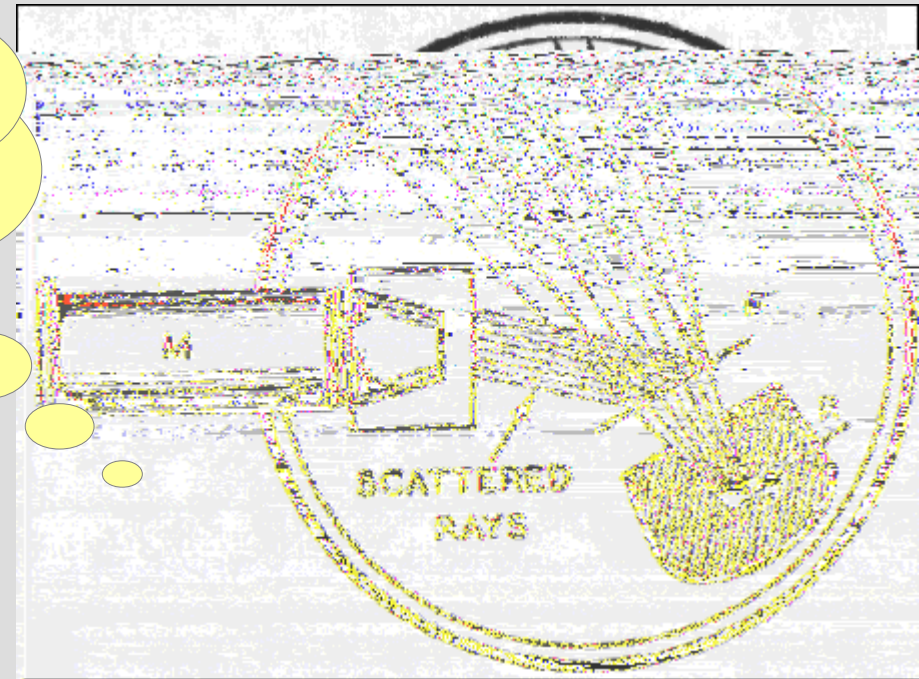
- рассеяние частиц
- ускорительные эксперименты
- ЯМР
- ....

# 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.

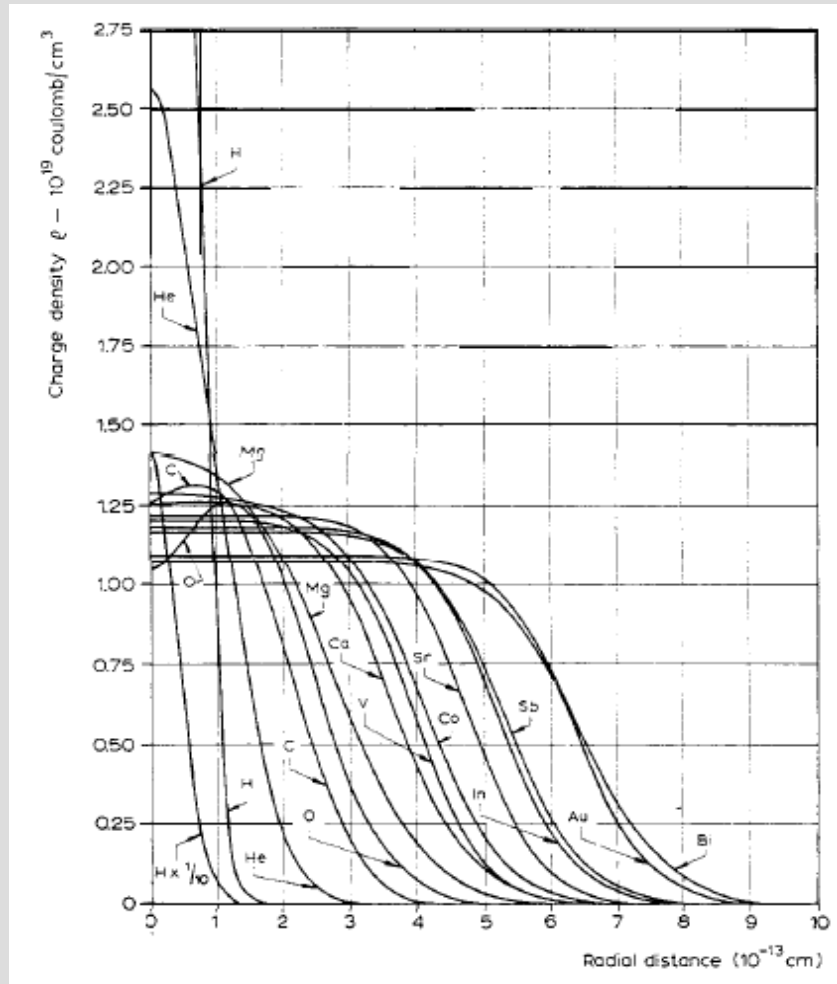


Разновидность опыта Резерфорда R - источник радиации, F - фольга, M - микроскоп с сцинтиллирующим экраном. [chemteam.info](http://chemteam.info), Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, 2016, <http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>

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

Хофштадтер (1961)



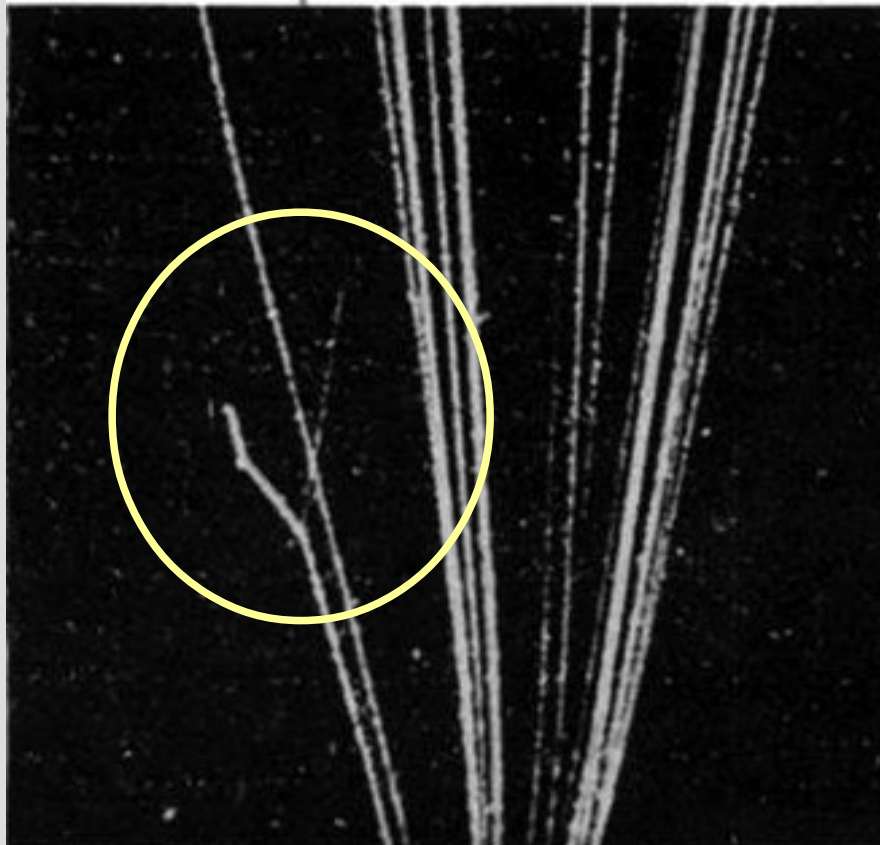
$$\lambda \approx \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc} \frac{mc^2}{E} = \Lambda \frac{mc^2}{E}$$

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

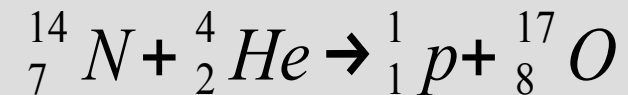
Размер ядра соответствует модели “несжимаемого вещества”

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

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



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



*один год,  
23000 фотографий,  
400000 треков частиц*

**ВОСЕМЬ “удачных”  
событий**

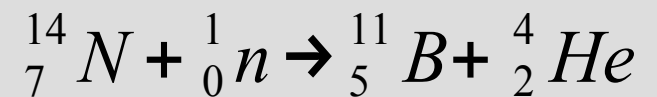
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

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

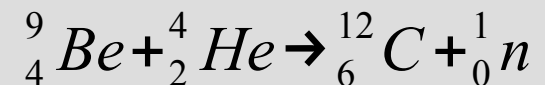
Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

# Существование нейтронов в ядре

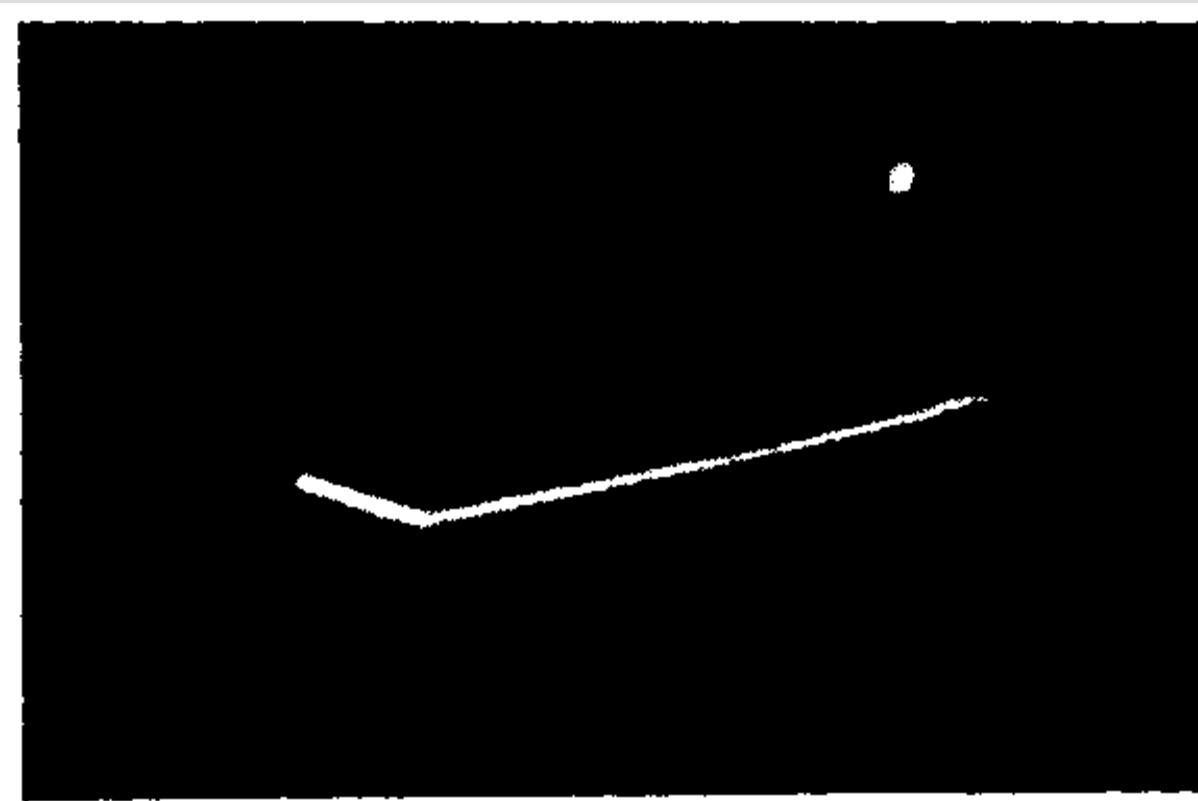
Чедвик (1935)



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)



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

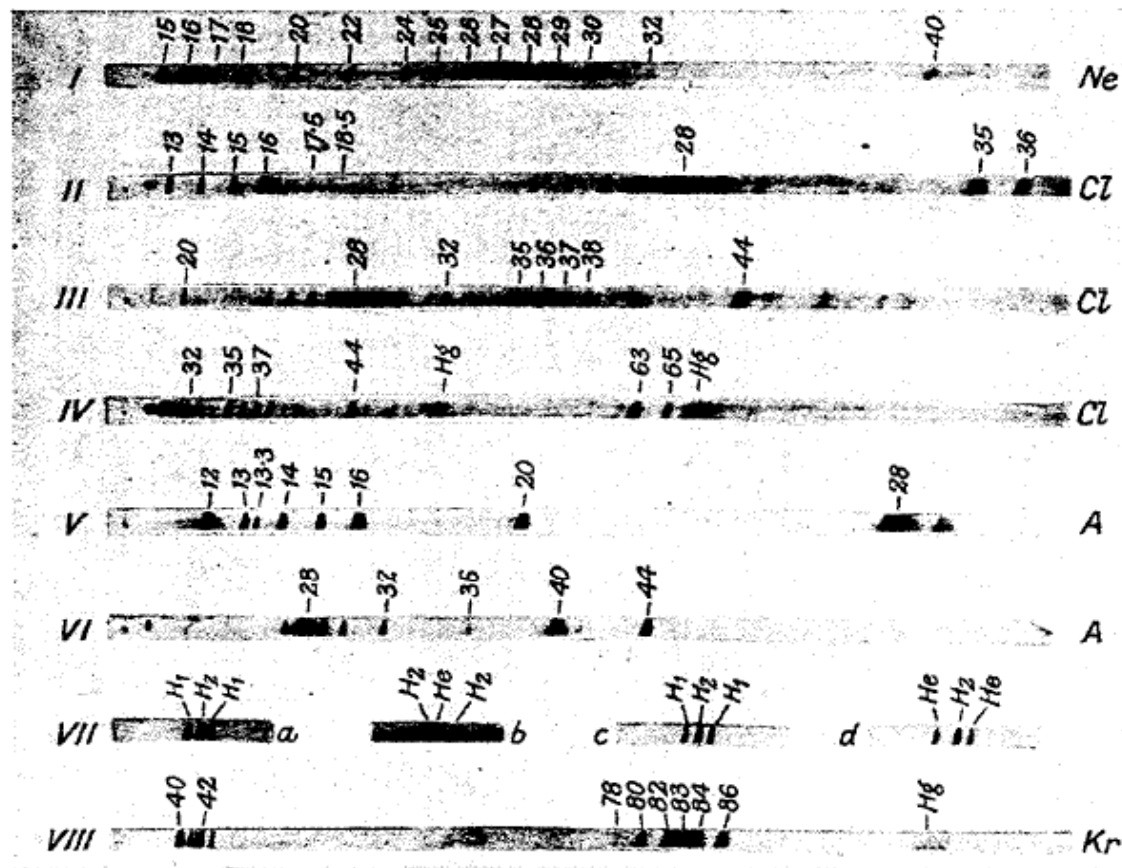


Fig. 2. Typical mass spectra.

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»*

неверно

если электрон локализован на ядерном размере (фм), то

$$\Delta p \Delta x \simeq \hbar$$
$$K \sim \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{m r_{\text{яд}}^2} \simeq 0.1 \text{ эрг} \sim 100 \text{ ГэВ}$$

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

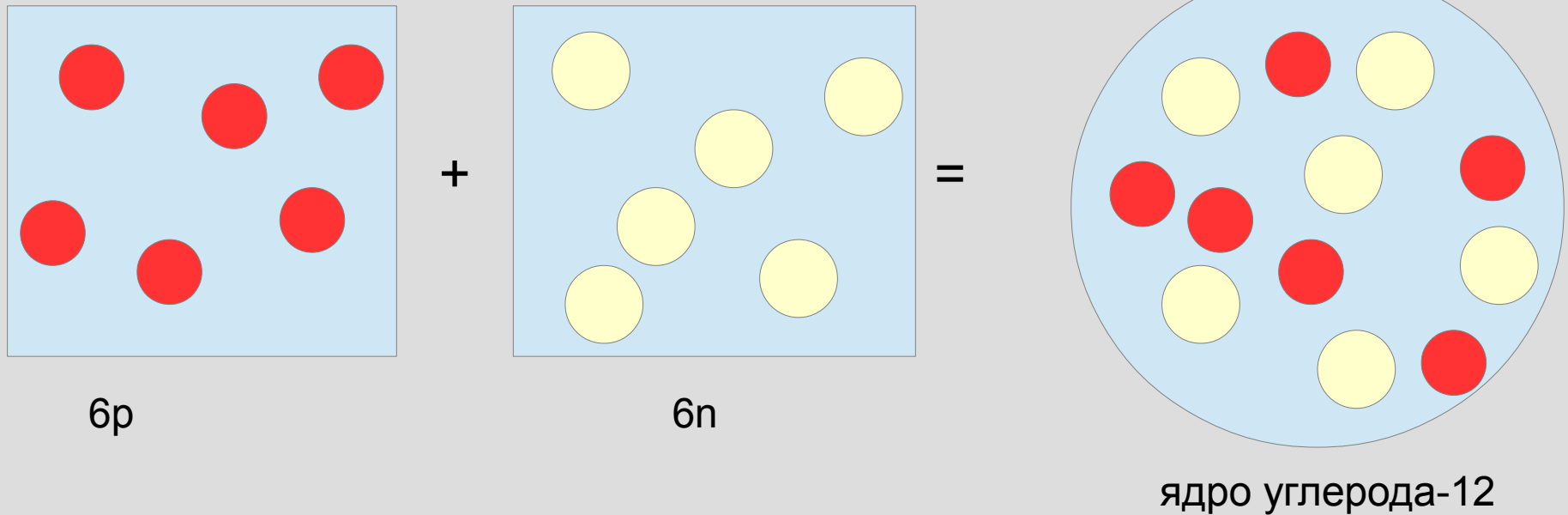
## Резюме 1

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

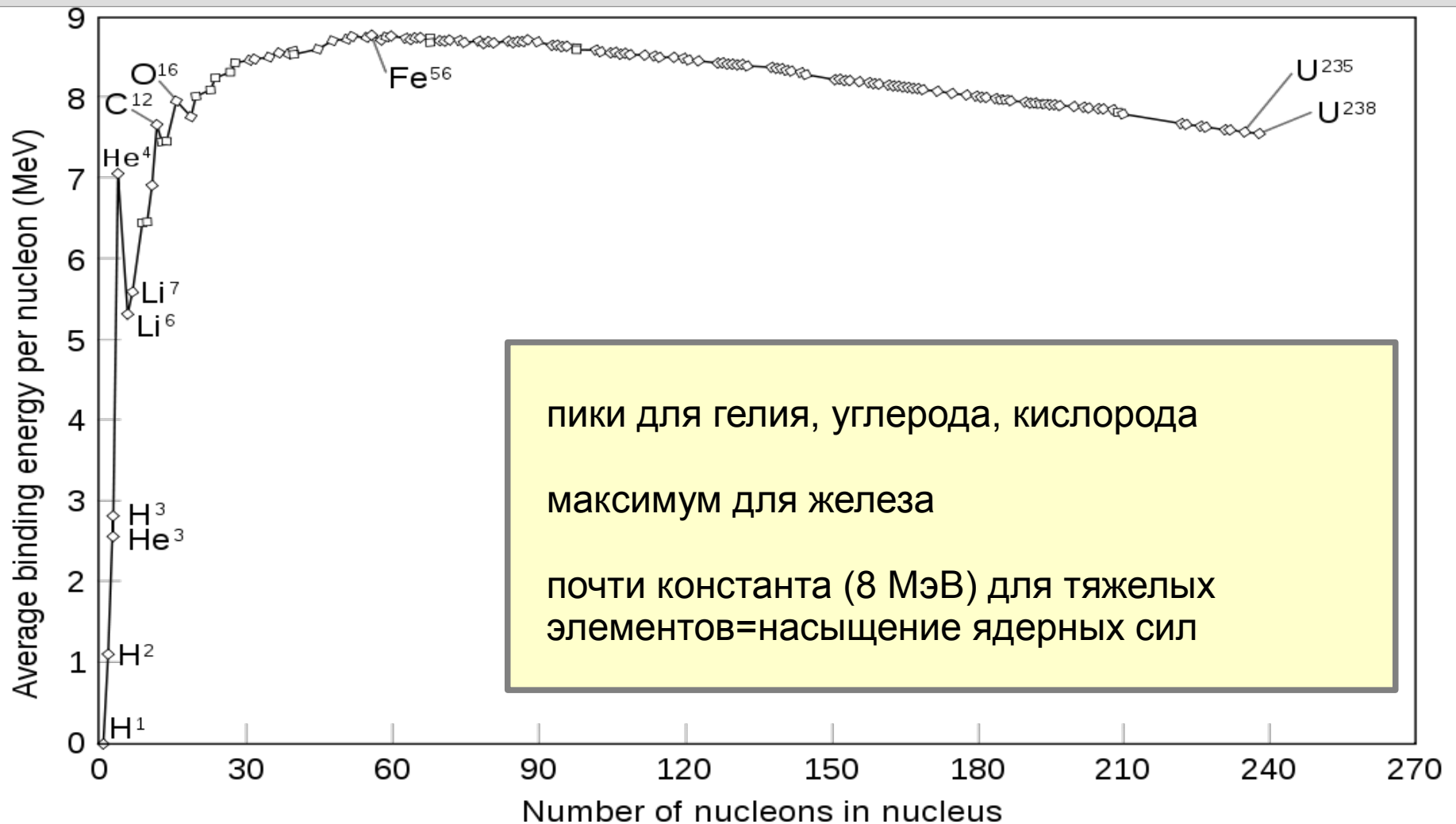


$$M_{\text{ядра}} c^2 + E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n) c^2$$

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

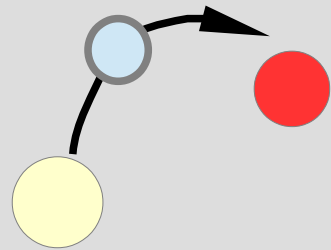
чем больше  $E_{\text{св}}$   
тем «крепче» ядро

## Удельная энергия связи (на нуклон)



# Модель ядерных сил Юкавы

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



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

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

для безмассовых частиц – бесконечный радиус взаимодействия

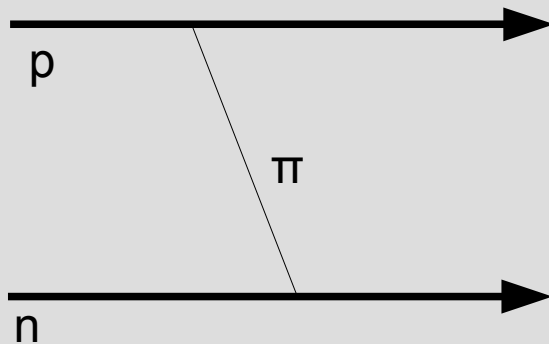
для массивных частиц – конечный

для ядерного размера

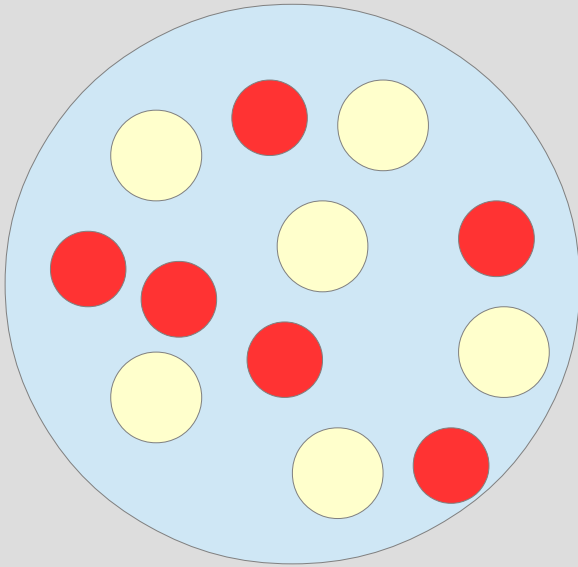
$$m c^2 \sim \frac{\hbar c}{L} \sim \frac{10^{-27} \times 10^{10}}{10^{-13}} \text{ эрг} = 10^{-4} \text{ эрг} \sim 10^8 \text{ эВ} = 100 \text{ МэВ}$$

предсказанные частицы (пи-мезоны, 140 МэВ) были обнаружены в космических лучах

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



# Капельная модель, формула Вайцзекера



Если нуклонов много – похоже на каплю жидкости!!!  
Тогда по аналогии можно получить  
феноменологическую формулу для энергии связи:

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

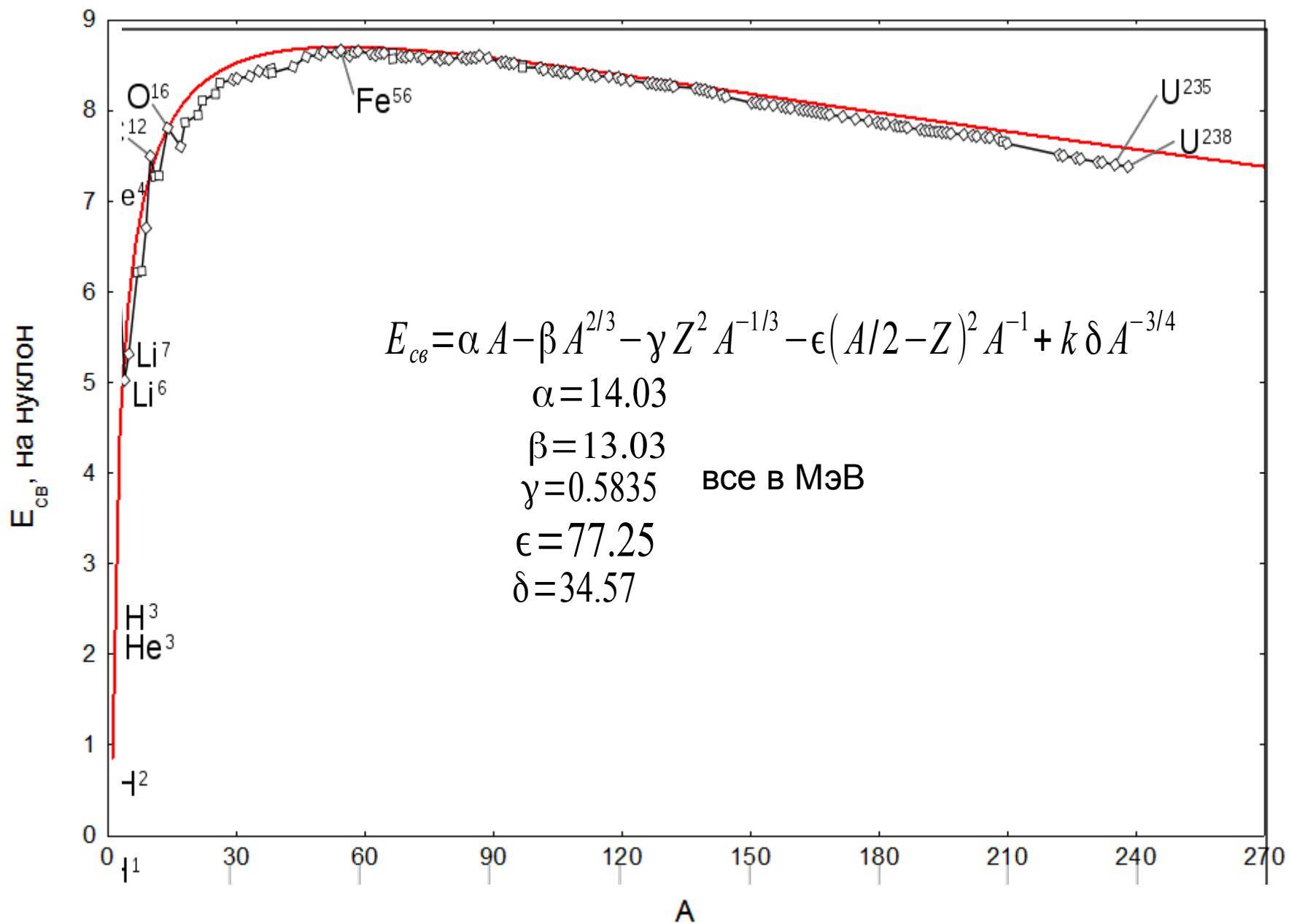
$$E_S = -\beta A^{2/3} \quad \text{поверхность}$$

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

$$E_{\text{сим}} = -\epsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A} \quad \text{выгодность равных чисел протонов и нейтронов}$$

$$E_{\text{спар}} = k \frac{\delta}{A^{3/4}} \quad \begin{array}{l} k=1 \text{ для чётно-чётных ядер, } k=0 \\ \text{для чётно-нечётных и } k=-1 \text{ для} \\ \text{нечётно-нечётных ядер} \end{array}$$

квантовые  
эффекты



сти!!!

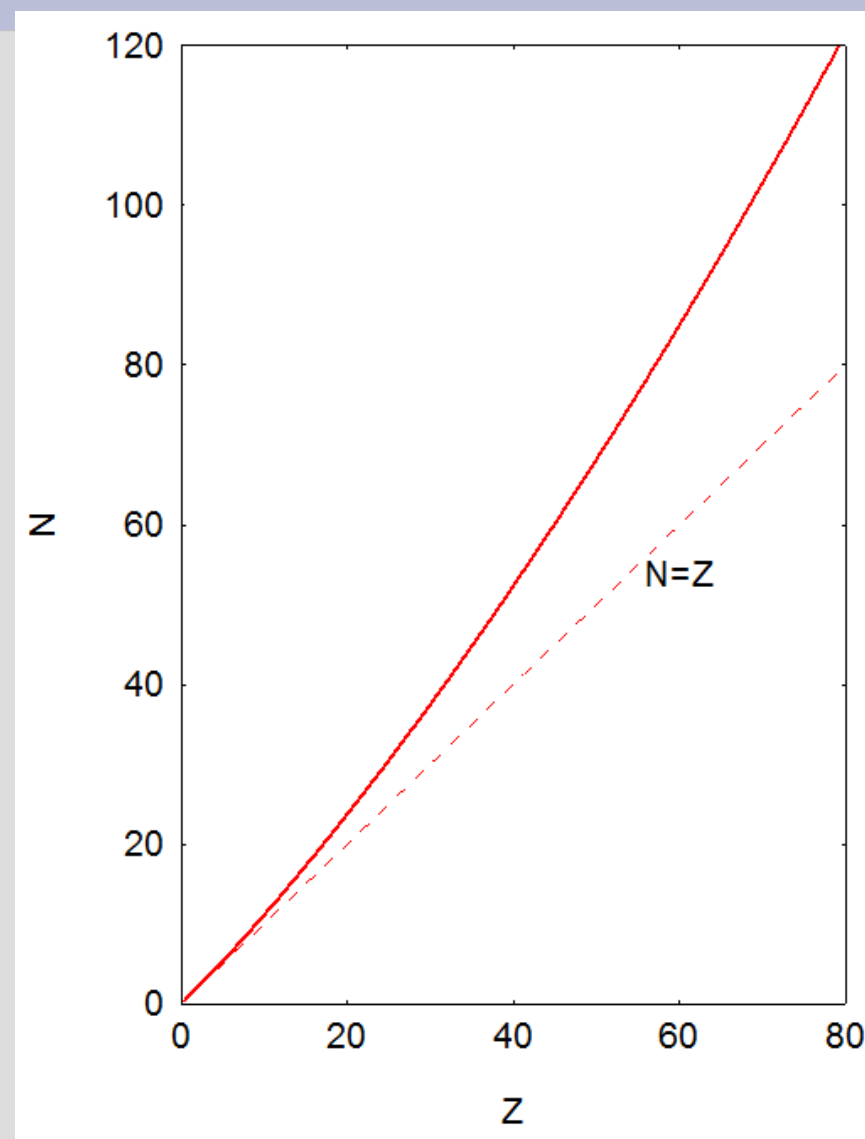
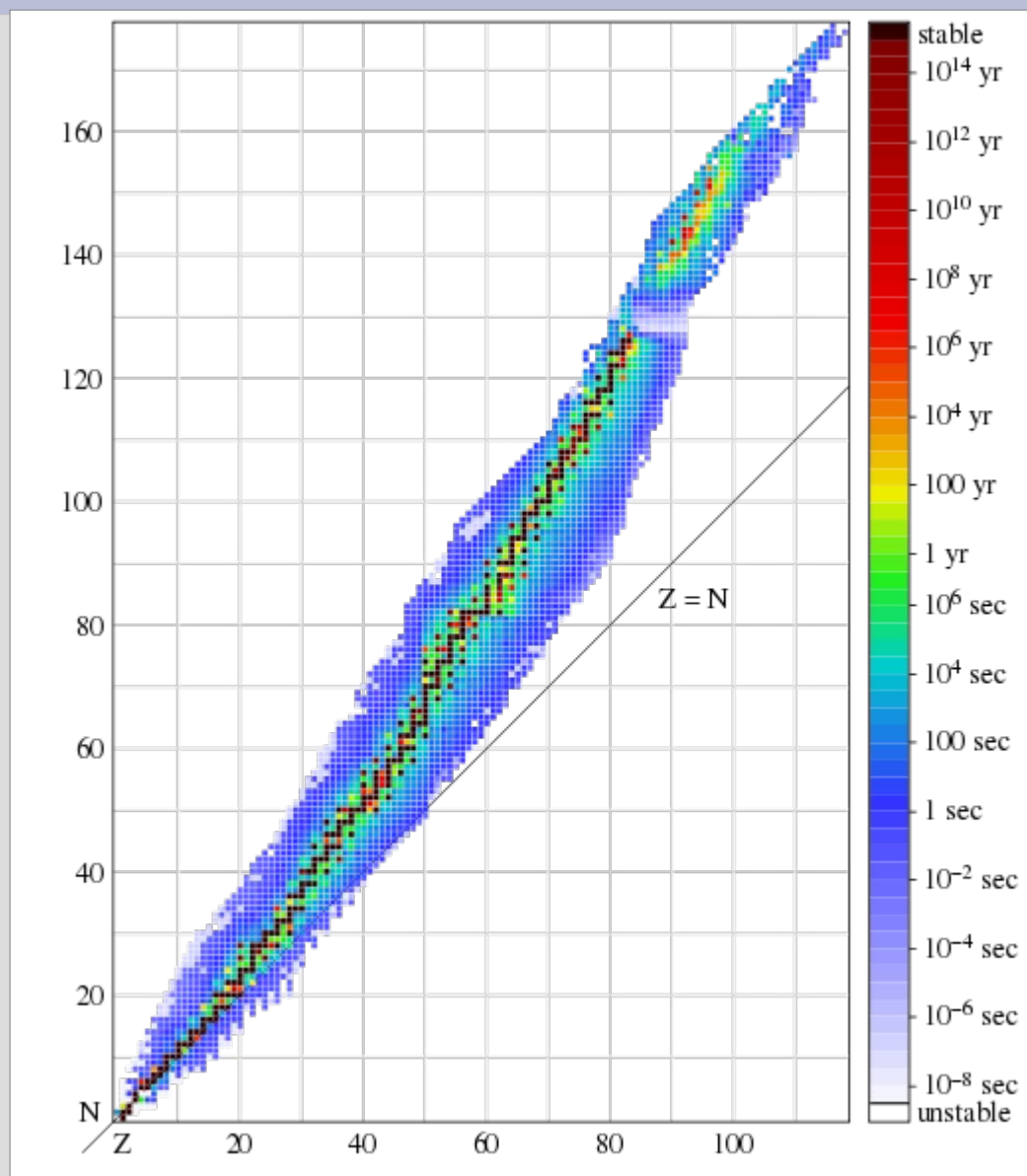
изи:

НЫХ  
и

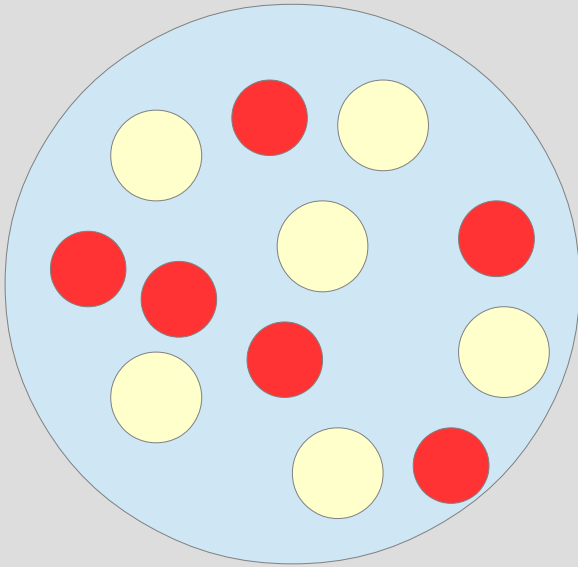
р,  $k=0$   
для

нечетно-нечетных ядер

## Ещё одна польза: “долина стабильности”



# Оболочечная модель, “магические числа”



Майер, Енсен  
(1963)

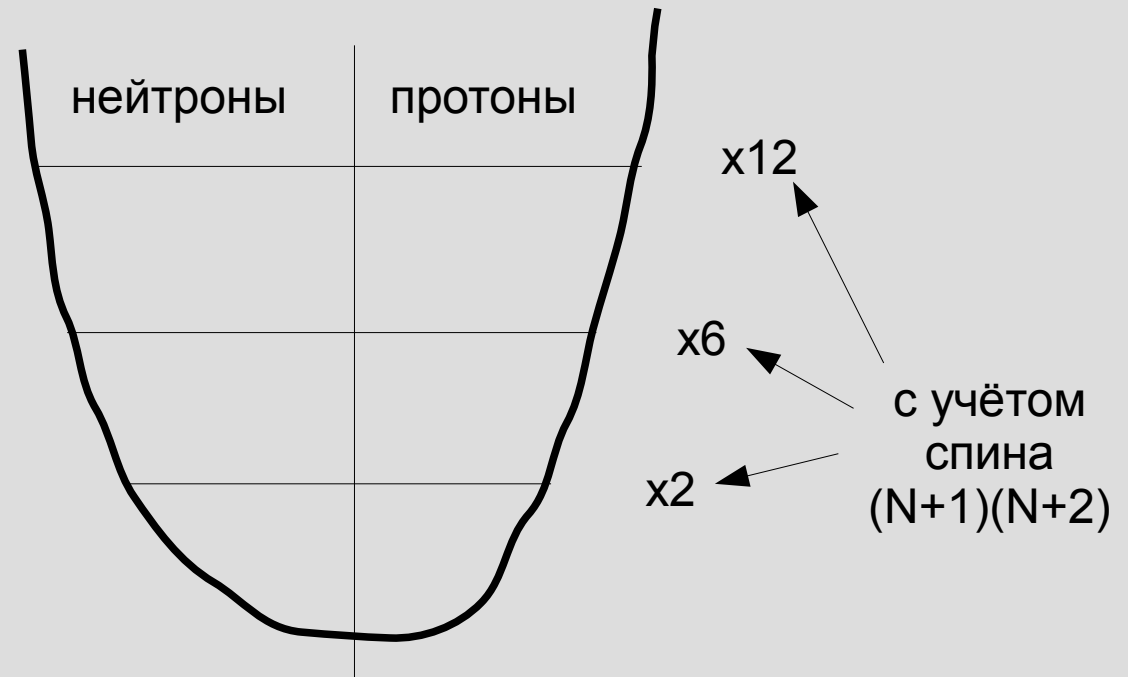


Один нуклон в “эффективном поле” других нуклонов.  
Минимум потенциальной энергии в центре.  
Простейшая модель – параболический потенциал

трехмерный осциллятор

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

уровни вырождены+спиновое  
вырождение



# Трёхмерный осциллятор в сферических координатах

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

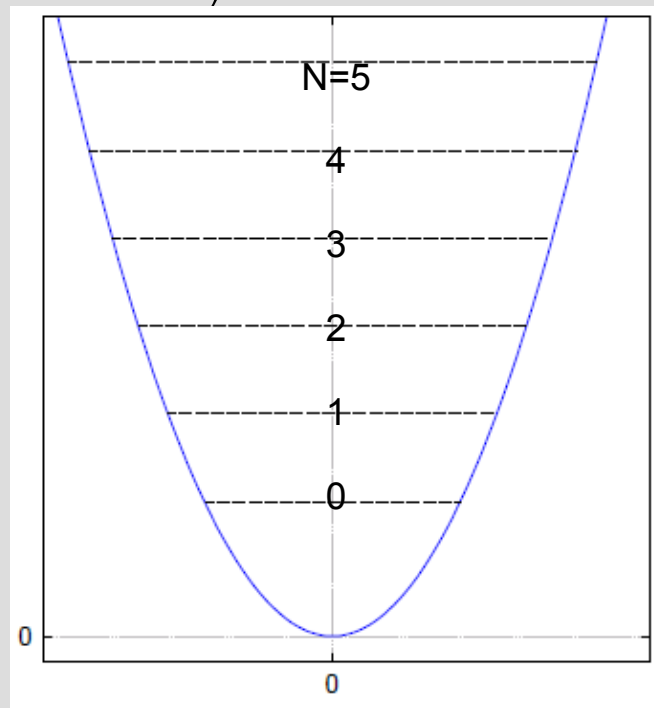
$$\Psi = \frac{\xi(r)}{r} \times Y_{lm}(\Theta, \phi)$$

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

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

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

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



(1g, 2d, 3s)

(1f, 2p)

(1d, 2s)

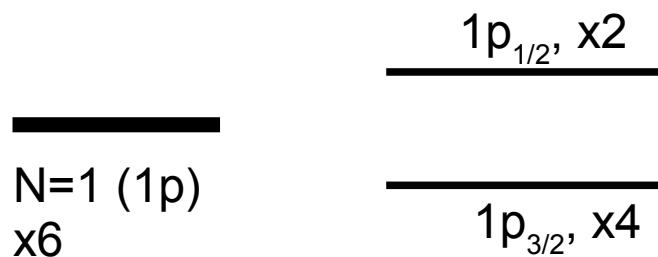
(1p)

(1s)

вырождение по L  
для строго  
гармонического  
осциллятора

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

углерод-12? Проявление “тонкой структуры”:



трехмерный осциллятор

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

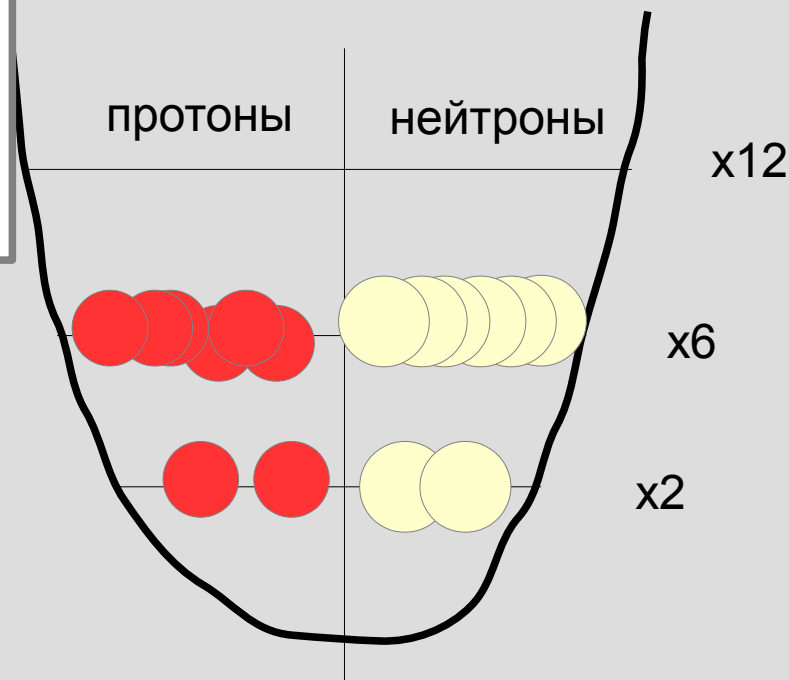
уровни вырождены+спиновое вырождение

## Майер, “магические числа”

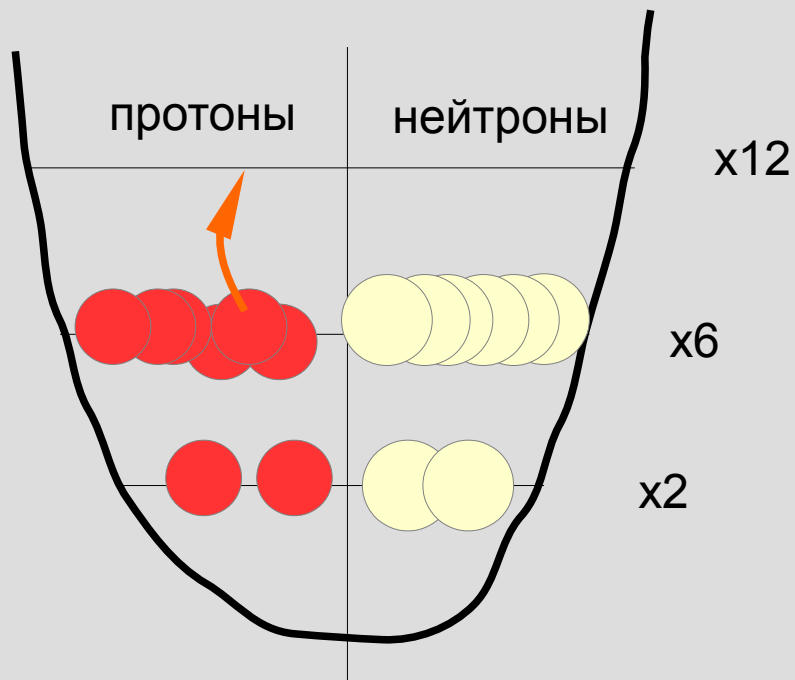
Майер, Енсен  
(1963)



нуклон в “эффективном поле” других нуклонов.  
мун потенциалной энергии в центре.  
гейшая модель – параболический потенциал



## Одночастичные возбужденные состояния ядра



Переход одного нуклона на свободный уровень

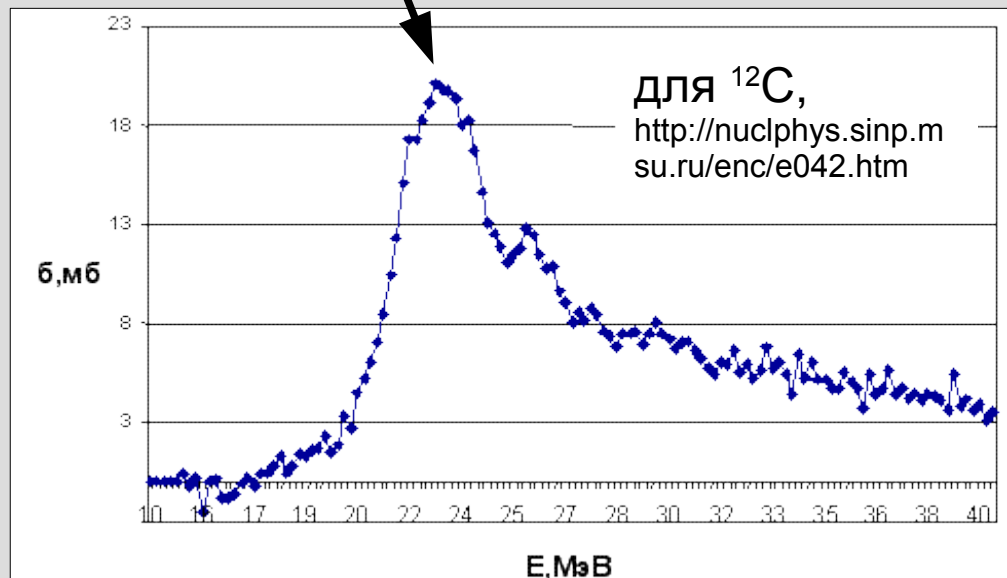
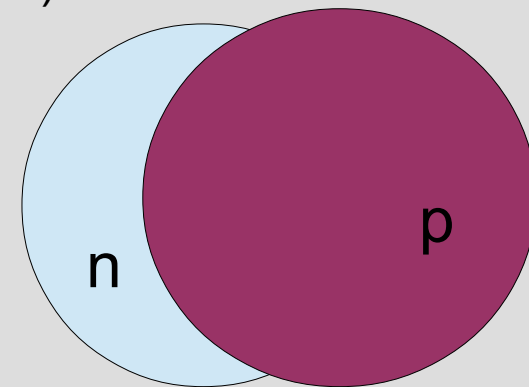
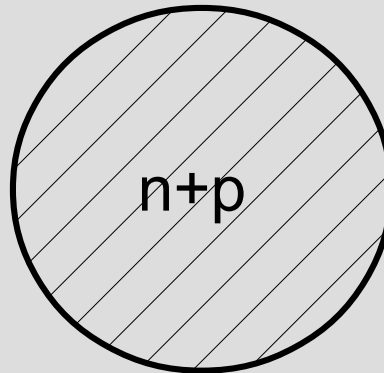
Энергии возбуждения меньше энергии связи —  
(иногда долгоживущие)  
связанные состояния

# Коллективные возбужденные состояния

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

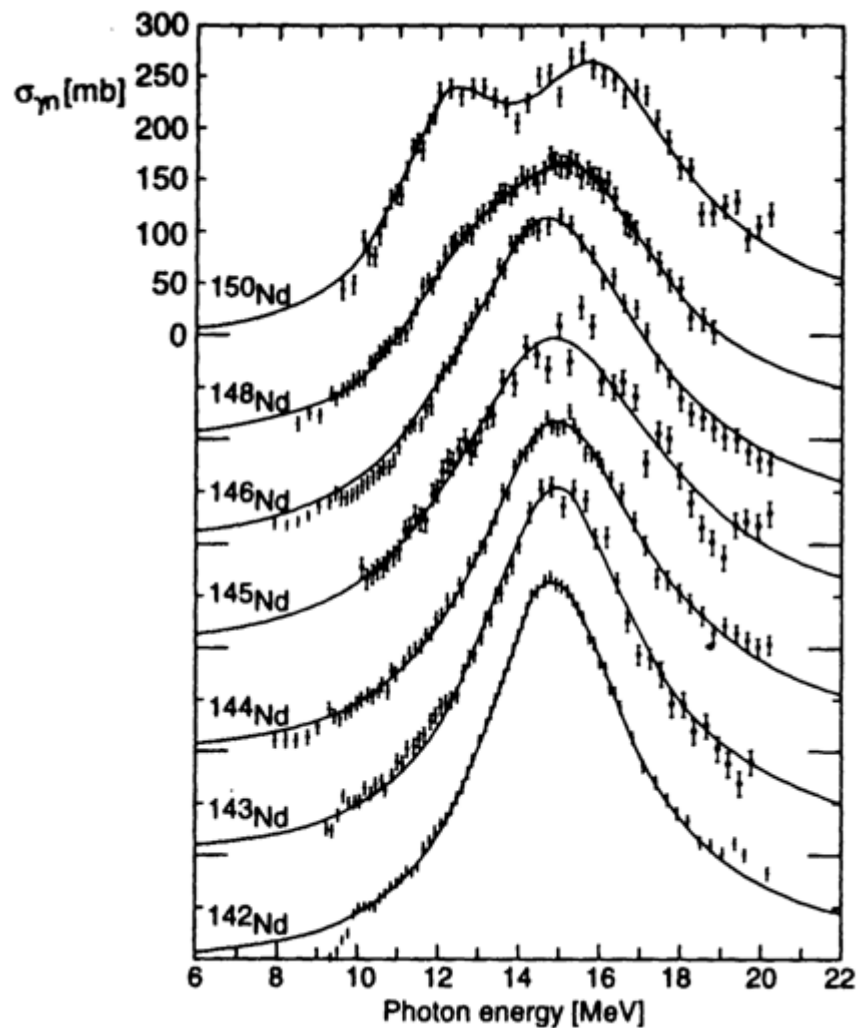
для  $A=50\dots150$

$$E \approx \frac{75}{\sqrt[3]{A}} \text{ МэВ}$$

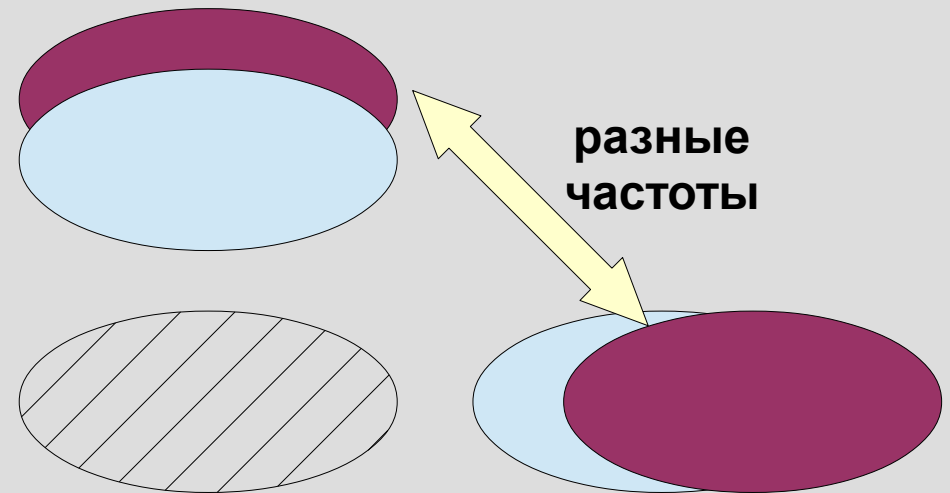


наблюдается для всех ядер,  
энергия  $\sim 20$  МэВ —  
больше энергии связи,  
короткоживущее состояние  
с большой шириной по  
энергии

## Несферичность некоторых ядер

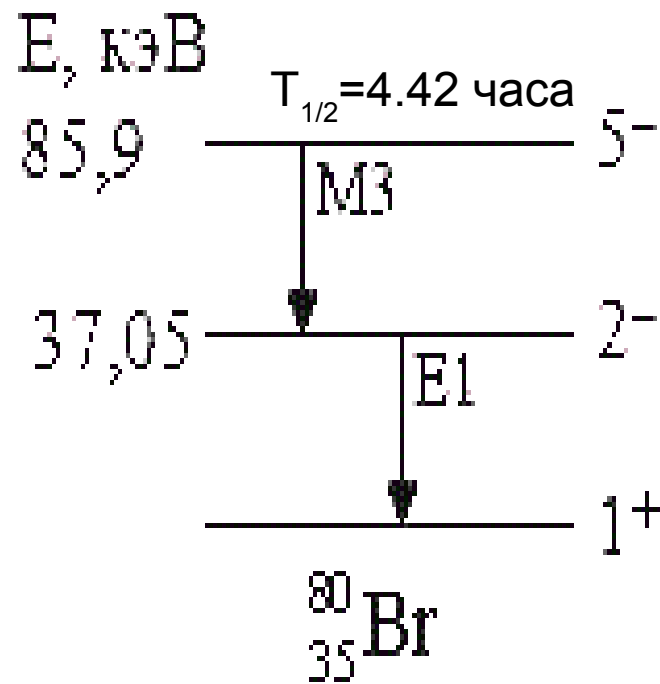


Эксперимент:  
расщепление гигантского  
дипольного резонанса для  
изотопов неодима.

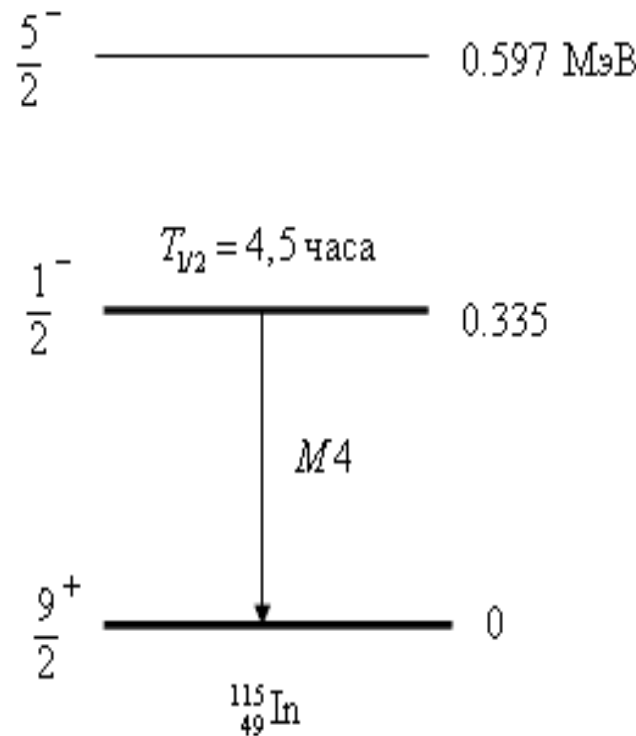


<http://nuclphys.sinp.msu.ru/gdr/gdr2.htm>

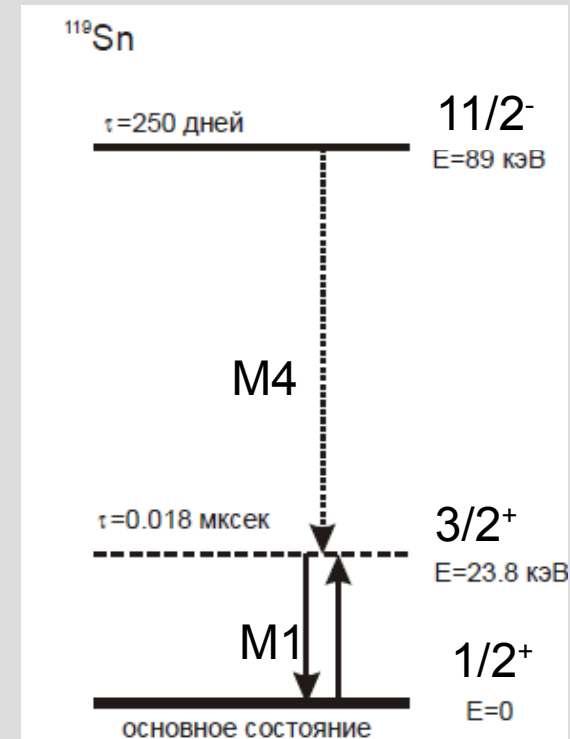
# Гамма-излучение и гамма-изомеры



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

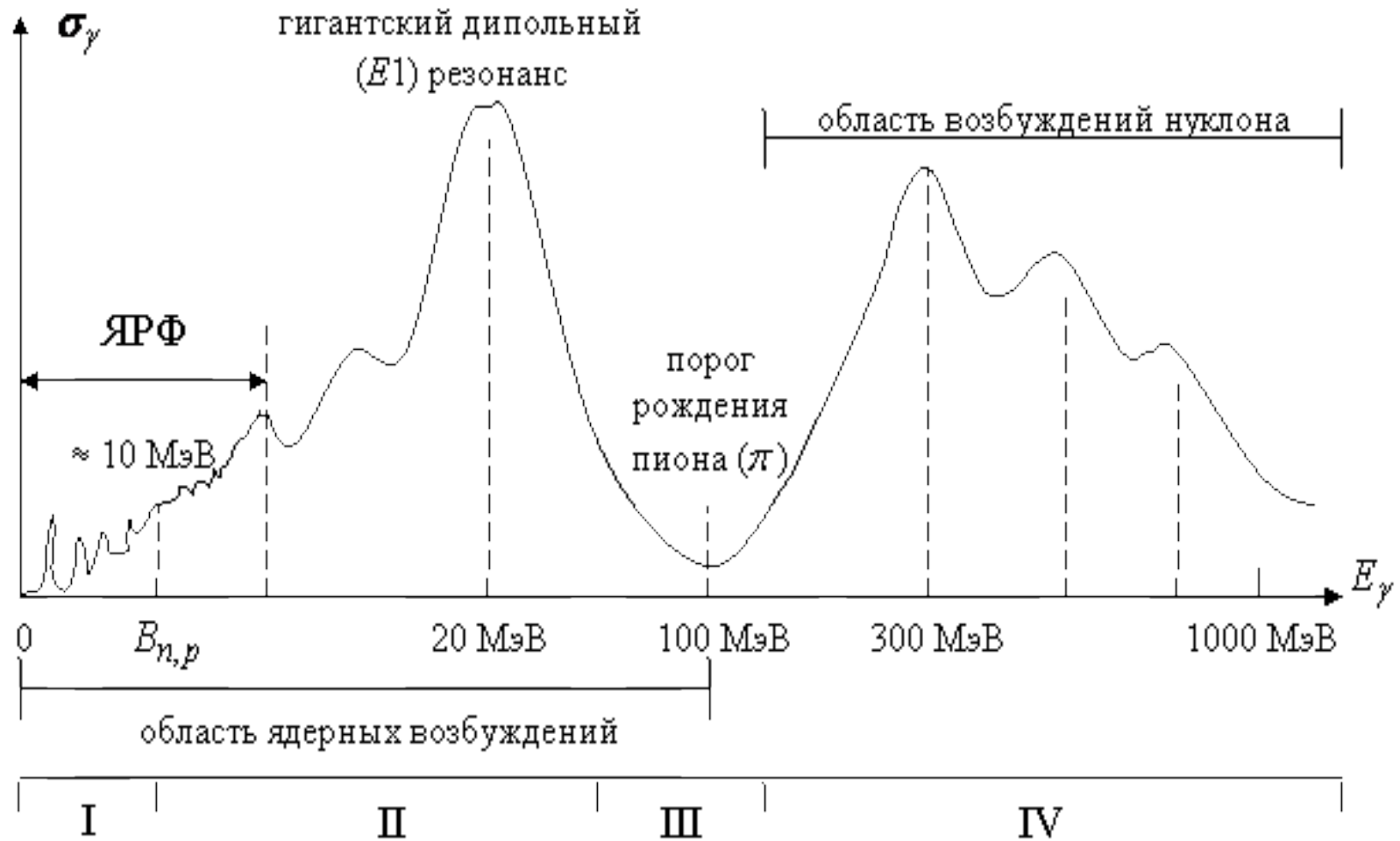


<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract06.htm>

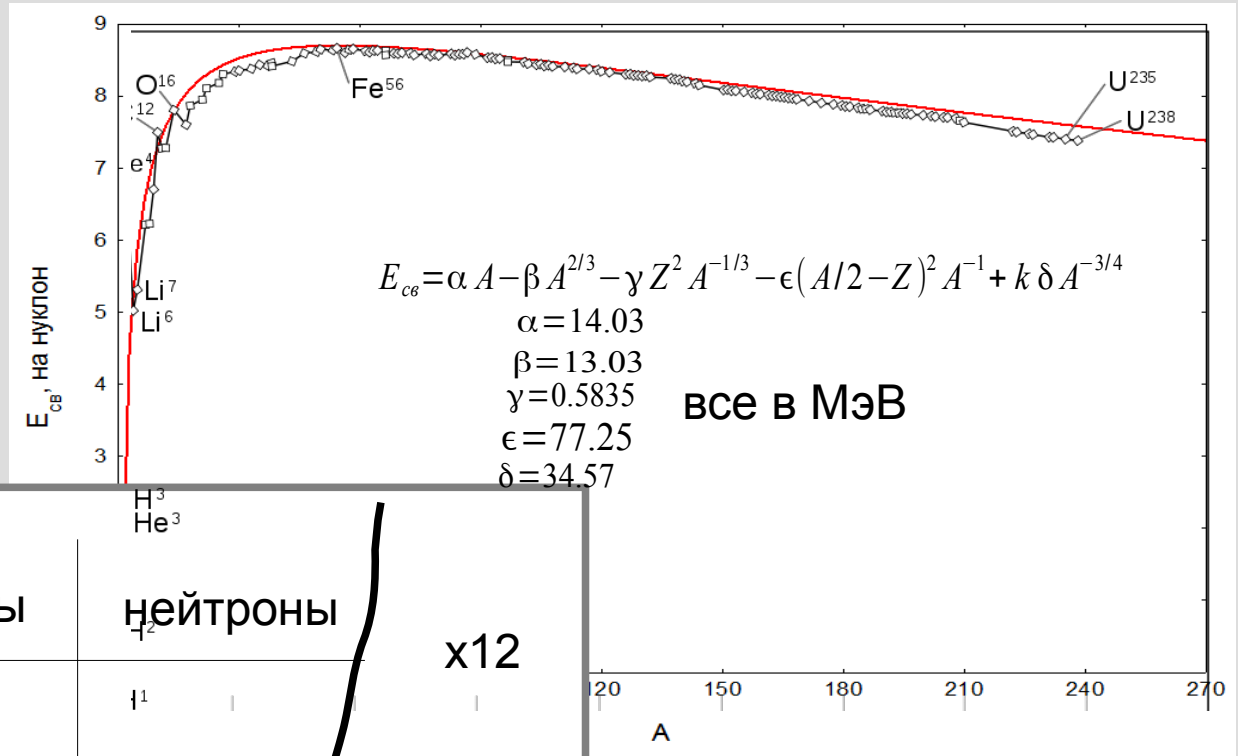
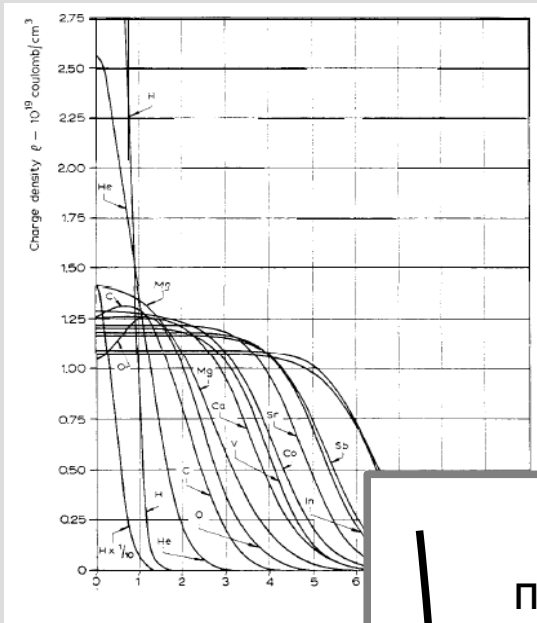


Обозначение уровней: полный момент (число), чётность (знак)

# Гамма-спектр



# Основное на лекции



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

