

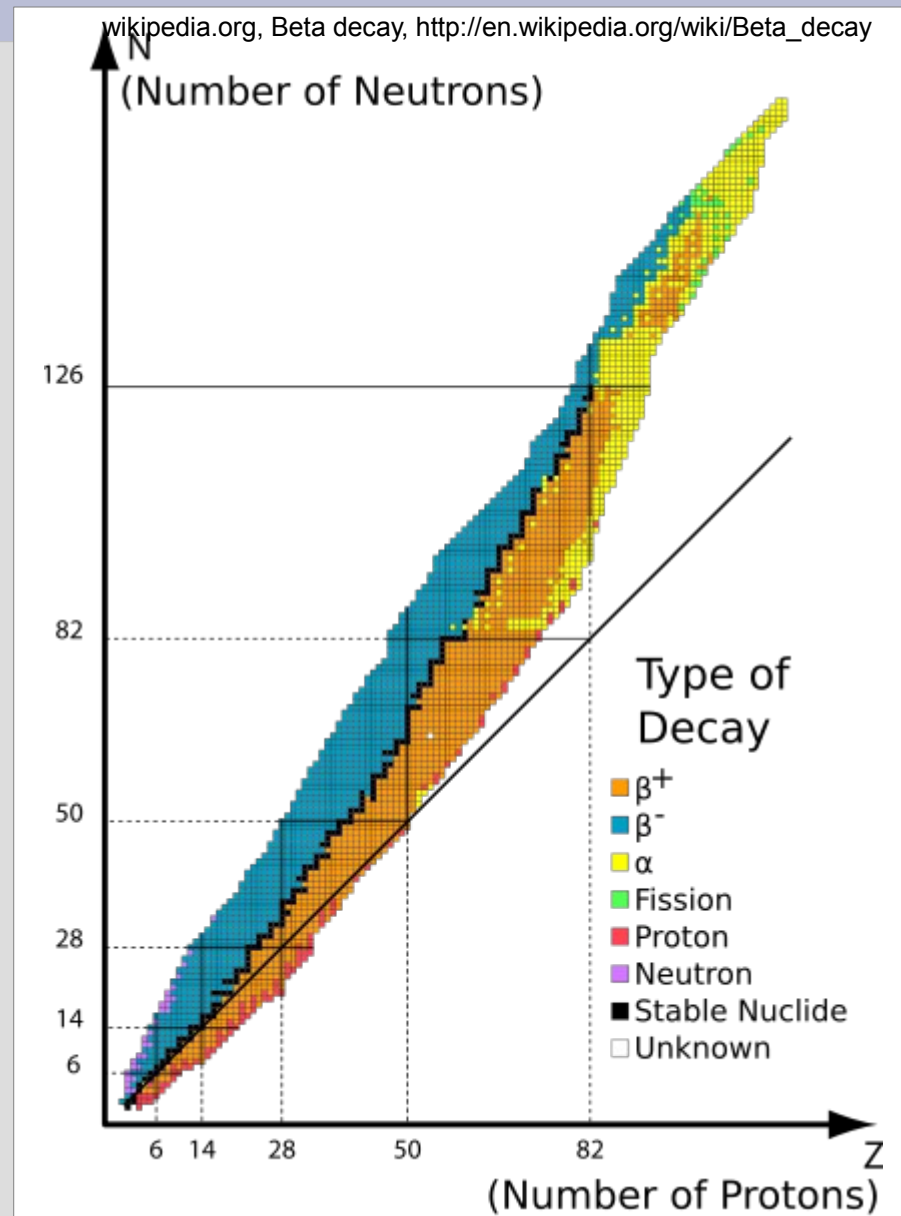
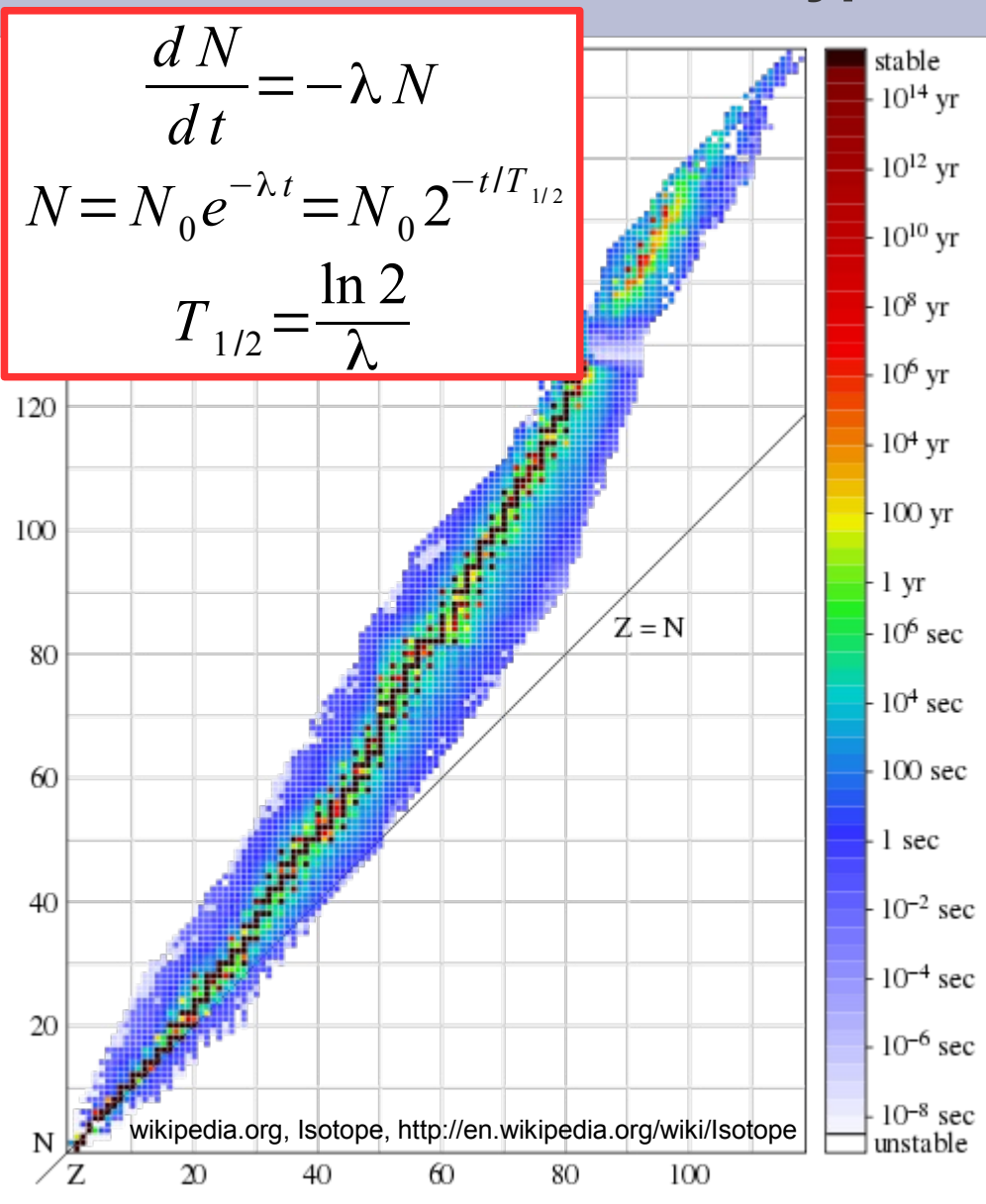


## Немного из истории

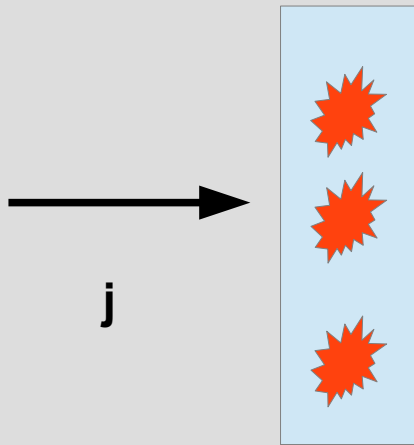
Рубеж 19-20 веков: Склодовская-Кюри, Беккерель, Резерфорд и др...

- Некоторые минералы (в т.ч. урановые руды) являются источником невидимого излучения («засветка» фотопластинок+ионизирующее действие).
- По существенному различию проникающей способности выделено три вида излучения: альфа, бета и гамма-излучение.
- Альфа-частицы идентифицированы как дважды ионизованные атомы гелия, бета-частицы как электроны.
- При испускании частиц возникают новые химические элементы

# Варианты распадов, атомный вес и долина стабильности. Закон радиоактивного распада и период полураспада



# Сечение реакции



число реакций (нужного типа) в единицу времени

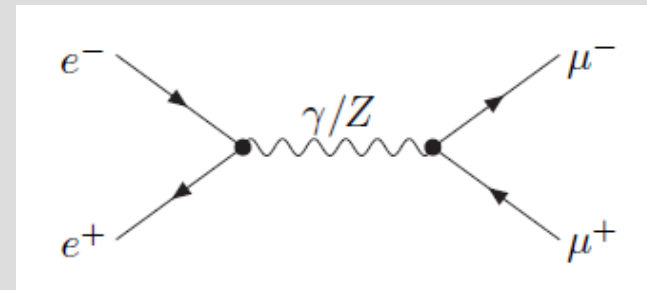
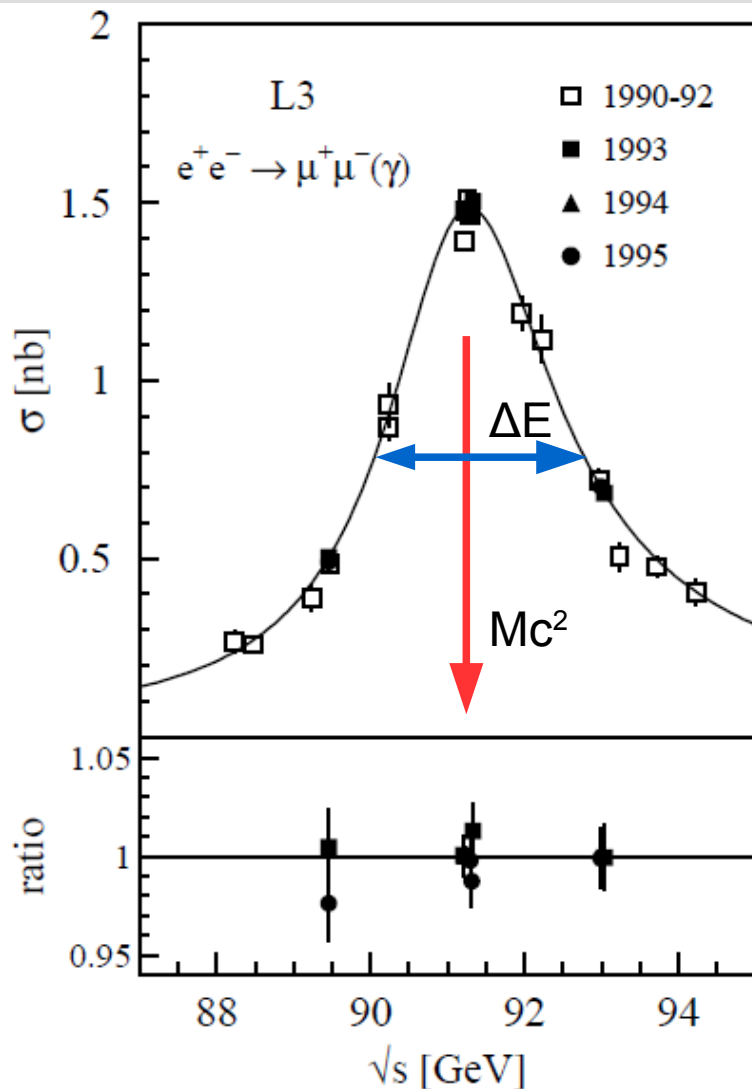
$$\propto j (n S dx) \sigma$$



“эффективная площадь”,  
в ядерной физике удобная  
единица барн  $1\text{бн}=10^{-24}\text{ см}^2$

$$j(x) = j_0 e^{-n\sigma x} \quad \text{ослабление потока}$$

# Сечение реакции – фактически измеряемая величина в эксперименте на ускорителях



Образование промежуточной частицы =  
“резонанс” сечения рассеяния

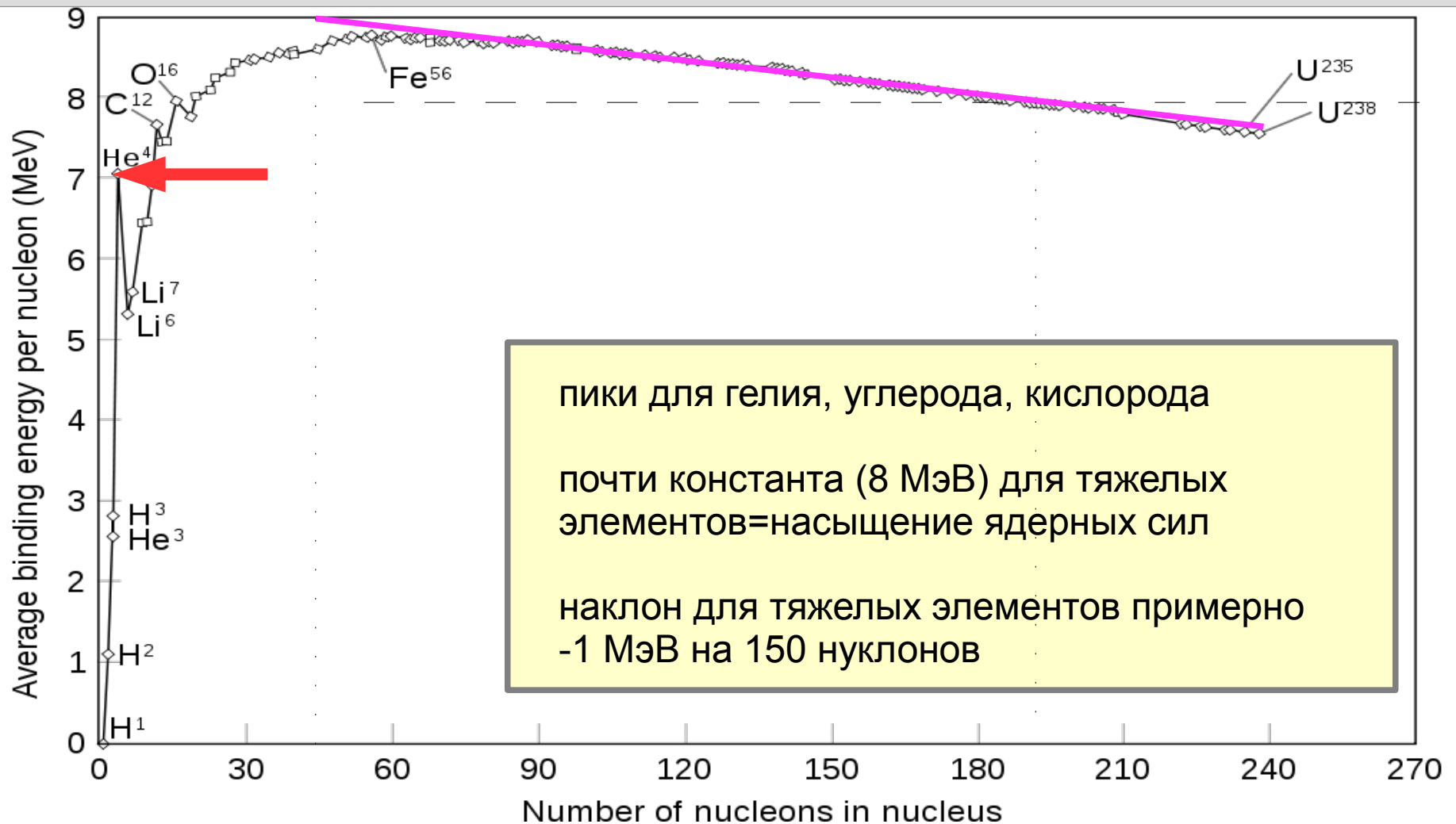
Ширина этого резонанса обратно  
пропорциональна времени жизни  
частицы

INTRODUCTION TO COLLIDER PHYSICS

MAXIM PERELSTEIN\*

<https://arxiv.org/pdf/1002.0274.pdf>

# Энергетическая выгодность распадов



## Альфа-распад. Почему именно гелий?



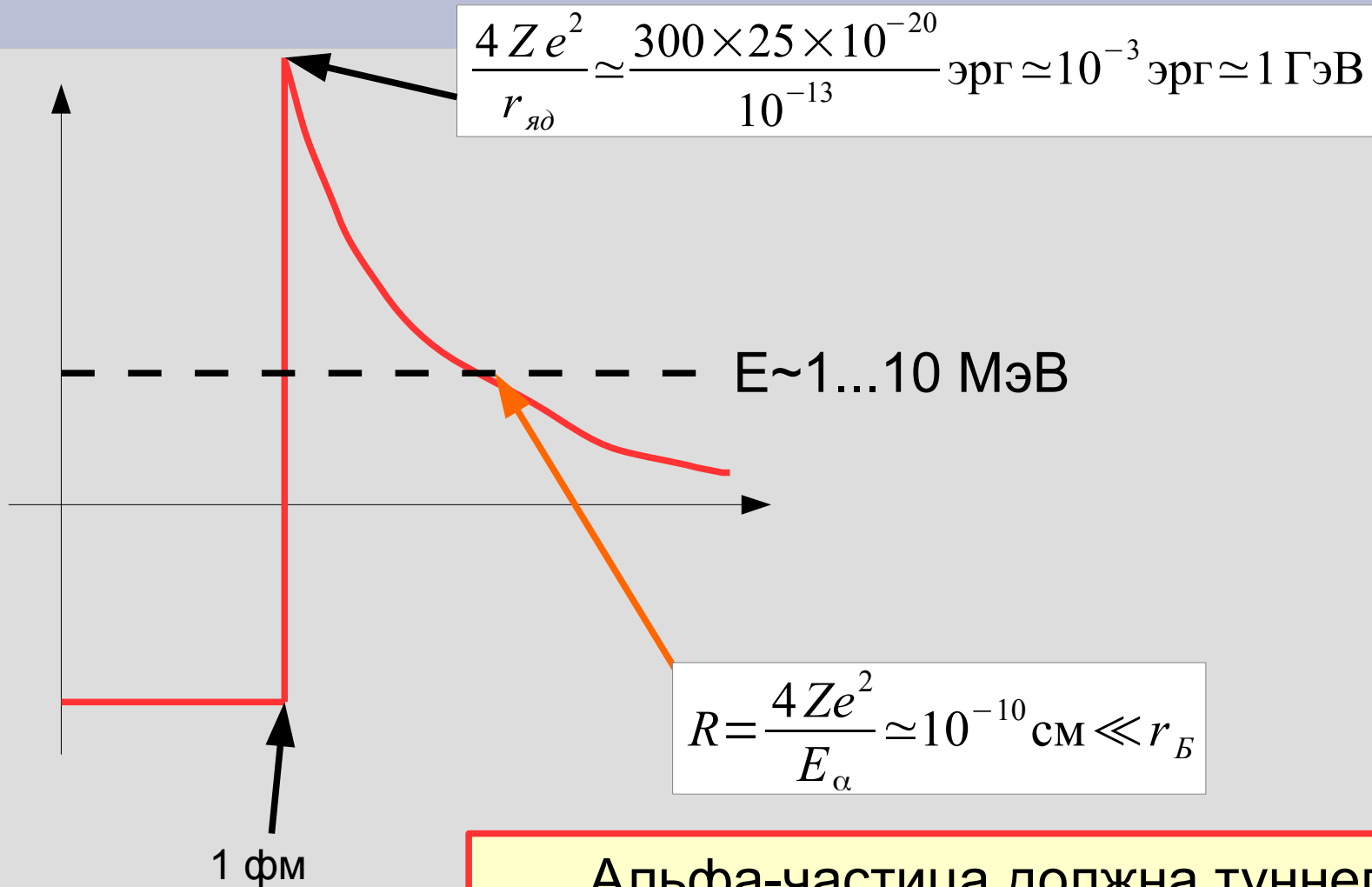
Для выгодного распада *полная энергия покоя* слева больше, а *энергия связи - меньше*

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

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

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

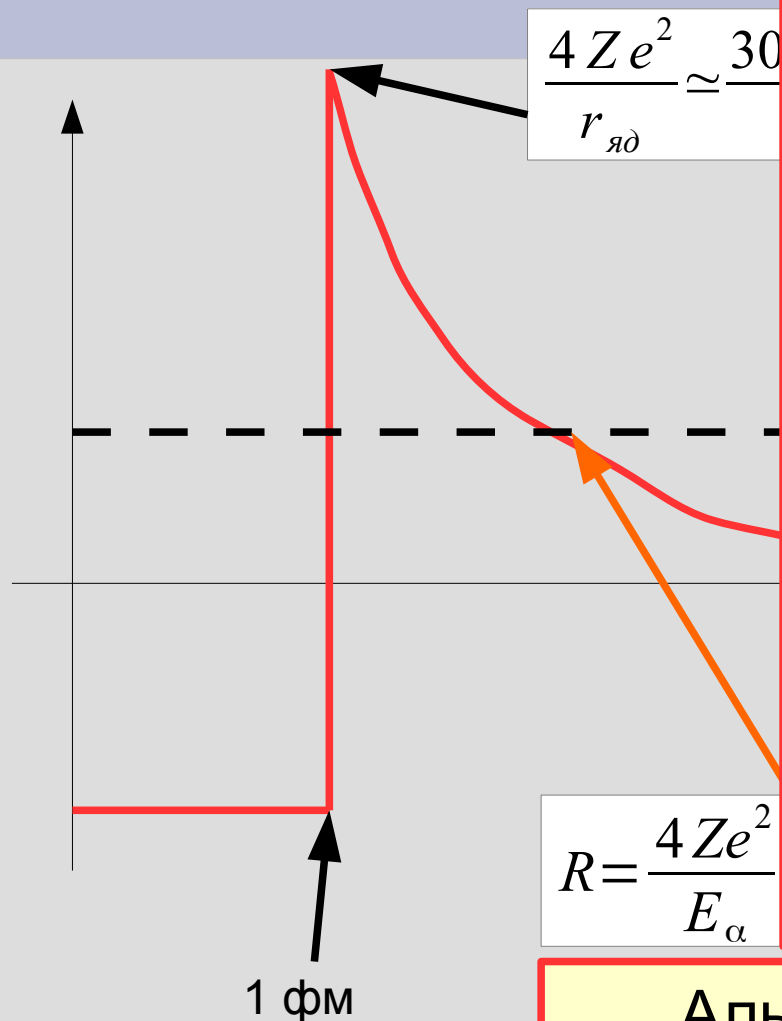
## Альфа-распад. Закон Гейгера-Неттола



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



## Альфа-распад. Закон Гейгера-Неттола



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

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

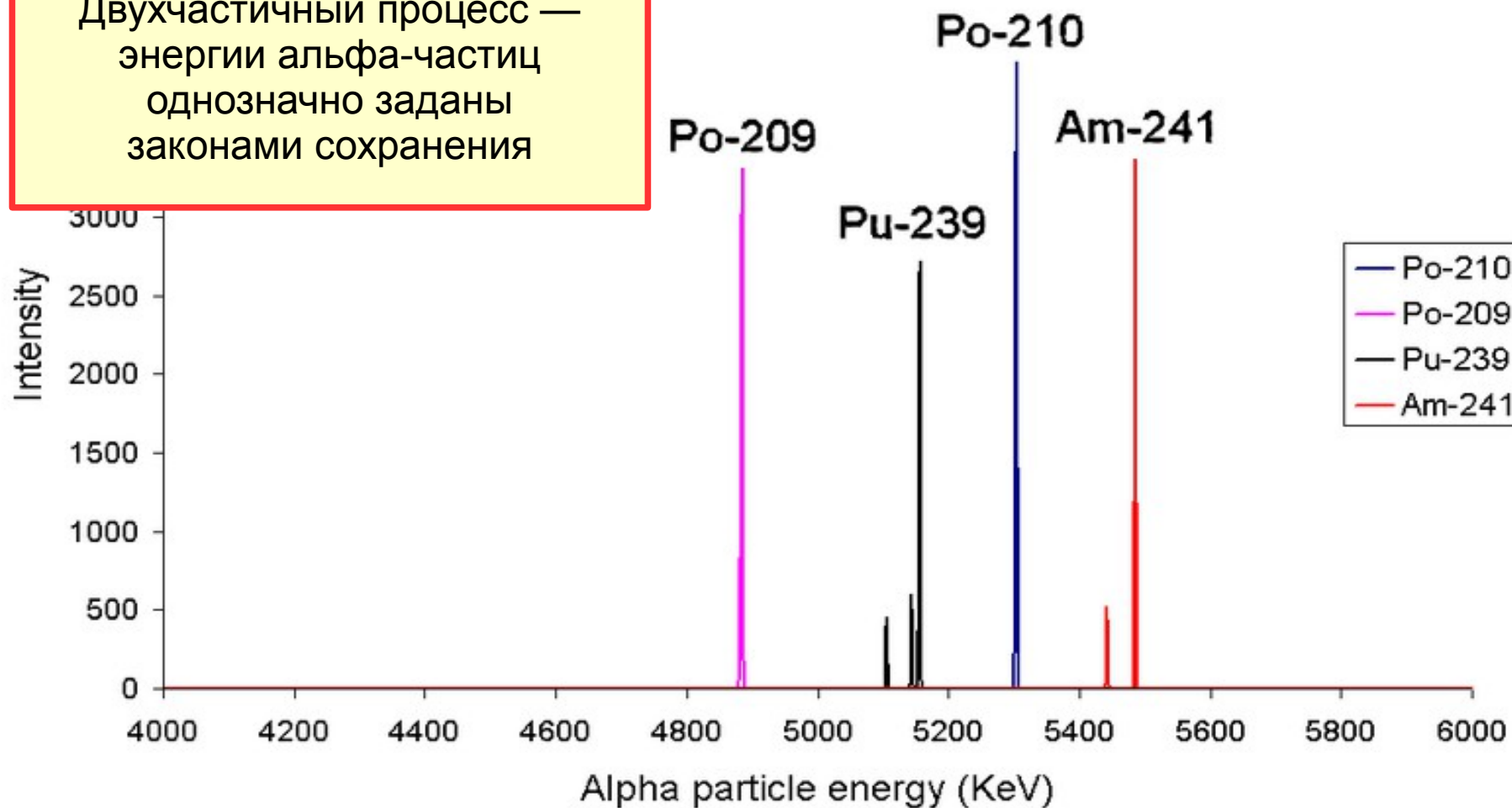
$$\ln D \propto -\frac{Z}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad T_{1/2} \propto 1/D$$

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

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

# Спектр альфа-распада

Двухчастичный процесс —  
энергии альфа-частиц  
однозначно заданы  
законами сохранения



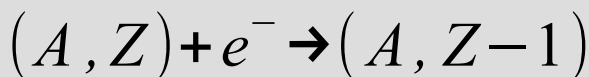
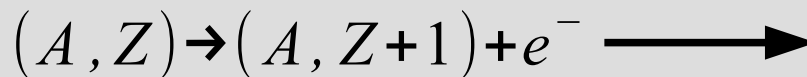
## Бета-распады

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

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

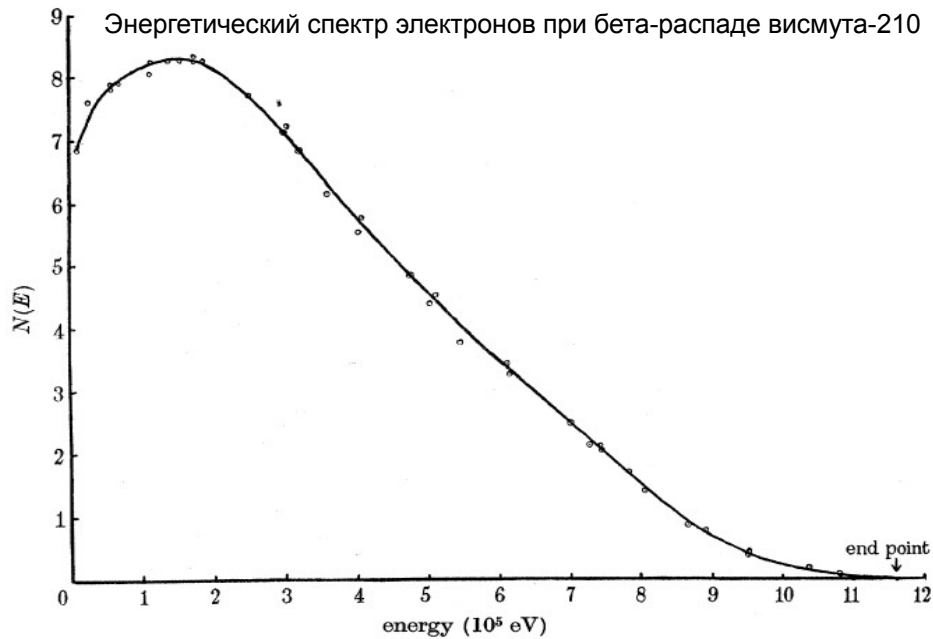


$$\begin{aligned}
 & N M_n c^2 + Z M_p c^2 - E_{\text{св}}(A, Z) > \\
 & (N-1) M_n c^2 + (Z+1) M_p c^2 - \\
 & \quad E_{\text{св}}(A, Z+1) + m_e c^2 \\
 & E_{\text{св}}(A, Z) < E_{\text{св}}(A, Z+1) + \Delta M c^2 - m_e c^2
 \end{aligned}$$

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

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

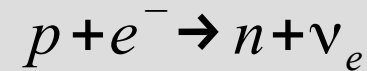
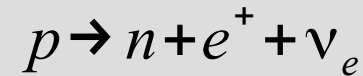
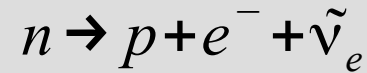
# Спектры бета-распада



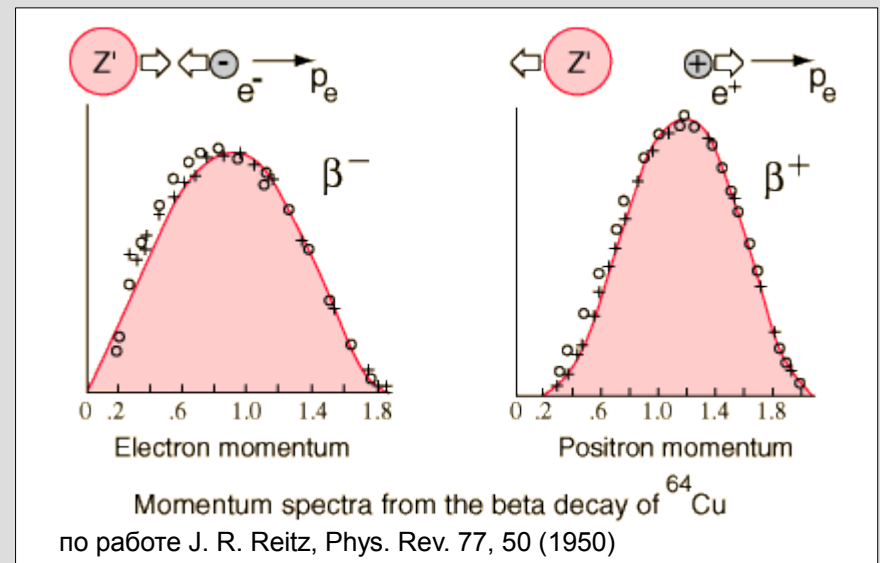
G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210],  
Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 (1940)

Cu-64:

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



↑  
нейтрино, “отпечаток”  
слабого взаимодействия

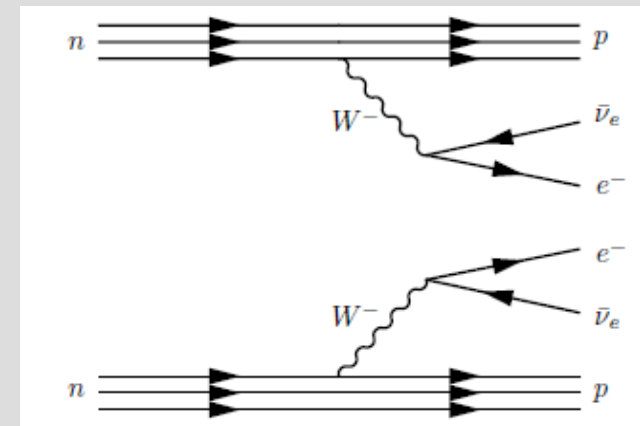
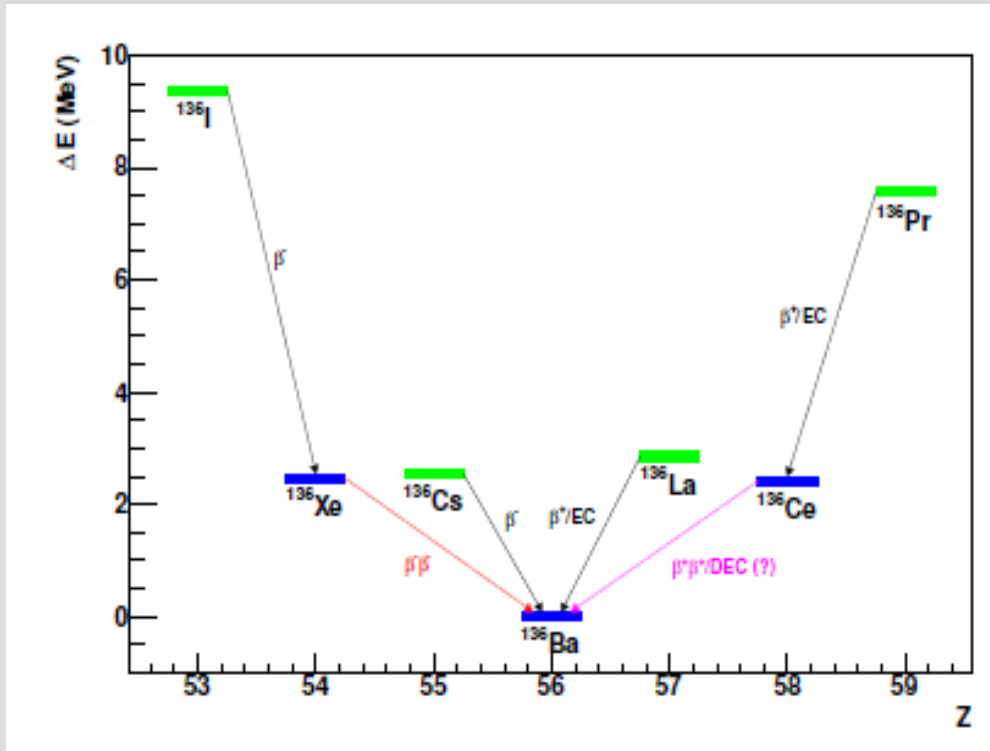


## Двойной бета-распад

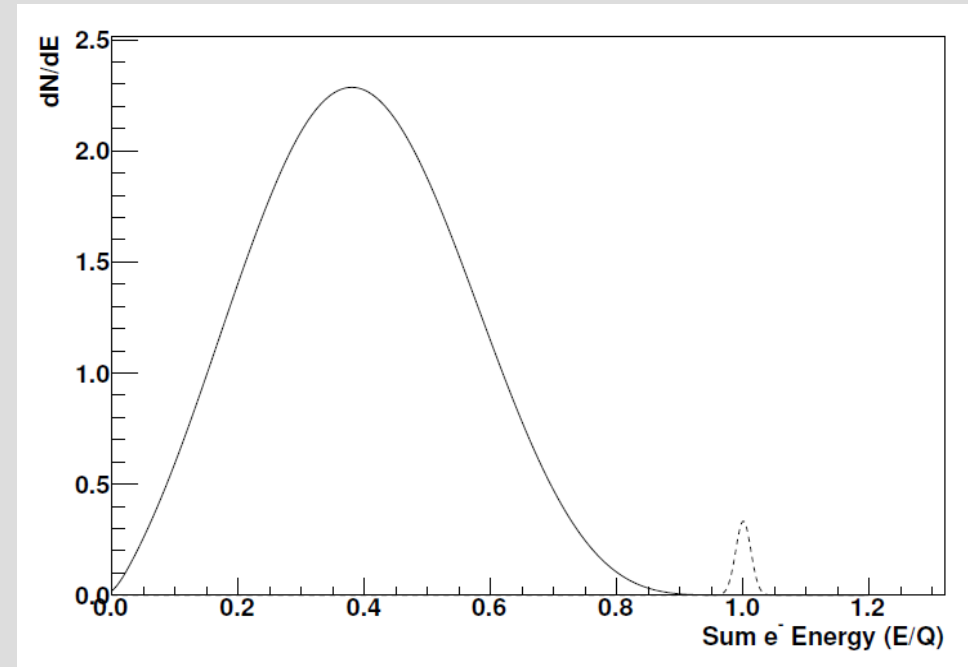
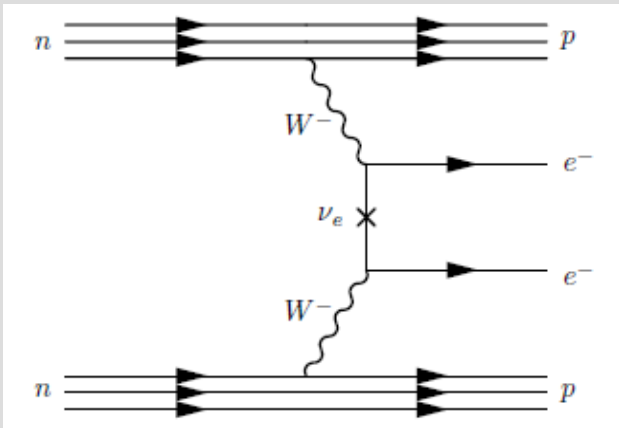
$^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Gd}$ ,  
 $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{238}\text{U}$

если «нормальный» бета-распад энергетически невыгоден:

все известные случаи — чётно-чётные ядра!

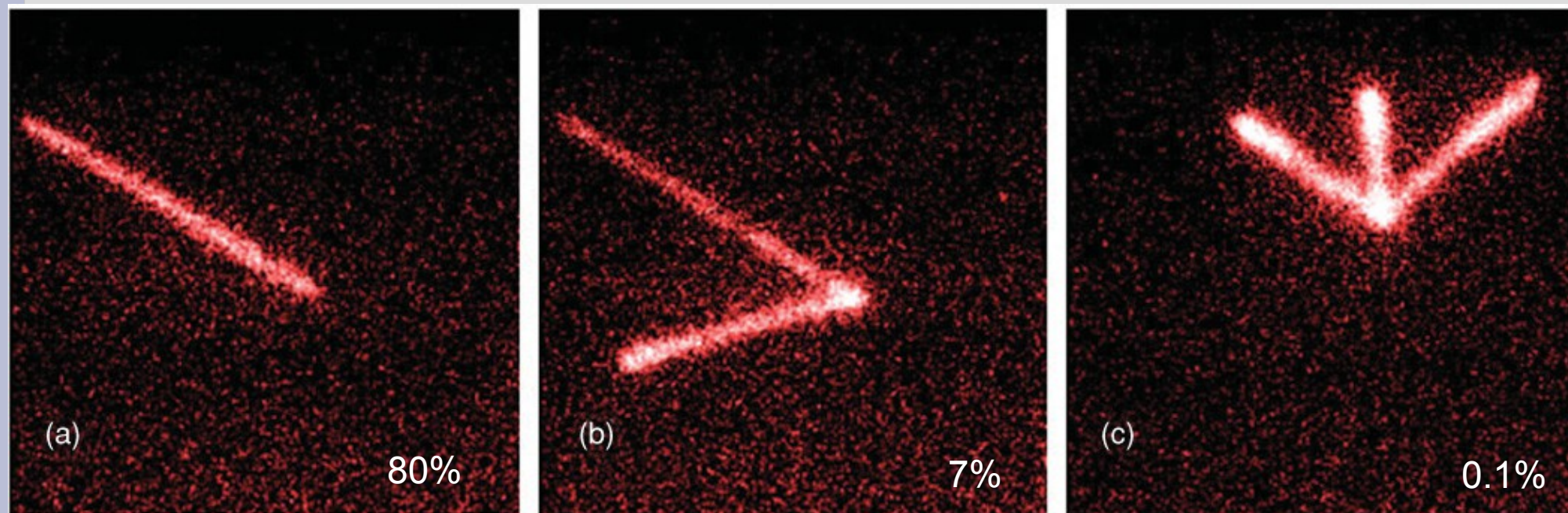


# Гипотеза: Безнейтринный двойной бета распад



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

# Экзотические распады: протонная и нейтронная ЭМИССИЯ

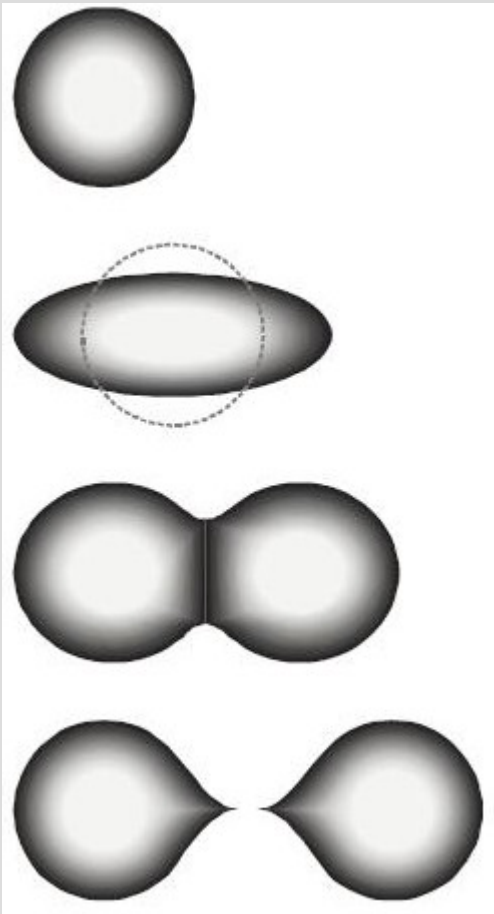


Оставленные в детекторе следы однопротонного (a), двухпротонного (b) и трёхпротонного (c) распадов образующегося после позитронного распада хрома-43 ядра ванадия-43. Из статьи M. Pomorski, *et al.*  $\beta$ -delayed proton emission branches in Cr43, Phys. Rev. C, (2011)

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



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

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

$$\frac{E_K}{E_S} \propto \frac{Z^2}{A}$$

более 50 – мгновенное деление

менее 17 – стабильность к делению

# Изотопная датировка

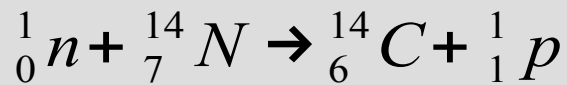
Радиоуглеродный анализ (до ~10,000 лет)

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

Либби  
(химия,  
1960)



## “Аксиоматика” радиоуглеродного метода



образование углерода-14 в атмосфере под действием космических лучей, примерно 7.5 кг. в год, единомоментно в атмосфере около 75 тонн (около  $10^{-7}$  всего углерода)

Углерод-14 распадается с периодом полураспада 5730 лет

В живом организме изотопное содержание углерода соответствует равновесному в атмосфере (в том числе, из-за малости времени жизни по сравнению с периодом полураспада)

### Идеальная ситуация:

Если по окончании жизнедеятельности образец полностью изолирован от внешней среды, то его возраст можно определить по концентрации углерода-14 (бета-активность углерода-14 или масс-спектроскопия)

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

# Поправки и калибровки

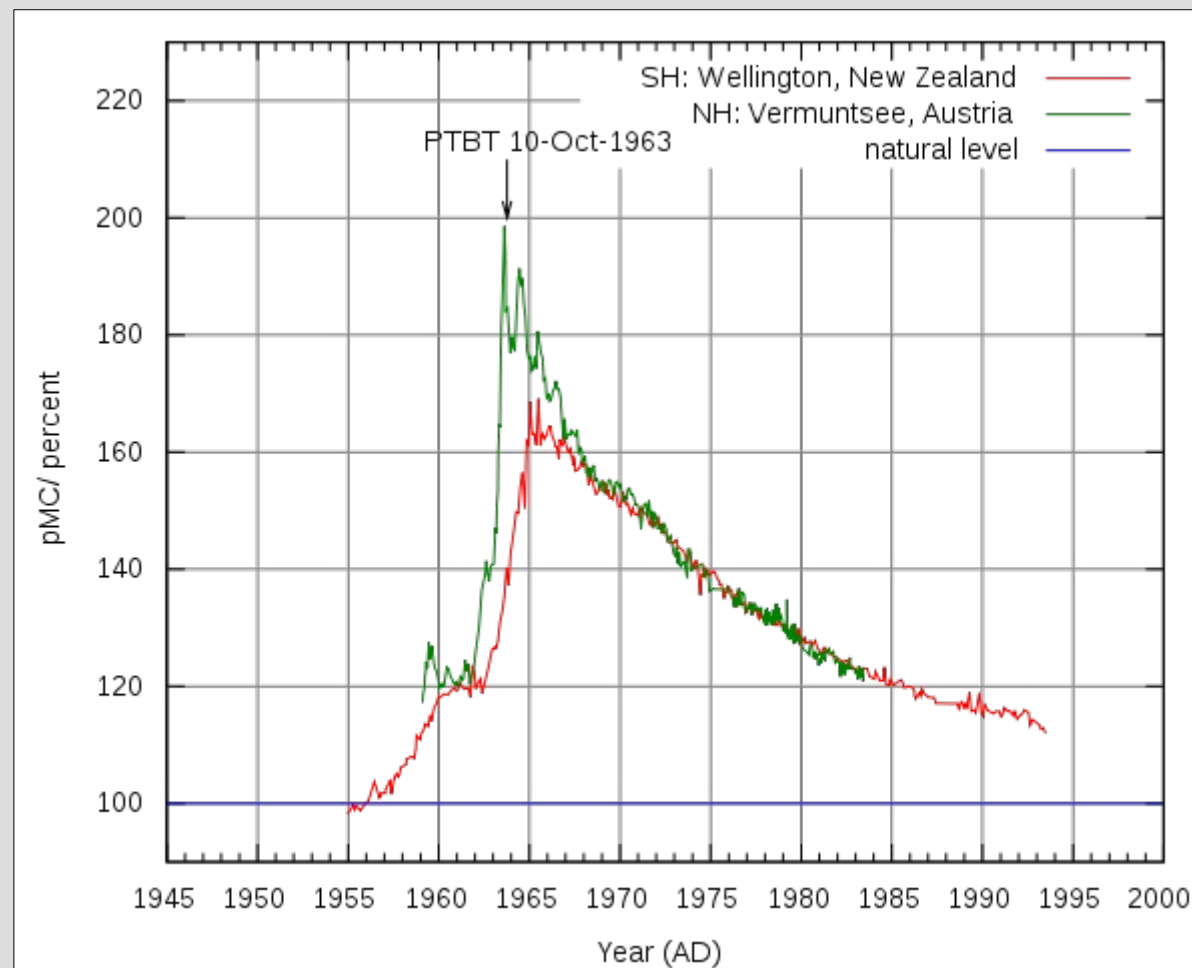
Антропогенный фактор:

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

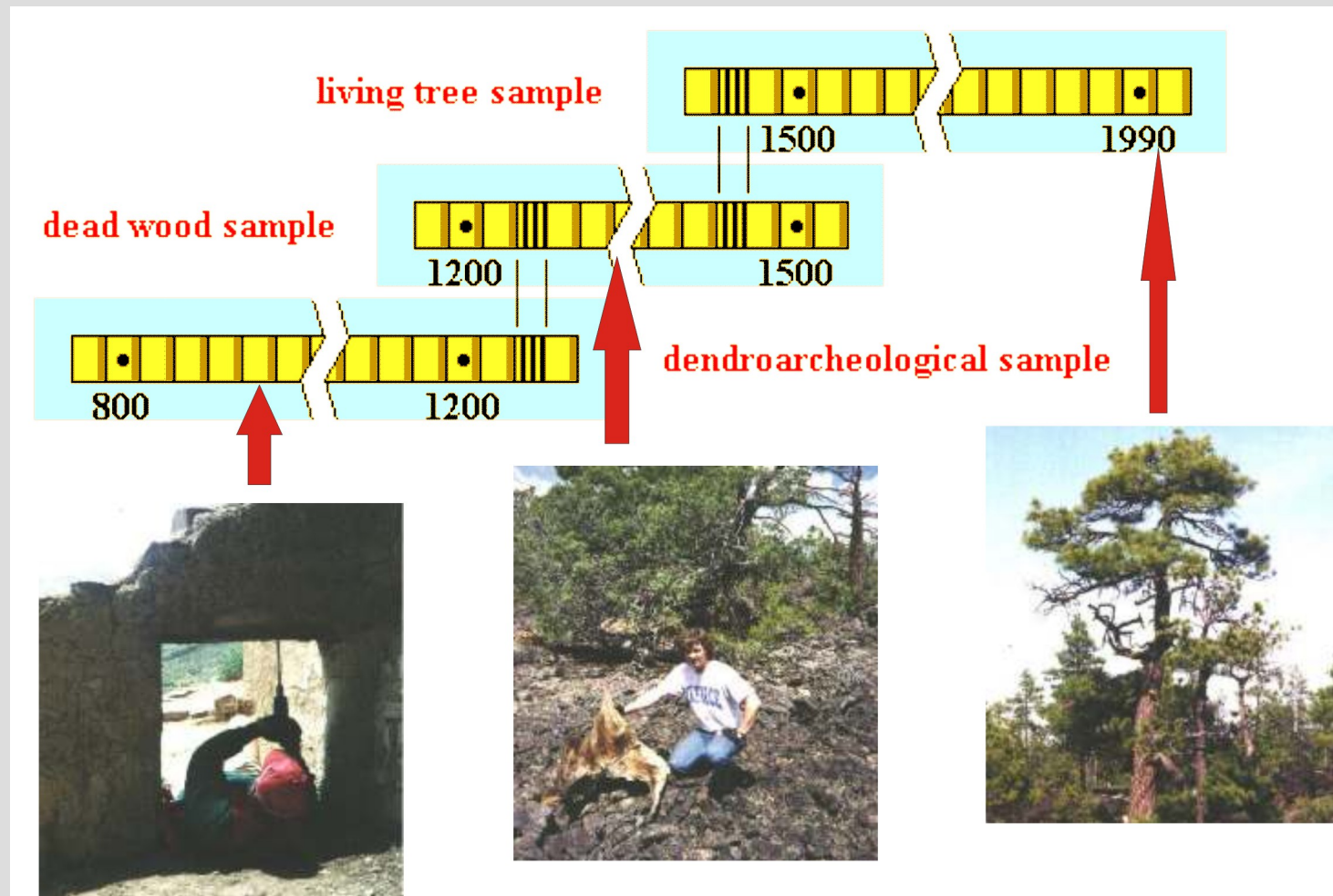
Природные факторы:

- 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](http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating)



# Дендрохронология



## 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 аргон-40

## Рубидий-стронциевый метод

Рубидий-87 распадается в стронций-87 (48.81 млрд.лет). Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.

Рубидий и стронций соседи в таблице Менделеева (щелочной и редкоземельный), встречаются вместе в разных минералах

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

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

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

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

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

↑  
измеряем сейчас

↖ ↗  
постоянно в серии образцов из-за отсутствия изотопного фракционирования

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

Рубидий-87 и стронций-86 стабильны

Рубидий и стронций встречаются в природе

На временах кристаллизации и кристаллизации не существует

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

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

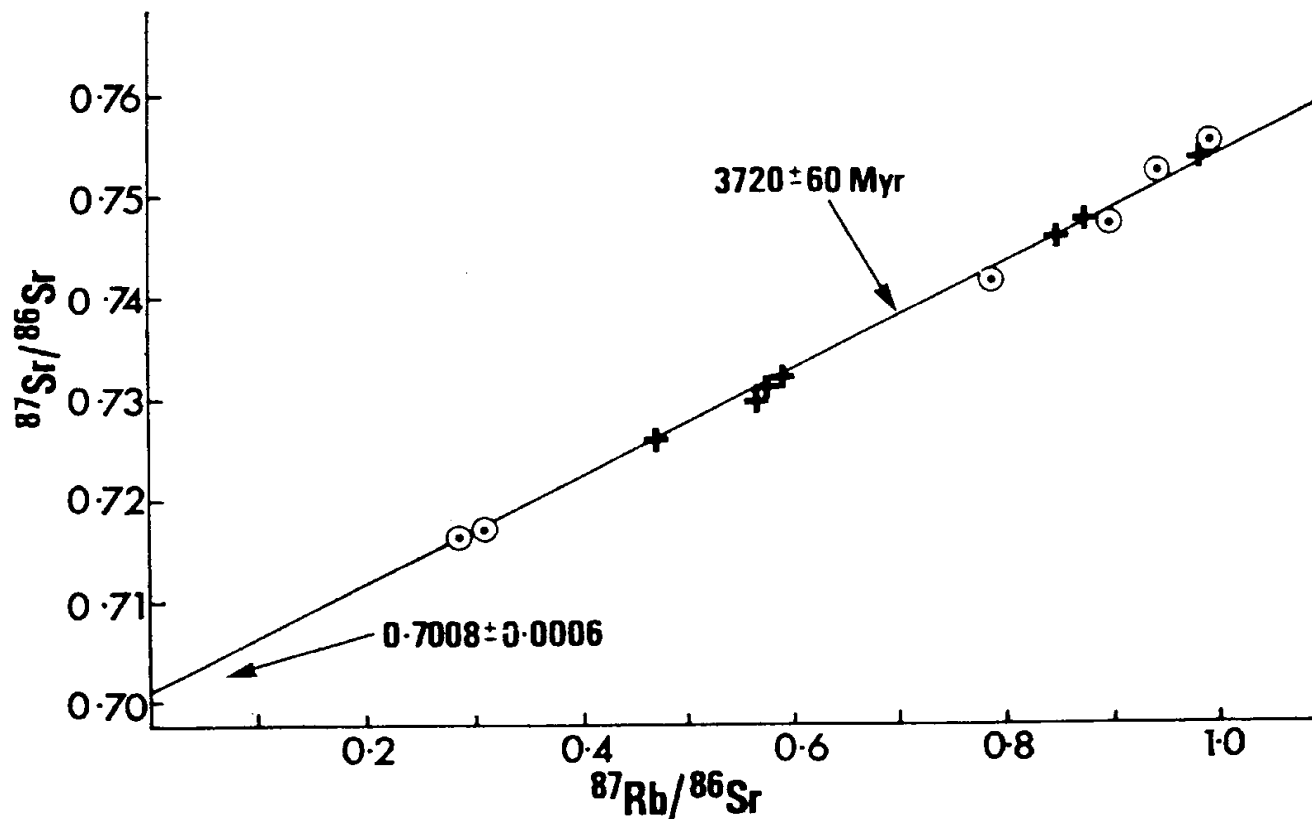
Исходные концентрации неизвестны, но отношение рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное



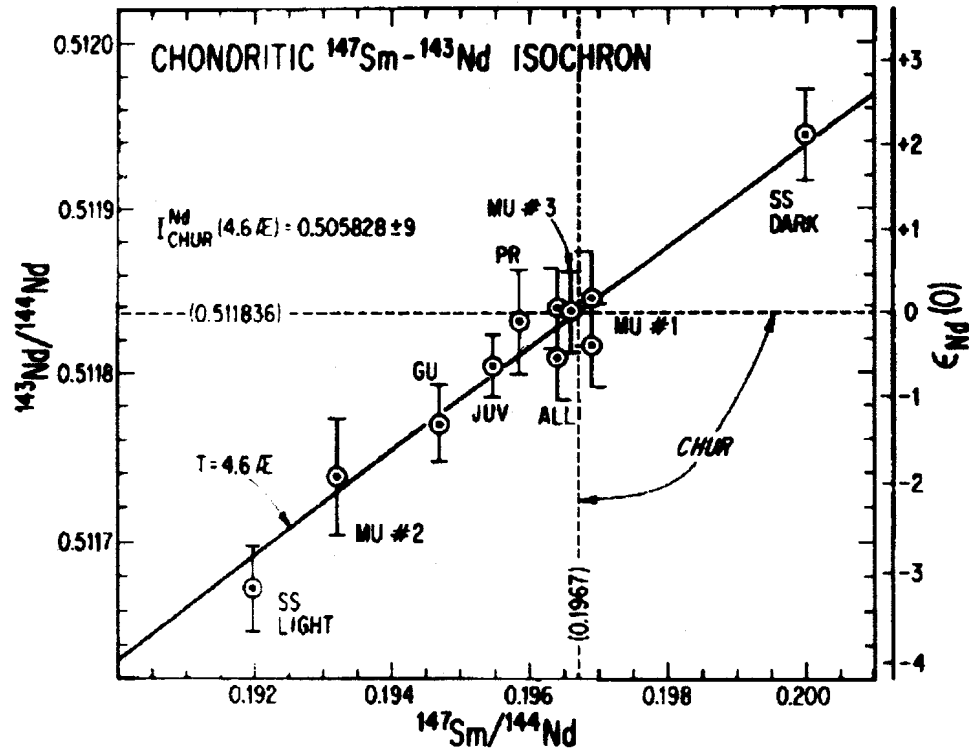
## Примеры применения

described elsewhere<sup>8</sup>. Rb/Sr ratios were determined by a precise X-ray fluorescence technique<sup>9</sup>. The decay constant of  $^{87}\text{Rb}$  was taken as  $1.39 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ .

**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).

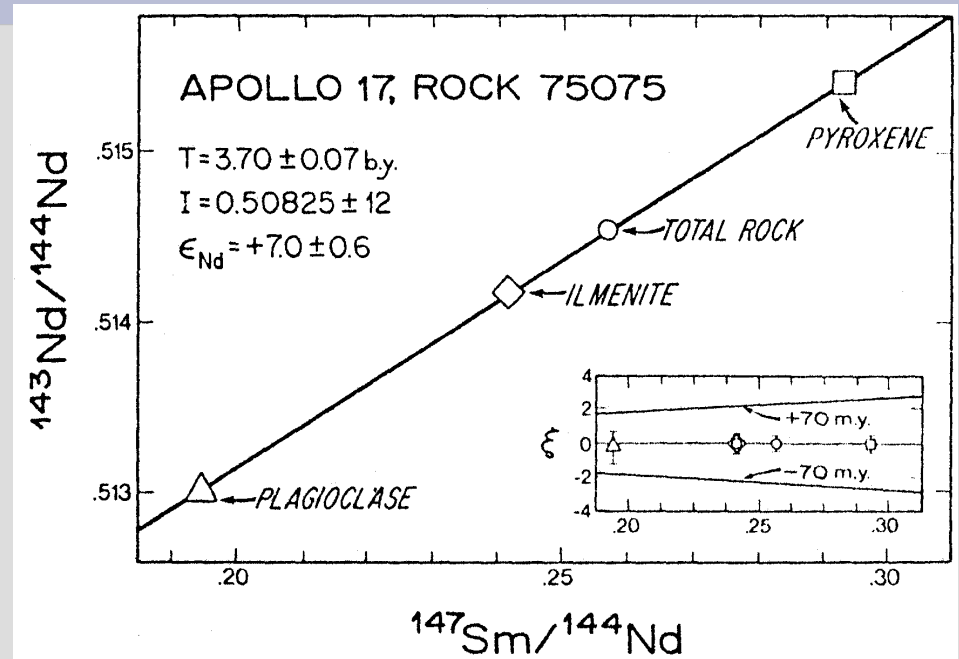


## Ещё примеры (Sm-Nd)



**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).**

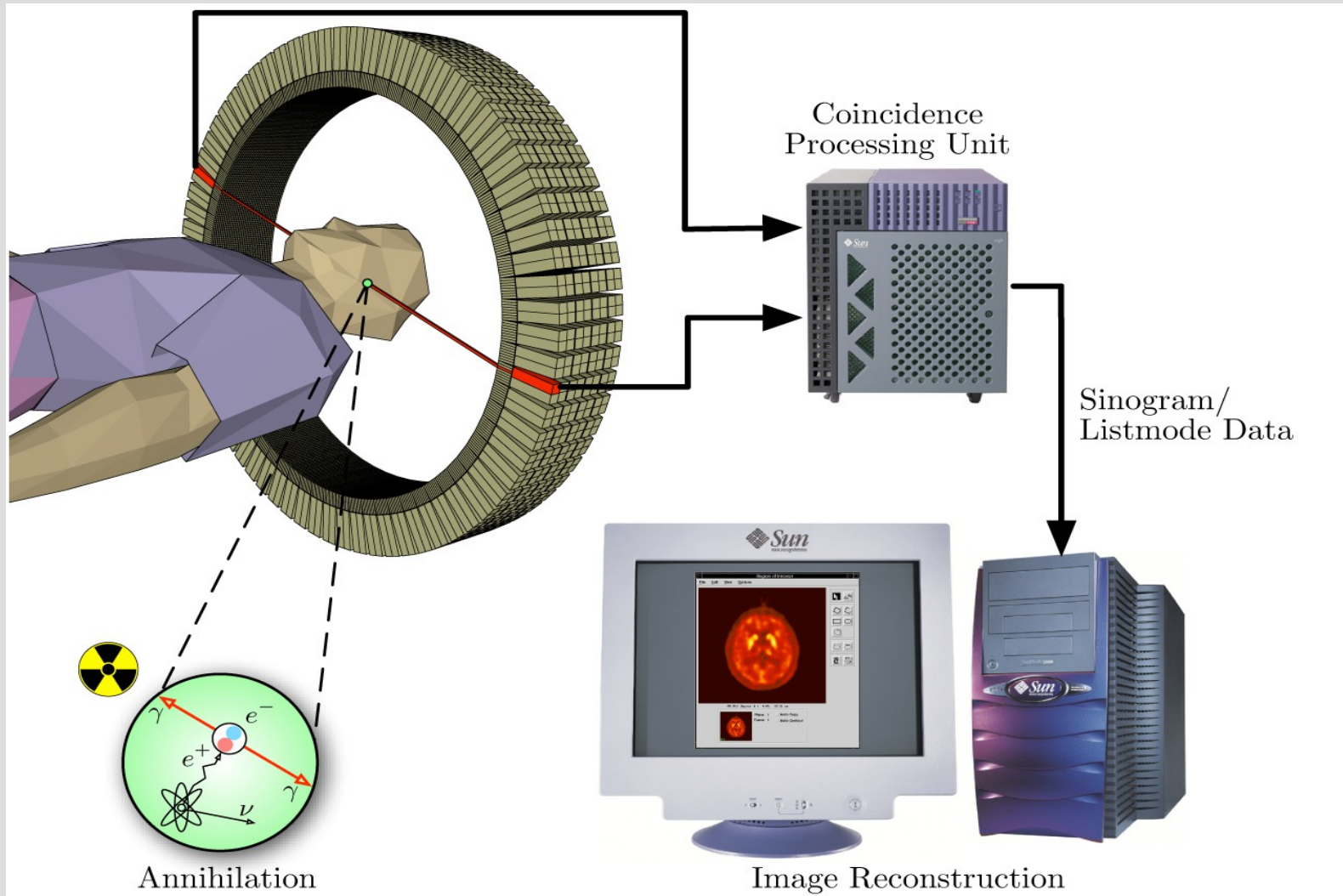
Jacobsen S.B., Wasserburg G.J., Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139 (1980)



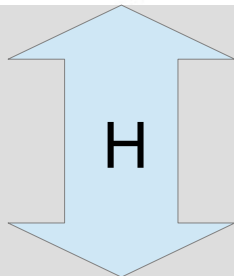
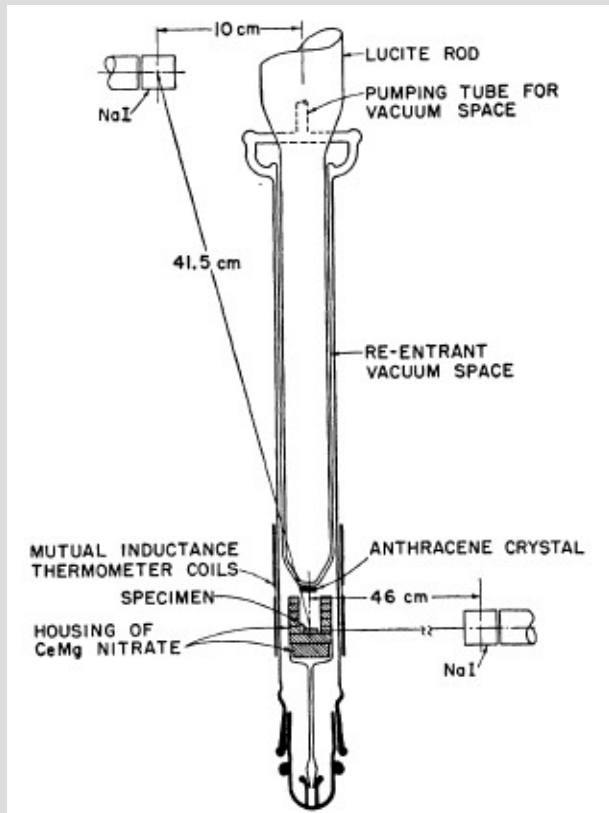
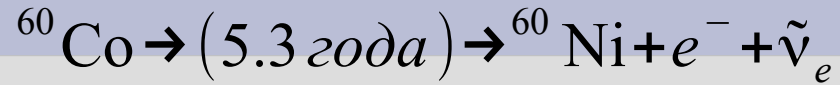
Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология., [http://wiki.web.ru/wiki/Геологический\\_факультет\\_МГУ:Геохимия\\_изотопов\\_и\\_геохронология](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология)

# Позитронная томография

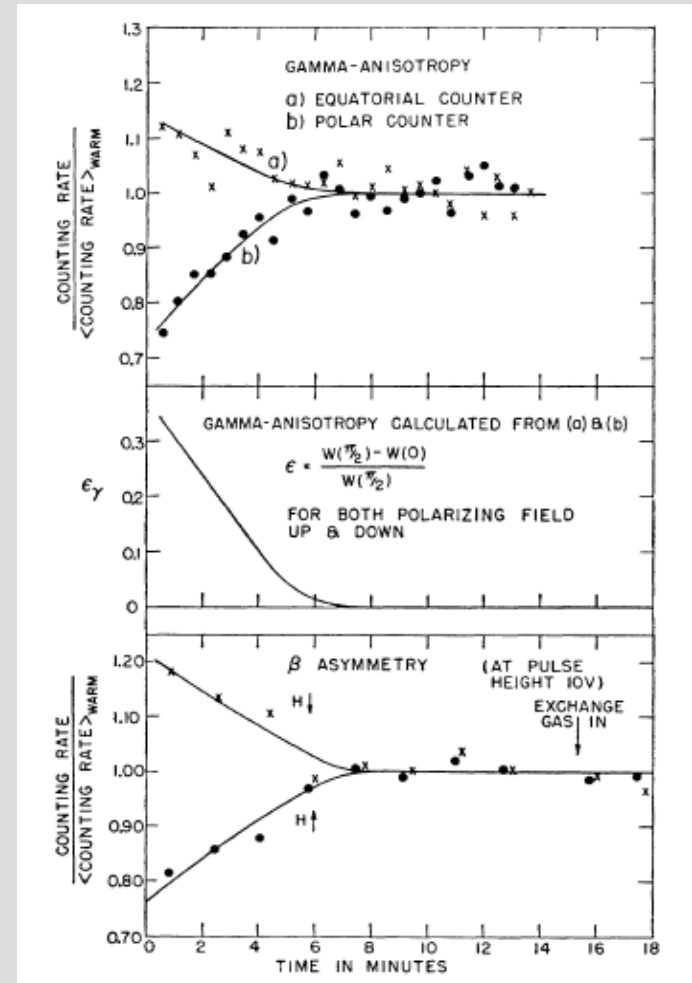


# Эксперимент Ву: несохранение чётности при бета-распаде

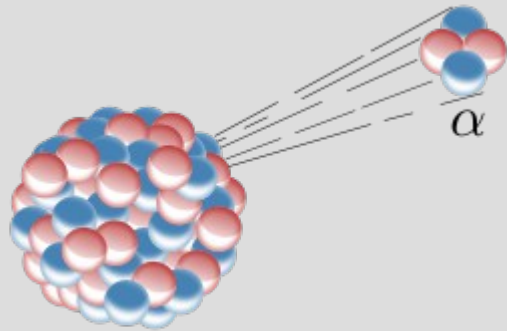


Co:  $5^+$   
 Ni: о.с.  $0^+$   
 возб.  $2^+, 2^+, 4^+$

Различие числа отсчётов счётчика бета-частиц при разном направлении поляризующего магнитного поля. В момент  $t=0$  достигалась минимальная температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных ядер характеризуется различием числа отсчётов в момент  $t=0$ . Из работы Ц.В



## Основное на лекции



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

