



NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY

Майнор “Мир глазами физиков”

Весна 2019

Введение в квантовую физику

Лекция 13:

Ядерная физика I:

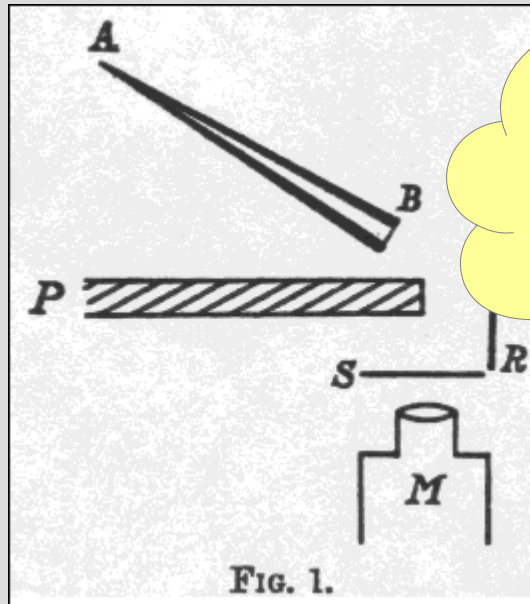
Строение ядра.

Радиоактивность.

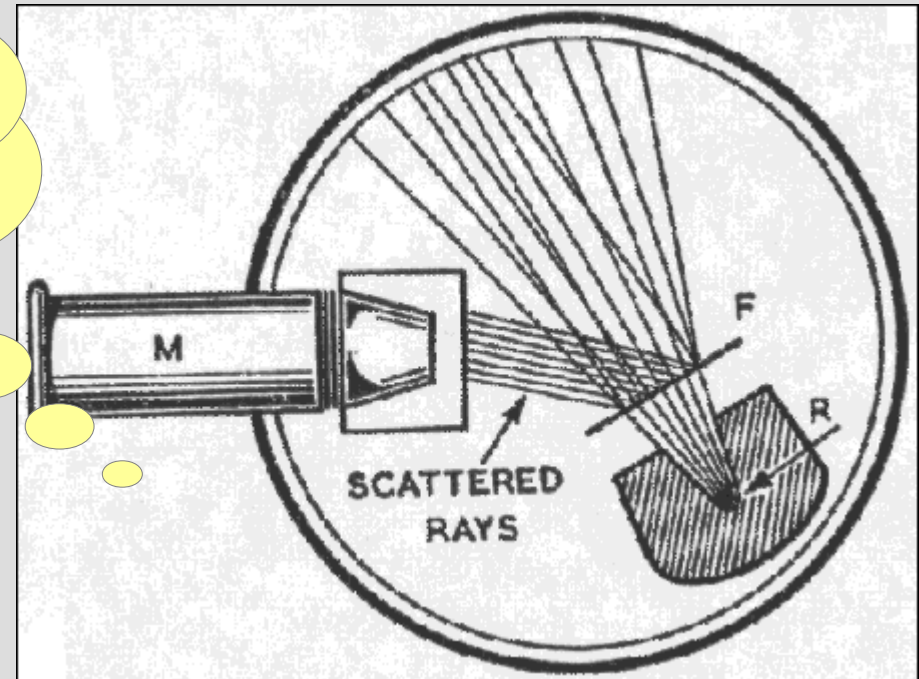
Ядерные реакции

Часть 1. Структура ядра.

Опыты Резерфорда (Гейгера-Марсдена)



отклонение на
большие углы!



Опыт Гейгера-Марсдена (по статье Н. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the α -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>

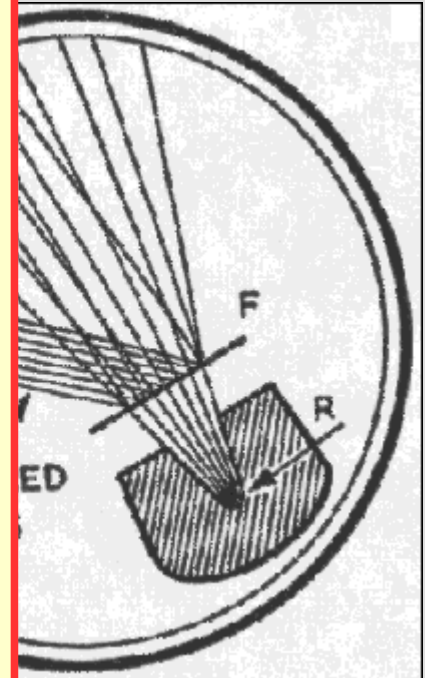
В опытах изучалось рассеяние альфа-частиц на фольге из разных материалов (Al, Fe, Cu, Ag, Sn, Pt, Au, Pb). Золото оказалось наиболее удобным материалом, так как позволяло изготавливать однородную очень тонкую фольгу до 0.086 мкм.

Опыты Резерфорда (Гейгера-Марсдена)

Основные результаты этих опытов:

- почти все альфа-частицы проходили через фольгу, не отклоняясь от своего направления
- часть альфа-частиц отклоняется на небольшие углы $\sim 1^\circ$
- примерно 1 альфа-частица из 10000 (при толщине фольги в доли микрона) отклоняются на большой угол $\sim 90^\circ$

Резерфорд показал (E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, 1911), что эти результаты могут быть объяснены в предположении, что существует компактное положительно заряженное ядро, взаимодействие с которым объясняет редкие процессы рассеяния на большой угол.



источник

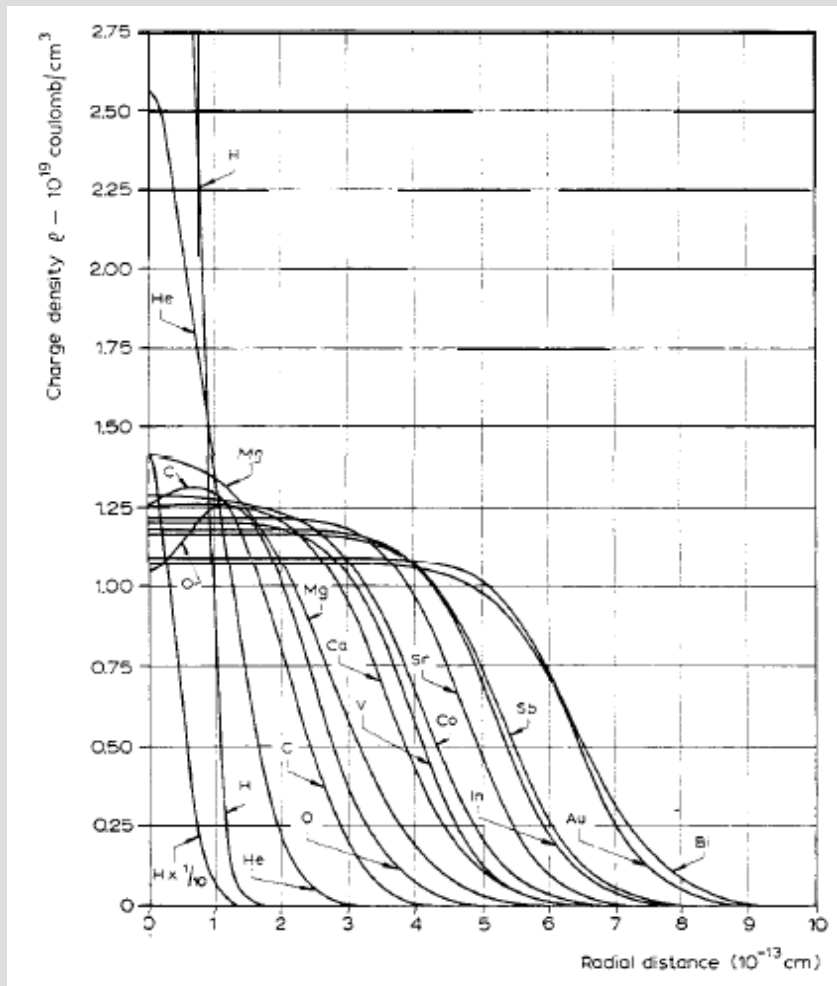
.info, Rutherford's
2016,
e/Rutherford-

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.

Опыт
Geiger
Reflected
трубка
свинца
фольга
-микр

Размеры ядра

Хофштадтер (1961)



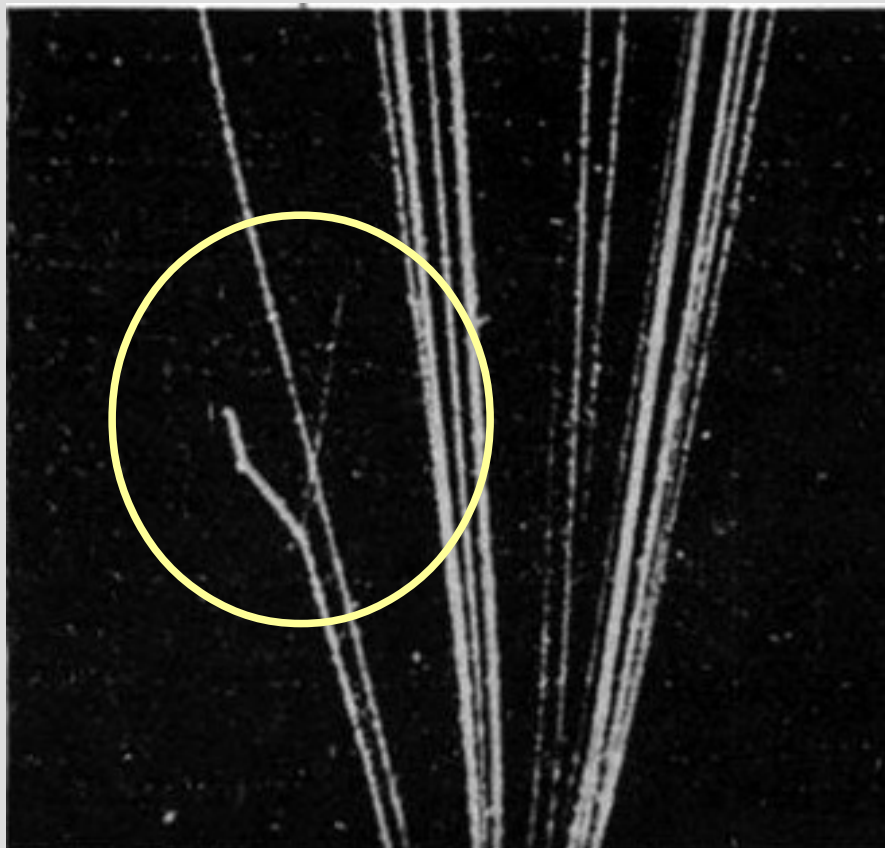
$$\lambda \approx \frac{hc}{E} = \frac{h}{mc} \frac{mc^2}{E} = \Lambda \frac{mc^2}{E}$$

Для “микроскопа” с разрешением 1 фм нужны электроны с энергией около 100 МэВ

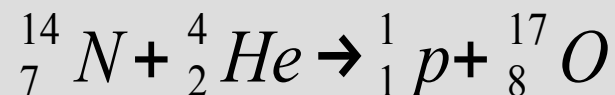
Размер ядра соответствует модели “несжимаемого вещества”

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

Существование протонов в ядре (Резерфорд и Содди, Блэккет)



Из атома азота выбит протон (тонкий след)



*один год,
23000 фотографий,
400000 треков частиц*

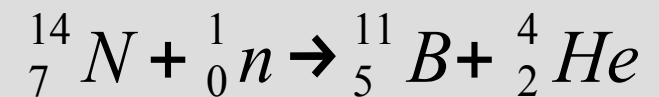
**ВОСЕМЬ “удачных”
событий**

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)

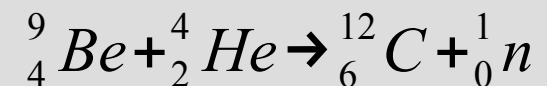
Резерфорд и Содди – нобелевские лауреаты по химии (1908, 1921), Блэккет – по физике (1948)

Существование нейтронов в ядре

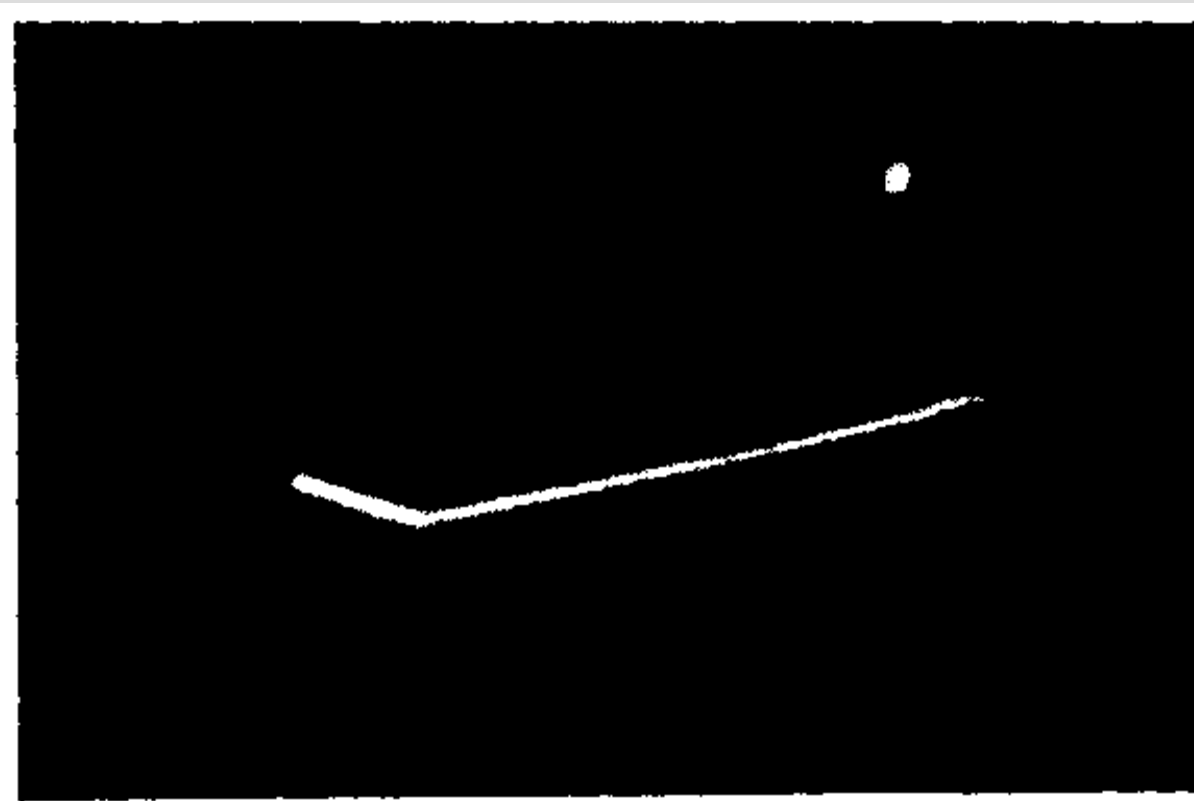
Чедвик (1935)



источник нейтронов:
бомбардируемая альфа-
частицами берилиевая
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

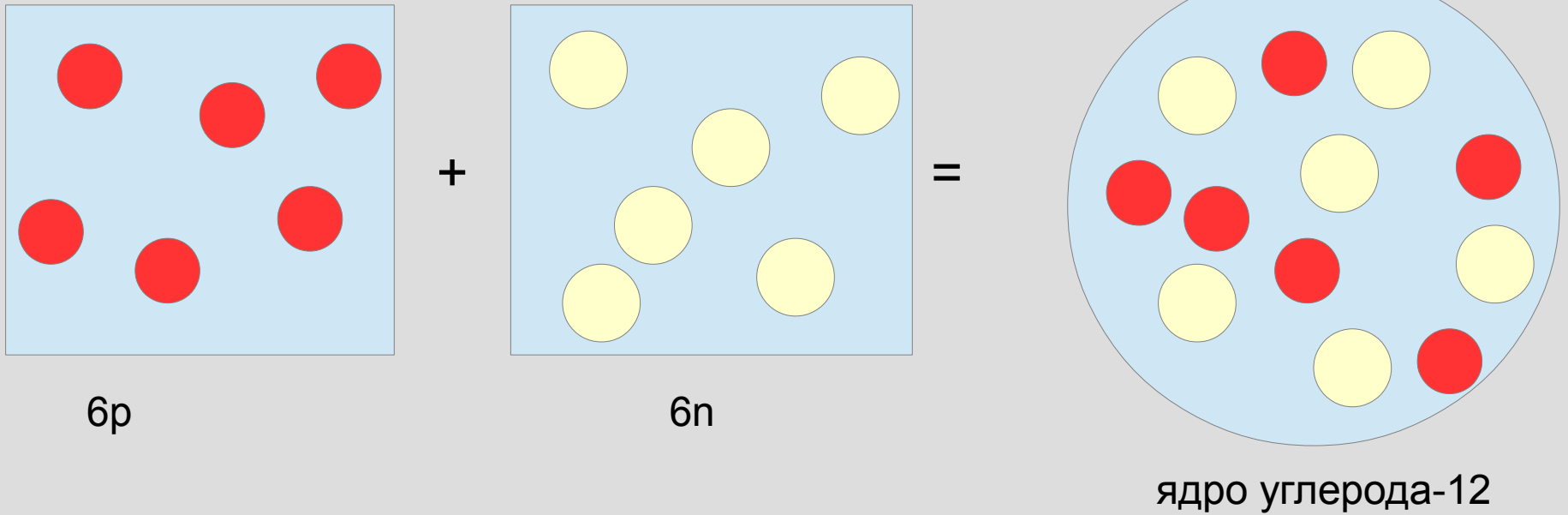
Резюме

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

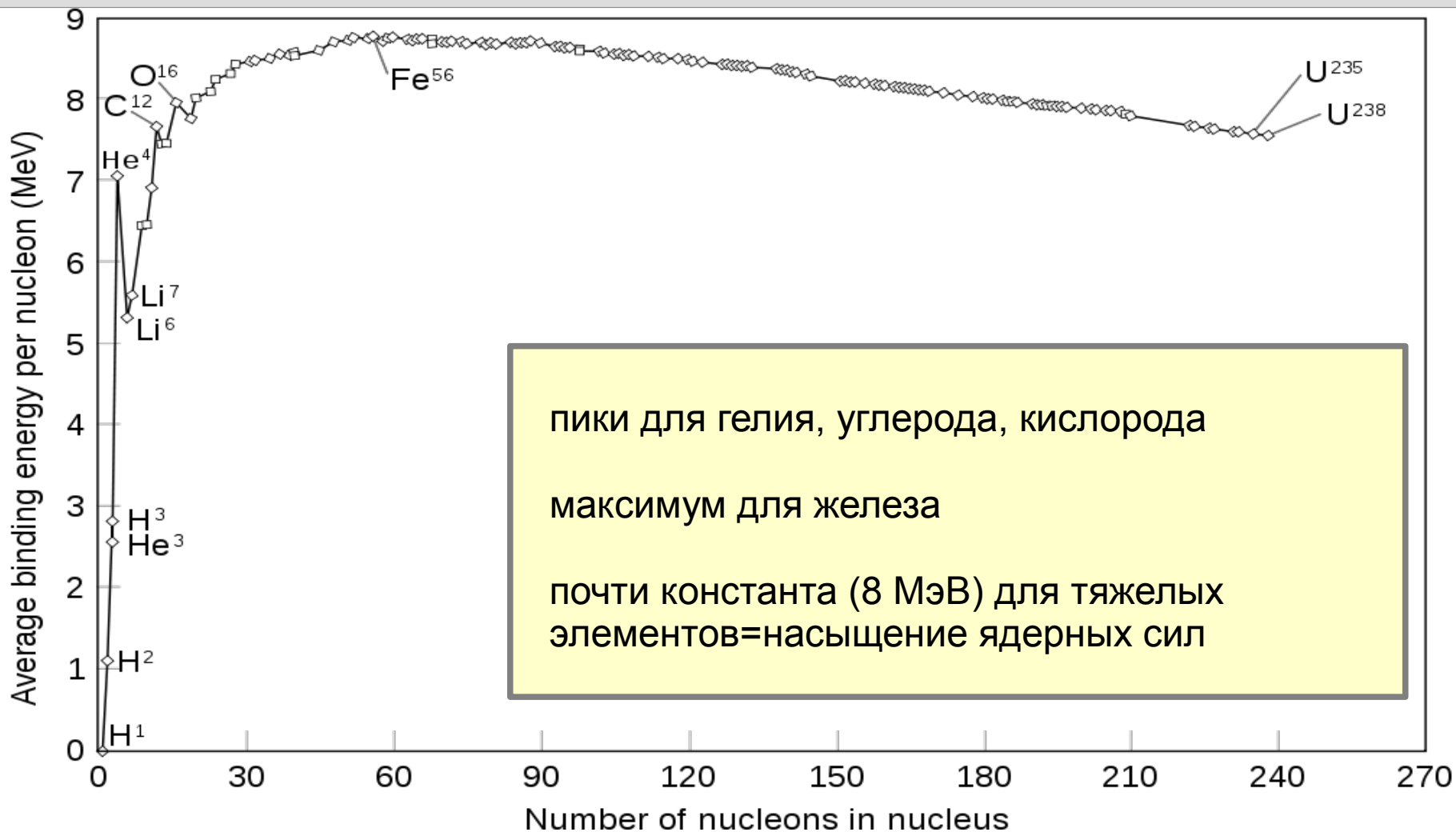
Энергия связи ядра



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

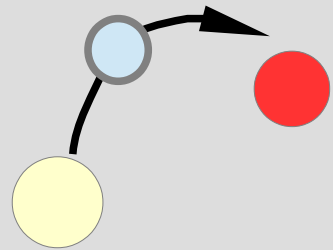
$$E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n - M_{\text{ядра}}) c^2$$

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

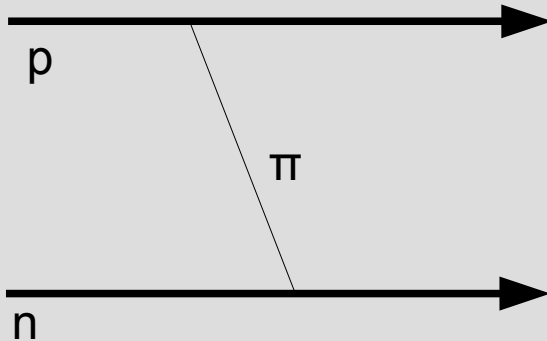
для массивных частиц – конечный

для ядерного размера

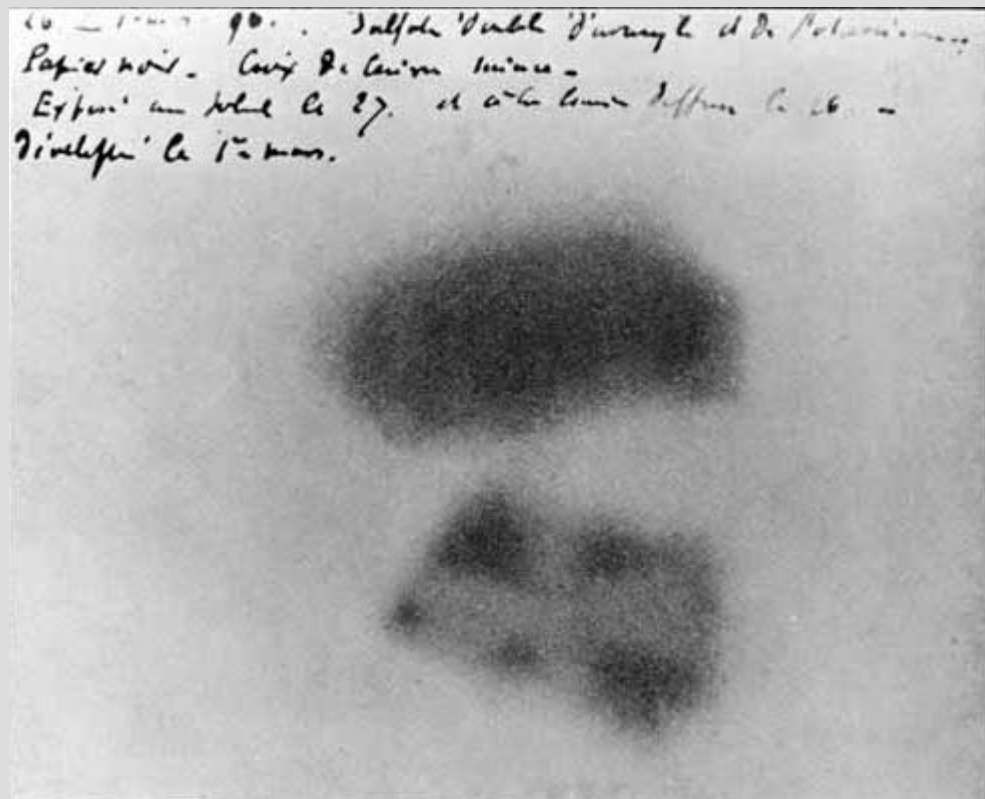
$$m c^2 \sim \frac{\hbar c}{L} \sim \frac{10^{-34} \times 10^8}{10^{-15}} \text{ Дж} = 10^{-11} \text{ Дж} \sim 10^8 \text{ эВ} = 100 \text{ МэВ}$$

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

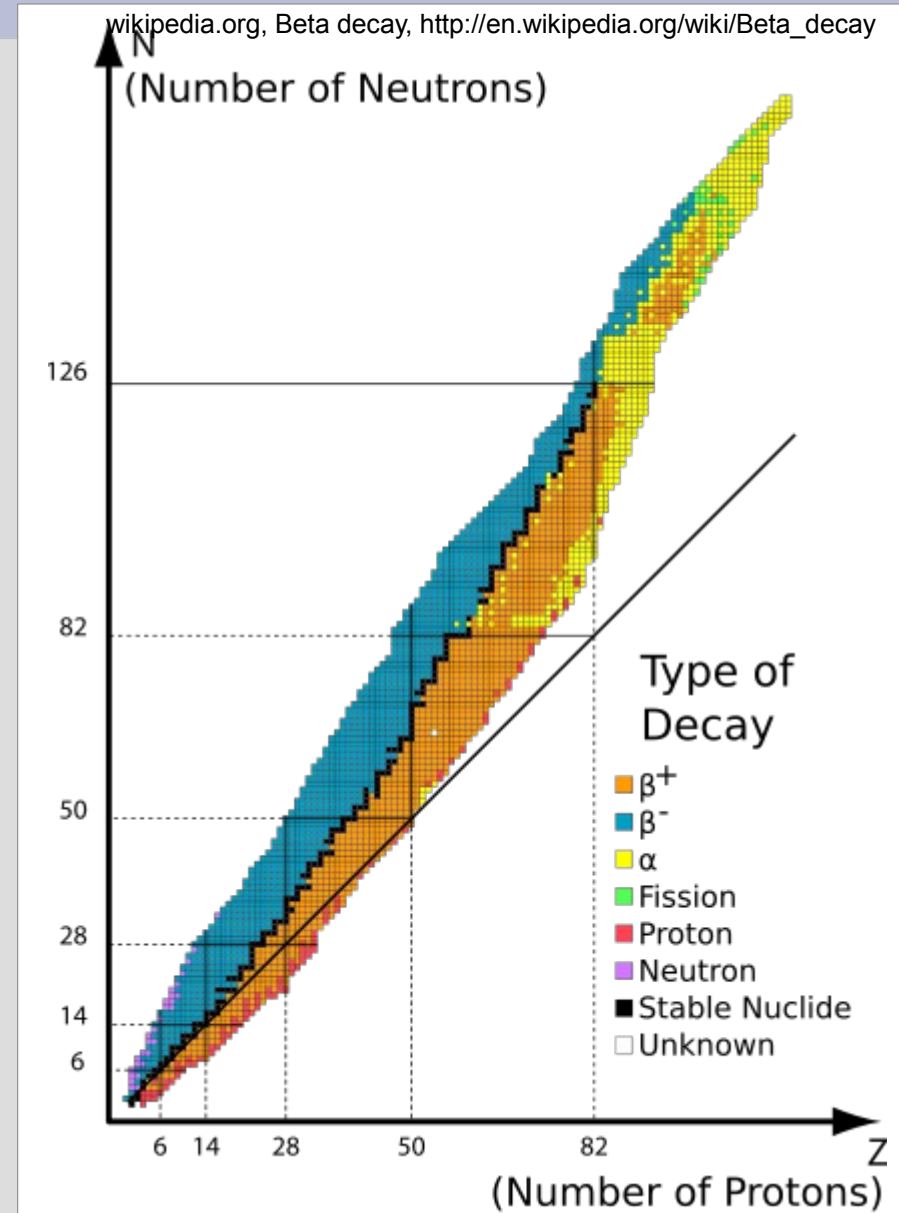
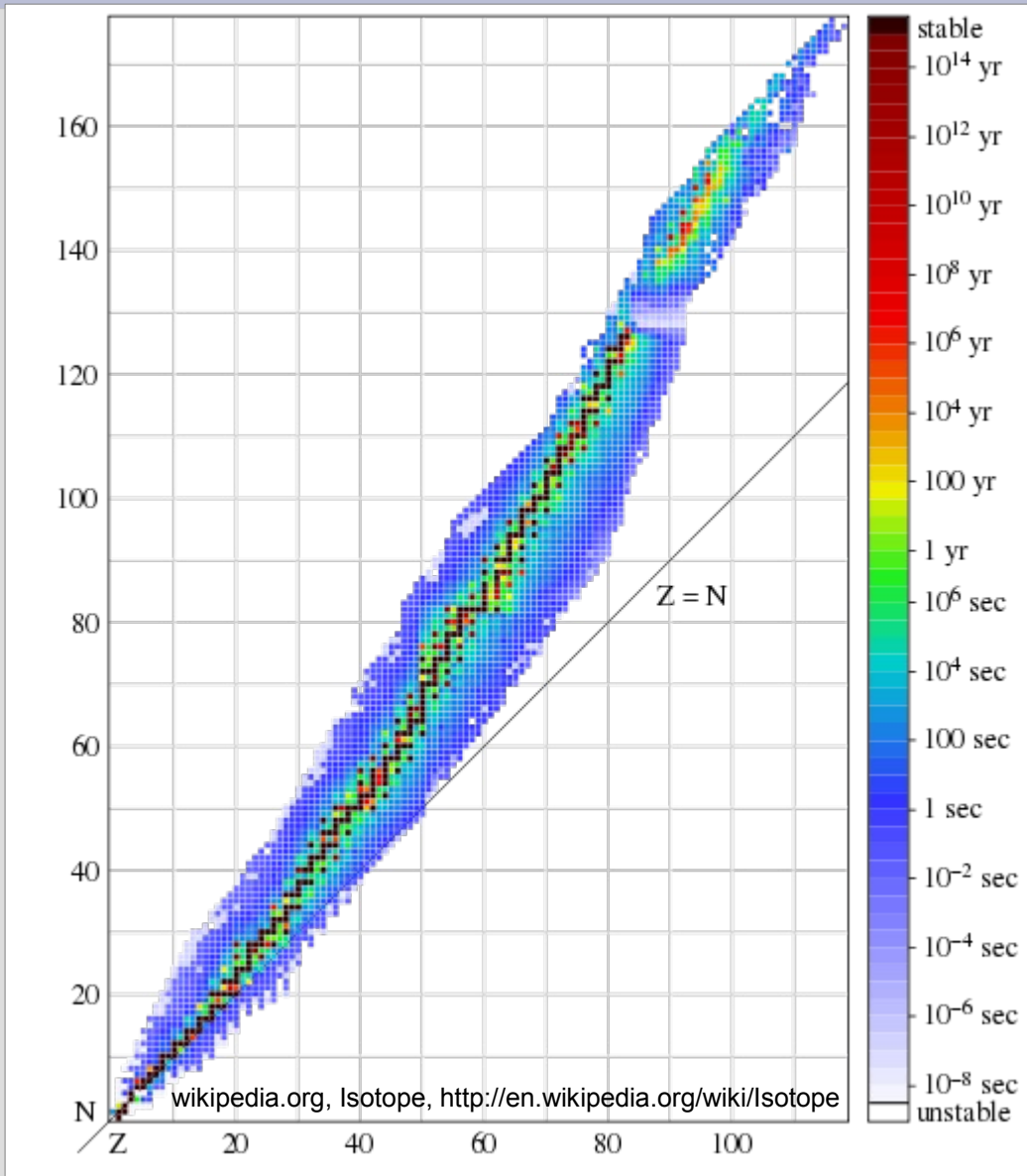
Юкава
(теория, 1949)
Поул
(обнаружение
мезонов, 1947)



Часть 2. Радиоактивность. Спонтанные и вынужденные реакции



Распад ядер

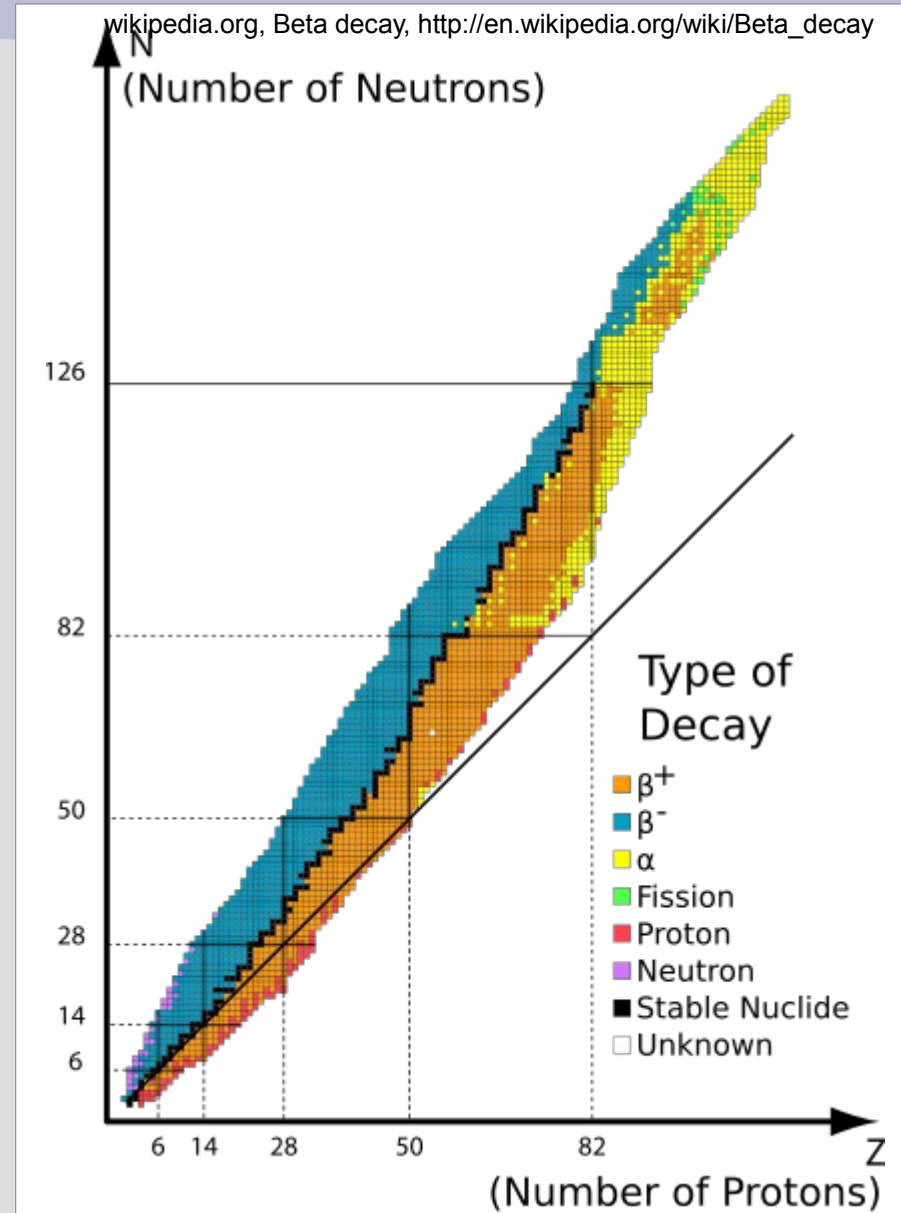
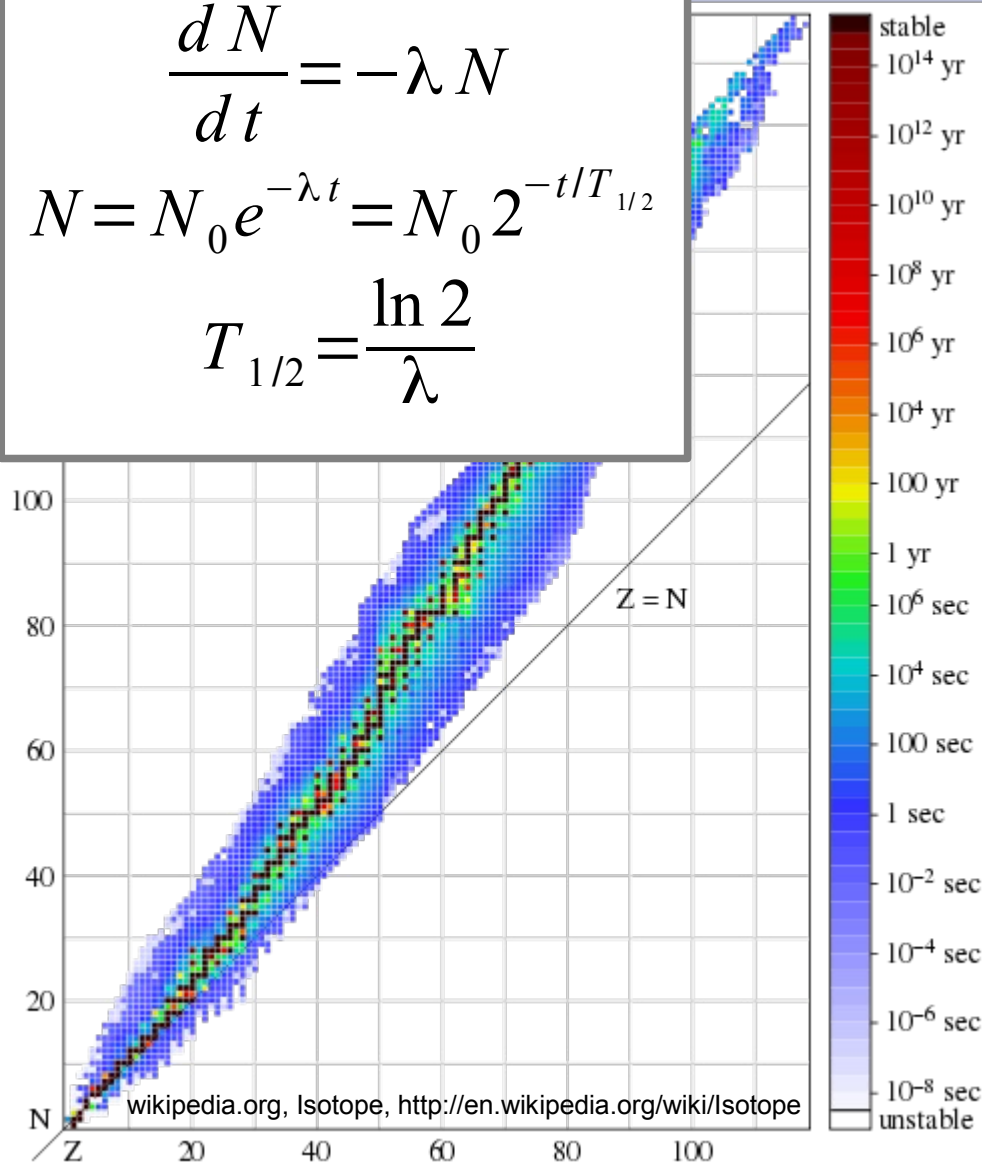


Распад ядер

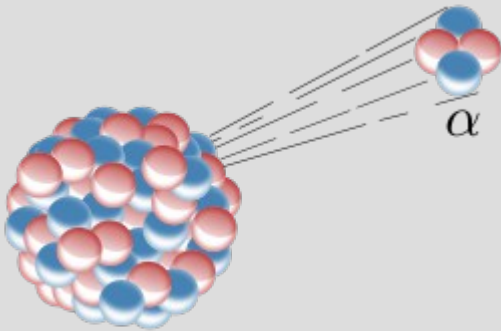
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

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

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

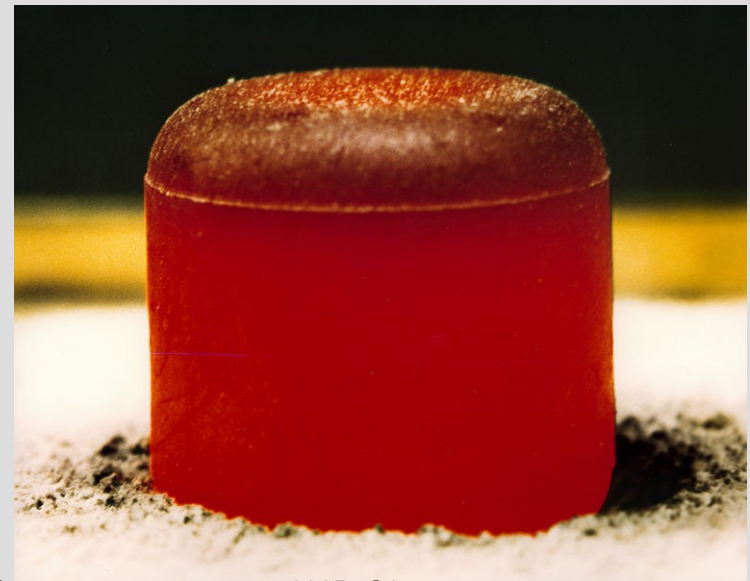


Альфа-распад



wikipedia.org, Alpha decay, ,
http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay

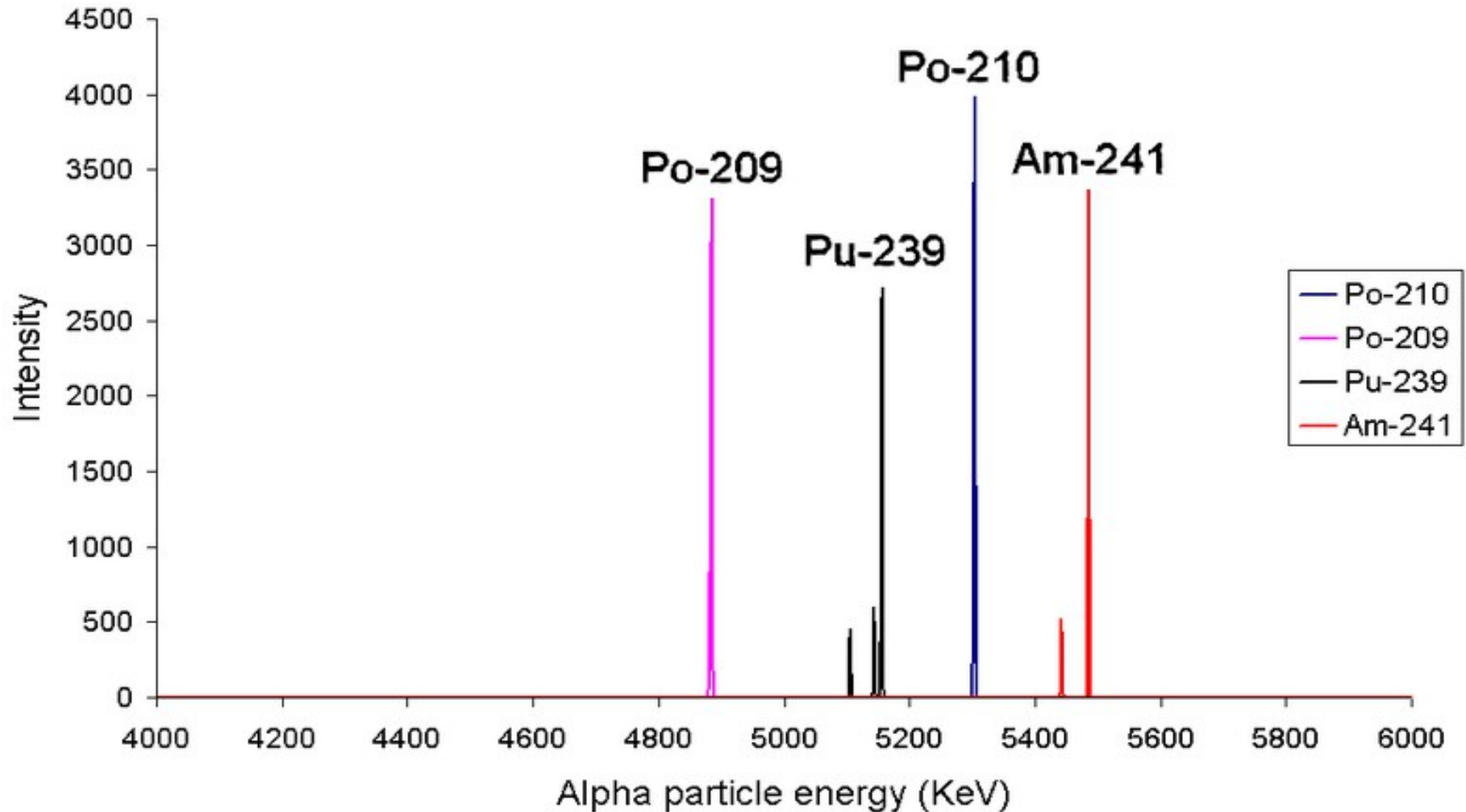
- Изменение заряда на 2, испускания ядра гелия-4
- Энергии альфа-частицы, типично, 4-9 МэВ
- Периоды полураспада от мксек до 10^{17} лет
- Туннельный процесс



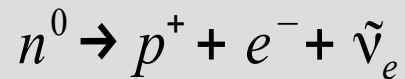
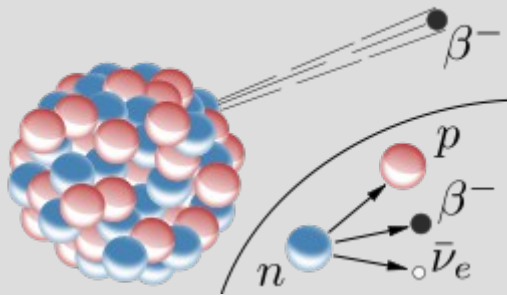
Таблетка оксида плутония $^{238}\text{PuO}_2$ для радиоизотопного термоэлектрического генератора космического зонда («Кассини» или «Галилео»). Цвет связан с тепловым излучением от разогретой альфа-частицами таблетки.

wikipedia.org, Radioisotope thermoelectric generator, 2016,
http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator

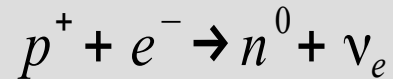
Спектр альфа-распада



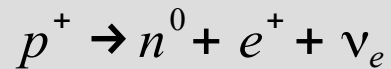
Бета-распад и его виды



электронный



K-захват

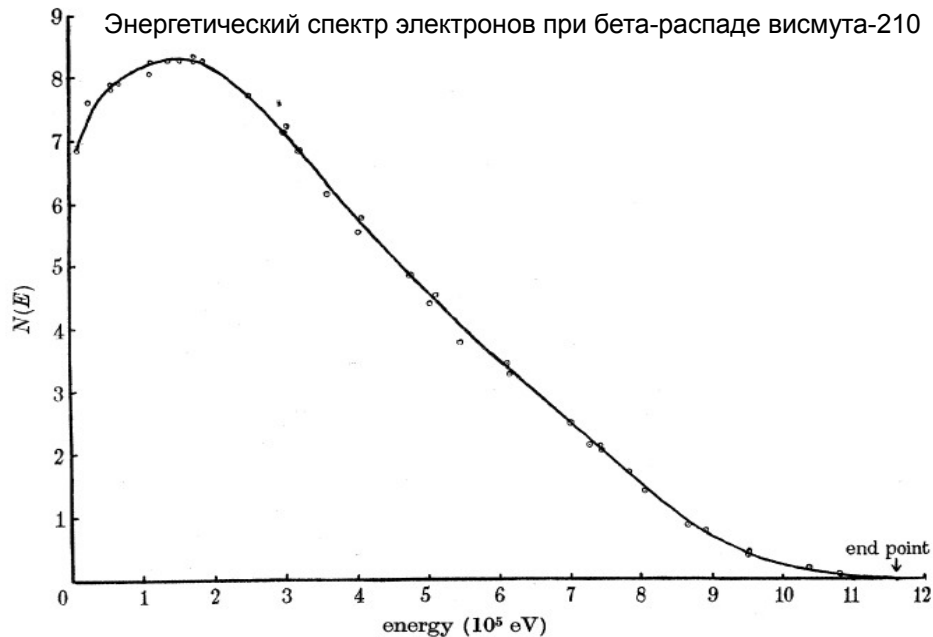


позитронный

Не взаимноисключающие возможности! В ядре изотопа меди-64 могут происходить

- электронный бета-распад (39%, образуется цинк-64),
- позитронный бета-распад (17%, образуется никель-64)
- K-захват (43%, образуется никель-64).

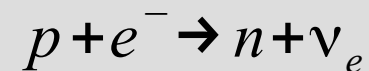
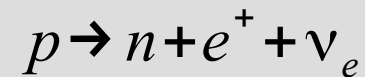
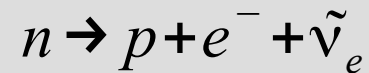
Спектры бета-распада



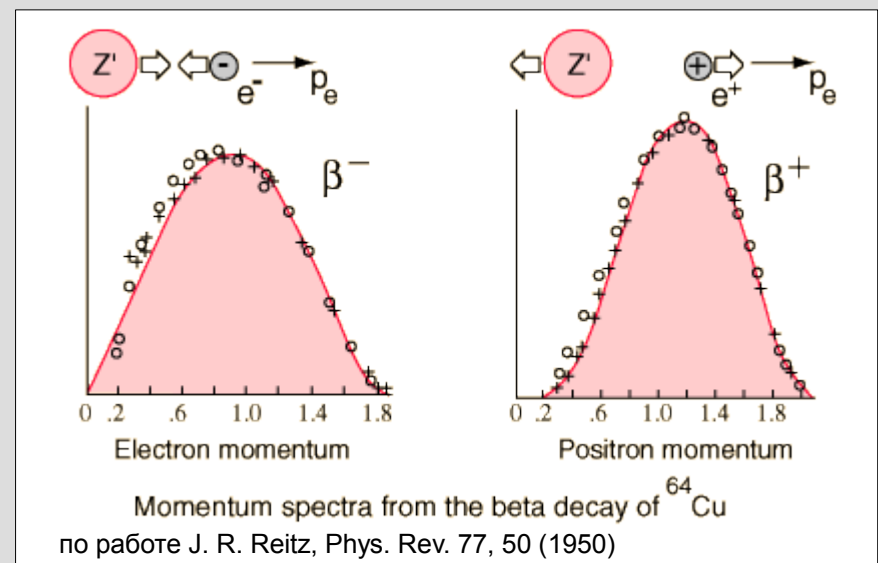
G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210],
Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 (1940)

Cu-64:

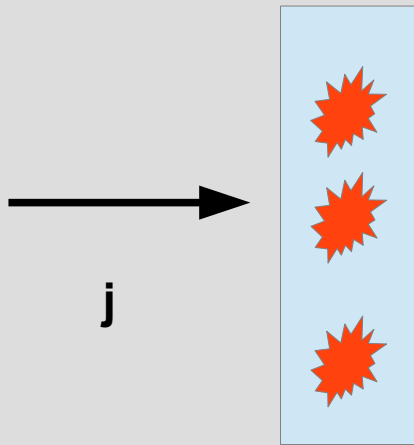
- (39%) Zn-64 (электронный)
- (17%) Ni-64 (позитронный)
- (43%) Ni-64 (K-захват)



↑
нейтрино, “отпечаток”
слабого взаимодействия



“Вынужденные” реакции. Сечение реакции



число реакций (нужного типа) в единицу времени

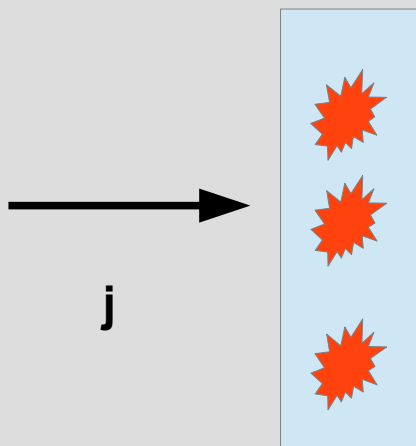
$$\propto j (n S dx) \sigma$$

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

$$\frac{d j}{d x} = - \frac{d N l(S dt)}{d x} = - j n \sigma$$

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

“Вынужденные” реакции. Сечение реакции



число реакций (нужного типа) в единицу времени

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

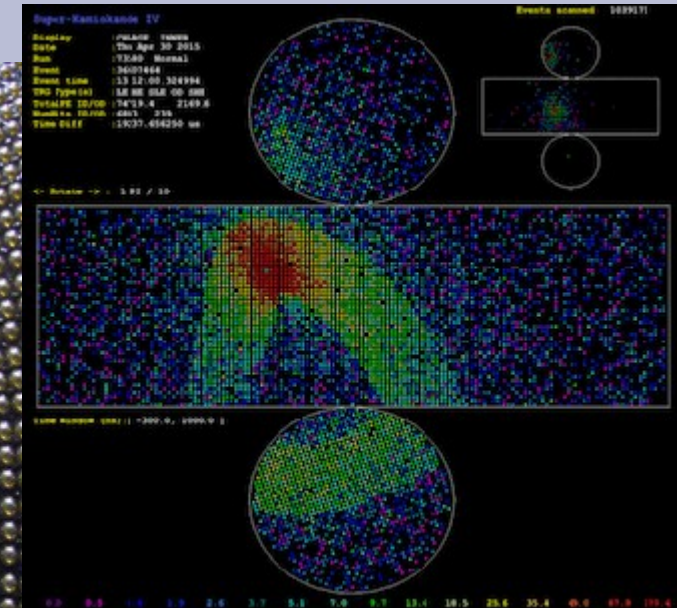
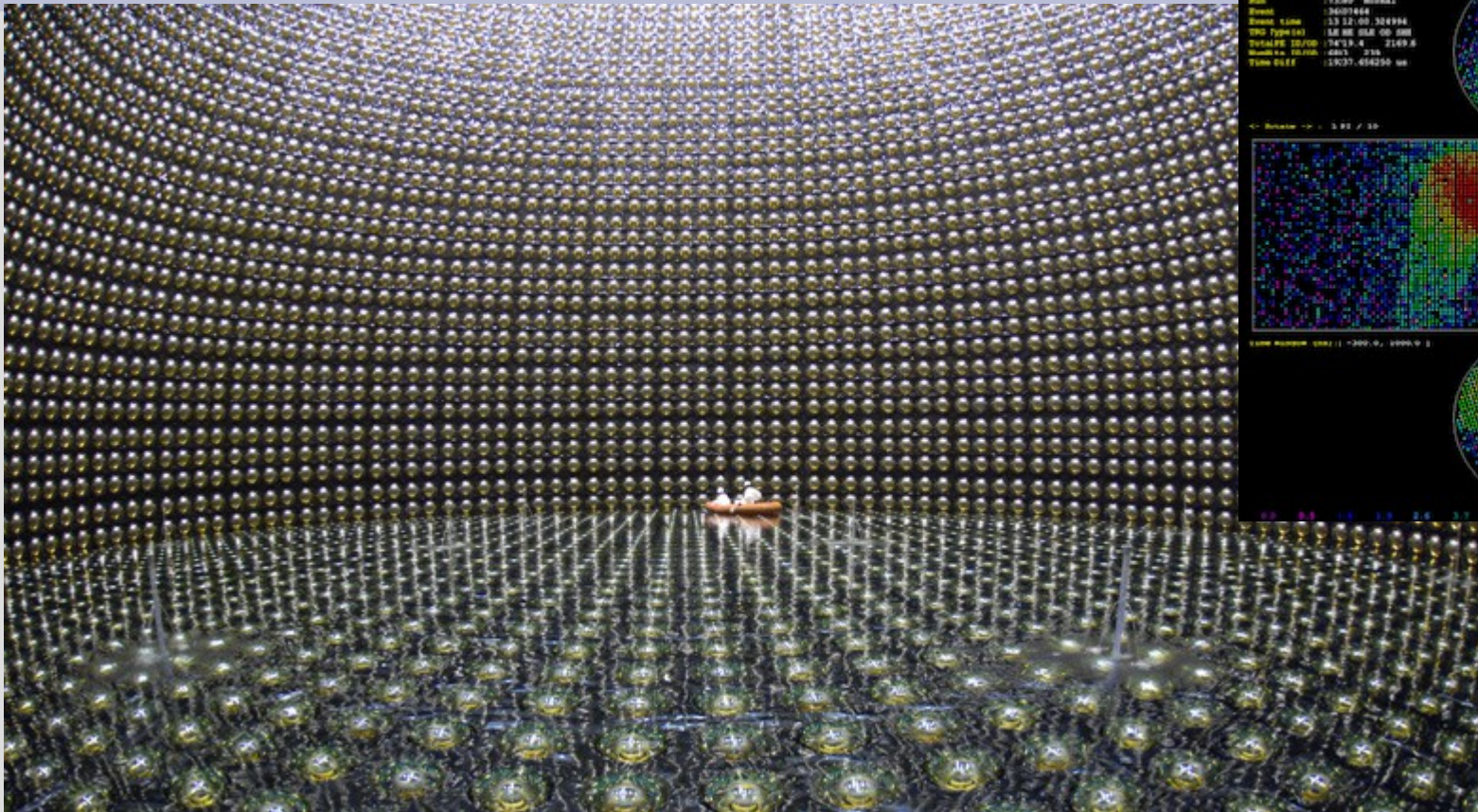
“эффективная площадь”,
в ядерной физике удобная
единица барн $1 \text{ бн} = 10^{-28} \text{ м}^2$

$$\frac{d j}{d x} = - \frac{d N / (S dx)}{d x}$$

$$j(x) = j_0$$

- Сечение захвата медленного нейтрона водородом 0.3 бн
- Сечение захвата медленного нейтрона бором-10 3800 бн, бором-11 0.005 бн
- Сечение взаимодействия нейтрино с веществом $\sim 10^{-16}$ бн

Детектирование нейтрино



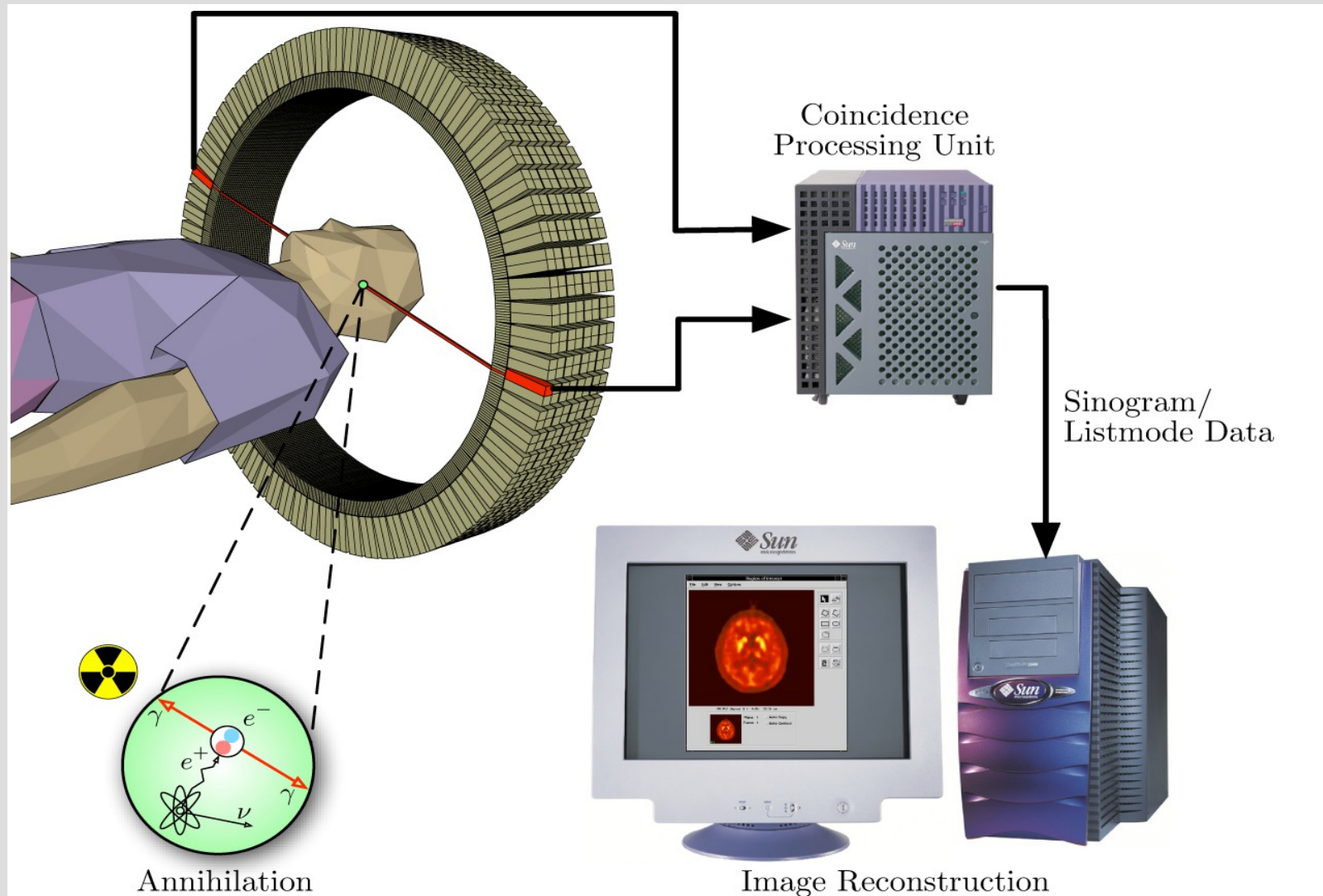
<https://en.wikipedia.org/wiki/Super-Kamiokande>

Обслуживание детектора СуперКамиоканде. С сайта Super Kamiokande, The World's Largest Underground Neutrino Detector, 2017, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

1000 метров под землёй
диаметр и высота около 40 метров, объём воды 50,000 м³
11,000 ФЭУ для детектирования черенковского излучения

Часть 3. Применения радиоактивности

ПЭТ: позитронная эмиссионная томография



Изотопная датировка

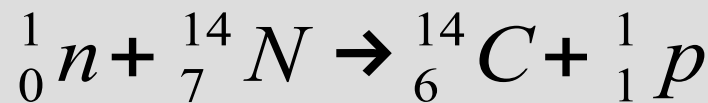
Радиоуглеродный анализ (до ~10,000 лет)

Либби
(химия,
1960)



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

“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

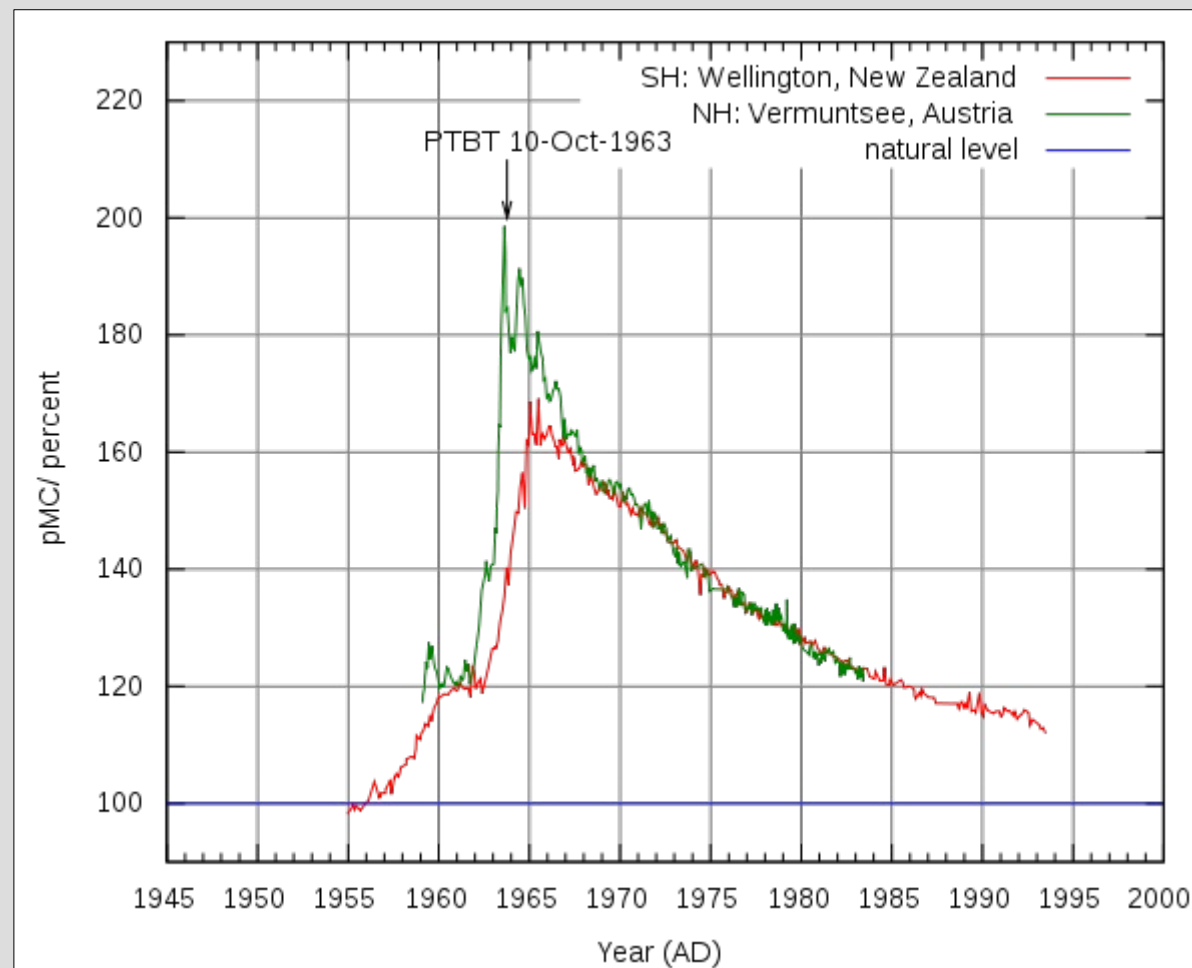
Антропогенный фактор:

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

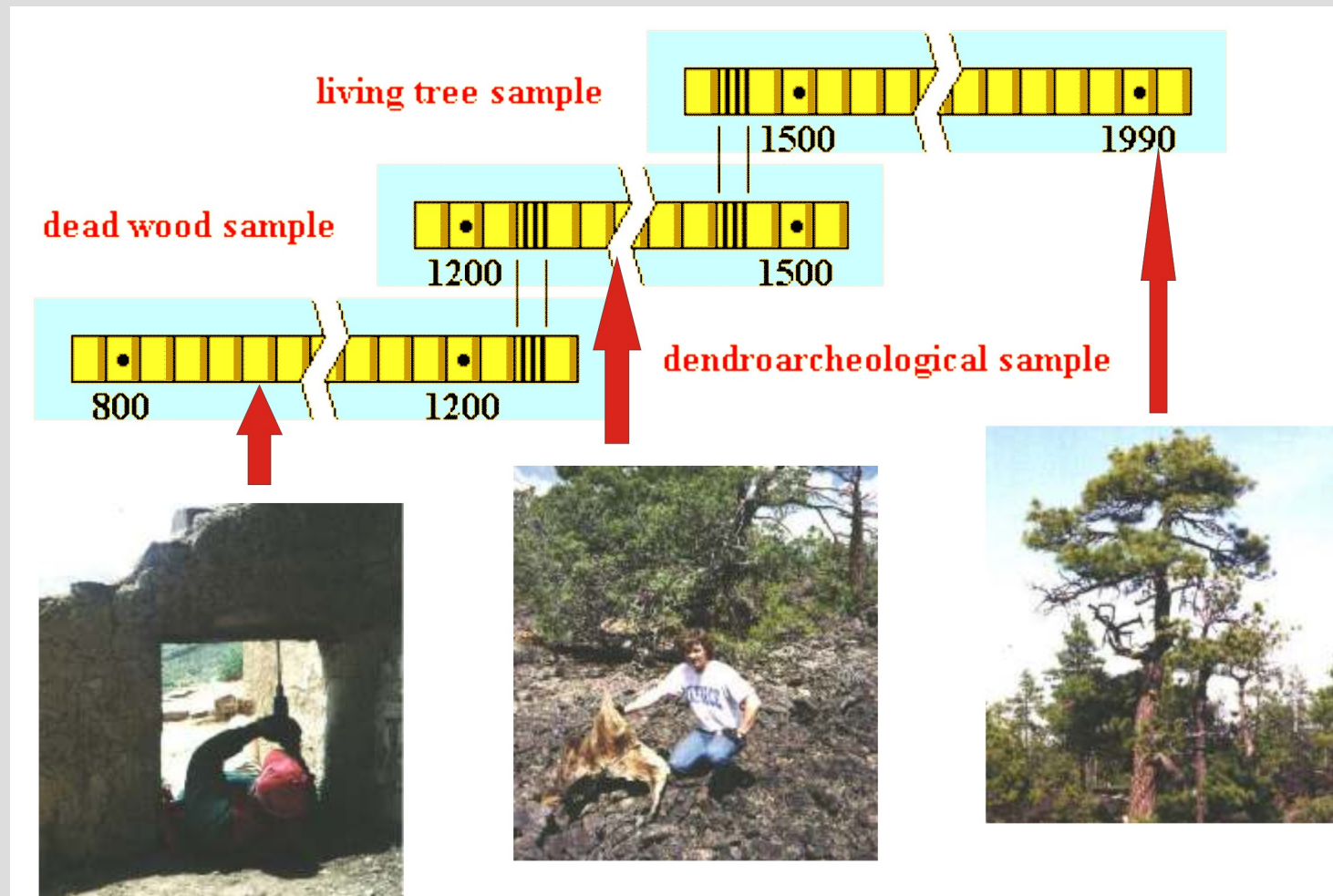
Природные факторы:

- 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



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

Рубидий

Рубидий-87 и стронций-86 стабильны

Рубидий и стронций встречаются в природе

На временах кристаллизации и кристаллизации не существует

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

↑
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!!!

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

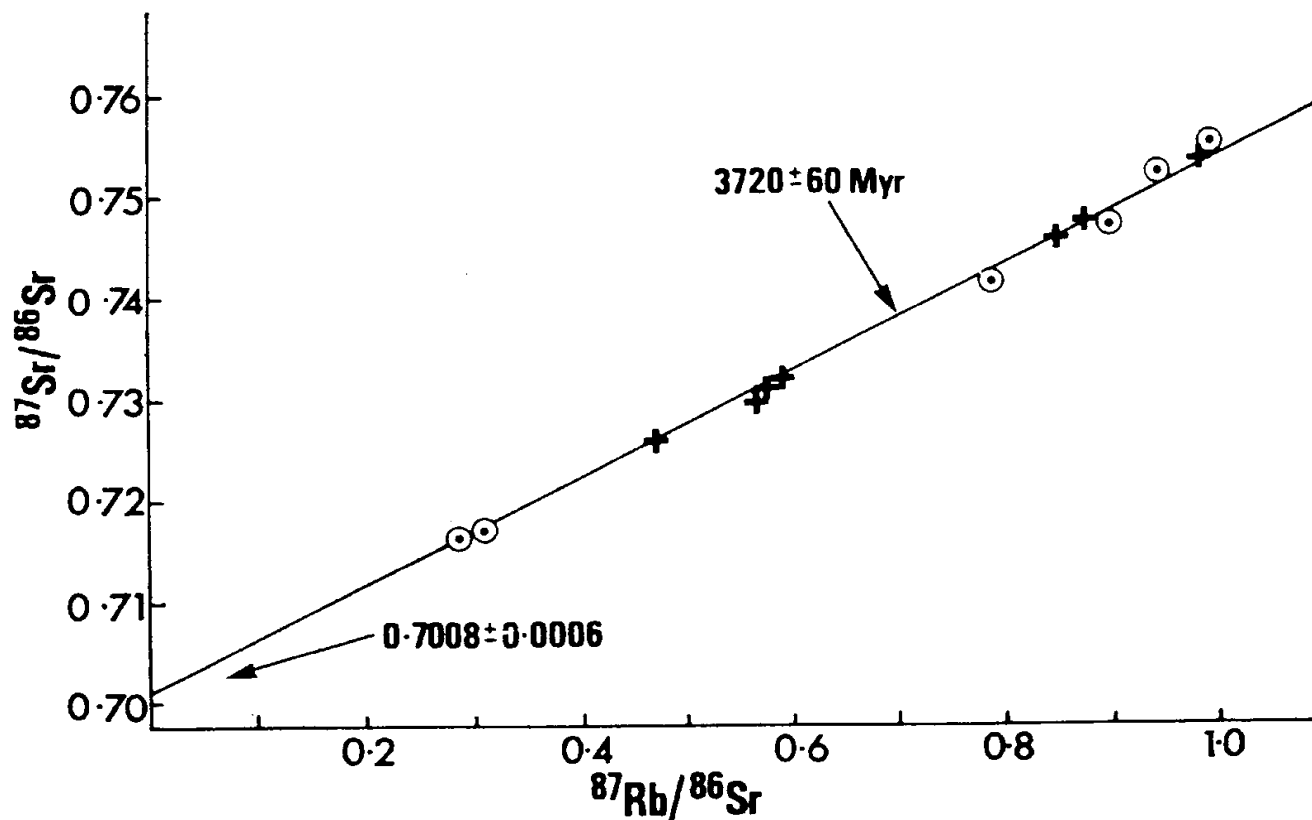
$${}^{87}\text{Rb} = {}^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

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

Примеры применения

described elsewhere⁸. Rb/Sr ratios were determined by a precise X-ray fluorescence technique⁹. The decay constant of ^{87}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)

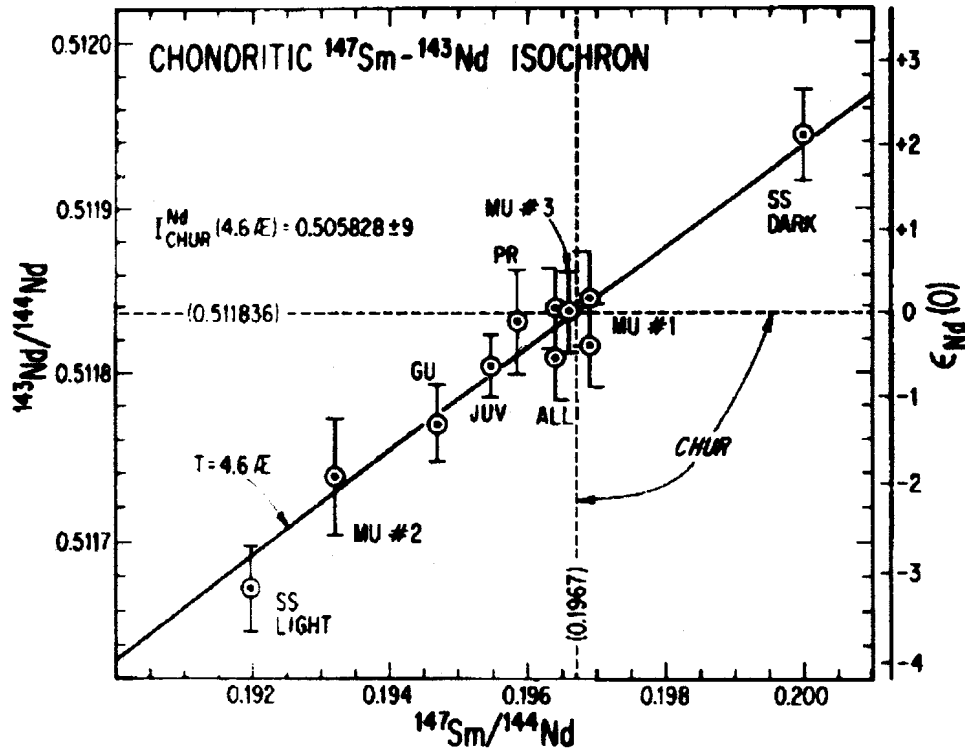
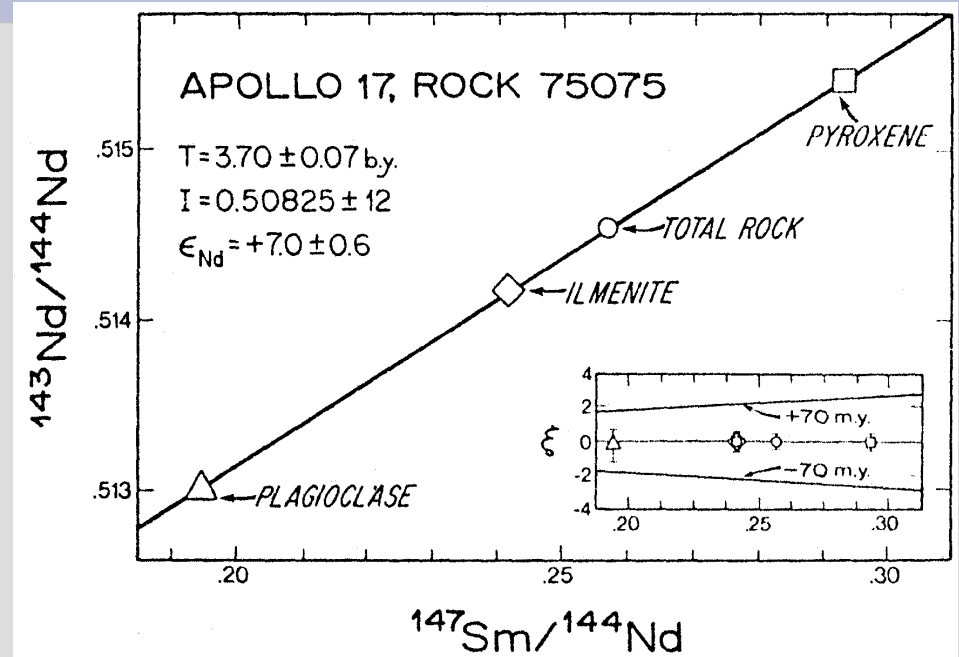


Fig. 2. Sm-Nd evolution diagram for chondrite samples and Juvinas. A reference line with a slope of 4.6 AE is shown. The dashed lines represent the new values selected for average chondrites (CHUR).

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

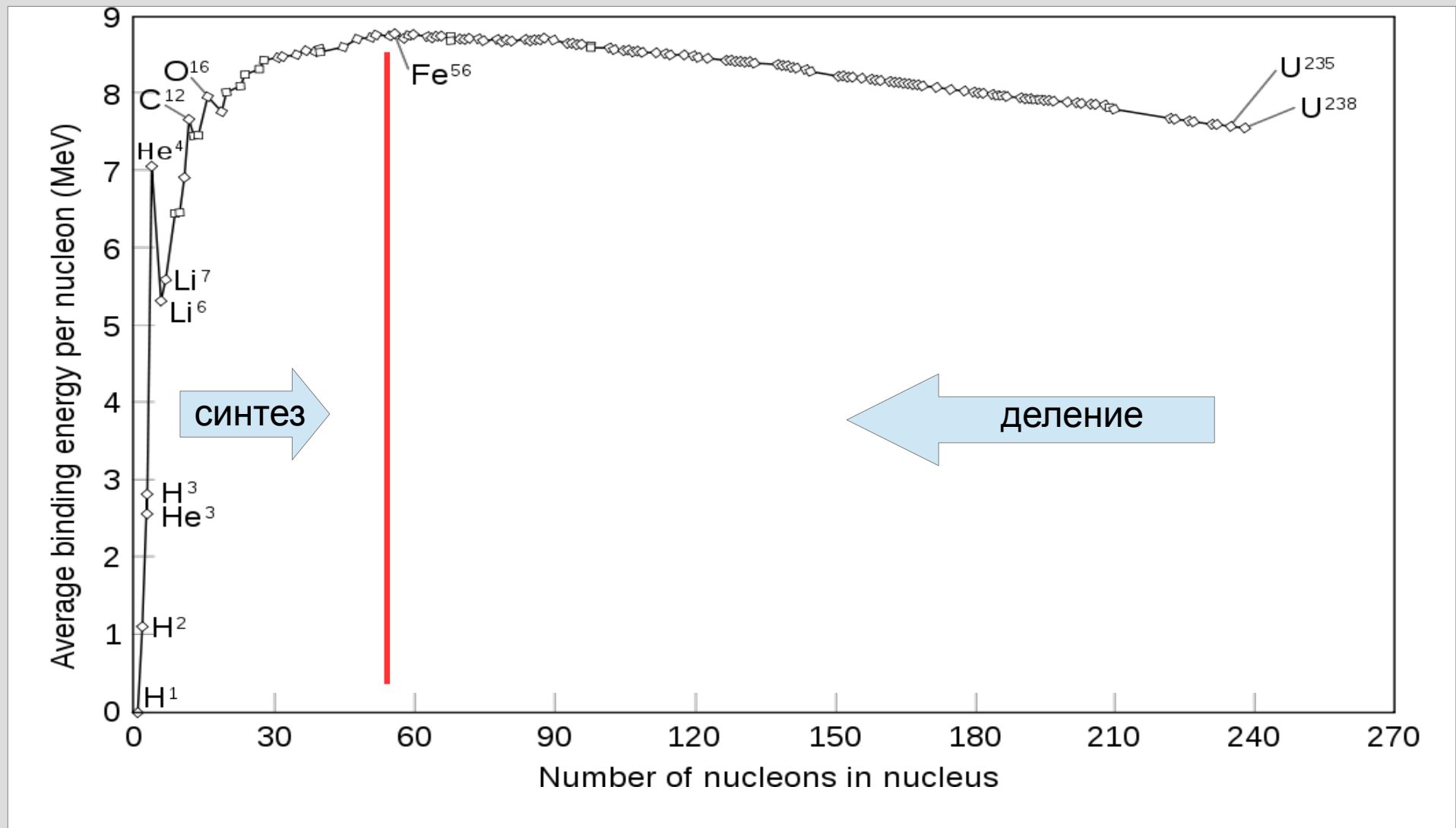


Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

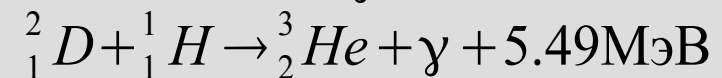
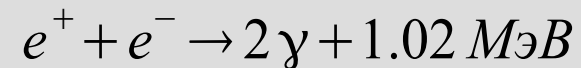
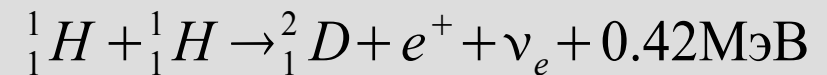
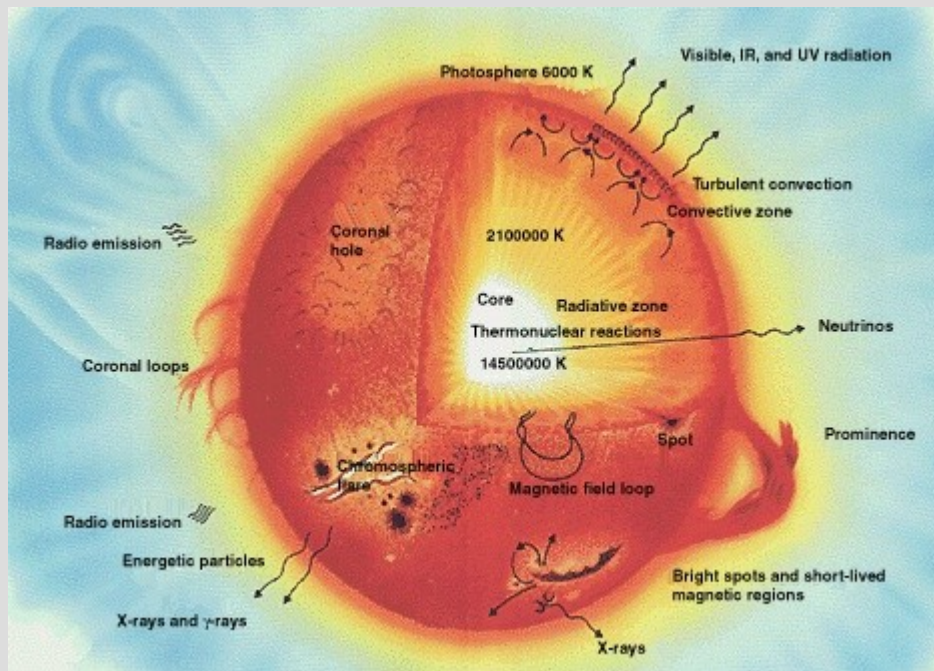
Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология., http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология

Часть 4. Ядерные реакции.

Ядерные реакции



Реакции синтеза в звёздах

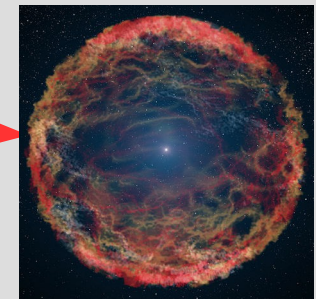
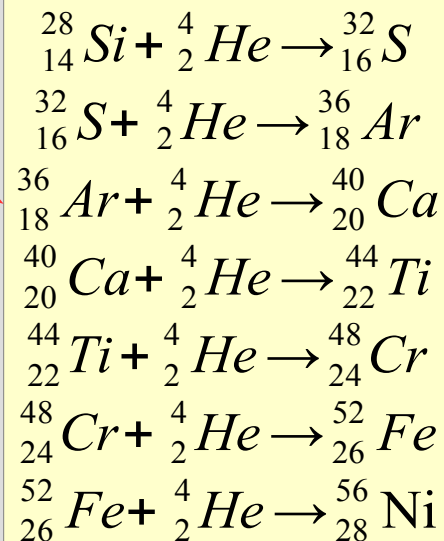
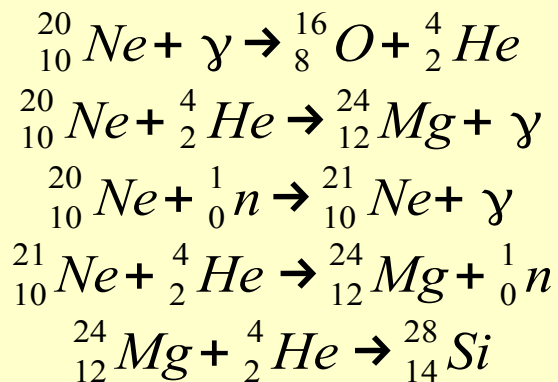
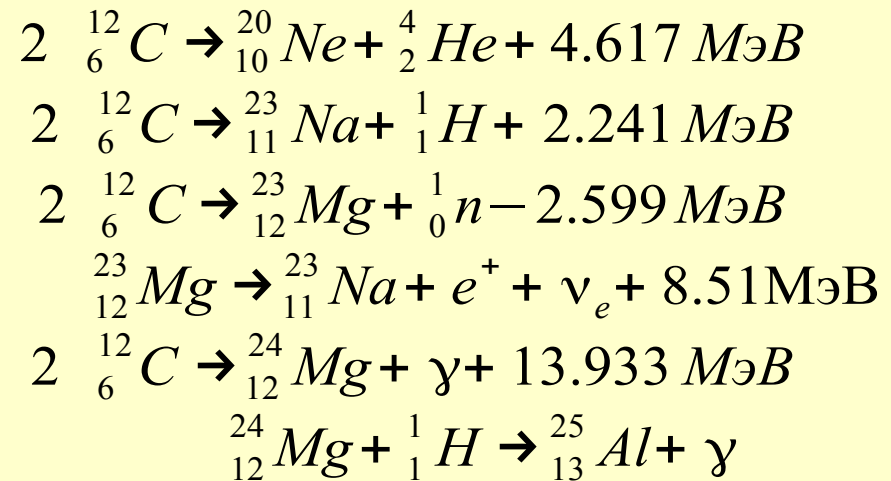
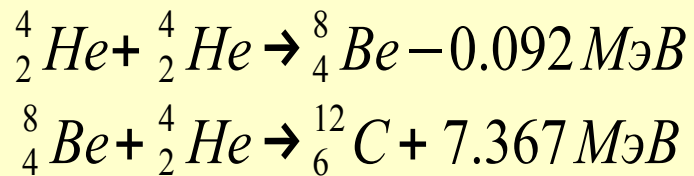


Необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов! Нужна высокая температура.

ядро звезды!

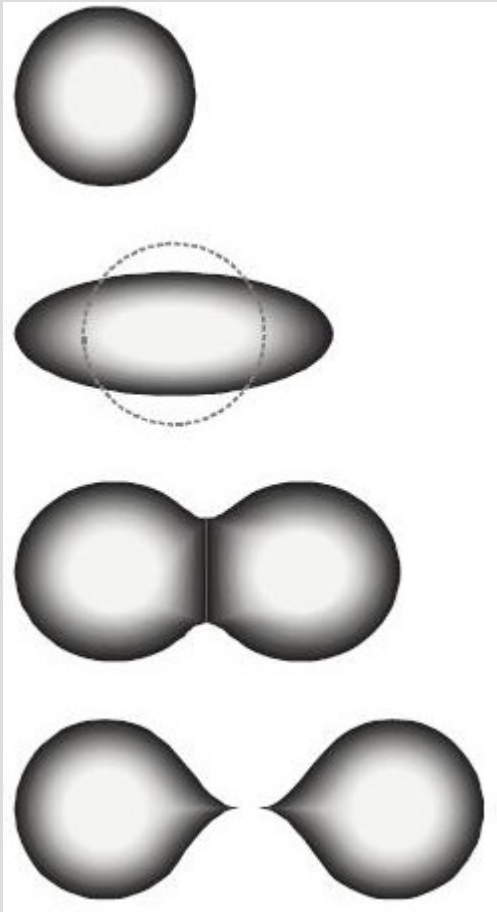
Реакции по каналу слабого взаимодействия! Нужны высокие плотности вещества

Звёздный нуклеосинтез “ОДНИМ ГЛАЗКОМ”

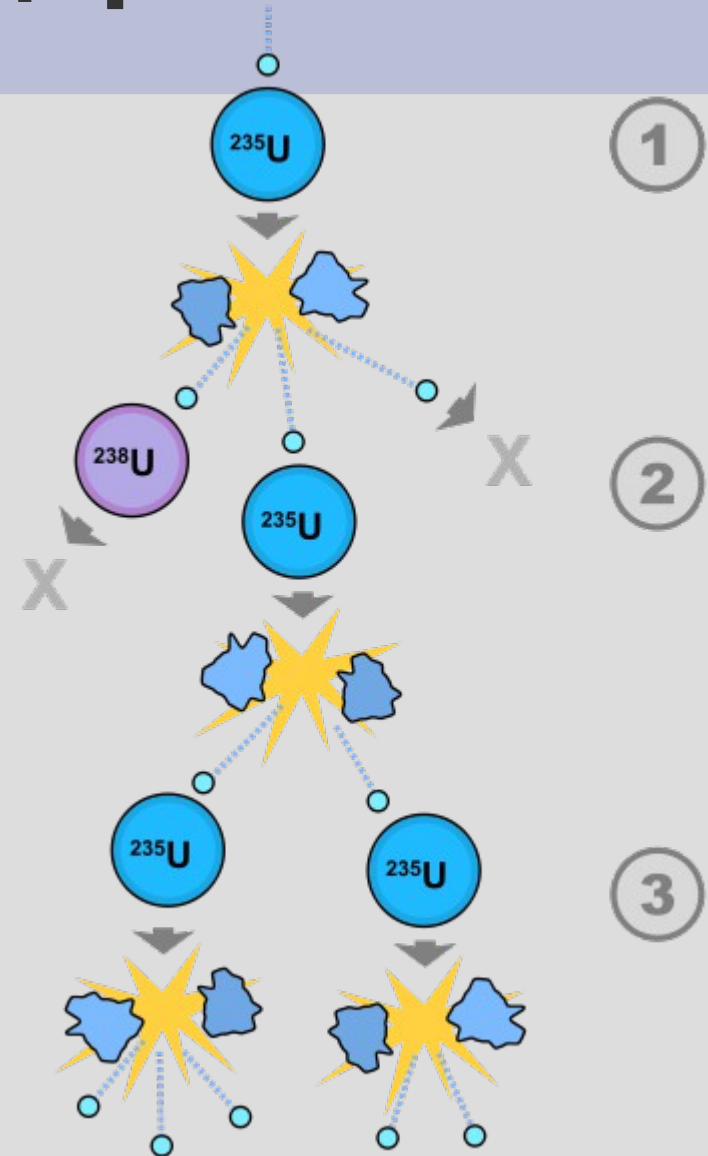


<https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova>

Деление ядер

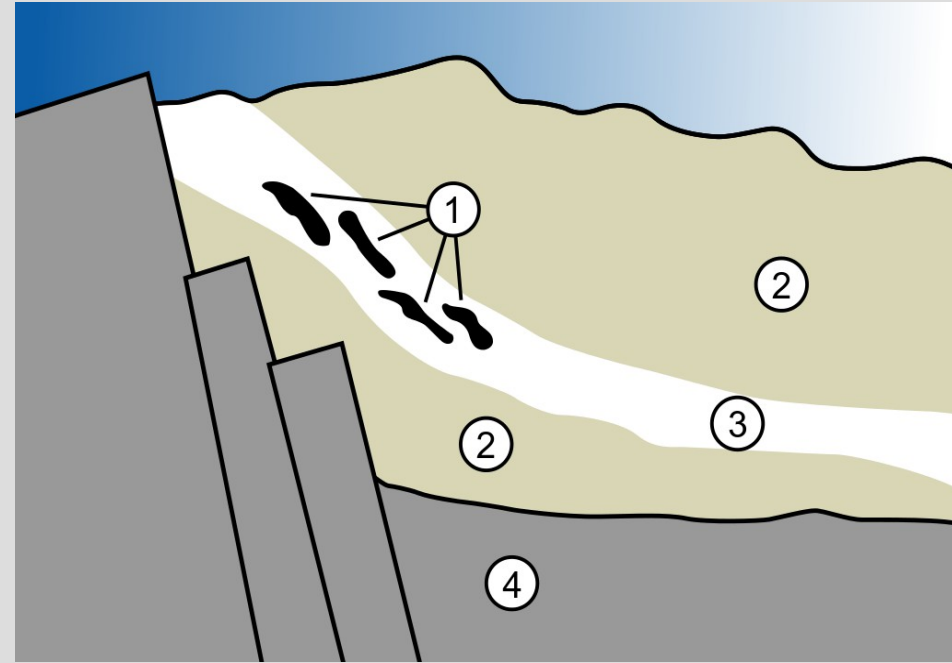


wikipedia.org, Nuclear fission, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission



Цепная реакция деления урана-235. Стадия 1 - исходный атом поглощает нейтрон и делится с образованием трёх нейтронов. Стадия 2 - один из нейтронов поглощается ядром урана-238 без деления, один покидает активную зону, а один вызывает следующее деление. Стадия 3 - образовавшиеся при делении урана-235 на второй стадии нейтроны вызывают деление новых ядер урана-235.
wikipedia.org, Nuclear chain reaction, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction

Природный реактор в Окло



Слева: фотография остатков одного из природных реакторов в Окло (реактор 15). Жёлтые горные породы содержат оксид урана. Справа: схема расположения природных реакторов в Окло. (1) — зоны реакторов, (2) — песчаник, (3) — слой урановой руды, (4) — гранит.

NASA, Oklo: Ancient African Nuclear Reactors , 2010, <http://apod.nasa.gov/apod/ap100912.html>
wikipedia.org, Oklo, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Oklo>

Задачи домашнего задания

Задача 1.

Определите среднюю плотность ядерного вещества, полагая что радиус ядра связан с числом нуклонов по эмпирической формуле $R=1.3\sqrt[3]{A}\text{фм}$, где A -массовое число ядра (число нуклонов).

Для оценки принять удельную энергию связи равной 8.5 МэВ/нуклон. Средняя масса нуклона $mc^2=940\text{ МэВ}$.

Задача 2.

Удельное содержание изотопа ^{14}C , усвоенного деревом при его жизни, затем уменьшается вследствие β -распада с периодом полураспада $T_{1/2}=5700$ лет. Определите возраст t деревянного предмета, обнаруженного при раскопках, если удельная активность, содержащегося в этом предмете изотопа ^{14}C составляет 0,1 от удельной активности свежесрубленного дерева.