КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Радиологические измерения»

Лекция 3. Радиоактивность.

и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.

Цель лекции: сформировать у обучающихся представление о физической природе радиоактивности, основных видах радиоактивного распада и закономерностях радиоактивных превращений, включая закон радиоактивного распада, период полураспада и активность радионуклидов.

Результаты обучения:

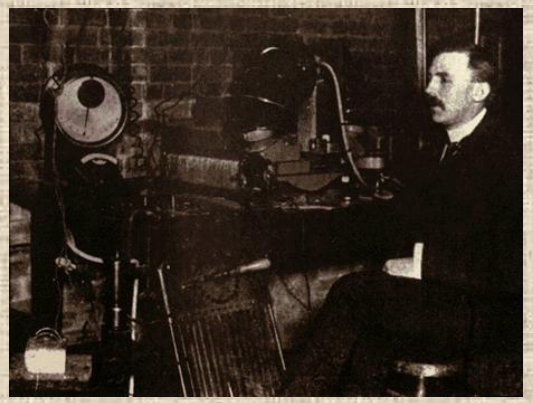
По завершении лекции обучающийся будет способен:

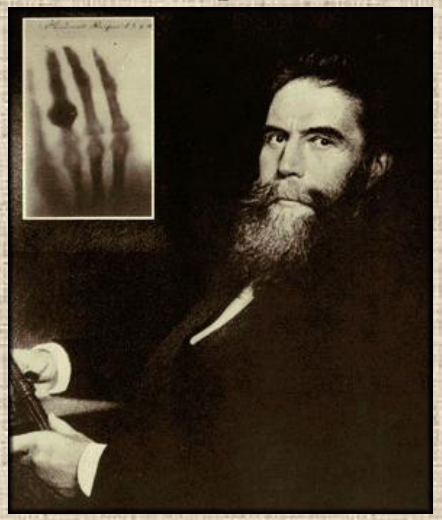
1. Объяснять физическую сущность радиоактивности и различать естественную и искусственную радиоактивность.
2. Характеризовать основные виды радиоактивного распада (α-, β-, γ-распады), а также нуклонную и кластерную радиоактивность.
3. Формулировать закон радиоактивного распада и объяснять физический смысл постоянной распада, периода полураспада и активности.
4. Применять закон радиоактивного распада для расчёта активности радионуклидов во времени.

История открытия радиоактивности: первые шаги

Rutherford:

Discoverer Alpha and Beta rays 1897



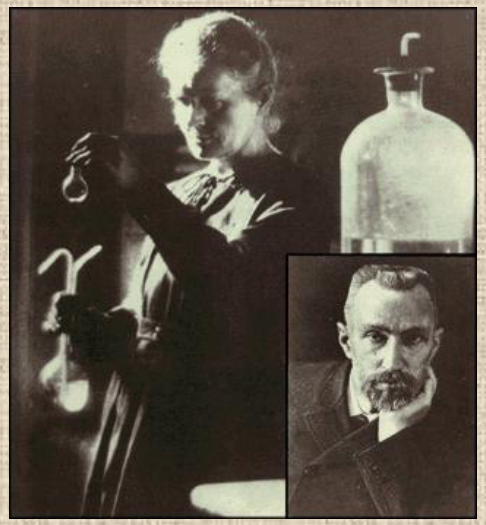


Roentgen:

Discoverer of X-rays 1895

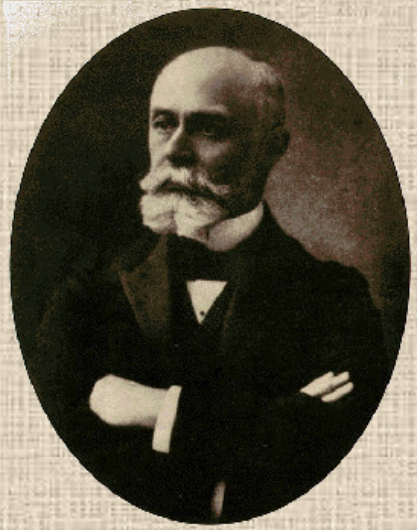
The Curies:

Discoverers of Radium and Polonium 1900-1908



Becquerel:

Discoverer of Radioactivity 1896



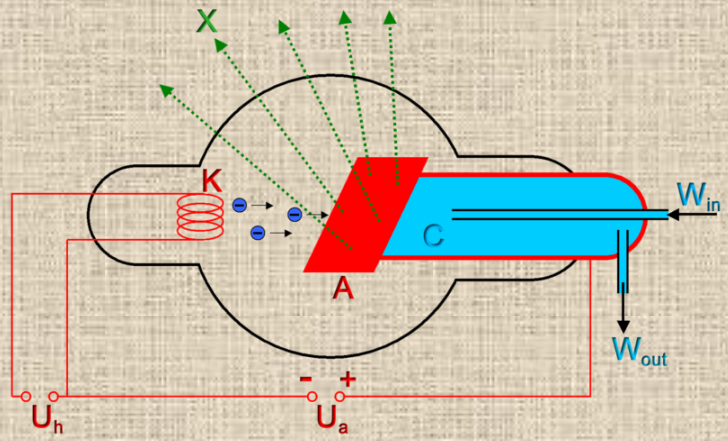
История открытия естественной радиоактивности



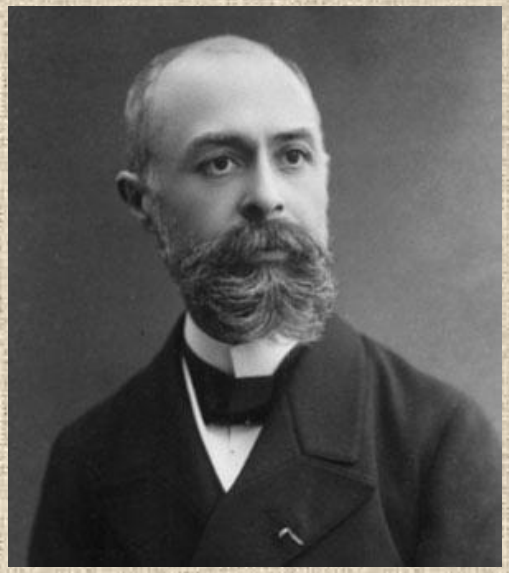
Вильгельм Рентген



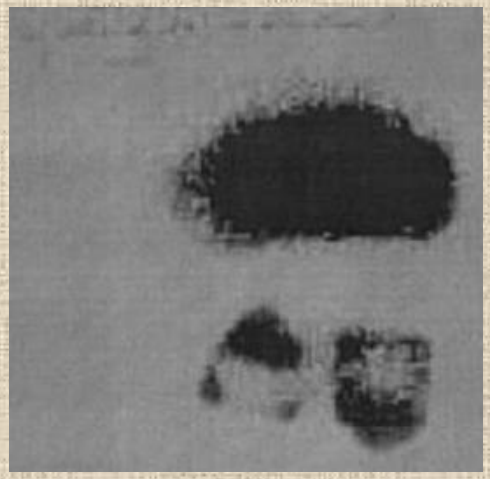
В 1895 г. немецкий ученый Рентген открыл лучи, которые впоследствии были названы его именем. Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение), либо при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках, в которых электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом (при этом рентгеновские лучи не испускаются, т. к. ускорение слишком мало) и ударяются об анод, где они резко тормозятся (при этом испускаются рентгеновские лучи: т. н. тормозное излучение) и в то же время выбивают электроны из внутренних электронных оболочек атомов анода. Пустые места в оболочках занимаются другими электронами атома. При этом испускается рентгеновское излучение с характерным для материала анода спектром энергий.



История открытия естественной радиоактивности



Антуан Анри Беккерель



В 1896 г. Беккерель случайно открыл радиоактивность во время работ по исследованию фосфоресценции в солях урана. К концу февраля он приготовил новую пластинку. Но погода была пасмурной и оставалась такой до 1 марта. Утро 1 марта было солнечным, и опыты можно было возобновить. Беккерель решил, однако, проявить пластинки, лежавшие несколько дней в темном шкафу. На проявленных пластинках четко обозначились силуэты образцов минералов, лежавших на непрозрачных экранах пластинок. Минерал без предварительного освещения испускал невидимые лучи, действовавшие на фотопластинку через непрозрачный экран. Беккерель немедленно ставит повторные опыты. Оказалось, что соли урана сами по себе без всякого внешнего воздействия испускают невидимые лучи, засвечивающие фотопластинку и проходящие через непрозрачные слои.

2 марта Беккерель сообщил о своем открытии

История открытия естественной радиоактивности

Мария Склодовская-Кюри



В 1898 г. Мария и Пьер Кюри выделили новый радиоактивный элемент – полоний, названный в честь Польши (Нобелевская премия 1903 г.). Вторую Нобелевскую премию М. Кюри получила в 1911 году за открытие радия.

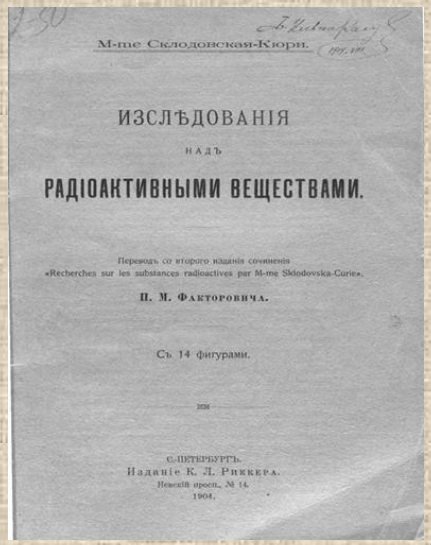
Пьер Кюри́



84 208.982

Po

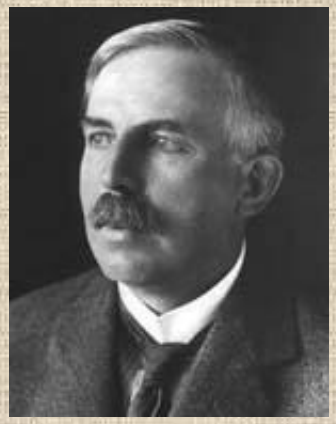
Polonium



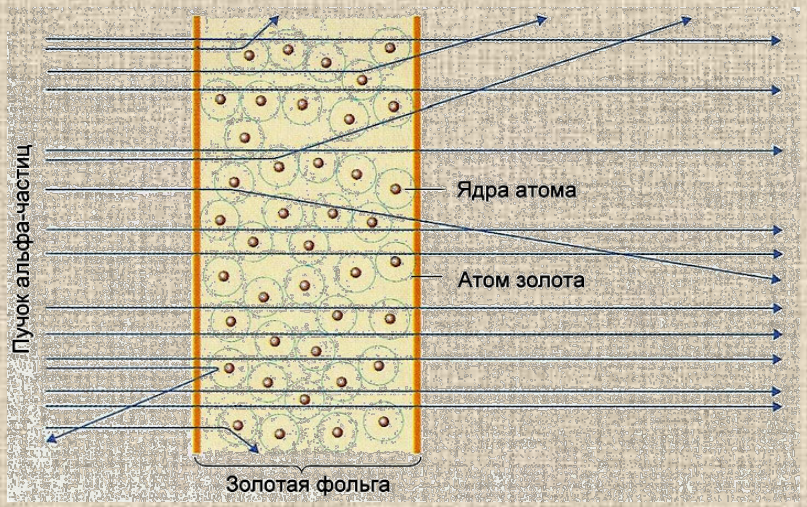




История открытия естественной радиоактивности



Эрнест Резерфорд



Э. Резерфорд экспериментально установил (1899), что соли урана испускают лучи 3 типов, которые по-разному отклоняются в магнитном поле:

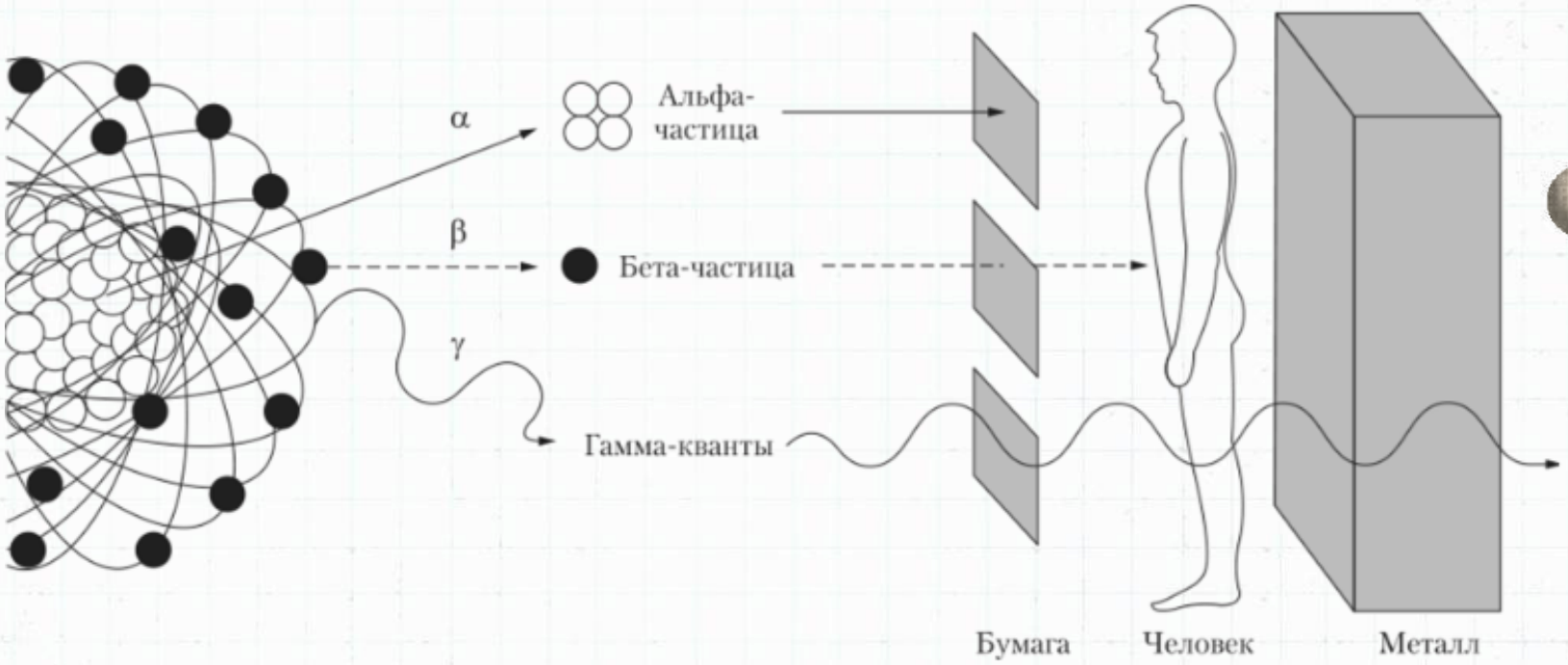
•лучи первого типа отклоняются так же, как поток положительно заряженных частиц; их назвали α-лучами;

•лучи второго типа отклоняются в магнитном поле так же, как поток отрицательно заряженных частиц (в противоположную сторону), их назвали β-лучами;

•лучи третьего типа, которые не отклоняются магнитным полем, назвали γ-излучением.

•Энергетические спектры α-частиц и γ-квантов, излучаемых радиоактивными ядрами, прерывистые («дискретные»), а спектр β-частиц — непрерывный.

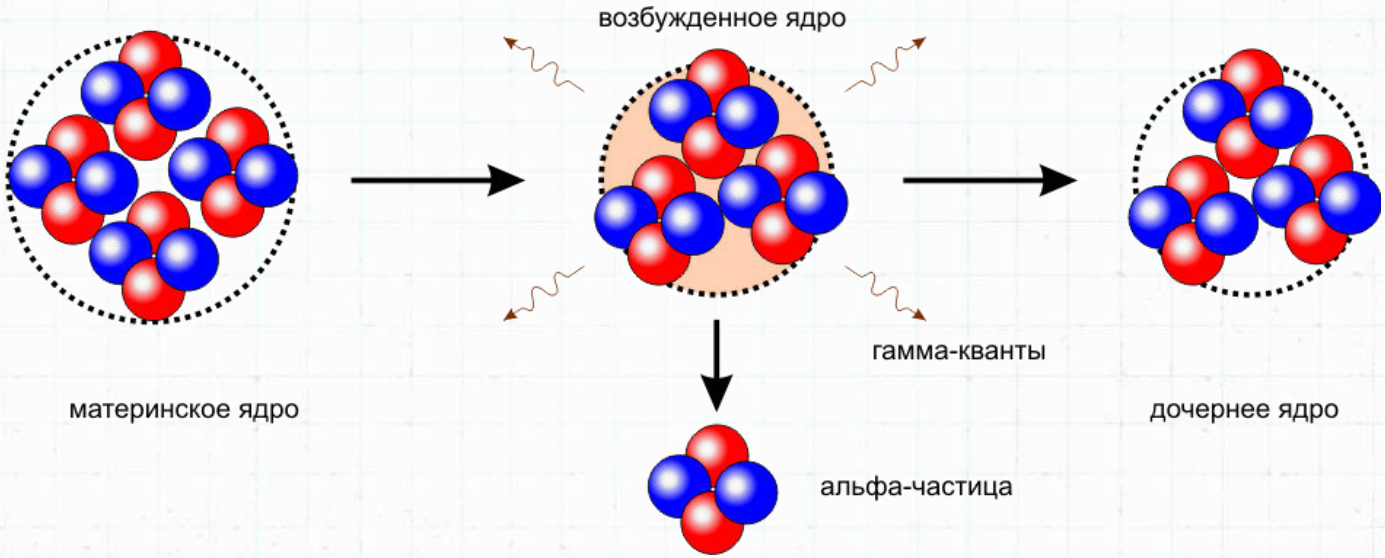
ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ – самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием альфа-частиц, бета-частиц, гамма-квантов и ионов



Виды радиоактивности

АЛЬФА-РАСПАД (АЛЬФА-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – самопроизвольное превращение ядер с массовым числом A1 в ядра с $A_2=A_1-4$ при одновременном испускании альфа-частиц, являющиеся ядрами гелия He-4

$$ {}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A-4}X_{Z-2} + {}^{4}He_{2} $$



Альфа-распад

***Ядро альфа-радиоактивно**, если выполняется условие*

$$\varepsilon_\alpha = \left[M(A-4,Z-2)+M\left({}^4He_2\right)-M(A,Z)\right]\cdot c^2 < 0$$

$$M(A,Z) > M(A-4,Z-2)+M\left({}^4He_2\right)$$

*При этом **энергия альфа-распада** (суммарная кинетическая энергия продуктов распада) в случае распада из основного состояния*

$$\Delta E_\alpha = \left|\varepsilon_\alpha\right| = \left[M(A,Z)-M(A-4,Z-2)-M\left({}^4He_2\right)\right]\cdot c^2 = T_\alpha + T_{\text{nucleus}}$$

*Из закона сохранения импульса **кинетическая энергия** распределяется следующим образом:*

$$\vec{P}_\alpha + \vec{P}_{\text{nucleus}} = \vec{P}(A,Z)$$

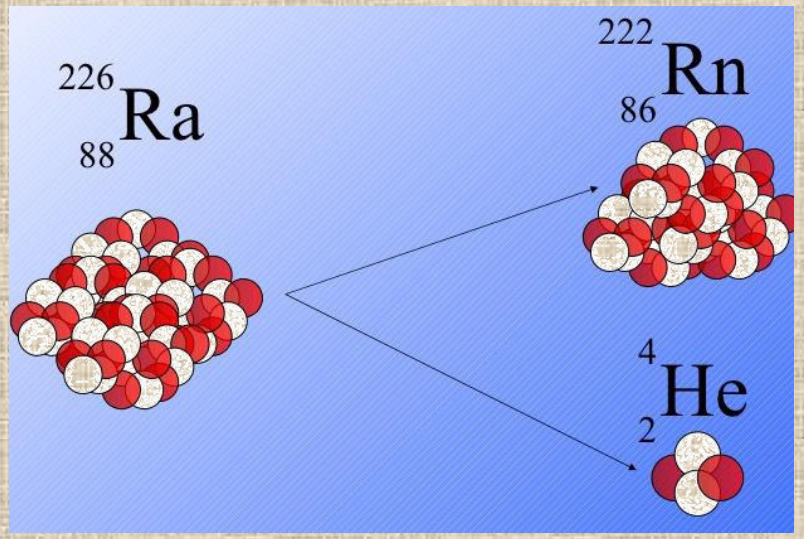
$$\vec{P}(A,Z)=0 \qquad \left|\vec{P}_\alpha\right| = \left|\vec{P}_{\text{nucleus}}\right| \qquad T_{\text{nucleus}} = T_\alpha \frac{M_\alpha}{M_{\text{nucleus}}}$$

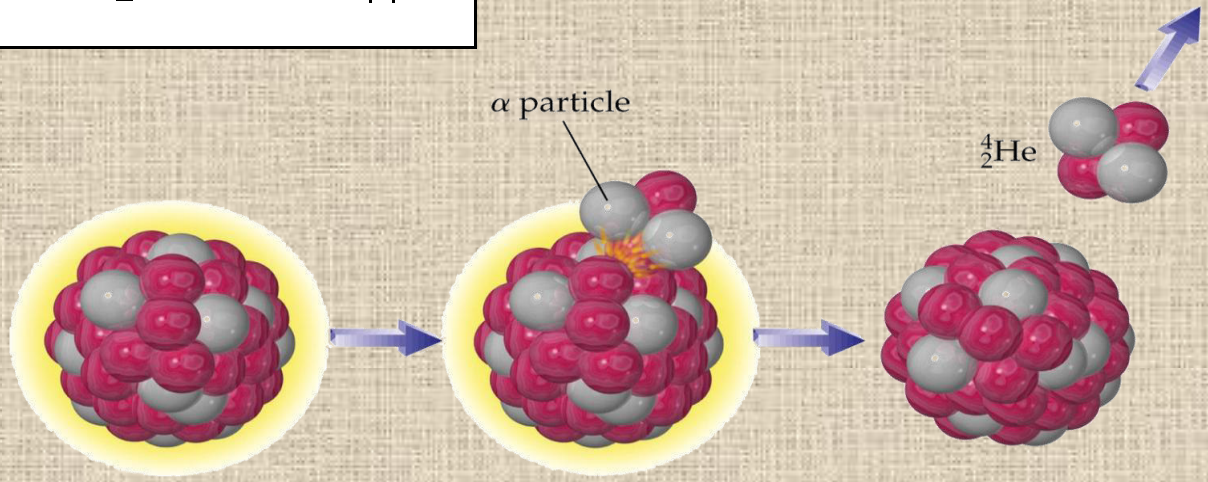
Примеры альфа-распада

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{234}_{90}Th$$

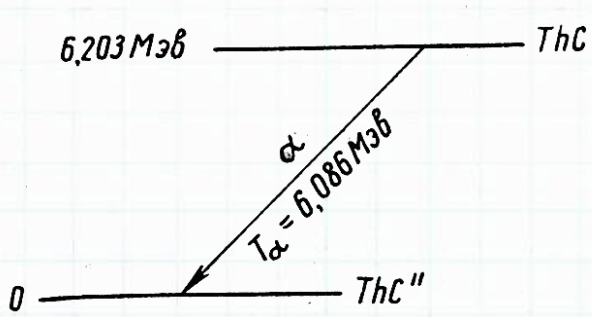
$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

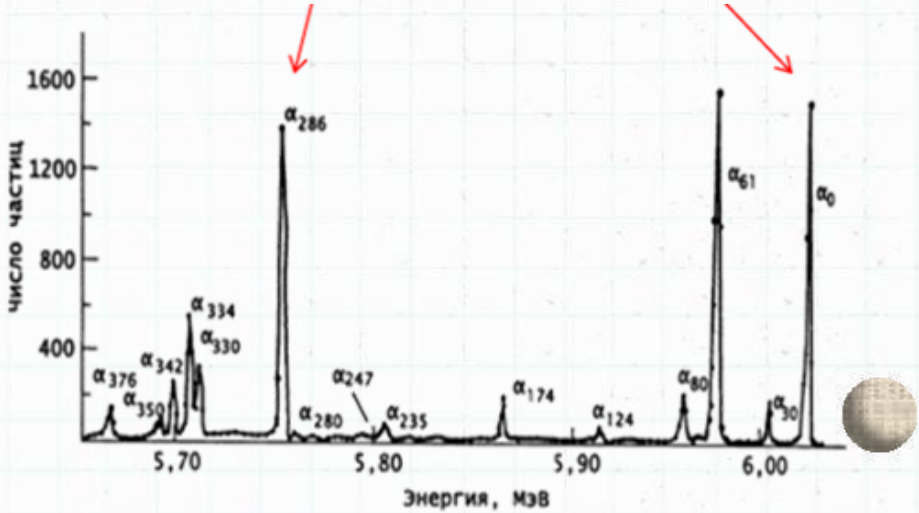
$^{256}_{103}Lr$	$\longrightarrow$	$^{252}_{101}Md$	+	$^{4}_{2}He$
$^{231}_{91}Pa$	$\longrightarrow$	$^{227}_{89}Ac$	+	$^{4}_{2}He$
$^{225}_{89}Ac$	$\longrightarrow$	$^{221}_{87}Fr$	+	$^{4}_{2}He$
$^{211}_{87}Fr$	$\longrightarrow$	$^{4}_{2}He$	+	$^{207}_{85}At$
$^{185}_{79}Au$	$\longrightarrow$	$^{4}_{2}He$	+	$^{181}_{77}Ir$

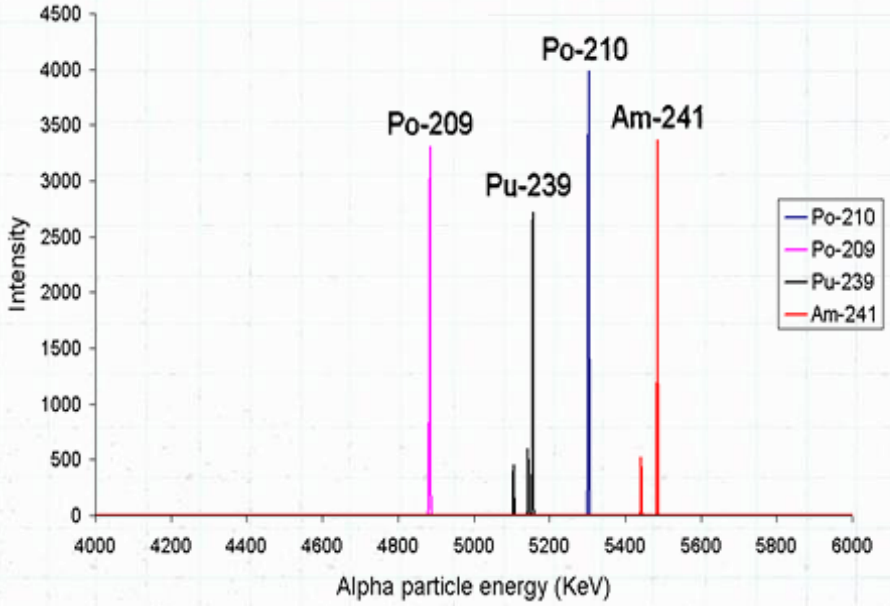




α-распад


6,203 Мэв
ThC
α
T_α = 6,086 Мэв
0
ThC''


Число частиц
1600
1200
800
400
α_{286}
α_{61}
α_0
α_{334}
α_{330}
α_{342}
α_{376}
α_{350}
α_{247}
α_{280}
α_{235}
α_{174}
α_{124}
α_{80}
α_{30}
5,70
5,80
5,90
6,00
Энергия, мэв


Po-210
Po-209
Am-241
Pu-239
Intensity
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
4000
4200
4400
4600
4800
5000
5200
5400
5600
5800
6000
Alpha particle energy (KeV)
Po-210
Po-209
Pu-239
Am-241

Виды радиоактивности

БЕТА-РАСПАД (БЕТА-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – самопроизвольное превращение ядер с порядковым номером Z1 в ядра с Z=Z1+/- 1, сопровождаемое испусканием бета-частиц (электронов или позитронов), либо Е-захватом

$$ {}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A}X_{Z+1} + \beta^{-} + \tilde{\nu}_{e} \qquad n \rightarrow p + \beta^{-} + \tilde{\nu}_{e} $$

$$ {}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A}X_{Z-1} + \beta^{+} + \nu_{e} \qquad p \rightarrow n + \beta^{+} + \nu_{e} $$

$$ e^{-} + {}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A}X_{Z-1} + \nu \qquad e^{-} + p \rightarrow n + \nu $$

Энергетические условия бета-распада имеют вид:

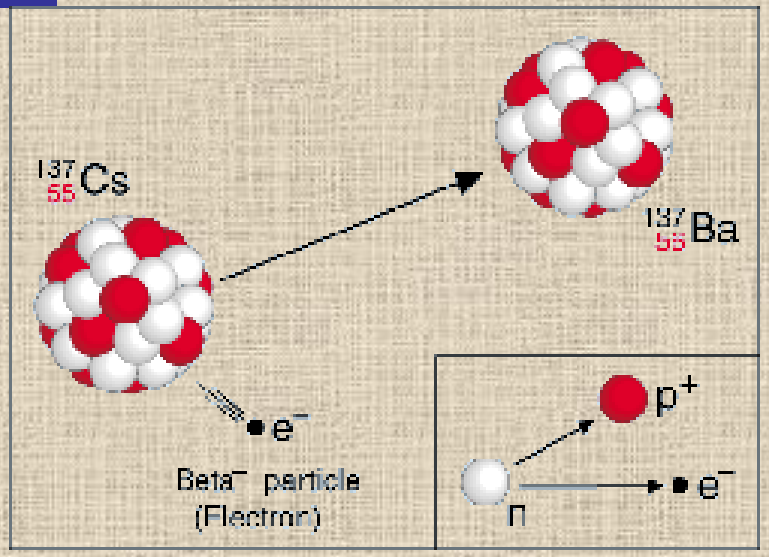
β^- ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$),	$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e$,	$Q_\beta = [{}^{at}M(A, Z) - {}^{at}M(A, Z+1)]c^2$,
β^+ ($p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$),	$M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e$,	$Q_\beta = [{}^{at}M(A, Z) - {}^{at}M(A, Z-1) - 2m_e]c^2$,
e-захват ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$),	$M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1)$.	$Q_\beta = [{}^{at}M(A, Z) - {}^{at}M(A, Z-1)]c^2$.

Примеры бета-распадов

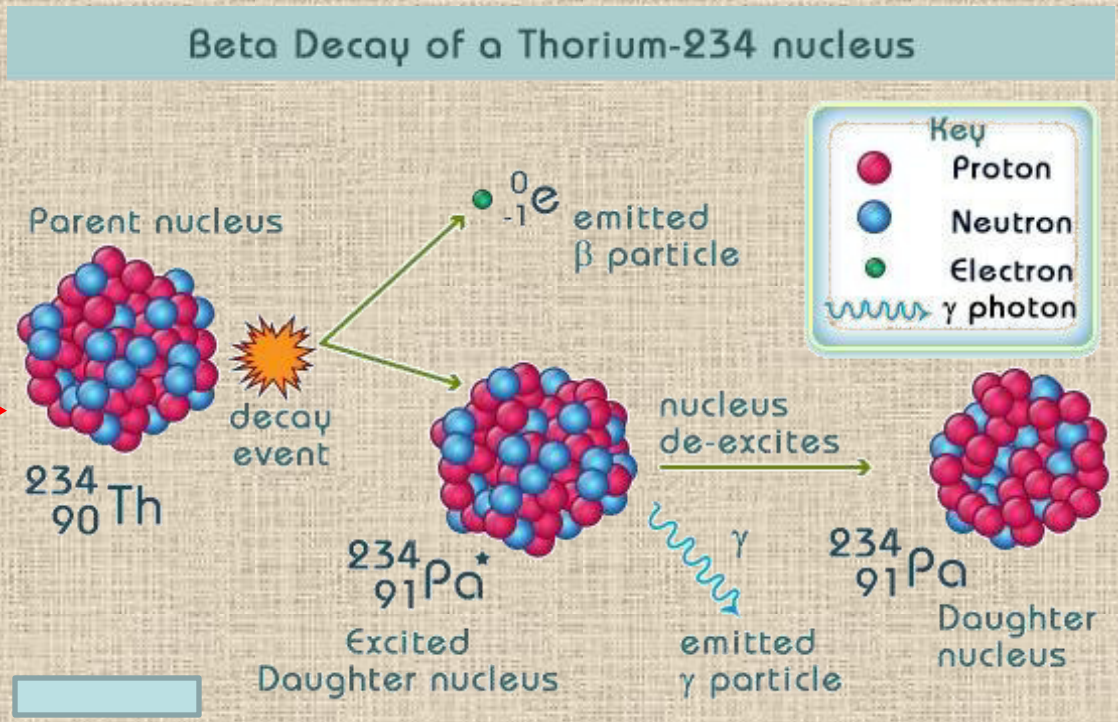
$$^{32}_{15}P \longrightarrow ^{32}_{16}S + ^{0}_{-1}e$$

$$^{42}_{19}K \rightarrow ^{0}_{-1}e + ^{42}_{20}Ca$$

$^{90}_{38}Sr$	$\longrightarrow$	$^{90}_{39}Y$	+	$^{0}_{-1}e$
$^{239}_{93}Np$	$\longrightarrow$	$^{239}_{94}Pu$	+	$^{0}_{-1}e$
$^{247}_{95}Am$	$\longrightarrow$	$^{247}_{96}Cm$	+	$^{0}_{-1}e$
$^{82}_{35}Br$	$\longrightarrow$	$^{82}_{36}Kr$	+	$^{0}_{-1}e$
$^{99}_{43}Tc$	$\longrightarrow$	$^{99}_{44}Ru$	+	$^{0}_{-1}e$



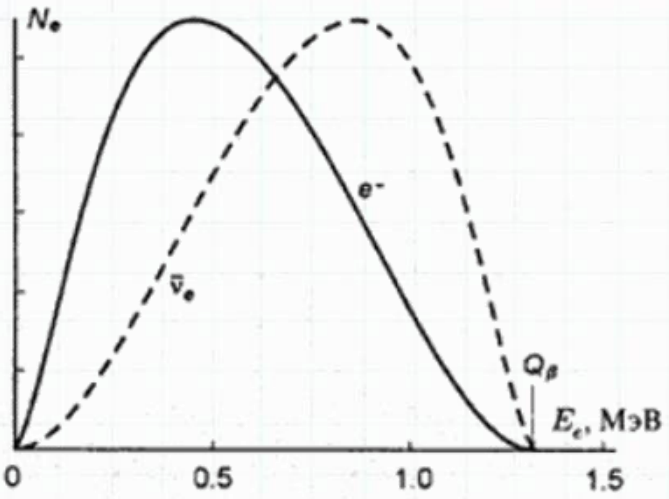
Beta Decay with Gamma Radiation

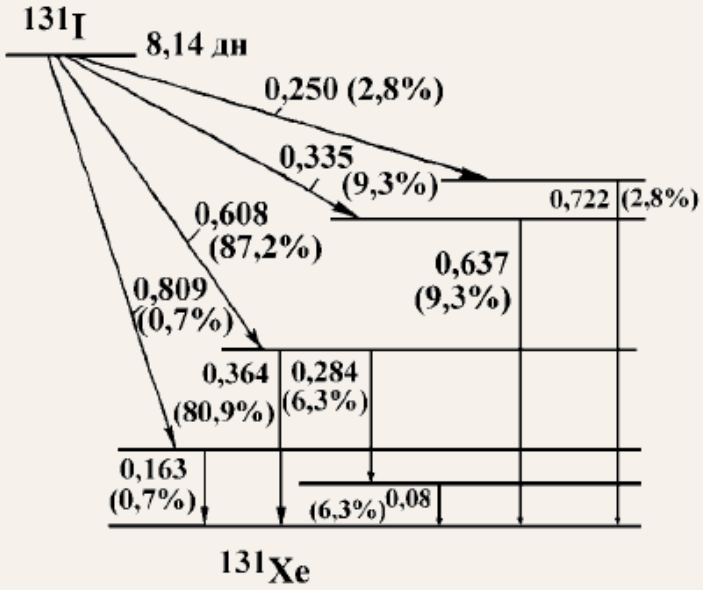


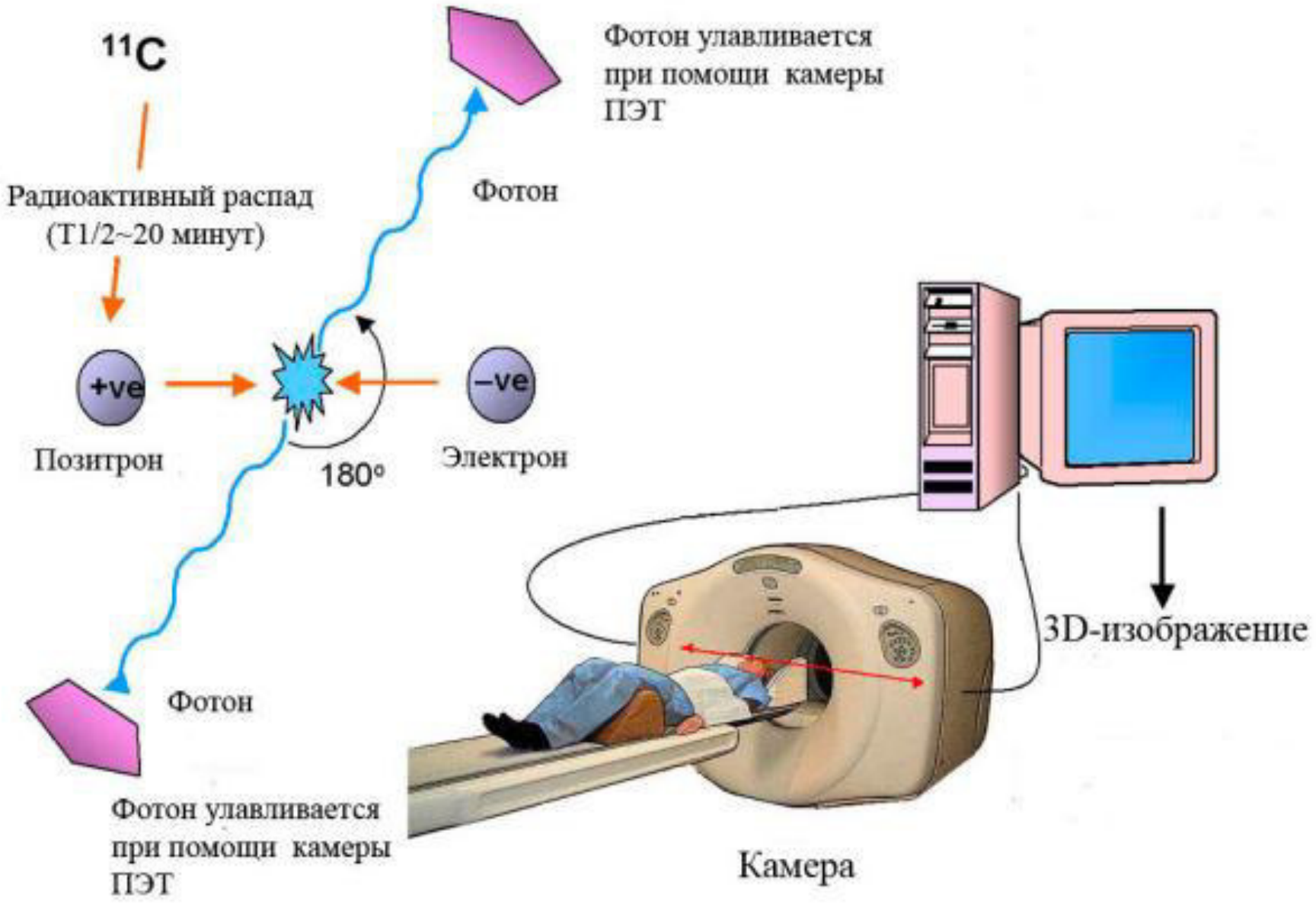
β-распад

Спектр электронов, образующихся при β-распаде в отличие от дискретного спектра α-частиц имеет непрерывный характер, т.е из ядра вылетают электроны различных энергий вплоть до энергии β-распада. Непрерывный спектр электронов некоторыми физиками интерпретировался как невыполнение закона сохранения энергии в β-распаде.

$$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

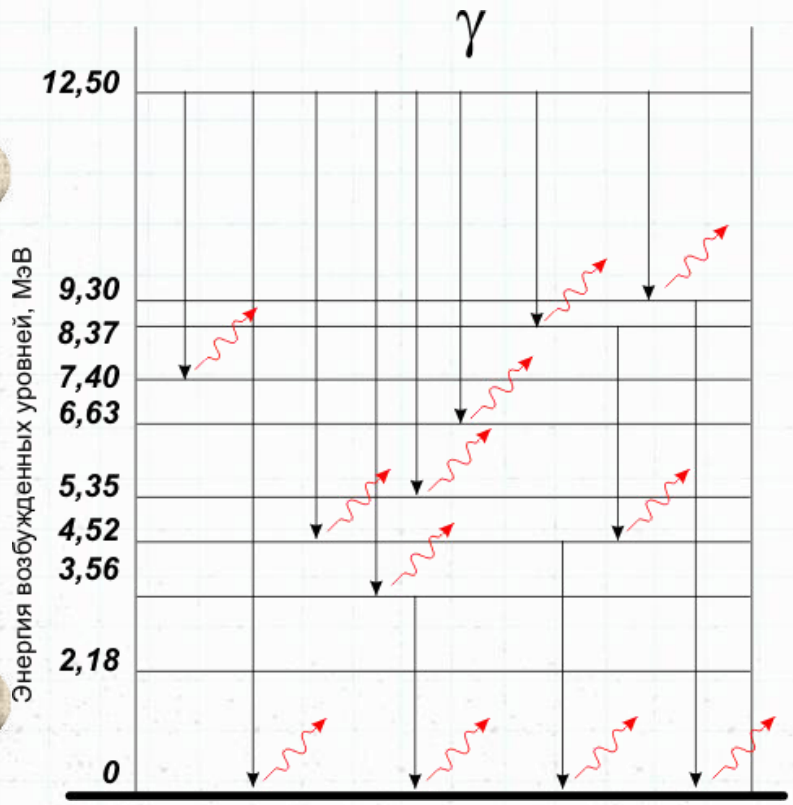


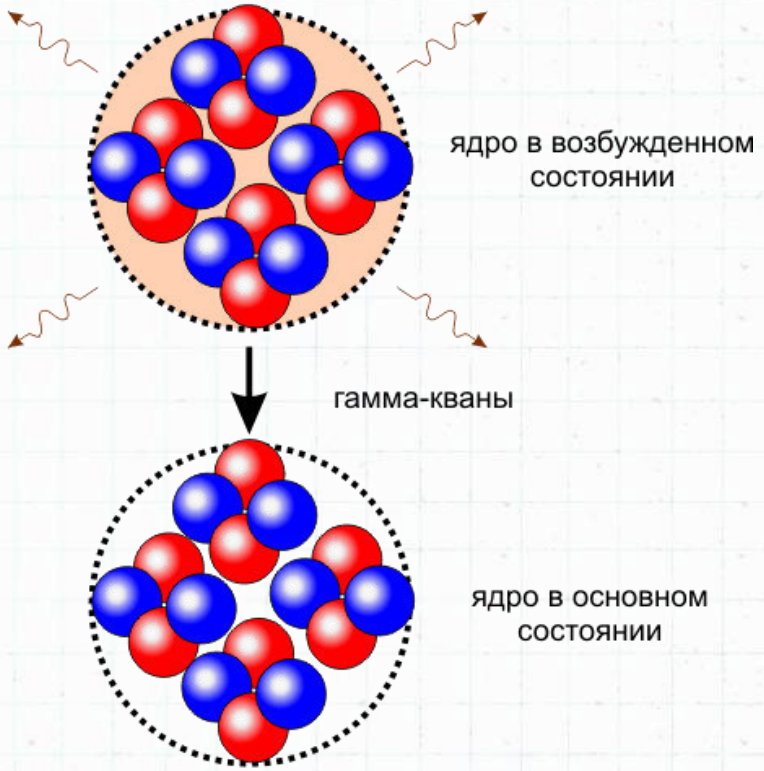



^{11}C
Радиоактивный распад
(T1/2~20 минут)
+ve
Позитрон
180°
–ve
Электрон
Фотон
Фотон улавливается
при помощи камеры
ПЭТ
Фотон
Фотон улавливается
при помощи камеры
ПЭТ
3D-изображение
Камера

ГАММА-РАСПАД (ГАММА-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – испускание гамма-квантов в процессе бета-распада и ядерных реакций при переходах ядер из верхних возбужденных состояний

$$^{A}X_{Z}(E_i) \rightarrow {}^{A}X_{Z}(E_0) + \gamma(E_i - E_0)$$

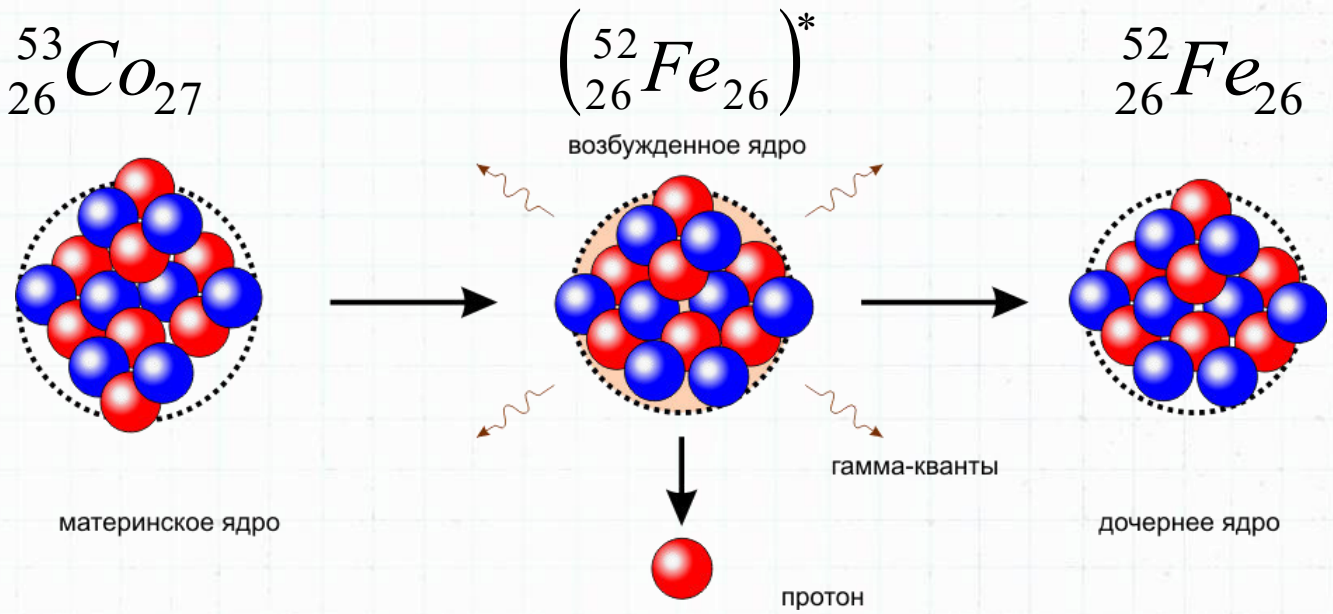




НУКЛОННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ – самопроизвольное превращение нейтронодефицитных ядер с испусканием протона

$$ {}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A-1}X_{Z-1} + {}^{1}p_{1} $$

$$ {}^{17}_{N} \xrightarrow{\beta^-} {}^{17}O^{*} \rightarrow {}^{16}O + n $$



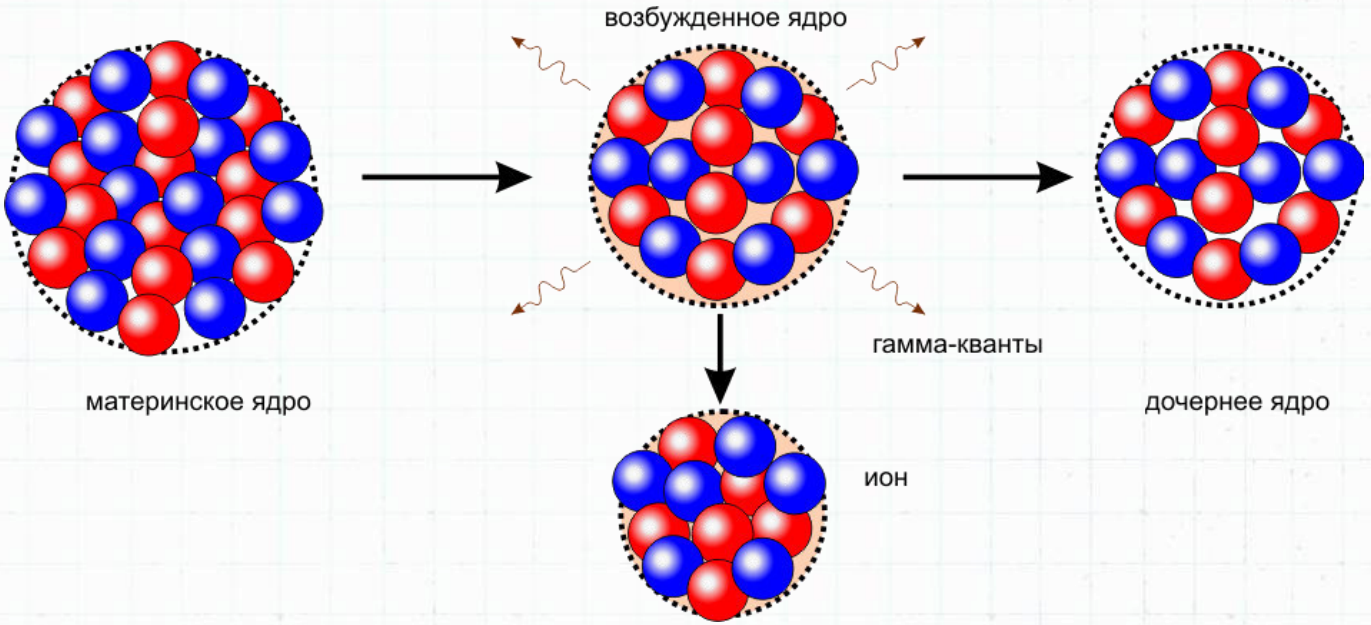
Известно свыше 30 изотопов, испускающих протоны из основного состояния ядер с Z > 50 от ^{105}Sb до ^{177}Tl.

Нейтронная радиоактивность наблюдается вплоть до ядер с Z = 16, включая тяжёлые изотопы ^{26}O, ^{33}Ne, ^{36}Na, ^{39}Mg и ^{49}S.

Виды радиоактивности

КЛАСТЕРНАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ – самопроизвольное превращение ядер с испусканием ядер, тяжелее, чем альфа-частица

$$^{223}Ra \rightarrow {}^{14}C + {}^{209}Pb + Q\ (31.85\ МэВ).$$



Кластерная радиоактивность – способность некоторых тяжелых ядер самопроизвольно испускать кластеры – ядра ^{14}C, ^{20}O, ^{24}Ne, ^{26}Ne, ^{28}Mg, ^{30}Mg, ^{32}Si *и* ^{34}Si.

Вероятность испускания ядер ^{14}C *почти на 10 порядков меньше, чем вероятность испускания α-частиц.*

Закон радиоактивного распада

Это означает, что число актов радиоактивного распада **dN** за время **dt** определяется только количеством радиоактивных ядер **N(t)** в данный момент времени **t**

$$dN = - \lambda N \, dt \qquad (1)$$

Вероятность распада λ входит в это уравнение в качестве коэффициента, который называется **постоянной распада**. Знак минус соответствует убыванию вещества в процессе распада.

Уравнение (1) легко решается, в результате чего получается следующий закон изменения числа радиоактивных ядер со временем:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \qquad (2)$$

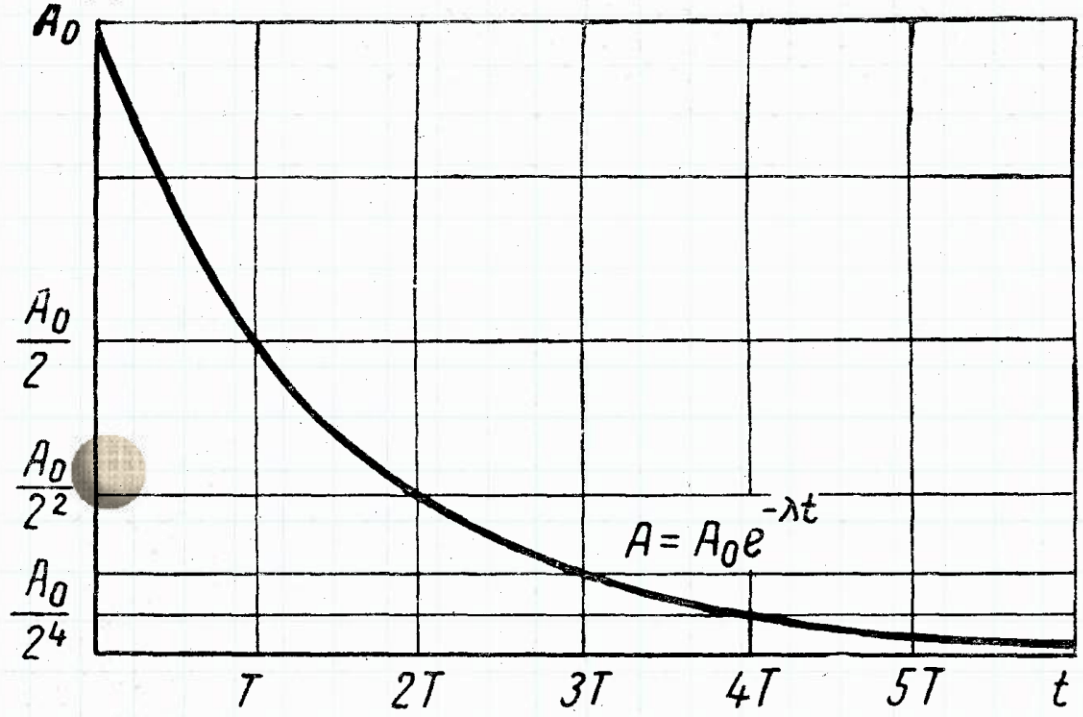
ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА – самопроизвольный спонтанный распад атомных ядер по закону (1), где

N0 – количество радиоактивных ядер в данном объеме вещества в момент времени t=0;

N – количество радиоактивных ядер в том же объеме вещества в момент времени t;

λ – постоянная распада.

Закон радиоактивного распада



$$A(t) = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T}}}$$

Естественно, что это явление интерпретировалось как уменьшение первоначального числа радиоактивных атомов N_0 по аналогичному закону

$$N(t) = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T}}}$$

Время T, за которое первоначальное количество N_0 радиоактивных атомов уменьшается в два раза, было названо **периодом полураспада**

ПОСТОЯННАЯ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА λ – это вероятность распада ядра за 1 сек, то есть доля ядер распадающаяся за 1 сек.

Если в полученное уравнение подставить вместо времени t период полураспада T, то может быть найдена связь постоянной распада λ с периодом полураспада T.

$$N(T) = \frac{N_0}{2}$$

$$N_0 \cdot e^{-\lambda T} = \frac{N_0}{2}$$

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0{,}69}{T} \qquad \textbf{(3)}$$

Закон радиоактивного распада

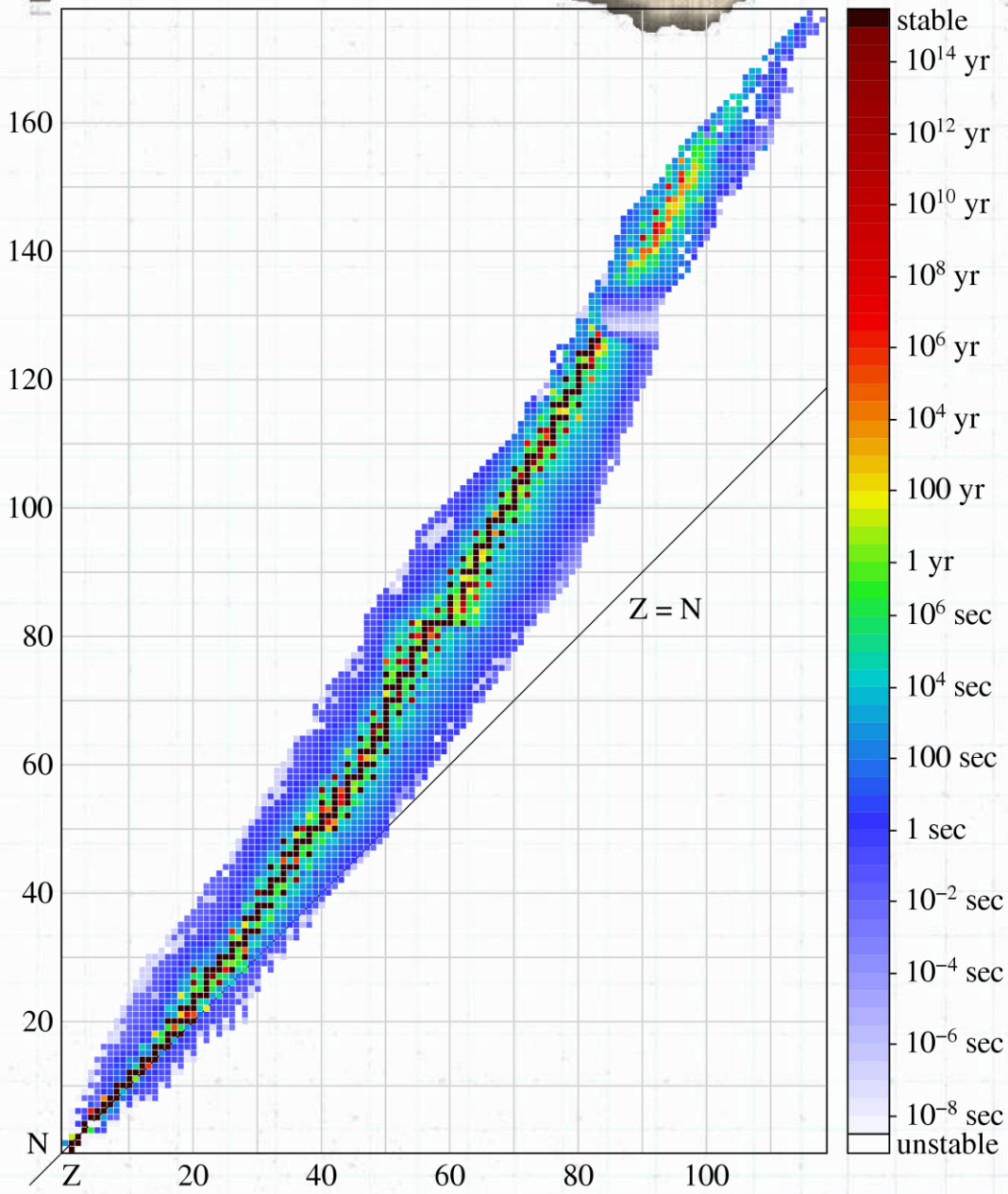
ВРЕМЯ ЖИЗНИ (СРЕДНЯЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА) – промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер уменьшается в e=2,7182818… раз

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА T – это характеристика устойчивости ядер относительно распада, равная времени, в течение которого исходное количество ядер данного вещества распадается наполовину

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2$$

Таблица нуклидов



Интенсивность распада, происходящего в радиоактивном препарате, характеризуется величиной, называемой **активностью A**. Активность определяется как число распадов, происходящих в радиоактивном препарате в единицу времени. Из физического смысла λ и определения A следует, что

$$A = \lambda N = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Единицей измерения активности в СИ является **Беккерель (Бк)**, равный одному распаду в секунду. Используется также внесистемная единица кюри (Ки), равная активности одного грамма изотопа радия ^{226}Ra ($1\ Ки = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ Бк$).

Активность единицы массы радиоактивного препарата ***a=A/m*** называется ***удельной активностью***.

Выводы:

1. Радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение атомных ядер, сопровождающееся испусканием частиц или электромагнитного излучения.
2. Основными видами радиоактивных превращений являются α- и β-распады, γ-переходы, а также нуклонная и кластерная радиоактивность.
3. Радиоактивный распад носит статистический характер, а изменение числа нераспавшихся ядер описывается экспоненциальным законом.
4. Постоянная распада и период полураспада характеризуют скорость радиоактивных превращений, а активность число распадов в единицу времени.
5. Закономерности радиоактивного распада лежат в основе радиологических измерений, радиационного контроля и практического применения радионуклидов.

Вопросы для самопроверки:

1) Что такое радиоактивность и в чем заключается её физическая сущность?
2) В чем особенности альфа-, бета- и гамма-распадов? Приведите примеры.
3) В чём заключается закон радиоактивного распада?
4) Как определяется период полураспада и чему он равен?
5) В каких единицах измеряется активность?
6) Чем отличаются материнское, дочернее и внучатое ядра?
7) Каково практическое значение радиоактивности в науке, технике и медицине?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

