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

«Основы производства радиоактивных изотопов»

Лекция 3. Радиоактивность и закон радиоактивного распада.

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

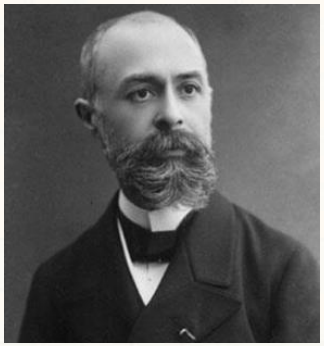
Цель лекции: сформировать представление о физической природе радиоактивности, основных видах радиоактивного распада и закономерностях его протекания, раскрыть количественные характеристики радиоактивных процессов и их практическое значение при получении и применении радионуклидов.

Результаты обучения:

По завершении лекции обучающийся будет способен:

1. Объяснять физическую природу радиоактивности и характеризовать основные этапы её открытия и исследования.
2. Различать основные виды радиоактивного распада (α-, β-распад и γ-излучение) и описывать соответствующие ядерные превращения.
3. Формулировать закон радиоактивного распада и объяснять физический смысл λ, $T_{1/2}$ и τ.
4. Рассчитывать изменение числа радиоактивных ядер и активности источника во времени.
5. Объяснять применение закона радиоактивного распада при производстве радионуклидов и использовании РФП.

Открытие радиоактивности

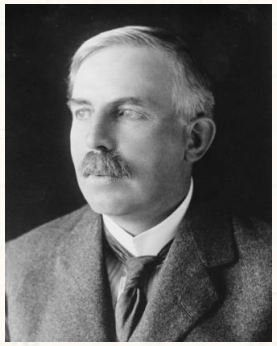


Анри Беккерель

- ✓ 1895 год - Вильгельм Рентген открыл рентгеновские лучи.
- ✓ 1896 год – Анри Беккерель. Исследуя флуоресценцию урановых солей, он случайно обнаружил их способность самопроизвольно излучать невидимые лучи, способные засвечивать фотопластинку. Это стало первым наблюдением естественной радиоактивности.
- ✓ 1898 год – Пьер и Мария Кюри. Они выделили новые элементы – полоний (Po) и радий (Ra), проявившие активность, превышающую активность урана в сотни раз. Мария Кюри ввела термин «радиоактивность».
- ✓ 1902-1903 годы – Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди разработали теорию радиоактивного распада и впервые установили, что активность вещества экспоненциально убывает со временем. Они также предложили закон радиоактивного распада, заложив основу статистического описания процессов в микромире.



Мария Склодовская-Кюри



Эрнест Резерфорд





Фредерик Содди



Вильгельм Рентген

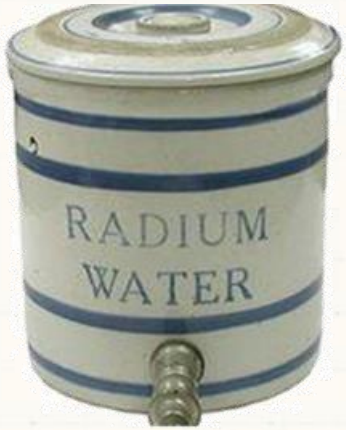


Пьер Кюри



Радиоактивные товары начала XX века





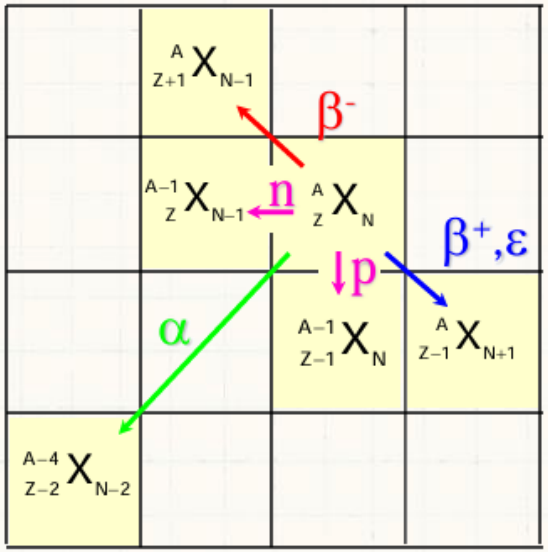








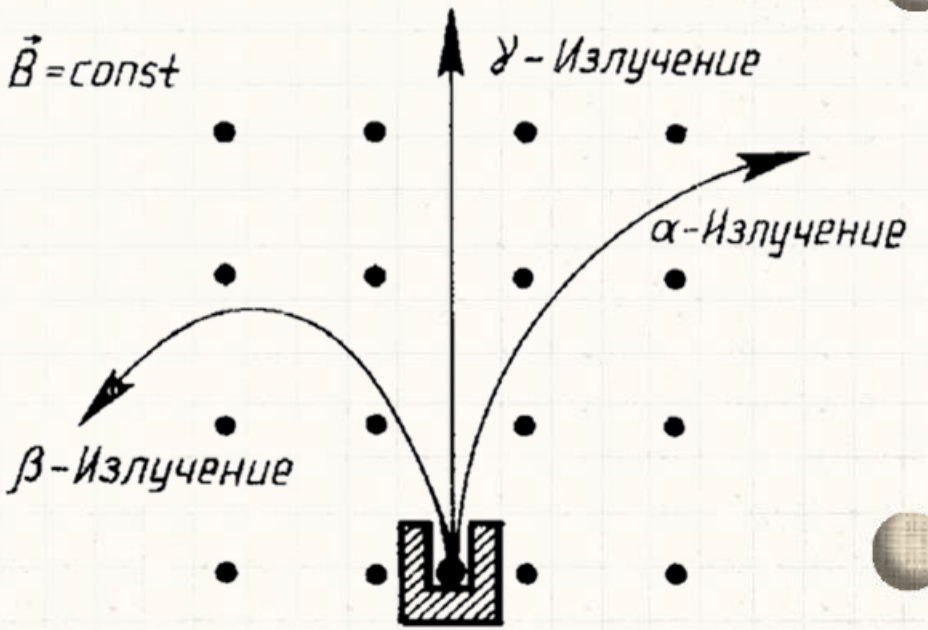
Радиоактивный распад



Спонтанное изменение состава и строения ядра.

Для химика: превращение одного химического элемента в другой.

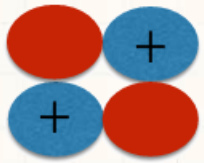
- Альфа-распад
- Бета-распад
- Гамма-распад



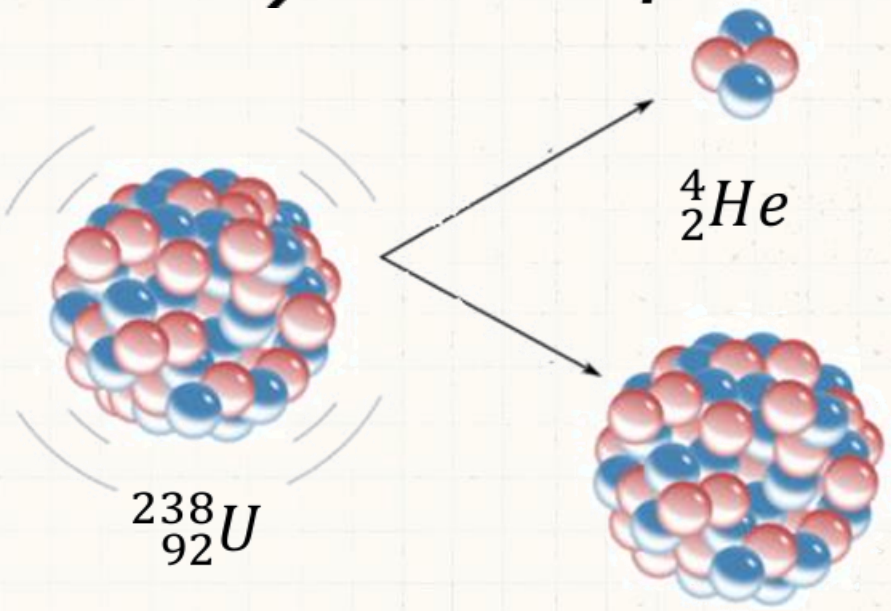
Альфа-распад

$$V_{кул} = \frac{Z_\alpha (Z_я - 2) e^2}{r}$$

Альфа-частица:



2 протона
2 нейтрона



Ядро гелия $^{4}_{2}He, \alpha$

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

$$P \approx e^{-\frac{2}{\hbar}\int_{R}^{R_0}\sqrt{2m_\alpha[V_{кул}(r) - T_\alpha]}dr}$$



Бета-распад

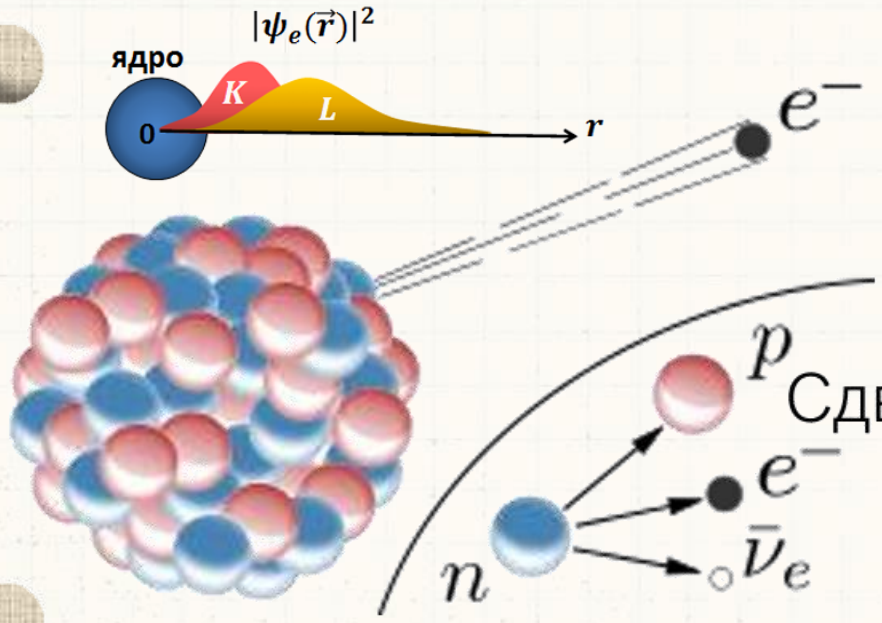
$$M(A,Z) > M(A,Z+1) + m_e;$$
$$M(A,Z) > M(A,Z-1) + m_e;$$
$$M(A,Z) + m_e > M(A,Z-1).$$

Не один, а три:

Бета-минус – образование электрона (β⁻)

Бета-плюс – образование позитрона (β⁺)

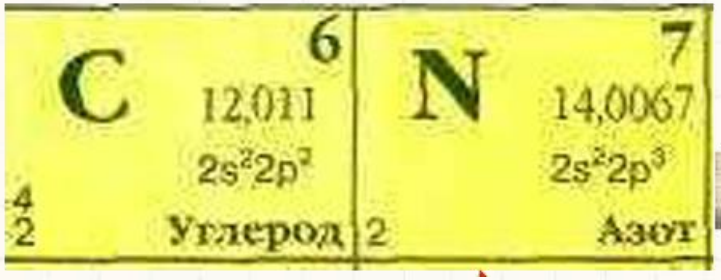
К-захват – ядро поглощает ближайший электрон



$$^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + e^- + \nu;$$

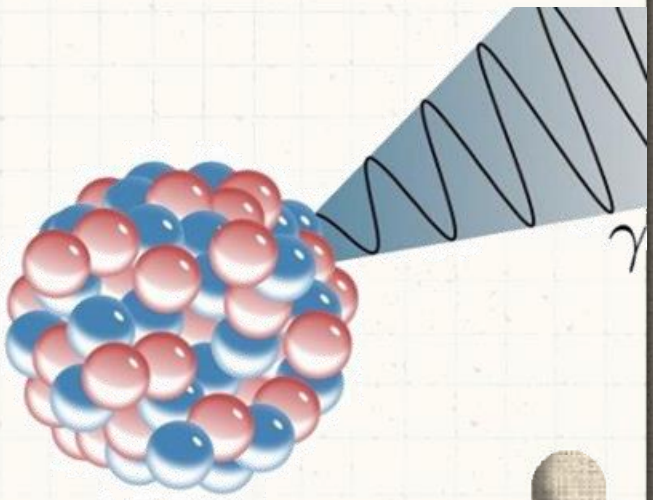
$$^1_1 p \rightarrow {}^1_0 n + e^+ + \tilde{\nu}.$$

Сдвиг вправо по таблице для β⁻



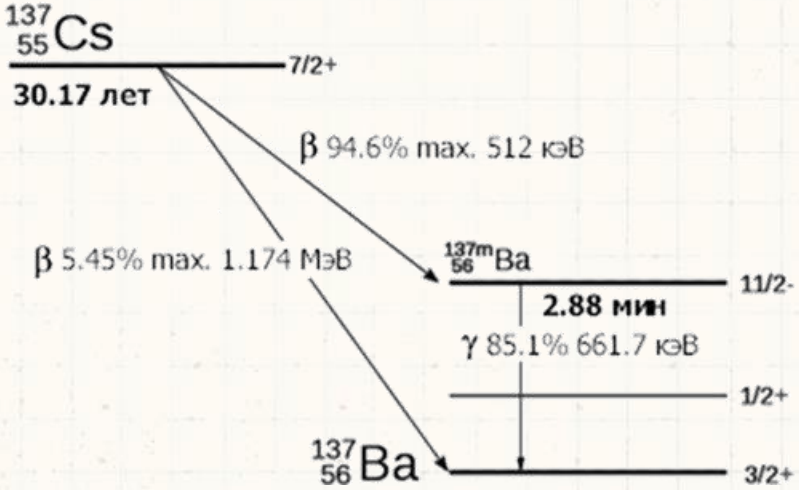
Гамма-распад

Гамма-квант:
Высокоэнергетический квант электромагнитного излучения

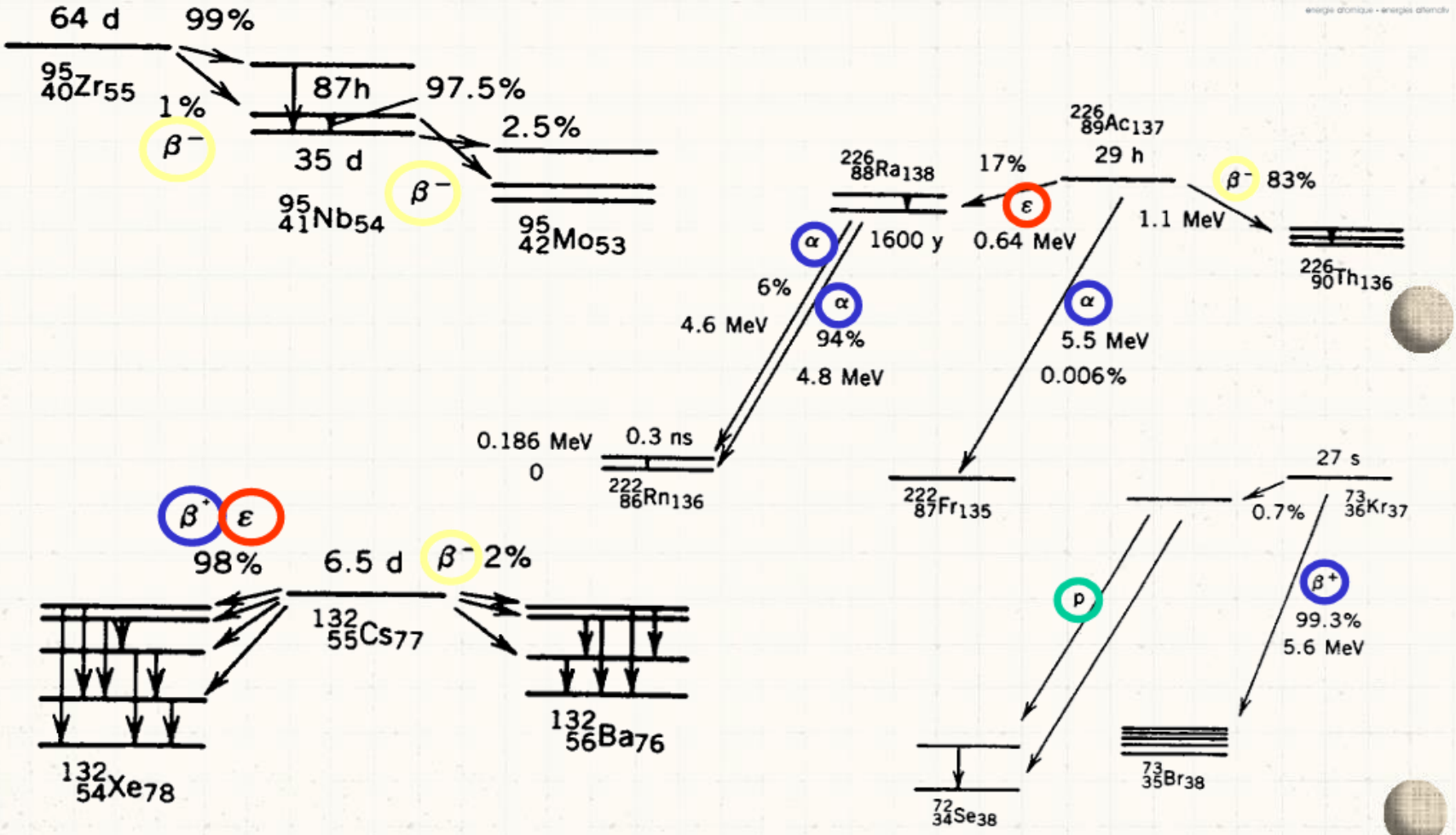


$$\frac{E(\gamma)}{E(\text{видимый свет})} = 1\ 000 - 1\ 000\ 000$$

Сопровождает альфа и бета распад!



Цепочка радиоактивного распада



Закон радиоактивного распада

Пусть в момент времени t имеется $N(t)$ одинаковых радиоактивных ядер или нестабильных частиц и вероятность распада отдельного ядра (частицы) в единицу времени равна λ.
Тогда за промежуток dt число радиоактивных ядер (частиц) уменьшится на dN, причём

$$dN = -\lambda \cdot N(t)dt,$$

откуда

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} = N(0)e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $N(0)$ – число радиоактивных ядер (частиц) в момент $t = 0$.
Наряду с λ используют

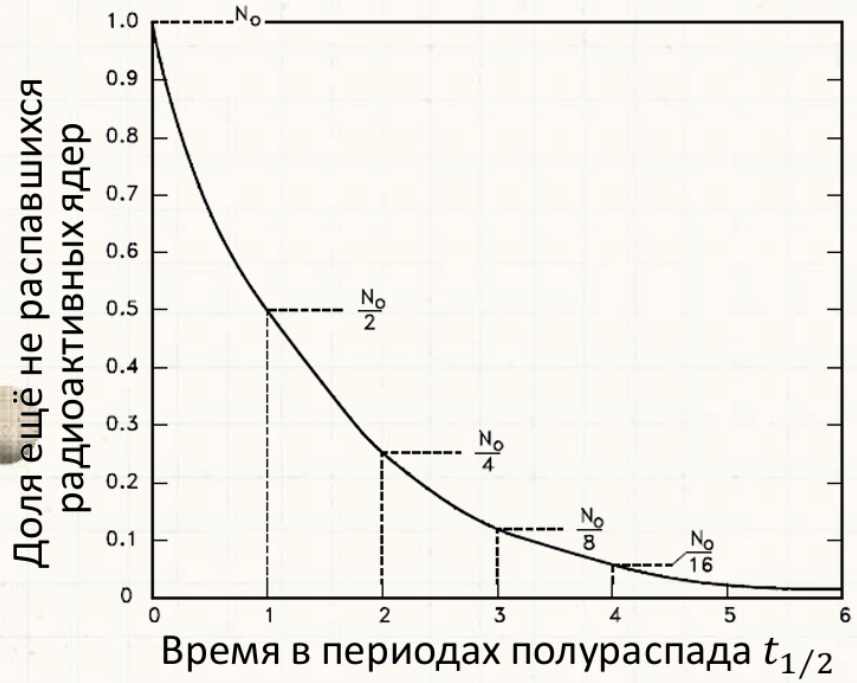
$\tau = \frac{1}{\lambda}$ – среднее время жизни ядра (до распада);

$t_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda}$ – период полураспада.

Среднее число $\bar{n}$ распадов за малое время t:

$$\bar{n} \approx N\lambda t$$

Закон радиоактивного распада



Период полураспада $T_{1/2}$ - время, требующееся для распада половины атомов данного радиоактивного вещества.

$$T_{1/2} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$

Средняя продолжительность т времени жизни атомов радиоактивного вещества определяется как сумма времён существования всех атомов данного изотопа, делённая на число атомов:

$$\tau = -\frac{1}{N_0}\int_{t=0}^{t=\infty} t\,dN = \frac{1}{N_0}\int_0^\infty t\lambda N dt = \lambda\int_0^\infty te^{-\lambda t}dt =$$

$$= -\left[\frac{\lambda t+1}{\lambda}e^{-\lambda t}\right]_0^\infty = \frac{1}{\lambda}.$$

Скорость распада – dN/dt атомов радиоактивного вещества называют абсолютной радиоактивностью (или абсолютной активностью) А препарата. Активность источника A – число распадов в единицу времени:

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

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

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

Единица измерения радиоактивности

[Беккерель] = Бк = [распад/с]

По сути – это **скорость** (интенсивность) распада – количество распавшихся ядер (в штуках) в единицу времени (секунда).

Единица измерения воздействия радиации на организм (эквивалентная доза)

[Зиверт] = Зв = [Дж/кг]

По сути – это **энергия**, переданная организму.

Корректно оценивать последствия воздействия радиации на человека именно в Зивертах, а не в Беккерелях.

Радиобиологический парадокс

В общем случае, когда имеется цепочка распадов 1→2→...n, процесс описывается системой дифференциальных уравнений

$$dN_i/dt = -\lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1}.$$

Решением системы (10) для активностей с начальными условиями $N_1(0) = N_{10}$; $N_i(0) = 0$ будет

$$A_n(t) = N_{10} \sum_{i=1}^{n} c_i e^{-\lambda_i t},$$

где

$$c_m = \frac{\prod_{i=1}^{n} \lambda_i}{\prod_{i=1}^{n}{}' (\lambda_i - \lambda_m)}.$$

Штрих означает, что в произведении, которое находится в знаменателе, опускается множитель с $i = m$.

Выводы:

1. Радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер, сопровождающееся испусканием радиоактивного излучения.
2. Основными видами распада являются α-, β- и γ-распады, различающиеся механизмами и характером испускаемого излучения.
3. Закон радиоактивного распада описывает экспоненциальное уменьшение числа нестабильных ядер и активности источника во времени.
4. Постоянная распада, период полураспада, среднее время жизни и активность являются основными количественными характеристиками радиоактивных процессов.

Вопросы для самопроверки:

1) Что называют радиоактивностью и в чём состоит её физическая природа?
2) Как формулируется закон радиоактивного распада и что означает постоянная распада λ?
3) Что такое период полураспада и как он выражается через λ?
4) Почему β-спектр частиц является непрерывным, а α-спектр – дискретным?
5) В чём заключается практическое значение закона радиоактивного распада в ядерной медицине?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

