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

«Радиологические измерения»

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

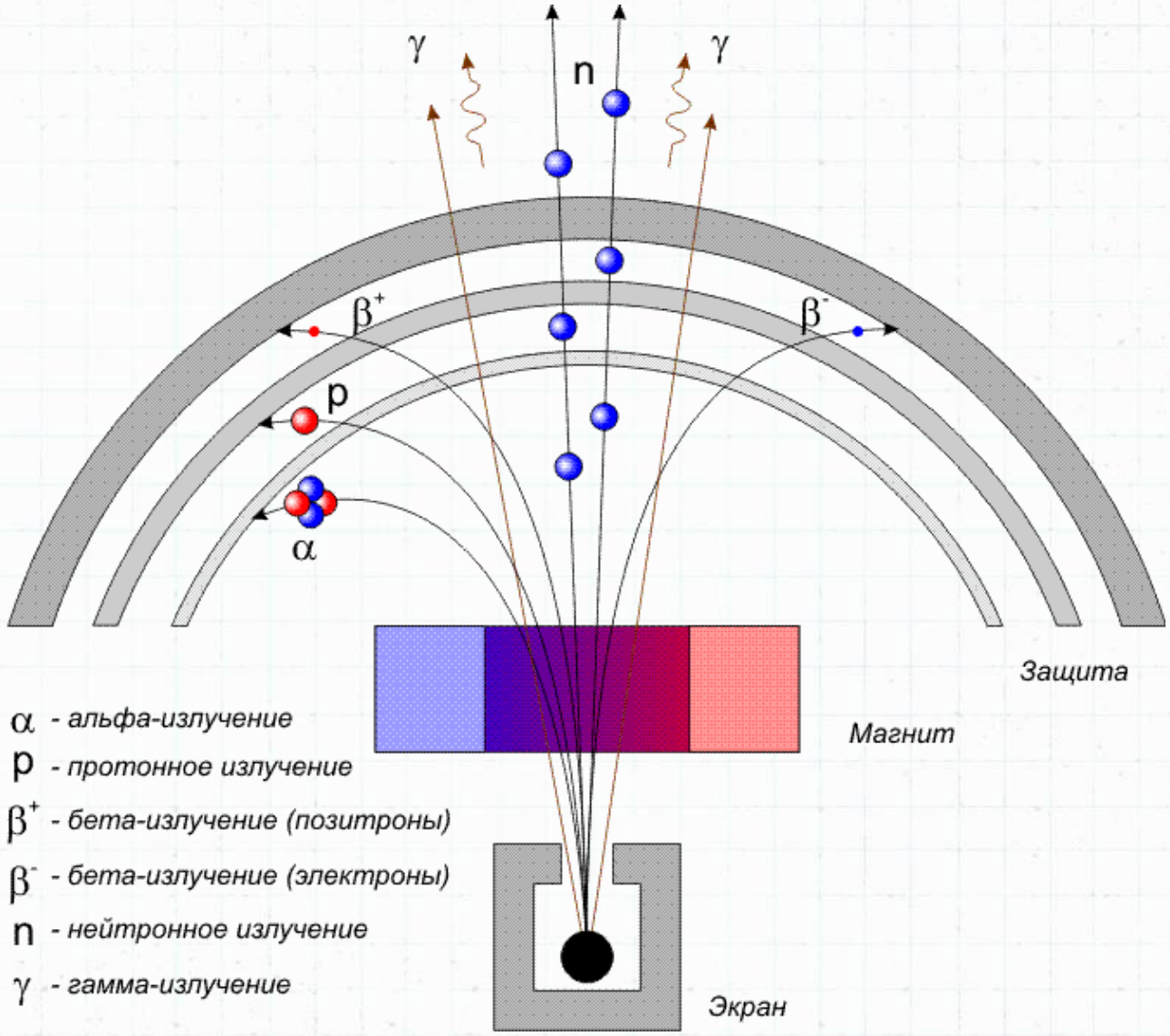
и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.

Цель лекции: сформировать у обучающихся представление об основных физических механизмах взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом, закономерностях потерь энергии и ослабления излучения, а также их значении для радиологических измерений и радиационной защиты.

Результаты обучения:

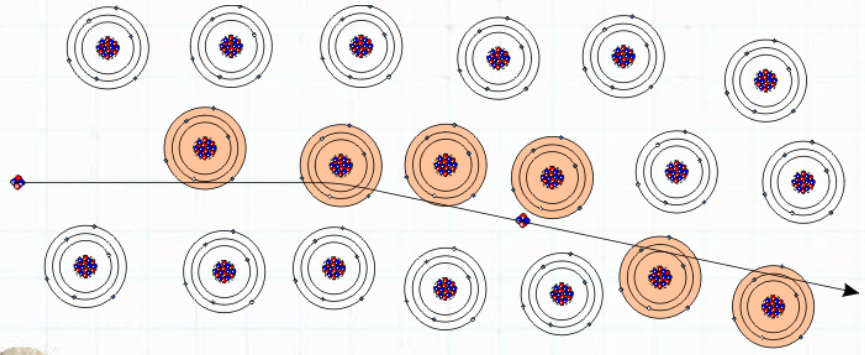
По завершении лекции обучающийся будет способен:

1. Объяснять особенности взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом.
2. Характеризовать основные механизмы потерь энергии заряженных частиц, включая ионизационные и радиационные потери.
3. Определять тормозную способность вещества и пробег заряженных частиц, объяснять физический смысл формулы Бете-Блоха.
4. Различать основные механизмы взаимодействия γ-квантов с веществом: фотоэффект, когерентное и комптоновское рассеяние, рождение электрон-позитронных пар.
5. Применять закон ослабления γ-излучения и характеризовать основные механизмы взаимодействия нейтронов с веществом.


γ
n
γ
β+
β-
p
α
Защита
Магнит
Экран
α - альфа-излучение
p - протонное излучение
β+ - бета-излучение (позитроны)
β- - бета-излучение (электроны)
n - нейтронное излучение
γ - гамма-излучение

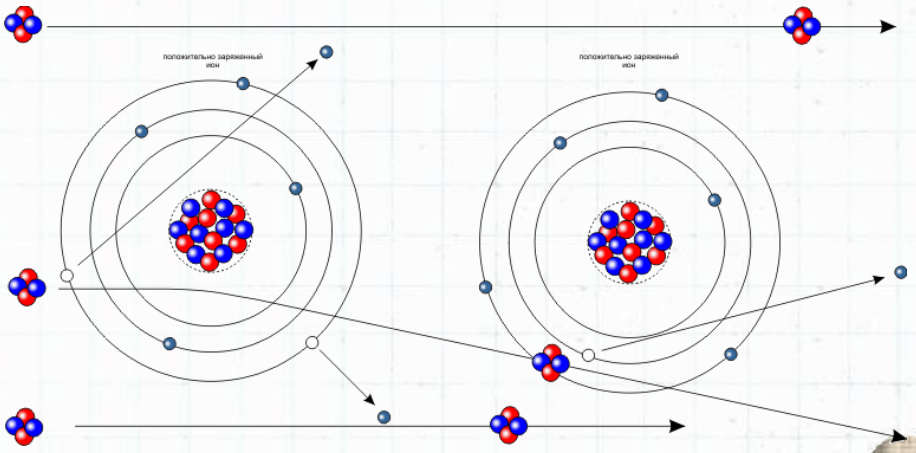
Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество

Ионизация атомов вещества

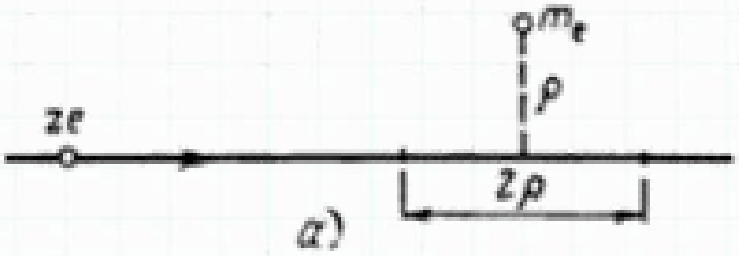


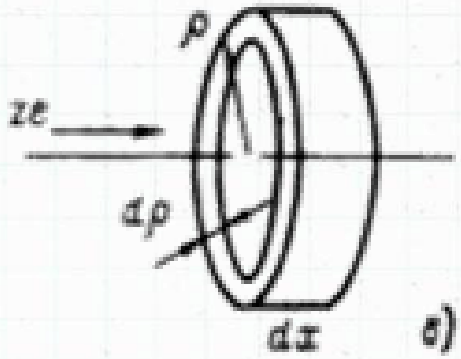
ИОНИЗАЦИЯ АТОМА – это процесс превращения электрически нейтрального атома вещества в ион, то есть электрически заряженную частицу, образующуюся при потере или избыточном присоединении электронов данным атомом.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ – это потери энергии движущимися сквозь вещество заряженными частицами на механизм ионизации атомов вещества



ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ





$$\Delta p_\perp = \int F_\perp \, dt.$$

$$\Delta p_\perp = 2ze^2/(\rho v).$$

$$V = 2\pi \rho d\rho dx.$$

$$Vn_e = 2\pi \rho n_e d\rho dx.$$

$$\Delta T = \Delta p_\perp^2/(2m_e) = [2z^2e^4/(m_e v^2)](1/\rho^2).$$

$$dT = \Delta T V n_e = \left(\frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2}\right)\frac{d\rho}{\rho}\,dx,$$

а на единице длины

$$\frac{dT}{dx}(\rho) = \left(\frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2}\right)\left(\frac{d\rho}{\rho}\right).$$

Полные ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

$$\frac{dT}{dx} = \int_{\rho_{мин}}^{\rho_{макс}} \frac{dT}{dx}(\rho)\,d\rho = \frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{\rho_{макс}}{\rho_{мин}}.$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{иониз} = -\frac{4\pi z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2\right],$$

$$-\frac{dE}{dx} = 3.1 \cdot 10^5 \cdot \frac{Z \cdot z^2 \rho}{A\beta^2}\left(11.2 + \ln\frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} - \beta^2\right)\frac{эВ}{см}$$

Зависимость Ионизационных потерь от частицы и среды

$$\left(dT_p/dx\right)_{v=v_0}=\left(dT_d/dx\right)_{v=v_0}.$$

$$\left(dT_d/dx\right)_{T=T_0}=\left(dT_p/dx\right)_{T=T_0/2}.$$

$$\left(dT_\alpha/dx\right)_{v=v_0}=4\left(dT_p/dx\right)_{v=v_0}$$

$$\left(dT_\alpha/dx\right)_{T=T_0}=4\left(dT_p/dx\right)_{T=T_0/4}.$$

Удельные потери сильно изменяется при переходе от среды к среде.

T, МэВ	$(dt/d\xi)_{\text{возд}}$, МэВ/(г·см$^{-2}$)	$(dT/d\xi)_{Pb}$, МэВ/(г·см$^{-2}$)	T, МэВ	$(dT/d\xi)_{\text{возд}}$, МэВ/(г·см$^{-2}$)	$(dT/d\xi)_{Pb}$, МэВ/(г·см$^{-2}$)
1	300	150	100	7,5	5
10	50	30	$>10^3$	2,3	1,6

Пробег тяжелой заряженной частицы

- Потери энергии приводят к постепенному торможению частицы и, в конечном итоге, к её остановке.
- Полный путь, пройденный заряженной частицей в веществе называется **пробегом.**
- Энергия тяжелой заряженной частицы *a* меняется в веществе от E_a до 0 в результате различных механизмов взаимодействия, основным из которых для энергий $E \leq 100$ Мэв являются **ионизационные потери**.

$$R(E_a) = \int_0^R dx = \int_{E_a}^0 \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{полн}} = \int_0^{E_a} \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE$$

Пробег тяжелой заряженной частицы

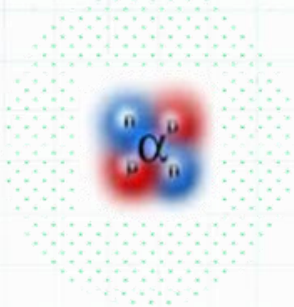
Средний пробег R_α моноэнергетических α - частиц обычно рассчитывают по эмпирическим формулам. В воздухе при нормальных условиях:

$$R_\alpha = a * E_\alpha^m$$

где R_α - пробег в см; E_α - кинетическая энергия α - частиц в Мэв, m – показатель степени.

Для α-частиц ($4<E_\alpha<9$ Мэв) a=0.318 , m=1.5 . Для α-частиц с более высокими энергиями $E\alpha\leq200$ (Мэв) a=0.148 , n=1.8.

При необходимости можно приблизительно выразить пробег альфа-частицы с энергией E_α в любом веществе с ее пробегом в воздухе как:



$$R_\alpha^A(см) = 0,56\cdot10^{-3}\cdot\frac{A^{1/3}}{\rho_A}\cdot R_\alpha^{воздух} =$$

$$=1,78\cdot10^{-4}\cdot\frac{A^{1/3}}{\rho_A}\cdot E_\alpha^{3/2}$$

Здесь E_α в МэВ, плотность вещества с массовым числом A ρ_A в г/см³.

Часто вместо линейного пробега используют массовый пробег заряженной частицы R_m, выражаемый в граммах на квадратный сантиметр (г/см^2).

$R_m = \rho R$ где ρ - плотность вещества в г/см^3.

Прохождение легких заряженных частиц через вещество

Ионизационные потери энергии электронами.

Радиационные потери энергии электронов.

Удельные потери энергии электронов являются суммой ионизационных и радиационных потерь

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Удельные ионизационные потери энергии электронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ион.} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 T_e}{\bar{I}^2}\frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2)\ln 2 + 1 - \beta^2\right],$$

где m_e – масса электрона ($m_e c^2$ = 511 кэВ – энергия покоя электрона); T_e – кинетическая энергия электрона; c - скорость света; $\beta = v/c$; v - скорость частицы; $n_e = N_A (Z/A)\rho$ – плотность электронов вещества, где N_A – число Авогадро, Z – заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона, A – атомный вес среды, ρ – плотность среды; $\bar{I}$ – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица: $\bar{I} = 13.5Z$ эВ; $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см – классический радиус электрона

Прохождение легких заряженных частиц через вещество

Ионизационные потери энергии электронами.

Радиационные потери энергии электронов.

Удельные потери энергии электронов являются суммой ионизационных и радиационных потерь

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Удельные радиационные потери энергии электронов

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{рад.} = -\frac{16}{3} n_e E \frac{Z r_0^2}{137} \qquad E < m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{рад.} = -n_e E \frac{Z r_0^2}{137}\left(4 \ln \frac{2E}{m_e c^2} - \frac{4}{3}\right) \qquad 1 < E/m_e c^2 < 137/Z^{1/3}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{рад.} = -n_e E \frac{Z r_0^2}{137}\left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9}\right) \qquad E/m_e c^2 > 137/Z^{1/3}, \quad (4)$$

где m_e – масса электрона ($m_e c^2 = 511$ кэВ - энергия покоя электрона); c – скорость света; Z – заряд частицы в единицах заряда позитрона; n_e – плотность электронов в веществе; $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона

Критическая энергия

Отношение удельных радиационных и ионизационных потерь энергии определяется зависимостью:

$$\frac{(dE/dx)_{рад}}{(dE/dx)_{ион}} \approx \frac{E_a Z_A}{1600 m_a c^2}$$

где E выражается в МэВ, Z - средний заряд ядер вещества.

Энергия электронов, при которой величина удельных радиационных потерь равна величине удельных ионизационных потерь, называется критической энергией $E_{кр}$

$$E_{кр} = 600/Z \text{ (МэВ)}$$

При энергиях электрона выше критической радиационные потери преобладают над ионизационными.

$E_{кр}$ зависит от вещества. Так для электронов с энергией 100 МэВ радиационные потери в железе и свинце превышают ионизационные соответственно в 3 и 10 раз.

Пробег электронов в веществе

Экстраполированные пробеги в **г/см²** электронов с энергией ***E*** (**МэВ**) в алюминии можно определить по формулам:

$$R_э(Al) = 0.407 \cdot E^{1.38} \text{ при } 0.15 \text{ МэВ} \le E < 0.8 \text{ МэВ},$$

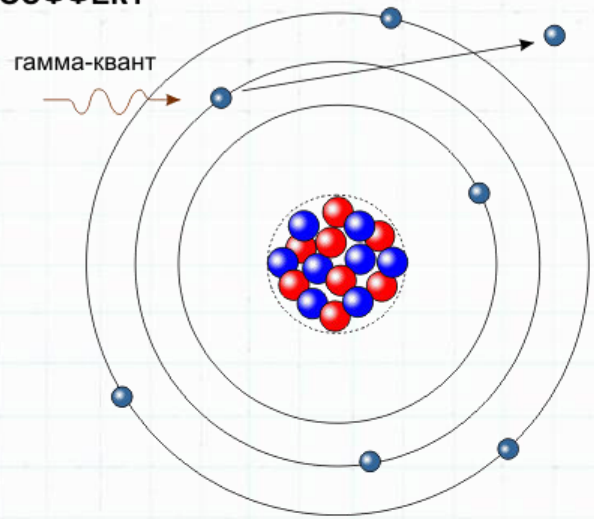
$$R_э(Al) = 0.542 \cdot E - 0.133 \text{ при } 0.8 \text{ МэВ} \le E < 3.0 \text{ МэВ},$$

Экстраполированный пробег электронов в веществе ***X*** с зарядом ***Z*** и массовым числом ***A*** связан с пробегом в алюминии следующим образом:

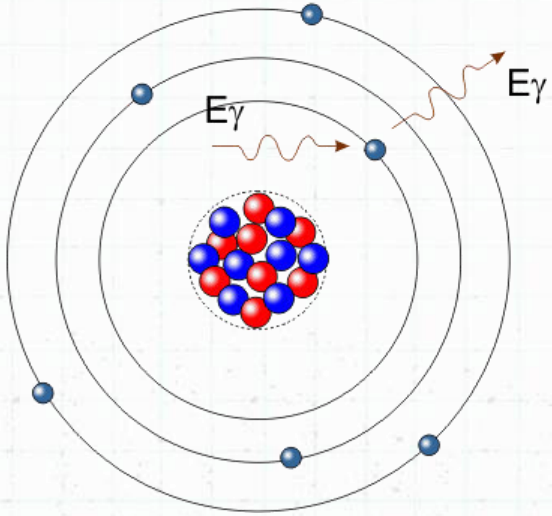
$$R_э^x = R_э^{Al} \frac{(Z/A)_{Al}}{(Z/A)_x} \quad (г/см^2)$$

Прохождение гамма-квантов через вещество

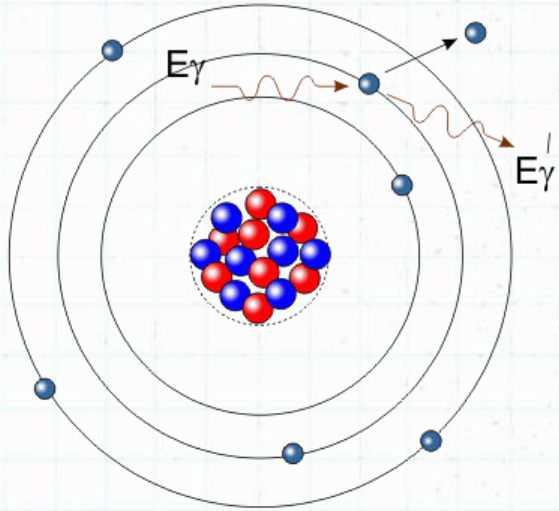
1. ФОТОЭФФЕКТ



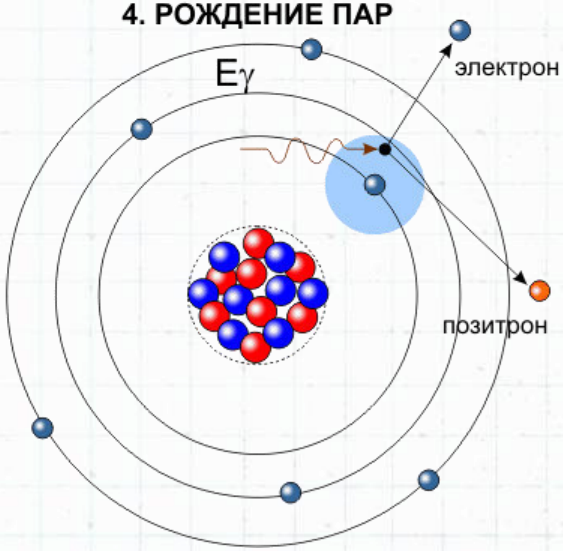
2. КОГЕРЕНТНОЕ ТОМСОН-РЭЛЕЕВСКОЕ РАССЕЯНИЕ



3. НЕКОГЕРЕНТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ



4. РОЖДЕНИЕ ПАР



Прохождение гамма-квантов через вещество

ЗАКОН ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ – интенсивность параллельного монохроматического пучка после прохождения однородного слоя толщиной x

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ГАММА-КВАНТОВ – это величина, обратная коэффициенту ослабления в данном веществе

$$l = \frac{1}{\mu}$$

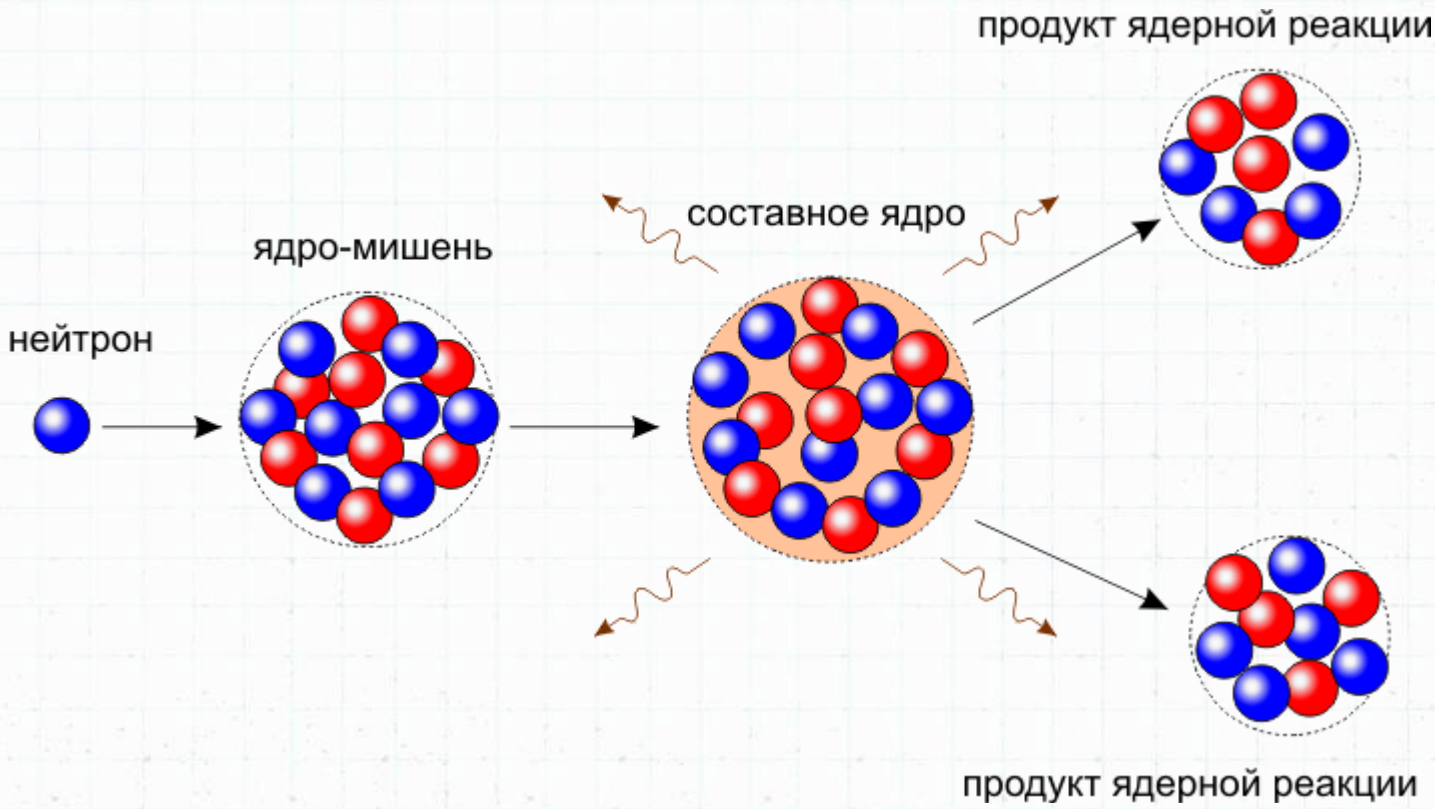
Толщина половинного ослабления

$$I_0 \cdot e^{-\mu x} = \frac{I_0}{2} \qquad e^{-\mu x} = \frac{1}{2} \qquad x_{1/2} = \frac{Ln2}{\mu} \approx \frac{0{,}69}{\mu}$$

Прохождение нейтронов через вещество

Ядерные реакции

$$n + {}^{10}_{5}B_5 \rightarrow \left({}^{11}_{5}B_6\right)^* \rightarrow {}^{7}_{3}Li_4 + {}^{4}_{2}He_2$$



Выводы:

1. Механизмы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом определяются природой, энергией частиц и характеристиками среды.
2. Заряженные частицы теряют энергию преимущественно на ионизацию и возбуждение атомов, а электроны также испытывают радиационные потери.
3. Тормозная способность и пробег характеризуют закономерности потерь энергии заряженных частиц при прохождении через вещество.
4. Основными механизмами взаимодействия γ-квантов с веществом являются фотоэффект, рассеяние и рождение электрон-позитронных пар; ослабление первичного пучка описывается экспоненциальным законом.
5. Нейтроны взаимодействуют с веществом посредством ядерных реакций, а знание механизмов взаимодействия различных видов излучения необходимо для радиологических измерений и радиационной защиты.

Вопросы для самопроверки:

1) Объясните, в чём состоит принципиальное отличие взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом?
2) Объясните понятие ионизационных потерь и их роль в процессе движения заряженных частиц через вещество.
3) Что понимается под средним пробегом и экстраполированным пробегом e^-?
4) Какова физическая суть формулы Бете-Блоха и для каких частиц она применяется?
5) Перечислите основные механизмы взаимодействия γ-квантов с веществом.
6) В чём заключается закон поглощения γ-квантов?
7) Почему *n* считаются наиболее опасным видом излучения с точки зрения радиационной безопасности?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

