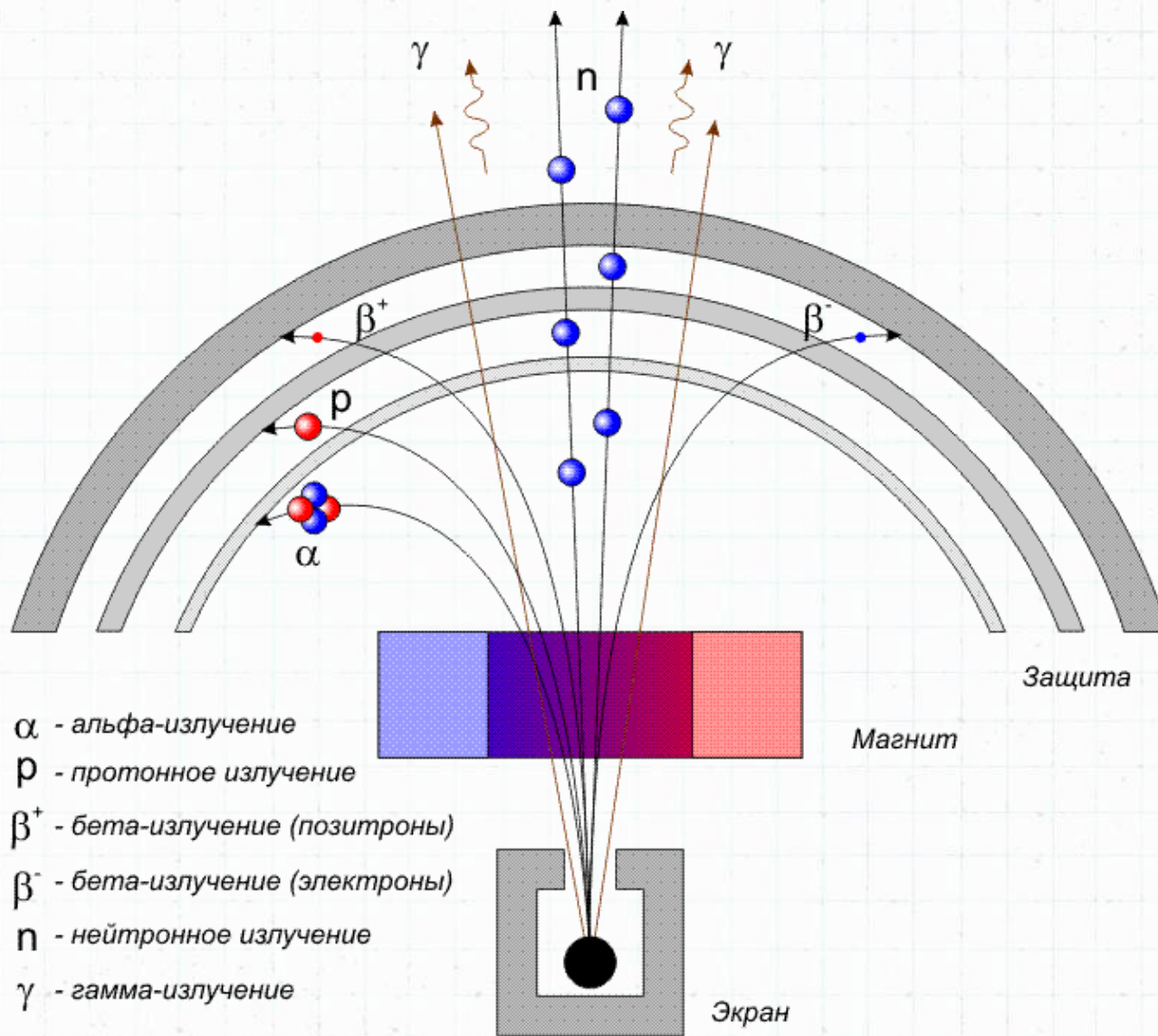


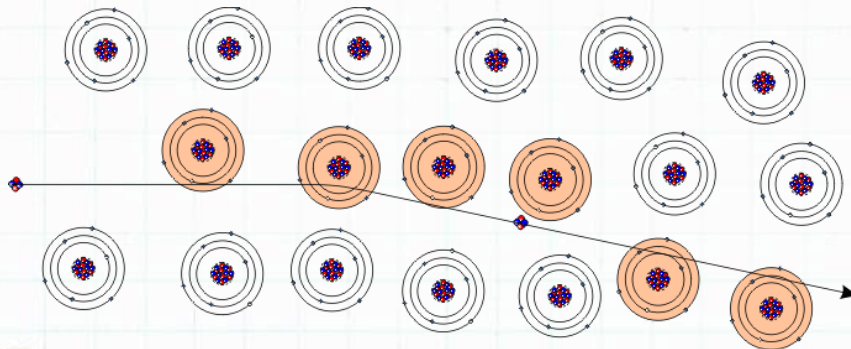
«Радиологические измерения»

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

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

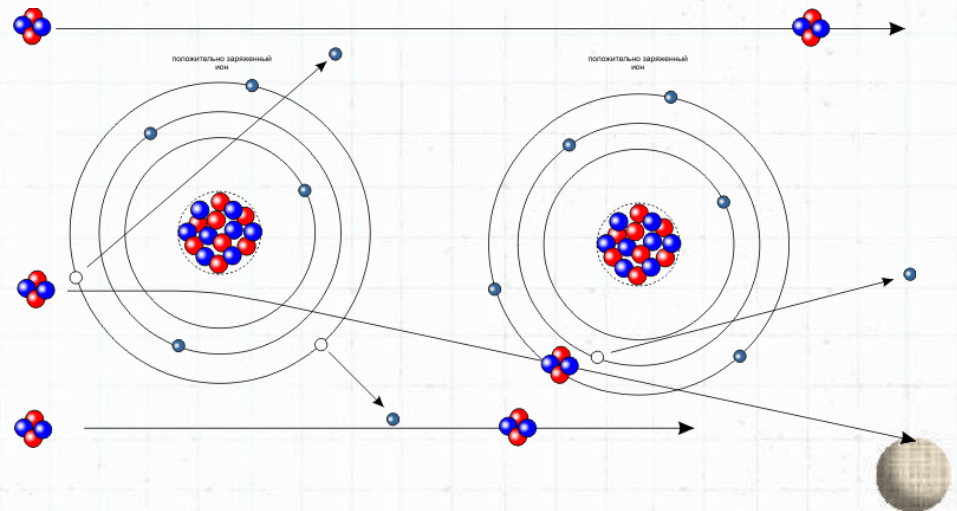


Ионизация атомов вещества

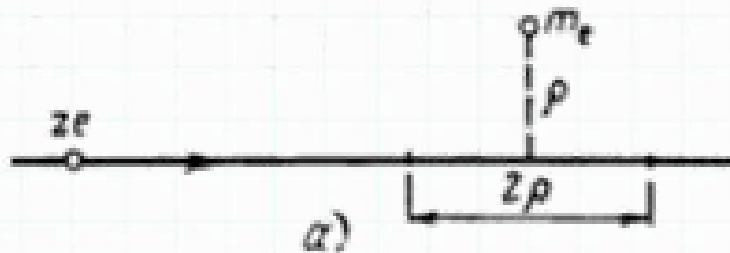


ИОНИЗАЦИЯ АТОМА – это процесс превращения электрически нейтрального атома вещества в ион, то есть электрически заряженную частицу, образующуюся при потере или избыточном присоединении электронов данным атомом.

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



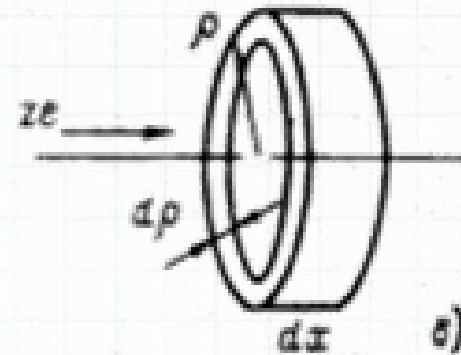
ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ



$$\Delta p_{\perp} = \int F_{\perp} dt.$$

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Зависимость Ионизационных потерь от частицы и среды

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

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

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

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

Удельные потери сильно изменяется при переходе от среды к среде.

T, МэВ	$(dT/d\xi)_{\text{возд.}}$ МэВ/(г·см ⁻²)	$(dT/d\xi)_{\text{Pb}}$ МэВ/(г·см ⁻²)	T, МэВ	$(dT/d\xi)_{\text{возд.}}$ МэВ/(г·см ⁻²)	$(dT/d\xi)_{\text{Pb}}$ МэВ/(г·см ⁻²)
1 10	300 50	150 30	100 > 10 ³	7,5 2,3	5 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.
- $$R(E_a) = \int_0^R dx = \int_{E_a}^0 \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{полн}}} = \int_0^{E_a} \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE$$

Пробег тяжелой заряженной частицы

Средний пробег R_α моноэнергетических α - частиц обычно рассчитывают по эмпирическим формулам.

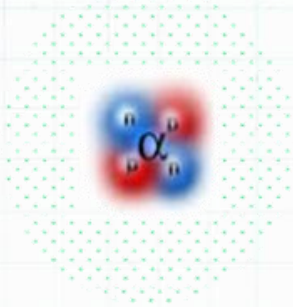
$$R_\alpha = a * E_\alpha^m$$

В воздухе при нормальных условиях:

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 $E_\alpha \leq 200$ (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:



$$R_\alpha^A (\text{см}) = 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A^{1/3}}{\rho_A} \cdot R_\alpha^{\text{воздух}} =$$
$$= 1,78 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A^{1/3}}{\rho_A} \cdot E_\alpha^{3/2}$$

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/см²).

$$R_m = \rho R \quad \text{где } \rho - \text{плотность вещества в г/см}^3.$$

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

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

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

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

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

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

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:

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

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** $E_{\text{кр}}$

$$E_{\text{кр}} = 600/Z \text{ (МэВ)}$$

При энергиях электрона выше критической радиационные потери преобладают над ионизационными.

$E_{\text{кр}}$ 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/см^2 электронов с энергией E (МэВ) в алюминии можно определить по формулам:

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

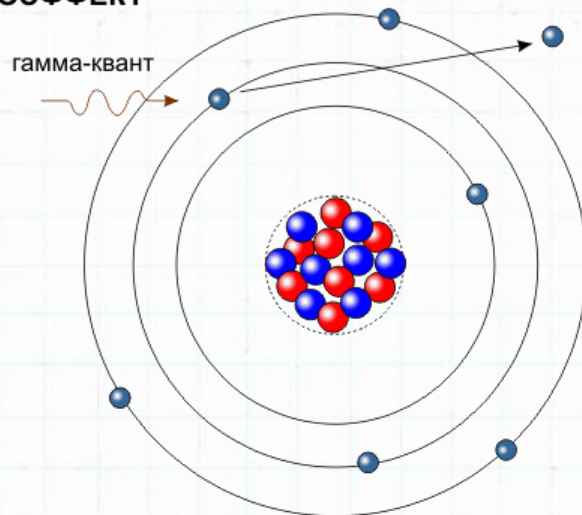
$$R_{\text{э}}(\text{Al}) = 0.542 \cdot E - 0.133 \text{ при } 0.8 \text{ МэВ} \leq E < 3.0 \text{ МэВ},$$

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

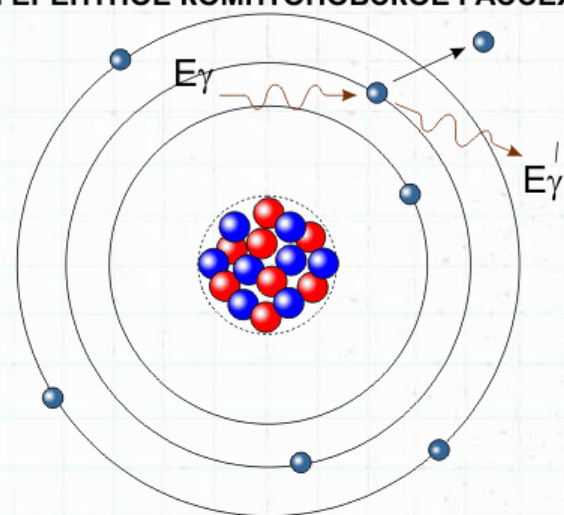
$$R_{\text{э}}^x = R_{\text{э}}^{\text{Al}} \frac{(Z / A)_{\text{Al}}}{(Z / A)_x} \quad (\text{г} / \text{см}^2)$$

Прохождение гамма-квантов через вещество

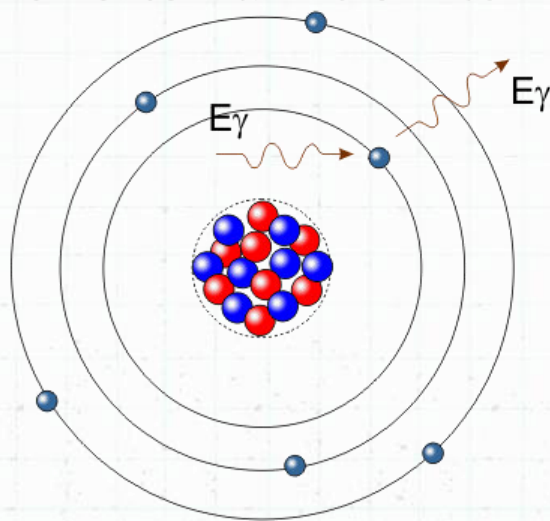
1. ФОТОЭФФЕКТ



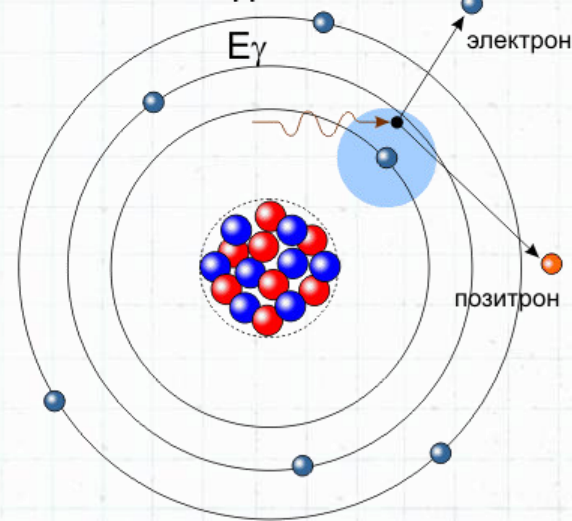
3. НЕКОГЕРЕНТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ



2. КОГЕРЕНТНОЕ ТОМСОН-РЭЛЕЕВСКОЕ 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

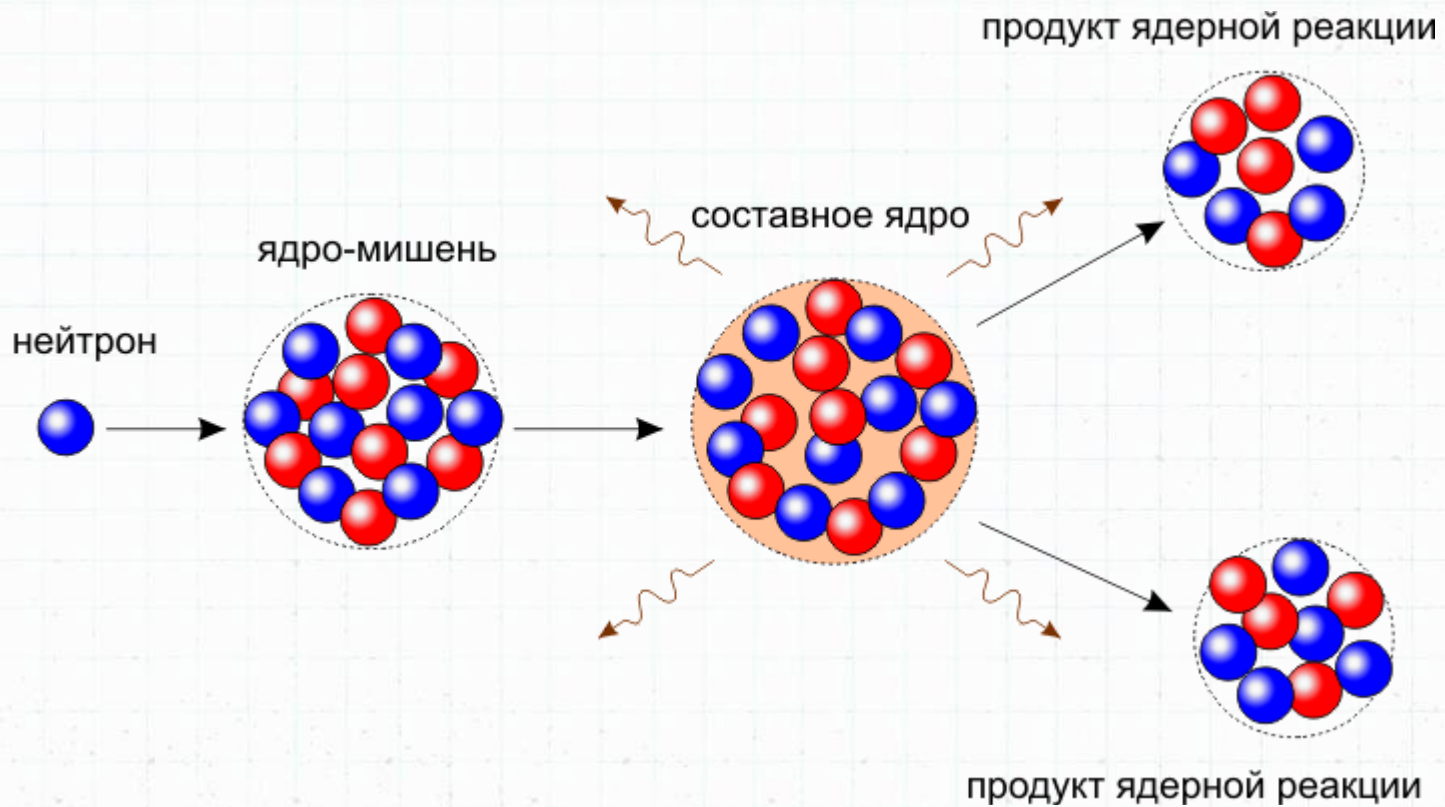
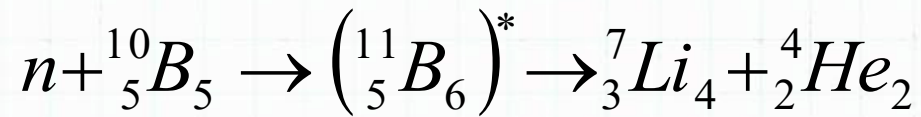
$$l = \frac{1}{\mu}$$

Толщина половинного ослабления

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

Прохождение нейтронов через вещество

Ядерные реакции



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

