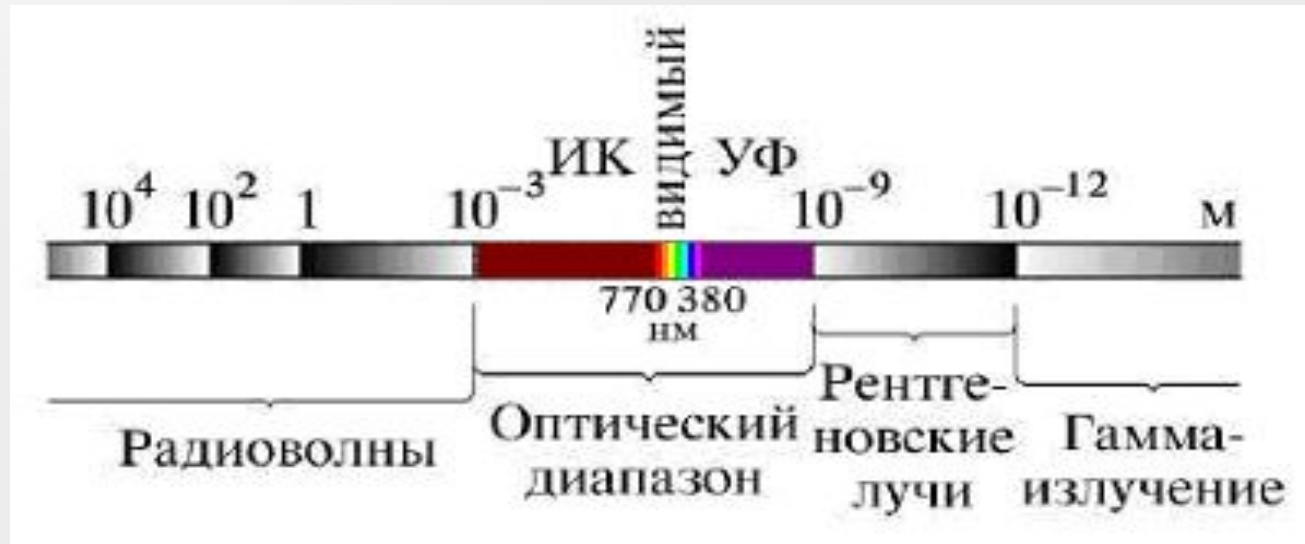


# Взаимодействие ИИ с веществом

# Атомное излучение

– это энергия в виде ЭМ излучения или частиц.

**Электромагнитное излучение** (фотоны): рентгеновское и гамма-излучения, **ВИДИМЫЙ** СВЕТ.



**Корпускулярное излучение** – альфа-, бета- и нейтронное излучение.

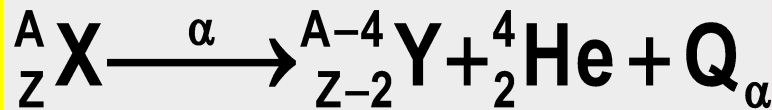
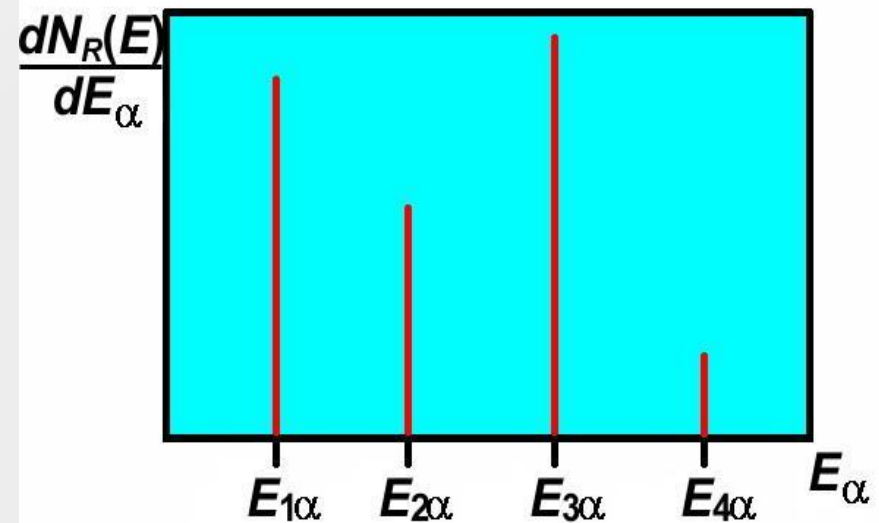
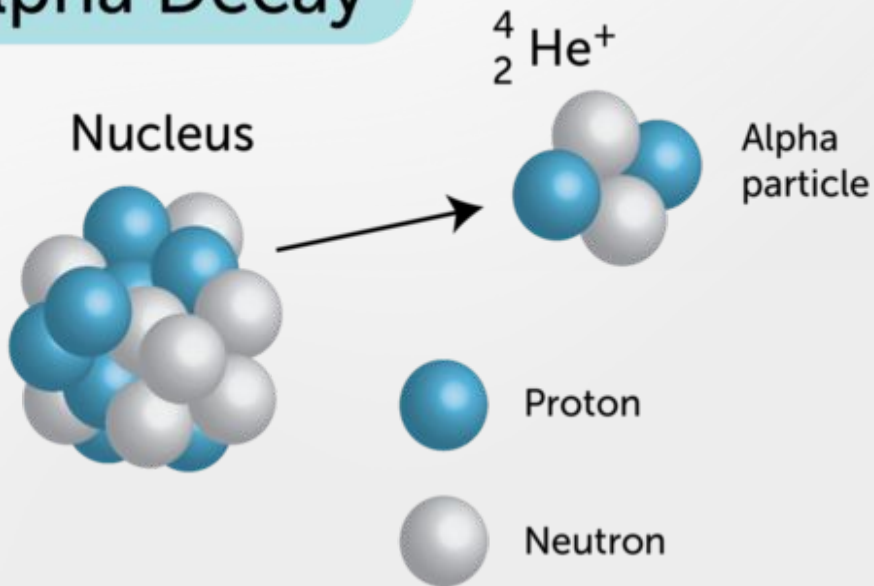
# Ионизирующее излучение

– излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации атомов и молекул, т.е. к возникновению в облученном веществе ионов разных знаков:

- **косвенно** ионизирующие  
(нейтроны и фотоны)
- **непосредственно** ионизирующие  
(заряженные частицы)

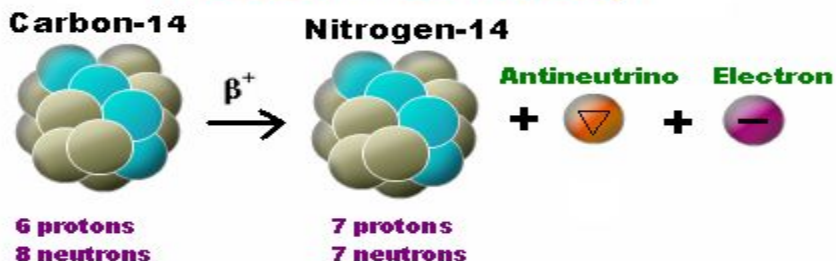
# Альфа-излучение

## Alpha Decay

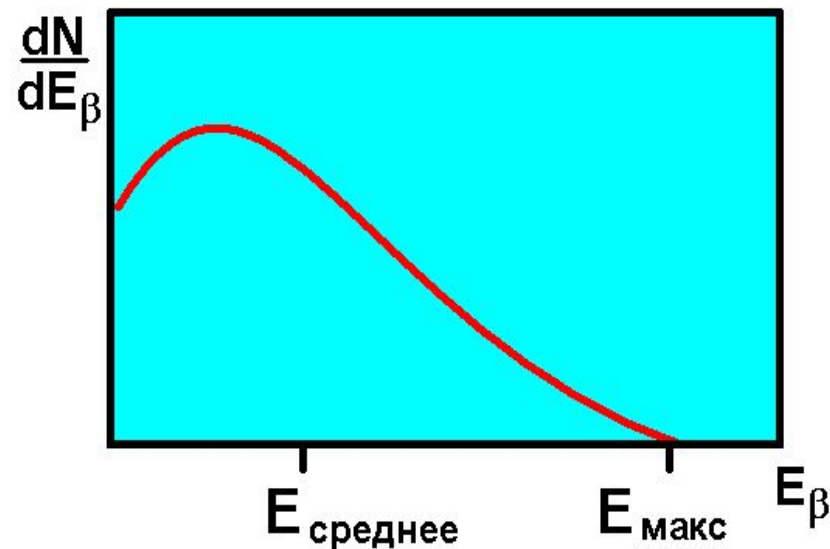
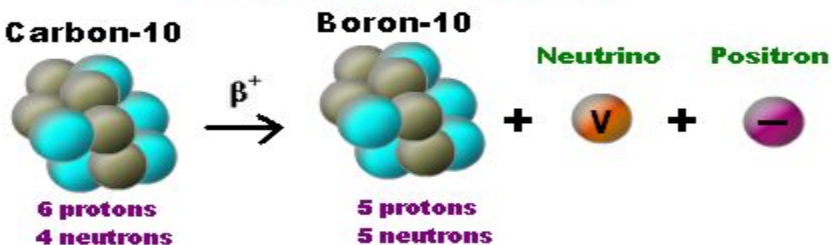


# Бета-излучение

## Beta-minus Decay

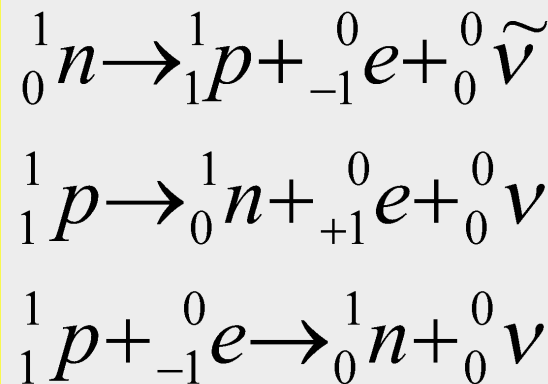
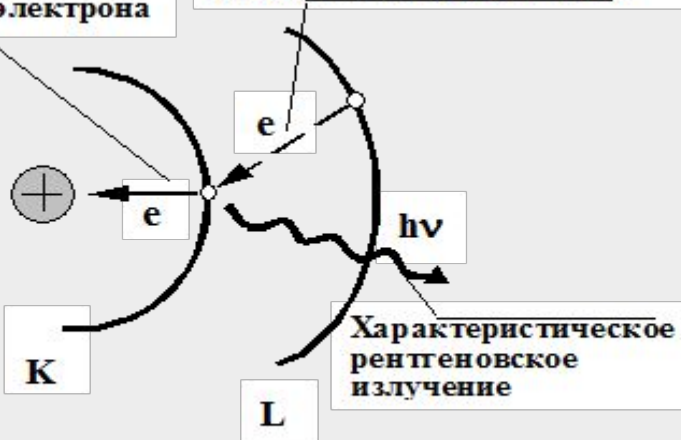


## Beta-plus Decay



Захват электрона

Переход электрона с L-оболочки на K-оболочку



# Электромагнитное излучение

## *Рентгеновское излучение*

переход электронов между атомными оболочками.

## *Тормозное излучение*

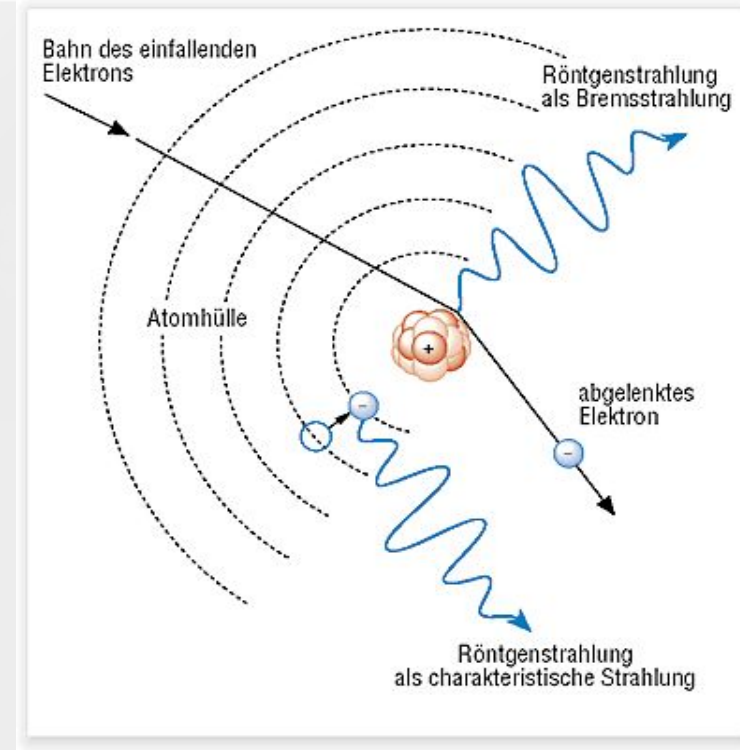
электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

## *Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*

ядерное превращение.

## *Аннигиляционное излучение*

аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



## Таблица спектров ИИ

Частицы или фотоны

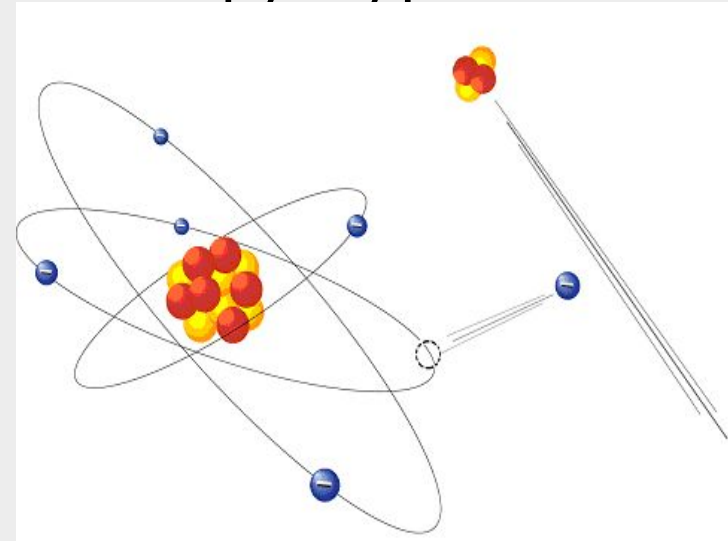
Виды распада	Частицы или фотоны				
	$e^-$	$e^+$	$\alpha$	$\gamma$	$n$
$\alpha$	–	–	Д	Д / –	–
$\beta^-$	Н	–	–	Д / –	–
$\beta^+$	–	Н	–	Д	–
ЭЗ	Д	–	–	Д	–
ИП	–	–	–	Д	–
СД	Н	–	–	Д	Н

\*Д – дискретный спектр излучения, Н – непрерывный спектр

# ПРЯМАЯ ИОНИЗАЦИЯ

**Прямая ионизация** атомов и молекул заряженными частицами – основной процесс передачи энергии излучения веществу.

Ионизация вещества является результатом взаимодействия **первичных и вторичных заряженных частиц** с электронной структурой атома.

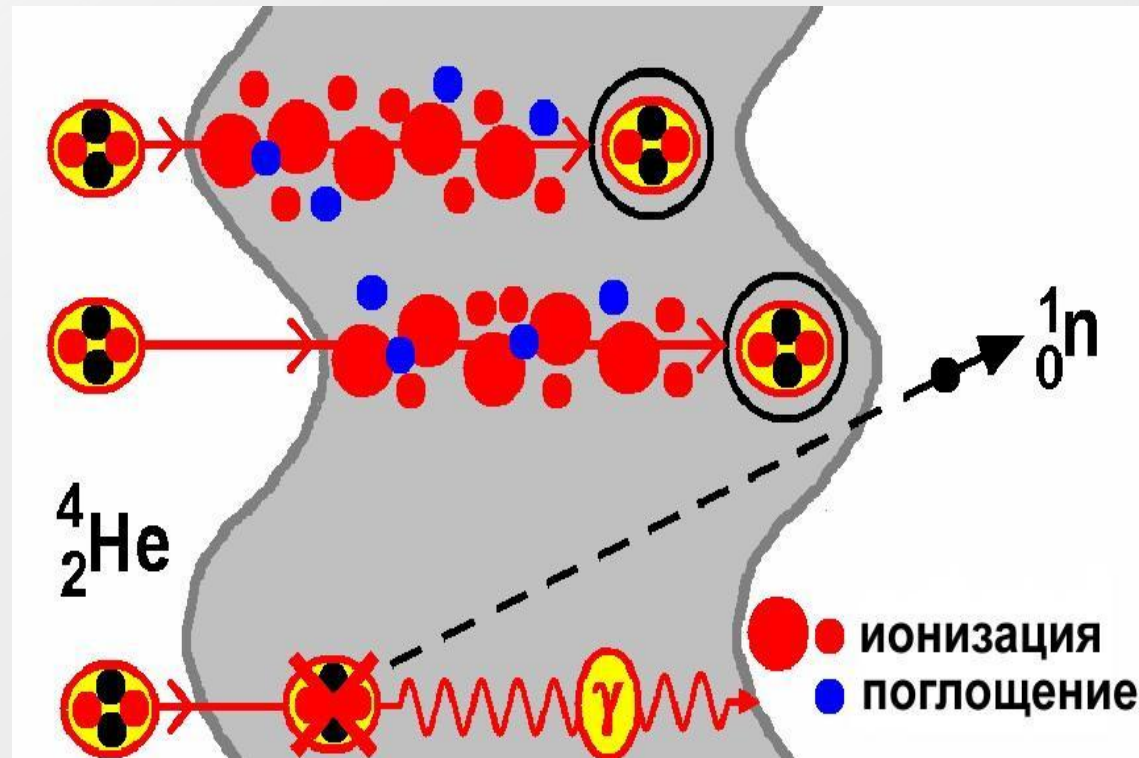




# Взаимодействие альфа-частиц / тяжелых заряженных частиц ( $p, d, \text{я.о.}$ )

## Процессы взаимодействия:

- возбуждение,
- ионизация,
- поглощение



Пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе: 4-10 см

Плотность ионизации:  $2 \cdot 10^5$  пар ионов ( $E_\alpha = 7 \text{ МэВ}$ )

# Возбуждение и ионизация

• *Рентгеновское излучение*  
переход электронов между  
атомными оболочками.

*Тормозное излучение*  
электронно-ядерное  
кулоновского взаимодействия.

*Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*  
ядерное превращение.

*Аннигиляционное излучение*  
аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .

# Поглощение

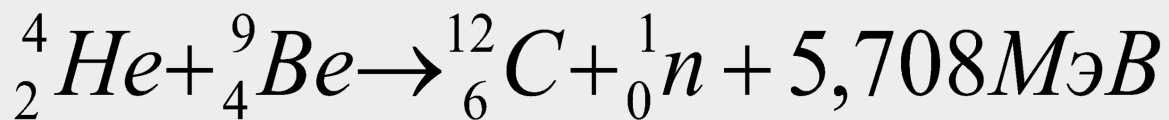
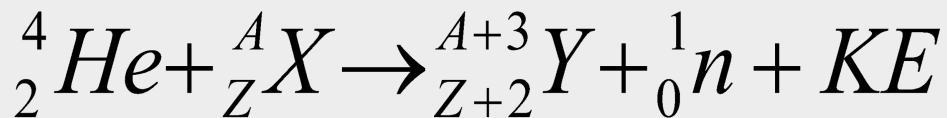
p или  $\alpha$ -частица  
поглощаются  
ядром  
(лег. ядра:  
Be, B, C, N, O, F)



атом в  
возбужденном  
состоянии



ядерное  
излучение



производство  
радионуклидных  
источников  $n$ -ОВ

## Средние потери энергии (формула Бете):

$$S_p = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}}\right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

$m_e$  – масса электрона

( $m_e c^2 = 511$  кэВ – энергия покоя электрона);

$\beta = v/c$ ;  $c$  – скорость света;  $v$  – скорость частицы;

$Z$  – заряд частицы в единицах заряда позитрона;

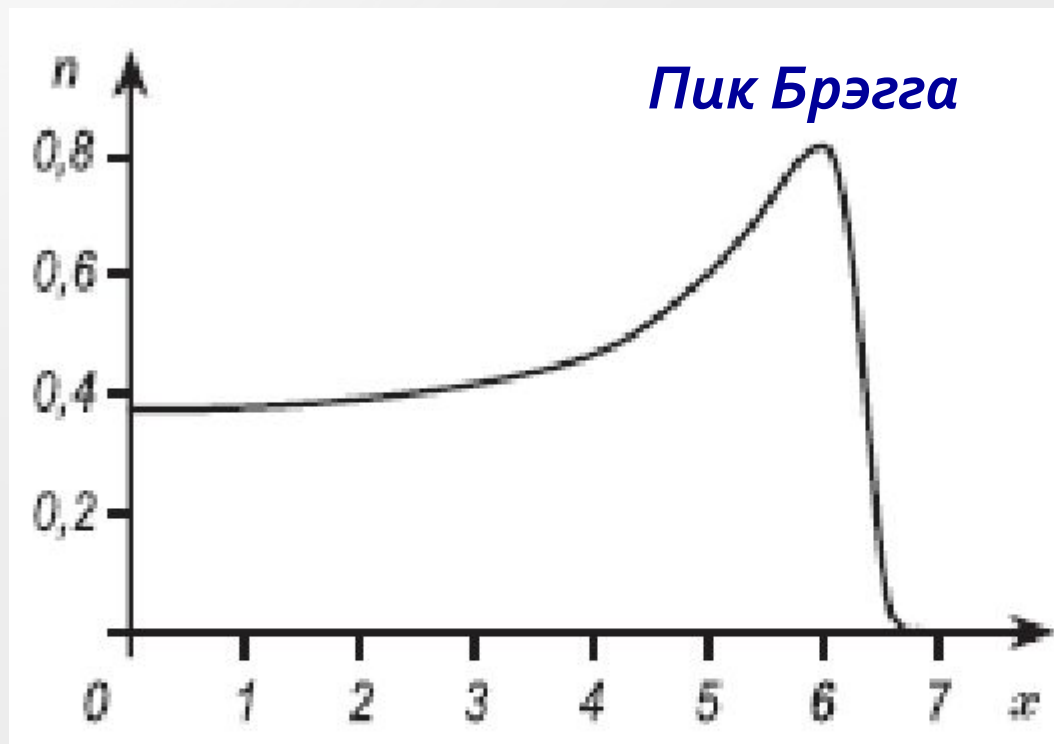
$n_e$  – плотность электронов вещества;

$\bar{I}$  – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица:  $\bar{I} = 13,5 \cdot Z'$  эВ,  $Z'$  – заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона;

$r_0 = e^2/m_e c^2 = 2,818 \cdot 10^{-13}$  см – классический радиус электрона.

Максимум ионизации  $\alpha$ -частиц соответствует энергии  $0,6$  МэВ, протонов –  $0,15$  МэВ.

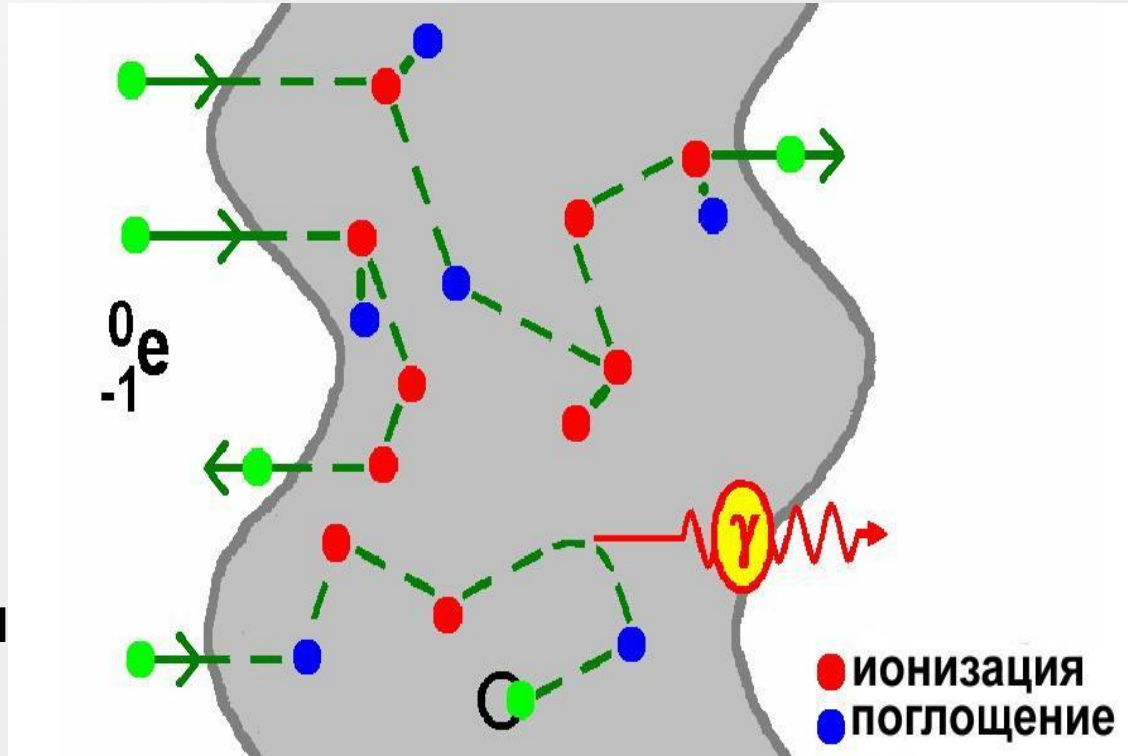
## Зависимость удельной ионизации от толщины слоя вещества для $\alpha$ -частиц



# Взаимодействие электронов

## Процессы взаимодействия:

- упругие
  - рассеяние
- неупругие
  - возбуждение
  - ионизация
  - тормозное излучение



Плотность ионизации: 100 пар ионов на 1 мкм

Мягкое  $\beta$ -излучение:  $E_{\beta} \leq 10$  кэВ

Жесткое  $\beta$ -излучение:  $E_{\beta} > 10$  кэВ

# Энергия $\beta$ -частиц расходуется на:

- ионизационные потери
- радиационные потери
- рассеяние

## Характеристическое X-излучение

The diagrams show an atom with a central nucleus and concentric electron shells labeled K, L, and M. Arrows indicate transitions between shells and the emission of various types of radiation.

**Тормозное излучение (Bremsstrahlung):**

- Transition: between atomic shells.
- Process: deceleration of an electron.
- Interaction: Coulomb interaction.
- Radiation:  $\gamma$ -quanta.
- Process: nuclear transformation.
- Interaction: annihilation of  $e^+$  and  $e^-$ .

**Характеристическое X-излучение (Characteristic X-ray):**

- Transition: between atomic shells.
- Process: electron transition.
- Interaction: Coulomb interaction.
- Radiation:  $\gamma$ -quanta.
- Process: nuclear transformation.
- Interaction: annihilation of  $e^+$  and  $e^-$ .

**Аннигиляционное излучение (Annihilation radiation):**

- Transition: between atomic shells.
- Process: electron transition.
- Interaction: Coulomb interaction.
- Radiation:  $\gamma$ -quanta.
- Process: nuclear transformation.
- Interaction: annihilation of  $e^+$  and  $e^-$ .

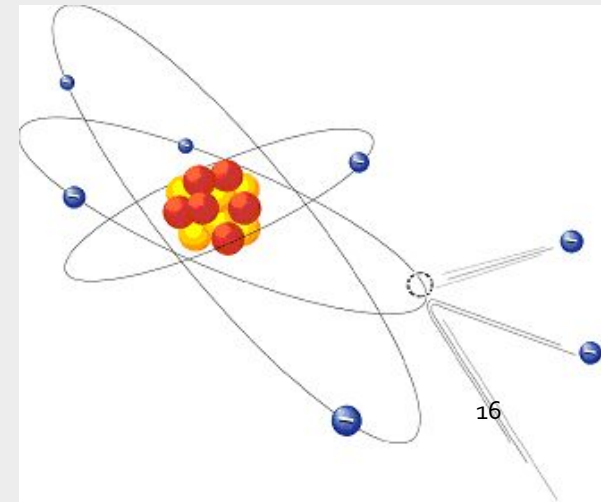
**Рентгеновское излучение (X-ray):**

- Transition: between atomic shells.
- Process: electron transition.
- Interaction: Coulomb interaction.
- Radiation:  $\gamma$ -quanta.
- Process: nuclear transformation.
- Interaction: annihilation of  $e^+$  and  $e^-$ .

## Ионизационные потери

- ионизация и возбуждение атомов;
- образование  $\delta$ -электронов способных производить вторичную ионизацию

$$\left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_c = \left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_v + \left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_u$$





## Рентгеновское излучение

переход электронов между атомными оболочками.

## Тормозное излучение

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

## Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)

ядерное превращение.

$$\left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_p \sim E_\beta \cdot Z^2$$

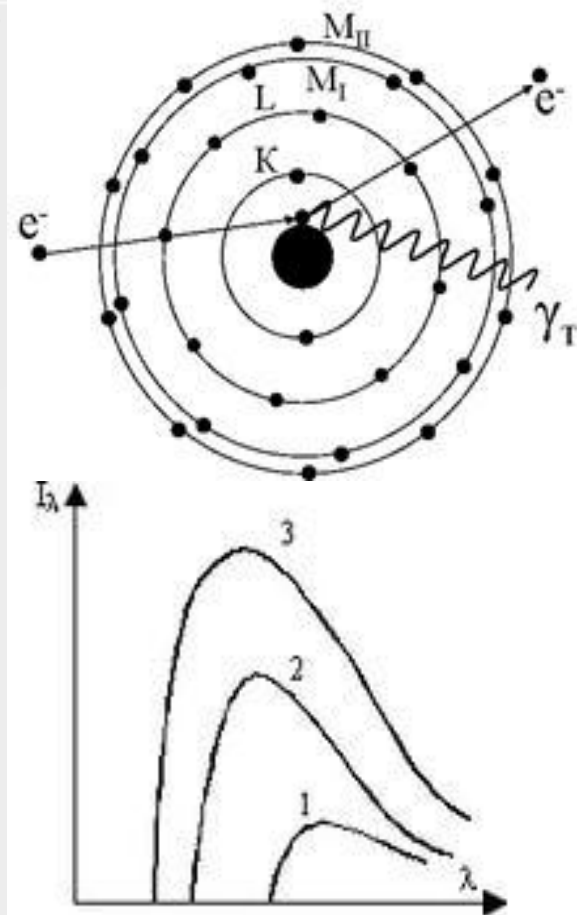
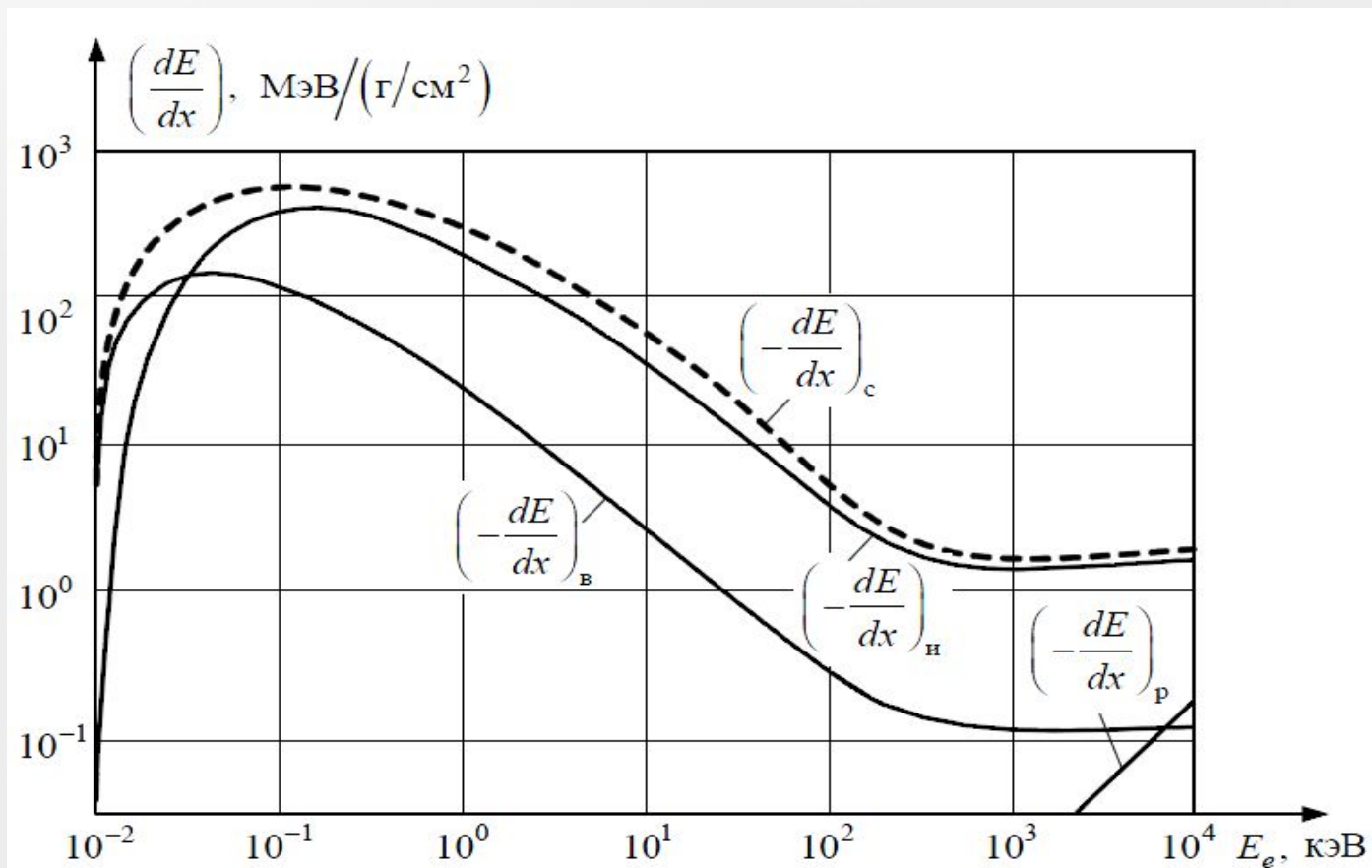


Рис. 1.1. Спектры тормозного излучения при различных напряжениях на аноде: 1 –  $U_1$ ; 2 –  $U_2 > U_1$ ; 3 –  $U_3 > U_2$ .

# Полные потери энергии

$$\left( -\frac{dE_e}{dx} \right) = \left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_e + \left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_u + \left( -\frac{dE_e}{dx} \right)_p$$



## Рассеяние

При рассеянии энергия  $\beta$ -частиц теряется большими порциями (до  $1/2 E_\beta$ )

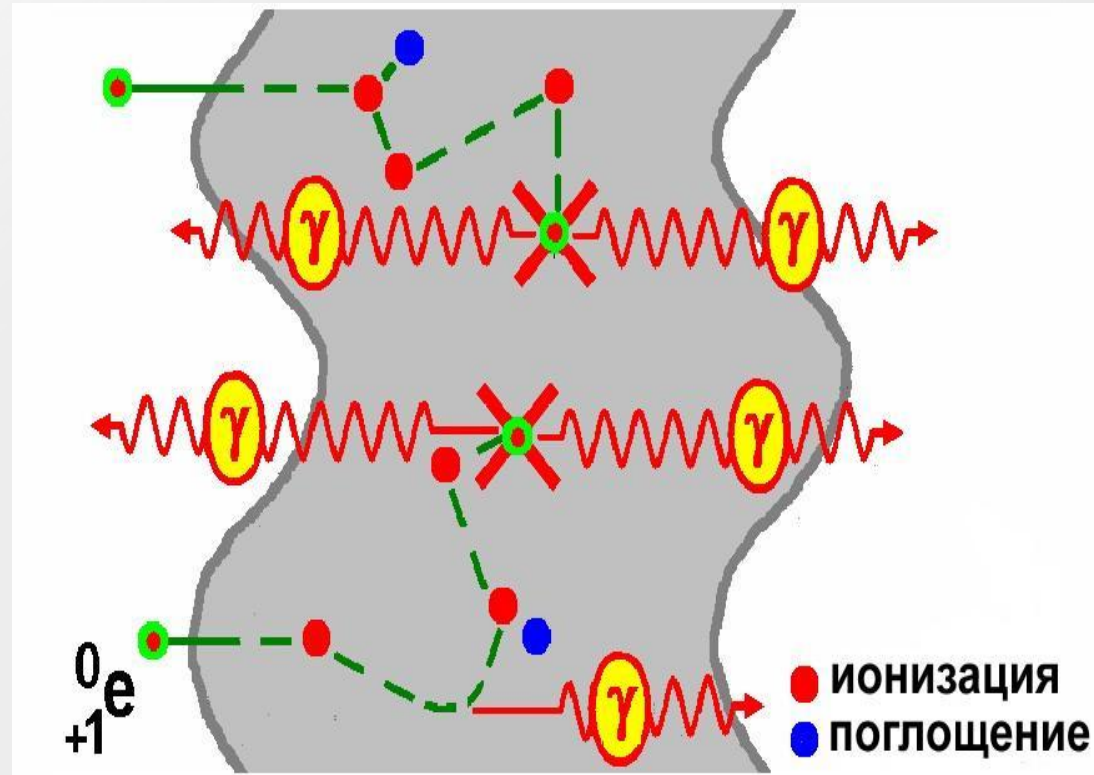
## Пробег

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{E_e}{(-dE_e / dx)} dE_e$$

# Взаимодействие позитронов

## Процессы взаимодействия:

- возбуждение
- ионизация
- тормозное излучение
- аннигиляция

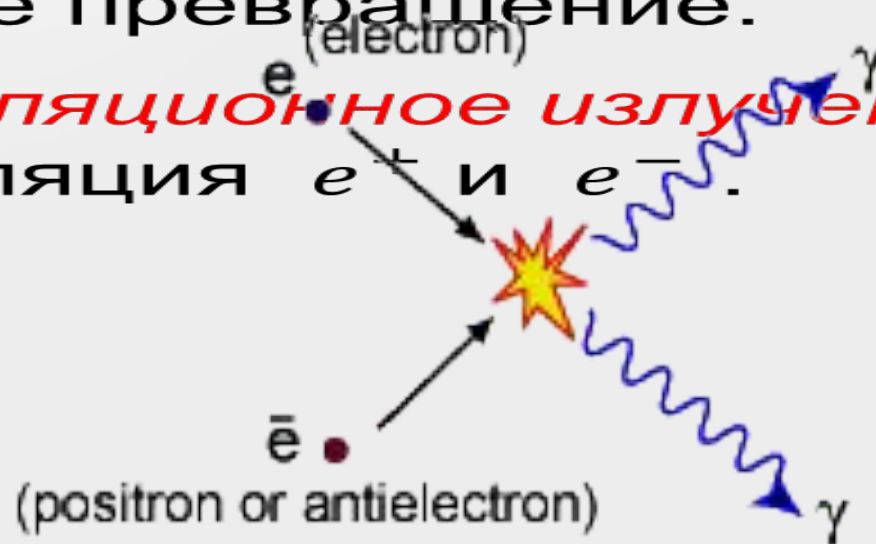


• **Рентгеновское излучение**  
переход электронов между  
атомными оболочками.

**Тормозное излучение**  
электронно-ядерное  
кулоновского взаимодействия.

**Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)**  
ядерное превращение.

**Аннигиляционное излучение**  
аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



# КОСВЕННАЯ ИОНИЗАЦИЯ

*Рентгеновское излучение*

переход электронов между атомными оболочками.

*Тормозное излучение*

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

*Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*

ядерное превращение.

*Аннигиляционное излучение*

аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .

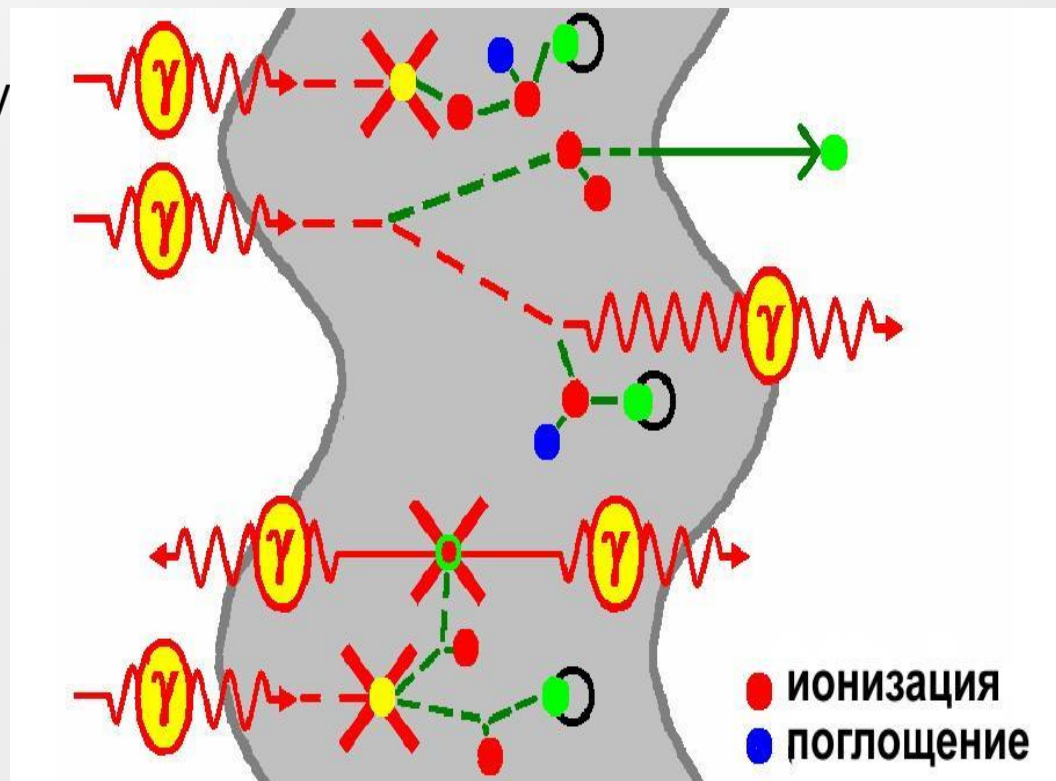
# Взаимодействие фотонов

*Рентгеновское излучение*  
переход электронов между  
атомными оболочками.

*Тормозное излучение*  
электронно-ядерное  
кулоновского взаимодействия.

*Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*  
ядерное превращение.

*Аннигиляционное излучение*  
аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



## **Рентгеновское излучение**

переход электронов между атомными оболочками.

## **Тормозное излучение**

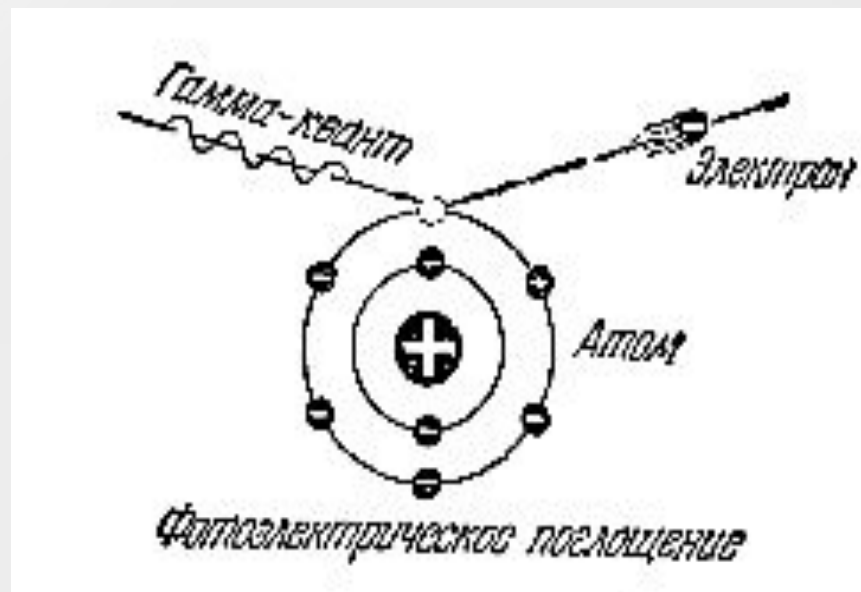
электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

## **Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)**

ядерное превращение.

## **Аннигиляционное излучение**

аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



**Рентгеновское излучение** переход электронов между атомными оболочками.  
**Тормозное излучение** электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.  
**Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)** ядерное превращение.  
**Аннигиляционное излучение** аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



## Рентгеновское излучение

переход электронов между атомными оболочками.

## Тормозное излучение

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

## Гамма-излучение ( $\gamma$ )

ядерное превращение

Рентгеновское излучение — переход электронов между атомными оболочками.  
Тормозное излучение — электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.  
Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты) — ядерное превращение.  
Аннигиляционное излучение — аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .

## Аннигиляционное излучение

аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$



***Рентгеновское излучение***

переход электронов между атомными оболочками.

***Тормозное излучение***

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

***Гамма-излучение (γ-кванты)***

ядерное превращение.

***Аннигиляция***

аннигиляция

***и***

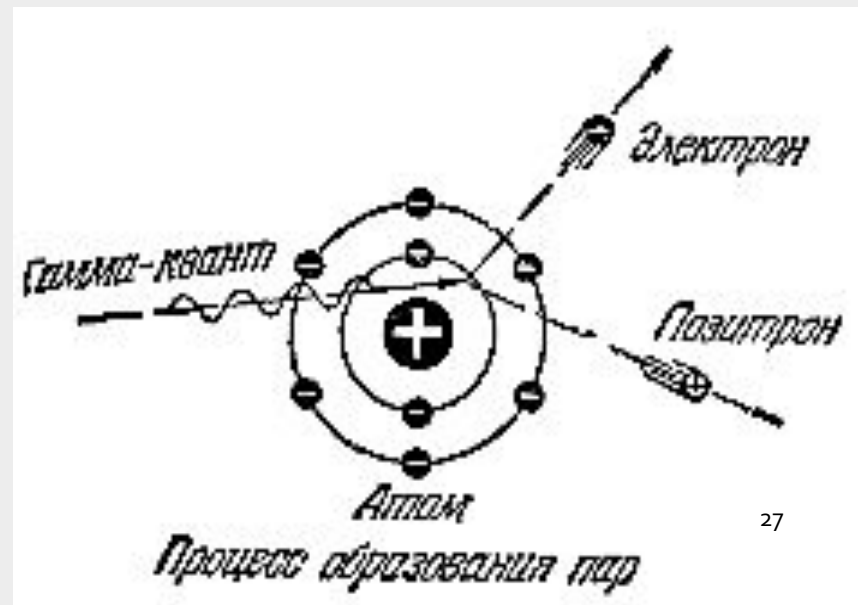
$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma \sin^2(\theta/2)}}$$

• **Рентгеновское излучение**  
переход электронов между  
атомными оболочками.

**Тормозное излучение**  
электронно-ядерное  
кулоновского взаимодействия.

**Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)**  
ядерное превращение.

**Аннигиляционное**  
аннигиляция  $e^+$  и



# Суммарное эффективное сечение

*Рентгеновское излучение*  
переход электронов между  
атомными оболочками.  
*Тормозное излучение*  
электронно-ядерное  
кулоновского взаимодействия.  
*Гамма-излучение (γ-кванты)*  
ядерное превращение.  
*Аннигиляционное излучение*  
аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .

$$\sigma_{\text{фот}} \sim Z^5, \quad \sigma_{\text{фот}} \sim 1/E_{\gamma}^{7/2}$$

$$\sigma_{\text{с}} \sim Z; \quad \sigma_{\text{с}} \sim 1/E_{\gamma}$$

$$\sigma_{\text{пар}} \sim Z^2$$

**Интенсивность потока**  $\gamma$ -излучения после прохождения через слой вещества толщиной  $x$  равна

**Рентгеновское излучение** — переход электронов между атомными оболочками.  
**Тормозное излучение** — электронно-ядерное кулоновское взаимодействие.  
**Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)** — ядерное превращение.  
**Аннигиляционное излучение** — аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .

• *Рентгеновское излучение*

переход электронов между атомными оболочками.

*Тормозное излучение*

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

*Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*

ядерное превращение.

*Линейное излучение*

**Керма-постоянная,**

Гр·м<sup>2</sup>/с·Бк:

$$\Gamma_K = \frac{\dot{K} \cdot r^2}{A}$$

$\dot{K}$  - мощность  
воздушной кермы

**Гамма-постоянная,**

Р·см<sup>2</sup>/мКи·ч:

$$\Gamma_X = \frac{\dot{X} \cdot r^2}{A}$$

$\dot{X}$  - мощность  
экспозиционной дозы

**Рентгеновское излучение** - переход электронов между атомными оболочками.  
**Тормозное излучение** - электронно-ядерное кулоновское взаимодействие.  
**Гамма-излучение (γ-кванты)** - ядерное превращение.  
**Аннигиляционное излучение** - аннигиляция e<sup>+</sup> и e<sup>-</sup>.

• *Рентгеновское излучение*

переход электронов между атомными оболочками.

*Тормозное излучение*

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

*Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты)*

ядерное превращение.

*Аннигиляционное излучение*

аннигиляция  $e^+$  и  $e^-$ .



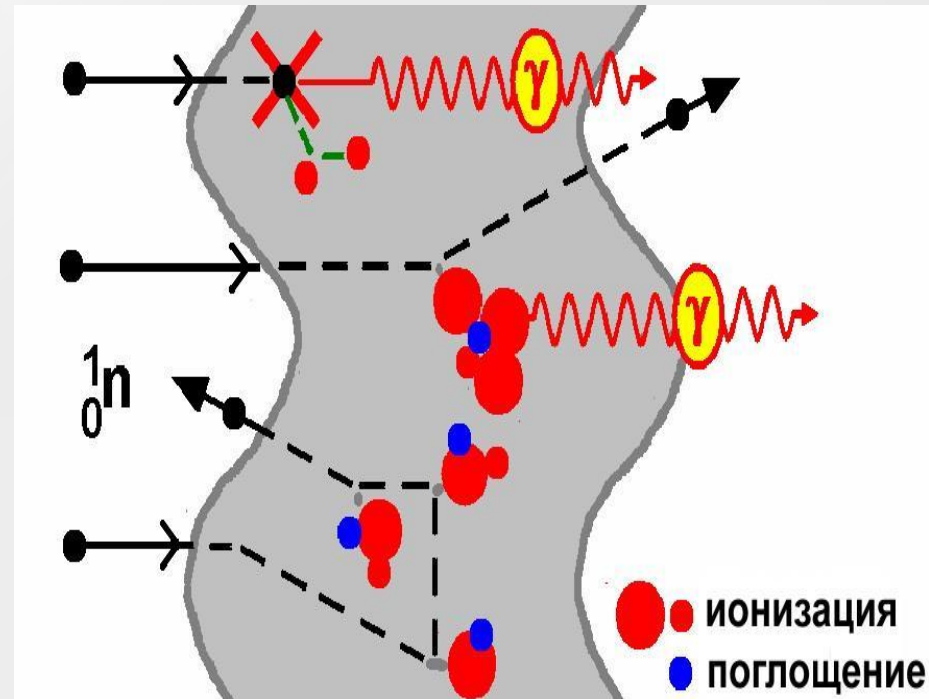
# Взаимодействие нейтронов

## Процессы взаимодействия:

- Упругое рассеяние
- Неупругое рассеяние (на ядрах H, C, O, N)
- Поглощение: деление ядер, радиационный захват

## Продукты :

- $p$ ,  $\alpha$ -частицы и  $d$  – продукты неупр. рассеяния  $n$ -ов;
- ядра отдачи – продукты упр. рассеяния  $n$ -ов;
- фотоны – продукты радиационного захвата.



## Спектр нейтронов

- **быстрые** – от 200 кэВ до 20 МэВ;
- **промежуточные** – 1–200 кэВ;
- **надтепловые** – от 0,1–0,2 эВ до 1 кэВ;
- **тепловые** – нейтроны, находящиеся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами вещества – 0,025 эВ.

# Разрушение тканей под действием радиации

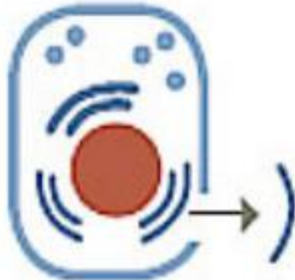


Радиоактивное вещество

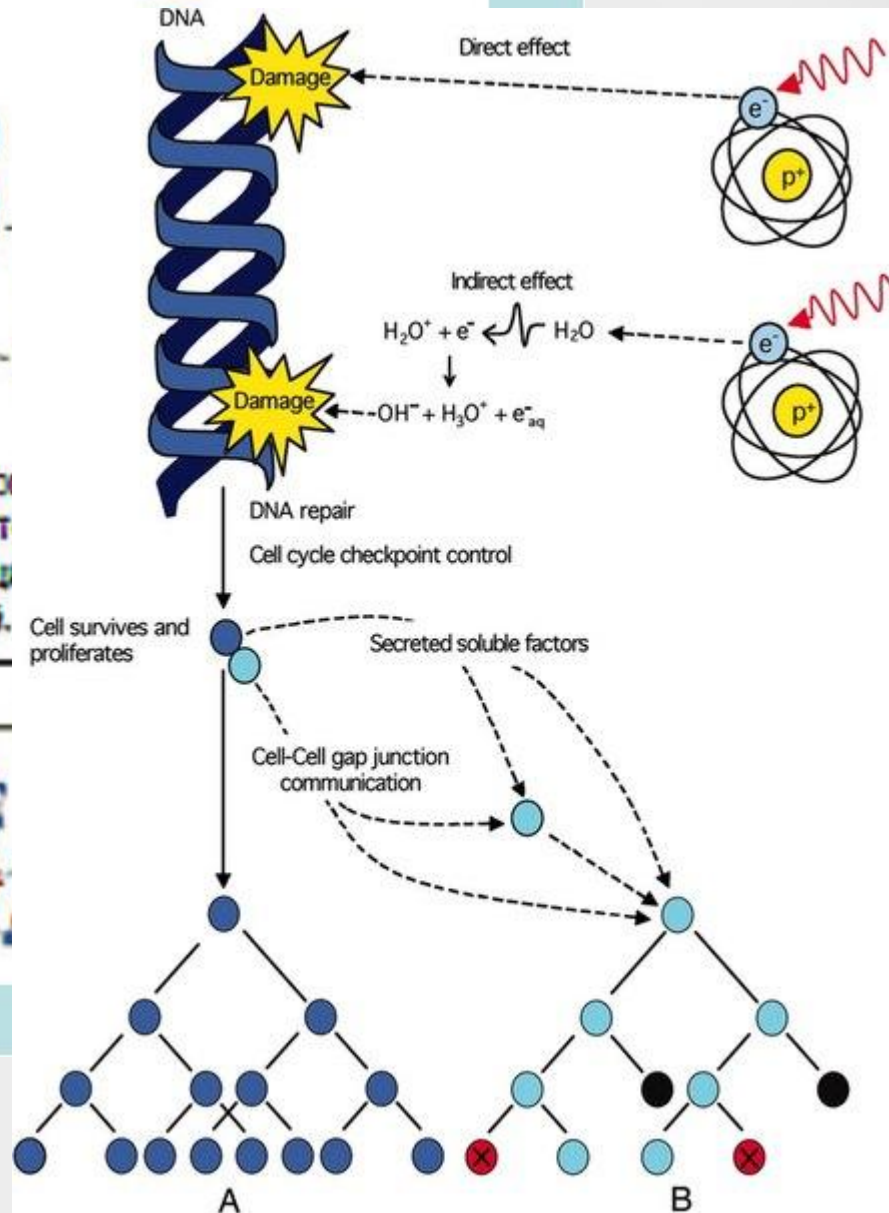
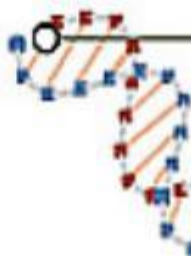
Частицы, которые выделяются при распаде радиоактивных веществ, обладают очень высокой скоростью (энергией). Столкнувшись с атомом, они могут его разрушить.



При столкновении радионуклеидов с атомом образуются свободные радикалы, которые имеют неустойчивую структуру и могут разрушать молекулы.



В результате разрушаются клетки тканей человеческого тела.



# Воздействие радиации на ткани и органы человека, восприимчивость к ионизирующему излучению.



Рис. 1. Коэффициенты радиационного риска для разных органов человека при равномерном облучении (1,00 — организм в целом)

## КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ЛЮДЕЙ

Радиационные эффекты  
Облучения людей

**Соматические** (последствия воздействия облучения, сказывающиеся на самом облученном, а не на его потомстве)

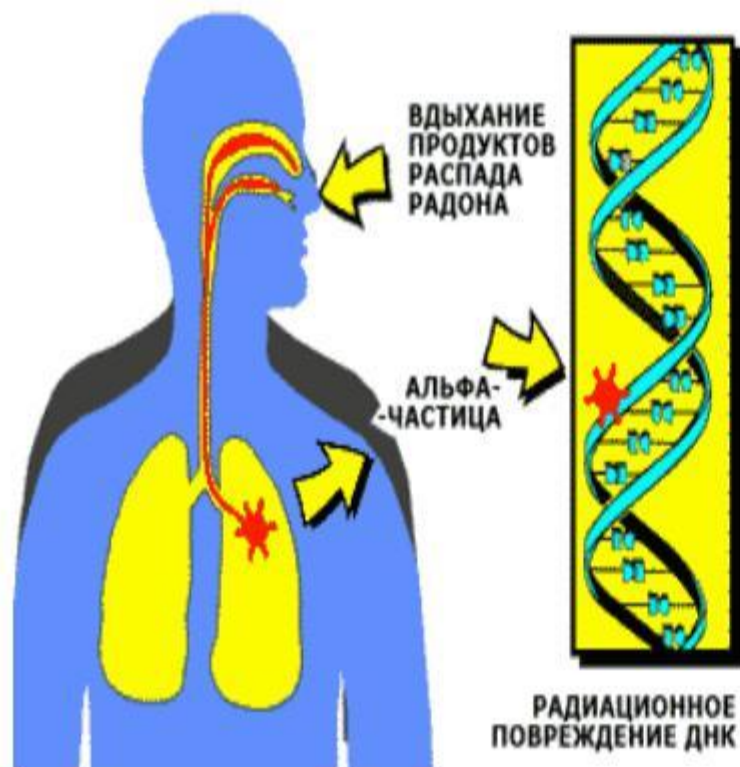
острая лучевая болезнь	хроническая лучевая болезнь	локальные лучевые повреждения (лучевой ожог, катаракта глаз, повреждение половых клеток)
------------------------	-----------------------------	--

**Соматико-стохастические** (трудно обнаруживаемые, так как они незначительны и имеют длительный скрытый период, измеряемый десятками лет после облучения)

сокращение продолжительности и жизни	злокачественные изменения крове образующих клеток	опухоли разных органов и клеток
--------------------------------------	---	---------------------------------

**Генетические** (врожденные уродства, возникающие в результате мутаций, изменения наследственных свойств и других нарушений в половых клеточных структурах облученных людей)

**Радиоактивные вещества вызывают необратимые изменения в структуре ДНК.**



# Радиобиологический парадокс: ничтожная энергия вызывает драматический биологический эффект!

Полулетальная доза для человека = 4 Гр = 270 Дж = 67 кал

По энергетическим затратам:

гибель в 50% случаев

1 чайная ложка  
горячего кофе

2 секунды на пляже



=



=



~~1920 - Фридрих Дессауер – «теория точечной теплоты»:  
радиация отдает энергию порциями, вызывая нагревание отдельных  
точек до очень высокой температуры. Далее локальное свертывание  
белков, что к ведет биологическому поражению.~~