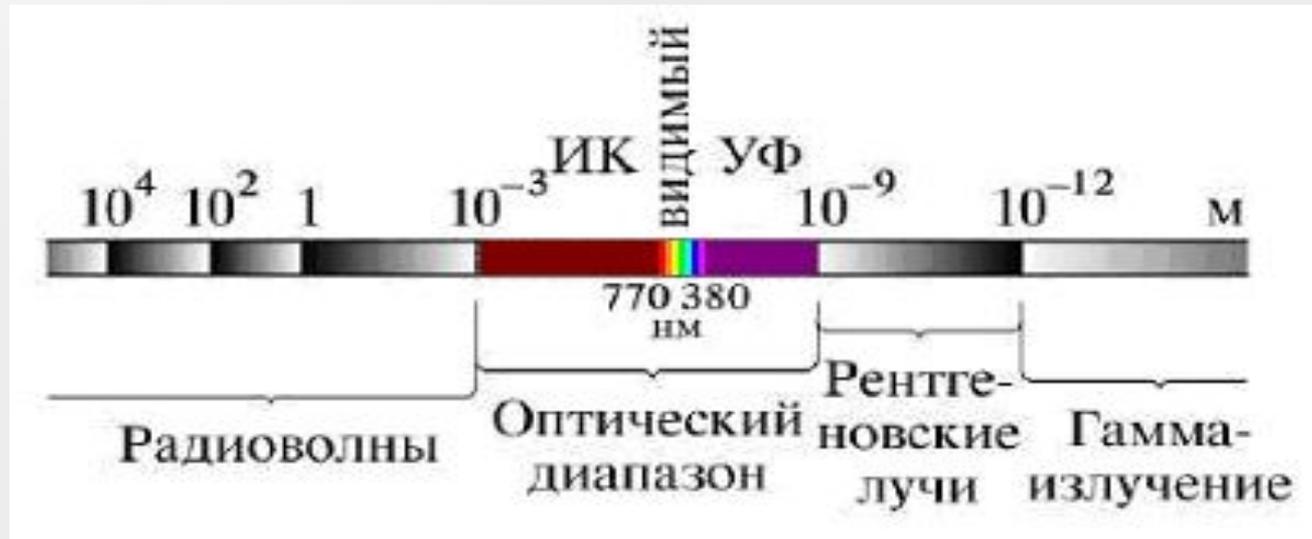


Взаимодействие ИИ с веществом

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.

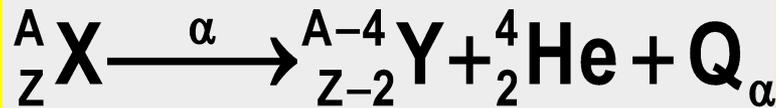
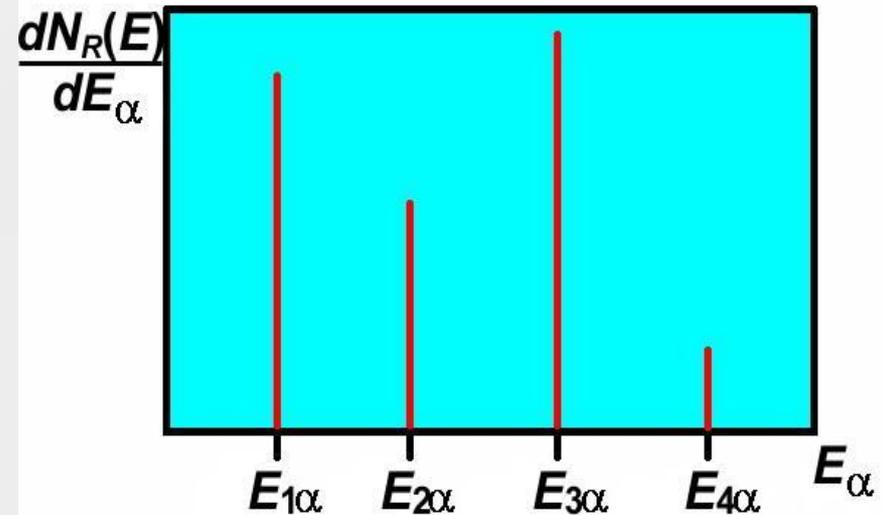
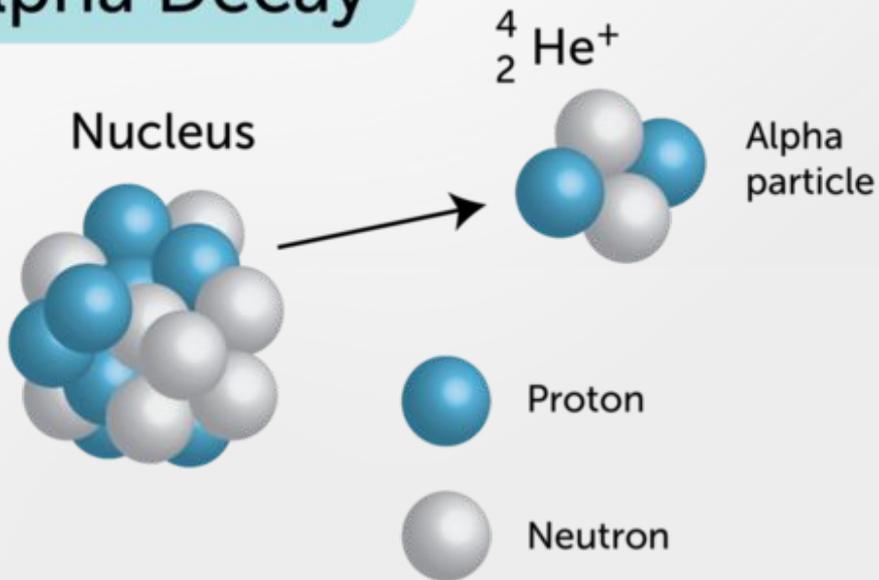
Ионизирующее излучение

– 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)

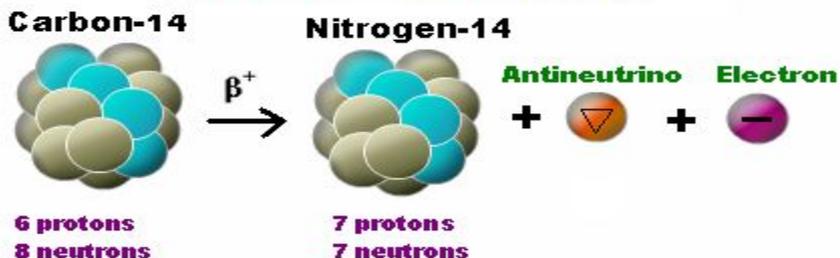
Альфа-излучение

Alpha Decay

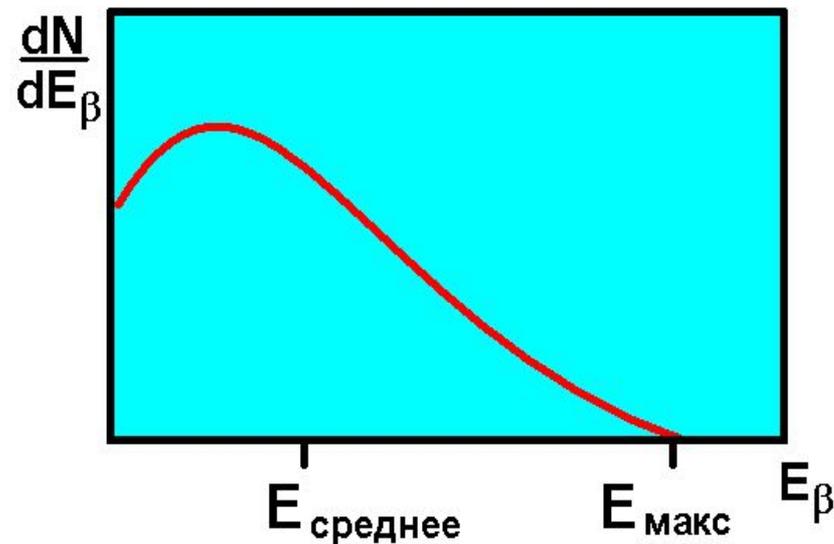
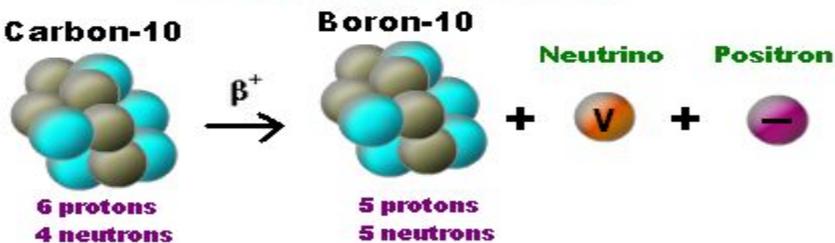


Бета-излучение

Beta-minus Decay

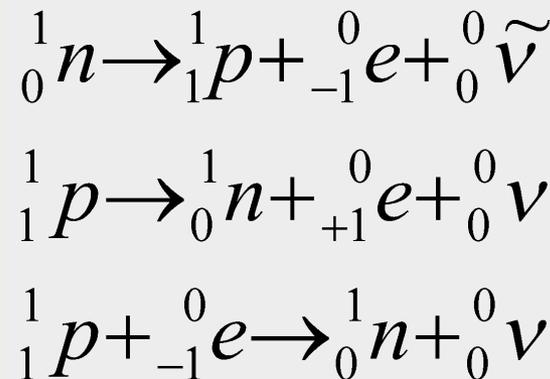
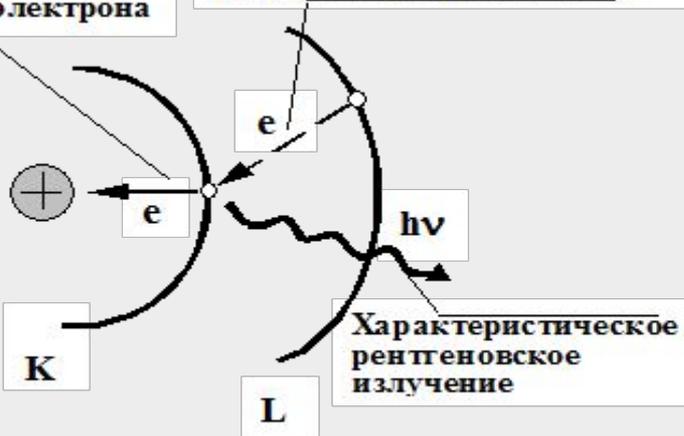


Beta-plus Decay



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 (γ -кванты)

ядерное превращение.

Аннигиляционное излучение

аннигиляция e^+ и e^- .

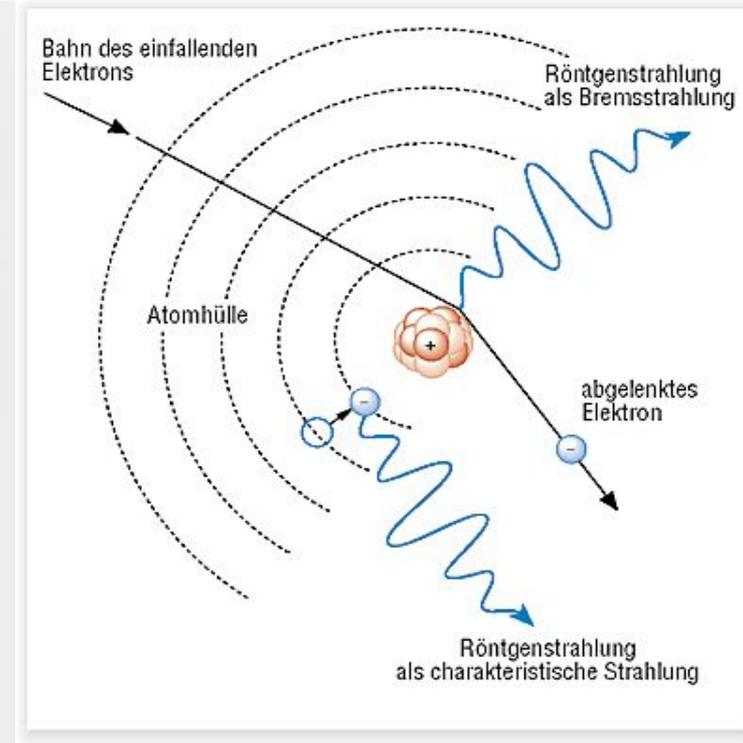


Таблица спектров ИИ

Частицы или фотоны

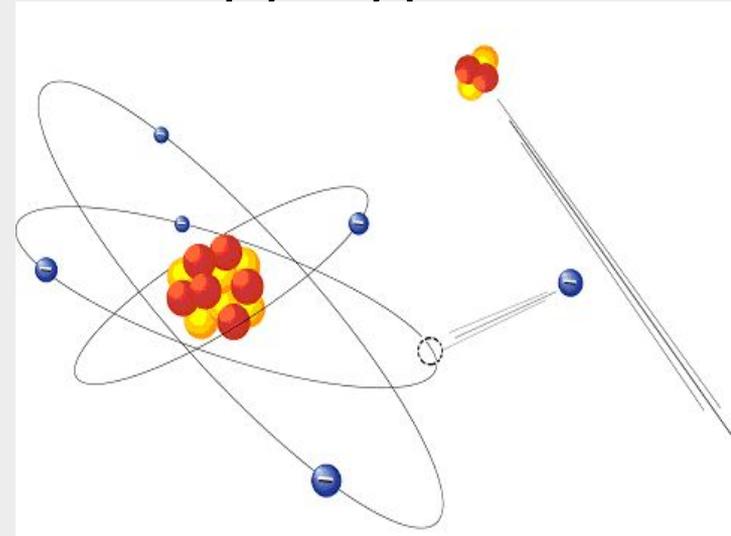
Виды распада	Частицы или фотоны				
	e^-	e^+	α	γ	n
α	–	–	Д	Д / –	–
β^-	Н	–	–	Д / –	–
β^+	–	Н	–	Д	–
ЭЗ	Д	–	–	Д	–
ИП	–	–	–	Д	–
СД	Н	–	–	Д	Н

*Д – дискретный спектр излучения, Н – непрерывный спектр

ПРЯМАЯ ИОНИЗАЦИЯ

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

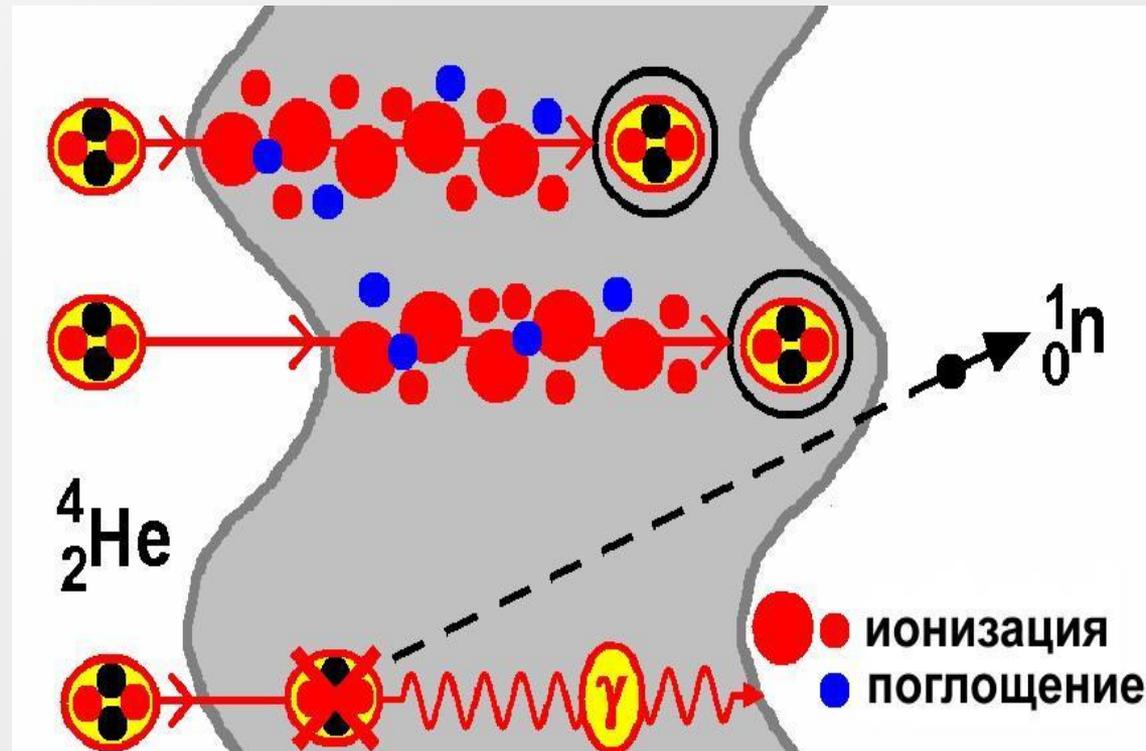
Ионизация вещества является результатом взаимодействия **первичных и вторичных заряженных частиц** с электронной структурой атома.



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

Процессы взаимодействия:

- возбуждение,
- ионизация,
- поглощение



Пробег α -частицы в воздухе: 4-10 см

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

Возбуждение и ионизация

• *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^- .

Поглощение

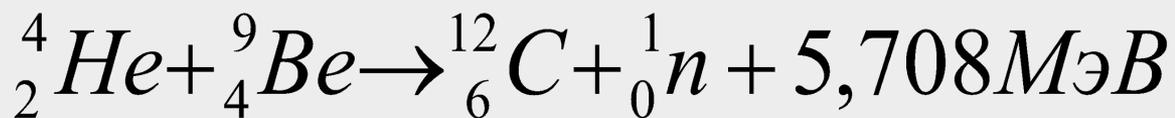
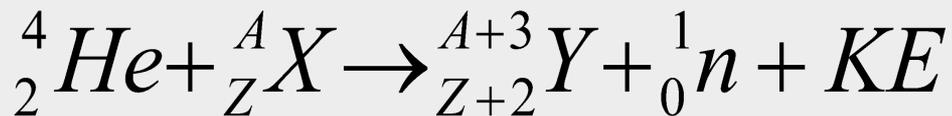
p или α -частица
поглощаются
ядром
(лег. ядра:
Be, B, C, N, O, F)



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;

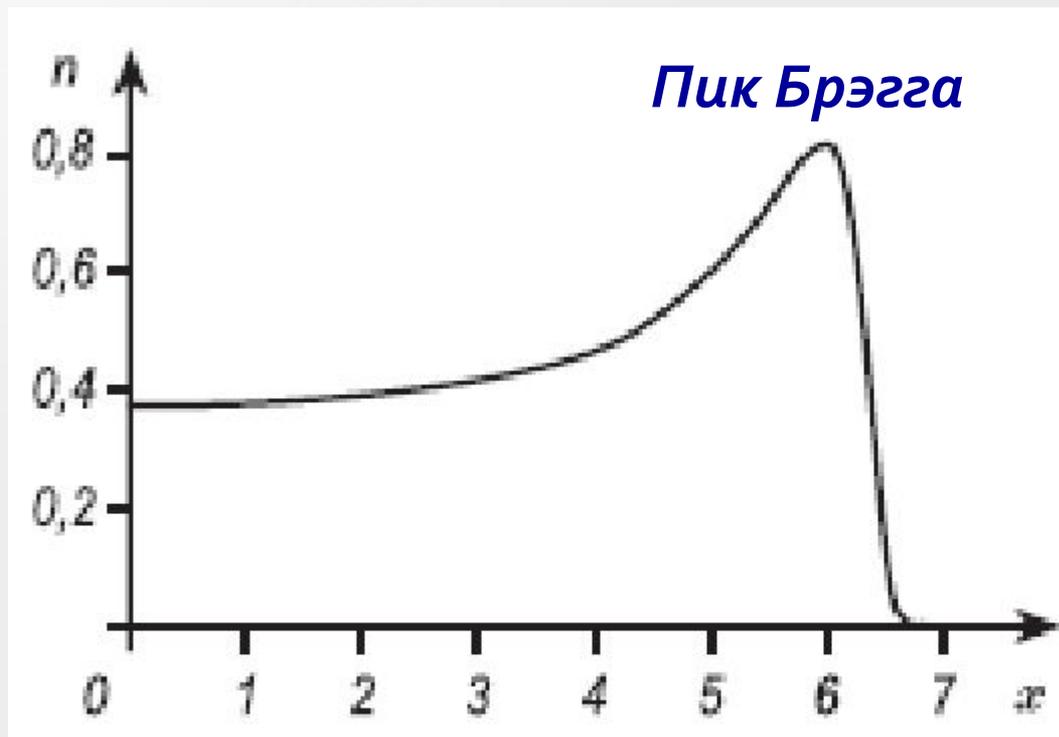
n_e – плотность электронов вещества;

\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 α -частиц соответствует энергии $0,6$ МэВ, протонов – $0,15$ МэВ.

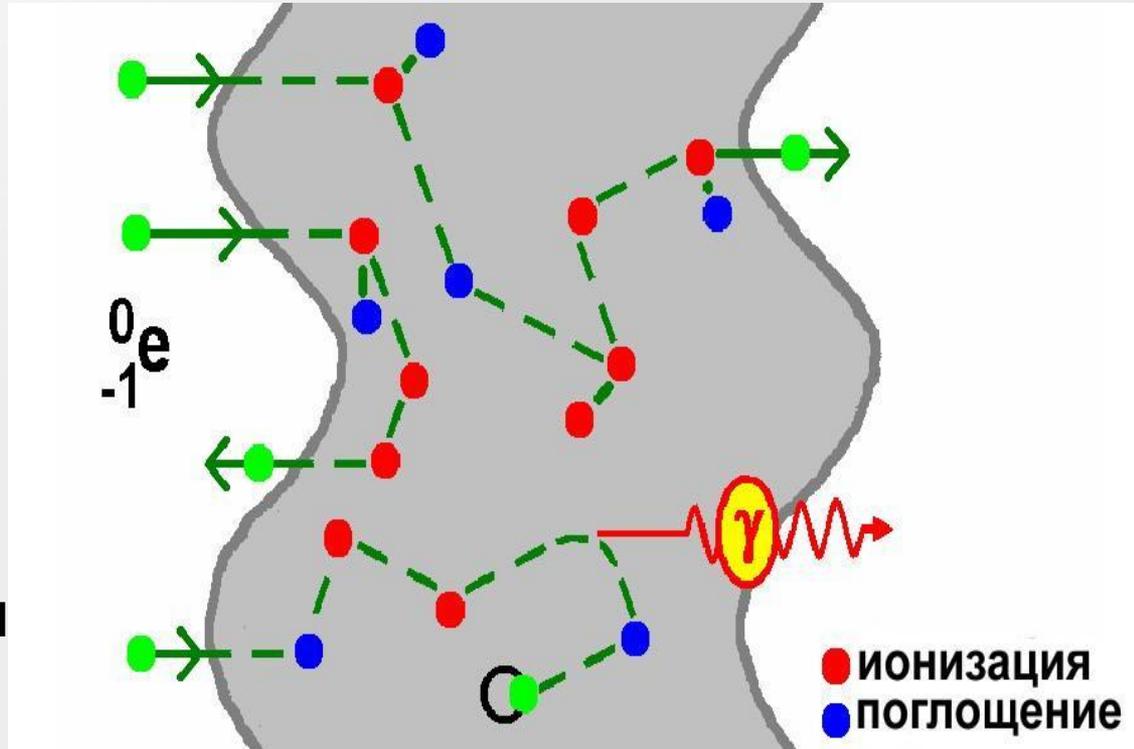
Зависимость удельной ионизации от толщины слоя вещества для α -частиц



Взаимодействие электронов

Процессы взаимодействия:

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



Плотность ионизации: 100 пар ионов на 1 мкм

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

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

Энергия β -частиц расходуется на:

- ионизационные потери
- радиационные потери
- рассеяние

Характеристическое X-излучение

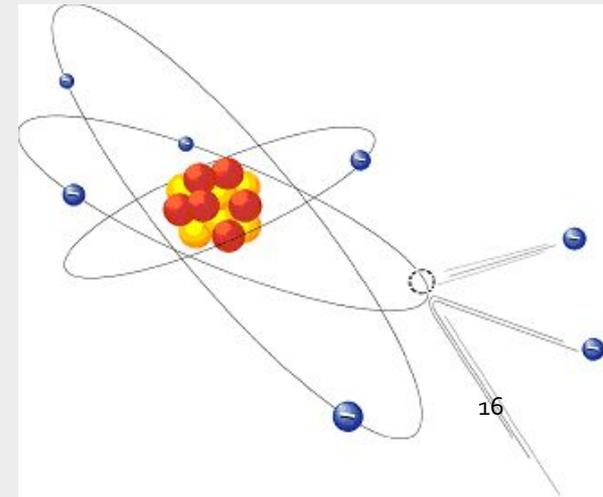
The image contains three diagrams illustrating different types of radiation and atomic transitions:

- Left Diagram: Тормозное излучение (Bremsstrahlung)**
 - Shows an electron moving through the electric field of a nucleus (K, L, M shells).
 - Text: "Тормозное излучение — это электромагнитное излучение, возникающее при торможении заряженных частиц (обычно электронов) в веществе."
 - Рентгеновское излучение: переход электронов атомными оболочками.
 - Тормозное излучение: электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.
 - Гамма-излучение (γ -кванты): ядерное превращение.
 - Аннигиляционное излучение: аннигиляция e^+ и e^- .
- Middle Diagram: Характеристическое X-излучение (Characteristic X-ray)**
 - Shows an electron transitioning from an outer shell (L) to an inner shell (K).
 - Text: "Характеристическое X-излучение — это электромагнитное излучение, возникающее при переходе электронов атомными оболочками."
 - Рентгеновское излучение: переход электронов атомными оболочками.
 - Тормозное излучение: электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.
 - Гамма-излучение (γ -кванты): ядерное превращение.
 - Аннигиляционное излучение: аннигиляция e^+ и e^- .
- Right Diagram: Аннигиляционное излучение (Annihilation Radiation)**
 - Shows a positron (e^+) and an electron (e^-) annihilating to produce two gamma photons.
 - Text: "Аннигиляционное излучение — это электромагнитное излучение, возникающее при аннигиляции e^+ и e^- ."
 - Рентгеновское излучение: переход электронов атомными оболочками.
 - Тормозное излучение: электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.
 - Гамма-излучение (γ -кванты): ядерное превращение.
 - Аннигиляционное излучение: аннигиляция e^+ и e^- .

Ионизационные потери

- ионизация и возбуждение атомов;
- образование δ -электронов способных производить вторичную ионизацию

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



Рентгеновское излучение

переход электронов между атомными оболочками.

Тормозное излучение

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ -кванты)

ядерное превращение.

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

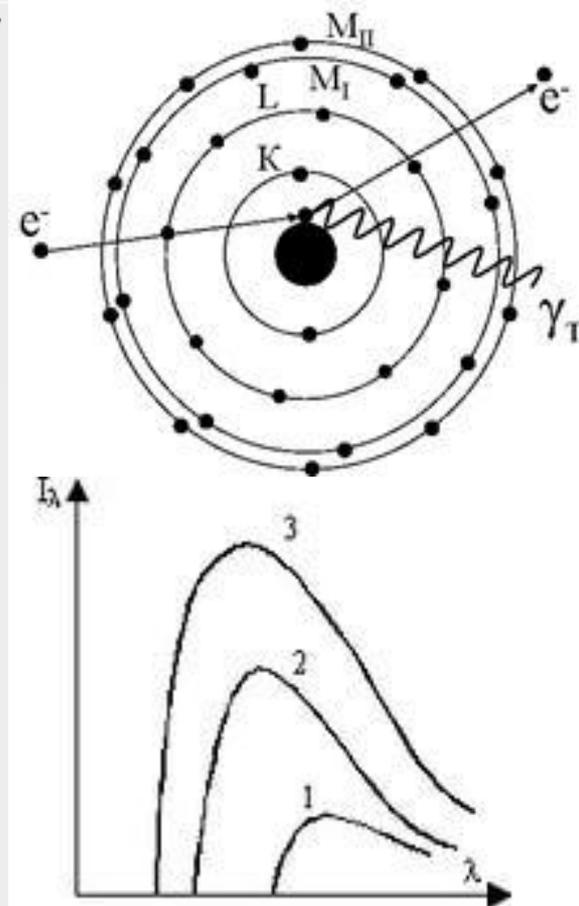
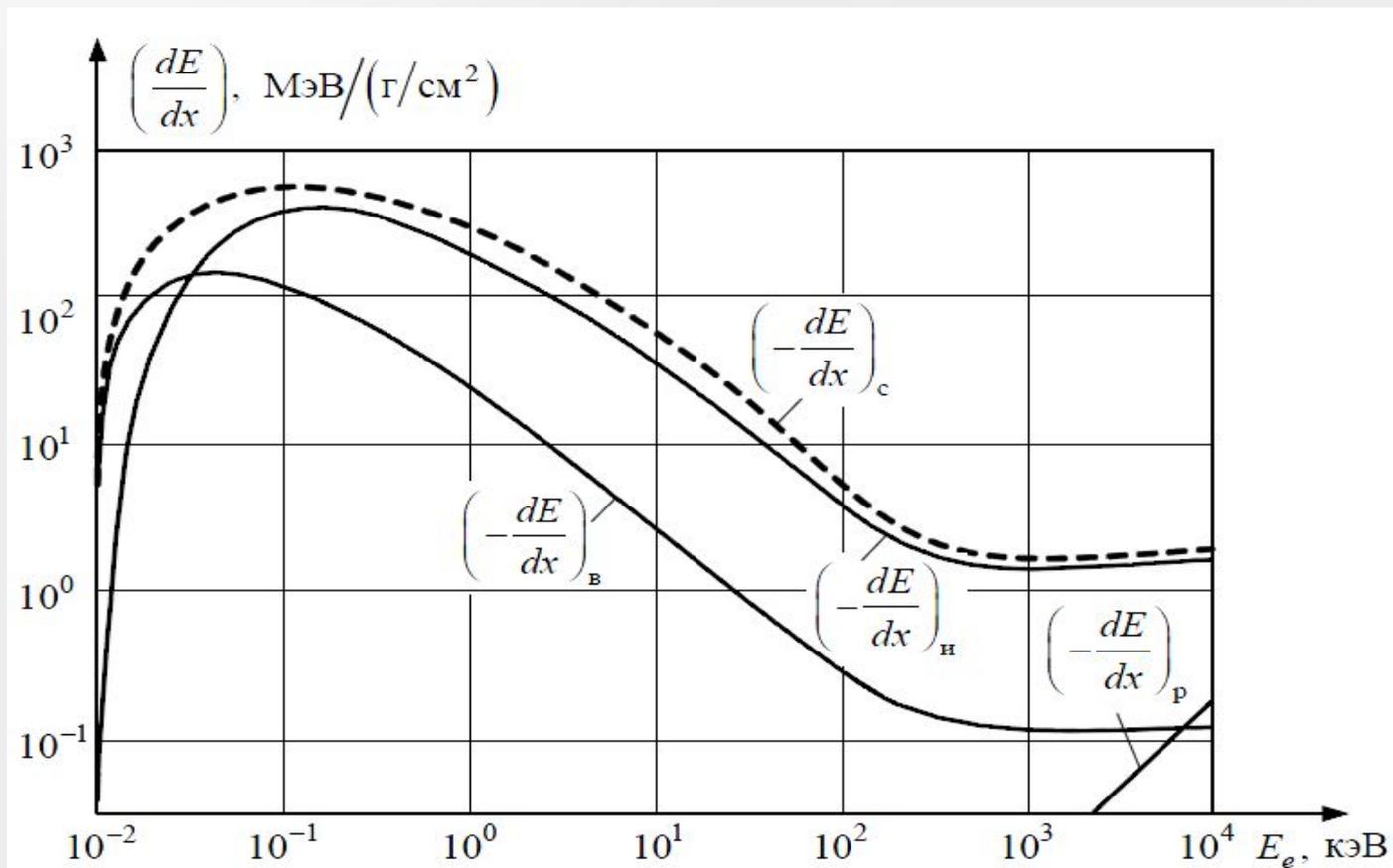


Рис. 1.1. Спектры тормозного излучения при различных напряжениях на аноде: 1 – U_1 ; 2 – $U_2 > U_1$; 3 – $U_3 > U_2$.

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 β -частиц теряется большими порциями (до $1/2 E_\beta$)

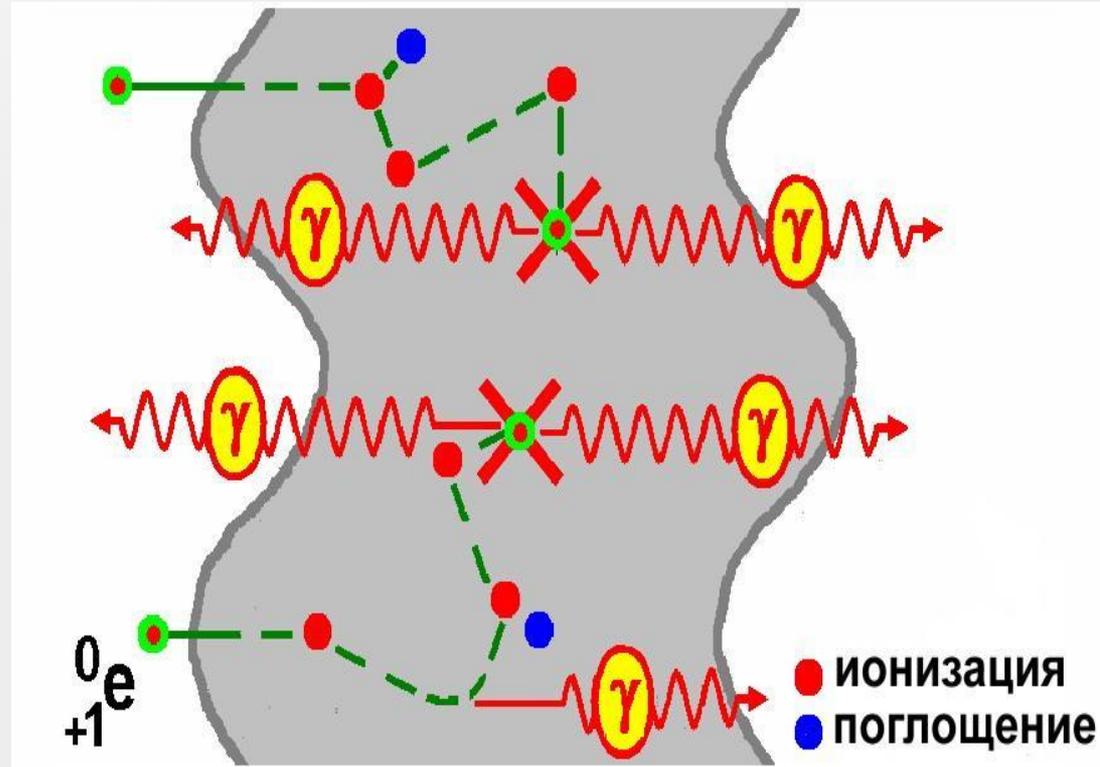
Пробег

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

Взаимодействие позитронов

Процессы взаимодействия:

- возбуждение
- ионизация
- тормозное излучение
- аннигиляция

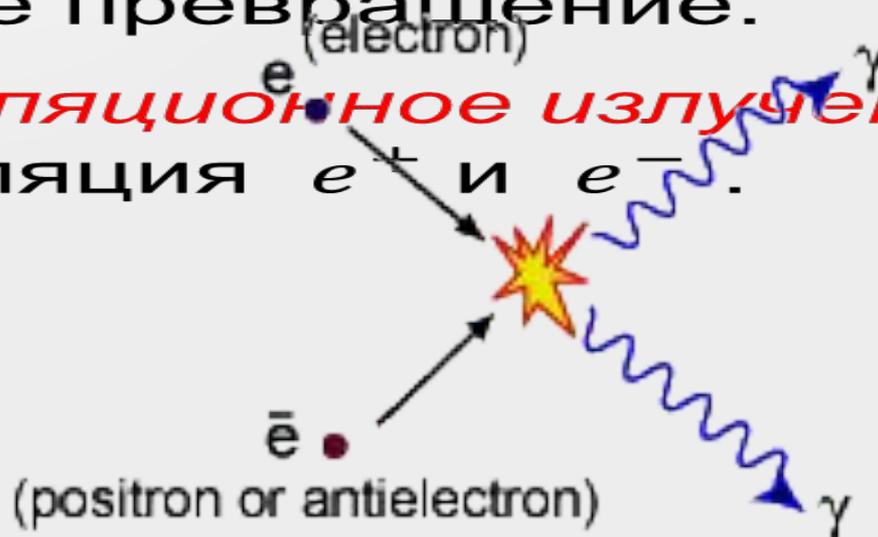


• **Рентгеновское излучение**
переход электронов между
атомными оболочками.

Тормозное излучение
электронно-ядерное
кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ -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 (γ -кванты)

ядерное превращение.

Аннигиляционное излучение

аннигиляция e^+ и e^- .

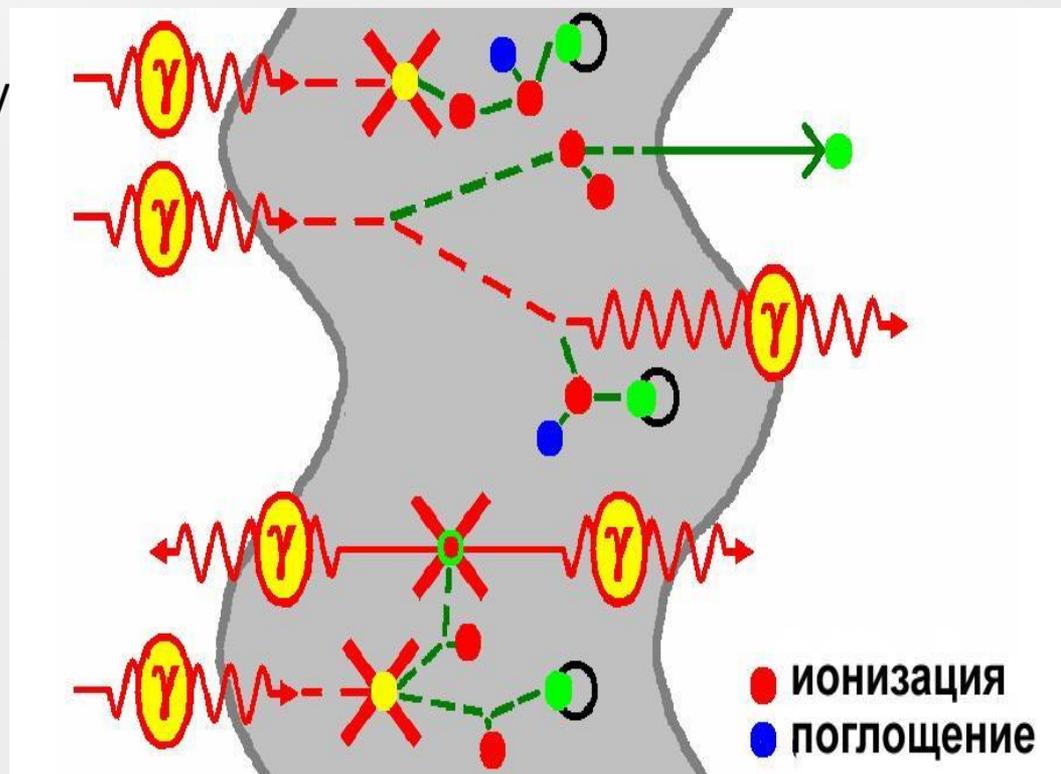
Взаимодействие фотонов

Рентгеновское излучение
переход электронов между
атомными оболочками.

Тормозное излучение
электронно-ядерное
кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ -кванты)
ядерное превращение.

Аннигиляционное излучение
аннигиляция e^+ и e^- .



Рентгеновское излучение

переход электронов между атомными оболочками.

Тормозное излучение

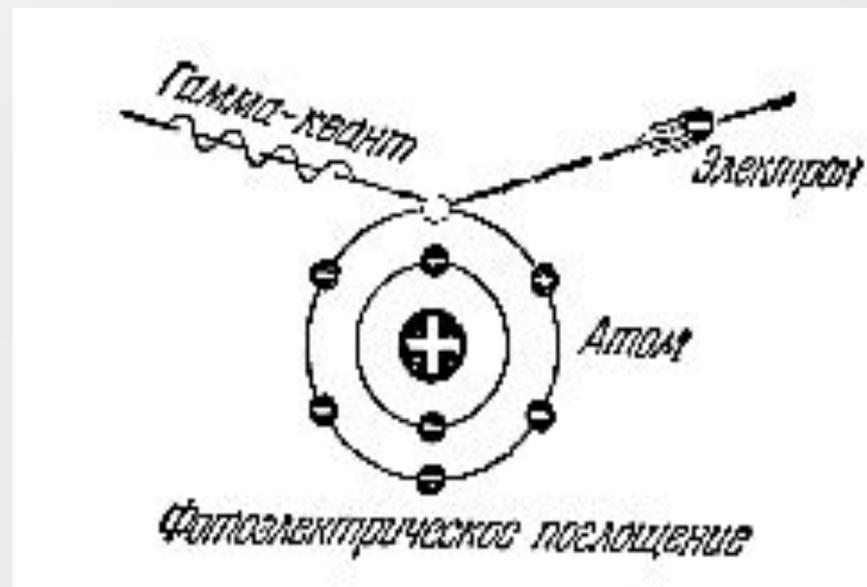
электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ -кванты)

ядерное превращение.

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

Рентгеновское излучение

переход электронов между атомными оболочками.

Тормозное излучение

электронно-ядерное кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ)

ядерное превращение

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^- .

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

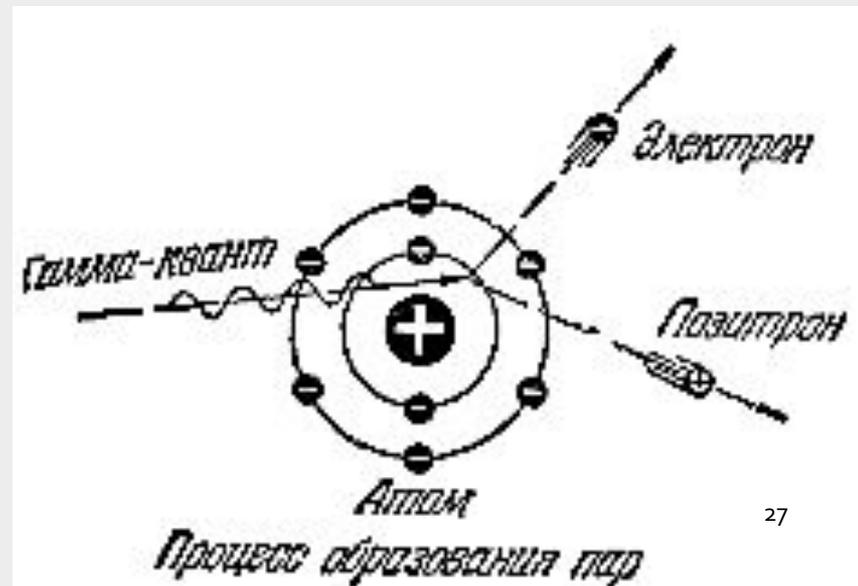
$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma \sin^2(\theta/2)}}$$

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

Тормозное излучение
электронно-ядерное
кулоновского взаимодействия.

Гамма-излучение (γ -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 γ -излучения после прохождения через слой вещества толщиной x равна

Рентгеновское излучение — переход электронов между атомными оболочками.
Тормозное излучение — электронно-ядерное кулоновское взаимодействие.
Гамма-излучение (γ -кванты) — ядерное превращение.
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.

Линейное излучение

Керма-постоянная,

Гр·м²/с·Бк:

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

\dot{K} - мощность
воздушной кермы

Гамма-постоянная,

Р·см²/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⁺ и e⁻.

• *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^- .

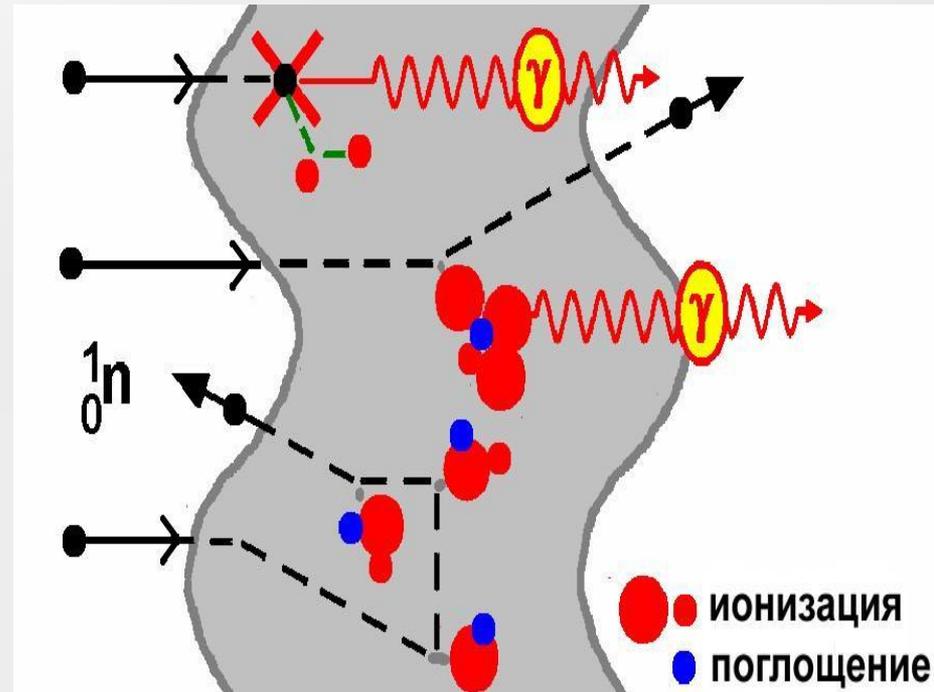
Взаимодействие нейтронов

Процессы взаимодействия:

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

Продукты :

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



Спектр нейтронов

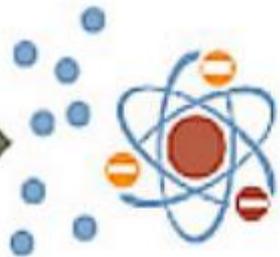
- **быстрые** – от 200 кэВ до 20 МэВ;
- **промежуточные** – 1–200 кэВ;
- **надтепловые** – от 0,1–0,2 эВ до 1 кэВ;
- **тепловые** – нейтроны, находящиеся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами вещества – 0,025 эВ.

Разрушение тканей под действием радиации

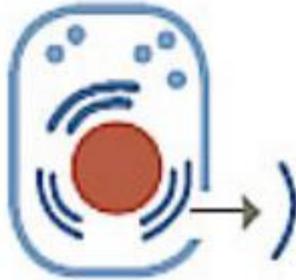


Радиоактивное вещество

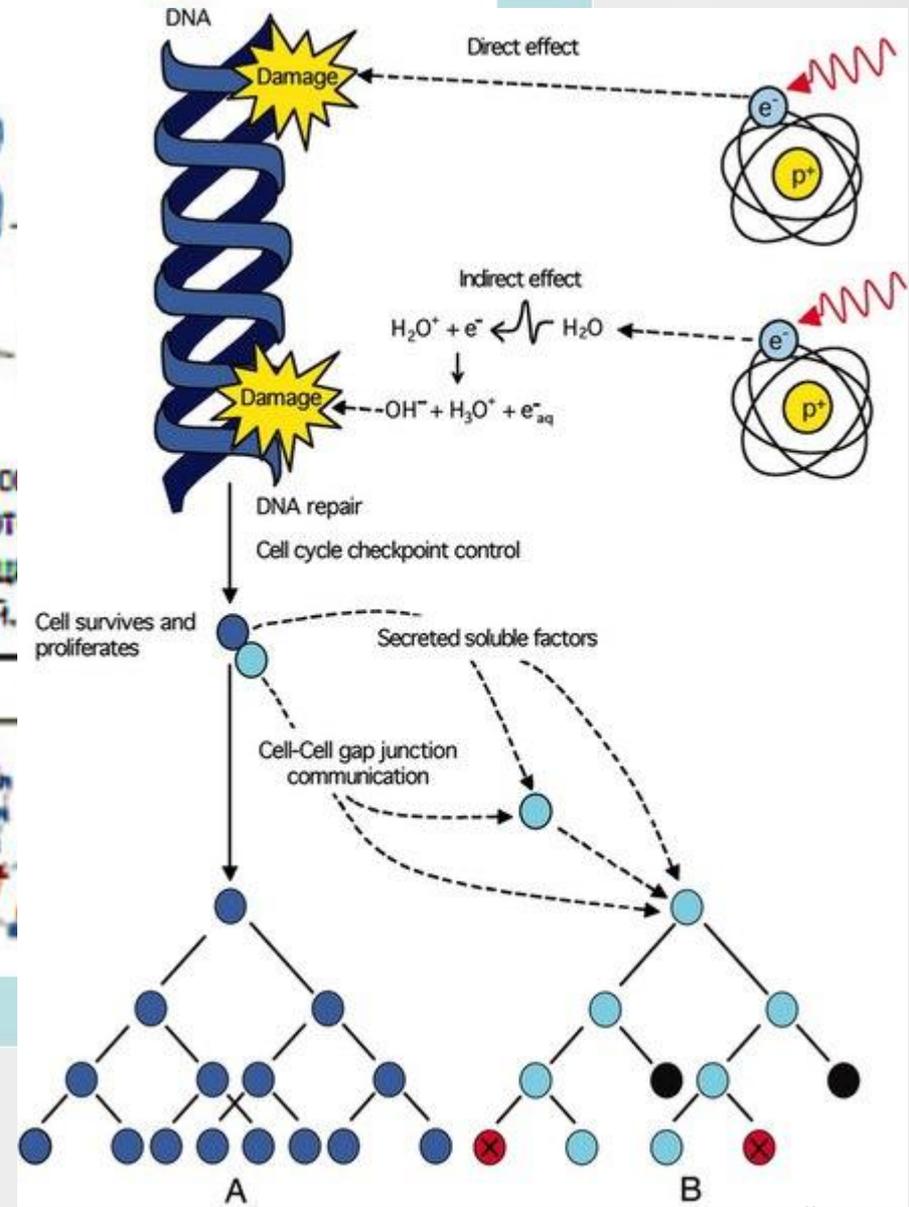
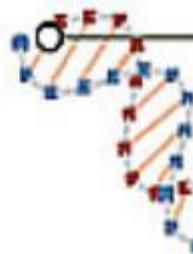
Частицы, которые выделяются при распаде радиоактивных веществ, обладают очень высокой скоростью (энергией). Столкнувшись с атомом, они могут его разрушить.



При столкновении радионаукал, кот «недостающ соединений».



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)

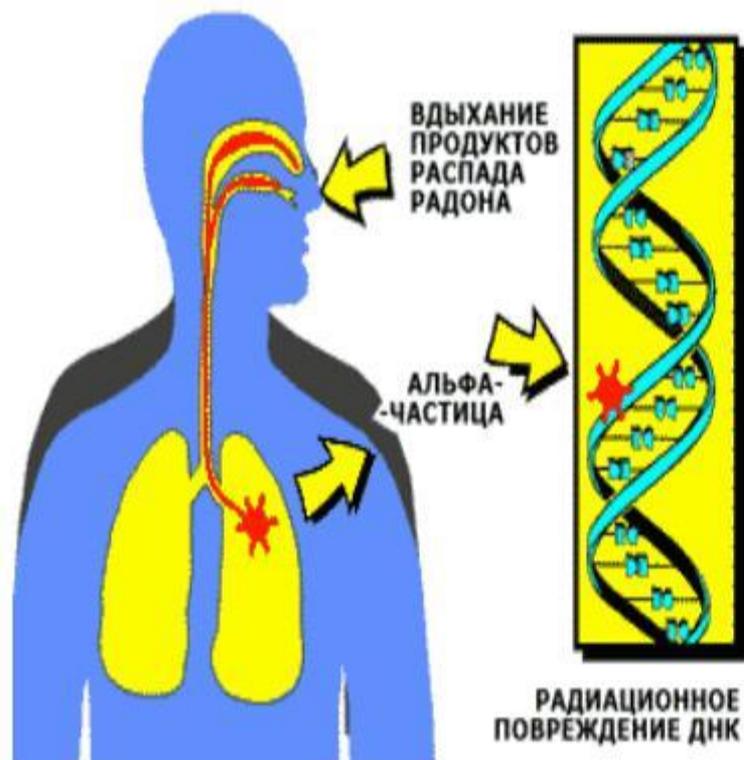
острая лучевая болезнь	хроническая лучевая болезнь	локальные лучевые повреждения (лучевой ожог, катаракта глаз, повреждение половых клеток)
------------------------	-----------------------------	--

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.~~