

*Раздел:*

# ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

# Лекция №1

## ПОНЯТИЕ, ВИДЫ И ПРИРОДА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

## ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ

1. ПОНЯТИЕ И ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.
2. ЗАКОН ОСЛАБЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.
3. ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ.
4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.

# 1. ПОНЯТИЕ И ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

**ИОНИЗИРУЮЩИМ  
И**

**НАЗЫВАЮТСЯ ВСЕ  
ИЗЛУЧЕНИЯ,**

**КОТОРЫЕ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ  
НА ВЕЩЕСТВО  
НЕПОСРЕДСТВЕН-  
НО ВЪЗЪВАЮТ  
ЕГО ИОНИЗАЦИЮ.**

**К ИОНИЗИРУЮЩИМ  
ИЗЛУЧЕНИЯМ  
ОТНОСЯТСЯ:**

- КОРОТКОВОЛНОВОЙ УФ (10-200 нм)
- РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
- ВСЕ ВИДЫ РАДИО-АКТИВНЫХ (ЯДЕРНЫХ) ИЗЛУЧЕНИЙ - АЛЬФА-, БЕТА-, ГАММА-, НЕЙТРОННОЕ.

# 1.1. ПРИРОДА И ВИДЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

РЕНТГЕНОВСКОЕ  
ИЗЛУЧЕНИЕ –  
ВОЛНОВОЙ  
(ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ)  
ПРИРОДЫ,  
  
НА ШКАЛЕ - МЕЖДУ УФ И  
ГАММА-излучением,  
ДИАПАЗОН  $80 - 10^{-5}$  нм  
(коротковолновое).

Вильгельм Конрад  
Рентген  
1845 – 1923



# КЛАССИФИКАЦИЯ

## 1) ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ И ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ:

- МЯГКОЕ – длина волны больше, проникающая способность меньше,  
и
- ЖЕСТКОЕ – длина волны меньше, проникающая

## 2) ПО МЕХАНИЗМУ ИЗЛУЧЕНИЯ

И СПЕКТРАМ –

- ТОРМОЗНОЕ  
и
- ХАРАКТЕРИСТИЧЕС  
КОЕ.

## 1. 2. ПРИРОДА И ВИДЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

**РАДИОАКТИВНЫМИ  
(ЯДЕРНЫМИ)**

НАЗЫВАЮТСЯ ИЗЛУЧЕНИЯ,

КОТОРЫЕ ОБРАЗУЮТСЯ ПРИ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ ЯДЕР.

**РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД –**  
ЭТО САМОПРОИЗВОЛЬНЫЙ РАСПАД НЕУСТОЙЧИВЫХ ЯДЕР С ОБРАЗОВАНИЕМ НОВЫХ ЯДЕР И ИСПУСКАНИЕМ РЯДА ИЗЛУЧЕНИЙ

# ВИДЫ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

ДВА ОСНОВНЫХ ТИПА РАСПАДА:

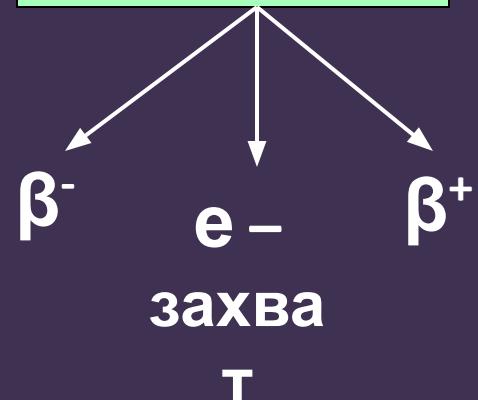
АЛЬФА ( $\alpha$ )

и

БЕТА ( $\beta$ )

БЕТА-РАСПАД – 3-Х ВИДОВ:

- ЭЛЕКТРОННЫЙ ( $\beta^-$ )
- ПОЗИТРОННЫЙ ( $\beta^+$ ) И
- ЭЛЕКТРОННЫЙ ЗАХВАТ
- (  $e$  - захват )



# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЧАСТИЦ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ  
ЧАСТИЦЫ  
И АТОМНЫЕ ЯДРА

ХАРАКТЕРИЗУЮТ  
ЗАРЯДОМ И МАССОЙ,

ВЫРАЖЕННЫМИ В  
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ  
ЕДИНИЦАХ.

- ЗАРЯД ЯДРА РАВЕН ЧИСЛУ ПРОТОНОВ В ЯДРЕ.  
ОПРЕДЕЛЯЕТ ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР ЭЛЕМЕНТА В ТАБЛИЦЕ МЕНДЕЛЕЕВА:

$$q_{\text{я}} = N_p = Z.$$

- МАССА ЯДРА РАВНА СУММЕ ЧИСЛА ПРОТОНОВ И ЧИСЛА НЕЙТРОНОВ В ЯДРЕ (т.е. общему числу нуклонов):

$$m_{\text{я}} = N_p + N_n = A.$$

ЭТА СУММА

# В СОСТАВ АТОМА ВХОДЯТ:

**ПРОТОНЫ, НЕЙТРОНЫ и ЭЛЕКТРОНЫ:**  
p n e

Т.к. ПРОТОНЫ И НЕЙТРОНЫ ОБРАЗУЮТ ЯДРО ("НУКЛЕУС" – NUCLEUS),  
ИХ ОБЩЕЕ НАЗВАНИЕ – **НУКЛОНЫ**.

$q_p = 1$ (э.е.з.)	$q_n = 0$	$q_e = e = -1$
$m_p = 1$ (э.е.м.)	$m_n = 1$	$m_e = 0$

**ПОЗИТРОН (АНТИЭЛЕКТРОН) НЕ ВХОДИТ В СОСТАВ ЯДРА,  
НО ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ ОДНОМ ИЗ ВИДОВ РАСПАДА ( $\beta^+$  ).**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ:**

$$q = +1,$$

$$m = 0.$$

# ИЗЛУЧЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ

## АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЕ –

- КОРПУСКУЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ.
- СОСТОИТ ИЗ БЫСТРО ДВИЖУЩИХСЯ АЛЬФА-ЧАСТИЦ, ИЛИ ЯДЕР АТОМОВ ГЕЛИЯ.
- ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬФА-ЧАСТИЦЫ:  
 $Z = 2, A = 4$ .
- ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ АЛЬФА-РАСПАДЕ.

## БЕТА-МИНУС-ИЗЛУЧЕНИЕ –

- КОРПУСКУЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ.
- СОСТОИТ ИЗ БЫСТРО ДВИЖУЩИХСЯ БЕТА-МИНУС ЧАСТИЦ, ИЛИ ЭЛЕКТРОНОВ.
- ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ БЕТА-МИНУС РАСПАДЕ.

## БЕТА-ПЛЮС-ИЗЛУЧЕНИЕ -

- КОРПУСКУЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ.
- СОСТОИТ ИЗ БЫСТРО ДВИЖУЩИХСЯ БЕТА-ПЛЮС ЧАСТИЦ, ИЛИ ПОЗИТРОНОВ.
- ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ БЕТА-ПЛЮС РАСПАДЕ.

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОПРОВОЖДАЕТ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЗАХВАТ.

## ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ -

- ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ (ВОЛНОВОЙ) ПРИРОДЫ.
- МОЖЕТ СОПРОВОЖДАТЬ

## ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА НЕЙТРИНО

- ХАРАКТЕРИСТИКИ:  
 $q = 0$ ,  $m = 0$ .
- ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ  
ПОЗИТРОННОМ БЕТА-  
РАСПАДЕ.

## ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА АНТИНЕЙТРИНО

- ХАРАКТЕРИСТИКИ:  
от нейтрино  
отличается только  
направлением  
спина.
- ОБРАЗУЕТСЯ ПРИ  
ЭЛЕКТРОННОМ БЕТА-  
РАСПАДЕ.

## 2. ЗАКОН ОСЛАБЛЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ при взаимодействии с веществом

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

ПОТОК  
ИОНИЗИРУЮЩЕГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ  
ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО  
УМЕНЬШАЕТСЯ  
ПО  
ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНО  
МУ ЗАКОНУ.

Здесь  $\Phi_0$  – падающий поток излучения,  
 $\Phi$  – поток излучения, прошедшего через слой вещества толщиной « $x$ »,  
 $\mu$  - линейный коэффициент ослабления.

Аналогично меняется интенсивность

# Характеристики взаимодействия данного вида излучения с данным веществом

- линейный коэффициент ослабления  $\mu$  [м<sup>-1</sup>]
- массовый коэффициент ослабления  
$$\mu_m = \mu / \rho$$
[ м<sup>2</sup> / кг ]
- слой половинного ослабления  $d_{1/2}$  [ м ]

Физический смысл этих  
характеристик

$\mu$   
ОБРАТЕН ТОЛЩИНЕ СЛОЯ  
ВЕЩЕСТВА,  
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ  
КОТОРОГО  
ПОТОК ИЗЛУЧЕНИЯ  
УМЕНЬШАЕТСЯ В "e"  
РАЗ.

Зависит от плотности  $\rho$   
вещества:

больше  $\rho \Rightarrow$  больше  
атомов на пути  
излучения  $\Rightarrow$  больше

# Характеристики взаимодействия данного вида излучения с данным веществом

Массовый коэффициент  
ослабления  $\mu_m$   
не зависит от плотности  
вещества.

$d_{1/2}$  -  
толщина слоя  
вещества,  
при прохождении  
которого  
поток излучения  
уменьшается  
вдвое.

СВЯЗЬ  $\mu$  и  $d_{1/2}$

Пусть  $x = d_{1/2} \Rightarrow$   
 $\Phi = \Phi_0 / 2;$   
 $\Phi_0 / 2 = \Phi_0 / e^{\mu d}$   
 $2 = e^{\mu d}$   
 $\ln 2 = \mu d_{1/2}$

$$d_{1/2} = \ln 2 / \mu$$

Чем больше  $\mu$ ,  
тем меньше  $d_{1/2}$ .

### 3. ПЕРВИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ионизирующих излучений С ВЕЩЕСТВОМ

#### РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

#### ТРИ ПЕРВИЧНЫХ ЭФФЕКТА:

- КОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ
- НЕКОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ
- ФОТОЭФФЕКТ

Тот или иной эффект – в зависимости от соотношения энергии рентгеновского фотона  $\epsilon$  и энергии ионизации (работы выхода электрона)  $A_i$ .  
*Энергия ионизации – энергия, необходимая для удаления электрона за пределы атома.*

# Когерентное (классическое) рассеяние

Это ИЗМЕНЕНИЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ ПУЧКА  
ИЗЛУЧЕНИЯ

(РАССЕЯНИЕ ПО  
ВСЕВОЗМОЖНЫМ  
НАПРАВЛЕНИЯМ).

ЭНЕРГИЯ ФОТОНОВ НЕ  
ИЗМЕНЯЕТСЯ

↓  
РАССЕЯНИЕ  
БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ  
длины волны.

ХАРАКТЕРНО ДЛЯ  
МЯГКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ:  
ЭНЕРГИЯ ФОТОНОВ  
МЕНЬШЕ ЭНЕРГИИ  
ИОНИЗАЦИИ -

$\epsilon < A_i$ .  
Энергия атомов  
вещества также не  
изменяется.  
↓  
Нет непосредственного  
биологического  
эффекта.

# Фотоэффект (ФЭ)

ПОГЛОЩЕНИЕ  
РЕНТГЕНОВСКОГО  
ФОТОНА  
АТОМОМ ВЕЩЕСТВА.

За счет его энергии:  
Выбивание валентного  
(внешнего) электрона  
из атома – ВНЕШНИЙ  
ФЭ;

Переход электрона на  
внешний (более  
высокий) уровень, т.е.  
возбуждение атома –  
внутренний ФЭ,

УСЛОВИЕ ВНЕШНЕГО  
ФЭ:  
 $\epsilon \geq A_i$ .

Описывается  
*УРАВНЕНИЕМ*  
ЭЙНШТЕЙНА:

$$hv = A_i + mv^2/2$$

Здесь  $m$  – масса  
электрона,  
 $v$  – его скорость,  
 $mv^2/2$  –  
кинетическая

# Некогерентное рассеяние

РЕНТГЕНОВСКИЙ  
ФОТОН МЕНЯЕТ  
НАПРАВЛЕНИЕ

При столкновении с  
электроном атома  
и выбывает из атома  
этот электрон,

ЧАСТИЧНО  
РАСТРАЧИВАЯ СВОЮ  
ЭНЕРГИЮ.



ЧАСТОТА ИЗЛУЧЕНИЯ  
УМЕНЬШАЕТСЯ,  
ДЛИНА ВОЛНЫ  
ВОЗРАСТАЕТ.



РАССЕЯНИЕ С

Увеличение длины  
волны  
при некогерентном  
рассеянии носит  
название  
**ЭФФЕКТ КОМПТОНА.**

**УСЛОВИЕ  
НЕКОГЕРЕНТНОГО  
РАССЕЯНИЯ:**

$\epsilon > A_i$ .  
Характерно для  
ЖЕСТКОГО  
излучения.  
Описывается  
уравнением:

# Линейный коэффициент ослабления в законе ослабления излучения

В общем случае  
может складываться из трех  
коэффициентов:  
ослабления за счет когерентного рассеяния  $\mu_k$ ,  
фотоэффекта  $\mu_\Phi$   
и некогерентного рассеяния  $\mu_{nk}$ :

$$\mu = \mu_k + \mu_\Phi + \mu_{nk}.$$

# Первичные эффекты гамма-излучения

## ТРИ ПЕРВИЧНЫХ ЭФФЕКТА:

- ФОТОЭФФЕКТ
- НЕКОГЕРЕНТНОЕ РАССЕЯНИЕ
- ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПАР

III – ПРИМЕР  
ПРЕВРАЩЕНИЯ  
"ЧАСТИЦ"  
ПОЛЯ  
В ЧАСТИЦЫ ВЕЩЕСТВА:

В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ  
ПОЛЕ АТОМНОГО  
ЯДРА  
ГАММА-ФОТОН →  
"ПАРА"  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОН,  
которые сразу же  
РАЗЛЕТАЮТСЯ В  
РАЗНЫЕ СТОРОНЫ.

- Превращение происходит с выполнением законов сохранения энергии и импульса.
- Реакция возможна при энергии гамма-фотона, не меньшей

- РОЛЬ ЯДРА - ПРИНЯТИЕ НА СЕБЯ ЧАСТИ ИМПУЛЬСА ФОТОНА.

В общем случае  
ЛИНЕЙНЫЙ  
КОЭФФИЦИЕНТ  
ОСЛАБЛЕНИЯ  
ТАКЖЕ СКЛАДЫВАЕТСЯ  
ИЗ ТРЕХ  
КОЭФФИЦИЕНТОВ:  
 $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$ .

# Первичные эффекты АЛЬФА- И БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

- ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ АЛЬФА И БЕТА-МИНУС САМИ ПРОИЗВОДЯТ НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ ИОНИЗАЦИЮ ВЕЩЕСТВА  
(КАК ЭЛЕКТРОНЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ ПРИ ФОТОЭФФЕКТЕ ИЛИ НЕКОГЕРЕНТНОМ РАССЕЯНИИ).
- ПРИ ВСТРЕЧЕ В ВЕЩЕСТВЕ БЕТА-ПЛЮС ЧАСТИЦЫ С ЭЛЕКТРОНОМ -  
**АННИГИЛЯЦИЯ:** ПРЕВРАЩЕНИЕ В ДВА ГАММА-ФОТОНА, РАЗЛЕТАЮЩИЕСЯ С ОДИНАКОВОЙ ПО МОДУЛЮ СКОРОСТЬЮ  
В РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ.  
**АННИГИЛЯЦИЯ - ПРОЦЕСС, ОБРАТНЫЙ РОЖДЕНИЮ  
электрон-позитронной пары**

## 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

### ТРИ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- ЛИНЕЙНАЯ ПЛОТНОСТЬ ИОНИЗАЦИИ  
*(УДЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ)*
- ЛИНЕЙНАЯ ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ  
*(УДЕЛЬНЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ)*
- СРЕДНИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ПРОБЕГ  
*(СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОЛНОГО*

### УДЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ

$$i = dn / dx$$

Это  
ЧИСЛО ПАР ИОНОВ,  
ОБРАЗОВАННЫХ  
ЧАСТИЦЕЙ  
НА ЕДИНИЦЕ ПУТИ  
В ВЕЩЕСТВЕ.

## УДЕЛЬНЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

$$S = dE / dx$$

[Дж/м]

Это  
ЭНЕРГИЯ,  
ТЕРЯЕМАЯ ЧАСТИЦЕЙ  
НА ЕДИНИЦЕ ПУТИ  
В ВЕЩЕСТВЕ.

## СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА

R [м]

Это  
РАССТОЯНИЕ,  
ПРОЙДЕННОЕ  
ЧАСТИЦЕЙ  
СО СКОРОСТЬЮ,  
БОЛЬШЕЙ СКОРОСТИ  
МОЛЕКУЛЯРНО-  
ТЕПЛОВОГО  
ДВИЖЕНИЯ.

# СРАВНИМ ЭТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ РАЗНЫХ ВИДОВ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

ЧЕМ БОЛЬШЕ  $i$ , ТЕМ БОЛЬШЕ  $s$   
И ТЕМ МЕНЬШЕ  $r$ .

$$i_{\alpha} > i_{\beta} > i_{\gamma}$$

$$S_{\alpha} > S_{\beta} > S_{\gamma}$$

$$R_{\alpha} < R_{\beta} < R_{\gamma}$$

# Объяснение

- АЛЬФА-ЧАСТИЦЫ - ЗАРЯЖЕННЫЕ, СРАВНИТЕЛЬНО МЕДЛЕННО ДВИЖУЩИЕСЯ.

НА ПУТИ - ПЛОТНОЕ СКОПЛЕНИЕ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ.

ГЛУБИНА ПРОНИКОВЕНИЯ В ВЕЩЕСТВО ОКОЛО 40 МКМ.

- БЕТА-МИНУС ЧАСТИЦЫ ДВИЖУТСЯ БЫСТРЕЕ.

НА ПУТИ - РАЗРЕЖЕННОЕ СКОПЛЕНИЕ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ.

НАИБОЛЬШАЯ ИОНИЗАЦИЯ – К КОНЦУ ПУТИ.

ГЛУБИНА ПРОНИКОВЕНИЯ В СРЕДНЕМ - ЧЕСКОПЬКО ММ

- ФОТОНОВСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ → ОБРАЗУЮТСЯ ЭЛЕКТРОНЫ С БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИЕЙ, ДЕЙСТВУЮТ ПОДОБНО БЕТА-МИНУС ЧАСТИЦАМ.

НО ЗАРЯДА У ФОТОНА НЕТ

↓  
БОЛЬШОЙ ПУТЬ  
ЕЩЕ ДО ПЕРВОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.

## ВЫБОР ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВНУТРЕННИЕ ОРГАНЫ:

- ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК ОБЛУЧЕНИЯ - ЭФФЕКТИВНЕЕ ФОТОНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.
- ВВЕДЕНИЕ ИСТОЧНИКА ВНУТРЬ – ЭФФЕКТИВНЕЕ АЛЬФА- ИЛИ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ.