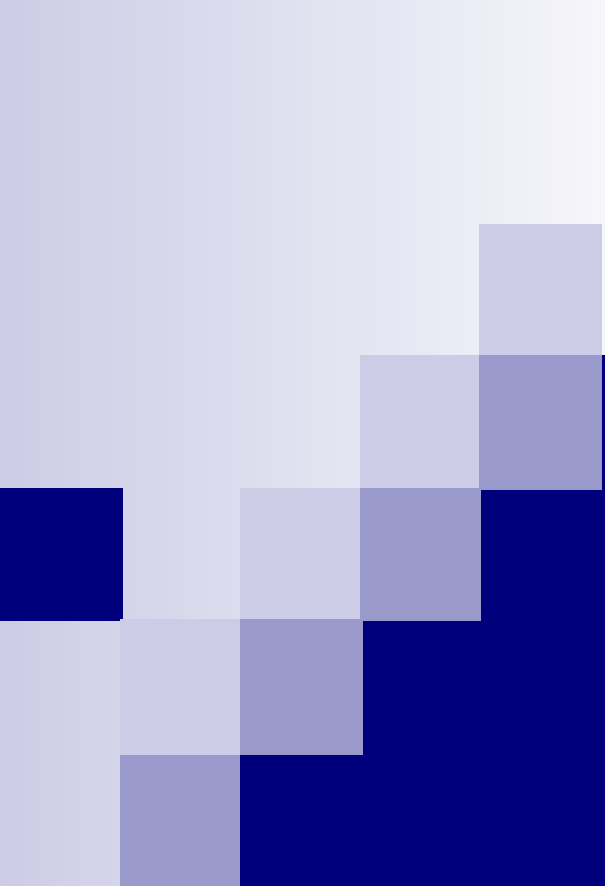




Рентгеновское излучение. Радиоактивность. Дозиметрия

Шамаева Т.Н.

Ионизирующее излучение – это потоки элементарных частиц или электромагнитные волны, взаимодействие которых с веществом приводит к его ионизации.



Рентгеновское излучение – это **электромагнитные волны** с длиной волны приблизительно от **80** до **10^{-5}** нм.

Виды рентгеновского излучения

- **Тормозное** рентгеновское излучение;
- **Характеристическое** рентгеновское излучение.

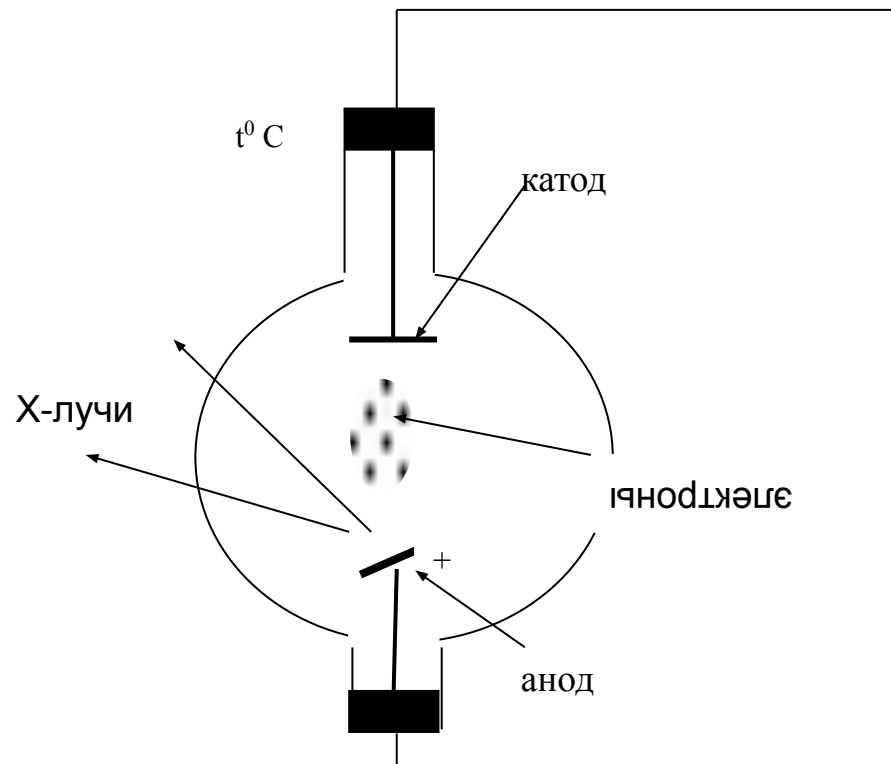


Рис.1 Устройство рентгеновской трубки

Механизм возникновения тормозного рентгеновского излучения

При нагревании катода в результате термоэлектронной эмиссии происходит испускание электронов. Под действием электрического поля высокого напряжения электроны упорядоченно движутся к аноду (возникает электрический ток). При приближении к аноду электроны резко тормозятся электрическим полем ионов кристаллической решетки анода, т.е. движутся с ускорением. Согласно теории Максвелла заряженные частицы (в данном случае электроны), движущиеся с ускорением, являются источником электромагнитных волн. Таким образом, процесс торможения электронов сопровождается возникновением электромагнитных волн - тормозного рентгеновского излучения.

Преобразования энергии, происходящие в рентгеновской трубке

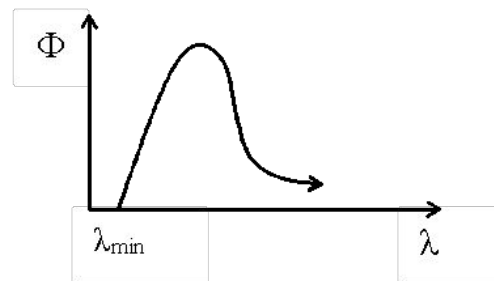
- Работа электрического поля $A = e \cdot U$ идет на увеличение кинетической энергии электрона $E_k = e \cdot U$.
- При торможении электронов их кинетическая энергия уменьшается и идет на излучение фотона с энергией $E_\phi = h \cdot \nu$ и нагревание анода $E_{\text{нагр}}$ (если электрон сталкивается с анодом).
- Таким образом $e \cdot U = h \cdot \nu + E_{\text{нагр}}$
где e - заряд электрона, U – напряжение в рентгеновской трубке, h – постоянная Планка, ν - частота излучения.

Характеристики тормозного рентгеновского излучения

1. **Поток рентгеновского излучения** – энергия, переносимая волной (рентгеновским излучением) за единицу времени через площадь, перпендикулярную направлению распространения волны.

$\Phi = k \cdot I \cdot U^2 \cdot Z$ (1), где I – сила тока в рентгеновской трубке, U – напряжение в рентгеновской трубке, Z – порядковый номер атома вещества анода, $k=10^{-9} \text{ В}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности.

2. **Спектр тормозного рентгеновского излучения** – график, показывающий зависимость потока рентгеновского излучения от длины волны. Он является сплошным.



Граница тормозного рентгеновского излучения ($\lambda_{\min}$) – это минимальная длина волны (максимальная частота $\nu_{\max}$), начиная с которой наблюдается рентгеновские лучи.

$\lambda_{\min} = \frac{12,3}{U}$ (2), где $[\lambda_{\min}] = 10^{-10} \text{ м}$, $[U] = 10^3 \text{ В}$.

3. **Проникающая способность.** Чем меньше длина волны, тем больше проникающая способность рентгеновских лучей.

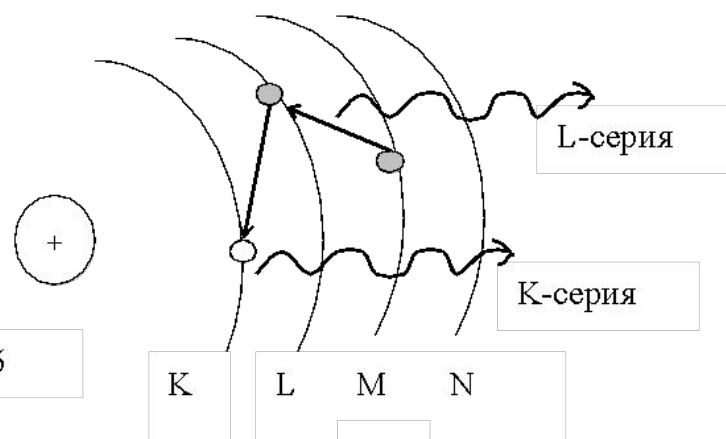
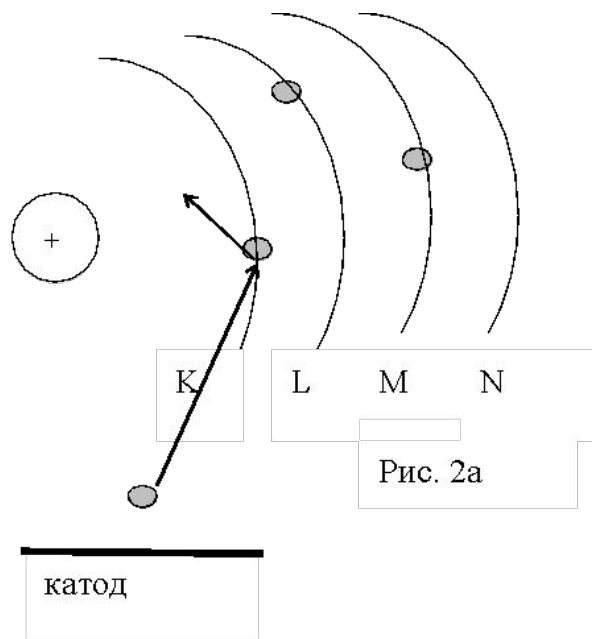
4. **Жесткость рентгеновского излучения.** Чем меньше длина волны, тем излучение более жесткое.

Характеристическое рентгеновское излучение

При увеличении напряжения в рентгеновской трубке электрон, испускаемый катодом, может преодолеть электрическое поле атомов анода и попасть внутрь атома, выбивая электрон с одного из внутренних уровней (рис.2а). На месте выбитого электрона образуется «вакантное место», на которое переходит электрон с более внешнего уровня. При переходе электрона с уровня с большей энергией на уровень с меньшей энергией, атом испускает фотон электромагнитного излучения, в данном случае фотон характеристического рентгеновского излучения (рис. 2б).

Спектр характеристического рентгеновского излучения является линейчатым.

Рис. 2б



Закон Мозли

Спектр характеристического рентгеновского излучения является **линейчатым**.

Закон Мозли позволяет определить атомный номер химического элемента по наблюдаемому спектру характеристического излучения.

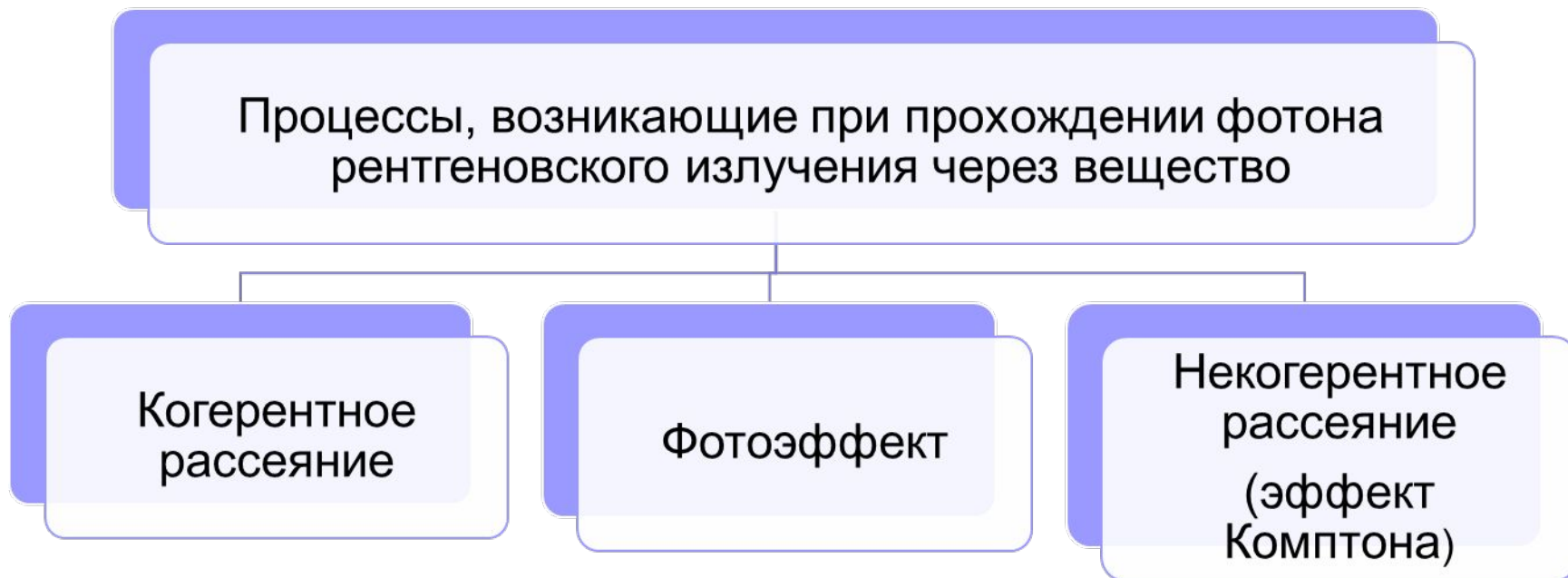
$$\sqrt{\nu} = A \cdot (Z - B)$$

где ν - частота спектральной линии, Z - атомный номер испускающего элемента, A , B - константы.

Поскольку каждый атом характеризуется собственным набором энергетических уровней, то спектр характеристического рентгеновского излучения будет индивидуальным для атомов того или иного химического элемента

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

При падении рентгеновского излучения на тело, оно в незначительной степени **отражается** от его поверхности, но в основном проходит внутрь, **поглощается** или **рассеивается** в результате взаимодействия с электронами атомов вещества. Частично фотоны могут проходить тело насквозь, не взаимодействуя с ним.

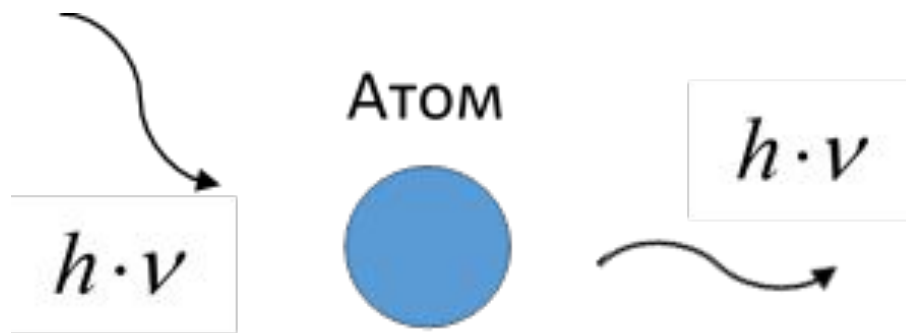


То, какой процесс будет происходить при взаимодействии фотонов рентгеновского излучения с атомами вещества, зависит от соотношения энергии ионизации и энергии фотона

- **Энергия ионизации** ($A_{и}$) — энергия, необходимая для удаления внутренних электронов за пределы атома или молекулы.
- **Энергия фотона** $E_{\phi} = h \cdot \nu$

Когерентное рассеяние

- Этот процесс происходит при условии, что $E_{\text{ф}} < A_{\text{и}}$. В это случае **изменяется только направление движения фотона**, его частота, длина волны и энергия не изменяются. Ионизации атома (вырывания электрона) не происходит.



Фотоэффект

- Если $E_{\text{ф}} \geq A_{\text{и}}$, то фотон рентгеновского излучения **поглощается** и происходит отрывание электрона от атома (**ионизация**).

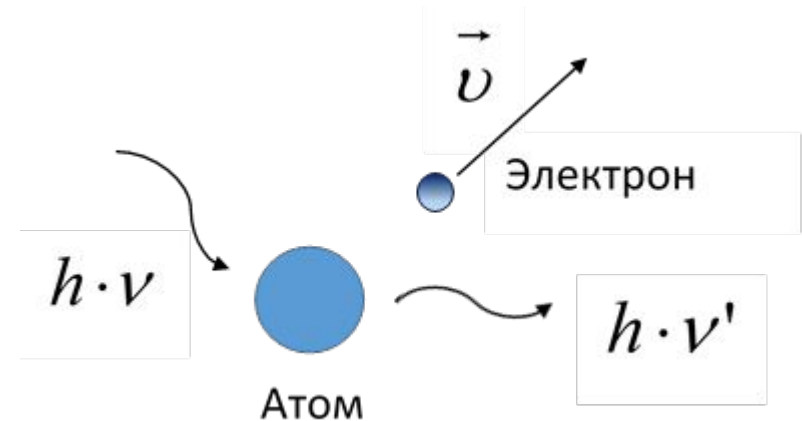


- Если энергии фотона недостаточно для отрыва электрона, то происходит **возбуждение атома** или молекулы, которое у некоторых веществ приводит к последующему излучению фотонов света (рентгенолюминесценция)

Эффект Комптона (некогерентное рассеяние)

- Если $E_{\phi} \gg A_{и}$, то под действием внешнего фотона рентгеновского излучения происходит отрывание электрона с внешней оболочки атома (**ионизация атома**) и сообщение ему кинетической энергии. Также появляется **вторичный рентгеновский фотон** с энергией $h \cdot \nu'$, меньшей, чем у внешнего фотона. Вторичный фотон, следовательно, имеет большую частоту, то меньшую длину волны.

$$h \cdot \nu = A_{и} + \frac{m \cdot v^2}{2} + h \cdot \nu'$$



Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

Закон ослабления рентгеновского излучения: $\Phi = \Phi_0 e^{-\mu \cdot x}$,

где Φ_0 – падающий на вещество поток рентгеновских лучей,

Φ – выходящий поток рентгеновских лучей,

x – толщина слоя вещества,

μ – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения веществом.

$\mu = k \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$, где Z – порядковый номер атомов вещества, составляющих биологическую ткань.

Массовый коэффициент ослабления: $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$, где ρ – плотность вещества.

Применение рентгеновского излучения в медицине

- *Рентгенография* – метод рентгенодиагностики, при котором изображение органа или ткани регистрируется на фотопленке (в основе лежит химическое действие рентгеновских лучей).
- *Цифровая рентгенография (радиовизиография)* – метод рентгенодиагностики, при котором изображение получается на экране монитора. Вместо рентгеновской пленки используются специальные высоко-чувствительные датчики, формирующие цифровое изображение или электронно-оптические преобразователи, создающие аналоговый сигнал, преобразуемый затем в цифровой сигнал.
- *Рентгеноскопия* – метод рентгенодиагностики, при котором осуществляется наблюдение органов и тканей в проходящем рентгеновском излучении при помощи флюоресцирующего экрана.
- *Рентгеновская томография* – метод рентгенодиагностики, основанный на получении послойного изображения внутреннего строения органов человека.

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Период полураспада

- Если $E_{\phi} \gg A_{\text{и}}$, то под действием внешнего фотона рентгеновского излучения происходит отрывание электрона с внешней оболочки атома (**ионизация атома**) и сообщение ему кинетической энергии. Также появляется **вторичный рентгеновский фотон** с энергией, меньшей, чем у внешнего фотона. Вторичный фотон, следовательно, имеет большую частоту, то меньшую длину волны.

Закон радиоактивного распада: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где

N – число нераспавшихся ядер,

N_0 – первоначальное число радиоактивных ядер,

t – время,

λ -постоянная радиоактивного распада (характеризует вероятность распада).

Формулировка закона: число радиоактивных ядер, которые еще не распались, убывает со временем по экспоненциальному закону.

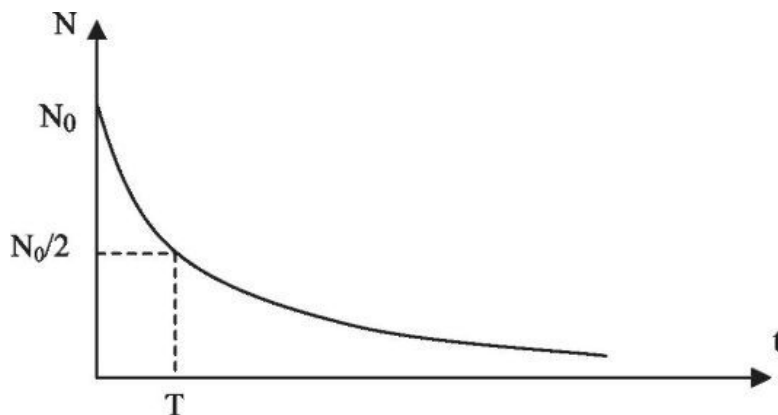
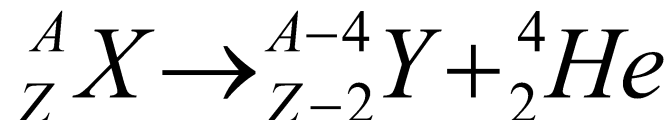


Рис. 1. Зависимость числа нераспавшихся ядер от времени

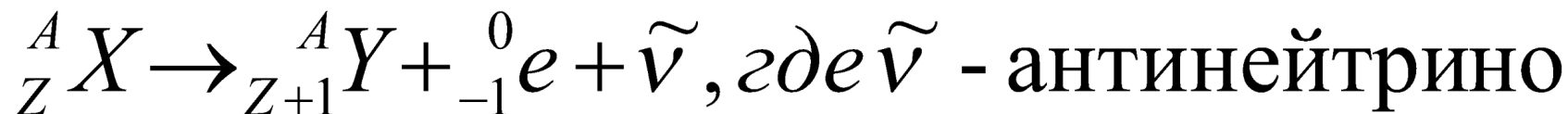
Виды радиоактивного распада

- **Альфа-распад** (α – частица – ядро атома гелия):

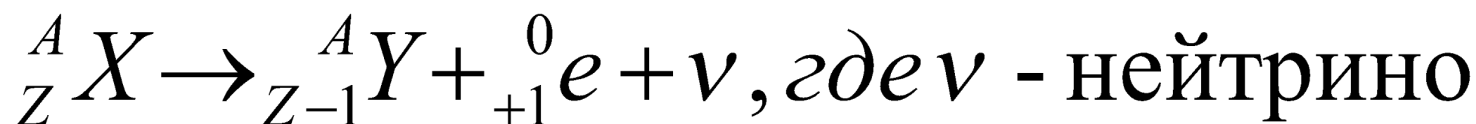


- **Бета-распад:**

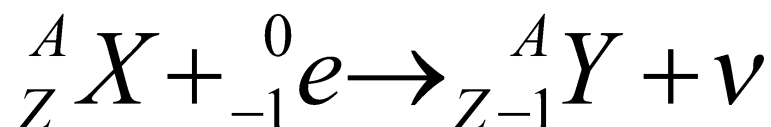
а) электронный распад (β^- – распад)



б) позитронный распад (β^+ – распад)



- В) Электронный захват: материнское ядро захватывает с ближайшей оболочки электрон, в результате образуется нейтрон. Часто сопровождается излучением квантов рентгеновского излучения. Это излучение возникает, когда место, освободившееся при поглощении внутреннего электрона, заполняется электроном с внешней орбиты.



Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина радиоактивных ядер.

Найдем связь периода полураспада с постоянной распада.

Подставим в закон радиоактивного распада $N=N_0$, $t=T$.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}.$$

Прологарифмируем последнее выражение:

$$\ln 2^{-1} = \ln(e^{-\lambda T}) \quad \text{или} \quad -\ln 2 = -\lambda \cdot T \cdot \ln e \quad (\text{по свойству логарифма } \log_a x^n = n \log_a x).$$

Т.к. $\ln e = 1$, то $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Активность радиоактивного препарата – скорость радиоактивного распада (число ядер, распадающихся за единицу времени).

Активность:
$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Единицы измерения в СИ: [A=1Бк] -1 **беккерель** – активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором за 1с проходит один распад.

Внесистемная единица измерения: **кюри**: $1Ku = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

$$A = -\frac{dN}{dt} = -(N_0 \cdot e^{-\lambda t})' = -N_0 \cdot (e^{-\lambda t})' \cdot (-\lambda \cdot t)' = N_0 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot (t)' = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$A = \lambda \cdot N \quad \text{или} \quad A = \frac{\ln 2}{T} N$$

Удельная массовая активность – величина, равная отношению активности изотопа к его массе.

Дозиметрия – это раздел радиационной биофизики, в котором устанавливаются некоторые количественные критерии воздействия ионизирующих излучений на биологические объекты и прежде всего на человеческий организм.

Величина	Формула	Определение	Единицы измерения		Связь между единицами измерения
			СИ	внесистемная единица	
Поглощенная доза излучения	$D = \frac{dE}{dm}$	Отношение энергии E, переданной элементу облученного вещества, к массе этого элемента m	1 Гр (1 грей)	1 рад (1 рад)	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$
Экспозиционная доза	$X = \frac{q}{m}$	Отношение суммарного заряда ионов одного знака, образованных в сухом воздухе под действием рентгеновского или γ -излучения, к массе воздуха	$1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	1 Р (1 рентген)	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
Эквивалентная доза	$H = K \cdot D$	Характеризует биологическое действие данного вида ионизирующего излучения, равно произведению коэффициента качества на поглощенную дозу	1 Зв (1 зиверт)	1 бэр	$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$
Мощность поглощенной дозы	$P = \frac{D}{t}$	Это поглощенная доза в единицу времени	1 Гр/с	1 рад/с	$1 \text{ рад/с} = 10^{-2} \text{ Гр/с}$
Эффективная эквивалентная доза	$H_{\text{эфф}} = \sum_{i=1}^n K_{pp} \cdot H_i$	Это мера риска возникновения последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности, равна сумме произведений эквивалентной дозы в органах (H_i) на коэффициент риска для данного органа (K_{pp})	1 Зв (1 зиверт)	1 бэр	$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$

Коэффициент качества (К) – коэффициент, показывающий во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше, чем рентгеновского или γ -излучения при одинаковой поглощенной дозе излучения в тканях. (Например, коэффициент качества нейтронов равен 10, альфа-излучения равен 20).

Связь между мощностью экспозиционной дозы и активностью препарата:

$$\frac{X}{t} = K_{\gamma} \cdot \frac{A}{r^2}$$

постоянная, r – расстояние от источника, $\frac{X}{t}$ – мощность экспозиционной дозы.

Связь между поглощенной и экспозиционной дозой:
 $D = f \cdot X$, где f – коэффициент, зависящий от энергии фотонов и от облучаемого вещества.