

Дисциплина:
методы магнитной
томографии

Лекция 1

- Физические основы медицинской визуализации. Термография. Рентгеновское излучение.
- Лектор: Загитов Гайфулла Нутфуллинович.

Основная задача современной медицинской диагностики, использующей достижения ядерной физики и компьютерных технологий, состоит в восстановлении внутренней структуры организма (визуализации) по результатам измерений вне этой структуры. Все виды визуализации основаны на физике взаимодействия излучения на вещество.

В качестве излучения могут быть использованы любые физические поля или частицы при условии, что они не нарушают целостности объекта и его жизнедеятельности. Внедрение в практику этих методов (наряду с традиционной рентгенологией) привело к возникновению новой обширной медицинской дисциплины, получившей за рубежом название диагностической радиологии (от латинского *radius* - луч), а у нас - лучевой медицинской диагностики (ЛМД).

Основные методы ЛМД можно разделить на 3 группы.

- Использование рентгеновского излучения.

Здесь основной измеряемый параметр – интенсивность потока рентгеновских фотонов в узком пучке на входе в тело пациента и на выходе из него, а основная характеристика структуры – распределение плотности вещества организма по его объёму.

- Использование электромагнитного излучения ВЧ диапазона.

Этот вид излучения используется в магниторезонансных томографах, работающих на принципе эффекта ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Здесь используется направленное локализованное определённым образом высокочастотное электромагнитное поле, которое влияет на поведение магнитных моментов отдельных атомов (как правило, атомов водорода), помещенных в магнитное поле. После прекращения воздействия возникает реакция в виде затухающего электромагнитного излучения. Измеряя амплитуду и скорость затухания его, можно восстановить внутреннюю структуру объекта. Основной структурной характеристикой в этом методе является распределение атомов водорода (или какого-либо другого элемента) по объёму тела.

- Использование излучения радиоактивных изотопов.

В этом методе используются радиофармпрепарат (РФП) – радиоактивное вещество с малым периодом полураспада. РФП вводится в организм через кровь или пищеварительный тракт. Через некоторое время установившееся распределение препарата по исследуемому органу отражает его структуру. Регистрируя интенсивность ионизирующего излучения на выходе из организма, можно получать информацию о деталях этой структуры.

Особенность методов ЛМД, отличающая её от классических медицинских методик (пальпация, перкуссия, аускультации, проведение биохимических анализов, биопсия), состоит в том что необходимая для диагностики заболевания информация представлена здесь в форме набора, т.н. медицинских изображений (medical imagings) внутренних структур органов. Данный подход позволяет неинвазивно, безболезненно определять патологию внутренних органов и сосудов, появление опухолей на ранних этапах, позиционировать положение новообразований в организме, наблюдать за

Тепловое излучение

- электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счет своей внутренней энергии

$$R_{\varepsilon} = \frac{dW}{dS \cdot dt} \quad (1.2)$$

Единицы системы СИ:

Энергетическая светимость – 1 Вт/м²

dR_{ω} – поток энергии, излучаемой с единицы поверхности, в интервале частот от ω до $\omega + d\omega$

$$dR_{\omega} = r_{\omega} \cdot d\omega$$

- Величина $r_{\omega}(T) = \frac{dR_{\varepsilon}}{d\omega}$, равная энергетической светимости, приходящейся на единичный интервал частот, называется **спектральной плотностью энергетической светимости** или **испускательной способностью** тела.

$$R_{\varepsilon}(T) = \int_0^{\infty} r_{\omega}(T) d\omega \quad (1.3)$$

$$\lambda = 2\pi c / \omega \Rightarrow d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega$$

1.2. Законы теплового излучения абсолютно черного тела

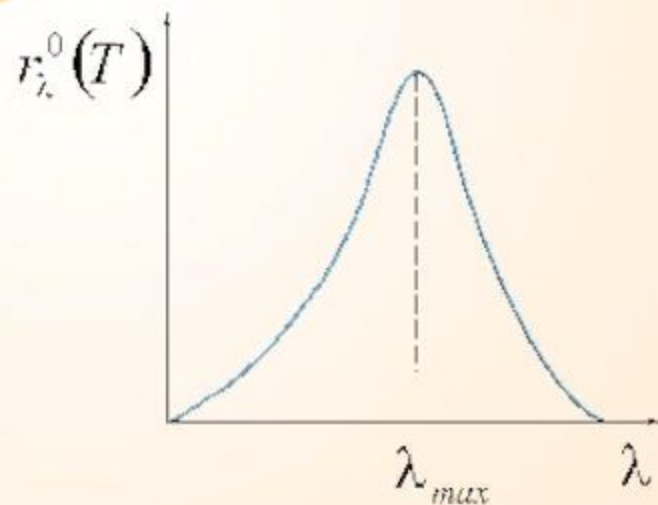
Закон Стефана-Больцмана

- Энергетическая светимость абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры.

$$R_{\Sigma}^0(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (1.6)$$

$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - *постоянная Стефана-Больцмана.*

Закон смещения Вина



$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.8)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К –
постоянная Вина.

Пример

Найдем, на какую длину волны приходится максимум теплового излучения человека.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{273 + 366} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ м} = \underline{9,4 \text{ мкм}}$$

Медицинская термография - это метод обследования пациентов с помощью специального прибора - тепловизора, позволяющего улавливать инфракрасное излучение и преобразовывать его в изображение - термограмму, которая регистрирует распределение тепла на поверхности тела. Температура кожи является интегральным показателем, и в ее формировании принимают участие несколько факторов: сосудистая сеть (артерии и вены, лимфатическая система), уровень метаболизма в органах и теплопроводность кожи. При анализе термограмм должны учитываться все эти факторы. Главным из них является все-таки сосудистый, который и определяет основные направления использования инфракрасного тепловидения (ИКТ) в клинической медицине. Увеличение притока крови или, наоборот, его уменьшение, вызванное сужением сосудов (стеноз) или их закупоркой (окклюзия), приводит к повышению или снижению температуры тканей соответственно.

Многие патологические процессы меняют нормальное распределение температуры на поверхности тела, причем во многих случаях изменения температуры опережают другие клинические проявления, что очень важно для ранней диагностики и своевременного лечения. Именно поэтому ИКТ, как метод функциональной диагностики, в последнее время завоевывает все большее признание в различных областях медицины, науки и клинической практики. Его значение и преимущество сопоставимо с рентгенографией, УЗИ, КТ и МРТ, которые применяются только для оценки морфологических особенностей органов. ИКТ визуально и количественно (для приборов последнего поколения с высокой точностью 0,01 °С) оценивает инфракрасное излучение от поверхности тела, отражающее состояние внутренних структур организма.

Этот вид диагностики позволяет оценивать функциональные изменения в динамике, то есть следить за изменениями при первичном обследовании и непосредственно в течение проводимого лечения.

Термография позволяет уточнять локализацию функциональных изменений, активность процесса и его распространенность, характер изменений - воспаление, застойность или злокачественность

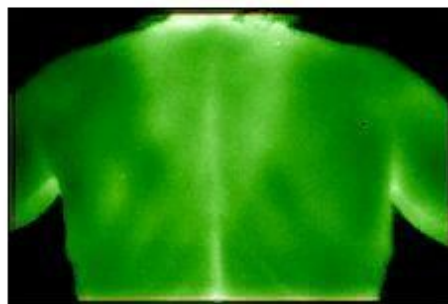
Примеры применения тепловизионного комплекса «Мед-ИК» для диагностики заболеваний



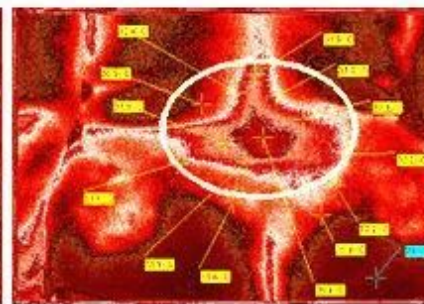
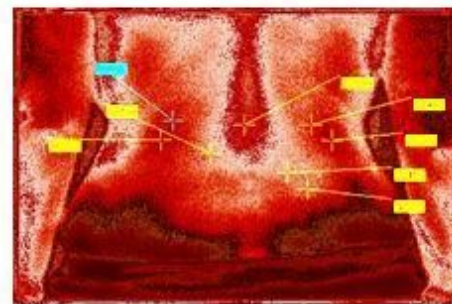
Щитовидная железа: норма (слева) и
многоузловой зоб (справа).



Молочные железы: норма (слева) и
умеренно выраженная мастопатия левой
молочной железы (справа).



Грудной отдел позвоночника: норма (слева) и
сколиоз (справа).



Поясничный отдел позвоночника: норма (слева) и
двусторонний поясничный радикулит (справа).

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

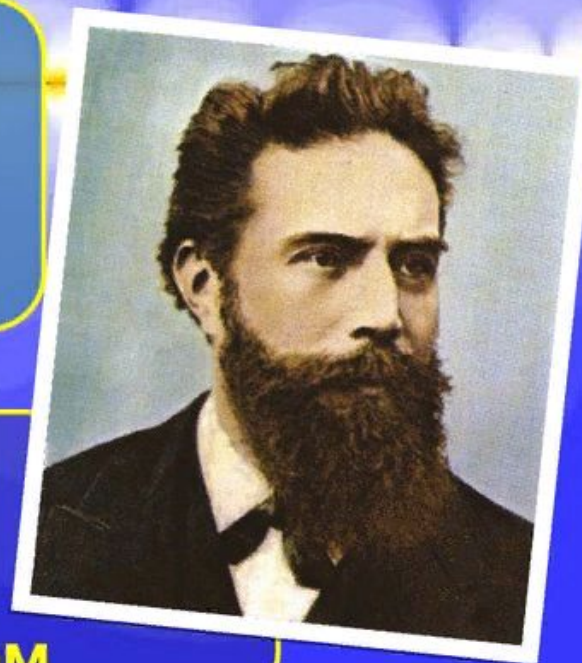
электромагнитные излучения
с длинами волн от 10 мм до 1 пм,
с частотами от 30 ПГц до 300 ЭГц

Источник- электроны при
торможении

Индикаторы- фотопластина,
сцинтилляционный счётчик

было открыто в 1895 году
немецким учёным

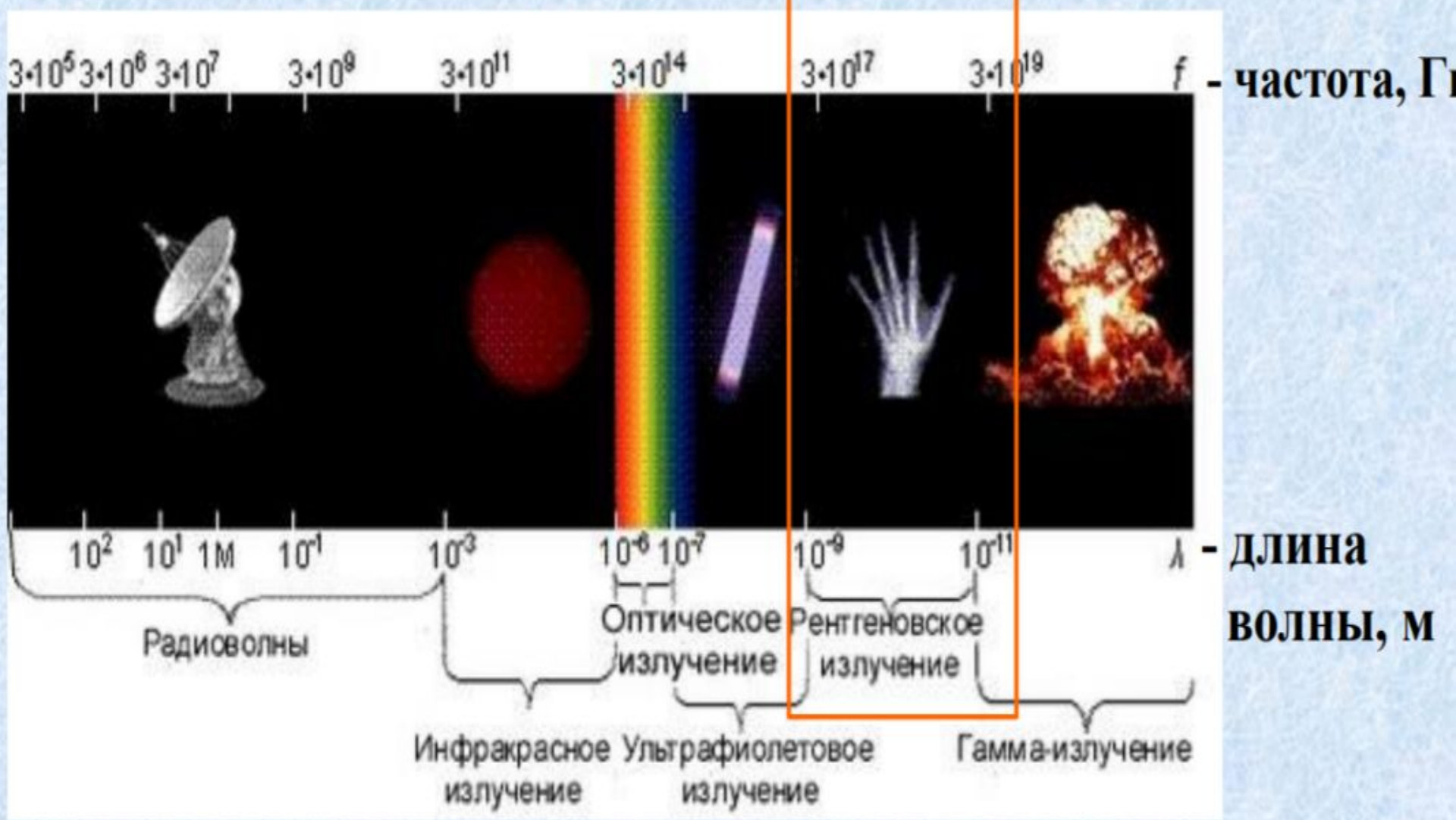
Вильгельмом Рентгеном



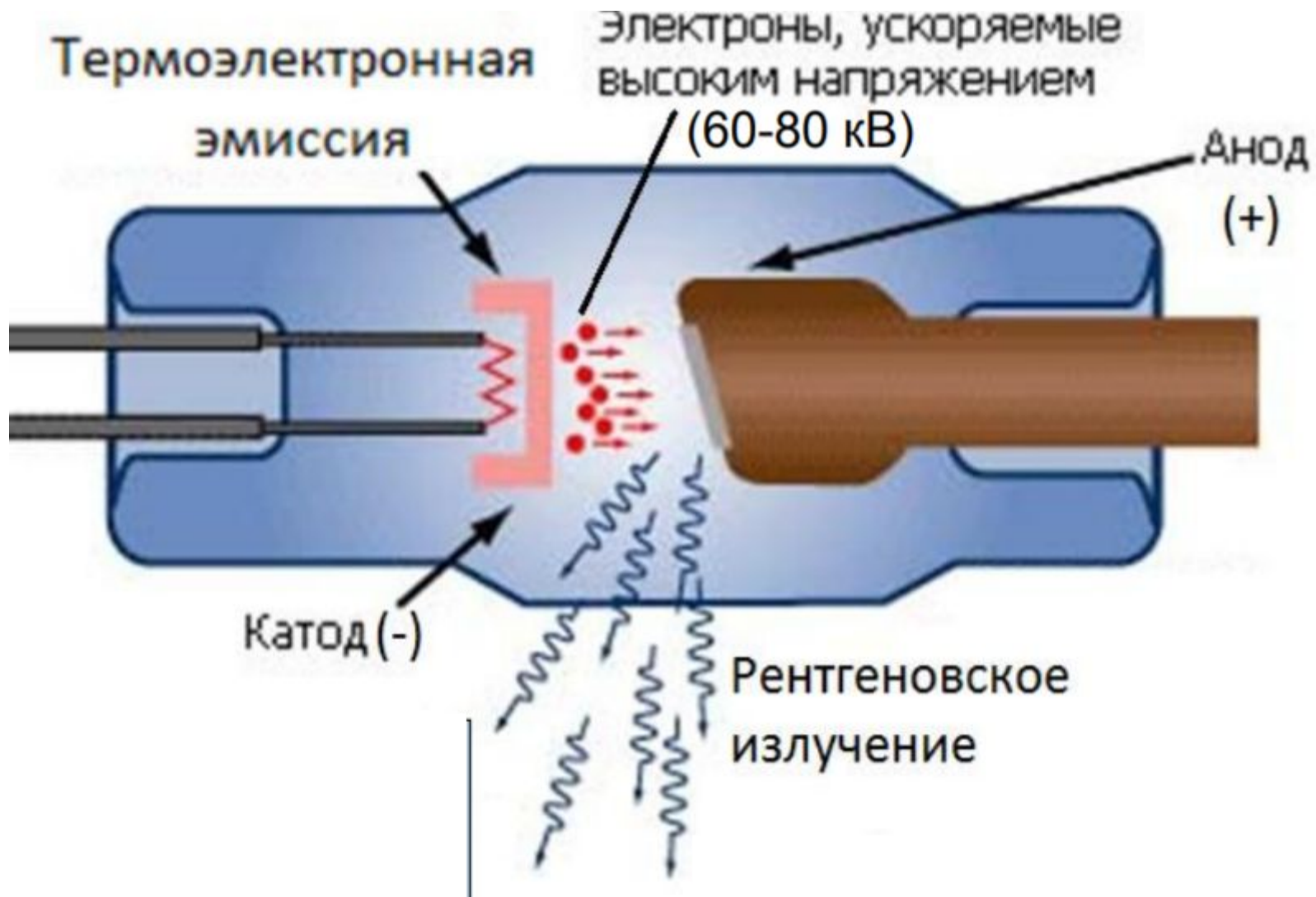
Рентгеновское излучение.

*Первый в мире
рентгеновский
снимок,
запечатлевший
кисть руки
жены Рентгена
с обручальным
кольцом.*





Устройство рентгеновской трубки



Катод – отрицательно (напр., медь) заряженный источник электронов - вольфрамовая нить, которая при пропускании через нее тока нагревается и испускает электроны (термоэлектронная эмиссия). Анод – положительно заряженная мишень для электронов из тугоплавкого материала с высокой теплопроводностью (чтобы было легче охлаждать). Рентгеновское излучение возникает, когда ускоренные электроны, достигая анода, «тормозят», и часть их кинетической энергии преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Остальная часть энергии ускоренных электронов идет на нагревание анода (поэтому его нужно охлаждать).

Тормозное рентгеновское излучение

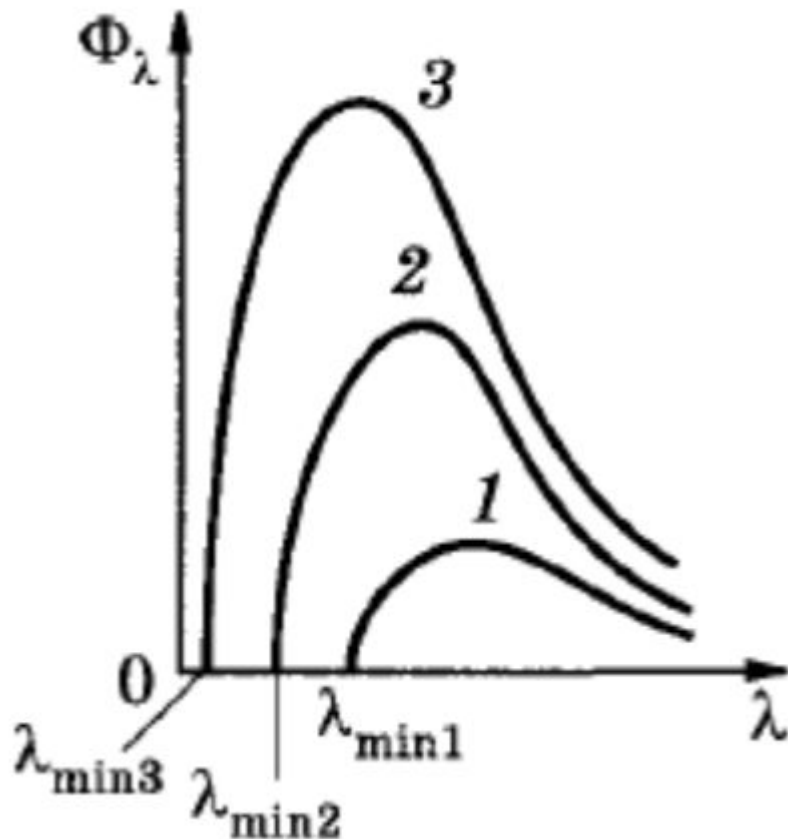
- В результате торможения электрона электростатическим полем атомного ядра и атомных электронов вещества анода возникает тормозное рентгеновское излучение.



Свойства тормозного рентгеновского излучения

- 1. Рентгеновское излучение испускается отдельными фотонами, энергии которых связаны с частотой формулой: $E = h\nu = hc/\lambda$ где ν - частота, λ - длина волны, c – скорость света, h – постоянная Планка.
- 2. Все электроны, достигающие анода, имеют одинаковую кинетическую энергию, равную работе электрического поля между анодом и катодом: $E_k = eU$ где e - заряд электрона, U - ускоряющее напряжение.
- 3. Кинетическая энергия электрона частично передается веществу и идет на его нагревание (Q), а частично расходуется на создание рентгеновского кванта:
 - $eU = Q + h\nu$
- 4. Соотношение между Q и $h\nu$ случайно.

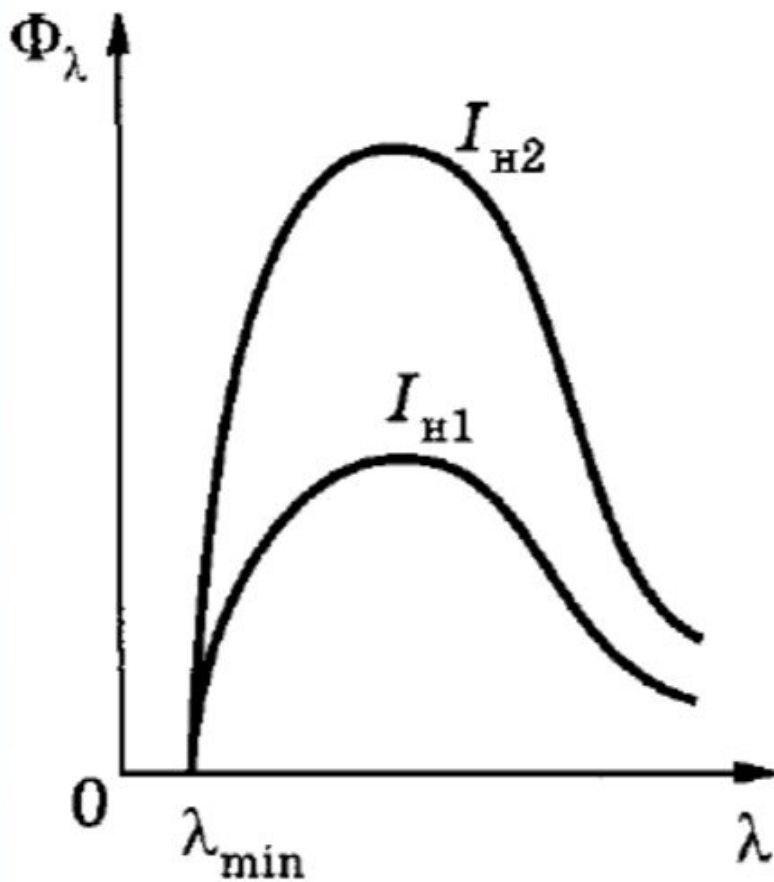
Спектр тормозного рентгеновского излучения



Зависимости плотности потока рентгеновского излучения от длины волны λ (спектры) при разных напряжениях на рентгеновской трубке:
 $U_1 < U_2 < U_3$

Наиболее коротковолновое тормозное излучение, соответствующее длине волны λ_{min} , возникает тогда, когда энергия, приобретенная электроном в ускоряющем поле, полностью переходит в энергию фотона: $E_k = eU = h\nu_{max} = hc / \lambda_{min}$ (Q=0) Откуда $\lambda_{min} = hc / eU$ где λ_{min} – минимальная длина волны, e - заряд электрона, U - ускоряющее напряжение, c – скорость света, h – постоянная Планка. Коротковолновое рентгеновское излучение обычно обладает большей проникающей способностью, чем длинноволновое, и называется жестким, а длинноволновое — мягким.

Увеличивая напряжение на рентгеновской трубке, изменяют спектральный состав



Спектр рентгеновского излучения при одном напряжении, но при разной силе тока накала катода: $I_{н1} < I_{н2}$

Если увеличить температуру накала катода, то возрастут эмиссия электронов и сила тока в рентгеновской трубке. Это приведет к увеличению числа фотонов рентгеновского излучения, испускаемых каждую секунду.

Спектральный состав его не изменится, но общая плотность потока рентгеновского излучения увеличится.

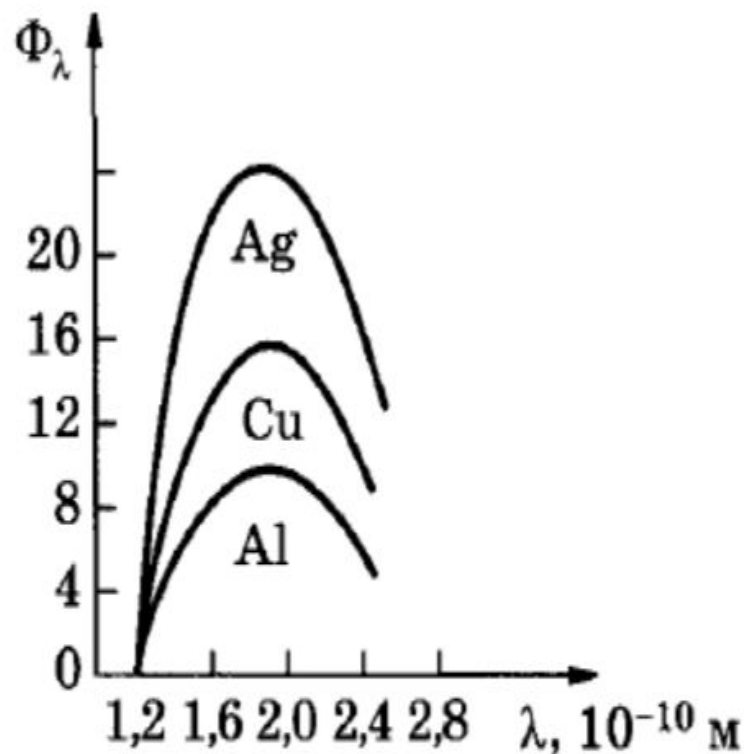
Поток рентгеновского излучения вычисляется по формуле:

$$\Phi = kIU^2Z,$$

где U и I — напряжение между электродами и сила тока в рентгеновской трубке,

Z — порядковый номер атома вещества анода,

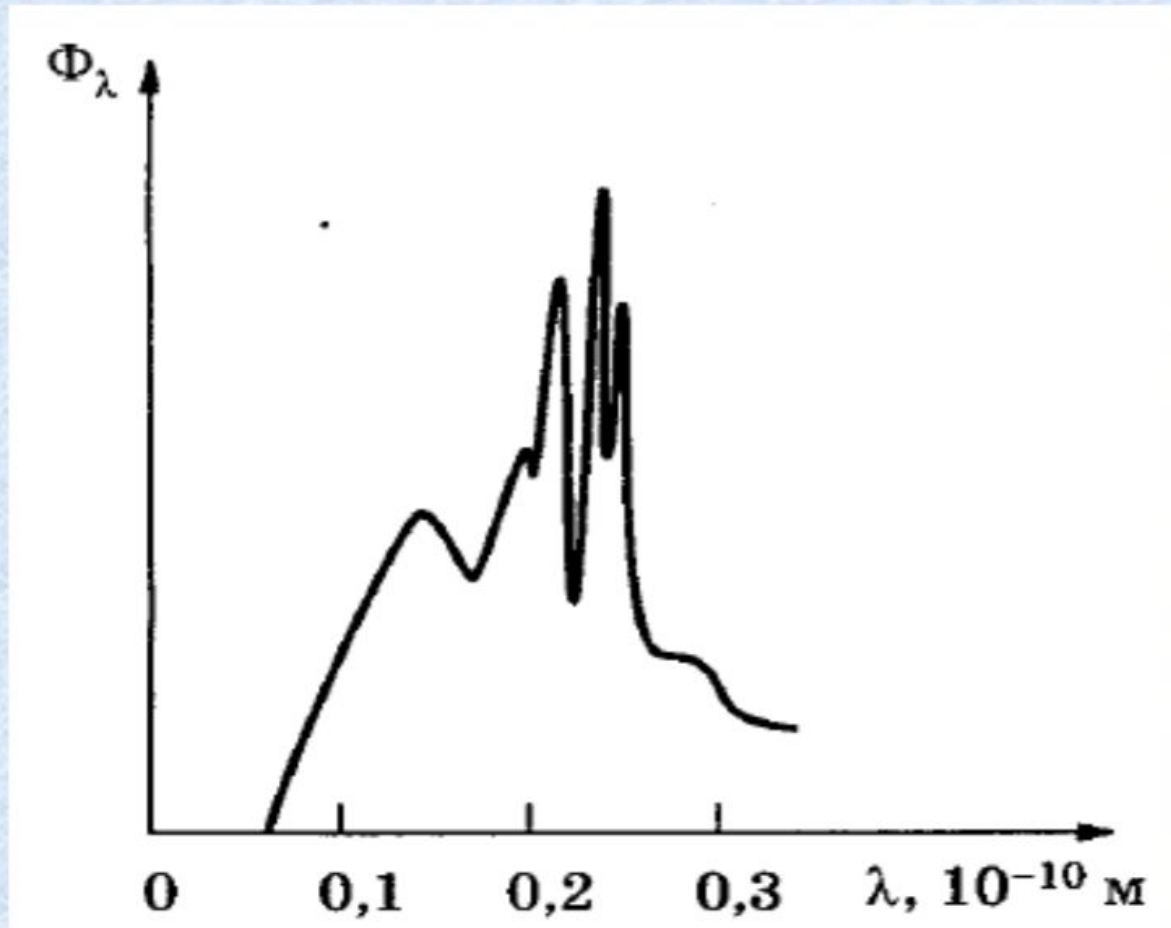
$k = 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ — коэффициент пропорциональности.



Спектр рентгеновского излучения при различных материалах анодов

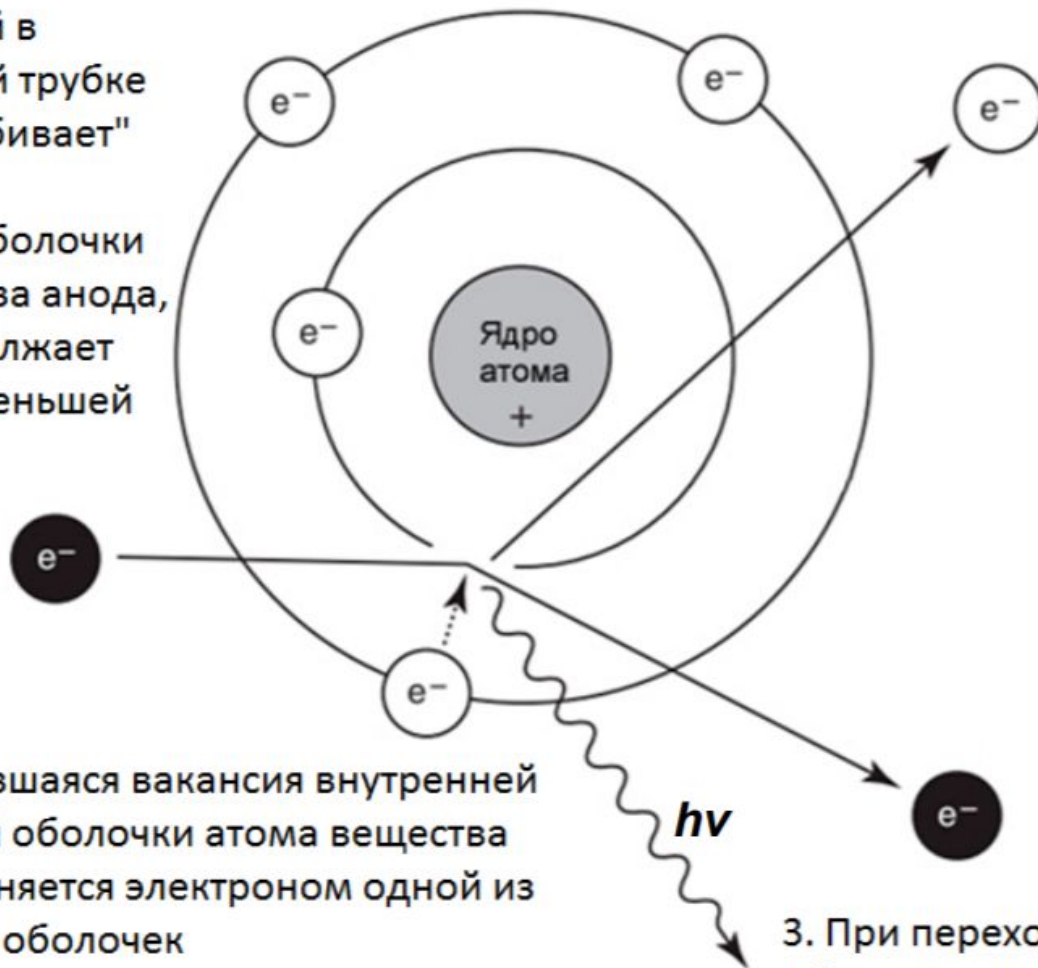
Характеристическое рентгеновское излучение

Увеличивая напряжение на рентгеновской трубке, можно заметить на фоне сплошного спектра появление линейчатого, который соответствует **характеристическому рентгеновскому излучению.**



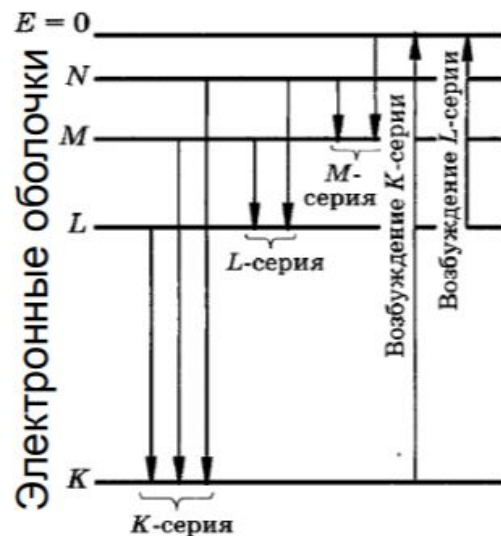
Характеристическое рентгеновское излучение

1. Ускоренный в рентгеновской трубке электрон "выбивает" электрон из внутренней оболочки атома вещества анода, а затем продолжает движение с меньшей энергией



2. Образовавшаяся вакансия внутренней электронной оболочки атома вещества анода заполняется электроном одной из его внешних оболочек

3. При переходе электрона с внешней оболочки на внутреннюю, происходит излучение рентгеновского фотона с энергией, равной разнице энергий внешней и внутренней электронных оболочек



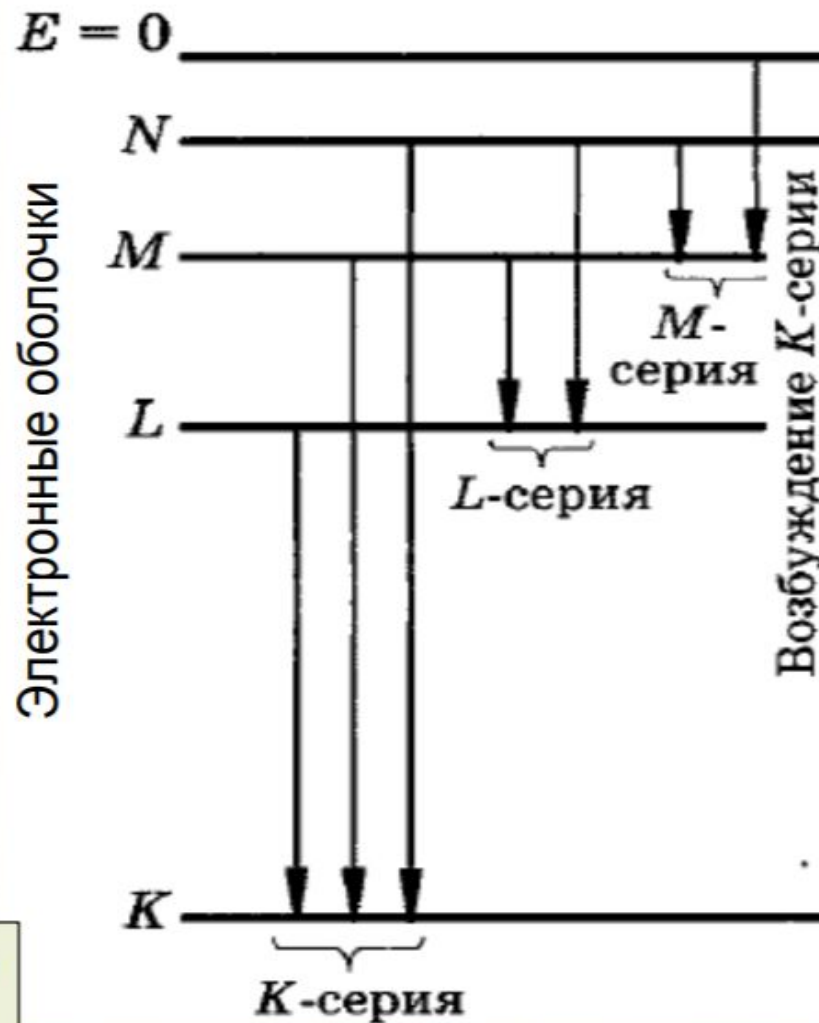
Характеристическое рентгеновское излучение

Характеристическое излучение возникает вследствие того, что **ускоренные электроны проникают в глубь атома и из внутренних слоев выбивают электроны.**

На свободные места переходят электроны с верхних уровней, в результате испускаются фотоны характеристического излучения с энергией $h\nu$ равной разнице энергий внешней $E_{\text{внеш}}$ и внутренней $E_{\text{внут}}$ электронных оболочек:

$$h\nu = E_{\text{внеш}} - E_{\text{внут}}$$

Характеристическое рентгеновское излучение состоит из серий **К, L, М** и т. д., наименование которых и послужило для обозначения электронных слоев.



Свойства характеристического рентгеновского излучения

1. Характеристический рентгеновский спектр атома не зависит от химического соединения, в которое этот атом входит.

Так, например, рентгеновский спектр атома кислорода одинаков для O , O_2 и H_2O , в то время как оптические спектры этих соединений существенно различны.

2. Характеристическое излучение возникает всегда при наличии свободного места во внутренних слоях атома независимо от причины, которая его вызвала.

Так, например, характеристическое излучение сопровождает один из видов радиоактивного распада, который заключается в захвате ядром электрона с внутреннего слоя.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

В зависимости от соотношения энергии $h\nu$ рентгеновского фотона и энергии ионизации A_u (энергии, необходимой для удаления внутренних электронов за пределы атома или молекулы) имеют место **три главных процесса** взаимодействия рентгеновского излучения с веществом:

1. Когерентное (классическое) рассеяние (при $h\nu < A_u$);
2. Некогерентное рассеяние (эффект Комптона) (при $h\nu \gg A_u$);
3. Фотоэффект (при $h\nu \geq A_u$).

1. Когерентное (классическое) рассеяние

Когерентное рассеяние – это рассеяние длинноволнового рентгеновского излучения, происходящее **без изменения длины волны**.

Возникает, если энергия фотона $h\nu$ меньше энергии ионизации $A_{и}$:

$$h\nu < A_{и}$$

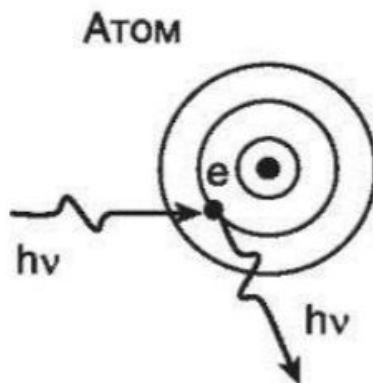


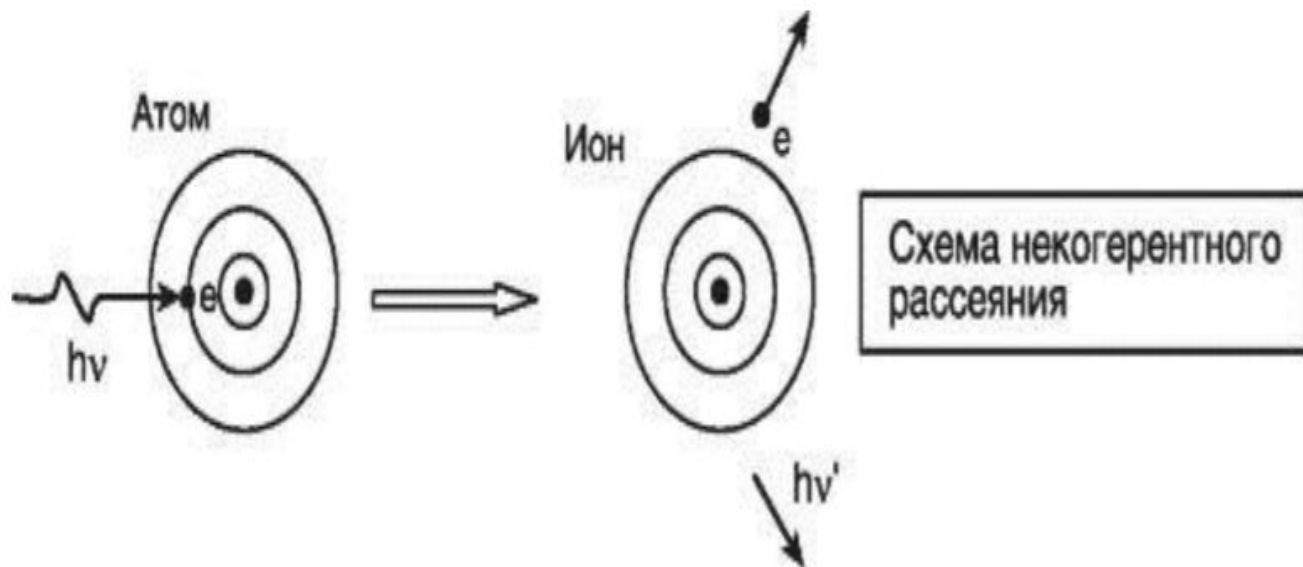
Схема когерентного
рассеяния

Так как в этом случае энергия фотона рентгеновского излучения и атома не изменяется, то **когерентное рассеяние само по себе не вызывает биологического действия**. Однако при создании защиты от рентгеновского излучения следует учитывать возможность изменения направления первичного пучка. Этот вид взаимодействия имеет

Некогерентное рассеяние (эффект Комптона) – это рассеяние рентгеновского излучения, происходящее **с изменением длины волны**.

Некогерентное (комптоновское) рассеяние происходит тогда, когда энергия фотона намного больше энергии внутренней ионизации:

$$h\nu \gg A_{II}$$



Наряду с вторичным рентгеновским излучением (с энергией фотона $h\nu'$) появляются **электроны отдачи** (с кинетической энергией E_K). Атомы или молекулы при этом становятся ионами.

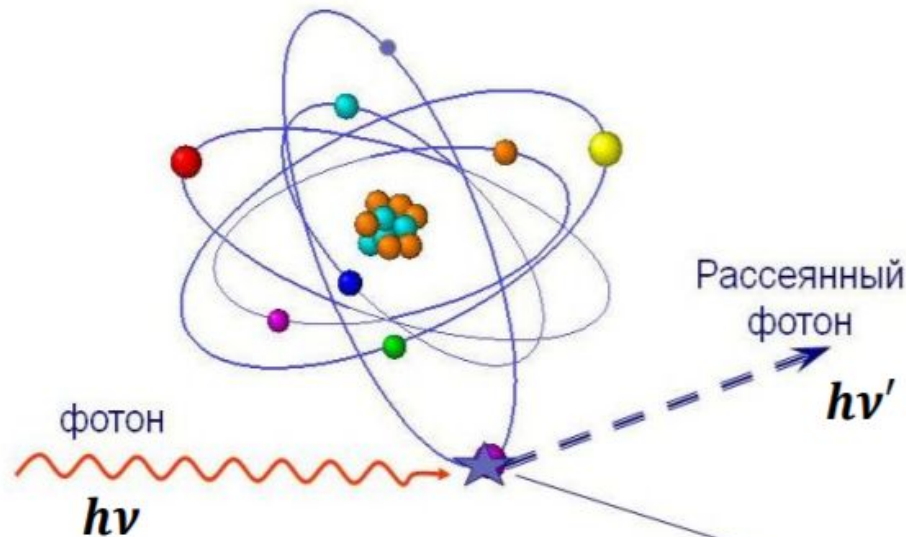
2. Некогерентное рассеяние (эффект Комптона)

Эффект Комптона обусловлен тем, что при взаимодействии с атомом энергия $h\nu$ фотона расходуется на образование нового рассеянного фотона рентгеновского излучения с энергией $h\nu'$, на «отрыв» электрона от атома (энергия ионизации A_u) и сообщение электрону кинетической энергии E_k :

$$h\nu = h\nu' + A_{\text{и}} + E_{\text{к}}$$

Так как обычно $h\nu \gg A_u$, то можно считать, что эффект Комптона происходит как бы на свободных электронах, приближенно записать

$$h\nu \approx h\nu' + E_{\text{к}}$$

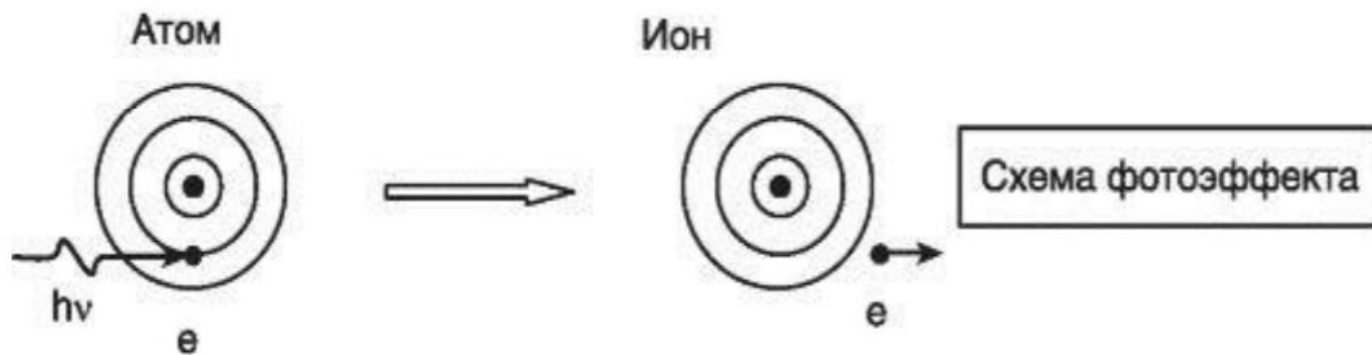


3. Фотоэффект

При фотоэффекте рентгеновское излучение поглощается атомом, в результате чего **вылетают электроны** из глубоких оболочек атома.

Фотоэффект имеет место тогда, когда энергия фотона $h\nu$ достаточна для ионизации атома (A_u - энергия ионизации):

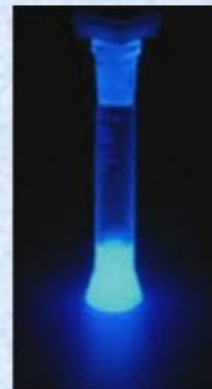
$$h\nu \approx A_u.$$



Комptonовское рассеяние и фотоэффект могут сопровождаться характеристическим рентгеновским излучением, так как после выбивания внутренних электронов происходит заполнение вакантных мест электронами внешних оболочек.

Действие рентгеновского излучения на вещество

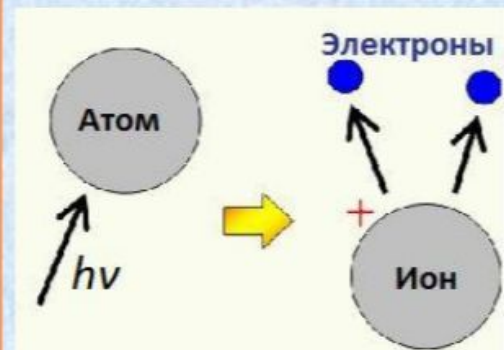
1. Рентгенолюминесценция — свечение ряда веществ при рентгеновском облучении. Такое свечение платиносинеродистого бария позволило В. Рентгену открыть лучи. Это явление используют для создания специальных светящихся экранов с целью визуального наблюдения рентгеновского излучения, иногда для усиления действия рентгеновских лучей на фотопластинку.



2. Химическое действие рентгеновского излучения, например образование перекиси водорода в воде. Практически важный пример — воздействие на фотопластинку, что позволяет фиксировать такие лучи.



3. Ионизирующее действие проявляется в увеличении электропроводимости под воздействием рентгеновских лучей. Это свойство используют в дозиметрии для количественной оценки действия этого вида излучения.



Ослабление рентгеновского излучения

В результате взаимодействия с веществом первичный пучок рентгеновского излучения ослабляется в соответствии с законом:

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

где μ — линейный коэффициент ослабления,
 x — глубина проникновения,

Φ_0 — поток падающего на среду рентгеновского излучения,
 Φ — поток рентгеновского излучения после ослабления средой.

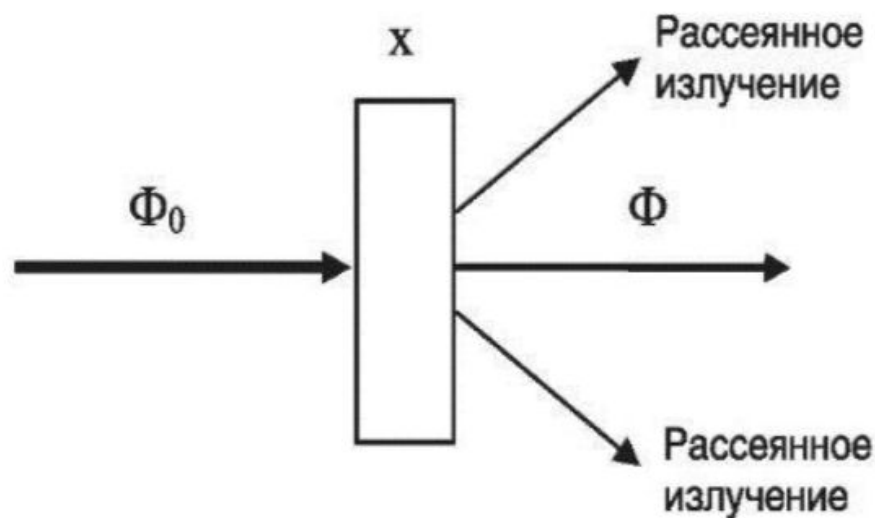
Линейный коэффициент ослабления:

$$\mu = \mu_k + \mu_{нк} + \mu_f$$

где μ_k - вклад когерентного рассеяния,

$\mu_{нк}$ - вклад некогерентного рассеяния,

μ_f — вклад фотоэффекта.



Ослабление рентгеновского излучения

Поток рентгеновского излучения ослабляется пропорционально числу атомов вещества, через которое этот поток проходит.

Если сжать вещество вдоль оси X в b раз (увеличить в b раз его плотность), то ослабление пучка не изменится, так как число атомов остается прежним. Следовательно, показатель степени в формуле не изменится:

$$\begin{aligned}\mu_1 x_1 &= \mu_2 x_2 = \mu_2 x_1 / b \\ x_2 &= x_1 / b,\end{aligned}$$

так как при сжатии толщина поглощающего слоя уменьшилась в b раз.

$$\mu_1 = \mu_2 / b,$$

линейный коэффициент ослабления μ зависит от плотности вещества.

Массовый коэффициентом ослабления μ_m , который равен отношению линейного коэффициента ослабления к плотности поглотителя, не зависит от плотности вещества:

$$\mu_m = \mu / \rho$$

Рентгенодиагностика

Рентгенодиагностика - метод получения изображений внутренних органов с использованием рентгеновских лучей.

Для диагностики используют фотоны с энергией порядка 60-120 кэВ.

При этой энергии **массовый коэффициент ослабления** в основном **определяется фотоэффектом** и может быть найден по формуле:

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3$$

где μ_m – массовый коэффициент ослабления;

λ – длина волны;

Z – атомный номер элемента вещества-поглотителя;

k – коэффициент пропорциональности.

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3$$

Поглощение рентгеновских лучей почти не зависит от того, в каком соединении атом представлен в веществе, поэтому можно легко сравнить по формуле массовые коэффициенты ослабления μ_{mk} кости $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и μ_{mv} мягкой ткани или воды H_2O . Атомные номера Ca, P, O и H соответственно равны 20, 15, 8 и 1. Подставив эти числа в формулу, получим:

$$\frac{\mu_{mk}}{\mu_{mv}} = \frac{3 \cdot 20^3 + 2 \cdot 15^3 + 8 \cdot 8^3}{2 \cdot 1^3 + 8^3} = 68$$



Плотность кости также выше плотности мягких тканей, поэтому на рентгеновском снимке получается светлое изображение кости на более темном фоне мягких тканей.

Методы рентгенодиагностики

1. Рентгеноскопия

Изображение формируется на флуоресцирующем экране.

Яркость изображения невелика, и его можно рассматривать только в затемненном помещении. Врач должен быть защищен от облучения.

Достоинство: проводится в реальном режиме времени.

Недостаток: большая лучевая нагрузка на больного и врача (по сравнению с другими методами).

Современный вариант рентгеноскопии - рентгенотелевидение - использует усилители рентгеновского изображения. Усилитель воспринимает слабое свечение рентгеновского экрана, усиливает его и передает на экран телевизора. В результате резко уменьшилась лучевая нагрузка на врача, повысилась яркость изображения и появилась возможность видеозаписи результатов обследования.



2. Рентгенография

Изображение формируется на специальной пленке, чувствительной к рентгеновскому излучению.

Снимки производятся в двух взаимно перпендикулярных проекциях (прямая и боковая). Изображение становится видимым после фотообработки. Готовый высушенный снимок рассматривают в проходящем свете. При этом удовлетворительно видны детали, контрастности которых отличаются на 1-2 %.

Достоинства: высокое разрешение, малое время облучения и практически полная безопасность для врача.

Недостаток: статичность изображения (объект нельзя проследить в динамике).

В некоторых случаях перед обследованием пациенту вводится специальное контрастное вещество. Например, йодсодержащий раствор (внутривенно) при исследовании почек и мочевыводящих путей.

