

Электромагнитное ионизирующее излучение

Учитывая то, что в медицине для
диагностики и лечения широко
используется электромагнитное
ионизирующее излучение,
остановимся на его особенностях и
взаимодействии с веществом

- Ионизирующее излучение – это излучение, при воздействии которого на вещество, происходит возбуждение и ионизация атомов. Возбуждение атомов происходит уже при поглощении видимого или ультрафиолетового света веществом, когда возможен переход электрона (одного или нескольких) на более удаленные от ядра энергетические уровни. При обратном переходе электронов на невозбужденные уровни происходит излучение квантов видимого света (люминесценция).

- В том случае, когда энергия кванта излучения ($E=h\nu$) превышает работу выхода электрона из атома или молекулы (A_u), то при поглощении излучения веществом из атома или молекулы выходит электрон, что приводит к образованию положительного иона. Свободный электрон может быть подсоединен к нейтральному атому или молекуле, результате чего образуется отрицательный ион.

- Если энергия кванта излучения, поглощаемого веществом, значительно превышает работу выхода электрона из атома или молекулы ($E \gg A_u$), то выходящий из атома или молекулы электрон может обладать достаточной кинетической энергией, чтобы выйти за пределы вещества. В дальнейшем он может самостоятельно ионизировать встречающиеся на пути атомы или молекулы, образуя лавину электронов.

- Таким образом электромагнитное излучение может быть отнесено к ионизирующему, если энергия кванта излучения E превышает работу выхода электрона из атома (или молекулы), то есть $E > A_{\text{и}}$. На шкале электромагнитных волн этому требованию отвечают рентгеновское излучение и гамма – излучение.

- В радиационной биологии и радиационной физике единицей энергии излучения служит обычно электронвольт (эВ). Учитывая, что заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, следует, что электронвольт равен: $\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

К ионизирующим излучениям относятся рентгеновские лучи и гамма – излучение. Они занимают крайнее место в спектре электромагнитных волн, вслед за ультрафиолетовыми лучами.

Рентгеновское излучение

- Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение с длиной волны от 80 до 0,0001 нм. В медицине используют рентгеновское излучение с длиной волны от 1 нм до 0,006 нм. Рентгеновское излучение невидимо для глаза, поэтому все наблюдения производятся с помощью флуоресцирующих экранов или фотопленок.

- Характерным его свойством рентгеновского излучения является то, что оно проходит через многие вещества, непроницаемые для оптического излучения. Все это – следствие малой длины волны этого вида электромагнитного излучения. По способу возбуждения рентгеновское излучение разделяется на характеристическое и тормозное.

- Характеристическое излучение возникает при переходе электронов между энергетическими уровнями внутренних оболочек (оболочки K, L, M) в атомах с высоким порядковым номером. Если при достаточно сильном внешнем воздействии на вещество, например, при бомбардировке атомов вещества электронами с высокой энергией или альфа частицами, а также при поглощении гамма-излучения, то электрон с одной из внутренних оболочек будет удален за пределы атома, а на освободившийся уровень W_1 перейдет электрон, находящийся на другом более высоком уровне W_2 .

- При этом излучается фотон с энергией, равной разности $W_2 - W_1 = h\nu_{\text{изл.}}$, что приводит к возникновению характеристического излучения. Свободное место может образовываться на любом уровне внутренних оболочек, а переход электрона может произойти с любого более высокого уровня.

- Другим механизмом возбуждения рентгеновского излучения является торможение быстро движущихся электронов электрическим полем атомов вещества, через которые они пролетают.

Частота излучения зависит от начальной кинетической энергии электрона и интенсивности его торможения.

- Если на вещество падает поток электронов, то для разных электронов эти условия различны. Поэтому излученные фотоны имеют самую различную энергию и частоту (длину волны). Излучения называют тормозным, и оно имеет сплошной спектр.

Наиболее распространенным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка

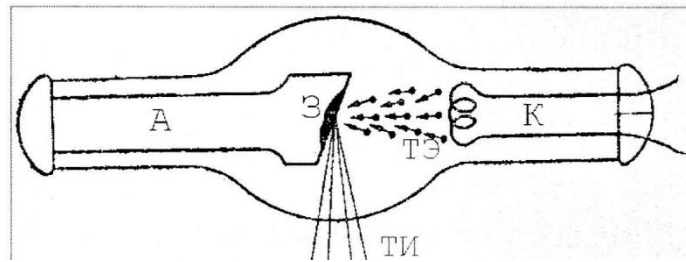


Рис. 1 Иллюстрация устройства рентгеновской трубки (эта иллюстрация демонстрирует основные элементы рентгеновской трубки и не предназначена для демонстрации особенностей современных рентгеновских трубок)

- Рентгеновская трубка представляет собой стеклянную вакуумную колбу, давление в которой составляет ($P = 10 - 10^{-10}$) мм.рт. столба, с двумя электродами – анодом и катодом. К ним приложено высокое электрическое напряжение (40 – 150) кВ. Катод выполнен в виде спирали, на которую подается напряжение накала. Поэтому он является источником термоэлектронов.

- Анод (А) – представляет собой металлический (обычно медный) водоохлаждаемый стержень со скосом на торце. Торец покрыт слоем тугоплавкого металла и носит название анодного зеркала. Термоэлектроны (ТЭ) , ускоренные электрическим напряжением между анодом и катодом попадают на анодное зеркало, где тормозятся атомами, покрываемые зеркало. При этом возникает тормозное рентгеновское излучение.

- Известно, что проникающая способность рентгеновского излучения в вещество (а, следовательно, и в биологические ткани) тем выше, чем меньше длина волны.
В рентгенологии обычно принимается, что мягкое излучение с низкой проникающей способностью генерируется рентгеновской трубкой при напряжении между анодом и катодом в диапазоне (40 – 60) кВ, средней жесткостью и средней проникающей способностью- (60 -110)кВ и повышенной жесткостью и наивысшей проникающей способностью (120 – 150) кВ.

- Одновременно с изменением спектра излучения регулирование напряжения на аноде трубки приводит к изменению общей мощности и излучения P , которая пропорциональна квадрату напряжения на аноде трубки. В целом поток энергии излучения (Φ) равен $\Phi = k U^2 I Z$, где I – ток, текущий в трубке, Z – атомный номер покрытия анодного зеркала трубки,

k – коэффициент пропорциональности,
 Φ - поток лучистой энергии (энергия,
переносимая через площадку в единицу
времени.

Гамма - излучение

Гамма – излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение ($\lambda < 0,1$ нм), которое испускается возбужденными атомными ядрами в процессе радиоактивных превращений и ядерных реакций. Ядро, так же как и атом, является квантово – механической системой с дискретным набором энергетических уровней.

- Гамма - квант с энергией $h\nu_\gamma$ излучается при переходе с возбужденного уровня E_2 на более устойчивый уровень E_1 : $E_2 - E_1 = h\nu_\gamma$. При радиоактивном распаде ядер обычно излучаются γ – лучи с энергией от 10 кэВ до 5 МэВ, а при ядерных реакциях – до 20 МэВ. В качестве γ – излучателя часто используется радиоактивный изотоп Co (Кобальт) с периодом полураспада – 5,3 года. При распаде Co превращается в Ni .

- Возбужденное ядро Ni, образующееся при распаде, переходит в стационарное состояние с излучением двух γ – квантов (с энергией 1,17 МэВ и 1,33 МэВ).

Часто используется радиоактивный изотоп Cs, который при β – излучении, превращается в стабильный атом Ba.

В качестве источника γ – излучателя применяется отработавшие в ядерных реакторах тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы)

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

- Поглощение и рассеяние ионизирующего излучения подчиняется закону Бугера – Ламберта:
$$I_x = I_0 \cdot e^{-kx} .$$

- где I_0 - интенсивность излучения, попадающего на поверхность вещества, I_x - интенсивность излучения, прошедшего через слой вещества толщиной x , k – коэффициент ослабления ионизирующего излучения.

- Значение коэффициента ослабления k равно: $k = k_{\text{пог.}} + k_{\text{рас.}}$, где $k_{\text{пог.}}$ - коэффициент поглощения ионизирующего излучения, а $k_{\text{рас.}}$ - коэффициент рассеяния ионизирующего излучения, что отражает два механизма ослабления – поглощение и рассеяние излучения.

Выше приведенная формула Бугера-Ламберта справедлива только для монохроматического света.

Механизмы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом

- 1. Когерентное рассеяние.

Возникает при взаимодействии фотонов с электронами внутренних оболочек атомов, когда энергия фотона ($E_1 = h\nu_1 < A_{и}$) недостаточна для вырыва электрона за пределы атома или молекулы.

Характеризуется изменением направления распространения света, но энергия (α , следовательно, и его частота и длина волны) остаются неизменными.

- Графически когерентное рассеяние иллюстрирует рис. 2.

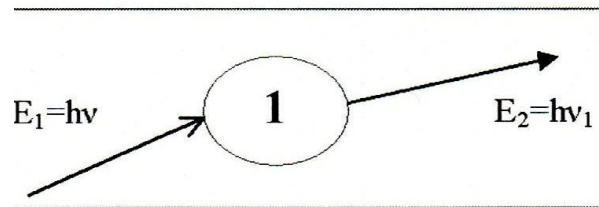


Рис.2. E_1 – квант излучения, взаимодействующий с атомом 1 (молекулой), E_2 – рассеянный квант излучения.

- Фотоэлектрический эффект.

Если энергия фотона ($E_1 = h\nu_1$) превышает энергию ионизации атома (Au), то при взаимодействии атома с фотоном, последний поглощается веществом и из атома вылетает электрон. Возникающий эффект носит название фотоэлектрического и сопровождается ионизацией атома.

- Если $h\nu_1 \gg A_u$, то электрон приобретает кинетическую энергию W_e , равную:

$$W_e = h\nu_1 - A_u.$$

Если эта энергия значительна (т.е. $W_e \gg 50$), то электрон e способен ионизировать другие атомы. Этот эффект носит название вторичной ионизации. Явление фотоэффекта иллюстрирует рис.3.

- Образующиеся при фотоэффекте электроны вызывают сильную ионизацию в атомах поглощающего вещества.

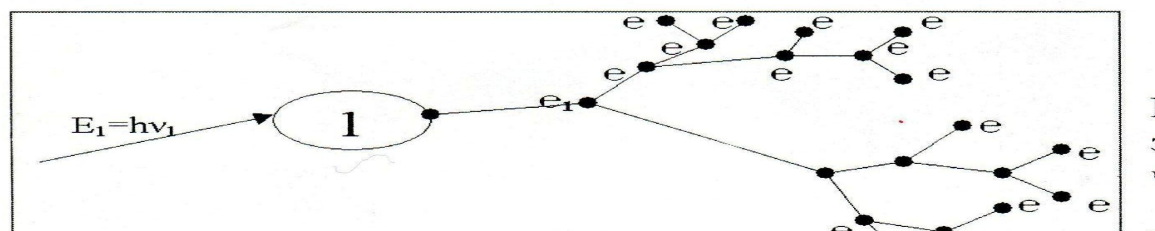


Рис3.

Иллюстрирует фотоэффект с вторичной ионизацией, приводящий к лавине электронов.

- Выход электрона за пределы атома сопровождается образованиями вакансий (свободного места в электронной оболочке), куда переходят электроны с более удаленных орбит. При этом переходе атом излучает квант света. Этот эффект носит название флуоресценции и, если он происходит в тканях организма, то приводит к фотобиологическим эффектам.

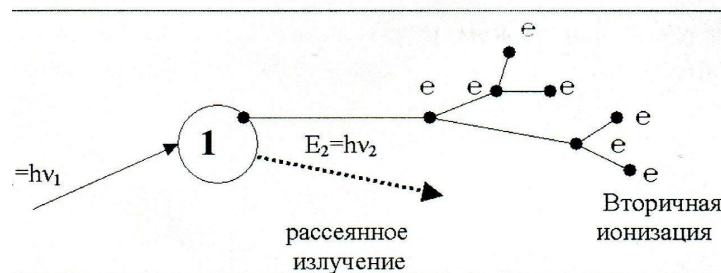
- Фотоэлектрический эффект определяет основное поглощение мягкого рентгеновского и γ – излучения при энергиях от нескольких килоэлектронвольт до сотен килоэлектронвольт . Коэффициент поглощения убывает с увеличением атомного номера веществ и с ростом энергии кванта излучения.

Эффект Комптона

- Этот эффект состоит в том, что энергия воздействующего на атом кванта излучения ($h\nu_1$) распределяется между выбиваемым из атома электроном с кинетической энергией W_e и вторичным квантом рассеянного излучения ($h\nu_2$). Рассеянное излучение возникает с увеличением длины волны и является некогерентным. Справедливо следующее равенство энергий: $h\nu_1 = W_e + A_u + h\nu_2$. Здесь A_u - энергия ионизации атома.



- При этом выбитый из атома электрон производит вторичную ионизацию вещества, а рассеянный квант излучения вступает во взаимодействие с веществом в ходе эффекта Комптона или фотоэффекта.



- Эффект Комптона может быть иллюстрирован рис.4.

- Рис. 4 иллюстрирует ионизацию атома или молекулы с образованием лавины электронов и рассеянного излучения.
На выбитого из атома электрона образуется вакансия, которая сопровождается высвечиванием кванта излучения в результате флуоресценции.
Поглощение ионизированного излучения путем эффекта Комптона характерно для веществ, облучаемых с энергией от сотен кэВ до нескольких МэВ.

Образование электронно – позитронных пар

- При энергиях кванта излучения больших 1,022 МэВ, когда квант излучения пролетает вблизи ядра атома или молекулы, он исчезает и вместо него появляется пара – электрон и позитрон, имеющие одинаковую массу, энергию $E_1/2$ и противоположные заряды (e^- , e^+).
Образовавшиеся электроны вызывают ионизацию или возбуждение атомов.

- Позитрон, соединяясь со встречным электроном, исчезают и на их месте путем аннигиляции возникает гамма-квант, который взаимодействуя с атомами или молекулами, вызывает появление лавин электронов.

- ***Рассмотренные механизмы поглощения рентгеновского излучения и гамма – излучения показывают, что во всех случаях происходит образование быстрых электронов, которые, в конечном счете, и приводят к образованию большого количества ионов. В ходе биохимических реакций это разрушает клетки тканей.***