

Радиационная безопасность
Лекции профессора
Кукина Павла Павловича

**Взаимодействие ионизирующих
излучений с веществом**

Общий механизм взаимодействия ионизирующих излучений с веществом

Корпускулярные частицы ядерного происхождения (α -частицы, β -частицы, нейтроны, протоны и т.д.), а также фотонное излучение (γ -кванты и рентгеновское и тормозное излучение) обладают значительной кинетической энергией.

Взаимодействуя с веществом они теряют эту энергию в основном в результате упругих взаимодействий с ядрами атомов или электронами (как это происходит при взаимодействии бильярдных шаров), отдавая и всю или часть своей энергии, на возбуждение атомов (т.е. перевод электрона с более близкой на более удаленную от ядра орбиту), а также на ионизацию атомов или молекул среды (т.е. отрыв одного или более электронов от атомов).

Упругое взаимодействие характерно для нейтральных частиц (нейтронов) и фотонов, не имеющих заряда. При этом нейтрон, взаимодействуя с атомами может в соответствии с законами классической механики передавать часть энергии, пропорциональную массам соударяющихся частиц. Если это тяжелый атом, то передается только часть энергии. Если это атом водорода, равной массе нейтрона, то передается вся энергия. При этом нейтрон замедляется до тепловых энергий, порядка долей электронвольта, а далее вступает в ядерные реакции.

Ударяя в атом, нейтрон может передать ему такое количество энергии, которое достаточно, чтобы ядро "выскочило" из электронной оболочки. В этом случае образуется заряженная частица, обладающая значительной скоростью, которая способна осуществлять ионизацию среды.

Аналогично взаимодействие с веществом и фотонов. Он самостоятельно не способен ионизировать среду, но выбивает электроны из атома, которые и производят ионизацию среды.

Нейтроны и фотонное излучение относятся к косвенно ионизирующим излучениям.

Заряженные частицы (α -частицы, β -частицы, протоны и т.д.) способны ионизировать среду за счет взаимодействия с электрическим полем атома. Попадая в зону действия электрического поля, ядра, положительно заряженные частицы тормозятся и отклоняются от направления своего движения, испуская при этом тормозное излучение, одной из разновидностей фотонного излучения.

Заряженные частицы могут за счет неупругих взаимодействий передавать атомам среды количество энергии недостаточное для ионизации. В этом случае образуются атомы в возбужденном состоянии, которые передают эту энергию другим атомам, либо испускают кванты характеристического излучения, либо соударяясь с другими возбужденными атомами, могут получить энергию, достаточную для ионизации атомов.

Как правило, при взаимодействии излучений с веществами происходят все три вида последствий этого взаимодействия: упругое соударение, возбуждение и ионизация. На примере взаимодействия электронов с веществом (табл. 1.) показана относительная доля и энергия, теряемая ими на различные процессы взаимодействия.

Таблица 1.

**Относительная доля энергии, теряемая
электронами в результате различных процессов
взаимодействия %.**

| Энергия, эВ | Упругое взаимодей ствие | Возбуждение атомов среды | Ионизация |
|--------------------------|--|---|------------------|
| 10^3 | 8.7 | 54.8 | 36.5 |
| 10^4 | 4.1 | 63.4 | 32.4 |
| 10^5 | 1.8 | 68.0 | 30.2 |

Истинная работа ионизации атома составляет **10-17эв** т.е. столько энергии требуется для отрыва электрона от атома.

Экспериментально установлено, что энергия передаваемая **на образование одной пары ионов в воздухе в среднем 35 эв для α -частиц, 34 эв для электронов, а для вещества биологической ткани примерно 33 эв** разница определяется следующим.

Среднюю энергию, идущую на образование одной пары ионов, определяют экспериментально как отношение энергии первичной частицы к среднему числу пар ионов, образованной одной частицей на всем ее пути.

Т.к. заряженные частицы тратят свою энергию на процессы возбуждения и ионизации, то в экспериментальную величину энергии ионизации входят все виды энергетических потерь, отнесенные к образованию одной пары ионов. Экспериментальным подтверждением сказанному является таблица. 1.

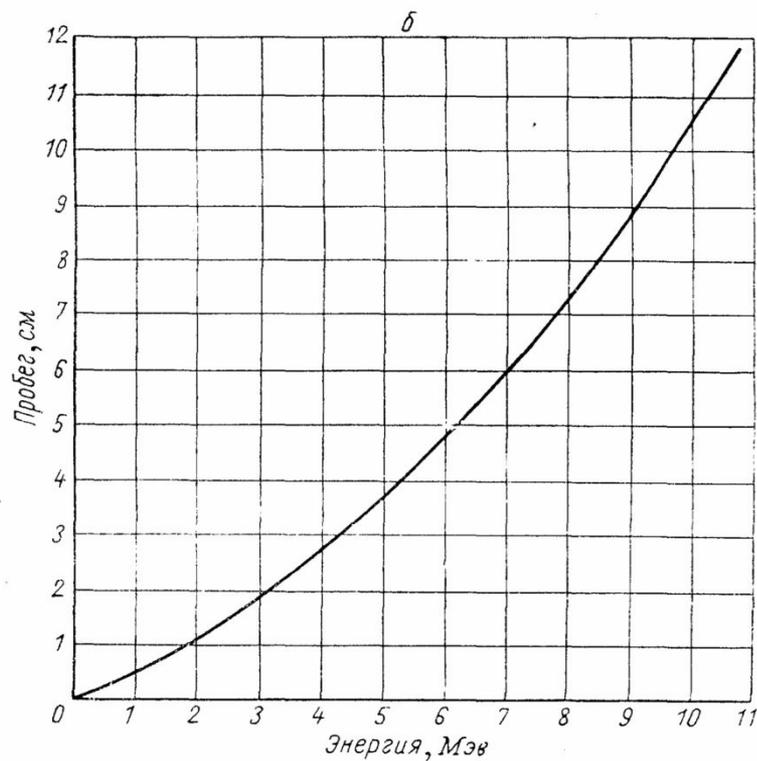
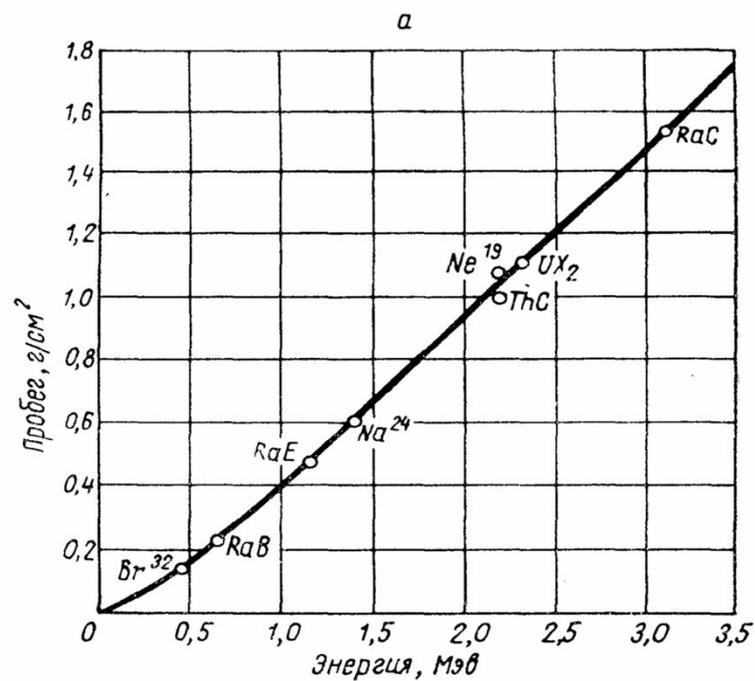
Взаимодействие α -частиц с веществом

Энергия α -частиц, испускаемая известными в настоящее время радионуклидами составляет 4-9 Мэв, скорость примерно 20000 км/с. Длина пробега α -частицы определяется ее энергией. Так пробег α -частиц достигает в воздухе 8-9 см, а в мягкой биологической ткани - нескольких десятков микрон. **Траектории α -частиц в веществе представляют прямые линии.**

Полная ионизация, создаваемая α -частицами на всем пути в среде, составляет примерно 120-150 тысяч пар ионов. Удельная ионизация изменяется от 25 до 60 тысяч пар ионов на 1 см пути в воздухе.

Удельная ионизация увеличивается к концу пробега α -частиц. Это связано с тем, что при прохождении через вещество энергия α -частицы, а значит и ее скорость уменьшается. В результате увеличивается вероятность ее взаимодействия с электронами атома. Это приводит к увеличению ионизации вещества, достигая максимума в конце пробега (рис. 1а).

Рис. 1. Зависимость пробег α (а) и β -частиц (б) в воздухе от их энергии.



Связь между пробегом α -частиц в воздухе и их энергией выражается эмпирической формулой:

$$R = 0.318 \cdot E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}$$

Таким образом, зная пробег α -частицы можно определить их энергию путем измерения длин следов α -частиц в камере Вильсона или в фотографической эмульсии. Более точное определение энергии α -частицы определяют с помощью магнитного спектрометра.

Взаимодействие β -излучения с веществом

Прохождение β -частиц (электронов) через вещество сопровождается упругими и неупругими соударениями с ядрами и электронами тормозящей среды.

Упругое рассеяние электронов на ядрах более вероятно, чем частиц неуклонной массы, и осуществляется при относительно низких энергиях электронов $E_k < 0,5$ Мэв.

Упругое рассеяние электронов на электронах в Z раз (Z - величина заряда ядра) менее вероятно, чем на на ядрах.

При энергии электронов выше энергии связи электрона и до ~ 1 Мэв основным механизмом потерь энергии является неупругое рассеяние на связанных электронах, приводящее к ионизации и возбуждению атомов.

При больших энергиях электронов главным механизмом потерь энергии является радиационное торможение (тормозное излучение).

Таким образом, процессы взаимодействия электронов со средой в отличие от взаимодействия тяжелых заряженных частиц характеризуется радиационным торможением и относительно большой потерей энергии или значительным изменением направления движения электронов в элементарном акте.

Вследствие этого интенсивность пучка электронов уменьшается почти экспоненциально с ростом толщины поглощающего слоя:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

где I и I_0 - относительная интенсивность пучка после и до поглощения;

μ - коэффициент поглощения;

x - толщина поглощающего слоя.

Путь электронов в веществе представляет ломанную линию, а пробег электронов одинаковых энергий имеют значительный разброс. Пробег электронов примерно в тысячу раз больше пробега α -частиц в веществе. Истинная длина пути электрона в веществе может в 1,5-4 раз превосходить его пробег.

Максимальная энергия β -спектра у известных в настоящее время радионуклидов лежит в пределах от нескольких десятков килоэлектрон-вольт до 3,0-3,5 Мэв.

Пробег β -частиц в воздухе составляет 22 см для ($E_{\text{макс}} = 0,155$ Мэв) и 1400 см ($E_{\text{макс}} = 3,58$ Мэв) и пробег в мягкой биологической ткани - 0,02 и 1,9 см соответственно. Зависимость пробега β -частиц в воздухе от их энергии представлена на рис. 1.(б)

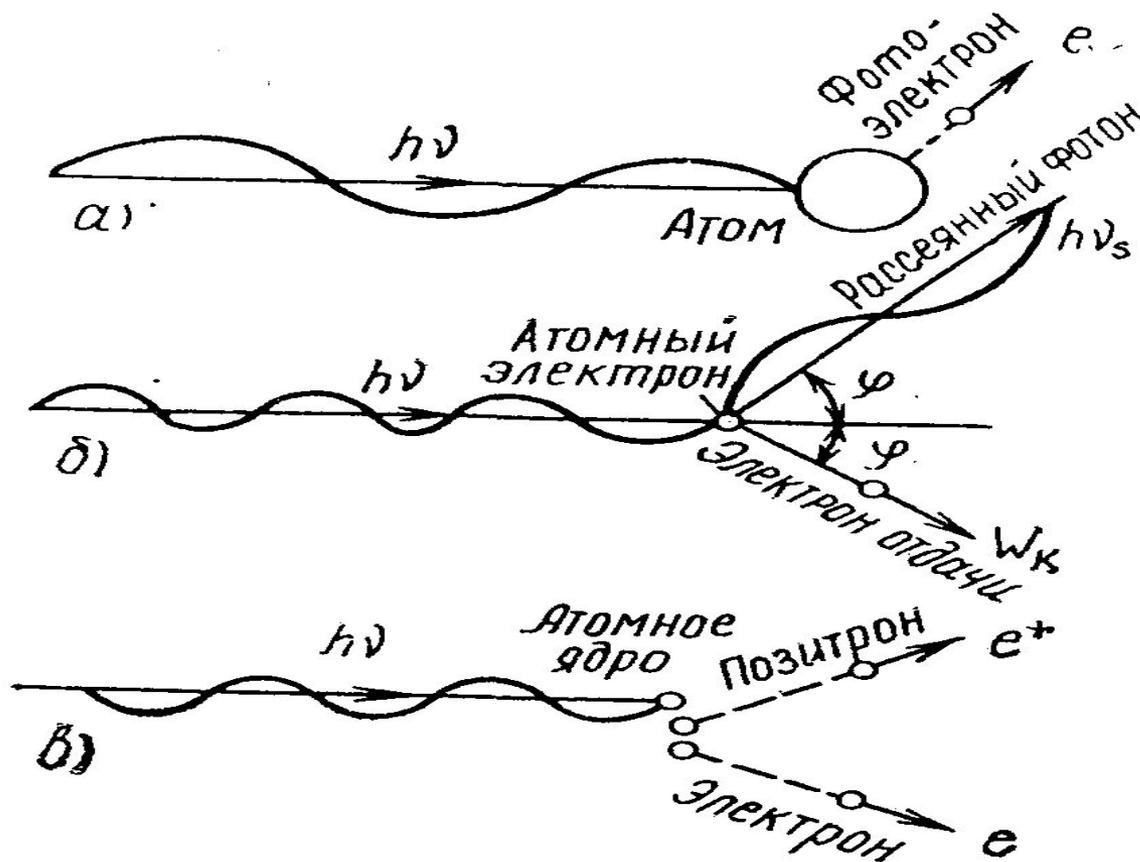
Взаимодействие γ -излучения с веществом

Большинство естественных и искусственных изотопов испускают γ -кванты, энергия которых лежит в интервале 0,01-10 Мэв.

Для квантов, имеющих такую энергию, существуют три основных типа элементарных процесса, в результате каждого из которых либо вся энергия γ -квантов, либо часть ее передается электрону: **фотоэлектрический эффект, эффект Комптона, образование электронно-позитронных пар (рис.2).**

Полученную энергию электроны и позитроны теряют в веществе путем тех же процессов, что и β -частицы.

Рис.2. Взаимодействие излучения с веществом: а) фотоэлектрический эффект, б) Комптон эффект, в) эффект образования пар.



Взаимодействие γ -излучения с веществом характеризуется тем, что каждый фотон выбывает из падающего пучка в результате одиночного акта.

Число выбывших из пучка фотонов пропорционально пройденной толщине вещества и числу падающих фотонов N через экспоненциальную зависимость:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

**где N_0 - число фотонов в исходном пучке,
 μ - коэффициент поглощения,
 x - толщина пройденного слоя.**

Фотоэлектрический эффект представляет собой процесс поглощения γ -кванты атомом вещества.

Энергия кванта передается одному из электронов атома, которым чаще всего оказывается наиболее прочно связанный К-электрон.

Кинетическая энергия вылетающего электрона E_k равна разности между энергией фотона E_γ и энергией связи $E_{св}$ электрона в атоме:

$$E_k = E_\gamma - E_{св}$$

Последующее заполнение вакантной К-оболочки электроном из вышележащих оболочек атома (например, из L-оболочки) сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения.

Коэффициент поглощения обусловленный фотоэффектом, обычно обозначается и характеризует сечение (вероятность осуществления) процесса. Фотоэффект происходит при невысоких энергиях γ -квантов.

Эффект Комптона. При больших энергиях - квантов рассеяние фотонов можно рассматривать как упругое столкновение фотона с отдельным свободным или слабосвязанным электроном (комптоновское рассеяние).

Падающий фотон отдает часть энергии электрону, вылетающему по углам φ , а рассеянный квант наблюдается под углом Θ . Сечение комптоновского рассеяния обозначается величиной σ .

Образование электронно-позитронных пар. При энергии больше $2m_0c^2$ в кулоновском поле ядра возникает пара электрон-позитрон.

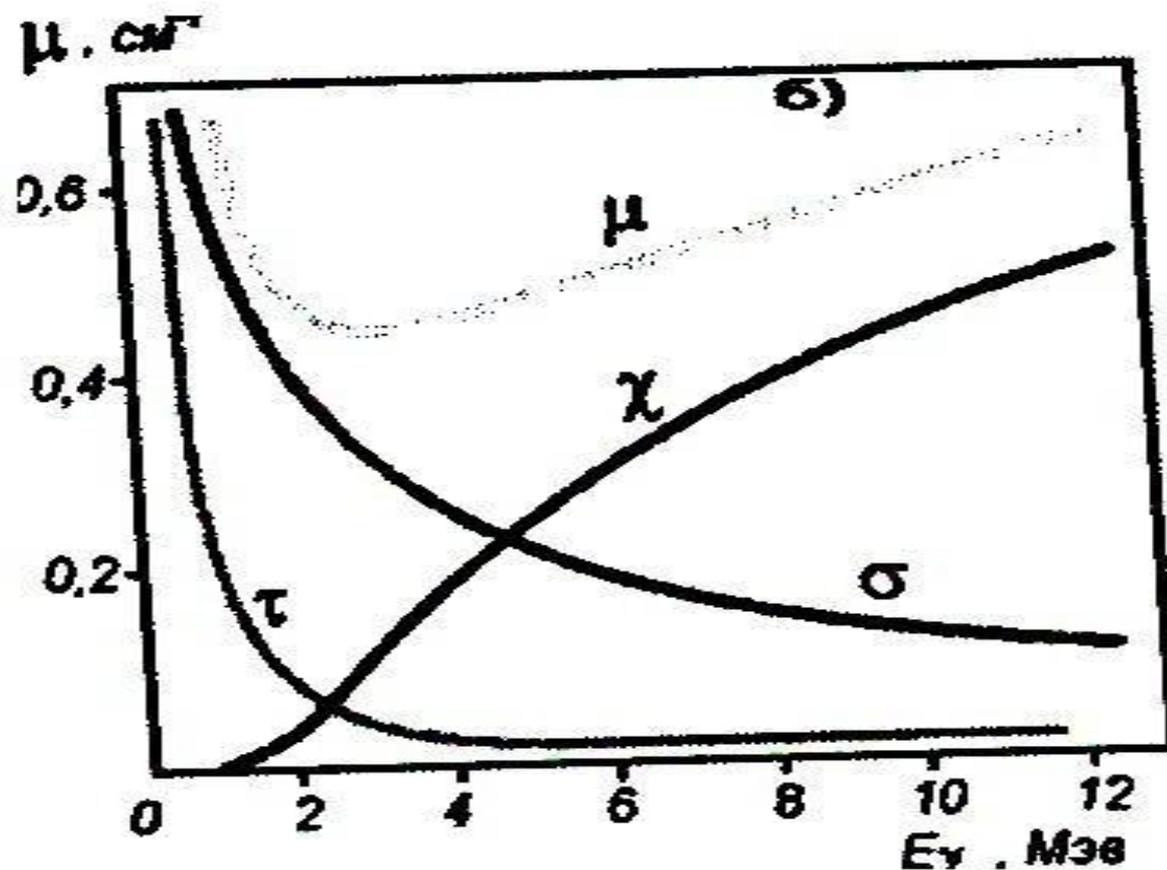
Энергия фотона расходуется на образование пары и на сообщение кинетической энергии электрону и позитрону. Электрон и позитрон, покинувшие ядро, имеют несколько отличающуюся энергию, так как в кулоновском поле ядра получают ускорение разных знаков. Сечение процесса образования пар обозначается величиной χ .

Как указано выше при прохождении через вещество γ -кванты поглощаются по экспоненциальному закону. При этом полный коэффициент поглощения равен сумме трех коэффициентов, характеризующих фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние и образование пар:

$$\mu = \tau + \delta + \chi$$

Зависимость линейных коэффициентов поглощения в свинце от энергии γ -излучения показана на рис. 3.

Рис.1.14.. Зависимость линейных коэффициентов поглощения μ , τ , σ , χ для свинца от энергии γ -излучения.



Взаимодействие гамма-излучения с различными веществами

| Вещество | Интервал энергий фотонов, E , МэВ | | |
|----------|-------------------------------------|------------------|-----------------|
| | Фотоэффект | Комптон-эффект | Образование пар |
| Воздух | $< 0,02$ | $0,02 < E < 23$ | > 23 |
| Алюминий | $< 0,05$ | $0,05 < E < 15$ | > 15 |
| Железо | $< 0,12$ | $0,12 < E < 9,5$ | $> 9,5$ |
| Свинец | $< 0,50$ | $0,5 < E < 4,7$ | $> 4,7$ |