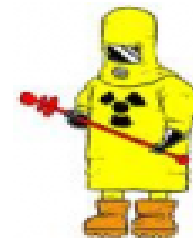


«Защита от ионизирующих излучений»

Тема 1.4:

Взаимодействие гамма- квантов с веществом



**Энергетический факультет
2015/2016 учебный год**



**Белорусский национальный
технический университет**

Источники гамма-квантов

- **γ -излучение** – коротковолновое электромагнитное излучение (длина волны $\lambda < 10^{-10}\text{м}$) с ярко выраженными корпускулярными и слабо выраженными волновыми свойствами, возникающее в основном при разрядке возбужденных состояний ядер.

ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ:

- **радиоактивные распады** (релаксация возбужденных состояний ядер, образовавшихся в результате радиоактивного распада)
- **ядерные реакции** (релаксация возбужденных состояний ядер, образовавшихся в результате ядерных реакций)
- **процессы аннигиляции** пар частица-античастица
- **деление ядер** (мгновенные гамма-кванты)
- **процессы прохождения заряженных частиц** через вещество, т.е. **тормозное излучение** (отклонение энергичных заряженных частиц в магнитных и электрических полях).

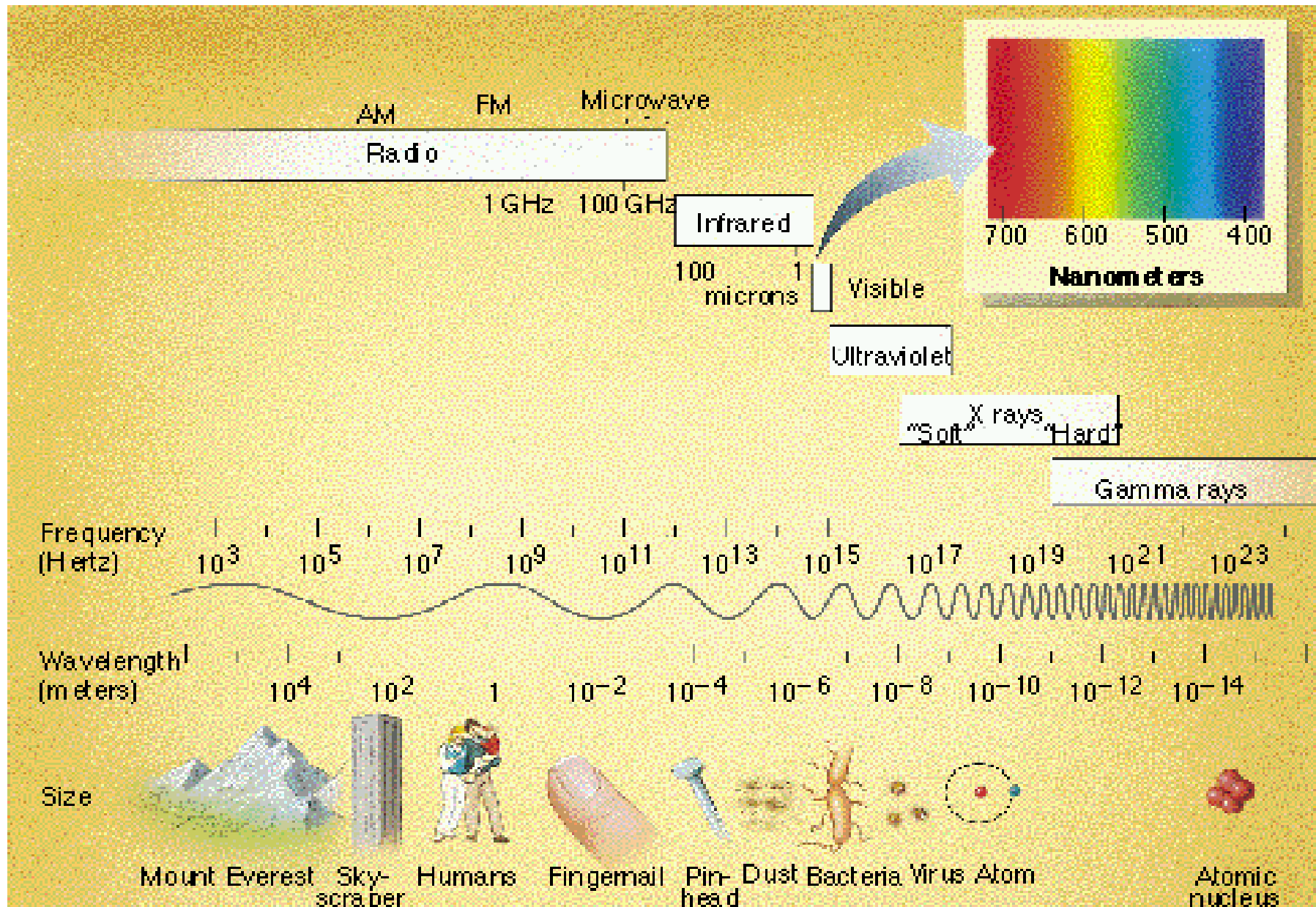
Спектральный диапазон гамма-квантов

- γ -излучение находится в высокочастотном диапазоне электромагнитного спектра .
- В области 1-100 кэВ (~ 1 нм – 10 пм) диапазоны гамма-излучения и более длинноволнового рентгеновского излучения перекрываются.
- Различают гамма- и рентгеновское излучение по источнику :
 - если квант излучается в ядерном переходе, то его принято относить к гамма-излучению;
 - если при переходах в атомной электронной оболочке или при взаимодействиях электронов — к рентгеновскому излучению.

Физически кванты электромагнитного излучения с одинаковой энергией не отличаются, поэтому такое разделение условно.

Для ядерного реактора характерный диапазон энергий гамма-квантов 50 кэВ – 10 МэВ

Шкала электромагнитных волн



Взаимодействие гамма-квантов с веществом

- При прохождении через вещество гамма-кванты взаимодействуют с электронами и ядрами, в результате их интенсивность уменьшается.
- Процессы взаимодействия гамма-квантов с веществом делят на два вида:
 - **Первичные** – приводят к поглощению или рассеянию фотонов
 - **Вторичные** – (следствие первичных) дают дополнительные гамма-кванты

Основные механизмы взаимодействия гамма-квантов с веществом

В области энергий до 10 Мэв наиболее существенными первичными процессами являются:

- фотоэффект
- эффект Комптона
- образование электрон-позитронных пар

*)Меньшую роль играет когерентное (томсоновское) рассеяние на связанных электронах.

Заметными вторичными процессами являются:

- Аннигиляционное излучение
- Тормозное излучение

Фотоэффeкт

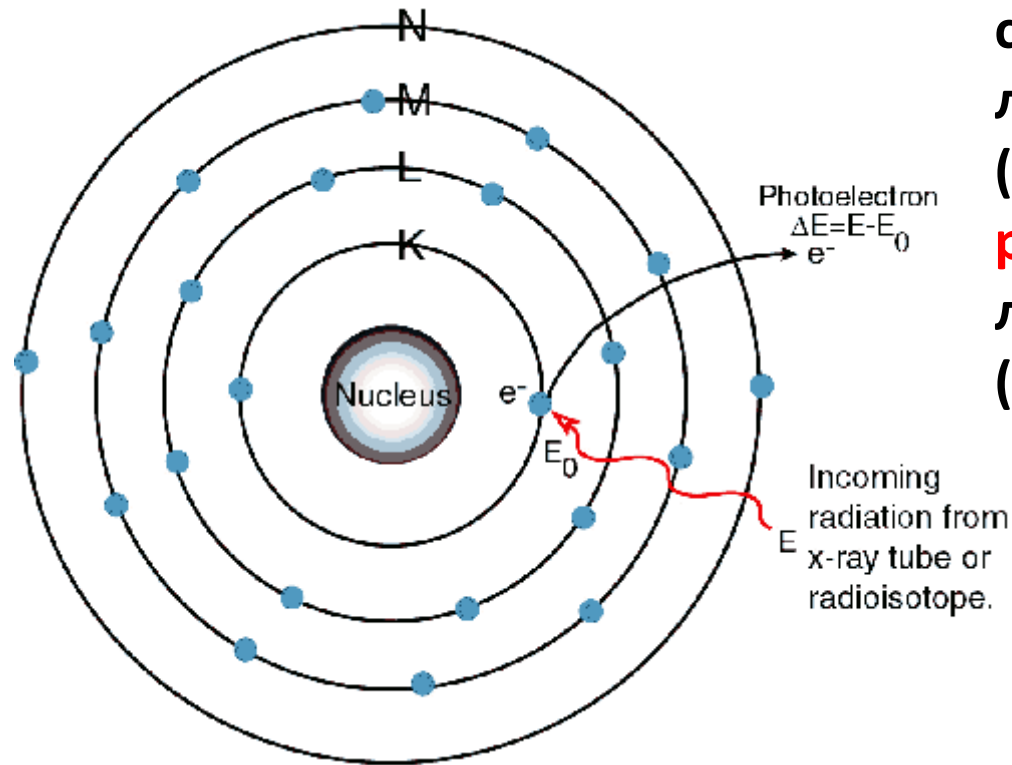
Фотоэффект (ФЭ)

- **Фотоэффект** - процесс, в котором связанный с ядром электрон вырывается из атома под действием электромагнитного излучения.
- Испущенные электроны называют фотоэлектронами.
- Различают
- **внешний фотоэффект** - фотоэлектроны покидают вещество (напр. поверхность металла под действием светового кванта)
- **внутренний фотоэффект** - фотоэлектроны свободно перемещаются в веществе, но его не покидают (напр. фотопроводимость полупроводников при энергии кванта E_{γ} большей, чем ширина запрещенной зоны)

Атомный ФЭ

Фотоэффект на атоме
сопровождается
либо

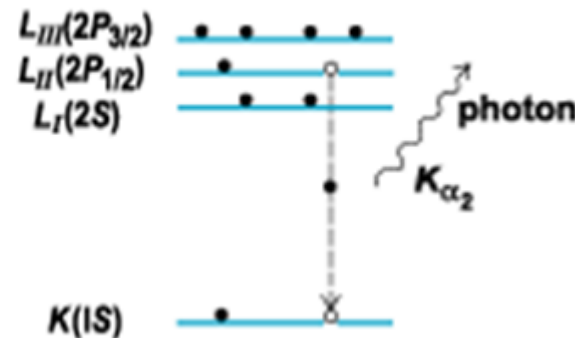
- (I) **характеристическим
рентгеновским излучением (ХРИ),**
либо
(II) **испусканием Оже-электронов.**



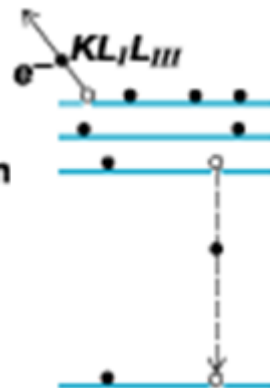
$$E_{\gamma} = T_e + I_K + T_{ion} \quad (T_{ion} \ll T_e),$$

$$\vec{p}_{\gamma} = \vec{p}_e + \vec{p}_{ion} \quad (p_e \approx p_{ion} \gg p_{\gamma}).$$

(I)
ХРИ



(II)
Оже-электрон



Атомный ФЭ

Ключевой момент для понимания физики ФЭ:

свободный электрон не может поглотить фотон!

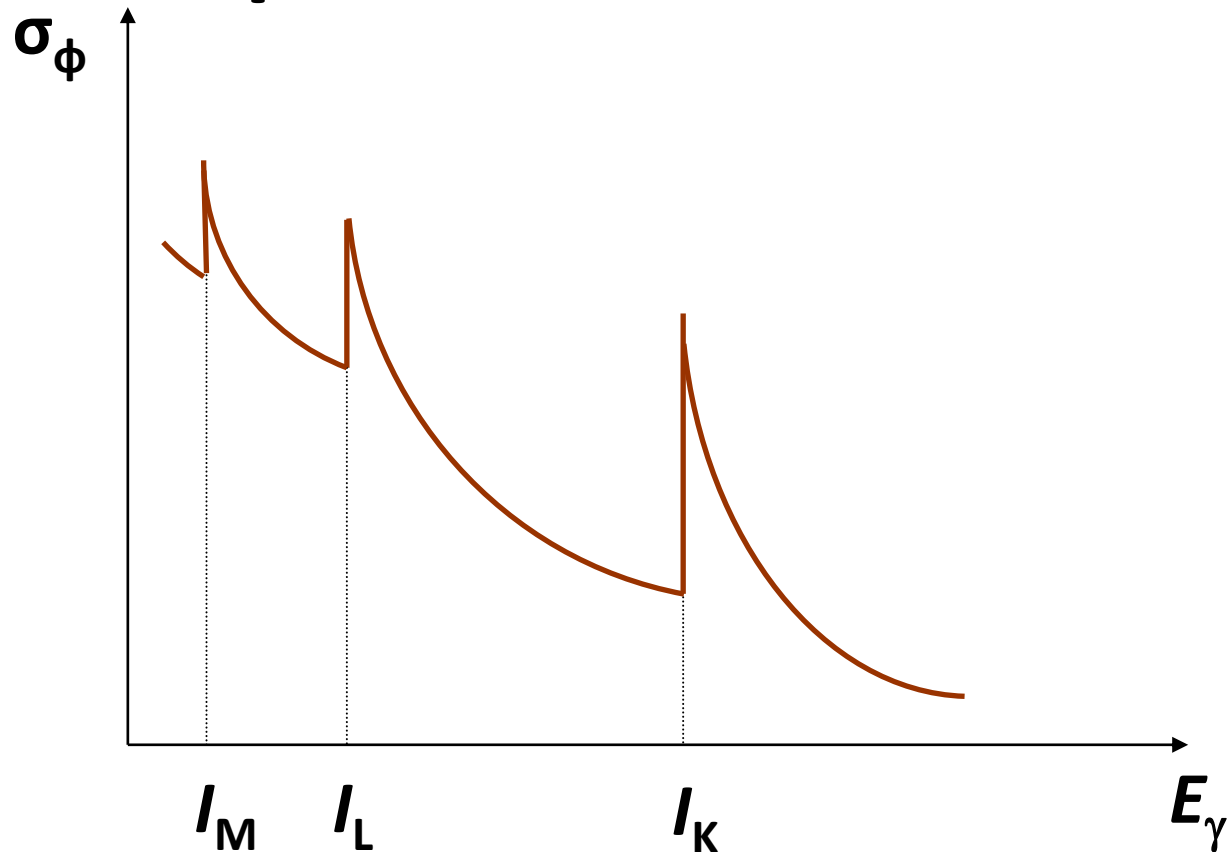
Действительно, записывая законы сохранения энергии и импульса для процесса поглощения фотона свободным электроном в системе отсчета, где перед поглощением электрон покоится, получим:

$$\begin{cases} E_{\gamma} + m_e c^2 = c \sqrt{p_e^2 + m_e^2 c^2}, \\ p_{\gamma} = p_e \quad (p_{\gamma} = E_{\gamma} / c), \end{cases} \Rightarrow E_{\gamma} = 0.$$

Атомный ФЭ

- Таким образом, **чем слабее связан электрон в атоме, тем меньше вероятность ФЭ** и наоборот.
- **Вероятность фотоэффекта тем выше, чем ближе энергия гамма-кванта к энергии связи электрона с ядром.**
- Значит можно ожидать, что для гамма-излучения:
 - (1) вероятность ФЭ для К-оболочки больше, чем для L-оболочки и т.д.;
 - (2) чем больше Z , тем вероятнее фотоэффект (возрастает кулоновская энергия связи электронов с ядром);
 - (3) с ростом E_γ вероятность ФЭ падает.

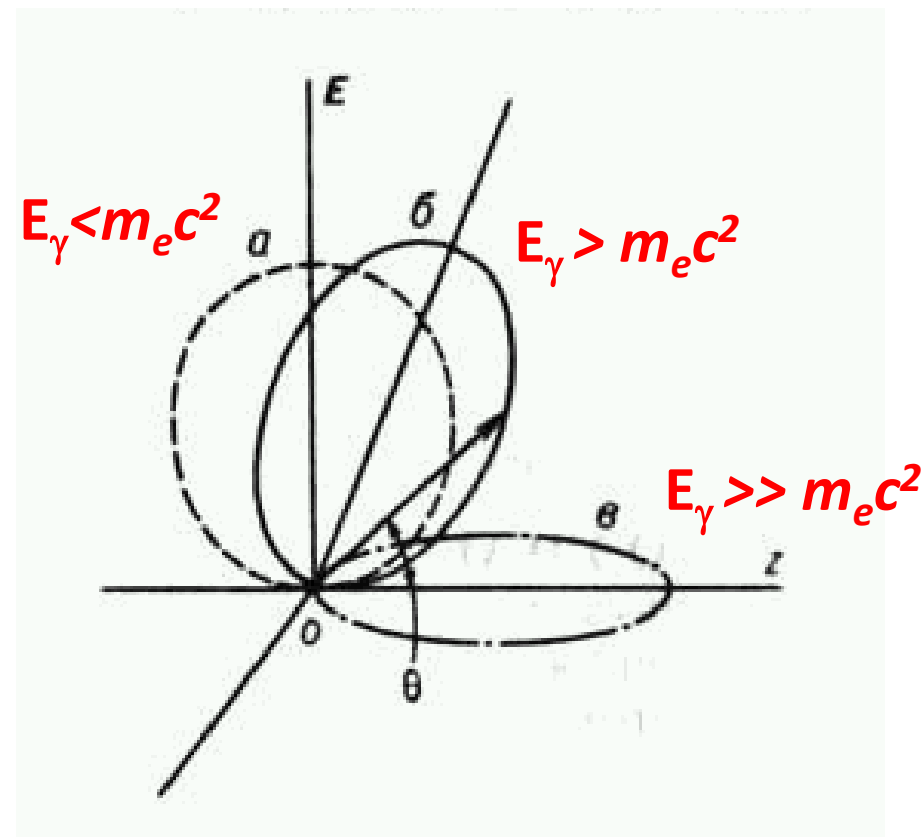
Зависимость сечения фотоэффекта от энергии гамма-кванта



Качественный вид зависимости сечения ФЭ от энергии γ -кванта. Резкие скачки наблюдаются при энергиях, равных потенциалам ионизации электронных оболочек атома вещества.

Угловое распределение электронов при ФЭ

При малых энергиях гамма-квантов $E_\gamma < m_e c^2$ и, соответственно малых скоростях фотоэлектронов, они вылетают в основном в направлении электрического вектора электромагнитной волны, т.е. перпендикулярно направлению падения гамма-кванта (OZ).



При $E_\gamma \gg m_e c^2$ угловое распределение фотоэлектронов становится вытянутым вперед.

Основные свойства ФЭ

- Сечение ФЭ сильно зависит от вещества:

$$\sigma_{\text{ф}} \sim Z^5;$$

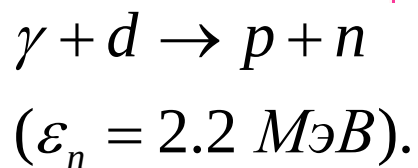
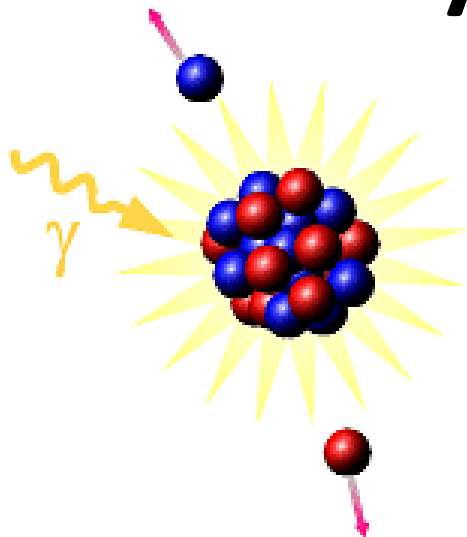
- Сечение ФЭ падает с ростом E_{γ} :

$$\sigma_{\text{ф}} \sim (1/E_{\gamma})^{7/2}, \text{ если } E_{\gamma} > I_{\text{к}};$$

$$\sigma_{\text{ф}} \sim 1/E_{\gamma}, \text{ если } E_{\gamma} \gg I_{\text{к}};$$

- Сечение ФЭ на 80% определяется ФЭ на К-оболочке.
- Фотоэффект – главный процесс, отвечающий за поглощение при небольших энергиях гамма-квантов ($< 0.5 \text{ МэВ}$)

Ядерный ФЭ (ЯФЭ)



Под ЯФЭ понимают реакции под действием γ -квантов типа (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) и т.п. При поглощении гамма-кванта ядро получает избыток энергии без изменения своего нуклонного состава, а ядро с избытком энергии является составным ядром.

- Как и другие ядерные реакции, поглощение ядром гамма-кванта возможно только при выполнении необходимых энергетических и спиновых соотношений.
- Если переданная ядру энергия превосходит энергию связи нуклона в ядре, то распад образовавшегося составного ядра происходит чаще всего с испусканием нуклонов, в основном нейтронов

Основные свойства ЯФЭ

- **Ядерный фотоэффект – пороговая реакция**, она становится возможной при энергиях гамма-квантов выше, чем энергия связи нуклона в составном ядре :
 $(E_\gamma)_{\text{пор}} \sim 6\text{-}10 \text{ МэВ}$. Исключение – дейтерий ^2H и ^9Be (2.23 МэВ и 1.67 МэВ, соответственно)
- Сечение ЯФЭ $\sigma_{\text{яф}} \sim Z$
- **Сечения** фотоядерных реакций в области энергий **до 100 МэВ составляют 1% полного сечения** взаимодействия гамма-квантов с атомом.
- Однако фотоядерные реакции **необходимо учитывать** в процессах преобразования фотонного излучения в веществе, **так как вторичные заряженные частицы**, такие как протоны и альфа-частицы, **могут создавать высокую плотность ионизации**

Эффект Комптона

Рассеяние гамма-квантов

- Помимо фотоэффекта возможны процессы взаимодействия, в которых γ -квант не поглощается, а рассеивается
- Рассеяние может быть с сохранением длины волны гамма кванта (т.н. **когерентное рассеяние**), либо с ее изменением (**эффект Комптона**).

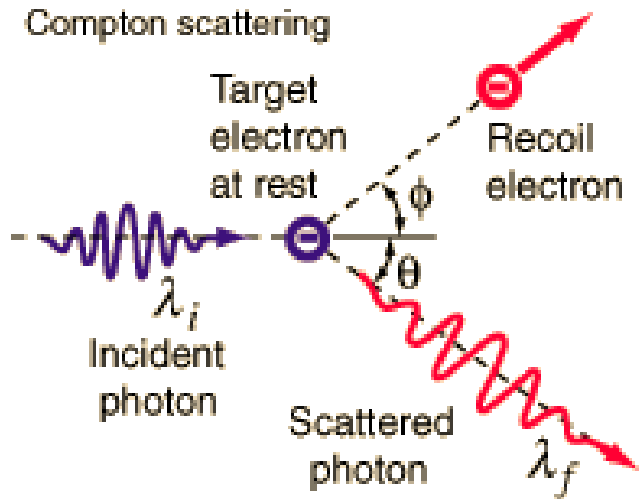
Эффект Комптона

Эффект Комптона – это процесс упругого рассеяния γ -кванта на электроне, сопровождаемый выбиванием этого электрона из атома (электрон отдачи) и увеличением длины волны рассеянного γ -кванта.

Т.е. в отличие от фотоэффекта, эффект Комптона не приводит к полному поглощению фотона: **часть энергии гамма-кванта преобразуется в кинетическую энергию электронов отдачи, а часть энергии уносит рассеянный квант.**

Поэтому Комптон-эффект в результате все же приводит к поглощению – гамма-кванты теряют энергию в последовательных актах рассеяния, а затем поглощаются (на это и рассчитана защита из бетона, кирпича и т.п., т.е. из материала с малым Z)

Изменение длины волны гамма-кванта



Рассмотрим рассеяние фотона на покоем электроне ($E_i \gg I$):

$$\begin{cases} E_i + m_e c^2 = E_f + E_e, \\ \vec{p}_i = \vec{p}_f + \vec{p}_e; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_e^2 = \frac{(E_i - E_f)^2}{c^2} + 2m_e(E_i - E_f), \\ p_e^2 = p_i^2 + p_f^2 - 2p_i p_f \cos \theta; \end{cases}$$

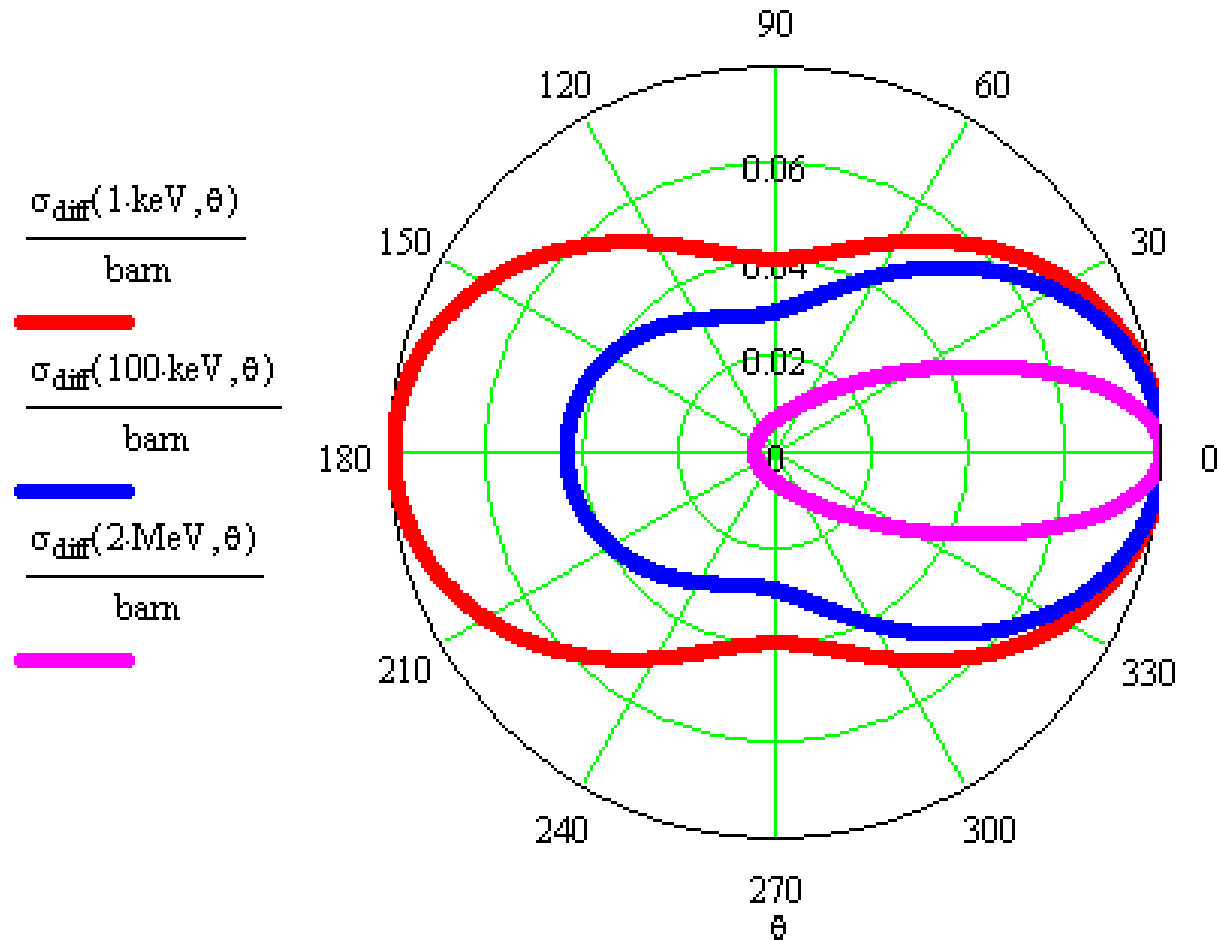
$$\Rightarrow \left(\frac{1}{p_f} - \frac{1}{p_i} \right) = \frac{1 - \cos \theta}{m_e c} \Rightarrow (\lambda_f - \lambda_i) = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta).$$

Формула Комптона (λ_e – комптоновская длина волны электрона):

$$\lambda_f = \lambda_i + \lambda_e (1 - \cos \theta) \quad \left(\lambda_e = h/m_e c = 2,426 \cdot 10^{-10} \text{ см} \right)$$

Изменение длины волны не зависит от первоначальной длины волны и определяется лишь углом θ рассеяния гамма-кванта

Угловое распределение фотонов



- При малых энергиях, $E_\gamma \ll m_e c^2$, угловое распределение **симметрично** относительно перпендикуляра к направлению распространения гамма-кванта (характерное «дипольное» распределение)
- В релятивистской области $E_\gamma \gg m_e c^2$ угловое распределение **резко вытянуто вперед**

Угловое распределение фотонов

- **Характер углового распределения влияет на количество рассеянных гамма-квантов, возвращающихся в падающий поток.**
- **Так при $E_\gamma = 2.5$ МэВ гамма кванты рассеиваются на угол не более чем 30° к направлению первоначального распространения, т.е. большая часть их возвращается таким образом в падающий поток $\Rightarrow$ могут возникать ошибки в интерпретации детектируемых величин**

Энергия электрона

- Комптон-эффект наиболее вероятен, когда энергия падающего кванта больше чем энергия связи электрона в атоме.
- Поэтому электроны на которых рассеивается гамма-квант можно считать **свободными**.
- После взаимодействия кинетическая энергия электрона отдачи определяется соотношением:

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma \sin^2(\theta/2)}}$$

Основные свойства эффекта Комптона

- Сечение растет с увеличением зарядового числа $\sigma_K \sim Z$
(т.к. растет число электронов, а каждый электрон индивидуально участвует в процессе);
- С увеличением энергии E_γ число рассеянных гамма-квантов уменьшается :
при малых энергиях – линейно: $\sigma_K \sim 1/E_\gamma$ (при $E_\gamma \ll m_e c^2$)
при больших $\sigma_K \sim \ln(E_\gamma)/E_\gamma$ (при $E_\gamma \gg m_e c^2$)
- Комптон-эффект слабее зависит от энергии по сравнению с фотоэффектом. Поэтому он дает основной вклад в ослабление потока гамма-излучения при энергиях выше 0.5 МэВ и становится незначительным лишь при $E_\gamma > 10$ МэВ
- В случае тяжелых ядер Комптон-эффект начинает преобладать над фотоэффектом в области энергий $E_\gamma > 2-3$ МэВ.

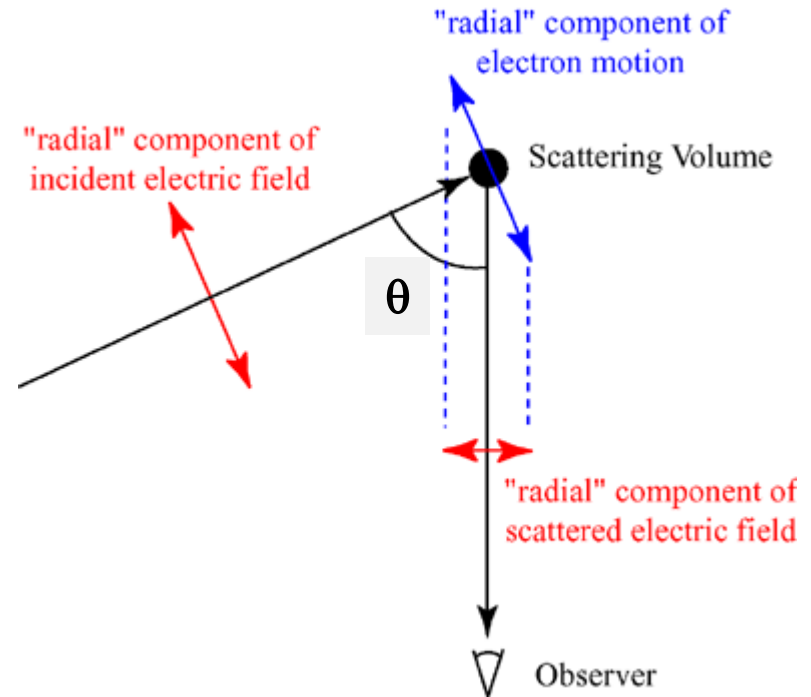
Обратный эффект Комптона

- Комptonовское рассеяние на движущемся электроне может приводить к уменьшению длины волны γ -кванта - **обратный эффект Комптона**.
- Это явление используют для получения моноэнергетических пучков гамма-квантов с высокой энергией. С этой целью поток фотонов от лазера рассеивают на большие углы на пучке ускоренных электронов высокой энергии, выведенных из ускорителя.
- Так на пучках электронов с энергией 3 ГэВ получают монохроматическое гамма-излучение с энергией 400 МэВ!

Когерентное рассеяние

Томсоновское рассеяние

- Вторым по величине вклада в полное сечение в области малых энергий гамма-квантов является **когерентное рассеяние фотонов на атомах вещества – томсоновское рассеяние**.
- Ни ионизации, ни возбуждения атомов при этом не происходит, гамма-квант рассеивается упруго.



В электромагнитной волне на заряженную частицу действует периодическая сила Лоренца. Периодически движущийся заряд будет излучать волны той же частоты. Поэтому **под действием электромагнитного излучения (кванта) связанные электроны в атоме колеблются резонансно и переизлучают кванты той же частоты**

Основные свойства Томсоновского рассеяния

- частота и энергия излучения остается неизменной до и после рассеяния;
- Угловое распределение когерентного рассеяния – классическое «дипольное» $\sim \cos^2 \theta$;
- сечение когерентного рассеяния не зависит от длины волны падающего электромагнитного излучения.

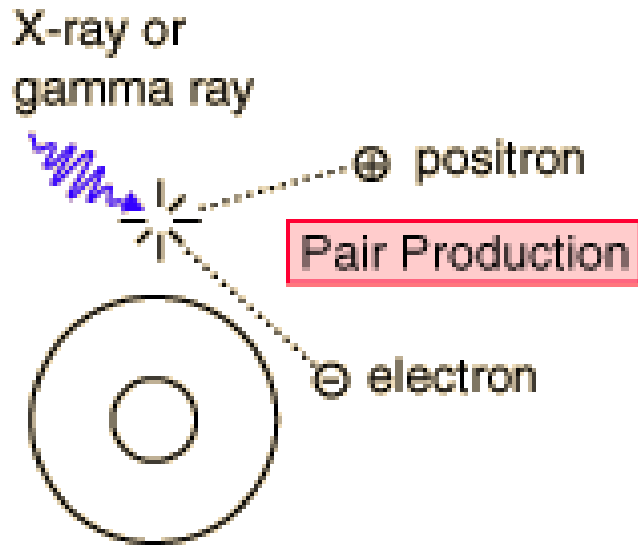
Рождение электрон-позитронных пар

Рождение пар

- При энергиях γ -кванта, превышающих значение $2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$, становится энергетически возможным процесс рождения γ -квантом пары электрон-позитрон в поле ядра.
- Вся энергия γ -кванта передается образованной паре и ядру отдачи, т.е. он исчезает.
- Рождение пар является доминирующим процессом взаимодействия с веществом γ -квантов с энергией $\sim 6\text{-}10 \text{ МэВ}$ и выше.

Порог энергии рождения

В вакууме процесс $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ невозможен!



**Иначе не выполняются
одновременно
законы сохранения энергии и
импульса**

**Таким образом, для рождения пары
необходимо присутствие 3-го тела!**

**Процесс образования пар происходит лишь
в кулоновском поле частицы, получающей часть
энергии и импульса.**

Чаще всего – в поле ядра, иногда – в поле электрона.

Порог энергии рождения

Образование пар в поле ядра может иметь место, если энергия кванта удовлетворяет соотношению

$$E_{\gamma}^{пор} = 2m_e c^2 + E_{я} \approx 2m_e c^2$$

где $2m_e c^2$ - энергия покоя пары электрон- позитрон, а $E_{я}$ - энергия отдачи ядра.

Так как энергия отдачи ядра сравнительно мала (<5 кэВ), то **порогом рождения пар в поле ядра можно считать суммарную энергию покоя электрона и позитрона $2m_e c^2 = 1.022$ МэВ.**

В основном образование e^+e^- -пар происходит в кулоновском поле ядер атомов.

Порог рождения пар в поле электрона равен $4m_e c^2$. Это связано с тем, что энергию отдачи получает электрон, имеющий малую массу, и пренебречь ею уже нельзя. Образование пар в поле электрона характеризуется сравнительно малым сечением.

Энергия фотона (если она превышает 1.022 МэВ) распределяется между электроном и позитроном

Угловое распределение

- **Электрон и позитрон испускаются преимущественно в том же направлении, в котором двигался падающий фотон, особенно если его энергия (а значит и импульс) велика. Основная часть электронов и позитронов движется в пределах угла**

$$\theta(\text{рад}) = 0.511 / E_{\gamma} (\text{МэВ})$$

Основные закономерности процесса рождения пар

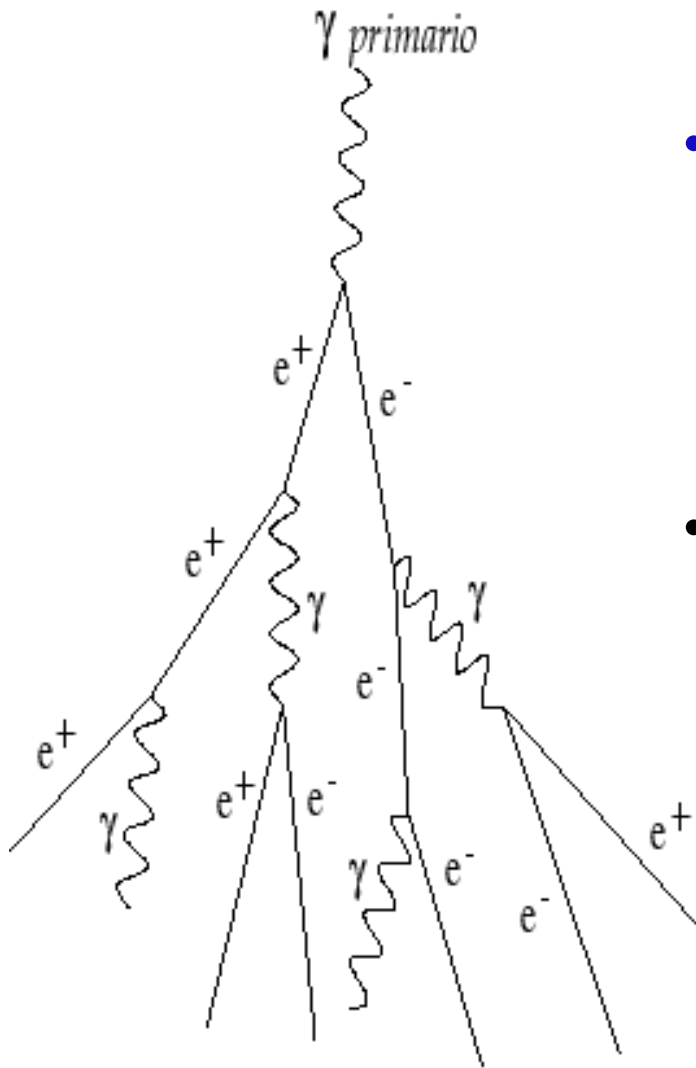
- Процесс имеет **энергетический порог**:

$$2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ};$$

- Сечение $\sigma_{\text{пар}} \sim Z^2$;

- С ростом энергии сечение сначала логарифмически растет $\sigma_{\text{пар}} \sim \ln E_\gamma$, а при энергиях $\sim 100 \text{ МэВ}$ «выходит на константу» $\sigma_{\text{пар}} \sim Z^2 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$;

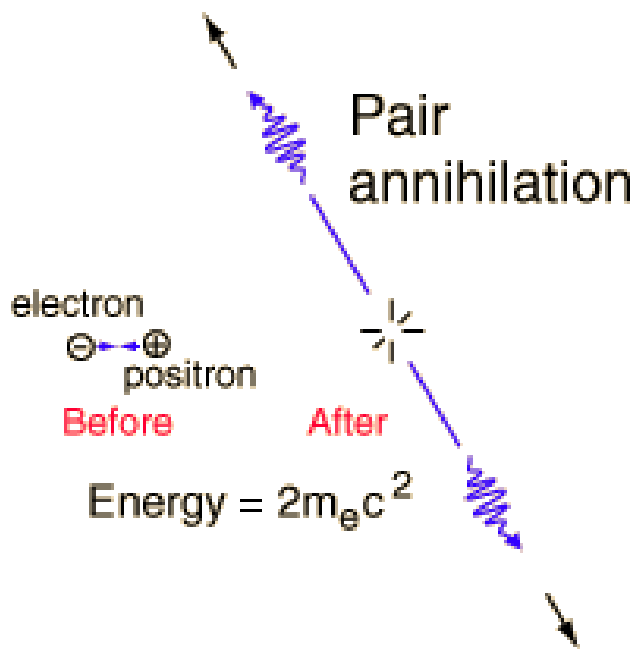
Электрон-фотонный ливень



- Образование электрон-позитронных пар приводит к возникновению электронно-фотонных ливней
- Если энергия γ -кванта достаточно, то он может родить пару. Электрон и позитрон могут испустить тормозные γ -кванты, которые в свою очередь могут родить электрон-позитронные пары.
- В результате возникает лавинообразный процесс, который однако быстро затухает, когда кинетические энергии рождающихся электронов и позитронов становятся меньше критической энергии $E_{\text{кр}} \approx 600/Z$ (МэВ), ниже которой ионизационные потери доминируют над радиационными.

Аннигиляция позитронов

Аннигиляция позитрона и электрона – это процесс, обратный рождению пары электрон-позитрон. Однако, в отличие от рождения пары аннигиляция не требует обязательного присутствия 3-го тела.

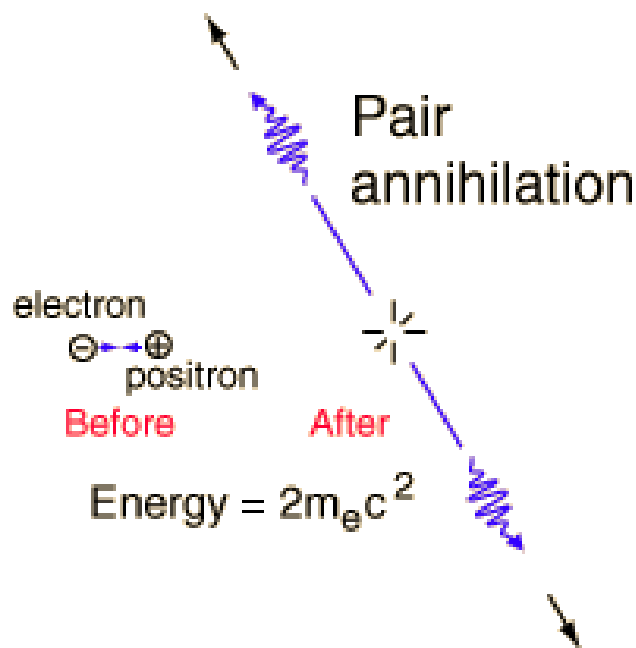


При этом возникает как минимум два аннигиляционных γ -кванта. Если в вакууме позитрон живет бесконечно долго, то, например, в типичных твердых средах он аннигилирует в среднем за 10^{-10} с.

Наряду с рождением пар, естественным источником позитронов служит β^+ -распад.

Аннигиляционное излучение при образовании пар

Процесс образования пар сопровождается низкоэнергетическим гамма-излучением, возникающим за счет быстрой аннигиляции свободного позитрона в присутствии электронов среды



- Аннигиляционное излучение имеет наибольшее значение для источников гамма излучения высокой энергии ($E_\gamma > 6$ МэВ) и для сред из тяжелых элементов ($Z > 25$).
- Это излучение несущественно для большинства задач (<7% полной дозы излучения), но имеет значение при расчете отраженного излучения.

Общая характеристика взаимодействия гамма-квантов с веществом

Полное сечение взаимодействия гамма-квантов

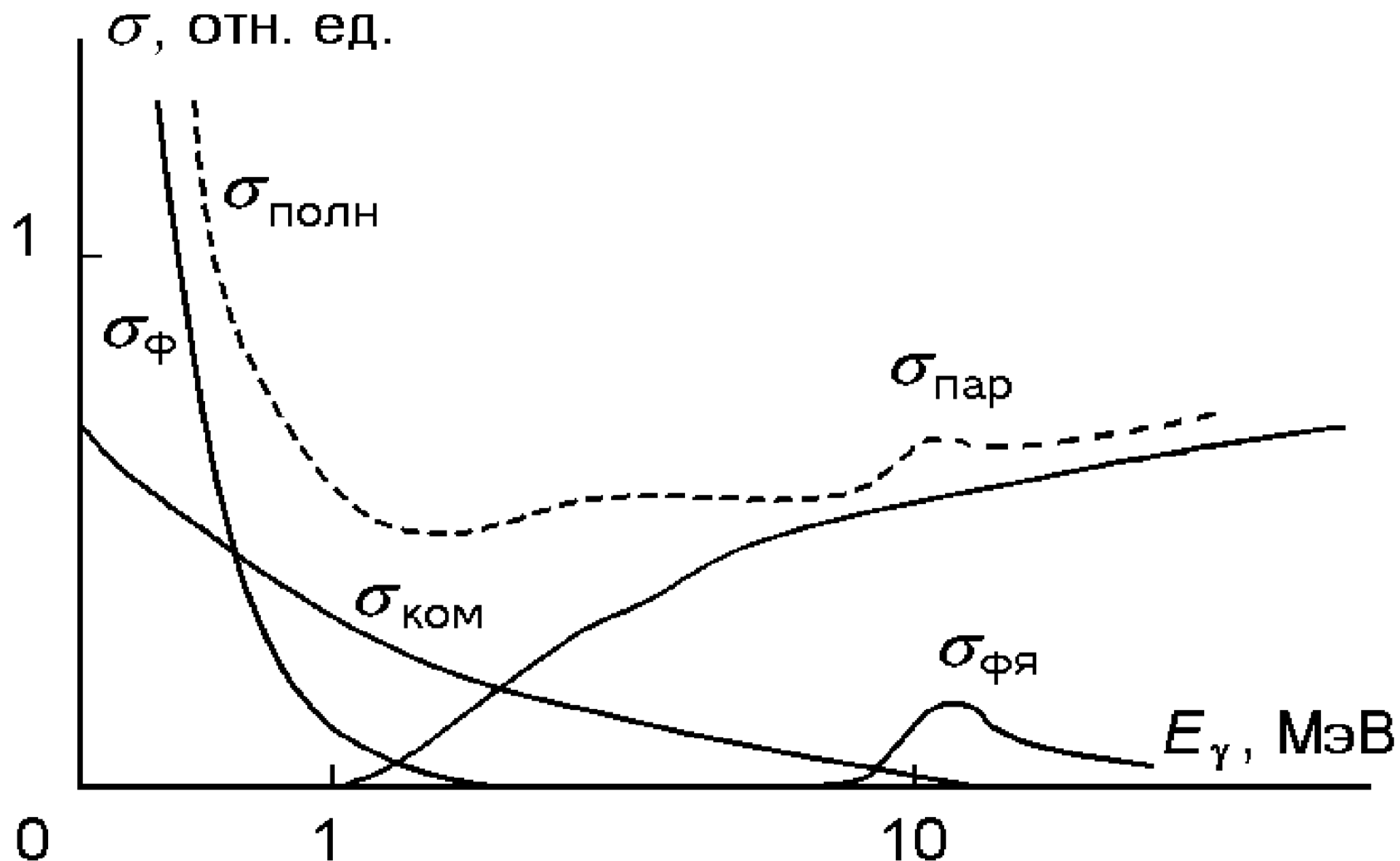
- Полное сечение взаимодействия – это сумма всех рассмотренных парциальных сечений, характеризует вероятность взаимодействия с веществом, приводящую как к поглощению, так и к рассеянию фотонов:

$$\sigma_{полн} = \sigma_{\phi} + \sigma_{\kappa} + \sigma_{пар} + \sigma_{ког} + \sigma_{фя} + \dots$$

- Но на практике учитывают лишь основные процессы: ослабление потока γ -квантов в веществе происходит в результате трех основных неупругих процессов: фотоэффект, Комптон-эффект и образование пары в поле атомного ядра:

$$\sigma_{полн} = \sigma_{\phi} + \sigma_{\kappa} + \sigma_{пар}$$

Полное сечение взаимодействия гамма-квантов



Ослабление потока γ -квантов в веществе

- (1) Характерная особенность полного сечения ослабления $\sigma_{\text{пол}}(E)$ – наличие **минимума**. К такому поведению приводит убывание сечений комптоновского рассеяния и фотоэффекта с ростом энергии и возрастание при этом сечения образования пар.

Энергия E_{min} , при которой $\sigma_{\text{пол}}$ достигает минимума, различна для разных элементов. E_{min} уменьшается с возрастанием Z :

Для легких элементов $E_{\text{min}} \gg 10$ МэВ. (Для Al $E_{\text{min}} = 21$ МэВ, для N $E_{\text{min}} = 45$ МэВ). Для тяжелых элементов положение минимума мало изменяется с ростом Z , а сам минимум становится более выраженным (Для Pb – 3.4 МэВ)

- (2) Доминирующая роль разных процессов приводит к разной зависимости $\sigma_{\text{пол}}(Z)$:

$\sim Z^5$ для $E_{\gamma} < 300$ кэВ;

$\sim Z$ для $0.3 \text{ МэВ} < E_{\gamma} < 7 \text{ МэВ}$;

$\sim Z^2$ для $E_{\gamma} > 7 \text{ МэВ}$;

Но в целом, чем больше заряд и плотность среды, тем эффективнее она поглощает γ -кванты.

Закон ослабления излучения в геометрии узкого пучка

Рассмотрим ослабление в веществе узкого пучка моноэнергетического излучения.

«Узкий пучок» означает, что рассеянные в процессе взаимодействия частицы не возвращаются в поток, и все кванты в пучке обладают начальной энергией E_0 .

Пусть на тонкий слой вещества нормально поверхности падает поток γ -квантов I_0 . В приближении однократного взаимодействия на глубине x имеем изменение плотности потока невзаимодействовавших пока частиц:

$$-dI(x) = I(x) n \sigma_{пол} dx \Rightarrow$$

$$I(x) = I_0 \exp(-n \sigma_{пол} x)$$

- закон ослабления излучения в геометрии узкого пучка (в «хорошей» геометрии)

n – атомная плотность;

$\sigma_{пол}$ – полное сечение взаимодействия: $\sigma_{пол} = \sigma_{\phi} + \sigma_K + \sigma_{пар}$.

Линейный и массовый коэффициенты ослабления

Поглощающую способность вещества принято характеризовать линейным и массовым коэффициентами ослабления (поглощения). Эти коэффициенты определяют кривую ослабления излучения в данном веществе. Величину макроскопического сечения взаимодействия Σ используемую как характеристику вещества при взаимодействии с нейтронами, в случае фотонного излучения называют линейным коэффициентом ослабления μ

Линейный коэффициент ослабления μ [см⁻¹]:

$$\mu = \Sigma = n\sigma_{пол}$$

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

Массовый коэффициент ослабления μ_m [см²/г]:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{n\sigma_{пол}}{\rho}$$

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) = I_0 \exp(-\mu_m d)$$

ρ – плотность вещества.

Линейный и массовый коэффициенты ослабления

Массовый коэффициент ослабления μ_m не зависит от плотности вещества, что позволяет использовать его табличные значения для задания линейного коэффициента ослабления μ одного и того же вещества **в разных фазовых состояниях** (твердое, жидкое, газообразное) путем домножения μ_m на соответствующую плотность.

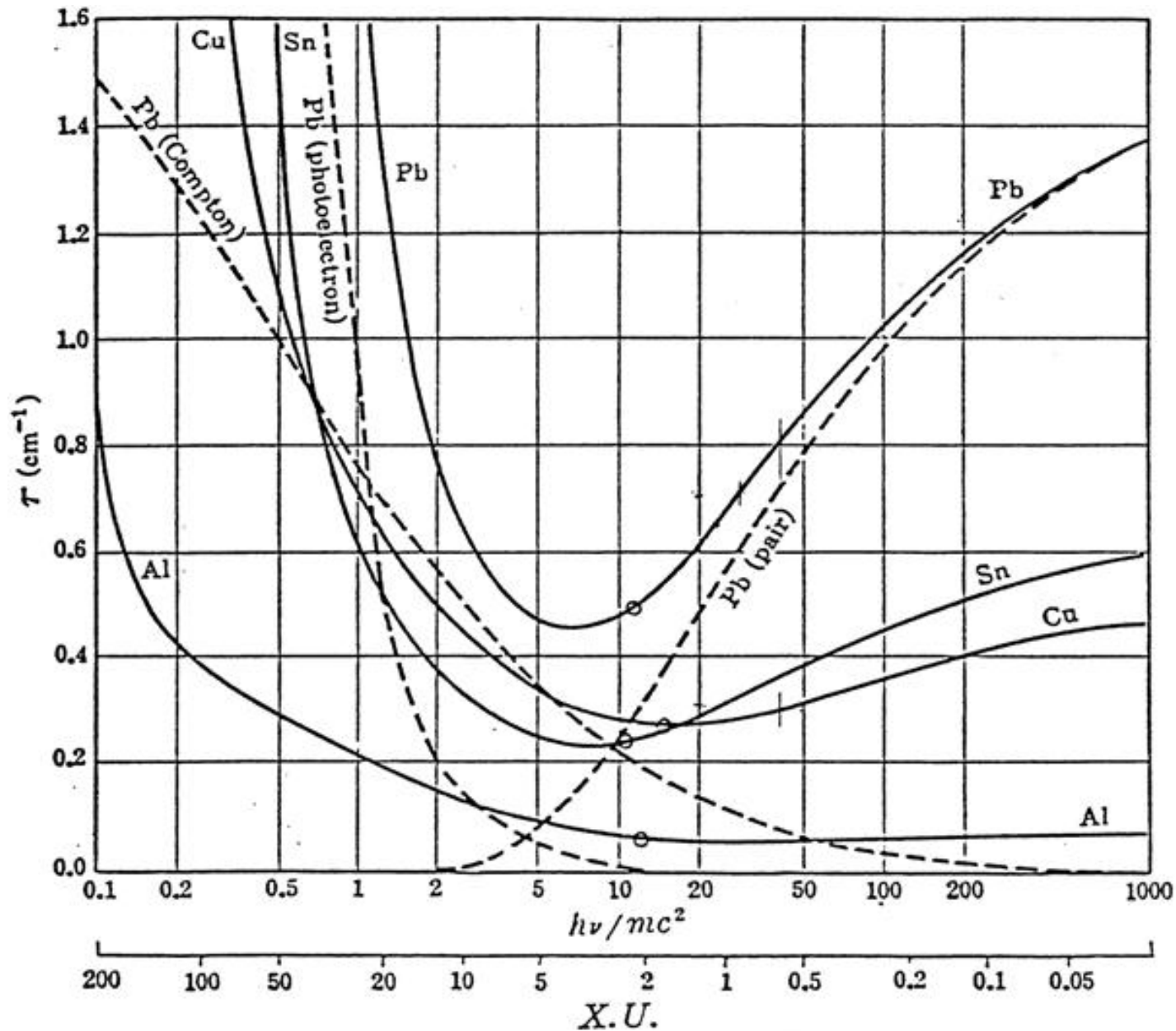
Например:

$$\mu(E)|_{\text{водяной пар}} = \mu_m(E)|_{H_2O} \cdot \rho|_{\text{водяной пар}}$$

$$\mu(E)|_{\text{вода}} = \mu_m(E)|_{H_2O} \cdot \rho|_{\text{вода}}$$

$$\mu(E)|_{\text{лед}} = \mu_m(E)|_{H_2O} \cdot \rho|_{\text{лед}}$$

Линейный коэффициент ослабления



Слой половинного ослабления

- Для гамма-излучения нет понятия полного пробега!
- При решении задач для характеристики проникающей способности гамма-излучения часто используют значения слоев ослабления $\Delta_{1/l}$.
- Слой ослабления $\Delta_{1/l}$ - это толщина вещества, ослабляющая излучение в l раз:

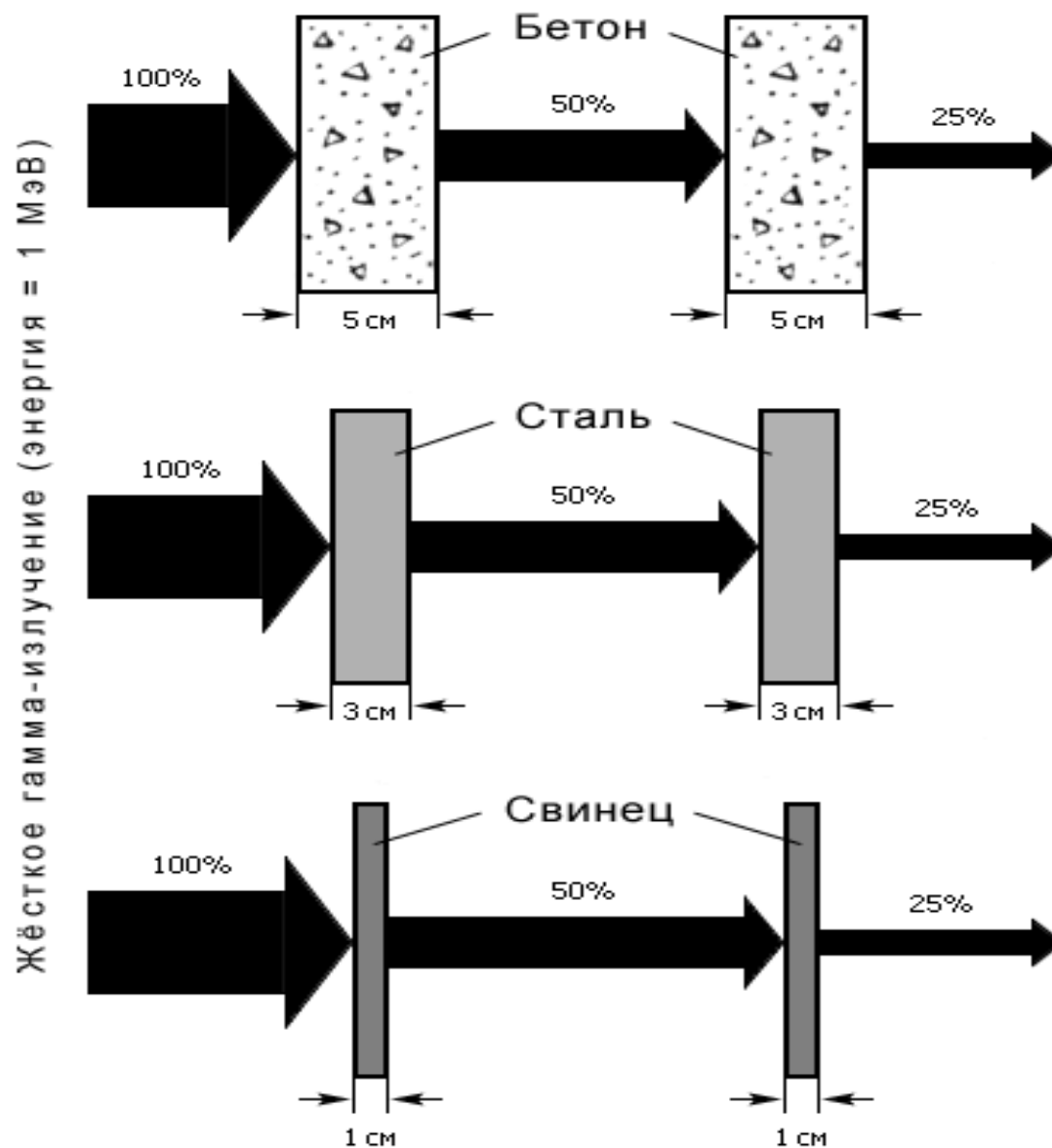
$$l = \frac{I_0}{I(\Delta_{1/l})} = \exp(\mu \Delta_{1/l})$$

$$\Delta_{1/l} = \frac{\ln l}{\mu}$$

- В частности, слой половинного ослабления

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Слой половинного ослабления для гамма-излучения с энергией 1 МэВ



Средняя длина свободного пробега

- Величина обратная линейному коэффициенту ослабления называется **длина свободного пробега l** . Она показывает, какое расстояние в среднем проходит в среде первичный гамма-квант до взаимодействия:

$$l = \frac{1}{\mu} \text{ (см)}$$

Литература

- А.П. Черняев, Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. – М.: Физматлит, 2004.
- Практикум по ядерной физике, под ред. В.О. Сергеева. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006.
- Батурицкий, М.А. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом : учебное пособие. – Мн.: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2005. – 118 с.
- Мухин К.Н. *Экспериментальная ядерная физика*»(Книга 1. Части I и II.). Энергоатомиздат, 1993.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П. *Ядерная физика*. Наука, 1980.
- Лощаков И.И. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений. - СПб.: Изд-во Политех. Университета, 2008.