

ВОЕННО–МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ

имени С.М. Кирова

**Кафедра биологической и медицинской
физики**

ЛЕКЦИЯ № 10

по дисциплине «Физика, математика»

на тему: «**Свойства ионизирующих
излучений. Основы дозиметрии**»

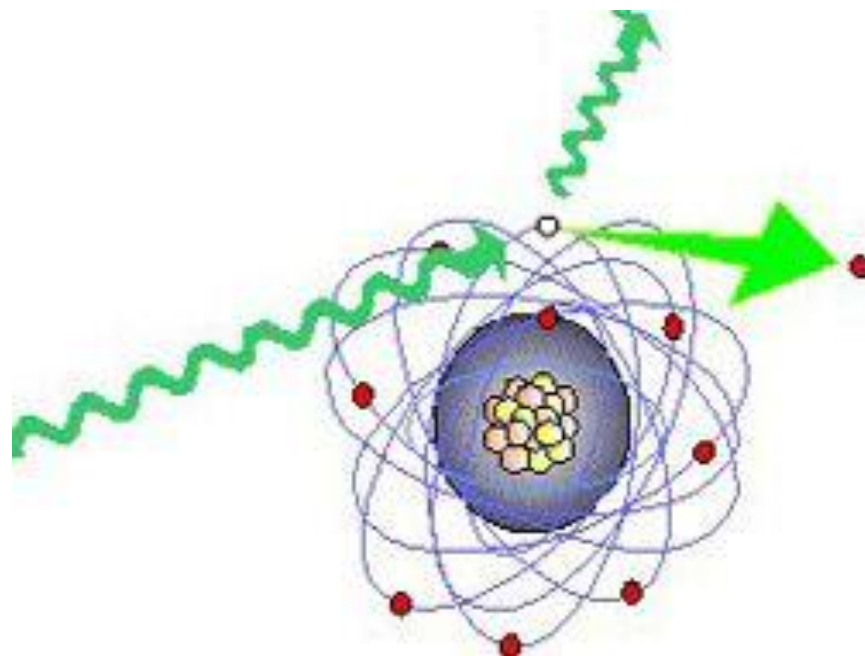
для курсантов и студентов I курса ФПВ,
ФПиУГВ, спецфакультета

1. Виды ионизирующих излучений.

Проникающая и ионизирующая способность разных видов ионизирующих излучений

- **Ионизирующими излучениями** называют потоки частиц и квантов электромагнитного поля - фотонов, взаимодействие которых со средой приводит к **ионизации** ее атомов и молекул.

- **Ионизация атома** представляет собой процесс превращения нейтрального атома под действием ионизирующего излучения в заряженные частицы — **свободный электрон** и **положительно заряженный ион**, т.е. образование **пары ионов**.
- В различных материалах на образование ионной пары необходима энергия **30 — 40 эВ**.



- Ионизирующими излучениями являются рентгеновское и γ -излучение, потоки α -частиц, электронов, позитронов, протонов, нейтронов, **энергии которых достаточно** для того, чтобы вызвать ионизацию.

Классификация ионизирующих излучений:

КОРПУСКУЛЯРНЫЕ (обладают массой покоя m_0)		ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ (не обладают массой покоя)
Заряженные	Незаряженные	
α -частицы, электроны, позитроны, протоны, другие ядра	Нейтроны	Рентгеновское и гамма- излучения
Преимущественно о взаимодействуют с электронной оболочкой	Взаимодействуют исключительно с ядрами	Преимущественно взаимодействуют с электронной оболочкой

Что может происходить с ИИ при взаимодействии с веществом?

- **Рассеяние** (изменение направления движения)
- **Торможение** (уменьшение кинетической энергии)
- **Поглощение** (исчезновение)
- **Образование электрон-позитронной пары** (только гамма-излучение)

Что может происходить с веществом?

- Возбуждение электронов (радиолюминесценция)
- Отрыв электронов (ионизация)
- Возбуждение ядра (испускание гамма-квантов)
- Образование ядер отдачи
- Ядерные реакции

Основные характеристики ионизирующих излучений:

- 1) **поток ионизирующего излучения**

$$\Phi_n = dN/dt,$$

- где dN - число частиц, падающих на данную поверхность за интервал времени dt .

- 2) **плотность потока ионизирующего излучения**

$$j_n = d\Phi_n/dS,$$

где $d\Phi_n$ - поток, приходящийся на площадь поперечного сечения dS поглощающего объема.

- 3) **поток энергии**

$$\Phi = dE/dt,$$

- где dE - суммарная энергия излучения (за исключением энергии массы покоя),
 dt – промежуток времени.

- 4) **энергетический спектр** ионизирующего излучения - распределение составляющих его частиц и фотонов по энергиям.

Основные количественные характеристики взаимодействия ионизирующих излучений с веществом:

- 1) **Линейная передача энергии (ЛПЭ)** или **линейная тормозная способность (S)** - энергия, переданная среде ионизирующей частицей на единице длины.

$$S = \frac{dE}{dl}$$

- Размерность – Дж/м.

- 2) **Линейная плотность ионизации (ЛПИ)** - число пар ионов, создаваемых частицей или квантом на единице пути в веществе.

$$i = \frac{dn}{dl}$$

- Размерность – пар ионов/м.

- ЛПИ зависит от природы и энергии **частицы** и от свойств облучаемого **вещества**.
- В справочниках обычно указывается ЛПИ **для стандартного вещества** – сухого воздуха, а за единицу пути принимается **один сантиметр**.

Значения линейной плотности ионизации в воздухе

Вид излучения	ЛПИ (пар ионов на см)
Альфа-частицы	20-80 тысяч
Бета-частицы	100-400
Рентгеновские и гамма-кванты	5-10
Протоны	10 000

- Конкретные значения ЛПИ могут отличаться от приведенных в 2-3 раза в зависимости от энергии частиц.
- В других веществах значения ЛПИ будут другими.
- В тканях человека значения ЛПИ примерно в 800 раз больше, чем в воздухе.

- 3) **Линейный пробег (R)**. За меру проникающей способности **для частиц** принимают расстояние, на котором частица замедляется до энергии, близкой к средней энергии **теплового движения**.

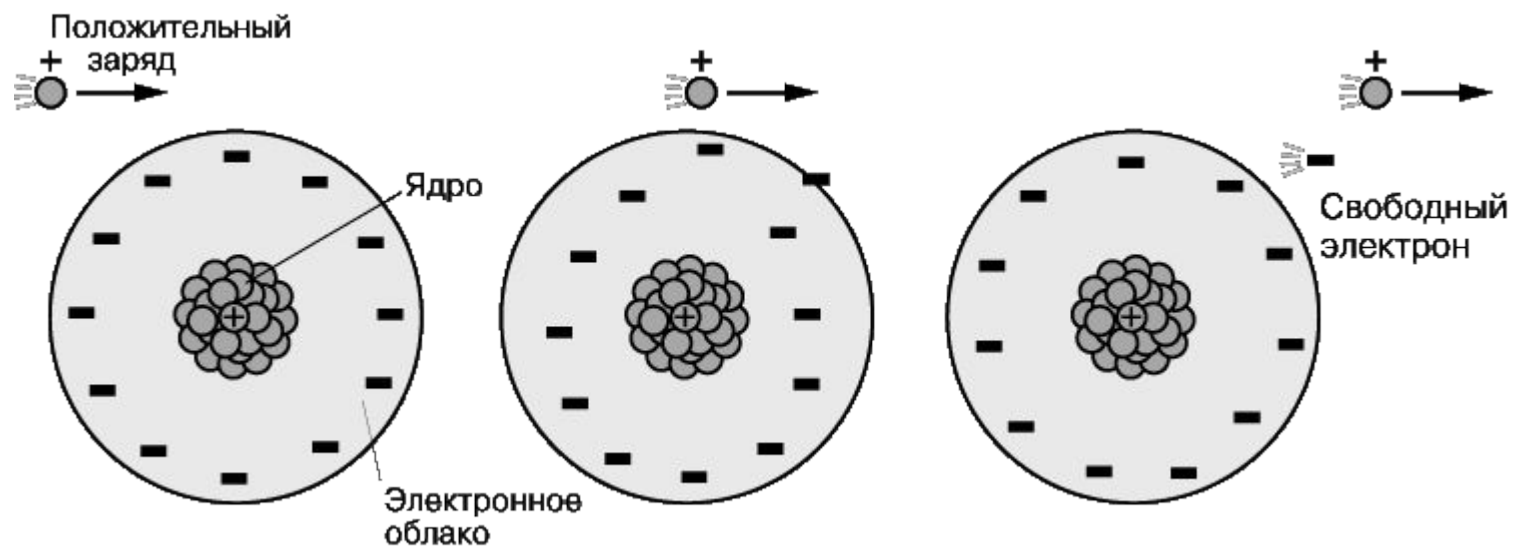
- Для квантов рентгеновых или гамма-лучей за меру проникающей способности принимают расстояние, на котором мощность излучения падает в «e» раз.
- Очевидно, что чем больше ЛПИ и ЛПЭ, тем меньше проникающая способность излучения в данном веществе.

- Излучения с высокой проникающей способностью называют **жесткими**; если же проникающая способность мала, такие излучения называют **мягкими**.

2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом

- Заряженные частицы прежде всего взаимодействуют с **электронной оболочкой** атома.
- В основе взаимодействия лежат **силы Кулона** (электростатические взаимодействия).

$$F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$$



Сравним свойства альфа- и бета-частиц:

Альфа-частицы	Бета-частицы
Масса покоя = 4 а.е.м. = = $4 \times 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.	Масса покоя = = $9,11 \times 10^{-31}$ кг (в 7289 раз меньше)
Заряд: $+2 \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Полная ионизация составляет 120-250 тыс. пар ионов при энергии 4-9 МэВ ; удельная ионизация изменяется от 20 до 80 тыс. пар ионов на пути в	Линейная плотность ионизации примерно в 800 раз меньше и составляет в среднем примерно 100-400 пар ионов на пути в воздухе.

Почему α -частицы ионизируют гораздо плотнее, чем β - частицы?

- При одинаковой кинетической энергии

$$E_{\text{кин.}} = \frac{mV^2}{2}$$

скорость движения **тяжелых альфа-частиц** значительно **меньше**, чем скорость движения бета-частиц.

Соответственно, больше **время пролета** мимо атома и **эффективнее взаимодействие** с атомом.

Защита:

- **α -частицы** плотно ионизируют и быстро теряют энергию, поэтому их проникающая способность мала.
- Вследствие этого они могут быть полностью задержаны **листом плотной бумаги, одеждой, слоем резины хирургических перчаток и эпидермисом кожи.**
- Однако **при попадании** α -излучающих нуклидов **внутрь** организма степень их опасности резко возрастает.

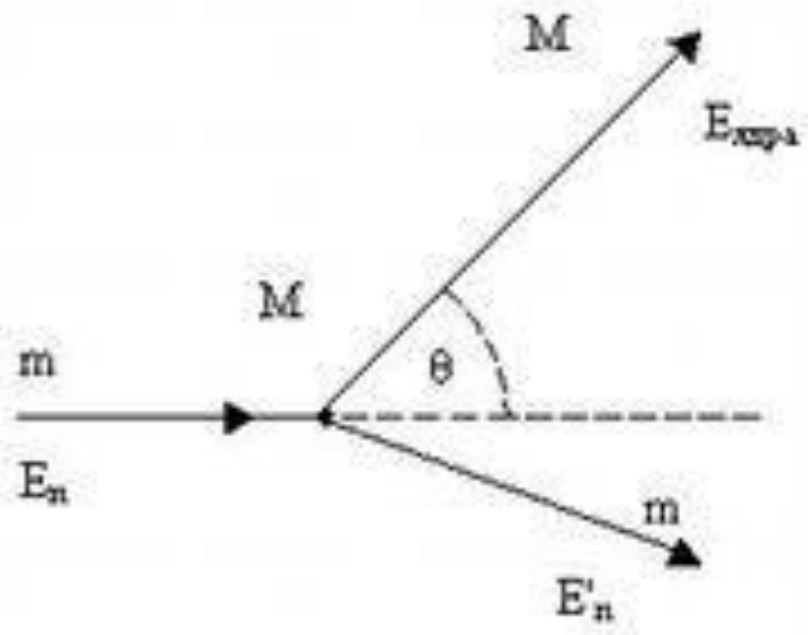
- β -частицы **средних энергий** задерживаются **оконным стеклом, подошвой обуви**, но могут вызывать поражение кожных покровов, роговицы и т. п.
- Поэтому даже при работе с **мягкими** β -излучателями руки должны быть защищены **перчатками**, а от **жестких** β -частиц (с энергией 1,5 МэВ и выше) следует защищаться экранами из **органического стекла**.

3. Взаимодействие нейтронов с веществом

- Нейтроны взаимодействуют **только с ядрами** атомов. Электронная оболочка для них прозрачна.
- Взаимодействие – **механическое**.
- Характер взаимодействия зависит **от кинетической энергии** нейтронов.

1) Упругое рассеяние

- Характерно для быстрых нейтронов (с энергией **от 200 кэВ до 20 МэВ**).
- Заключается в том, что нейтрон, обладающий определенным запасом энергии, при столкновении с ядром атома **передает** ему **часть энергии**, а сам **изменяет направление** своего движения.



- Суммарная кинетическая энергия нейтрона и ядра до и после взаимодействия не изменяется, причем, **чем больше масса неподвижного ядра** по сравнению с массой движущегося нейтрона, **тем меньшая доля энергии** будет ему передана при столкновении.

- При равных массах сталкивающихся объектов (например, с ядром водорода) движущееся тело (в данном случае нейтрон) будет терять в среднем половину своей энергии.

- На практике, это означает, что материалы, **обогащенные водородом** (такие как вода, бетон и парафин) являются лучшими материалами для **защиты от нейтронов**, так как протон атомов водорода позволяет рассеять энергию падающих нейтронов относительно быстро.

- Ядро атома, получившее дополнительную энергию ("**ядро отдачи**"), покидает свои электронные оболочки и, обладая положительным зарядом, производит **вторичную ионизацию**.

- Важно помнить, что отскакивающие в результате упругого рассеяния нейтронов ядра являются **тяжелой заряженной частицей**.
- Они теряют свою энергию с высокой скоростью, взаимодействуя с атомами среды таким же образом, как альфа-частицы и, следовательно, классифицируются как **ионизирующее излучение с высокой ионизирующей способностью**.

- По этой причине, учитывая, что упругое рассеяние является наиболее вероятным взаимодействием для быстрых нейтронов в биологической ткани, **быстрые нейтроны** могут быть **особенно опасны** при облучении тела человека.

2) Неупругое рассеяние

- Более сложное взаимодействие может иметь место, когда **быстрые или промежуточные (с энергией от 0,5 эВ до 200 кэВ)** нейтроны сталкиваются с мишенью, которая намного больше, чем они сами, и не отскакивает (как в случае упругого рассеяния), а **временно поглощается** ядром-мишенью.

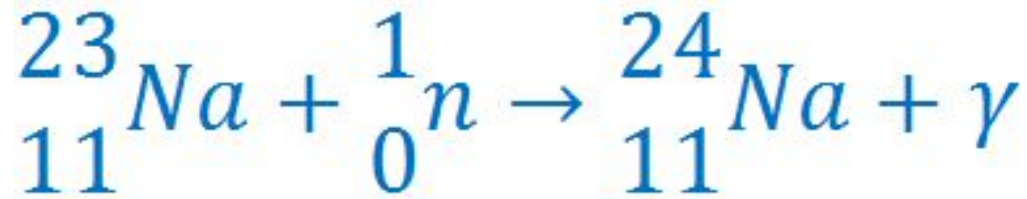
- После короткого времени **нейтрон переиспускается** с уменьшенной энергией, а ядро-мишень остается в возбужденном состоянии.
- Затем ядро снимает возбуждение путем испускания **гамма-излучения**.

- Поскольку суммарная кинетическая энергия не сохраняется при этом столкновении (потому что часть энергии идет на образование гамма-излучения), этот тип столкновения называется **неупругим столкновением**. А сам тип взаимодействия называется **неупругим рассеянием**.

3) Поглощение нейтронов (радиационный захват)

- Характерно для **медленных и тепловых** нейтронов (с энергией **до 0,5 эВ**).
- Нейтроны **поглощаются** и становятся частью ядер атомов поглотителя.
- Затем эти ядра должны избавиться от избыточной энергии, обычно путем **испускания гамма-излучения**.

- Пример реакции радиационного захвата:



Защита от нейтронов:

- **Трехкомпонентная:**
- **1) Замедлитель** быстрых нейтронов - материалы, содержащие преимущественно **легкие элементы** (водород, бор, углерод и другие).
- Чаще всего в качестве таких материалов применяют **воду, пластмассы, парафин.**

- **2) Поглотитель медленных нейтронов - бор, бериллий, кадмий, европий и некоторые другие.**
- **3) Защита от гамма-квантов – свинец, медь.**

4. Взаимодействие рентгеновского и гамма- излучений с веществом

- **Рентгеновы лучи** – это электромагнитное излучение с длиной волны **меньше 10^{-8} м (от 10^{-8} до 10^{-14})**.

- Оно возникает:
- а) **при торможении электронов** в кулоновском поле многоэлектронных атомов (**тормозное РИ**);
- б) **при переходе электрона** с одной из внешних оболочек **на вакантное место**, образовавшееся **во внутренней оболочке** (**характеристическое РИ**).

- Гамма-излучение – электромагнитное излучение с длиной волны **меньше 10^{-10} м.**
- Испускается при переходах между возбужденными состояниями **атомных ядер.**

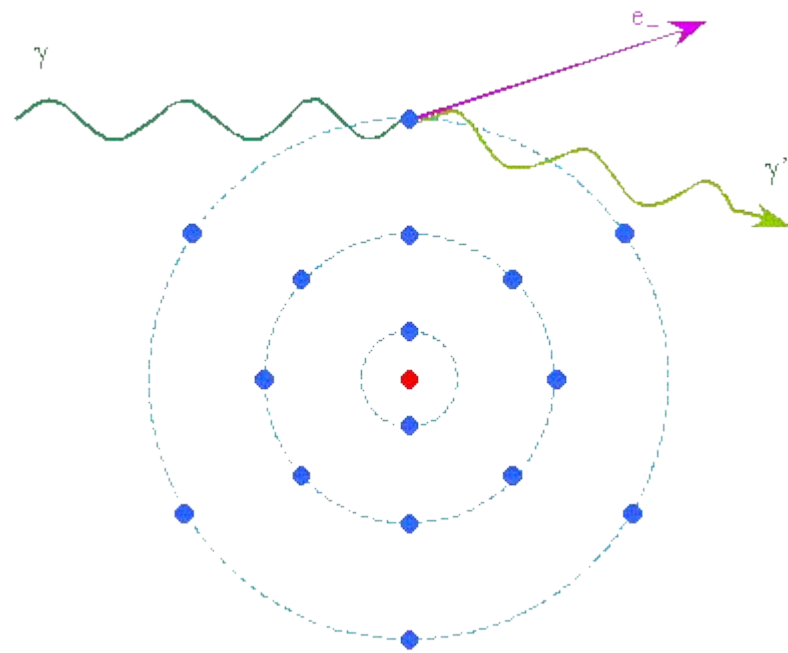
- Резкая граница между гамма- и рентгеновским излучением не определена.
- **В области 1—100 кэВ** гамма-излучение и рентгеновское излучение различаются **только по источнику**: если квант излучается в ядерном переходе, то его принято относить к гамма-излучению; если при взаимодействиях электронов или при переходах в атомной электронной оболочке — к рентгеновскому излучению.
- С точки зрения физики, кванты электромагнитного излучения с одинаковой энергией не отличаются, поэтому такое разделение условно.

- Рентгеновские и гамма-кванты преимущественно взаимодействуют **с электронной оболочкой** атома.
- При взаимодействии рентгеновских и гамма-квантов с электронами вещества могут происходить **следующие процессы**:

- **1) Когерентное рассеяние**, когда квант изменяет **направление движения**, но его энергия (частота, длина волны) сохраняется.
- Этот процесс значителен только в случае **мягкого (длинноволнового) рентгеновского излучения**, энергия квантов которого меньше энергии ионизации.

- 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 значение для **рентгеноструктурного анализа**.

- **2) Некогерентное рассеяние или эффект Комптона.**
- В этом случае квант при столкновении с атомом отдает электрону **только часть своей энергии**, отклоняясь от своего первоначального направления. Электрон вылетает из атома.
- При этом возникает рассеянное рентгеновское или гамма-излучение, длина волны которого **больше**, чем у падающего.



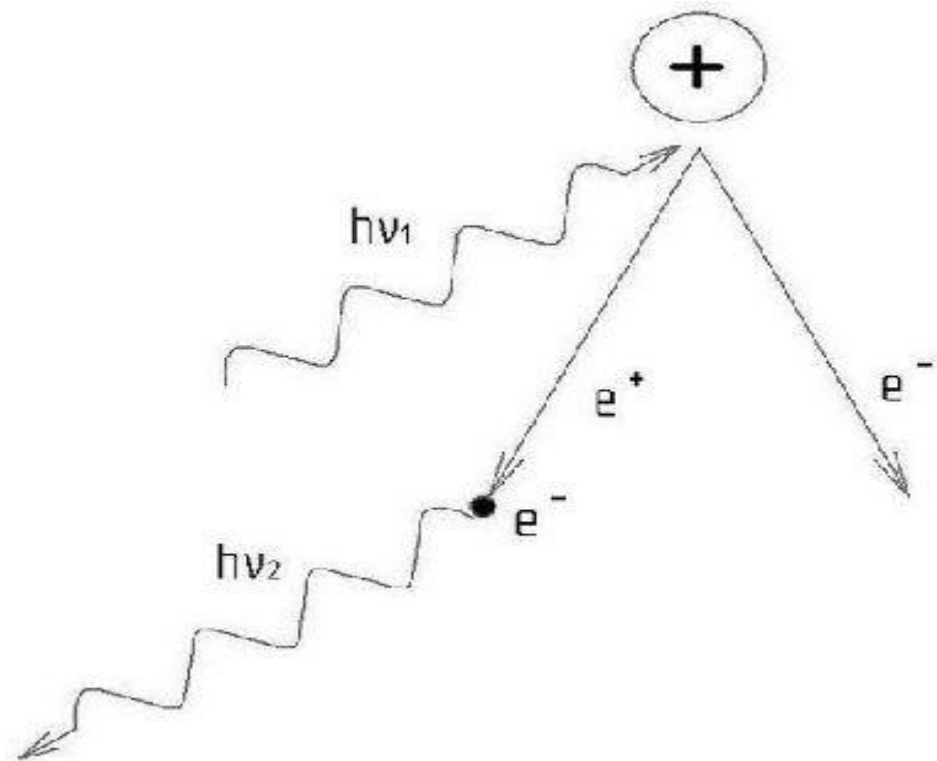
- Изменение длины волны зависит от угла θ , под которым рассеивается гамма-квант:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

- **3) Поглощение или фотоэффект.**
- В этом случае квант полностью отдает свою энергию одному из электронов атома. Электрон с большой скоростью вылетает из атома, превращаясь в ион.
- При этом кинетическая энергия электрона равна разности энергии кванта и работы выхода электрона (формула Эйнштейна):

$$h\nu = A + mv^2/2$$

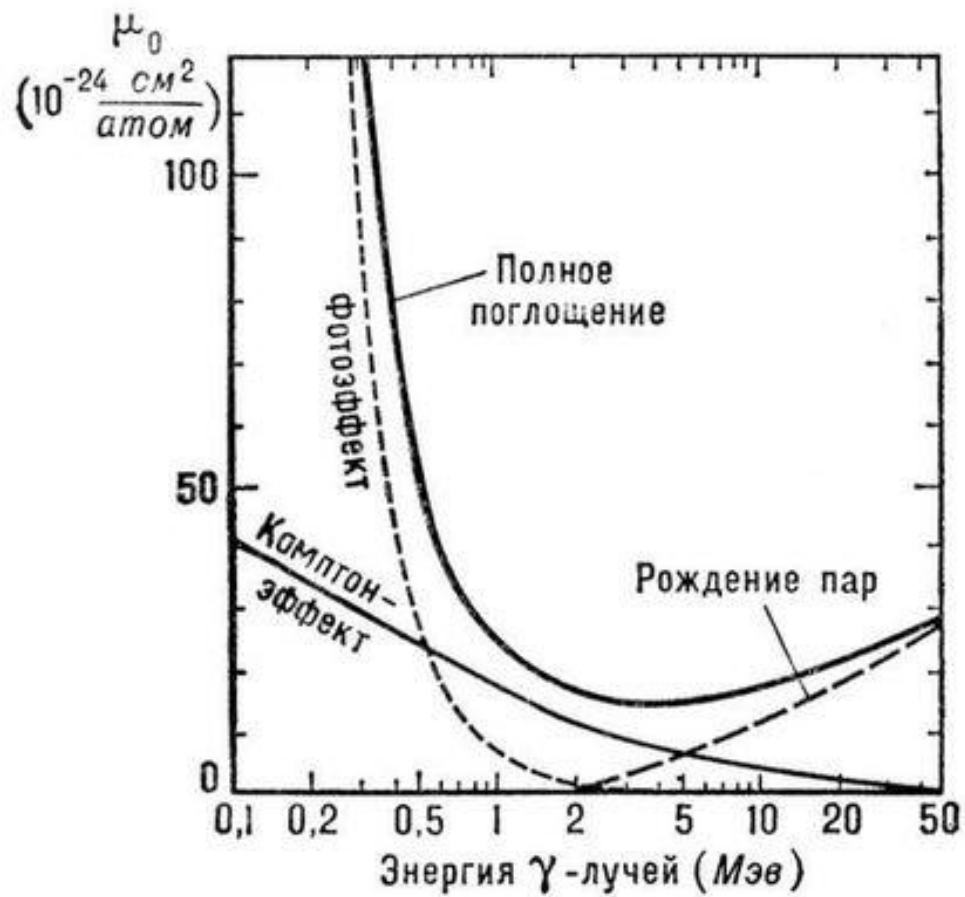
- 4) **Образование электронно-позитронной пары.**
- Если энергия кванта больше, чем **1,022 МэВ**, то в поле ядерных сил он может превратиться в две частицы – **электрон и позитрон**.
- Этот процесс, обратный аннигиляции, называется **процессом рождения пары**.



- Вероятность каждого из перечисленных процессов существенно зависит от **энергии кванта** и от **порядкового номера** в таблице Менделеева того элемента, с которым взаимодействует излучение.

- В частности, чем **ближе к началу** периодической системы находится элемент, тем **менее вероятен** процесс **поглощения**.
- **С ростом энергии кванта** вероятность поглощения и рассеяния **уменьшается**, причем **вероятность поглощения** убывает гораздо **быстрее**, чем вероятность рассеяния.

- Вероятность **образования пар**, наоборот, **увеличивается с ростом энергии квантов**, и при больших энергиях процесс образования пар становится доминирующим.



5. Закон ослабления рентгеновского и гамма- излучения веществом

- Ослабление интенсивности рентгеновских и гамма-лучей при прохождении их через слой вещества толщиной x количественно описывается **законом Бугера**:

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

- Здесь I_0 – интенсивность падающего излучения, $I(x)$ – интенсивность излучения после прохождения через вещество,
 μ - линейный коэффициент ослабления.
- μ зависит от порядкового номера элемента, а также от вида и энергии излучения.

- Наряду с коэффициентом ослабления μ часто пользуются другой величиной, называемой **слоем половинного ослабления**.
- Это толщина слоя вещества, который **ослабляет** интенсивность излучения **вдвое**.
- Его обозначают $d_{1/2} (x_{0,5})$.

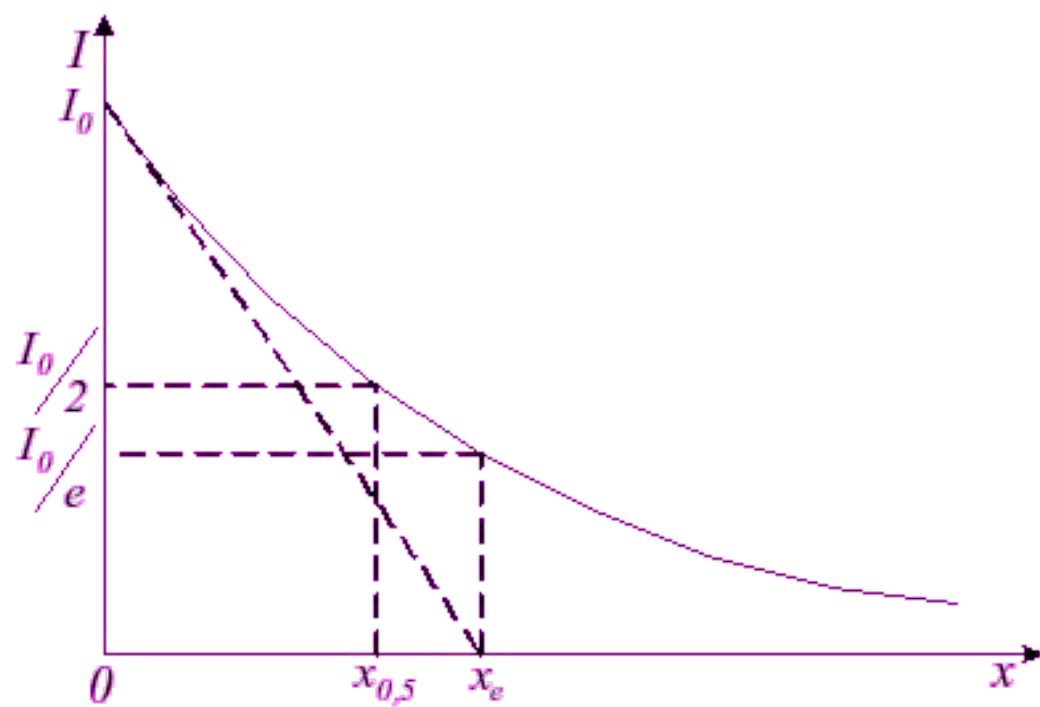


Рис. 2

- Слой половинного ослабления и коэффициент ослабления связаны между собой:

$$\mu = \ln 2 / d_{1/2} = 0,693 / d_{1/2}.$$

- Зная величину слоя половинного ослабления в стандартном веществе (например - в алюминии), можно сравнить жесткость (проникающую способность) разных излучений.
- Чем **больше слой** половинного ослабления, тем **более жестким** является излучение.

- В ряде случаев поглощающий слой вещества удобнее характеризовать не толщиной, а величиной массы, приходящейся на единицу площади (m/S).

- Тогда, вводя массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \mu/\rho$, где ρ - плотность вещества, можно переписать закон Бугера в виде:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \left(\frac{m}{S}\right)}$$

- Значения массовых коэффициентов ослабления в разных веществах гораздо меньше отличаются друг от друга, чем линейные коэффициенты ослабления, и поэтому ими пользоваться удобнее.

Вещество	μ , см ⁻¹	μ_m , см ² г ⁻¹
Вода	0,17	0,17
Воздух	0,002	0,16
Алюминий	0,44	0,17
Бетон	0,39	0,17

- Если излучение проходит последовательно через несколько разных веществ, то при использовании массового коэффициента ослабления аргументом экспоненты становится **суммарная толщина слоя вещества, выраженная в массовых единицах (приведенная масса)**.