

Лекция 8

- 1. Взаимодействие ядерных частиц с веществом**
- 2. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество.**
- 3. Прохождение легких заряженных частиц через вещество.**
- 4. Прохождение γ - квантов через вещество.**
- 5. Другие механизмы взаимодействия излучения с веществом: Комptonовское рассеяние, фотоэффект, рождение электрон-позитронных пар, эффект Вавилова –Черенкова.**

1. Введение.

Будем рассматривать частицы и γ - кванты с энергиями $E \gg \bar{J} = 13.5 \times Z$ эВ. (\bar{J} – средний потенциал ионизации атома; $E < 10$ МэВ).

Общая картина взаимодействия:

частица (m, q, E) \rightarrow *вещество* (ρ, A, \bar{J}) \Rightarrow
 \Rightarrow *электроны, γ – кванты,*
ядерные реакции, частицы.

2. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество.

Частица, пролетая сквозь вещество, «расталкивает» атомные электроны своим кулоновским полем. При этом частица теряет свою энергию – ионизационные потери, а атомы ионизируются или возбуждаются. Эти потери энергии на единицу пути будем характеризовать величиной $-dE/dx$ и полным пробегом R частицы в веществе.

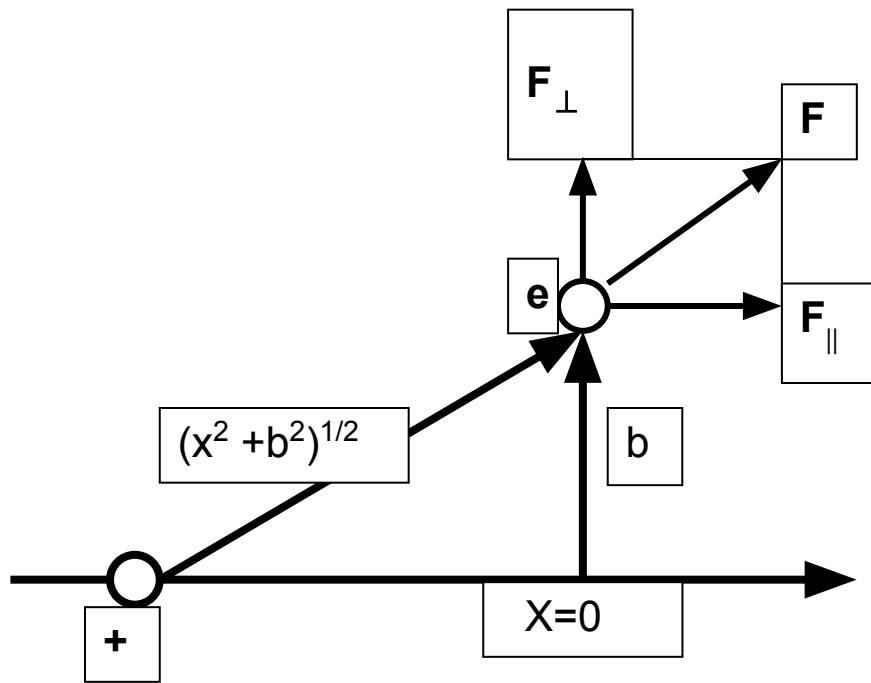
Приближения:

- применимо классическое рассмотрение процесса столкновения частицы с электроном

атома $\underline{-pb \gg \hbar}$;

- скорости атомных электронов до и после столкновения малы по сравнению со скоростью налетающей частицы, или

$$E_{\text{част}} \gg (M_{\text{част}}/m_e)E_e$$



**Схема взаимодействия заряженной
частицы (+) с электроном (e)**

Вычислим потери энергии налетающей частицей при столкновении с одним электроном. Импульс электрона будет меняться в перпендикулярном направлении к оси (X):

$$\Delta p_{\perp} = \int F_{\perp} dt$$

Пусть взаимодействие эффективно на участке пути равном $2b$, которое частица проходит за время $\Delta t = 2b/v_{\text{ч}}$. Кулоновская сила взаимодействия примерно равна:

$$F_{\perp} = Ze^2 / b^2$$

$$F_{\perp} = Ze^2 / b^2; \quad \text{отсюда получим } \Delta p_{\perp} = 2Ze^2 / bv$$

Соответствующая кинетическая энергия равна

$$\Delta E = \frac{\Delta p_{\perp}^2}{2m_e} = \left(\frac{2Z^2 e^4}{m_e v^2} \right) \left(\frac{1}{b^2} \right)$$

Это энергия, которую теряет частица и приобретает электрон в атоме вещества.

Учтем взаимодействие со всеми электронами на расстоянии b . Для этого запишем объем цилиндрического слоя радиуса b , толщиной db и высотой dx :

$V = 2\pi \cdot b \, db \, dx$. Число электронов в объеме V равно

$V \cdot n_e = 2\pi \cdot b \cdot n_e \, db \, dx$ (n_e – плотность электронов).

Тогда общие потери энергии частицей:

$$dE = \Delta E \cdot V \cdot n_e = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \frac{db}{b} dx$$

и на единице длины после интегрирования

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{dE}{dx}(b) db = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

Оценка логарифмического множителя приводит к выражению для ионизационных потерь – формула Бора:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \ln \frac{m_e v^2}{\bar{J}(1 - \beta^2)}$$

Выражая скорость через энергию и массу частицы:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e Z^2 e^4 M_\mu}{E_\mu m_e} \cdot \ln \frac{2m_e E}{\bar{J}M}$$

Выводы из формулы Бора:

- Число n_e пропорционально плотности вещества

$n_e = Z \cdot \rho \cdot N_a / A$. Поэтому $-dE/dx \sim \rho$, а величина

$-dE/d(\rho \cdot x)$ примерно одинакова для всех веществ.

- Величину (ρx) , имеющую размерность г/см²,

принимают за единицу длины и в этих единицах

рассчитывается толщина защиты от радиации.

- Зависимость $-dE/dx \sim 1/v^2$ свидетельствует, что чем ниже скорость частицы, тем выше потери. Поэтому треки частиц в камере Вильсона или в фотоэмульсии резко утолщаются в конце пути.

- При одной и той же энергии при нерелятивистских скоростях потери пропорциональны массе частицы. Поэтому треки у тяжелых частиц жирнее и короче.

Многokrратно заряженные частицы сильнее тормозятся в веществе.

Формула Бора не применима при очень малых и очень больших энергиях налетающих частиц.

Пробег R частицы в веществе зависит от энергии, массы и заряда частицы:

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{-dE/dx} \approx \frac{M}{Z^2} v^4$$

3. Прохождение легких заряженных частиц через вещество.

Механизм ионизационных потерь для электронов в общем такой же, как и для других заряженных частиц. Отличие в малости массы электрона, что приводит к большому изменению импульса электрона в каждом столкновении, изменения первоначального направления движения. С учетом всех поправок для ионизационных потерь электронов получены выражения:

а –релят.:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi n_e e^4}{m_e v^2} \cdot \left(\ln \frac{m_e v^2 E}{2\bar{J}^2 (1 - \beta^2)} - (2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + C \right)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi n_e e^4}{m_e v^2} \cdot \ln \frac{m_e v^2}{2\bar{J}} - \text{для нерел. энергий}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi n_e e^4}{m_e v^2} \cdot \left(\ln \frac{E^2}{2\bar{J} \sqrt{1-\beta^2}} + \frac{1}{8} \right) - \text{для ультрарел.}$$

при $E \gg m_e c^2 = 0.5 \text{ МэВ}$

Выводы:

-При одной и той же скорости потери примерно одинаковы для однократно заряженных частиц любых масс для релятивистских энергий (например: p, e).

-В нерелятивистском случае потери пропорциональны массе частицы и для протона они в 2000 раз больше чем для электрона той же энергии. В ультрарелятивистском пределе ионизационные потери слабо зависят и от энергий и от масс частиц. Поэтому эти частицы трудно отличить по толщине треков.

Заряженная частица, движущая с ускорением, излучает электромагнитные волны. Поэтому электроны при столкновениях с атомами (ядрами) вещества излучают. Это излучение называют тормозным. Потери энергии на тормозное излучение называются радиационными.

Интенсивность тормозного излучения для частицы с ускорением v' в нерелятивистском некантовом случае определяется соотношением:

$$W = \frac{2}{3} \cdot \frac{e^2 z^2}{c^3} |\ddot{\chi}|^2 \approx \frac{z^2}{m^2}$$

Релятивистский квантовый расчет приводит к следующей формуле для радиационных потерь:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{t_r} \text{ где } t_r \text{ — радиационная длина,}$$

$$\text{отсюда } E = E_0 \exp(-x/t_r)$$

С увеличением энергии электронов радиационные потери становятся преобладающими при $E_{кр}$. Для оценки критической энергии получено соотношение:

$$\frac{(-dE/dx)_{рад}}{(-dE/dx)_{иониз}} \approx \frac{ZE(MэВ)}{800} \quad E_{кр} = \frac{800}{Z}$$

$$E_{кр}({}_{6}^{12}C) = \frac{800}{6} = 133 MэВ$$

4. Прохождение γ - квантов через вещество.

К γ - квантам относят электромагнитные волны, длина которых, λ_γ , значительно меньше межатомных расстояний $d = 10^{-8}$ см: $\lambda_\gamma \ll d$.

Энергия γ - квантов может принимать значение в пределах: $10 \text{ кэВ} < E_\gamma < 1000 \text{ ГэВ}$

Поскольку γ - кванты имеют нулевую массу покоя, то скорость их должна равняться скорости света.

Поэтому, при взаимодействии с веществом γ - кванты или поглощаются, или рассеиваются на большие углы и их интенсивность

понижается:
$$dJ = - \mu J_0 dx$$

**здесь J, J_0 – число частиц, проходящих через 1 см^2 в 1 сек. и начальная интенсивность, соответственно; μ - коэффициент поглощения;
 μ / ρ - массовый коэффициент поглощения или
толщина слоя вещества, измеряется в единицах
 $\text{г} / \text{см}^2$.**

Если коэффициент поглощения разделить на число поглощающих центров, то получим полное сечение рассеяния данного процесса:

$\mu_i = n_i \sigma_i$, а полный коэффициент поглощения будет равен: $\mu = \sum \mu_i$

Поглощение γ - квантов веществом происходит за счет трех процессов: фотоэффекта, комpton-эффекта и рождения электронно-позитронных пар в кулоновском поле ядра.

Фотоэффект.

Фотоэффектом называется процесс поглощения γ - кванта атомом с испусканием электрона.

Поскольку свободный электрон не может поглотить γ - квант (вследствии нарушения законов сохранения энергии и импульса), то вероятность поглощения будет максимальна при $E_\gamma \sim E_{св}$ для электронов. Таким образом, на зависимости эффективного сечения ионизации σ_Φ от E_γ будут наблюдаться резкие пики при E_γ равных потенциалу ионизации оболочек К, L, M и т. Д. ...

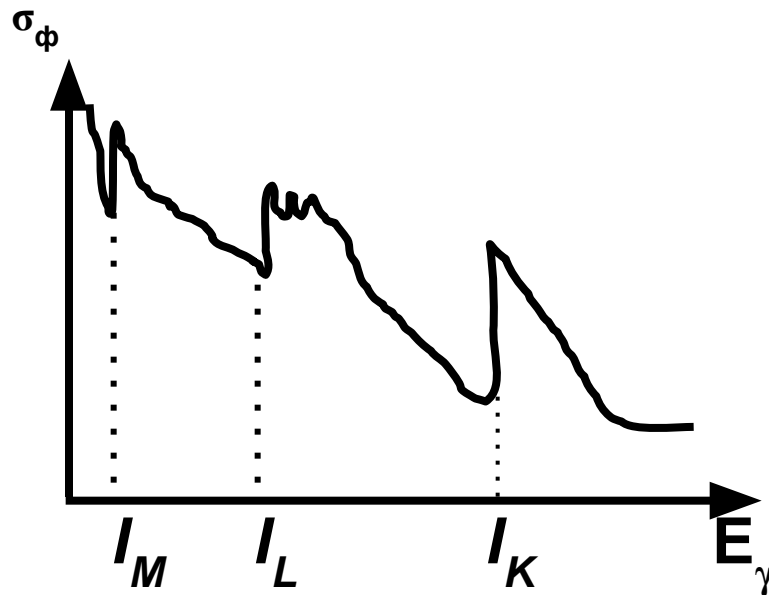


Рис . Зависимость сечения ионизации от энергии энергии γ - кванта.

Сечение фотоионизации $\sigma_{\text{ф}} \sim Z^5$, т.е. сильно зависит от атомного номера вещества; растет при переходе к тяжелым элементам; является преобладающим механизмом поглощения при низких энергиях γ -квантов:

$$\sigma_{\text{ф}} \approx 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 \text{ при } E_{\gamma} = 1 \text{ КэВ};$$

$$\sigma_{\text{ф}} \approx 6 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2 \text{ при } E_{\gamma} = 0.1 \text{ МэВ}.$$

$$\sigma_0 = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2$$

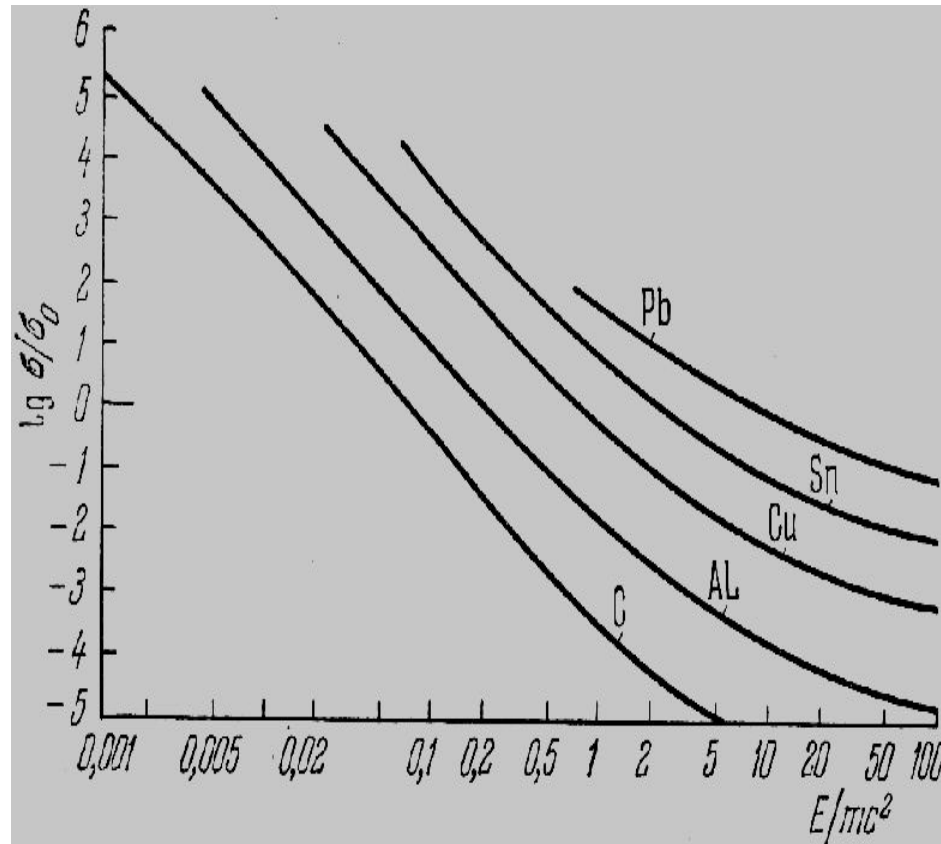


Рис . Зависимость эффективных сечений фотоэффекта для разных элементов от энергии γ - кванта (в единицах $m_e c^2$).

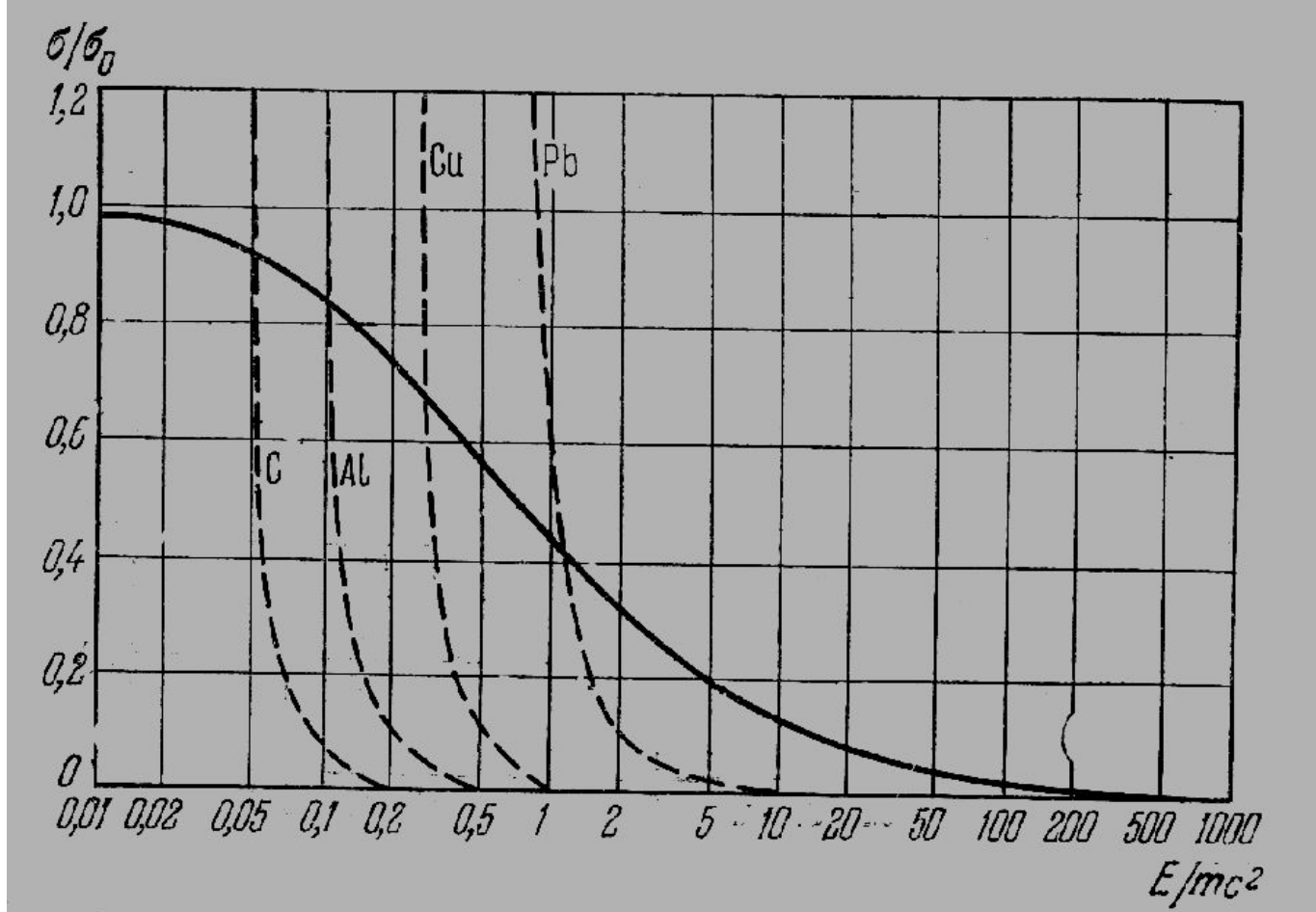
Комптон – эффект.

С увеличением энергии γ -кванта электроны в атоме можно считать свободными и взаимодействие принимает характер рассеяния. При этом наблюдается рассеянное излучение с большей длиной волны. Изменение длины волны γ -кванта равно:

$$\Delta\lambda = h / m_e c (1 - \cos\Theta) = \Lambda_k (1 - \cos\Theta),$$

где Θ - угол рассеяния, Λ_k – Комптоновская длина волны электрона:

$$\Lambda_k = h / m_e c = 2.42 \cdot 10^{-10} \text{ см } (0.024\text{\AA})$$



Полные сечения комптон-эффекта (спл. линия) и фотоэффекта для разных элементов от энергии γ - кванта (в единицах $m_e c^2$).

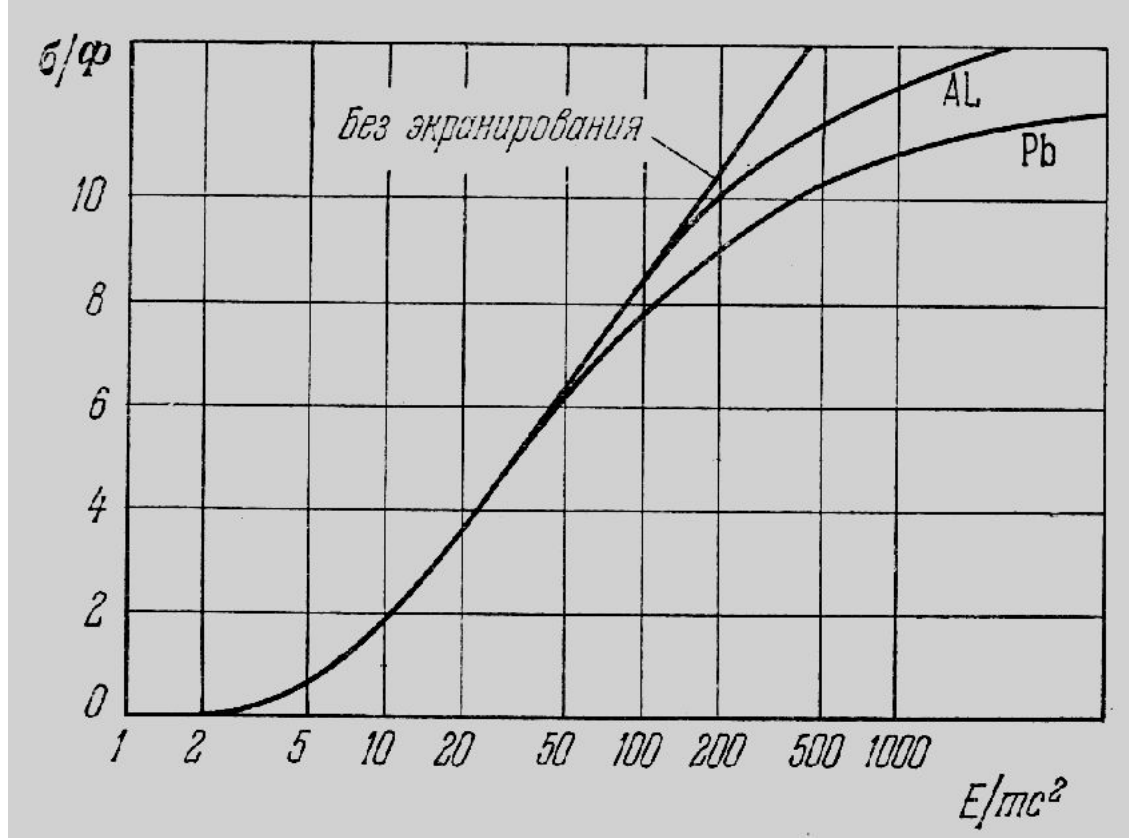
В поле ядра возможен процесс образования электрон-позитронных пар. При высоких E_γ пороговая энергия образования равна

$$E_0 \approx 2m_{\text{я}}c^2 = 1.02\text{Мэв}$$

При образовании электрон-позитронных пар в кулоновском поле электрона пороговая энергия γ - кванта повышается до:

$$E_0 \approx 2m_e c^2 = 2.04\text{Мэв}$$

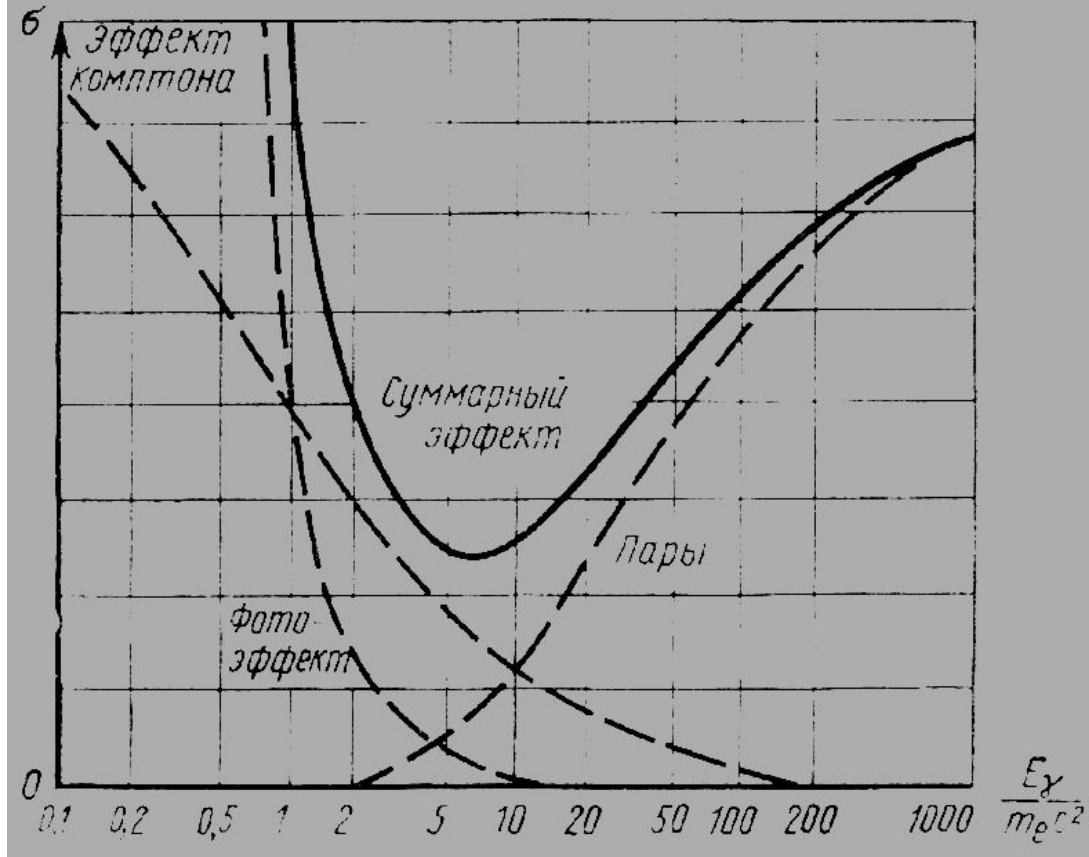
$\sigma \equiv \sigma$
0



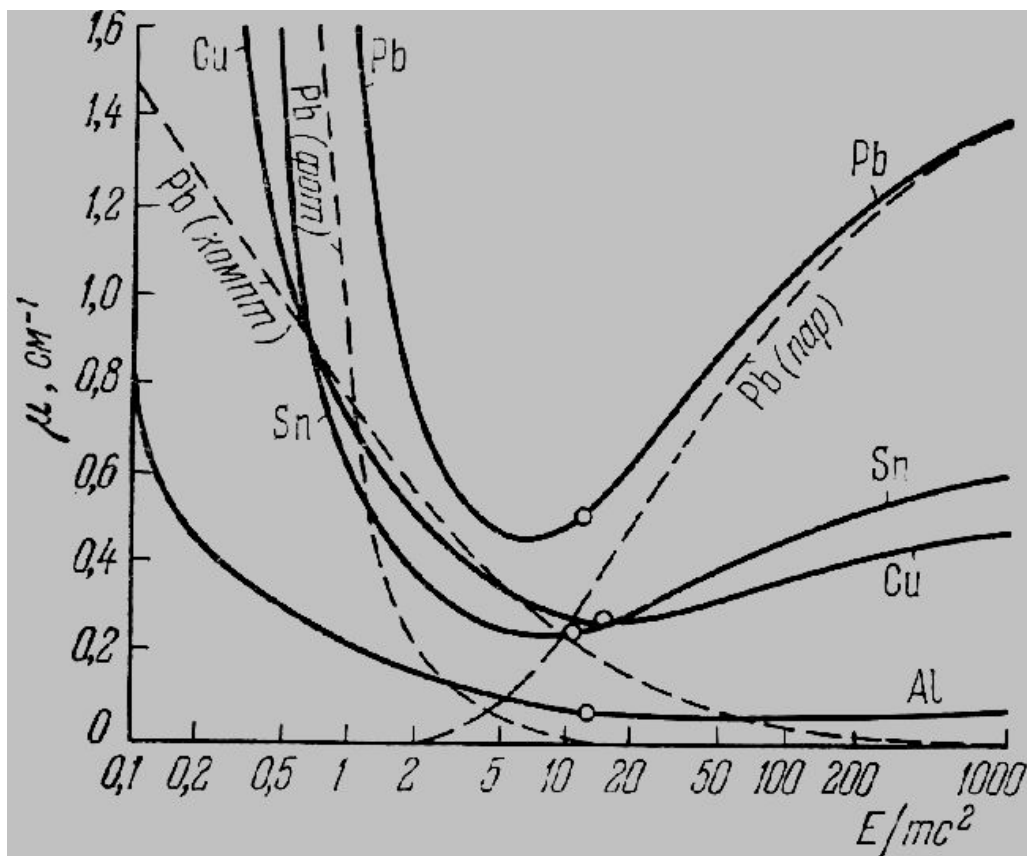
Зависимость эффективного сечения рождения электрон-позитронных пар на свинце и алюминии от энергии γ - кванта (в единицах $m_e c^2$).

В итоге, для γ - квантов, необходимо учитывать все три процесса взаимодействия со средой: фотоэффект, эффект Комтона и процесс образования электрон-позитронных пар:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_{\text{фот}} + \sigma_{\text{компт.}} + \sigma_{\text{пар}} \approx \\ &\approx Z^5 / E_{\gamma}^{7/2} + Z / E_{\gamma} + Z^2 \ln 2 E_{\gamma}\end{aligned}$$



Зависимость сечения поглощения для свинца от энергии γ -кванта (в единицах $m_e c^2$).

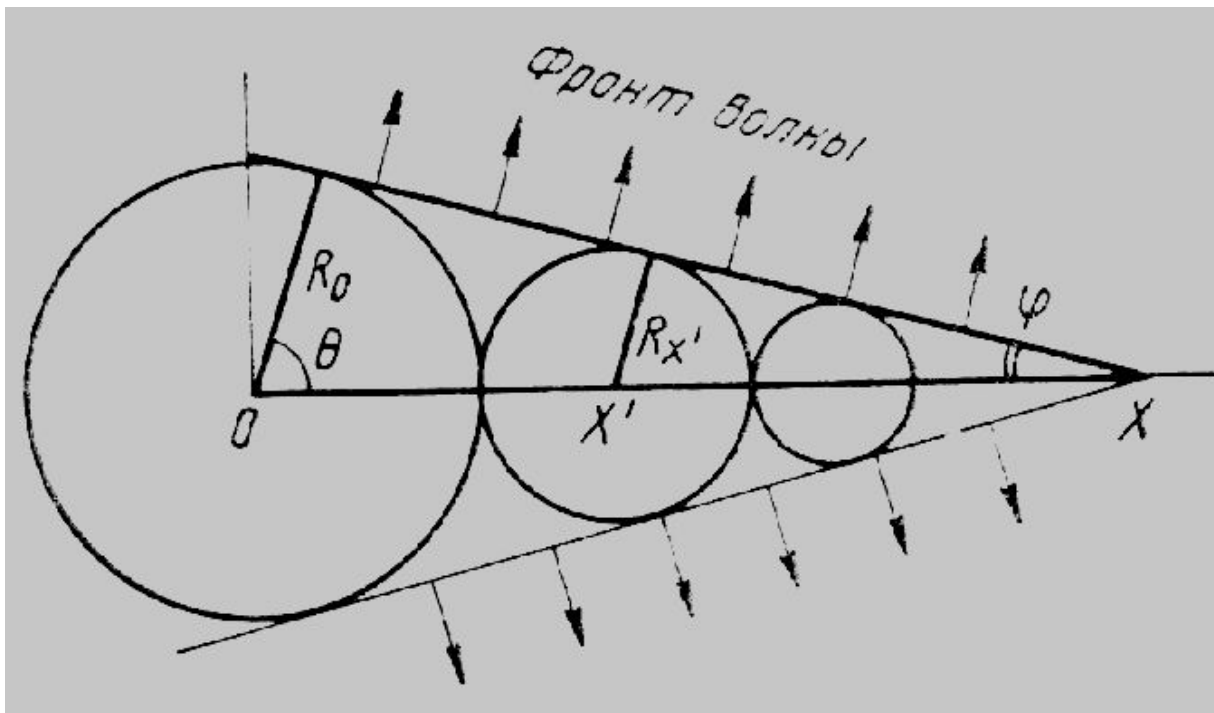


Зависимость коэффициента поглощения от энергии γ -кванта (в единицах $m_e c^2$) для разных элементов.

5. Другие механизмы взаимодействия излучения с веществом.

Эффект Черенкова. 1958 г. – Нобелевская премия, П. Черенков, И. Франк, И. Тамм.

Скорость света в среде определяется формулой: $v = c' = c/n$. Так как $n > 1$, то частица может двигаться быстрее скорости света в среде. Такая сверхсветовая частица, если она заряжена, будет излучать свет даже при неускоренном движении.



Фронт волны черенковского излучения является огибающей сферических волн испущенных частицей. При $v = c' < c/n$ черенковское излучение отсутствует. Угол испускания черенковского излучения Θ равен: $\cos\Theta = R_0 / X = c/nv$, что позволяет определить скорость частицы. Черенковские счетчики.