

4.2 Поглощение гамма-излучения.

Найдем закон ослабления параллельного моноэнергетического пучка γ - квантов в плоской мишени. Пусть на поверхность плоской мишени перпендикулярно к ней падает поток γ - квантов I_0 . Ослабление пучка в веществе вызывается поглощением и рассеянием γ - квантов. Рассеянный γ - квант теряет часть своей энергии при столкновении с электронами и меняет направление своего распространения. На расстоянии x от внешней поверхности поток γ - квантов ослабляется до величины $I(x)$. В тонком слое мишени толщиной dx из потока уводится dI γ - квантов. Величина dI пропорциональна потоку $I(x)$ на поверхности слоя и толщине слоя dx :

$$dI = -\mu \cdot I dx \quad (49)$$

Знак минус в правой части уравнения показывает, что в слое поток уменьшается на dI γ - квантов. Перепишем уравнение в виде:

$$\mu = -\frac{dI}{I dx} \quad (50)$$

Коэффициент пропорциональности μ называют **полным линейным коэффициентом ослабления**. Он имеет размерность см^{-1} и численно равен доле моноэнергетических γ - квантов, выбывающих из параллельного пучка на единице пути излучения в веществе. Полный линейный коэффициент ослабления зависит от плотности, порядкового номера вещества, а также от энергии γ - квантов:

$$\mu = \mu(\rho, z, E_\gamma)$$

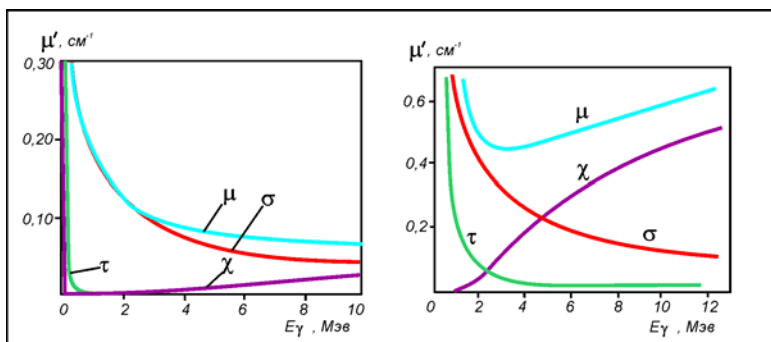
Умножим левую и правую части последнего уравнения на dx , а затем проинтегрируем его в пределах от 0 до x :

$$\ln \frac{I(x)}{I_0} = -\mu x \quad (51)$$

После потенцирования получим закон ослабления параллельного моноэнергетического пучка γ - квантов в веществе:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (52)$$

Описывающий ослабление интенсивности (I) падающего пучка фотонов в зависимости от толщины слоя вещества. Здесь $\mu = \tau + \varepsilon + \chi$ и τ - линейный коэффициент ослабления в случае фотоэффекта, ε - линейный коэффициент ослабления для комптон-эффекта, χ - линейный коэффициент ослабления в случае эффекта образования пар.



Численные значения τ , σ и χ табулированы: величину μ_γ иногда называют полным коэффициентом ослабления γ -излучения.

Рис.16. Зависимость коэффициента ослабления γ – излучения для алюминия (слева) и свинца (справа) от энергии γ – лучей.

Линейный коэффициент фотопоглощения можно записать в виде:

$$\tau = \tau_e + \tau_s, \quad (53)$$

где τ_e - характеризует часть коэффициента поглощения, приводящую к преобразованию первичной энергии фотона в кинетическую энергию электрона. τ_s - характеризует преобразование энергии первичных фотонов в энергию характеристического излучения.

Линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения пропорционален отношению:

$$\tau = Z^5 / E_\gamma^{3.5} \quad (54)$$

Величина τ резко уменьшается с ростом энергии и при $E_\gamma > 10$ МэВ фотоэлектроны практически не образуются.

В случае эффекта Комптона, часть энергии γ -кванта преобразуется в кинетическую энергию электронов отдачи, а часть энергии уносит рассеянный фотон. Аналогично фотоэффекту линейный коэффициент комптоновского взаимодействия можно представить в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_s \quad (55)$$

где ε_e и ε_s имеют тот же смысл, что τ_e и τ_s в случае фотоэффекта.

Вероятность рассеяния γ -квантов в случае эффекта Комптона зависит от плотности атомных

электронов $n_e = Z$. Линейный коэффициент комптоновского рассеяния $\epsilon = Z/E_\gamma$. Поэтому с увеличением энергии число рассеянных γ -квантов уменьшается.

В случае тяжелых ядер комптон-эффект начинает преобладать над фотоэффектом в области энергий $E_\gamma > \text{МэВ}$. Комптон-эффект слабее зависит от энергии E_γ по сравнению с фотоэффектом. Поэтому им можно пренебречь лишь в области энергий $E_\gamma > 10 \text{МэВ}$, где становится существенным эффект образования электрон-позитронных пар. В случае эффекта образования электрон-позитронных пар энергия первичного фотона преобразуется в кинетическую энергию электрона и позитрона и в энергию аннигиляционного излучения.

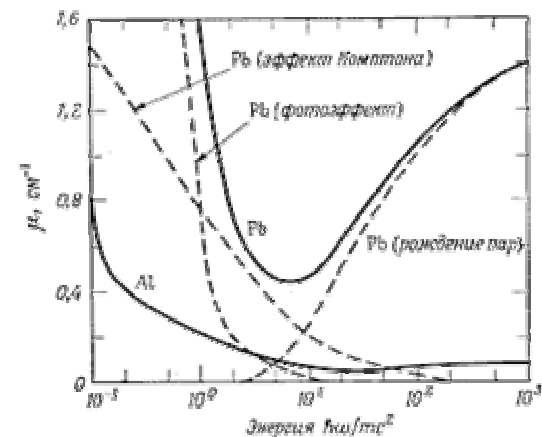


Рис. 17. Зависимость линейных коэффициентов ослабления γ -квантов от их энергии для свинца (для сравнения дана суммарная кривая алюминия – практически полное отсутствие эффекта образования пар).

Если через χ обозначить линейный коэффициент эффекта образования пар, то часть коэффициента χ_e , характеризующая преобразование энергии первичного фотона в кинетическую энергию электрона и позитрона, определяется соотношением:

$$\chi_e = (E_\gamma - 1.022) \chi / E_\gamma. \quad (56)$$

Линейный коэффициент эффекта образования пар $\chi = Z^2 \ln E_\gamma$.

В области энергий $E_\gamma > 10 \text{МэВ}$ основную роль в ослаблении пучка γ -квантов играет эффект образования пар. Таким образом, во всех трех процессах взаимодействия первичного фотона с веществом часть энергии преобразуется в кинетические энергии электронов и позитронов, а часть - в энергию вторичного фотонного излучения. В случае фотонов нельзя указать определённую длину пробега, но можно указать среднее расстояние, проходимое фотоном в веществе до взаимодействия. Это среднее расстояние называется средней длиной свободного пробега и равно $1/\mu$.

Проникающую способность γ -лучей характеризуют толщиной слоя половинного ослабления $d_{1/2}$ или связанной с ней величиной коэффициента ослабления: $d_{1/2} = 0,693/\mu$.

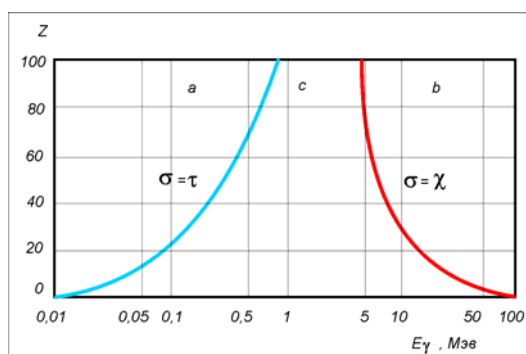


Рис.18 Относительная роль трех эффектов поглощения фотонов: а – область преобладания фотоэлектрического эффекта; б – область преобладания комптоновского эффекта; в – область преобладания эффекта образования пар.

На **Рис.17** показана зависимость линейных коэффициентов ослабления γ -квантов от их энергии для свинца и алюминия.

Величина μ зависит от плотности ρ , заряда ядер вещества Z и

энергии γ -квантов E_γ :

$$\mu = \mu(\rho, Z, E_\gamma). \quad (57)$$

Можно ввести массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \mu/\rho$.

Вещества с **одинаковыми** эффективными порядковыми номерами имеют **равные** массовые коэффициенты ослабления. Так, массовые коэффициенты ослабления воды, кислорода, азота, воздуха, углерода и живой ткани мало отличаются друг от друга, так как их эффективные порядковые номера близки по величине.

После замены $\mu = \mu_m \cdot \rho$ закон ослабления переписывается в виде:

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \mu_x), \quad (58)$$

где $\mu_x = \rho \cdot x$ - масса в граммах, расположения на 1см^2 мишени в слое толщиной x .

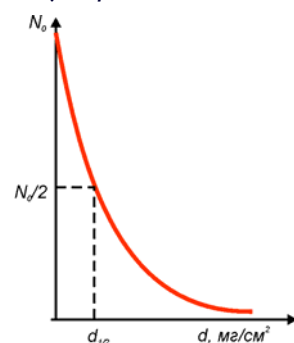
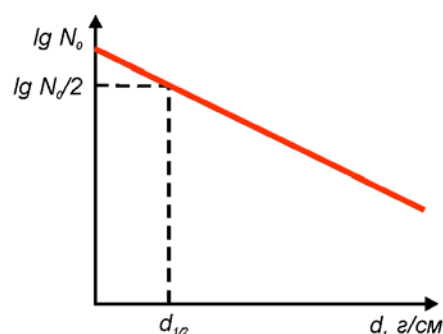


Рис.19. Кривая ослабления γ -излучения в веществе (обычный масштаб).

Рис.20. Кривая ослабления γ -излучения в веществе, построенная в полулогарифмических координатах

На **Рис. 15 и 16** показана зависимость коэффициентов τ , σ и χ от энергии γ -



излучения. С ростом энергии коэффициент τ резко уменьшается, величина коэффициента σ снижается, но медленнее, чем τ , коэффициент образования пар растет с повышением энергии, начиная с 1,02 Мэв. С ростом атомного номера вещества поглотителя фотоэффект возрастает пропорционально Z^4 , Комптон-эффект – пропорционально Z , эффект образования пар – пропорционально Z^2 . На **Рис.17** показаны области энергии γ -квантов, в которых преобладает тот или иной процесс поглощения фотонов. В точках левой кривой Комптон эффект равен фотоэффекту, в точках правой кривой Комптон эффект равен эффекту образования пар. Таким образом, фотоэлектрическое поглощение оказывается основным процессом уменьшения интенсивности γ - излучения в тяжелых элементах при малой энергии γ -квантов. При прохождении γ -лучей как низких, так и высоких энергий через легкие вещества основным видом взаимодействия будет комптоновское рассеяние. Коэффициент ослабления пар составляет значительную долю в суммарном коэффициенте ослабления для жесткого γ -излучения и тяжелых поглощающих веществ.

В свинце полный линейный коэффициент ослабления с увеличением энергии сначала уменьшается принимая минимальное значение при энергии 3 Мэв, а затем увеличивается. Такой ход кривой объясняется тем, что при низких энергиях зависимость $\mu(E_\gamma)$ обуславливается фотоэффектом и комптон- эффектом, а уже при энергиях больше 3 Мэв, в коэффициент μ основной вклад дает эффект образования пар. Свинец наиболее прозрачен для γ - квантов с энергией около 3 Мэв. Взаимодействие излучения с веществом заканчивается в одних эффектах поглощением γ - квантов (фотоэффект, образование пар), в других рассеянием (комптон - эффект).

Поэтому полный линейный коэффициент часто подразделяют на две составляющие:

$$\mu = \mu_e + \mu_s, \quad (59)$$

где $\mu_e = \tau + \chi$, $\mu_s = \varepsilon$ - линейный коэффициент рассеяния.

Коэффициент μ_e называют коэффициентом истинного поглощения или коэффициентом электронного преобразования. Он определяет долю энергии γ -излучения, переданную электронам и позитронам в слое вещества. Значения μ и μ_e в различных средах даны в **Табл. 7**. μ_s - линейный коэффициент рассеяния, он определяет долю энергии γ -излучения, преобразованную в энергию вторичного γ -излучения. Используя линейный коэффициент поглощения, легко рассчитать энергию излучения E , поглощенную в единице объема вещества. Если поток моноэнергетических γ - квантов с энергией E_γ равен Φ , то:

$$E_e = \mu_e * \Phi E_\gamma. \quad (60)$$

Если точечный источник γ -излучения находится в вакууме, то плотность потока γ -излучения I будет меняться с изменением расстояния R до источника по закону:

$$I(R) = I_0 / 4\pi R^2 \quad (61)$$

Если точечный источник γ -излучения помещен в вещество, то на ослабление плотности потока моноэнергетических γ -квантов влияет и взаимодействие с веществом и увеличение расстояния:

$$I(R) = \exp(-\mu R) I_0 / 4\pi R^2 \quad (62)$$

Это соотношение не учитывает вклад в интенсивность рассеянного излучения. Рассеянные γ -кванты после многократных столкновений с электронами могут выйти из вещества. В точку А, расположенную после защитного слоя, попадают как первичные, так и рассеянные γ -кванты. Тогда приведенное соотношение будет иметь вид:

$$I(R) = \exp(-\mu R) B I_0 / R^2 \quad (63)$$

Величина B называется фактором накопления. Она обычно измеряется экспериментально.

Пути пробега гамма – квантов и нейтронов в воздухе измеряются сотнями метров, в твердом веществе – десятками сантиметров и даже метрами. Проникающая способность гамма – излучения увеличивается с ростом энергии гамма – квантов и уменьшается с увеличением плотности вещества – поглотителя. В **Табл.6** приведены в качестве примера значения толщины слоев воды, бетона и свинца, ослабляющих потоки гамма – излучения различной энергии в десять раз.

Табл. 6. Толщина слоя половинного поглощения гамма-излучения разными материалами

Энергия гамма – квантов, МэВ	Толщина слоя вещества, ослабляющего поток γ – излучения в 10, см		
	Вода	Бетон	Свинец
0,5	24	12	1,3
5,0	76	36	4,7

Табл. 7. Линейные коэффициенты передачи μ_k и линейные коэффициенты ослабления μ , в различных средах, см^{-1}

Энергия γ - квантов МэВ	Вода		Алюминий		Свинец	
	μ_k	μ	μ_k	μ	μ_k	μ
0.1	0.0253	0.171	0.1002	0.444	24.494	60.0
0.2	0.0299	0.137	0.0742	0.323	6.645	11.8
0.5	0.0330	0.097	0.0775	0.228	1.022	1.72
1.0	0.0310	0.0706	0.0726	0.166	0.435	0.79
2.0	0.0260	0.0493	0.0613	0.117	0.218	0.51
5.0	0.0189	0.0302	0.0486	0.075	0.308	0.49
10.0	0.0154	0.0221	0.0451	0.062	0.372	0.60

Величина μ зависит от плотности ρ , заряда ядер вещества Z и энергии γ -квантов E_γ :