

Измерение коэффициента ослабления потока γ -лучей в веществе и определение их энергии

Васильев Денис
ФИБТ МФТИ

(Дата: 22 февраля 2018 г.)

Цель: с помощью сцинтилляционного счетчика измерить линейные коэффициенты ослабления потока γ -лучей в свинце, железе и алюминии; по их величине определить энергию γ -квантов

Оборудование: свинцовый коллиматор, источник γ -лучей, набор поглотителей, сцинтиллятор, формирователь-выпрямитель

I. ВВЕДЕНИЕ

A. Возникновение γ -лучей

Гамма-лучи возникают при переходе возбужденных ядер из одного энергетического состояния в другое, более низкое. Энергия γ -квантов обычно заключена между несколькими десятками килоэлектрон-вольт и несколькими миллионами электрон-вольт. Гамма-кванты не несут электрического заряда, их масса равна нулю. Проходя через вещество, пучок γ -квантов постепенно ослабляется. Ослабление происходит по экспоненциальному закону, который может быть записан как:

$$I = I_0 e^{-\mu l}$$

; или

$$I = I_0 e^{-\mu' m_1}$$

. В этих формулах I, I_0 – интенсивности прошедшего и падающего излучений, l – длина пути, пройденного пучком γ -лучей, m_1 – масса пройденного вещества, приходящаяся на единицу площади, μ, μ' – константы, величина которых зависит от вещества, сквозь которое проходят гамма-лучи. Ослабление потока гамма-лучей, происходящее при прохождении среды, связано с тремя эффектами: фотоэлектрическим поглощением, комптоновским рассеянием и с генерацией электрон-позитронных пар. Рассмотрим эти эффекты.

B. Фотоэлектрическое поглощение

При столкновении γ -квантов с электронами внутренних атомных оболочек может происходить поглощение квантов. Энергия γ -кванта передается соответствующему электрону, а импульс делится между этим электроном и оставшимся после его вылета ионом. Свободный электрон не может поглотить γ -квант, так как при этом невозможно одновременно удовлетворять законам сохранения энергии и импульса. Наружные электроны не принимают участия в фотоэлектрическом поглощении, потому что они слабо связаны в

атоме, так что их практически можно считать свободными. Вероятность dP фотоэлектрического поглощения γ -квантов пропорциональна длине пути dl и плотности электронов в среде:

$$dP_f = \sigma n_1 dl$$

, где n_1 – плотность внутренних электронов, а σ – поперечное сечение фотоэлектрического поглощения. Поперечное сечение характеризует вероятность фотоэффекта, рассчитанную на один электрон. Нетрудно найти связь между коэффициентом поглощения для фотоэффекта μ_f :

$$\mu_f = \sigma n_1$$

Пусть в результате фотоэффекта энергия γ -кванта передается электрону, находящемуся на i -й оболочке атома. Обозначим через W_i энергию связи этого электрона. После вылета атома электрон приобретает кинетическую энергию

$$T_i = \hbar\omega - W_i$$

Освободившееся после вылета электрона место заполняется затем одним из электронов с вышележащих оболочек. При таких переходах возникает характеристическое рентгеновское излучение. Вероятность фотоэффекта сложным образом зависит от энергии γ -лучей и от заряда ядер. Для оценок можно пользоваться формулой

$$\sigma \sim \frac{Z^5}{(\hbar\omega)^{\frac{7}{2}}}$$

, правильно передающей основные черты явления. Из этой формулы видно, что вероятность фотоэффекта быстро возрастает при переходе от легких к тяжелым элементам и резко падает с увеличением энергии γ -квантов.

C. Комптоновское рассеяние

Комптоновским рассеянием называется упругое столкновение γ -кванта с электроном. При таком столкновении γ -квант передает электрону часть своей

энергии, величина которой определяется углом рассеяния. В отличие от фотоэффекта, который может идти только на сильно связанных электронах, комптоновское рассеяние происходит на свободных или слабосвязанных электронах. Роль эффекта Комптона становится существенной только тогда, когда энергия квантов становится много больше энергии связи электронов в атоме. Атомные электроны в этом случае можно считать практически свободными, что обычно и делается при теоретическом анализе. Вероятность комптон-эффекта сложным образом зависит от энергии γ -квантов. В том случае, когда энергия γ -кванта много больше энергии покоя электрона, формула сильно упрощается, и выражение для сечения комптон-эффекта приобретает простой вид:

$$\sigma_k = \pi r^2 \frac{mc^2}{\hbar\omega} \left(\ln \frac{2\hbar\omega}{mc^2} + \frac{1}{2} \right)$$

, где r – классический радиус электрона, а m – его масса. Из этой формулы следует, что сечение комптон-эффекта с ростом энергии фотонов падает далеко не так резко, как сечение фотоэффекта. Сечение σ_k относится к одному свободному электрону, в то время как приведенное выше сечение фотоэффекта рассчитано на атом. Комптоновское рассеяние, отнесенное к атому, оказывается, естественно, в Z раз больше. Комптоновский коэффициент линейного ослабления μ_k связан с сечением σ_k формулой, аналогичной формуле для фотоэффекта. Отметим в заключение, что, в отличие от фотоэффекта, эффект Комптона приводит не к поглощению γ -квантов, а к их рассеянию и уменьшению их энергии.

D. Образование пар

При энергиях γ -лучей, превышающих $2mc^2 = 1,02\text{МэВ}$, становится возможен процесс поглощения γ -лучей, связанный с образованием электрон-позитронных пар. Рождение пар не может происходить в вакууме, оно возникает в электрическом поле ядер. Вероятность этого процесса приблизительно пропорциональна Z^2 и сложным образом зависит от энергии фотона. При энергиях больше $2mc^2$ фотоэффект даже для самых тяжелых ядер уже не играет практически никакой роли. Вероятность образования пар должна поэтому сравниваться с вероятностью комптоновского рассеяния. При энергиях, с которыми приходится иметь дело при изучении ядер, рождение пар существенно только в самых тяжелых элементах. Так, даже для свинца вероятность рождения пар сравнивается с вероятностью комптоновского эффекта только при энергии $4,7\text{МэВ}$.

E. Полный коэффициент ослабления потока γ -лучей

Полный линейный коэффициент μ ослабления пучка γ -квантов при прохождении через вещество равен сумме коэффициентов для всех трех рассмотренных процессов. На рис.2 изображены графики μ для различных материалов. Рассмотрим опыты, поставленные в хорошей геометрии, т.е. в условиях, когда исследуется прохождение сквозь вещество узкого параллельного пучка γ -лучей. В этом случае не только фотоэлектрическое поглощение и генерация пар, но и комптоновское рассеяние выводит γ -кванты из пучка. Поэтому при прохождении через вещество меняется только количество, но не энергия γ -квантов в пучке, так что коэффициент μ , характеризующий поглощение γ -квантов в веществе, не зависит от длины пути. Обозначим через $-dN$ число γ -квантов, выбывших из пучка на пути dl . Это число пропорционально имеющемуся их числу N и пройденному пути dl . Имеем, следовательно,

$$-dN = \mu N dl$$

. Интегрируя это уравнение, получим

$$N = N_0 e^{-\mu l}$$

. Откуда окончательно получим:

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N}$$

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки, используемой в работе, показана на рис.1. Свинцовый коллиматор выделяет узкий почти параллельный пучок γ -квантов, проходящий через набор поглотителей П и регистрируемый сцинтилляционным счетчиком. Сигналы от счетчика усиливаются и регистрируются пересчетным прибором ПП. Высоковольтный выпрямитель ВВ обеспечивает питание сцинтилляционного счетчика. При недостаточно хорошей геометрии в результаты могут вкратиться существенные погрешности. В реальных установках всегда имеется конечная вероятность того, что γ -квант провзаимодействует в поглотителе несколько раз до того, как попадет в детектор. Чтобы уменьшить число таких случаев, в данной работе сцинтилляционный счетчик расположен на большом расстоянии от источника γ -квантов, а поглотители имеют небольшие размеры.

III. ИЗМЕРЕНИЯ

- 1) Сталь;
- 2) Алюминий;
- 3) Свинец;

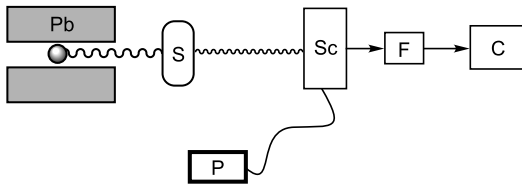


Рис. 1. Схема установки

Таблица I. Зависимость числа частиц N от толщины стальной пластинки l

N_0	1887748	1881670	1895446	1909888
N	841748	409176	199274	107876
l, cm	1,0	2,0	3,0	4,0

Таблица III. My caption

N_0	1880883	1866034	1881708	1914274
N	802605	386808	199940	102824
l, cm	0,5	1,0	1,5	2,0

Таблица II. Зависимость числа частиц N от толщины алюминиевой пластинки l

N_0	1935403	1866251	1874829	1884667
N	1064750	617680	365580	223070
l, cm	2,0	4,0	6,0	8,0