

Лабораторная работа 5.1.2

Эффект Комптона

Симанович Александр Паниман Александр
Б01-108

04.09.2023

Аннотация

В работе экспериментально подтверждена гипотеза об отрицательном сдвиге частоты при рассеянии γ -кванта на мишени (эффект Комптона). Косвенно определена энергия покоя электрона $mc^2 = (548 \pm ..)$ кэВ.

Теоретическое введение

Модели комптоновского и рэлеевского рассеяний

При изучении рассеянного γ -излучения в его составе кроме основной частоты ω_0 можно обнаружить излучение со смещенной (уменьшенной) частотой. Данный эффект называется эффектом Комптона.

Его обоснование можно дать, считая γ -излучение потоком квантов.

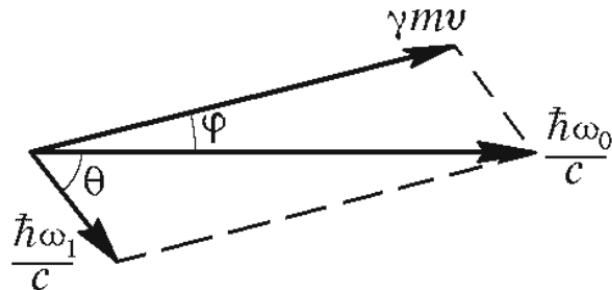


Рис. 1: Векторная диаграмма рассеяния γ -кванта на электроне

Рассмотрим модель комптоновского рассеяния – упругого соударения фотона и свободного электрона. Пользуясь векторной диаграммой и считая электрон покоящимся ($E_0 = mc^2$) получим следующие соотношения:

$$mc^2 + \hbar\omega_0 = \alpha mc^2 + \hbar\omega_1,$$

$$\frac{\hbar\omega_0}{c} = \alpha mv \cos \varphi + \frac{\hbar\omega_1}{c} \cos \theta,$$

$$\alpha mv \sin \varphi = \frac{\hbar\omega_1}{c} \sin \theta.$$

Из данной системы получаем выражение для смещения длины волны:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_1 = \Lambda_K(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

где λ_0 – начальная длина волны, λ_1 – смещенная длина волны,

$$\Lambda_K = \frac{h}{mc} = 2.42 \text{ пкм},$$

комптоновская длина волны электрона.

Обратим внимание, что смещение не зависит от вещества рассеивателя и энергии рассеиваемого кванта. Условием применимости данной модели является $E \gg E_{\text{связи}}$, где E – энергия фотонов, $E_{\text{связи}} \approx (0.1 \div 10)$ кэВ – энергия связи электрона в атоме.

При рассеянии на связанном электроне имеет место классическое рэлеевское рассеяние. Оно описывается моделью упругого рассеяния на всем атome. Условие применимости: $E_{\text{связи}} \gg E$.

Влияние вещества рассеивателя и энергии фотонов

Сечения рассеяния зависят от атомного номера Z .

Сечение рэлеевского рассеяния растет как $\sigma_p \sim Z^2$, поскольку электроны под действием фотона колеблются синфазно, складываются их амплитуды. В случае комптоновского электрона свободны и независимы, складываются интенсивности, поэтому $\sigma_k \sim Z$.

Также сечения рассеяния зависят от энергии фотонов. На рис. 2 изображена данная зависимость. Обратим внимание, что существует зона (~ 20 кэВ), где комптоновское и рэлеевское рассеяния имеют одинаковые сечения. В этой зоне Комптон наблюдал одновременно две компоненты: исходную и смещенную. В нашем эксперименте фотоны обладают энергией ~ 600 кэВ, поэтому мы увидим только смещенную компоненту.

Кванты, попавшие в вещество, могут быть поглощены. Для этого существует два механизма: образование электрон-позитронных пар ($600 \text{ кэВ} < E_{\text{пор}} = 2mc^2 = 1.02 \text{ МэВ}$) и фотоэффект. При фотоэффекте из атома выбивается электрон, который далее теряет энергию на возбуждение других атомов. Энергия возбуждения излучается в виде мягких фотонов.

Таким образом, при исследовании высокоэнергетических рассеянных фотонов мы изучаем комптоновское рассеяние.

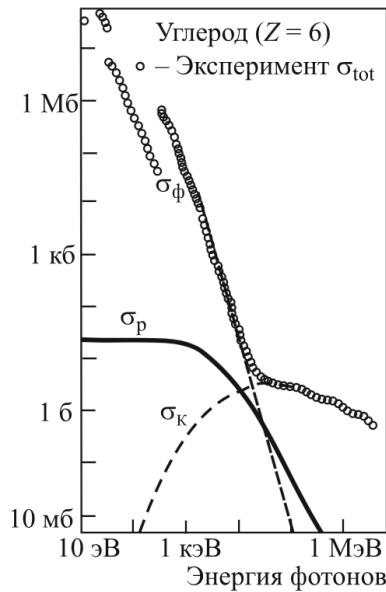


Рис. 2: Сечение взаимодействия фотонов с углеродом;
 σ_ϕ – сечение фотоэффекта,
 σ_p – сечение рэлеевского рассеяния,
 σ_k – сечение комптоновского рассеяния,
 σ_{tot} – общее сечение взаимодействия.

Методика эксперимента

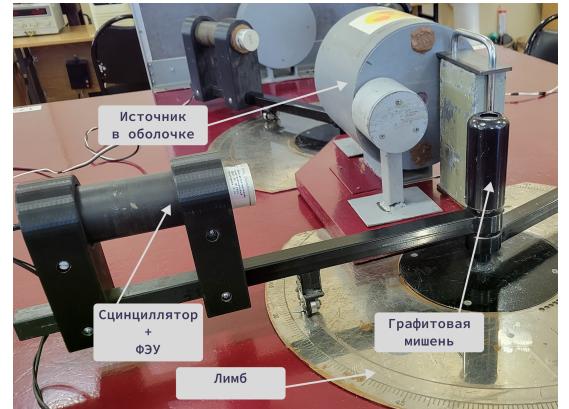
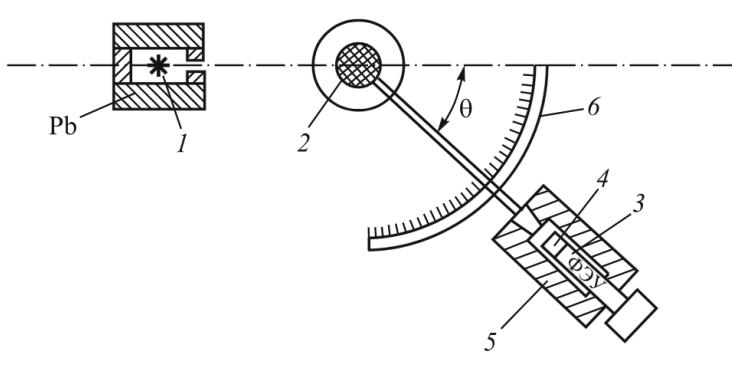


Рис. 3: Схема установки для изучения рассеяния γ -квантов

В качестве источника γ -квантов используется ^{137}Cs с энергией квантов $E = 662$ кэВ, помещенный в свинцовый контейнер с коллиматором. Излучение попадает на графитовую мишень, в которой происходит рассеяние. Рассеянное излучение улавливается сцинтилляционным детектором NaI(Tl) в паре с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Сигнал ФЭУ подается на ЭВМ с АЦП. ЭВМ получает спектр сигнала.

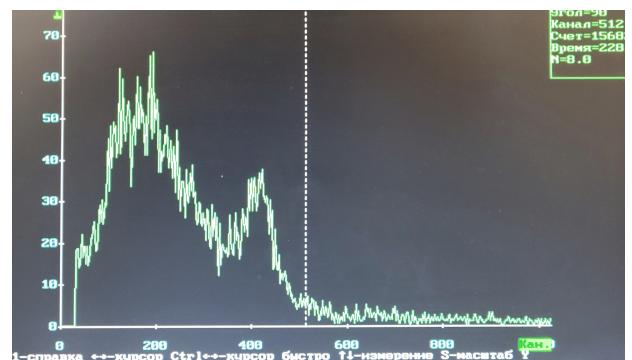
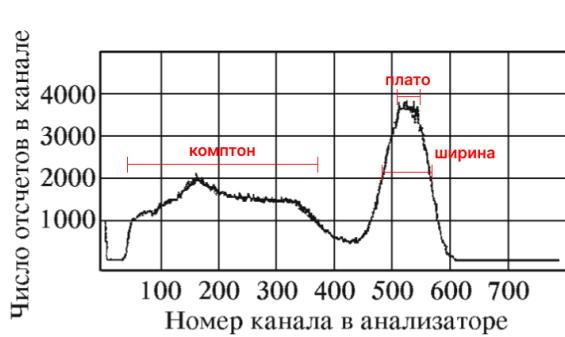


Рис. 4: Спектр, получаемый на ЭВМ

Рассеянный γ -квант порождает быстрые электроны в сцинтилляторе механизмами комптоновского рассеяния и фотоэффекта. Эти электроны возбуждают атомы в сцинтилляторе. Возбужденные атомы излучают фотоны оптического диапазона, которые улавливаются ФЭУ. При комптоновском рассеянии γ -квант передает лишь часть энергии и создает шумовую часть спектра. При фотоэффекте происходит *полное поглощение* кванта электроном, в этом случае амплитуда вспышек пропорциональна полной энергии кванта. Положение этого пика однозначно определяет энергию γ -кванта.

Для численной обработки перепишем формулу (1):

$$\frac{1}{\varepsilon(\theta)} - \frac{1}{\varepsilon_0} = 1 - \cos \theta,$$

где $\varepsilon(\theta)$ – энергия рассеянных на угол θ квантов ε_0 – энергия исходных квантов, выраженные в единицах mc^2 (m – масса электрона).

Переписывая для каналов ЭВМ в спектре:

$$\frac{1}{N(\theta)} - \frac{1}{N_0} = A(1 - \cos \theta), \quad (2)$$

где соответствующие N – номера каналов, A – коэффициент пропорциональности: $\varepsilon = AN$.

Также мы можем вычислить энергию покоя электронов, на которых происходит рассеяние:

$$mc^2 = E(0) \frac{E(90)}{E(0) - E(90)} = E_\gamma \frac{N(90)}{N(0) - N(90)}, \quad (3)$$

где $N(\theta)$ – номер канала, на котором находится пик полного поглощения для угла θ , $E_\gamma = 662$ кэВ – начальная энергия квантов.

Результаты

В соответствии с методикой, указанной выше, получаем спектры для углов в диапазоне $\theta = (0 \div 110)^\circ$. Исходя из формулы (2) по положениям фотопика строим график $\frac{1}{N} = f(1 - \cos \theta)$.

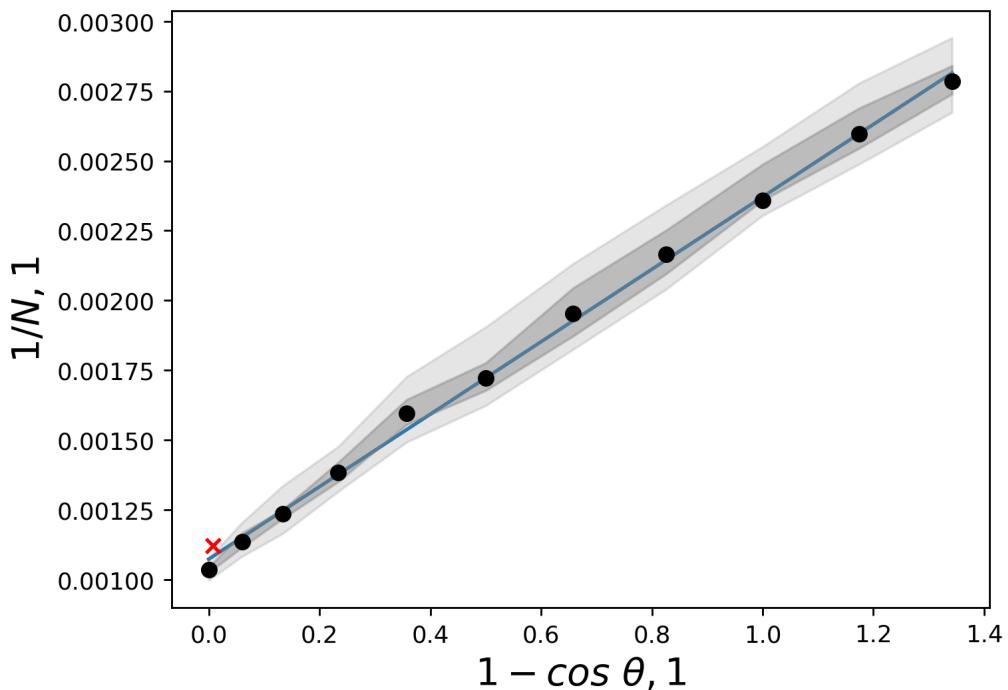


Рис. 5: Зависимость энергии рассеянного кванта от угла рассеяния

Аппроксимируя график прямой имеем: $k = 0.00130$, $b = 0.00107$.

Из аппроксимации получаем: $N(0) = 931.42$, $N(90) = 421.73$. Откуда энергия покоя электрона: $mc^2 = (547.75 \pm ..)$ кэВ.

Заключение и выводы

Данная работа подтверждает существование эффекта Комптона.

Проверена корректность зависимости (1). Получено значение энергии покоя электрона $mc^2 = (548 \pm ..)$ кэВ. Справочное значение: $mc^2 = 511$ кэВ.

Приложение 1. Измерения

$\theta, {}^\circ$	N (фотопик)	Ширина слева	Ширина справа	Плато слева	Плато справа	?
0	965	929	1002	957	975	
7	892	847	935	885	899	x
20	881	830	923	857	896	
30	809	748	858	799	820	
40	723	677	760	704	740	
50	627	579	670	608	643	
60	581	525	616	563	596	
70	512	469	548	489	534	
80	462	427	490	444	477	
90	424	392	434	402	424	
100	385	360	402	372	393	
110	359	340	374	352	365	

Таблица 1: Положение фотопика от угла рассеяния