

КОМПТОН-ЭФФЕКТ НА СВОБОДНОМ ЭЛЕКТРОНЕ

М. И. Блатов, В. А. Муромова, Т. И. Сырейщикова,

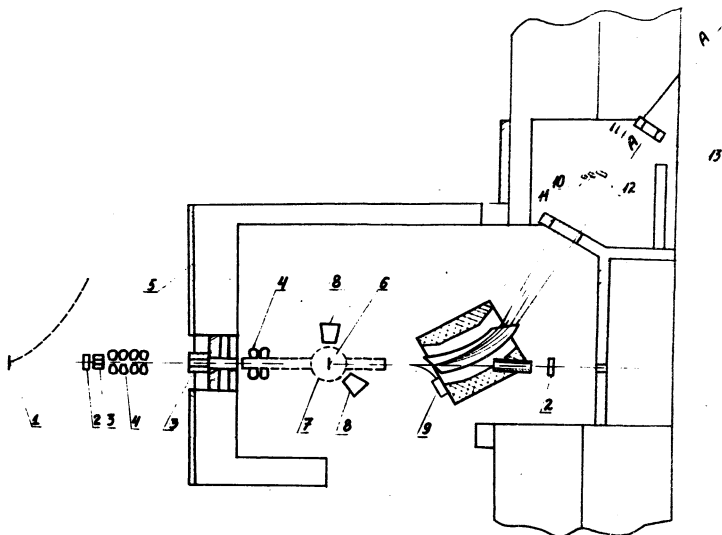
Ю. Я. Тельнов, М. Н. Якименко

Комптон-эффект на свободном электроне принадлежит к числу "чистых" электродинамических эффектов, интерпретация которых не связана с рассмотрением неэлектромагнитных взаимодействий. В выполненных к настоящему времени измерениях дифференциального сечения комптоновского рассеяния на электроне достигнута точность не лучше 10% /1/ - /7/. Полученные экспериментальные данные подтверждают лишь справедливость формулы Клейна-Нишины-Тамма, описывающей комптон-эффект на свободном электроне в самом низком порядке теории возмущений.

Описываемая работа выполнена на синхротроне ФИАН на 650 Мэв /8/, /9/. В работе изучалось дифференциальное сечение комптоновского рассеяния на свободном электроне при двух углах (45° и 90°) вылета рассеянного гамма-кванта по отношению к падающему и трех энергиях первичных гамма-квантов: 191 Мэв, 374 Мэв, 479 Мэв. Рассматриваемая в эксперименте область углов и энергий ранее не исследовалась.

Регистрировались совпадения между гамма-квантом, рассеянным на угол θ , и комптоновским электроном отдачи заданной энергии. Из кинематики процесса следует, что в условиях эксперимента практически всю энергию первичного гамма-кванта ($> 0,99\omega_0$) уносит электрон. Поэтому при регистрации энергии электрона фиксируется энергия первичного гамма-кванта. Геометрия эксперимента приведена на рис. 1. Пучок гамма-квантов проходил через систему коллиматоров, очистительных магнитов и попадал на рабочую мишень. Весь путь пучка от последних очистительных магнитов до мишени проходил внутри вакуумной камеры. Вокруг мишени вне камеры располагались два сцинтилляционных счетчика для регистрации гам-

ма-квантов, рассеянных на углы 45° и 90° . Электроны отдачи требуемой энергии отбирались магнитным спектрометром /10/ и регистрировались сцинтилляционным счетчиком, который регистрировал



Р и с. 1. Геометрия эксперимента: 1 - мишень синхротрона, 2 - камера монитора, 3 - коллиматоры, 4 - очистительные магниты, 5 - бетонная защита, 6 - мишень, 7 - вакуумная камера, 8 - счетчики гамма-квантов, 9 - позитронный счетчик; 10, 11, 12 - электронные счетчики.

электроны в энергетическом интервале $\pm 7\%$. Точность выделения энергетического интервала 1% . Апертурный угол магнитного спектрометра ($\leq 2 \cdot 10^{-2}$) больше суммы предельного угла вылета электронов отдачи и среднеквадратичного угла рассеяния электронов в мишени. Поэтому эффективность электронного счетчика не зависела от энергии падающего гамма-кванта и угла его рассеяния. Усредненная по всему сцинтиллятору эффективность регистрации электронов равнялась $0,90 \pm 0,02$.

Угловые размеры гамма-счетчиков в горизонтальной плоскости составляли 16° , в вертикальной 27° , что соответствовало телесному углу $\sim 0,13$ стерадиан.

Измеренная эффективность регистрации рассеянных гамма-квантов для счетчика, расположенного под углом 45° , составляла $0,660 \pm 0,024$, а для счетчика под углом 90° — $0,570 \pm 0,034$. Относительные измерения интенсивности гамма-пучка осуществлялись тонкостенными дифференциальными ионизационными камерами, расположенными за экспериментальной установкой. Абсолютная калибровка монитора осуществлялась с помощью квантометра /II/.

Основным процессом, конкурирующим с комптон-эффектом, является рождение электронно-позитронных пар. Для выделения комптон-эффекта измерения проводились на мишенях с различным атомным номером: Be, Al, Cu. Зависимость экспериментальных выходов от атомного номера элемента мишени была аппроксимирована методом наименьших квадратов выражением вида:

$$n(\theta, E) = A_1 z + B_1 z^2 = (a + 1,12B)z + Bz^2.$$

Здесь член $a z$ соответствует комптон-эффекту на электронах атома. Члены Bz^2 и $I, I_2 Bz$ соответствуют рождению электронно-позитронных пар в поле ядра и в поле атомарных электронов, соответственно /I2/.

Наряду с истинными совпадениями аппаратура регистрировала и случайные совпадения за счет одновременного фонового облучения обоих счетчиков. Основная загрузка счетчиков обусловлена процессами, происходящими в мишени, и никакая дополнительная экранировка счетчиков не позволяет уменьшить величину загрузки. Для уменьшения величины случайных совпадений использовались схемы совпадений с малым разрешающим временем ~ 5 нсек. Режим работы синхротрона позволял стабилизировать мгновенную интенсивность гамма-излучения при ее максимальной длительности, что в свою очередь стабилизировало и снижало уровень загрузки счетчика. Несмотря на все принятые меры, количество случайных совпадений превышало в 10–20 раз количество истинных совпадений. В эксперименте использовались одновременно два комплекта аппаратуры с очень близкими параметрами. Осуществлялось попеременное включение задержки 49 нсек в один из каналов схемы $e^- \gamma$ -совпадений обоих комплектов. Это позволяло измерять одновременно как полный счет совпадений $e^- \gamma$, так и только счет случайных совпадений. Величина задержки связана с периодом обращения электронов в ускорителе, то есть со временем между соседними микроимпульсами гамма-излучения.

Попеременное измерение случайных совпадений на обоих комплексах схем помогло уменьшить ошибку, обусловленную неправильным учетом случайных совпадений. Эта особенность эксперимента в свою очередь потребовала проведения регулярного контроля за соотношением между разрешающими временами обоих схем совпадения. С этой целью проводилось одновременное измерение на двух схемах заведомо случайных совпадений, что являлось одновременно и одним из способов проверки работоспособности аппаратуры.

Экспериментальные данные в каждой позиции представляли собой серии из не менее чем десяти измерений.

Непосредственно измеряемой в эксперименте величиной была скорость счета совпадений $n(\theta, E)$ гамма-кванта, рассеянного на угол θ , и электрона энергии E . Эта величина сравнивалась с результатом теоретического расчета, осуществленного на ЭМ ФИАН. При расчете сечение комптоновского рассеяния представлялось формулой Клейна-Нишины-Тамма. Предполагалось, что пучок первичных гамма-квантов параллельный, распределение интенсивности пучка по горизонтали подчиняется формуле Шиффа, а по вертикали равномерное. При сравнении теории и эксперимента предполагалось, что расчетная величина выхода $n(\theta, E)$ является точной. Неопределенности параметров, определяющих величину выхода, рассматривались как систематическая ошибка экспериментальных результатов. Эта ошибка наряду со статистической точностью измерения $n(\theta, E)$ определяла конечную ошибку эксперимента. Отдельными составляющими систематической ошибки являлись: ошибка измерения числа атомов в бериллиевой мишени, ошибка вычисления постоянной спектра тормозного излучения, неопределенность в эффективностях электронного и гамма-счетчиков, неопределенность импульса спектрометра и угловых размеров гамма-счетчиков. Систематическая неопределенность величины выхода $n(\theta, E)$ составляла 6%. Основной вклад в окончательную ошибку экспериментальных данных обусловлен статистической ошибкой. Последняя связана с большой величиной фона с мишени, что затруднило дальнейшее улучшение методики.

В таблице приведены экспериментальные значения величины $n(\theta, E)$ для двух углов рассеяния и трех энергий первичных гамма-квантов. Там же приведены ошибки экспериментальных результатов и расчетные значения.

Таблица

Энергия	Угол 45°		Угол 90°	
	эксперимент	теория	эксперимент	теория
191 Мэв	$(27,2 \pm 2,44) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 10,3\%$	$18,2 \cdot 10^{-2}$	$(5,95 \pm 0,56) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 9,3\%$	$4,95 \cdot 10^{-2}$
374 Мэв	$(10,85 \pm 1,96) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 18\%$	$8,12 \cdot 10^{-2}$	$(2,24 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 17\%$	$2,14 \cdot 10^{-2}$
479 Мэв	$(7,07 \pm 1,43) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 20,3\%$	$6,35 \cdot 10^{-2}$	$(1,72 \pm 0,36) \cdot 10^{-2}$ $\delta = 16,7\%$	$1,72 \cdot 10^{-2}$

Для угла рассеяния 90° статистический анализ экспериментальных данных с помощью критерия χ^2 подтверждает согласие расчета с экспериментальными результатами при 30%-ном уровне значимости.

Экспериментальные значения для угла 45° лежат выше теоретических, причем расхождение усиливается с уменьшением энергии. Нормированная по площади теоретическая кривая также согласуется с экспериментальными данными на угле 45° на уровне значимости 30%. Расхождение в абсолютных величинах экспериментального и теоретического выходов для угла рассеяния 45° представляется разумным объяснить вкладом от двойного комптон-эффекта. Последний может оказаться значительным, несмотря на то, что вероятность двойного комптон-эффекта на два порядка меньше вероятности одиночного комптон-эффекта. Связано это с тем, что падающий на мишень гамма-пучок представляет собой тормозное излучение электронов максимальной энергии $\omega_{\max} \sim 650$ Мэв. Поэтому наряду с одиночным комптоновским рассеянием гамма-квантов энергии ω_0 аппаратура регистрирует и двойной комптон-эффект с жестким дополнительным гамма-квантом, который может иметь энергию от 0 до $\omega_{\max} - \omega_0$. Для двойного комптон-эффекта имеет место интегрирование по спектру падающих квантов.

Точный учет этого процесса, а также радиационных поправок при столь широких пределах интегрирования представляет собой самостоятельную теоретическую задачу, выходящую за рамки нашей работы.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность А. А. Комару, М. А. Маркову, В. Н. Майкову и В. А. Петухову за постоянное внимание и интерес к работе. Авторы рады случаю поблагодарить В. В. Горшкова, Л. Е. Шубина, Р. Г. Хазизова и всю группу по эксплуатации ускорителя за помощь при проведении эксперимента.

Авторы благодарны также Ю. М. Александрову, Б. Н. Доронину, В. Ф. Грушину и Е. М. Лейкину за любезно предоставленную возможность пользоваться относительным монитором и провести его абсолютную калибровку с помощью квантометра.

Получила в редакцию
13 июня 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. J. L. Lawson. Phys. Rev., 75, 433 (1949).
2. G. R. Sleigh. Phys. Rev., 86, 1028 (1952).
3. Л. В. Курносова, Л. А. Разоренов, П. А. Черенков, ЖЭТФ, 30, 690 (1965).
4. J. D. Anderson, R. W. Kenney; C. A. McDonald Phys. Rev., 102, 1626 (1956).
5. F. H. Goensgen. Bull. Am. Phys. Soc., 28, 14 (1953).
6. A. A. Peuman, W. Scholz, G. Sepp. Nucl. Phys., 88, 417 (1966).
7. B. Gittelman, W. C. Barber, W. Selove et al., Phys. Rev., 171, 1388 (1968).
8. М. И. Благоев, В. А. Мурашова, Т. И. Сырейщикова, Ю. Я. Тельнов, М. Н. Якименко. Препринт ФИАН (в печати).
9. В. А. Петухов, А. А. Комар, М. Н. Якименко. Препринт ОИЯИ Р. 283, 1958 г.
10. В. Н. Майков, В. А. Мурашова, Т. И. Сырейщикова, Ю. Я. Тельнов, М. Н. Якименко. Труды ФИАН, 40, 38 (1968).
11. Ю. Н. Александров, В. Ф. Грушин, Б. Н. Доронин, Е. М. Лейкин. Препринт ФИАН, № 35, 1968 г.
12. J. A. Wheeler and W. E. Lamb. Phys. Rev., 101, 1836 (1956).