

Эксперименты по поискам влияния резонансного окружения на мессбауэровское поглощение гамма-лучей ^{57}Fe

В. Г. Алпатов, Ю. Д. Баюков, А. В. Давыдов, Ю. Н. Исаев, Г. Р. Карташов, М. М. Коротков, С. И. Рейман⁺, В. М. Самойлов

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, 117218 Москва, Россия

⁺ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2003 г.

После переработки 1 июня 2004 г.

Процесс виртуального обмена фотонами между атомными ядрами и полем нулевых электромагнитных колебаний должен приводить к тому, что некоторая часть ядер данного образца будет оказываться в виртуальном возбужденном состоянии, время жизни которого $\sim \hbar/E$, где E – энергия ядерного уровня. Для ядер ^{57}Fe , нижнее возбужденное состояние которых имеет энергию 14.4 кэВ, это время составляет $\sim 4.6 \cdot 10^{-20}$ с. Если тонкий мессбауэровский поглотитель гамма-квантов из атомов ^{57}Fe окружить толстым экраном из тех же атомов, то количество виртуально возбужденных ядер в поглотителе уменьшится и он, казалось бы, будет сильнее поглощать проходящее сквозь него мессбауэровское гамма-излучение внешнего источника. В данной работе измерялось отношение интенсивностей гамма-лучей 14.4 кэВ нуклида ^{57}Fe , прошедших сквозь тонкий резонансный поглотитель, в зависимости от отсутствия или наличия резонансного экрана вокруг поглотителя. Сравнение этих отношений, измеренных при покоящемся и приведенном в колебание гамма-источнике показывает, что они различаются на 0.00123 ± 0.00075 . Эту величину следует считать верхним пределом для искомого эффекта в условиях данного опыта.

PACS: 76.80.+y

В работах [1–4] Высоцкий и др. теоретически развивают и подкрепляют экспериментальными данными идею о возможности изменять периоды полураспада гамма-активных ядер путем воздействия на спектр нулевых электромагнитных колебаний, осуществляемого путем помещения вблизи гамма-излучателя массивного образца из тех же атомов, но с ядрами в основных состояниях. Согласно [1–4], такой эффект мог бы иметь место вследствие взаимодействия между ядрами и полем нулевых колебаний. В результате подобного процесса может на очень короткое время ($\sim \hbar/E$, E – энергия ядерного уровня) возникнуть виртуальное возбужденное состояние ядра при столь же кратковременном снижении интенсивности спектра нулевых колебаний в данной области энергии. Для ядра ^{57}Fe , имеющего нижнее возбужденное состояние с энергией 14.4 кэВ, длительность пребывания в виртуальном возбужденном состоянии составляет $\sim 4.6 \cdot 10^{-20}$ с. Если изготовить из ^{57}Fe тонкий резонансный поглотитель гамма-лучей, то при динамическом равновесии определенная доля ядер ^{57}Fe будет находиться в виртуальном возбужденном состоянии и, казалось бы, не сможет участвовать в резонансном поглощении реальных фотонов, падающих на резонансный поглотитель от внешнего гамма-источника. Если же, следуя [2], такой поглотитель

окружить массивным экраном из атомов ^{57}Fe , то этот экран, являясь виртуальным резонансным поглотителем фотонов из спектра нулевых колебаний, снизит их интенсивность в резонансной области энергий, что приведет к соответствующему увеличению резонансного поглощения проходящих сквозь поглотитель гамма-лучей внешнего источника.

С целью обнаружения такого эффекта была изготовлена небольшая настольная установка, принципиальная схема которой показана на рисунке. Гамма-лучи от стандартного мессбауэровского

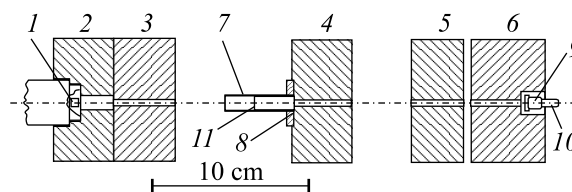


Схема экспериментальной установки: 1 – кристалл кремниевого детектора БДЭР-2, 2–6 – латунные коллиматоры, 7 – экран, 8 – плексигласовый фланец с опорной трубкой экрана, 9 – мессбауэровский гамма-источник MSCRA, 10 – шток, соединяющий гамма-источник с подвижной катушкой вибратора, 11 – резонансный поглотитель на торце плексигласовой трубки. Второстепенные детали (подставка, крепеж) не показаны.

гамма-источника MSCRA (^{57}Co в матрице родия) активностью 0.48 ГБк, укрепленного на подвижной катушке электромагнитного вибратора, проходили сквозь систему коллиматоров, формирующую гамма-пучок диаметром 4 мм, падающий на тонкий резонансный поглотитель. Последний представлял собой диск из алюминиевой фольги толщиной ~ 0.02 мм и диаметром 8 мм, на который был высажен слой мелкодисперсного порошка из сплава родия с 20 ат.% естественного железа. Толщина поглотителя по ^{57}Fe составляла 0.012 мг/см^2 . Поглотитель был приклеен к торцу плексигласовой трубки с внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм, укрепленной на торце одного из коллиматоров. На эту трубку можно было плотно надевать цилиндрические экраны длиной 40 мм, причем поглотитель оказывался посередине экрана. С помощью электромагнитного вибратора можно было привести гамма-источник в колебательное движение вдоль оси системы коллиматоров с амплитудой скорости, достаточной для практически полного подавления резонансного поглощения в стоящем на пути гамма-квантов поглотителе. Гамма-кванты, прошедшие сквозь поглотитель, регистрировались кремниевым детектором БДЭР-2 площадью 25 мм^2 и толщиной 4 мм. Измерения интенсивности гамма-квантов при выключенном и включенном вибраторе показали, что поглотитель резонансно поглощает $\sim 17\%$ падающих на него гамма-квантов с энергией 14.4 кэВ.

Были проделаны 3 серии измерений интенсивности прошедших сквозь поглотитель гамма-лучей в зависимости от наличия или отсутствия экрана на плексигласовой трубке. В первой серии измерений резонансный экран представлял собой цилиндр из двух слоев медной фольги толщиной 0.1 мм, между которыми был укреплен резонансный поглотитель гамма-квантов с энергией 14.4 кэВ, изготовленный из высаженного на алюминиевую фольгу толщиной 0.08 мм мелкодисперсного порошка сплава родия с 20 ат.% железа, обогащенного изотопом ^{57}Fe до 95.1%. Толщина резонансного экрана по изотопу ^{57}Fe составляла 3.4 мг/см^2 . Во второй серии измерений тот же резонансный экран был укреплен на цилиндре из чертежной бумаги, а медная подложка отсутствовала. Третий эксперимент был сделан с нерезонансным экраном из металлического родия толщиной 0.1 мм. Кроме этих трех видов измерений, был проделан опыт, при котором резонансный поглотитель отсутствовал, но применялся, как во второй серии измерений, резонансный экран на бумажно-алюминиевой подложке. Этот опыт делался, что-

бы выяснить, не задевает ли пучок гамма-квантов экран и не рассеиваются ли они им в этом случае так, что появляется возможность “просачивания” их через оставшуюся на пути часть коллиматорной системы в детектор.

В измеряемой детектором области спектра излучений, кроме гамма-линии 14.4 кэВ, присутствовали линии рентгеновского излучения железа и родия и гамма-линия ^{57}Fe с энергией 122 кэВ. Гамма-спектры регистрировались программируемым анализатором Nokia LP 4900В. Полученные данные содержали сведения о числах отсчетов в отрезках спектров, где расположены пики гамма- и рентгеновских линий, а также о площадях пьедесталов под этими линиями. В таблице представлены полученные результаты. Приведены данные об интенсивностях гамма-линии 14.4 кэВ, измеренных вместе с лежащими под пиками пьедесталами, поскольку эти суммарные величины определены с меньшими относительными погрешностями, чем чистые пики без пьедесталов; площади последних составляли $\sim 33\%$ суммарной интенсивности при выключенном вибраторе и $\sim 23\%$ при включенном. В качестве погрешностей приведены наибольшие значения из ожидаемых в каждом случае статистических и реальных средних квадратичных ошибок.

Из приведенных в таблице данных видно, что во всех случаях, кроме результата, полученного с резонансным экраном на бумажной подложке при включенном вибраторе, отношения чисел отсчетов, измеренных без экрана и при его наличии, в пределах погрешностей не отличаются от единицы. В первом опыте (резонансный экран между двумя слоями медной фольги) общая толщина экрана и, прежде всего меди, позволяет считать его абсолютно “черным” поглотителем гамма-лучей 14.4 кэВ. Согласно Высоцкому (см. [4]), наличие такого экрана, пусть даже содержащего резонансный слой, эквивалентно условиям, когда экран вообще отсутствует. В его экспериментах [4] изменение $T_{1/2}$ для уровня 14.4 кэВ нуклида ^{57}Fe проявлялось при добавлении к резонансному экрану абсолютно “черного” свинцового экрана. Нам казалось, что, по аналогии с этим опытом, наши измерения с “черным” экраном не должны дать разницы в числах резонансно поглощенных гамма-квантов для случаев наличия и отсутствия такого экрана. Однако резонансный экран на бумажной подложке не является “черным” для гамма-лучей 14.4 кэВ и именно в опыте с этим экраном можно было надеяться на выявление искомого эффекта. Физические процессы, происходящие в резонансном поглотителе и экране, различны в условиях, когда гамма-источник

Вариант условий эксперимента	Отношение чисел отсчетов для γ -линии 14.4 кэВ, полученных в отсутствии и в присутствии экрана при покоящемся γ -источнике	То же в случае, когда γ -источник приведен в колебательное движение
Резонансный экран укреплен между слоями медной фольги толщиной по 0.1 мм	1.00031 ± 0.00052	1.00013 ± 0.00051
Резонансный экран укреплен на подложке из чертежной бумаги	$1.00016 \pm 0,00052$	$0.99893 \pm 0,00054$
Нерезонансный экран из металлического родия толщиной 0.1 мм	$1.00055 \pm 0,00072$	$0.99958 \pm 0,00066$
Удален резонансный поглотитель. Применен резонансный экран на подложке из чертежной бумаги	0.99995 ± 0.00036	0.99972 ± 0.00036

покоится или колеблется. При включении вибратора резонансное рассеяние и поглощение гамма-квантов 14.4 кэВ ядрами поглотителя практически невозможно. Однако комптоновское и релеевское рассеяния и гамма-квантов и рентгеновых лучей всех энергий, испускаемых источником, возможно при обоих режимах измерений. Какая-то часть этих излучений может вторично рассеяться атомами экрана и при скользящем проникновении в коллиматор, стоящий перед детектором, достичь последнего и несколько повысить скорость счета по сравнению с ее величиной в отсутствие экрана. Измерение с резонансным экраном на бумажной подложке при колеблющемся источнике, казалось бы, подтверждают такую возможность. Эффект перерассеяния гамма-лучей атомами экрана должен, конечно, сохраниться и при покоящемся гамма-источнике, тем более, что в этом случае к комптоновскому и релеевскому рассеяниям добавится ядерное резонансное рассеяние гамма-лучей 14.4 кэВ и станет возможным резонансное перерассеяние определенной доли этих гамма-квантов, испытавших релеевское рассеяние атомами поглотителя без отдачи. Влияние перерассеяния гамма-квантов скажется в увеличении числа отсчетов при наличии экрана, что для покоящегося источника приведет к кажущемуся снижению искомого эффекта увеличения резонансного поглощения при окружении поглотителя резонансным экраном и даже может полностью замаскировать этот эффект. Сравнение результатов измерений, проведенных с резонансным экраном на бумажной подложке при включенном и выключенном вибраторе, позволяет сделать грубую оценку возможного влияния этого экрана на мессбауэровское поглощение гамма-лучей 14.4 кэВ. Если предположить, что величина отношения чисел отсчетов, измеренных без экрана и с экраном при колеб-

лющемся источнике, отличается от единицы вследствие перерассеяния гамма-лучей экраном, и допустить, что по крайней мере такой же величины эффект перерассеяния должен присутствовать и в опыте с покоящимся источником (а там он может быть только больше из-за вклада резонансно рассеянных гамма-квантов), получаем следующую оценку искомого эффекта:

$$[(1.00016 + 0.00052) - 1] - \\ - [(0.99893 + 0.00054) - 1] = 0.00123 \pm 0.00075.$$

Конечно, в рамках данной работы нельзя из-за недостаточной статистической обеспеченности категорически настаивать на именно таком истолковании данного результата. Следует принять указанное число за верхний предел величины возможного эффекта влияния резонансного экрана на мессбауэровское поглощение данного гамма-излучения.

В будущих опытах потребуется принять меры по снижению влияния перерассеяния гамма-квантов экраном и по снижению погрешностей хотя бы на порядок величины. Полезно также перейти от гамма-лучей ^{57}Fe , для которых трудно подобрать пару источник-поглотитель с близким к нулю изомерным сдвигом и с достаточно узкой нерасщепленной мессбауэровской гамма-линией без того, чтобы использовать сплавы с большим содержанием других, кроме железа, тяжелых элементов (например, родия), к излучению других мессбауэровских нуклидов. В частности, было бы интересно провести опыты с источником, поглотителем и экраном из $^{119}\text{SnO}_2$. С этим веществом, как и с ^{57}Fe , можно работать при комнатной температуре.

Авторы благодарят Н. Н. Делягина за ценные советы по выбору условий эксперимента, Н. И. Рохлова

за изготовление образцов сплава железо–родий, В. Д. Калантарова за изготовление деталей установки и Д. В. Львова за помощь в проведении измерений.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 01-02-16577).

1. В. И. Высоцкий, В. И. Воронцов, Р. Н. Кузьмин, Письма в ЖТФ **10**, 300 (1984).
2. V. I. Vysotskii, Phys. Rev. **C58**, 337 (1998).
3. V. I. Vysotskii, V. P. Bugrov, A. A. Kornilova et al., Hyperfine Interactions **107**, 277 (1997).
4. V. I. Vysotskii, A. A. Kornilova, A. A. Sorokin, and S. I. Reiman, Laser Physics **11**, 442 (2001).