14

ITEP-50-96

Fermilab Library
0 1160 0045000 1

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ

Институт теоретической и экспериментальной физики

50-96

FERMILAB
FERMILAB
JUN 1 2 1997
LIBRARY

лпатов, Ю. Д. Баюков, А. В. Давыдов, Ю. Н. Исаев,
арташов, М. М. Коротков, В. М. Самойлов.

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПЫТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ МЕССБАУЭРОВСКОГО САМОПОГЛОЩЕНИЯ γ-КВАНТОВ ДОЛГОЖИВУЩЕГО ИЗОМЕРА ^{109m}Ag

Москва 1996

УДК 539.I М-I6

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПЫТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ МЕССБАУЭРОВСКОГО САМОПОГЛОЩЕНИЯ γ-КВАНТОВ ДОЛГОЖИВУЩЕГО ИЗОМЕРА ^{109m}Ag: Препринт ИТЭФ 50-96/

В.Г.Алпатов, Ю.Д.Баюков, А.В.Давыдов и др. - М., I996 - I6с.

This set-up is intended to search for Mossbauer selfabsorption of the ^{109m}Ag 88 keV γ-rays in the single crystal source-absorber by means of a comparison of the γ-ray yields temperature dependencies in the horizontal and vertical directions. If the γ-resonant broadening is small then the gravitation red shift would restrict the effective resonant absorption length in the vertical γ-ray beam. The set-up consists of a small size cryostat, two Ge(Li)-detectors and a system for compensation of the vertical component of the Earth magnetic field. Switching this system on and off one may observe the synchronous modulation of the resonant absorption probability in the horizontal direction. The expected decrease of the γ-ray intensity in the horizontal beam caused by the Mossbauer effect is $\sim 5\times10^{-4}$ when the source is cooled from 77 to 4.2 K. For the vertical beam such decrease is $\sim$ 7 times less.

Рис. - I, список лит. - I2 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, I996

Опыты по наблюдению гамма-резонансного поглощения γ-лучей долгоживущих изомеров $^{107m,109m}Ag$ в поликристаллическом особо чистом серебре методом активации серебряного поглотителя γ-лучами сильного источника /1-5/, проведенные в 1960-е - 1970-е годы, дали результаты, согласующиеся с теоретическими оценками уширения γ-резонанса в $\sim 10^5$ раз. В последние годы появилось несколько работ /6-9/, выполненных другим способом с монокристаллами серебра, в которых, казалось бы, наблюдались эффекты мессбауэровского поглощения γ-квантов, соответствующие гораздо меньшему уширению (от 16 до 100 раз в разных работах). Примененная в этих работах методика состояла в наблюдении температурной зависимости выхода γ-излучения ^{109}Ag из монокристаллических серебряных пластинок, в которые предварительно вводился термодиффузией материнский радионуклид ^{109}Cd. Было обнаружено, что при охлаждении γ-источника от 77 до 4,2 К выход γ-квантов 88 кэВ снижается в большей мере, чем можно было бы ожидать на основании данных о сжатии серебра при охлаждении и соответствующем увеличении обычного коэффициента поглощения γ-квантов. Авторы /6-9/, приписывая избыточное поглощение γ-квантов эффекту Мессбауэра, вероятность которого должна сильно расти при переходе от 77 к 4,2 К, делают по величине дополнитель-

ного поглощения вышеприведенные оценки фактора уширения. Несомненно, если действительно уширение γ-резонанса ^{109}Ag в монокристалле серебра мало, это должно иметь большое значение для дальнейшего развития мессбауэровской спектроскопии высокого разрешения и для решения ряда практических задач, в том числе и проблемы γ-лазера. Поэтому нами были предприняты опыты по проверке результатов работ /6-9/.

Для получения однозначно интерпретируемых данных была выбрана методика сравнения в одном опыте температурных зависимостей самопоглощения γ-квантов ^{109}Ag, излучаемых монокристаллическим серебряным источником в горизонтальном и вертикальном направлениях. Если уширение γ-линии 88 кэВ невелико (скажем, в 30 раз, как указано в /6/), то гравитационное красное смещение энергии γ-линии на 30-кратную естественную ширину резонанса произойдет в вертикальном пучке фотонов на пути всего лишь в 30 мкм. Значит испускаемые вертикально γ-кванты смогут эффективно поглощаться за счет эффекта Мессбауэра только на небольшой начальной длине пролета порядка 30 мкм. В то же время для горизонтального пучка γ-квантов каких-либо ограничений длины резонансного поглощения нет и работать сможет слой серебра, толщина которого определится обычными электронными механизмами поглощения. Поэтому можно ожидать существенной разницы в резонансном поглощении фотонов в горизонтальном и вертикальном направлениях. Для нашего γ-источника, представляющего собой серебряный монокристаллический диск диаметром ~ 25 мм и толщиной 1,08 мм, устанавливаемый под углом 45° к горизонтальной плоскости, величины эффекта резонансного поглощения в двух направлениях различаются по расчету в ~ 7 раз. При этом относительная величина

ослабления горизонтального пучка вследствие эффекта Мессбауэра весьма невелика - ~ 0,05 % . Таким образом, экспериментальное устройство для выявления искомого эффекта должно обеспечивать возможность измерения интенсивности фотонов с относительной точностью не хуже 10^{-4}. Для дополнительного контроля в установке должен использоваться второй, нерезонансный, γ-источник, выход γ-лучей которого будет одинаково меняться с температурой в обоих направлениях.

Как показано в /10/, удобно измерять одним и тем же детектором интенсивности γ-линий основного и вспомогательного источников и определять их отношение R. Используя достаточно широкие области суммирования чисел импульсов в их амплитудном спектре, удается достичь высокой степени стабильности при определении R, позволяющей получить относительную точность измерения ~ 10^{-4}.

Кроме гравитации, на величину эффективного сечения резонансного поглощения γ-квантов влияет магнитное поле Земли, расщепляющее вследствие эффекта Зеемана γ-линию ^{109}Ag на 14 компонент, расстояния между которыми превосходят естественную ширину линии в ~ 10^6 раз. Следовательно, в условиях, когда излучающие и поглощающие ядра находятся в одном и том же магнитном поле (как это имеет место в нашем случае), каждая зеемановская компонента спектра испускания может поглощаться только в пределах эффективной ширины соответствующей зеемановской компоненты спектра поглощения, не взаимодействуя с остальными компонентами. Интенсивность определенной компоненты зеемановской структуры спектра испускания (поглощения) выражается ф-лой (1)

$$I(m_i, m_f) \sim \left| C^{I_f m_f}_{I_i m_i LM} \right|^2 \times F(\vartheta, \Delta m) \qquad (1)$$

Первый сомножитель в правой части (1) представляет собой квадрат коэффициента Клебша-Гордана, соответствующего переходу ядра с подуровня со спином I_i и магнитным квантовым числом m_i на подуровень с квантовыми числами I_f и m_f. В этом переходе излучается фотон с угловым моментом L и его проекцией на ось квантования M. Второй сомножитель, $F(\vartheta, \Delta m)$, определяет зависимость интенсивности данной компоненты от угла ϑ между вектором напряженности магнитного поля и направлением испускания фотона. В условиях, когда перекрытие соседних компонент зеемановского спектра практически отсутствует (наш случай), эффективное сечение резонансного поглощения будет для каждой компоненты спектра определяться квадратом величины $I(m_i, m_f)$, а суммарное эффективное сечение - суммой этих квадратов. В /11/ было показано , что эта сумма существенным образом зависит от ϑ; она максимальна при $\vartheta = 0$ (или 180°) и снижается в 3 раза для $\vartheta \cong 45^o$ (135°). Таким образом, ориентация пучков γ-квантов по отношению к направлению магнитного поля Земли должна сильно влиять на величину эффекта резонансного поглощения γ-квантов. Мы сочли удобным в рассматриваемом варианте постановки эксперимента создать условия, когда путем искусственной компенсации вертикальной составляющей магнитного поля Земли горизонтальный пучок γ-квантов можно было бы сделать параллельным остающейся горизонтальной составляющей поля, расположив его в плоскости магнитного меридиана. Тогда, включая и выключая устройство компенсации вертикальной составляющей поля в условиях, когда мессбауэровское поглощение γ-квантов в источнике в принципе возможно (низкая температура), можно увидеть соответствующие изменения интенсивнос-

ти фотонов (на ~ 60% от полной величины резонансного поглощения) и сделать дополнительные заключения о ширине γ-линии. Для вертикального пучка эффект резонансного поглощения даже в отсутствие магнитного поля очень мал; в данном же случае изменение его при переключении направления магнитного поля будет столь мало, что вряд ли можно будет его обнаружить при относительной точности измерений ~ 10^{-4}. Влияние направления магнитного поля на резонансное поглощение γ-квантов может наблюдаться, как и влияние гравитации, только для малоуширенной γ-линии, и не потому, что при значительном уширении зеемановские компоненты перекроются - этого не произойдет даже при уширении в 10^5 раз - , а из-за уменьшения сечения резонансного поглощения с ростом ширины линии.

Описание экспериментальной установки

Общая схема установки представлена на рисунке. Главной ее частью является малогабаритный криостат, в котором можно охлаждать γ-источники до температуры жидкого азота или жидкого гелия, причем в последнем случае охлаждение осуществляется слабой постоянной струей жидкого гелия. Криостат не имеет азотного экранирующего объема, обычно применяемого в гелиевых криостатах, и охлаждение теплового экрана осуществляется отходящими парами гелия.

Основной и контрольный γ-источники укрепляются в съемном фланце, имеющем бериллиевое окно. После закрепления источников фланец впаивается оловянным припоем в скошенное под углом 45° окно гелиевого объема. Жидкий гелий подается в криостат сифоном, вставляемым в вертикальную трубу, на которой

подвешен гелиевый объем. Расход жидкого гелия - ~ 1 л/час. Температура γ-источников измеряется термометром, состоящим из прокалиброванного сопротивления КГ, полученного в свое время в Ин-те полупроводников АН УССР, и цифрового омметра Ф-30. Сопротивление укреплено в корпусе гелиевого объема вблизи γ-источников. Окна в тепловом экране изготовлены из металлизированного майлара, а в наружных фланцах корпуса криостата - из бериллиевой фольги толщиной 0,25 мм для горизонтального пучка и из дюраля толщиной 0,3 мм - для вертикального.

Криостат укреплен на подставке из дюралюминия. Ни сам криостат, ни подставка не содержат деталей из ферромагнитных материалов. Однако, некоторое количество железа имеется в конструкции диффузионного насоса ЦВЛ-100, применяемого для откачки криостата. Этот насос расположен на расстоянии 550 мм от оси криостата. На общей с криостатом подставке можно расположить два сосуда Дьюара с Ge(Li)-детекторами для регистрации γ-квантов, испускаемых источниками в горизонтальном и вертикальном направлениях. В случае, если требуется сделать измерение в горизонтальном направлении при более высокой скорости счета, убирается детектор вертикального пучка, что дает возможность максимально приблизить второй детектор к γ-источникам.

Для компенсации горизонтальной составляющей магнитного поля Земли применена система, состоящая из пары колец Гельмгольца диаметром 380 мм с одним слоем витков, источника питания катушек и схемы автоматического включения и выключения их, работающей от сигналов амплитудного анализатора Nokia LP 4900B. Ge(Li)-детекторы через стандартные спектрометрические тракты соединены с блоком

селекции подгрупп памяти компьютеризованного анализатора Nokia. Для управления работой анализатора в него введена компьютерная программа, фиксирующая момент времени начала очередного измерения, задающая продолжительность измерения и вводящая поправку в числа отсчетов на различие периодов полураспада $T_{1/2}$ основного и вспомогательного γ-источников. Эта же программа управляет подачей сигналов включения и выключения компенсирующего магнитного поля с одновременным изменением номеров групп памяти анализатора, в которые поступает информация. В конце каждого измерения полученные амплитудные спектры от двух детекторов записываются на гибкие магнитные диски, вычисляются и печатаются суммы отсчетов под пиками полного поглощения γ-линии 88 кэВ ^{109}Ag и γ-линии контрольного γ-источника с учетом упомянутой поправки на разницу в $T_{1/2}$.

Наличие контрольного нерезонансного γ-источника позволяет исключить ложные эффекты изменения чисел отсчетов с температурой, которые могли бы появиться вследствие неизбежных температурных деформаций криостата, в частности вызванного охлаждением укорочения вертикальной трубки, на которой подвешен гелиевый объем. Для дополнительного контроля деформаций установка оборудована оптическим устройством, состоящим из теодолита, источника света и системы зеркал, расположенных снаружи криостата. В корпусе криостата предусмотрены 2 стеклянных окна, сквозь которые можно следить за положением меток, нанесенных на охлаждаемые детали криостата. Во время основных измерений эти окна закрываются непрозрачными крышками для уменьшения теплоподвода к гелиевому объему. С помощью этого устройства можно наблюдать и измерять линейные деформации с точностью ~ 20 мкм. В случае необходимости весь криостат, как

целое, можно переместить с помощью опорных винтов, приведя сдвинувшийся вследствие деформации гелиевый объем в прежнее положение относительно детекторов.

Методика изготовления γ-источника на основе ^{109}Cd, введенного в монокристалл серебра, и способы исследования его структуры описаны в нашей статье /12/. Отличие γ-источника, примененного в данной установке, от источника, описанного в /12/, состоит в том, что новый γ-источник изготавливался тремя циклами электролиза ^{109}Cd и термодиффузии, а прежний источник - за один цикл. Отметим, что по нашей методике ^{109}Cd вводится в одинаковом количестве с обеих сторон серебряной пластинки. В направлении перпендикулярном плоскости источника интенсивность испускаемых γ-квантов с энергией 88 кэВ равна ~ $1{,}05 \times 10^{6}$ стерад.$^{-1}$с$^{-1}$.

В качестве вспомогательного γ-источника в наших предварительных опытах /10/ использовался ^{57}Co, введенный термодиффузией в медную фольгу. Оказалось, однако, что медь , постепенно окисляясь, начинает сыпаться с поверхности этого источника, загрязняя установку радиоактивностью ^{57}Co. Поэтому для последующих опытов был изготовлен γ-источник из ^{57}Co, введенного в серебряную фольгу толщиной 20 мкм. Совершенно неожиданно выяснилось, что этот γ-источник, несмотря на малую среднюю атомную концентрацию ^{57}Co в серебре (~ 10^{-7}), обладает ферромагнитными свойствами. По-видимому в процессе термодиффузии в серебре возникли области скопления кобальта. Такой γ-источник нельзя применять в нашем опыте, поскольку его магнитное поле, существенно превосходящее земное, не позволит достичь нужного результата при включении компенсационных катушек. Поэтому пришлось искать третий вариант изготовления контрольного

γ-источника. Поскольку этот источник должен излучать γ-линию, не слишком сильно, но и не слишком мало отличающуюся по энергии от γ-линии ^{109}Ag (88 кэВ), не должен иметь в своем спектре γ-линий других энергий, увеличивающих фоновую подложку в измеряемой части спектра, и быть достаточно долгоживущим по сравнению с ^{109}Cd, то ясно, что выбор подходящих нуклидов весьма невелик. Мы остановились на γ-источнике на основе ^{241}Am, в спектре излучений которого доминирует γ-линия с энергией 59,54 кэВ. Контрольный γ-источник имеет форму диска того же диаметра, что и основной серебряный источник. Его рабочее тело изготовлено из хроматографической бумаги толщиной 0,3 мм, пропитанной азотнокислым раствором ^{241}Am и высушенной. Активность контрольного источника ~ 2,3 МБк.

Для установки криостата в положение, когда горизонтальный пучок γ-квантов лежит в плоскости магнитного меридиана, и для подбора силы тока через компенсационные катушки ,были выполнены измерения направления и напряженности магнитного поля внутри криостата в месте расположения γ-источников. Эти измерения были сделаны сотрудником ВНИИФТРИ А.Е.Еськиным с помощью малогабаритного феррорезонансного зонда с чувствительностью 10^{-3} Эрстеда, разработанного во ВНИИФТРИ. Измерения велись в условиях, когда диффузионный насос, имеющий ферромагнитные детали, был в своем рабочем положении и это, как выяснилось, не мешало осуществить надежную компенсацию ~~горизонтальной~~ вертикальной составляющей магнитного поля Земли и нужную ориентацию криостата по отношению к плоскости магнитного меридиана.

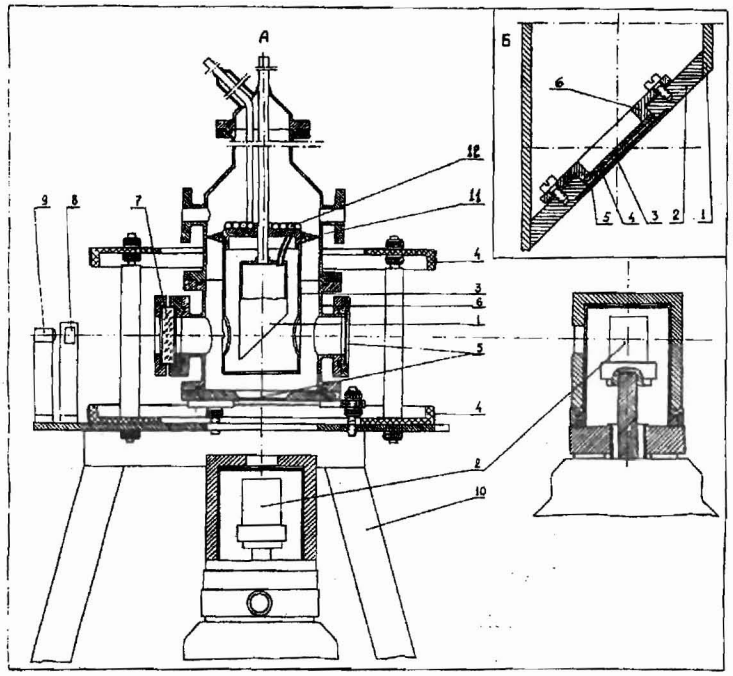
Оценка экспериментальных возможностей установки.

Имеющиеся в нашем распоряжении Ge(Li)-детекторы и спектрометрическая аппаратура позволяют получить приемлемое энергетическое разрешение при скоростях счета порядка $2,0 \times 10^3$ c^{-1}. Активность серебряного γ-источника и геометрические условия, ограничивающие возможность сближения детекторов с источниками (размеры сосудов Дьюара с детекторами, компенсационных катушек, вертикальные размеры кристаллов германия, служащих детекторами, и т.д.) не позволяют достичь скоростей счета на γ-линии 88 кэВ более 300 отсч./с при работе с одним детектором (на горизонтальном пучке) и более 500 отсч./с и 100 отсч./с при одновременной работе с детекторами вертикального и горизонтального пучков, соответственно. Контрольный γ-источник подобран так, что дает приблизительно такие же числа отсчетов на линии 59,54 кэВ. Отсюда следует, что для получения относительной точности $\sim 10^{-4}$ при измерении отношения R чисел отсчетов на γ-линиях основного и контрольного γ-источников для двух направлений магнитного поля требуется чистое время измерений $\sim$ 560 часов при каждой температуре. Значит, для измерений при температуре 4,2 К опыт потребует, как минимум, 560 л жидкого гелия, а с учетом промежутков между измерениями вероятно раза в 1,5 больше. Измерения с одним детектором (в горизонтальном пучке) должны занять меньшее время, т.к. детектор при этом можно приблизить к γ-источникам, но зато будет утрачена важная информация - результат работы нижнего детектора, регистрирующего γ-кванты в вертикальном пучке одновременно с боковым детектором. Наличие же искомого эффекта на горизонтальном пучке при одновременном практическом отсутствии его на вертикальном пучке

было бы важнейшим критерием возможности отождествления наблюдаемого эффекта с резонансным поглощением γ-квантов. Если измерения с точностью ~ 10^{-2} % покажут, что эффект резонансного самопоглощения отсутствует, это будет означать, что нижний предел фактора уширения γ-линии равен 150.

Отметим здесь, что приближать детектор горизонтального пучка к γ-источникам можно лишь до известного предела, т.к. вертикальный размер кристалла германия в детекторе при данном расстоянии определяет величину максимального возможного наклона пути γ-кванта в источнике по отношению к горизонтальной плоскости. Слишком большая величина этого наклона вызовет ограничения резонансного поглощения из-за гравитационного красного смещения, что приведет к относительному росту фоновых отсчетов и снизит измеряемую величину эффекта. Поэтому единственный путь увеличения эффективности установки это - повышение активности источников и применение детекторов, способных работать при более высоких скоростях счета без ухудшения разрешающей способности. К сожалению финансовые сложности не позволяют нам пока пойти по этому пути.

Авторы благодарят А.Е.Еськина за проведение магнитных измерений и В.Е.Радько за помощь в сборке установки. Работа выполнялась при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 96-02-19176).



Подписи к рисунку

А. Схема установки (вид сбоку):
1 - корпус гелиевого объема, 2 - Ge(Li)-детекторы, 3 - тепловой экран, 4 - кольца Гельмгольца, 5 - окна для выпуска пучков γ-квантов, 6 - корпус криостата, 7 - окно для наблюдения за деформациями, 8 - зеркало, 9 - осветитель, 10 - подставка, 11 - фторопластовые ограничители деформаций, 12 - спиральная трубка охлаждения теплового экрана отходящими парами гелия.

Б. Схема закрепления γ-источников:
1 - корпус гелиевого объема, 2 - обойма с γ-источниками, 3 - серебряный γ-источник, 4 - контрольный γ-источник (^{241}Am в бумажном диске внутри оболочки из алюминиевой фольги), 5 - бериллиевое окно, 6 - прижимное кольцо.

Литература

1. Г.Е.Бизина, А.Г.Беда, Н.А.Бургов, А.В.Давыдов. // ЖЭТФ, 1963, Т.45, N 5(11), С. 1408-1413.
2. А.Г.Беда, Г.Е.Бизина, А.В.Давыдов. В кн. "Проблемы ядерной физики и физики элементарных частиц", М., "Наука", 1975, С. 209-234.
3. В.Г.Алпатов, А.Г.Беда, Г.Е.Бизина, А.В.Давыдов, М.М.Коротков. // Proc. of the 5-th Intern. Conf. on Mossbauer Spectroscopy, 1973, Bratislava, Czechoslovakia. Praha, 1975, Part 3, P. 499-504.
4. В.Г.Алпатов, А.Г.Беда, Г.Е.Бизина, А.В.Давыдов, М.М.Коротков: // Сб. статей "Прикладная ядерная спектроскопия", М: Атомиздат , 1977, N 7, С. 232-237.
5. В.Г.Алпатов, А.Г.Беда, Г.Е.Бизина, А.В.Давыдов, М.М.Коротков. // Proc. of Intern. Conf.on Mossbauer Spectroscopy, Bucharest, Romania, 1977, V. 1, P. 43-49.
6. W.Wildner, U.Gonzer. // J. de Physique, Colloque C2, Suppl. au n° 3, Tome 40, Mars 1979, P. C2-47 - C2-48.
7. R.D.Taylor, G.R.Hoy. // SPIE, V. 875, Short and Ultrashort Wave Length Lasers, 1988, P. 126-133.
8. G.R.Hoy, R.D.Taylor. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1988, V. 40, N 6, P. 763-771.
9. S.Rezaie-Serej, G.R.Hoy, R.D.Taylor. // Laser Physics, 1995, V.5, N 2, P. 240-257.
10. В.Г.Алпатов, А.В.Давыдов, Г.Р.Карташов, М.М.Коротков, В.Е. Радько, А.А.Садовский. // Измерительная техника, 1995, N 3,

С. 52-55.

11. А. В. Давыдов, Ю. Н. Исаев, В. М. Самойлов. М., Препринт ИТЭФ, 1996, N 48.

12. В. Г. Алпатов, Г. Е. Бизина, А. В. Давыдов, Г. Р. Карташов, А. А. Садовский. // Измерительная техника, 1994, N 1, С. 58-61.