

Эффект Мессбауэра. Теоретический обзор

С. А. Михеев

1. Испускание и поглощение γ -квантов свободными ядрами

Прежде чем перейти к описанию самого эффекта Мессбауэра рассмотрим явление испускания и поглощения γ -квантов свободными ядрами. Пусть ядро массы M находится в возбужденном состоянии с энергией E_0 . При распаде этого состояния испускается γ -квант с энергией E_γ и импульсом $p_\gamma = E_\gamma/c$. Можно было бы ожидать, что для тождественного ядра, находящегося в основном состоянии будет велика вероятность поглощения данного γ -кванта. Однако на самом деле часть энергии распада расходуется на энергию отдачи ядра R . То есть энергия вылетевшего γ -кванта будет равна

$$E_\gamma = E_0 - R.$$

Принимая во внимания закон сохранения импульса и малость энергии отдачи по сравнению с E_0 можно записать для неё следующее выражение:

$$R = E_0/2Mc^2.$$

Также следует учесть изменение энергии γ -кванта связанное с тепловым движением. В связи с эффектом Доплера, если ядро имеет скорость V в направлении испускания γ -кванта, то энергия γ -кванта изменится на величину

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma \frac{V}{c}.$$

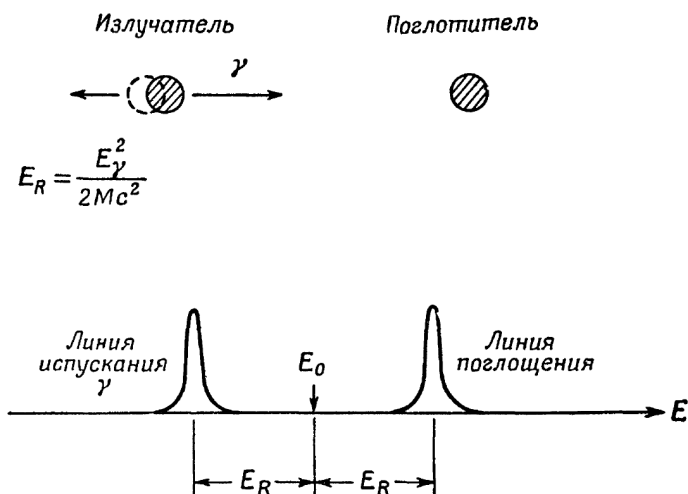


Рис. 1. Иллюстрация невозможности резонансного поглощения в свободных атомах.

Таким образом, разница между E_0 и энергией γ -кванта определяется энергией отдачи ядра и энергией доплеровского уширения

$$E_0 - E_\gamma = \frac{E_0}{2Mc^2} - E_\gamma \frac{V}{c}.$$

Доля энергии γ -перехода, теряемая на отдачу атома, мала: для γ -кванта с энергией 100 кэВ и ядра с массовым числом 100 она равна лишь $5 \cdot 10^{-7}$. До работы Мессбауэра было невозможно измерить энергию γ -кванта с точностью, необходимой для обнаружения такого малого различия в энергиях. Однако эта потеря энергии оказывается существенной, если ее сравнивать с собственной шириной линии γ -лучей, т. е. с точностью, с которой энергия γ -лучей определяется свойствами ядра. Конечная собственная ширина является следствием соотношения неопределённостей.

$$\Gamma\tau = \hbar.$$

Согласно этой формуле, время жизни 10^{-7} с (типичное значение) соответствует ширине линии $4.6 \cdot 10^{-9}$ эВ, которая гораздо меньше энергии, теряемой на отдачу ядра. В результате этого линия испускания γ -лучей не перекрывается с линией поглощения и резонансное поглощение не наблюдается.

Для тех ядер, скорости которых окажутся достаточно большими (десятки и сотни м/с), условие резонанса может быть восстановлено. Как

правило, перекрытие линий испускания и поглощения очень мало. Перекрытие можно увеличить, если сообщить ядрам источника поступательную скорость в направлении к поглотителю

2. Эффект Мессбауэра

2.1. Качественное описание

Эффект Мессбауэра — физическое явление, наблюдающееся в твердых телах. Оно состоит в испускании гамма-луча радиоактивным атомом, находящимся в связанном состоянии, без потери части энергии гамма-излучения за счет эффекта отдачи ядра и резонансном поглощении испущенного гамма-луча ядром стабильного атома, также находящегося в связанном состоянии.

Качественно этот эффект можно объяснить следующим образом. При испускании γ -кванта импульс отдачи неизбежно должен быть передан излучающей системе, но в отличие от случая свободного ядра, это приводит к изменению состояния не отдельного ядра, а большого количества ядер, входящих в состав кристалла. С отличной от нуля вероятностью импульс отдачи может быть передан всему кристаллу как целому. Поскольку масса кристалла является бесконечно большой (по сравнению с E_0/c^2), передача импульса в таком процессе не будет сопровождаться передачей энергии, т. е. энергия отдачи обращается в нуль. Вероятность такого «безотдачного» процесса и является вероятностью эффекта Мессбауэра. В этом случае при испускании γ -кванта внутренняя энергия кристалла не меняется, т. е. кристалл остается в том же квантовом состоянии, в котором он первоначально находился.

2.2. История открытия

Это открытие было сделано в 1958 г. немецким аспирантом Рудольфом Мессбауэром, диссертационная работа которого была посвящена изучению влияния температуры на поглощение гамма-излучения ядрами. В своей работе он использовал радиоактивный нуклид осмий-191, претерпевающий β -распад с образованием радиоактивного иридия-191, переход которого в стабильное состояние сопровождается испусканием гамма-лучей. Мессбауэр обнаружил возрастание рассеяния в иридии при низких температурах, что противоречило предсказаниям классической теории.

Чтобы разобраться в сути его открытия, рассмотрим три случая, реализуемых в твёрдых телах.

1. Если энергия отдачи свободного атома велика по сравнению с энергией связи атома в твердом теле, то атом будет выбит из своего положения в решетке и применима модель свободного атома, изложенная в пункте 1.
2. Если энергия отдачи свободного атома больше характерной энергии колебаний решетки (энергии фононов), но меньше энергии, необходимой для смещения, то атом будет оставаться на своем месте, а его энергия отдачи будет расходоваться на нагревание решетки.
3. Если энергия отдачи меньше энергии фононов, то решетка является квантовой системой, которая не может возбуждаться произвольным образом, и возникает эффект Мессбауэра.

2.3. Эйнштейновская модель и вероятность эффекта Мессбауэра

В эйнштейновской модели твердого тела твердое тело описывается совокупностью $3N$ осцилляторов (где N — число атомов в твердом теле), имеющих одинаковую частоту ω . При этом состояние твердого тела задается квантовыми числами осцилляторов. Единственные возможные изменения состояния твердого тела сводятся к возрастанию или уменьшению одного или нескольких квантовых чисел. Эти изменения соответствуют поглощению фотона с энергией которая в реальных твердых телах обычно равна по порядку величины 10^{-2} эВ. Испускание γ -кванта сопровождается теперь передачей энергии решетке частями, кратными этой энергии фонона ($0, \pm\hbar\omega, \pm 2\hbar\omega$). В этом утверждении содержится также возможность процесса без передачи энергии.

Было показано, что при усреднении по большому числу процессов испускания передаваемая энергия, приходящаяся на один процесс, точно равна энергии отдачи свободного атома. Используя этот факт и полагая, что R гораздо меньше $\hbar\omega$, так что можно пренебречь двухфононными процессами, мы можем написать выражение, которое непосредственно определяет величину f долю (вероятность) процессов испускания γ -квантов, происходящих без возбуждения решетки:

$$R = (1 - f)\hbar\omega \quad \text{или} \quad f = 1 - \frac{R}{\hbar\omega}.$$

Общая вероятность бесфононных процессов имеет вид

$$f = \exp(-\chi^2 \langle x^2 \rangle)$$

где $\chi = 2\pi/\lambda = E_0/\hbar c$, а $\langle x^2 \rangle$ — среднее значение квадрата смещения ядра (при тепловых колебаниях) в направлении, совпадающем с направлением вылета фотона.

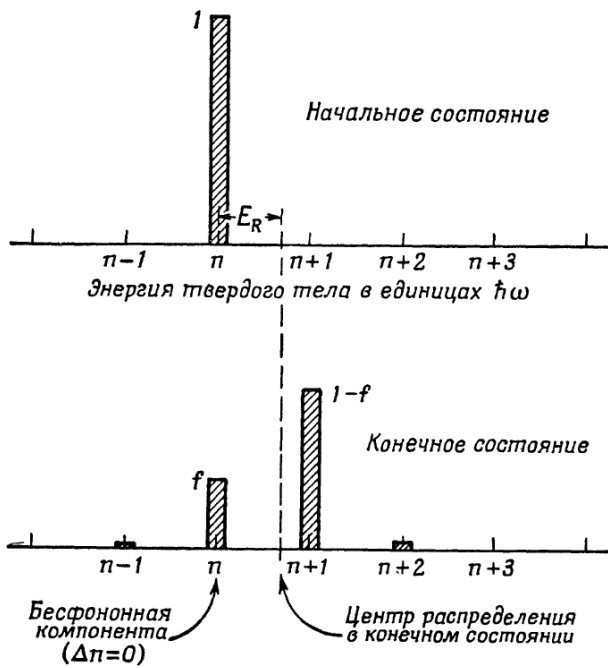


Рис. 2. Вероятность бесфононного процесса в модели Эйнштейна.

Из этой формулы видно, что f является убывающей функцией температуры, поскольку величина $\langle x^2 \rangle$ при повышении температуры всегда возрастает. С классической точки зрения такая зависимость является естественным следствием увеличения средней энергии колебаний атомов при повышении температуры. С квантовой точки зрения следует рассмотреть влияние температуры на вероятность рождения фонона (т. е. на вероятность перехода осциллятора в более высокое энергетическое состояние). Фононы являются частицами со свойствами бозонов. Для таких частиц процесс рождения имеет индуцированный характер, т. е. вероятность их рождения тем выше, чем больше частиц уже присутствует в данной системе. Повышение температуры соответствует переходу осциллятора в более высокое состояние, т. е. в состояние с большим числом фононов, что влечет за собой увеличение вероятности рождения фонона и уменьшение вероятности эффекта Мессбауэра.

В настоящее время эффект Мессбауэра наблюдался для 73 изотопов 41 элемента. Для регистрации эффекта Мессбауэра подходят гамма-переходы с энергиями, меньшими 100 кэВ. Для γ -переходов с энергиями

меньшими 30 кэВ вероятность эффекта Мессбауэра остается достаточно большой в широком температурном диапазоне. Например, для ядра ^{57}Fe ($E_\gamma = 14.41$ кэВ) измерения возможны при достаточно высоких температурах вплоть до 1000°C , при низких температурах вероятность эффекта может достигать значения $f = 0.9$. Для больших энергий γ -квантов измерения необходимо проводить при низких температурах. В частности для ядра ^{197}Au ($E_\gamma = 77.3$ кэВ) $f = 0.1$ только при гелиевых температурах.

3. Значение эффекта Мессбауэра

Важнейшим свойством γ -излучения без отдачи, является ширина линии. Если при испускании γ -кванта возбуждается решетка, то эффективная ширина линии по порядку величины равна энергии фононов. Если решетка не возбуждается, то ширина бесфононной компоненты излучения определяется только шириной ядерных уровней, между которыми происходит переход. Согласно принципу неопределенности, времени жизни ядра 10^{-7} с соответствует ширина линии 10^{-8} эВ, что на шесть порядков меньше ширины, возникающей в случае, когда решетка возбуждается. Однако более важен тот факт, что эта ширина линии меньше характерных значений энергий магнитного дипольного и электрического квадрупольного взаимодействий ядра с окружающими его электронами. Таким образом явления, связанные с этими взаимодействиями, могут наблюдаться и исследоваться с помощью эффекта Мессбауэра. Другой характеристикой ширины линии является ее отношение к полной энергии γ -кванта. Для энергии 100 кэВ и рассмотренного выше времени жизни это отношение равно 10^{-13} . Это эквивалентно утверждению, что энергию γ -лучей можно определять с точностью 10^{-13} . Поэтому γ -лучи являются наиболее точно определенным по энергии электромагнитным излучением, которое можно использовать для физических опытов.

Эффективное сечение поглощения описывается формулой Брейта-Вигнера

$$\sigma(E) = \sigma_0 \left[1 + 4 \left(\frac{E - E_0}{\Gamma_a} \right)^2 \right]^{-1}.$$

4. Мессбауэровская гамма-спектроскопия

Если вероятность эффекта Мессбауэра не слишком мала, энергетическое распределение γ -квантов можно рассматривать состоящим из двух компонент: узкой мессбауэровской линии, интенсивность которой пропорциональна f , и широкого распределения (с интенсивностью пропорцио-

нальной $1 - f$), которое соответствует γ -переходам с изменением внутренней энергии кристалла. Сечение Мессбауэрской компоненты определяется формулой Брейта–Вигнера и имеет Лоренцеву форму, а широкое распределение как правило воспринимается как фон.

В большинстве случаев эффект Мессбауэра наблюдается для первых возбужденных состояний, распад которых может осуществляться или в результате радиационного перехода с энергией E_0 или в результате внутренней конверсии.

Как только было обнаружено, что линии излучения и поглощения имеют минимально возможную естественную ширину, стало ясно, что на основе эффекта Мессбауэра можно создать принципиально новый спектрометр, позволяющий исследовать исключительно слабые взаимодействия ядра с внешними полями, характеризующими электронные и ионные свойства твердого тела и отражающими его физические и химические параметры.

Поскольку эти взаимодействия приводят к так называемой сверхтонкой структуре ядерного гамма-спектра (10^{-5} – 10^{-8} эВ), то для его «прощупывания» необходимо иметь «зонд» по меньшей мере столь же тонкий. Для создания такого спектрометра подходят лишь те изотопы, время жизни возбужденных состояний которых больше 10^{-8} с.

5. Методы измерения и модуляции спектров

Чтобы перейти от эффекта Мессбауэра к мессбауэровской спектроскопии, требуется найти какой-то способ модулировать энергию гамма-лучей по величине. Самой простой и популярной является модуляция основанная на эффекте Доплера. Методика измерений, основанная на модуляции энергии линии испускания (или линии поглощения) с помощью эффекта Доплера, принципиально очень проста. Если источнику сообщается скорость V относительно резонансного поглотителя, энергия линии испускания изменится на величину

$$\Delta E = E_0 \frac{V}{c}.$$

Мессбауэровские эксперименты могут осуществляться различными способами. На практике их чаще всего проводят «в геометрии пропускания». Источник α закрепляют на штоке, приводимом в движение вибратором (генератором механических колебаний). Процесс испускания гамма-квантов источником происходит изотропно, т. е. с равной вероятностью во всех направлениях. С помощью свинцового экрана, имеющего отверстие, пучок гамма-квантов «коллимируют» в направлении детектора. На

пути пучка устанавливают поглотитель *a*. Регистрация мессбауэровского спектра состоит в измерении скорости счета γ -квантов (или их относительного поглощения в образце) в зависимости от скорости движения источника (или от номера канала в памяти накопителя информации). Предположим, что источник и поглотитель идентичны. В этом случае значения энергии γ -перехода в источнике и поглотителе равны, вследствие чего максимум резонансного поглощения будет наблюдаться при $V = 0$.

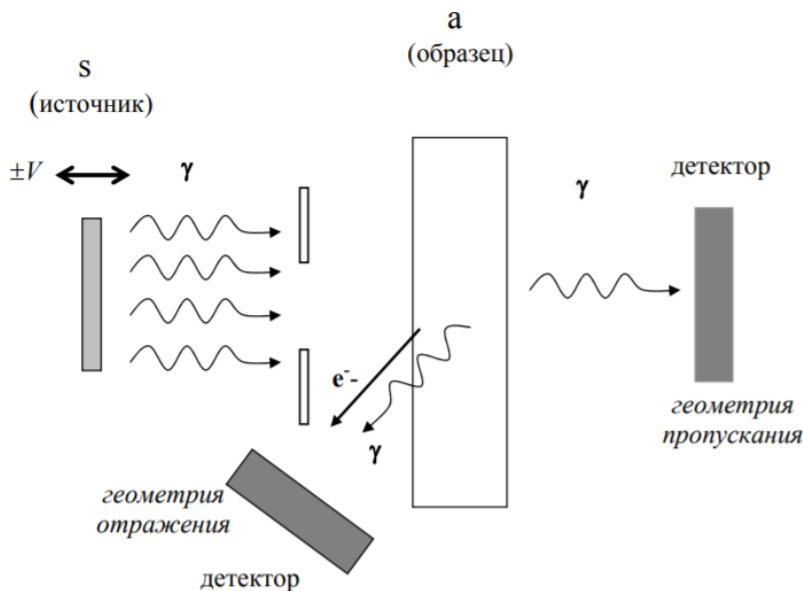


Рис. 3. Схема установки для измерения Мессбауэровских спектров.

Если при съемке спектров в геометрии пропускания исследуемое вещество является поглотителем, получаемые спектры называют «мессбауэровскими спектрами поглощения» или просто «мессбауэровскими спектрами». В случае, когда исследуемым веществом является источник, их называют «эмиссионными мессбауэровскими спектрами». В некоторых случаях вместо того, чтобы измерять скорость счета гамма-квантов, прошедших через поглотитель, в зависимости от скорости движения источника, исследуют изменение интенсивности излучения, отраженного под большим углом к первоначальному направлению пучка гамма-квантов. В данном случае речь идет о проведении мессбауэровских измерений «в геометрии отражения».

6. Экспериментальные установки

Экспериментальные установки, предназначенные для измерения мессбаэровских спектров, называются мессбаэровскими спектрометрами. Такие установки обеспечивают движение источника (или поглотителя) с заданной скоростью и регистрацию интенсивности потока γ -квантов, прошедших через поглотитель, в зависимости от величины скорости.

В настоящее время в большинстве экспериментов используются электродинамические спектрометры, в которых скорость непрерывно меняется по заданному закону. Как правило, применяется равноускоренное движение, при котором скорость линейно меняется в зависимости от времени. Такой закон движения обеспечивается электродинамическим приводом с обратной связью, в катушки которого подается электрический сигнал соответствующей формы. Интенсивность потока γ -квантов фиксируется с помощью многоканального анализатора, временная развертка которого синхронизирована с изменением скорости. Для регистрации γ -квантов используются сцинтилляционные, газовые пропорциональные или полупроводниковые детекторы.

В некоторых случаях применяются детекторы, специально предназначенные для регистрации мессбаэровского излучения (резонансные детекторы). В рабочем объеме этих детекторов находится вещество, содержащее ядро мессбаэровского изотопа и имеющее большую вероятность эффекта Мессбаэра. Мессбаэровское резонансное поглощение в объеме счетчика приводит к переходу ядер в возбужденное состояние, распад которого с большой вероятностью сопровождается испусканием электрона внутренней конверсии. Поскольку вероятность регистрации электрона близка к 100%, общая эффективность детектора мессбаэровского излучения оказывается весьма высокой. Вместе с тем, чувствительность резонансного детектора к фону может быть сделана очень малой, что обеспечивает высокое отношение полезного счета к фону.

Литература

1. Г. Вертхейм, Эффект Мессбаэра. Издательство «Мир», 1966.
2. Делягин Н. Н., Еременко Д. О., Корниенко Э. Н., Кузаков К. А., Платонов С. Ю., Сомиков А. В., Шпинькова Л. Г., Яковлева Г. Н., Эффект Мессбаэра. Учебно-методическое пособие. — М.: 2010
3. Белозерский Г. Н. Мессбаэровская спектроскопия как метод исследования поверхностей. М., 1990
4. А. М. Афанасьев, Мессбаэра эффект, Физическая энциклопедия, том 3, стр. 100, Москва 1992.