

Мёссбауэра эффект - резонансное поглощение γ -квантов атомными ядрами, наблюдаемое, когда источник и поглотитель γ -излучения - твёрдые тела, а энергия γ -квантов невелика (~ 150 кэВ). Иногда М. э. называется резонансным поглощением без отдачи, или ядерным гамма-резонансом (ЯГР).

При облучении вещества γ -квантами наряду с обычными процессами взаимодействия возможно резонансное поглощение γ -квантов ядрами, при котором γ -квант исчезает, а ядро возбуждается, т. е. переходит в состояние с большей внутренней энергией.

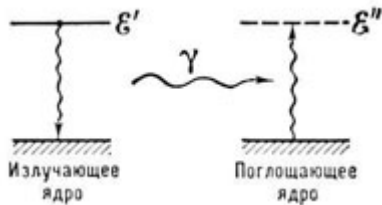


Рис.1.

Это явление аналогично резонансному поглощению световых квантов атомами. Необходимое условие резонансного поглощения состоит в том, чтобы энергия, которую квант расходует на возбуждение ядра, равнялась бы в точности энергии квантового перехода, т. е. разности внутренних энергий ядра в возбуждённом и основном состояниях. На первый взгляд это условие автоматически удовлетворяется, когда излучающие и поглощающие ядра одинаковы (рис.1).

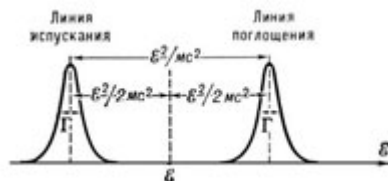


Рис. 2.

Однако γ -квант с энергией E обладает импульсом $p = E/c$ (где c - скорость света), и по закону сохранения импульса при излучении или поглощении кванта ядром последнее испытывает отдачу. Излучающее ядро массы M , получив импульс приобретает кинетическую энергию $DE = p^2/2M = E^2/2Mc^2$. Т. о., часть энергии γ -перехода трансформируется в кинетическую энергию ядра и энергия испущенного кванта меньше полной энергии γ -перехода на величину DE . Такая же энергия DE передаётся свободному (покоящемуся) ядру и в процессе поглощения. Поэтому для достижения резонанса падающий на ядро γ -квант должен иметь энергию на величину DE большую, чем энергия перехода. В результате линии испускания и поглощения оказываются смещёнными друг относительно друга на величину $2DE = E^2/Mc^2$ (Рис. 2).

Величина DE составляет весьма небольшую долю от энергии перехода E , однако DE всегда значительно превосходит ширину линии излучения. Поэтому линии испускания и поглощения почти не перекрываются и вероятность резонансного поглощения γ -квантов чрезвычайно мала. Например, для γ -излучения 14,4 кэВ (ядра ^{57}Fe) $DE \approx 2 \cdot 10^{-3}$ эВ, тогда как естественная ширина линии $\Gamma \approx 4,6 \cdot 10^{-9}$ эВ.

Обычно ядра входят в состав твёрдых тел или жидкостей, т. е. не являются свободными, однако в большинстве случаев потеря энергии DE из-за отдачи практически не отличается от рассмотренного выше случая свободных и неподвижных ядер. Кроме того, ширины линий γ -излучения обычно существенно превосходят естественные ширины Γ вследствие доплеровского уширения, возникающего при тепловом движении атомов.

Однако при комнатной температуре перекрытие линий испускания и поглощения остаётся всё же незначительным. При наблюдении резонансного поглощения света атомами аналогичная трудность, как правило, не возникает: из-за малой энергии фотона энергия отдачи мала и смещения линий испускания и поглощения незначительны. Чтобы сделать резонансное поглощение γ -квантов наблюдаемым, приходится искусственно увеличивать перекрытие линий испускания и поглощения. Для этого используют сдвиг линий за счёт эффекта Доплера, при встречном движении излучающего и поглощающего ядер.

В осуществлённых экспериментах необходимая скорость движения (сотни м/сек) сообщалась одним из трёх способов: путём механического перемещения источника или поглотителя; за счёт отдачи, испытываемой ядром, если излучению γ -кванта предшествует α - или β -распад; за счёт нагревания источника и поглотителя до высокой температуры. В 1958 Р. Мёссбауэр обнаружил, что для ядер, входящих в состав твёрдых тел, при малых энергиях γ -переходов может происходить испускание и поглощение γ -квантов без потери энергии на отдачу. В спектрах испускания и поглощения наблюдаются несмещённые линии с энергией, в точности равной энергии γ -перехода, причём ширины этих линий равны (или весьма близки) естественной ширине Γ . В этом случае линии испускания и поглощения перекрываются, что позволяет наблюдать резонансное поглощение γ -квантов. Это явление, получившее наименование М. э., обусловлено коллективным характером движения атомов в твёрдом теле. Благодаря сильному взаимодействию атомов в твёрдых телах энергия отдачи передаётся не отдельному ядру, а превращается в энергию колебаний кристаллической решётки, иными словами, отдача приводит к рождению фононов. Но если энергия отдачи (рассчитанная на одно ядро) меньше средней энергии фонона, характерной для данного кристалла, то отдача не каждый раз будет приводить к рождению фонона. В таких "бесфононных" случаях отдача не изменяет внутренней энергии кристалла. Кинетическая же энергия, которую приобретает кристалл в целом, воспринимая импульс отдачи γ -кванта, пренебрежимо мала. Передача импульса в этом случае не будет сопровождаться передачей энергии, а поэтому положение линий испускания и поглощения будет точно соответствовать энергии E перехода.

Вероятность такого процесса достигает нескольких десятков %, если энергия γ -перехода достаточно мала; практически М. э. наблюдается только при $DE \ll 150$ кэВ (с увеличением E вероятность рождения фононов при отдаче растёт). Вероятность М. э. сильно зависит также от температуры. Часто для наблюдения М. э. необходимо охлаждать источник γ -квантов и поглотитель до температуры жидкого азота или жидкого гелия, однако для γ -переходов очень низких энергий (например, $E = 14,4$ кэВ для γ -перехода ядра ^{57}Fe или $23,8$ кэВ для γ -перехода ядра ^{119}Sn) М. э. можно наблюдать вплоть до температур, превышающих 1000 °С. При прочих равных условиях вероятность М. э. тем больше, чем сильнее взаимодействие атомов в твёрдом теле, т. е. чем больше энергия фононов. Поэтому вероятность М. э. тем выше, чем больше дебаевская температура кристалла.

Существенным свойством резонансного поглощения без отдачи, превратившим М. э. из лабораторного эксперимента в важный метод исследования, является чрезвычайно малая ширина линии. Отношение ширины линии к энергии γ -кванта при М. э. составляет, например, для ядер ^{57}Fe величину $\sim 10^{-13}$, а для ядер ^{67}Zn $\sim 5,2 \cdot 10^{-16}$. Такие ширины линий не достигнуты даже в газовом лазере, являющемся источником самых узких линий в инфракрасном и видимом диапазоне электромагнитных волн.

С помощью М. э. оказалось возможным наблюдать процессы, в которых энергия γ -кванта на чрезвычайно малую величину (Γ или даже небольших долей Γ) отличается от энергии перехода ядер поглотителя. Такие изменения энергии приводят к смещению линий испускания и

поглощения друг относительно друга, что влечёт за собой изменение величины резонансного поглощения, которое может быть измерено. Возможности методов, основанных на использовании М. э., хорошо иллюстрирует эксперимент, в котором удалось измерить в лабораторных условиях предсказанное теорией относительности изменение частоты кванта электромагнитного излучения в гравитационное поле Земли. В этом эксперименте (Р. Паунда и Г. Ребки, США, 1959) источник g -излучения был расположен на высоте 22,5 м над поглотителем. Соответствующее изменение гравитационного потенциала должно было привести к относительному изменению энергии g -кванта на величину $2,5 \cdot 10^{-15}$. Сдвиг линий испускания и поглощения оказался в соответствии с теорией. Под влиянием внутренних электрических и магнитных полей, действующих на ядра атомов в твёрдых телах, а также под влиянием внешних факторов (давление, внешние магнитные поля) могут происходить смещения и расщепления уровней энергии ядра, а следовательно, изменения энергия перехода. Т. к. величины этих изменений связаны с микроскопической структурой твёрдых тел, изучение смещения линий испускания и поглощения даёт возможность получить информацию о строении твёрдых тел. Эти сдвиги могут быть измерены с помощью мёссбауэровских спектрометров. Если g -кванты испускаются источником, движущимся со скоростью v относительно поглотителя, то в результате эффекта Доплера энергия g -квантов, падающих на поглотитель, изменяется на величину Ev/c (для ядер, обычно применяемых при наблюдении М. э., изменение энергии E на величину G соответствует значениям скоростей v от 0,2 до 10 мм/сек). Измеряя зависимость величины резонансного поглощения от v (спектр мёссбауэровского резонансного поглощения), находят то значение скорости, при котором линии испускания и поглощения находятся в точном резонансе, т. е. когда поглощение максимально. По величине v определяют смещение ΔE между линиями испускания и поглощения для неподвижных источника и поглотителя.

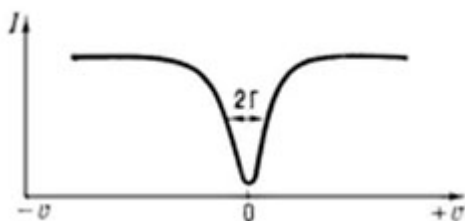


Рис.3 а.

На рис. 3 а, показан спектр поглощения, состоящий из одной линии: линии испускания и поглощения не смещены друг относительно друга, т. е. находятся в точном резонансе при $v = 0$. Форма наблюдаемой линии может быть с достаточной точностью описана лоренцевой кривой (или Брейта - Вигнера формулой) с шириной на половине высоты $2G$. Такой спектр наблюдается только в том случае, когда вещества источника и поглотителя химически тождественны и когда на ядра атомов в этих веществах не действуют ни магнитное, ни неоднородное электрическое поля. В большинстве же случаев в спектрах наблюдаются несколько линий (сверхтонкая структура), обусловленных взаимодействием атомных ядер с внеядерными электрическими и магнитными полями.

Характеристики сверхтонкой структуры зависят как от свойств ядер в основном и возбуждённом состояниях, так и от особенностей структуры твёрдых тел, в состав которых входят излучающие и поглощающие ядра. Важнейшими типами взаимодействий атомного ядра с внеядерными полями являются электрическое монополюсное, электрическое квадрупольное и магнитное дипольное взаимодействия.

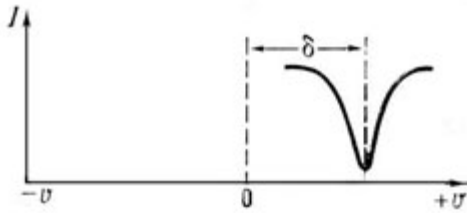


Рис. 3 б.

Электрическое монополюное взаимодействие представляет собой взаимодействие ядра с электростатическим полем, создаваемым в области ядра окружающими его электронами; оно приводит к возникновению в спектре поглощения сдвига линии (рис. 3 б), если источник и поглотитель химически не тождественны или если распределение электрического заряда в ядре неодинаково в основном и возбуждённом состояниях.

Этот т. н. изомерный или химический сдвиг пропорционален электронной плотности в области ядра, и его величина является важной характеристикой химической связи атомов в твёрдых телах. По величине этого сдвига можно судить об ионном и ковалентном характере химической связи, об эффективных зарядах атомов в химических соединениях, об электроотрицательности атомов, входящих в состав молекул, и т.д. Исследование химических сдвигов позволяет также получать сведения о распределении заряда в атомных ядрах.

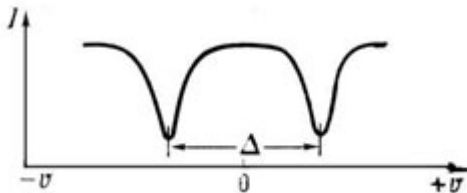


Рис. 3 с.

Электрическое квадрупольное взаимодействие - взаимодействие квадрупольного момента ядра с неоднородным электрическим полем приводит к расщеплению ядерных уровней, в результате чего в спектрах поглощения наблюдается не одна, а несколько линий. Например, для ядер ^{57}Fe , ^{119}Sn и ^{125}Te в спектрах поглощения наблюдаются две линии (квадрупольный дублет, рис. 3 с).

Разность энергии между компонентами дублета D пропорциональна произведению квадрупольного момента ядра на градиент электрического поля в области ядра. Т. к. величина градиента электрического поля является характеристикой симметрии зарядов, окружающих ядро в твёрдом теле, то исследование квадрупольного взаимодействия позволяет получить информацию об электронных конфигурациях атомов и ионов, об особенностях структуры твёрдых тел, а также о квадрупольных моментах атомных ядер. Магнитное дипольное сверхтонкое взаимодействие обычно наблюдается в магнитоупорядоченных (ферро-, антиферро-, ферримагнитных) веществах, в которых на ядра атомов действуют сильные магнитные поля H , достигающие величины $\sim 10^6$ э. Энергия магнитного дипольного взаимодействия пропорциональна произведению магнитного момента ядра на H и зависит от ориентации магнитного поля.

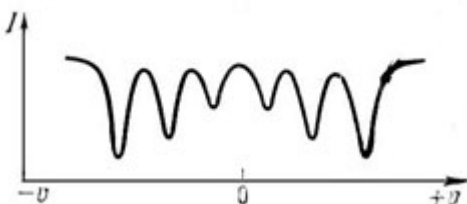


Рис. 3 д.

Поэтому магнитное дипольное взаимодействие приводит к расщеплению основного и возбуждённых уровней ядер, в результате чего в спектре поглощения наблюдаются несколько линий, число которых соответствует числу возможных g -переходов между магнитными подуровнями основного и возбуждённых состояний (эффект Зеемана). Например, для ядра ^{57}Fe число таких переходов равно 6 (рис. 3 d).

По расстоянию между компонентами магнитной сверхтонкой структуры можно определить напряжённость магнитного поля, действующего на ядро в твёрдом теле. Величины этих полей очень чувствительны к особенностям электронной структуры твёрдого тела, к составу магнитных материалов, поэтому исследование магнитной сверхтонкой структуры широко используется для изучения магнитных свойств кристаллов.

Важной для физики твёрдого тела характеристикой М. э. является также его вероятность. Измерение вероятности М. э. и её зависимости от температуры позволяет получить сведения об особенностях взаимодействия атомов в твёрдых телах и о колебаниях атомов в кристаллической решётке.

Измерения, в которых используется М. э., отличаются высокой избирательностью, т.к. в каждом эксперименте резонансное поглощение наблюдается только для ядер одного сорта. Эта особенность метода позволяет эффективно использовать М. э. в тех случаях, когда атомы, на ядрах которых наблюдается М. э., входят в состав твёрдых тел в виде примесей. М. э. успешно используется для исследования электронных состояний примесных атомов в металлах и полупроводниках и для изучения особенностей колебаний примесных атомов в кристаллах. М. э. находит также применение в биологии (например, исследование электронной структуры гемоглобина, в геологической разведке (экспресс-анализ руд), для целей химического анализа, для измерения скоростей и вибраций и т.п. М. э. наблюдался для 73 изотопов 41 элемента; самым лёгким среди них является ^{40}K , самым тяжёлым - ^{243}At .

Лит.: Эффект Мессбауэра. Сб. ст., под ред. Ю. Кагана, М., 1962; Мёссбауэр Р., Эффект РК и его значение для точных измерений, в сборнике: Наука и человечество, М., 1962; Фраунфельдер Г., Эффект Мёссбауэра, пер. с англ., М., 1964; Вертхейм Г., Эффект Мёссбауэра, пер. с англ., М., 1966; Шпинель В. С., Резонанс гамма-лучей в кристаллах, М., 1969; Химические применения мессбауэровской спектроскопии, пер. с англ., под ред. В. И. Гольданского [и др.], М., 1970; Эффект Мессбауэра. Сб. переводов статей, под ред. Н. А. Бургова и В. В. Складяревского, пер. с англ., нем., М., 1969.

Н. Н. Делягин.

Материалы предоставлены проектом Рубрикон

© 2001 Russ Portal Company Ltd.

© 2001 "Большая Российская энциклопедия"