



Рудольф Мёссбауэр отвечает на вопросы редакции журнала «Квант»

В 1958 году немецкий физик Рудольф Мёссбауэр обнаружил эффект, названный его именем, — явление резонансного поглощения, испускания и рассеяния гамма-квантов ядрами в твердых телах без потери энергии кванта на отдачу ядру. Через три года за эту работу он получил Нобелевскую премию.

Прошло четверть века с момента открытия. На основе эффекта Мёссбауэра разработаны новые методы исследования веществ — мёссбауэровская спектроскопия и мёссбауэрография, которые применяются в различных областях физики, техники, химии, биологии, медицины.

В сентябре 1982 года профессор Мёссбауэр был избран иностранным членом АН СССР. Мы встретились с ним и попросили ответить на наши вопросы.

— Какие, по Вашему мнению, проблемы в физике наиболее актуальны?

— Проблем в физике очень много. Наибольший прогресс следует ожидать в области элементарных частиц. Здесь выделяются вопросы об устойчивости протона, массе нейтрино и существовании монополя Дирака. Конечно, много проблем в астрофизике и космологии. С другой стороны, следует отметить такую важную область, как биофизика. Сейчас, например, начали изучать динамику больших биологических молекул. Наконец, важнейшая проблема, которую я рассматриваю как некий аспект инженерных проблем, — это управляемый термоядерный синтез. Многие открытия делаются случайно, трудно прогнозировать реальные сроки решения отдельных вопросов.

— Как Вы стали физиком?

— В школе мне нравились и математика, и физика; я увлекался также химией. Любил экспериментировать. Очень интересовался электроникой. Вместе с группой товарищей мы делали телефоны, усилители. Именно увлечение электроникой оказало решающее влияние на мой выбор, и я стал физиком.

— Советуете ли Вы молодым людям получать физическое образование, становиться физиками?

— Конечно. Физика изучает фундаментальные явления. Физическое образование позволяет легко переключиться, если возникнет необходимость перейти в другие области исследований, например, в биологию или химию. Физические закономерности используются везде.

— Каким должно быть современное образование?

— Я считаю, что нет необходимости в прямом смысле изменять систему образования, ее нужно приспособить к нуждам современной науки. В физическом образовании очень важно понимать основополагающие моменты, а не уделять слишком много внимания частностям. Сейчас современная электроника, микрокомпьютеры и ЭВМ вторгаются в жизнь буквально каждого человека. Этот факт следует также учитывать даже на самой начальной стадии образования.

— Какая математика нужна физики?

— Хотя часто физики в своей работе опираются на интуитивные соображения, знание математики необходимо. Чем лучше физик знает математику, тем успешнее он сможет работать. Нужно хорошо владеть практической математикой. Математика — язык физика. Однако следует различать потребности в математике для физика-теоретика и физика-экспериментатора. Существует опасность слишком увлекаться компьютерами. Многие молодые люди настолько полагаются на них, что перестают сами думать.

— Ваши пожелания читателям «Кванта».

— Учиться настойчиво и плодотворно. За годы учебы много усвоить. Изучая математику и физику, не забывать, что это только часть общечеловеческой науки и культуры.

Эффект Мёссбауэра или резонансное ядерное поглощение γ -квантов в кристаллах

Кандидат физико-математических наук
Ю. А. САМАРСКИЙ

Немного о резонансе

Даже людям, далеким от физики, хорошо знакомы самые разнообразные явления резонанса. Кто не крутил ручку радиоприемника, настраиваясь на нужную волну? Или не слышал дребезжания стекол в оконной раме от проходящего мимо трамвая? Многие, наверное, помнят фольклорную историю о том, как рота солдат, шагая строем по мосту и случайно попав в такт с его собственными колебаниями, рухнула вместе с мостом в реку.

В этих и многих других случаях резонанс — резкое возрастание амплитуды колебаний — возникает при совпадении частоты внешнего воздействия на систему с собственной частотой колебаний этой системы. Если вблизи рояля сыграть на музыкальном инструменте какую-нибудь ноту, рояль откликнется звучанием именно этой ноты: частота звука, издаваемого инструментом (частота внешнего воздействия), совпадает с собственной частотой колебаний соответствующей струны рояля.

Для приемного контура радиоприемника внешнее воздействие — это радиоволны от передающей станции, а собственная частота определяется параметрами контура — сопротивлением, индуктивностью и емкостью, которые мы меняем, вращая ручку настройки.

На примере радиоприема удобно обсудить и еще одну сторону явле-

ния резонанса. Кроме частоты, на которую мы хотим настроить приемник, очень важна точность настройки. У хорошего приемника даже ничтожный поворот ручки резко меняет условие приема. Это означает, что приемный контур обладает острым резонансом. Величина, характеризующая остроту резонанса, называется добротностью Q и определяется отношением резонансной частоты ν_p к ширине $\Delta\nu$ того интервала частот, в котором удается наблюдать резонансное явление (рисунок 1):

$$Q = \frac{\nu_p}{\Delta\nu}. \quad (1)$$

В современных радиотехнических контурах добротность составляет примерно $200 \div 300$.

Резонанс в атоме

Типичными резонансными системами являются также атомы, молекулы и атомные ядра.

Наука о законах движения микрочастиц — квантовая механика — смогла объяснить многие явления, происходящие в атоме, и, в частности, способность атомов поглощать и испускать фотоны лишь с определенной энергией.

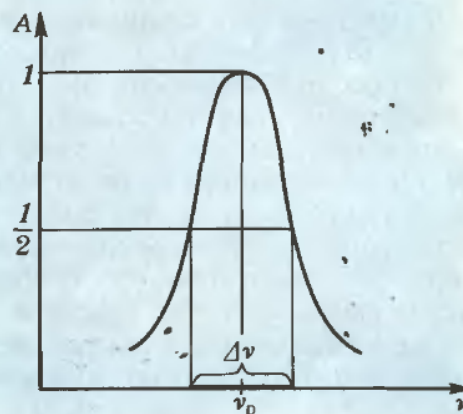


Рис. 1. Типичный вид резонансной кривой. В нашем случае она изображает зависимость амплитуды колебаний A приемного контура от частоты ν передающей станции. Наиболее интенсивные колебания в контуре будут наблюдаться при частоте $\nu = \nu_p$. Величина $\Delta\nu$, взятая на половине высоты кривой, называется шириной резонансной кривой.

Процесс излучения фотона одиночным свободным атомом впервые был рассмотрен Нильсом Бором.

Бор пришел к выводу, что электрон в атоме может обладать только дискретными значениями энергии $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_n, \dots$. Каждому такому значению энергии соответствует устойчивое (стационарное) состояние атома, в котором атом не излучает и не поглощает.

Атом может переходить из одного энергетического состояния в другое, или, как говорят, с одного энергетического уровня на другой. Излучение фотона происходит при переходе атома с уровня с большей энергией на уровень с меньшей энергией. Самый низкий энергетический уровень атома называют основным, а остальные — возбужденными. При поглощении фотона атом переходит в возбужденное состояние, занимая уровень с большей энергией. Время жизни τ атома в возбужденном состоянии обычно составляет $10^{-8} - 10^{-7}$ с, после чего он самопроизвольно (спонтанно) переходит на более низкие энергетические уровни, испуская фотоны. Энергия испускаемого (поглощаемого) фотона связана с энергией уровней, между которыми совершается переход, условием Бора:

$$E_n - E_k = h\nu_{nk}, \quad (2)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, а ν_{nk} — частота излучения (мы поместили ее двумя индексами — n и k , чтобы подчеркнуть, что процесс излучения связан с двумя значениями энергии атома).

Графически процесс излучения (поглощения) изображают стрелками, соединяющими те два энергетических уровня, при переходе между которыми происходит испускание (поглощение) фотона (рисунок 2; E_1 — основной уровень, остальные — возбужденные). Частоты соответствующих переходов обычно называют спектральными линиями.

Согласно уравнению (2), частота излучения ν_{nk} должна быть строго фиксирована, если энергии E_n и E_k строго определены. Другими словами, при переходе $E_n \rightarrow E_k$ должна возникать идеальная монохроматическая, то есть бесконечно узкая,

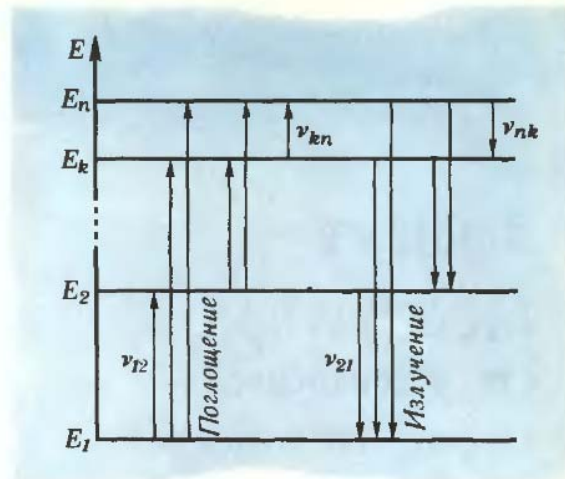


Рис. 2.

спектральная линия. На самом деле все спектральные линии имеют конечную ширину. При точном квантовомеханическом рассмотрении оказывается, что каждый возбужденный энергетический уровень не бесконечно узок, а «размыт», он имеет так называемую естественную ширину ΔE , которую обозначают Γ . Естественная ширина уровня Γ и время жизни τ атома в данном возбужденном состоянии связаны соотношением

$$\Gamma \tau = \frac{h}{2\pi}. \quad (3)$$

Чем больше время жизни уровня, тем точнее фиксирована его энергия, чем меньше время жизни — тем более он «размыт». Соотношение (3) носит название принципа неопределенности Гейзенберга для энергии.

На рисунке 3, а изображены основной и первый возбужденный энергетические уровни свободного атома (для простоты энергию основного уровня условно принимают за нуль).

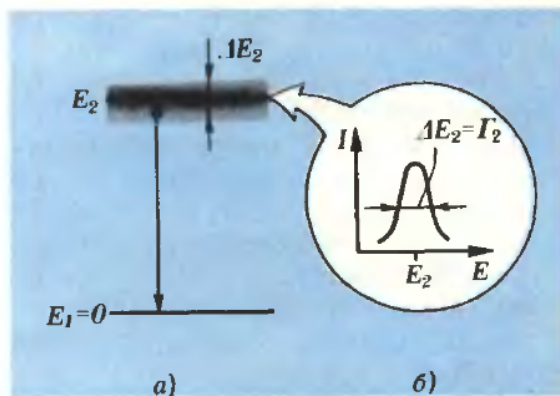


Рис. 3.

Если отложить по оси абсцисс энергию атома, а по оси ординат — вероятность найти атом в состоянии с данной энергией, то получится характерная резонансная кривая (рис. 3,б). Ширина этой кривой на половине высоты и называется естественной шириной линии Γ .

Наличие естественной ширины приводит к тому, что при переходе атома с одного возбужденного уровня на более низкий, в том числе и на основной уровень, существует разброс по энергии и, следовательно, по частоте излучаемых фотонов, который принципиально нельзя уменьшить. Так, для перехода, изображенного на рисунке 3, «размытие» энергии фотонов равно Γ_2 , что соответствует разбросу по частоте

$$\Delta\nu_{21} = \Gamma_2/h = 1/2\pi\tau_2,$$

где τ_2 — время жизни атома в состоянии E_2 . Иными словами, для данного перехода спектральная линия $\nu_{21} = E_{21}/h$ имеет ширину $\Delta\nu_{21} = 1/2\pi\tau_2$.

В основном состоянии атом может находиться бесконечно долго ($\tau \rightarrow \infty$), поэтому (см. (3)) естественная ширина основного уровня $\Gamma_1 = 0$.

Для уровней с временем жизни $\tau \approx 10^{-8}$ с естественная ширина составляет

$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{6,28 \cdot 10^{-8} \text{ с} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1}} \approx 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ эВ} \approx 10^{-7} \text{ эВ.}^*)$$

Она оказывается существенно меньше энергии перехода (то есть разности энергий между самими уровнями), которая для видимого света — порядка электронвольта.

Итак, если попадающий в атом фотон имеет энергию, равную разности энергий между основным и каким-либо возбужденным уровнем, то атом может поглотить фотон и перейти на данный возбужденный уровень. Через время $\tau \approx 10^{-8}$ с атом вновь вернется в основное состояние, как правило, испустив такой же фотон. Этот процесс возможен для фотонов только определенной энергии и носит, таким образом, резонансный характер.

Впервые был обнаружен и стал широко известен оптический резонанс, связанный с излучением и поглощением атомами натрия «желтой линии» с длиной волны $\lambda = 5890 \text{ \AA} = 5890 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, то есть с частотой $\nu = c/\lambda = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света). Энергия фотонов, соответствующих этому излучению, — $E = h\nu = 2,1 \text{ эВ}$. Резонанс был открыт Робертом Вудом в 1904 году.

Интересно, какова добротность этого резонанса? Атомы натрия излучают желтый свет (желтую линию) при переходе с возбужденного уровня, время жизни которого $\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Отсюда естественная ширина уровня —

$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} \approx 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ эВ},$$

а ширина резонансной линии —

$$\Delta\nu = \frac{\Gamma}{h} = \frac{1}{2\pi\tau} \approx 1,06 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда, согласно (1), добротность резонанса равна

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{E}{\Gamma} \approx 4,8 \cdot 10^7.$$

Мы видим, что оптический резонанс в сотни тысяч раз острее привычного резонанса в радиотехнике. Следует отметить, что добротность такого порядка типична для атомных и молекулярных систем.

А теперь обратимся к ядерному γ -резонансу.

Резонанс γ -квантов

Атомные ядра, как и электроны в атоме, могут находиться в различных дискретных энергетических состояниях, то есть на различных энергетических уровнях. Как и у атома, самый низкий из уровней называется основным, остальные уровни носят название возбужденных. Возбужденные, то есть радиоактивные ядра могут быть получены разными путями: в результате бомбардировки их заряженными или нейтральными частицами, в результате поглощения ядрами фотонов и т. д. Ядра, находящиеся в возбужденных состояниях, могут переходить на более низкие энергетические уровни, в том числе и на

*) В физике микромира энергию принято выражать в электронвольтах: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

основной. Такие переходы происходят самопроизвольно. Освобождающаяся энергия уносится фотонами. Эта энергия обычно заключена между несколькими сотнями и несколькими миллионами электронвольт, то есть на много порядков больше энергии видимого света. Так возникает γ -излучение. Наблюдаемый спектр γ -лучей всегда дискретный, что и позволяет говорить о дискретности ядерных уровней. Схема энергетических уровней для ядерных переходов изображается совершенно аналогично схеме переходов в атоме. Как и в атоме, из-за конечного времени жизни возбужденные уровни ядра имеют естественную ширину Γ (см. рисунок 3). Размытость возбужденных уровней ядра приводит к появлению ширины у спектральных линий γ -излучения.

Ядра атомов могут не только испускать, но и поглощать фотоны. Этот процесс возможен лишь для γ -квантов определенных энергий и, следовательно, тоже носит резонансный характер.

Казалось бы, резонансное поглощение γ -лучей должно легко наблюдаться. Для этого достаточно пропустить поток γ -квантов, испущенных радиоактивным источником, через вещество-поглотитель, содержащий те же ядра в невозбужденном (основном) состоянии. Однако это не так. Дело в том, что энергия E_γ , уносимая γ -квантом, оказывается меньше энергии перехода между уровнями, и ее недостаточно для возбуждения ядра-поглотителя. Хотя и небольшая, но заметная доля энергии уносится ядром-источником, которое, согласно закону сохранения импульса, начинает двигаться в сторону, противоположную направлению вылета γ -кванта (как орудие после выстрела).

Проведем некоторые простые оценки для свободного ядра (атома).

Пусть излучающее ядро свободно и первоначально покоится, а испускаемый γ -квант соответствует ядерному переходу с первого возбужденного уровня на основной (рисунок 3). Согласно закону сохранения импульса, после испускания γ -кванта ядро получит импульс отдачи, равный по абсолютной величине импульсу

γ -кванта: $p_\gamma = p_\gamma = E_\gamma/c$. В результате ядро начнет двигаться со скоростью $v_\gamma = p_\gamma/m_\gamma$, унося энергию отдачи R , равную

$$R = \frac{m_\gamma v_\gamma^2}{2} = \frac{p_\gamma^2}{2m_\gamma} = \frac{E_\gamma^2}{2m_\gamma c^2}. \quad (4)$$

По закону сохранения энергии, $E_\gamma + R = E_{21}$, где E_{21} — расстояние (разность энергий) между основным и первым возбужденным уровнями ядра. Поскольку всегда $R \ll E_\gamma$, в формуле (4) E_γ можно заменить на энергию перехода E_{21} :

$$R \approx \frac{E_{21}^2}{2m_\gamma c^2}. \quad (5)$$

Оценим величину R . Рассмотрим в качестве примера ядро изотопа ^{119}Sn , у которого $E_{21} = 2,38 \cdot 10^4$ эВ, время жизни возбужденного уровня $\tau = 1,8 \cdot 10^{-8}$ с, а естественная ширина этого уровня — $\Gamma_2 = h/2\pi\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ эВ. Энергия отдачи в этом случае составляет

$$R \approx \frac{E_{21}^2}{2m_\gamma c^2} \approx \frac{(2,38 \cdot 10^4)^2 (\text{эВ})^2}{2 \cdot 119 \cdot 10^9 \text{ эВ}} \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ.}^*)$$

Энергия, которая расходуется на отдачу ядра, поглощающего γ -квант, оказывается точно такой же. Эта картина показана на рисунке 4: линия испускания смещена на величину R влево от E_2 , а линия поглощения — на столько же вправо от E_2 (расстояния по оси E даны условно).

Какое же влияние оказывает сдвиг R на резонансное поглощение γ -квантов? Сама по себе величина R не представляет существенного интереса, важно соотношение между R и шириной Γ резонансной линии. Легко видеть, что резонансное поглощение возможно только в случае, если спектры испускания и поглощения перекрываются, то есть при условии

$$2R \leq \Gamma. \quad (6)$$

А это условие почти никогда не выполняется для γ -переходов в свобод-

*) Напомним, что число, стоящее слева от символа изотопа, представляет собой массу ядра (атома) изотопа, выраженную в атомных единицах массы (а. е. м.). По определению 1 а. е. м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Обозначим ее через m_0 . Тогда энергия, соответствующая 1 а. е. м., равна $m_0 c^2 = 931,5 \text{ МэВ} \approx 10^9 \text{ эВ}$. Следовательно, для ядра олова ^{119}Sn энергия, соответствующая $m_\gamma c^2$, численно равна $119 \cdot 10^9 \text{ эВ}$.

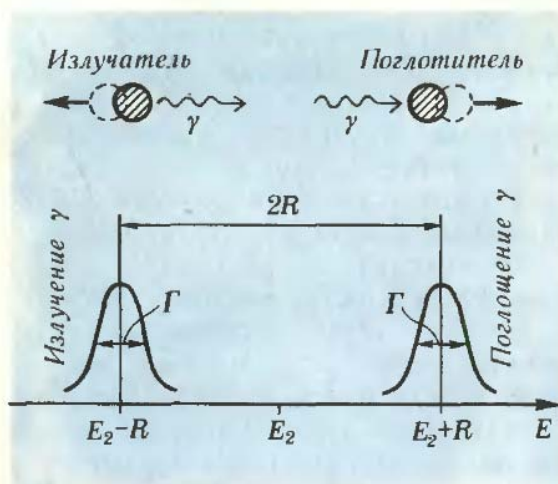


Рис. 4.

ных ядрах, то есть в случаях, когда можно пренебречь энергией связи ядер в веществе. Так, для рассмотренного свободного ядра ^{119}Sn ширина Γ на пять порядков, то есть в сотню тысяч раз, меньше R . Понятно, что в этом случае наблюдать резонансное поглощение γ -квантов невозможно.

Почему же тогда энергия отдачи не помешала наблюдению оптического резонанса для желтой линии натрия? Или там отдачи вовсе нет? Отдача, конечно, существует и там, но посмотрим, какова ее величина. Масса атома натрия равна 22 а. е. м., и энергия отдачи равна

$$R = \frac{(h\nu)^2}{2M_{\text{Na}}c^2} = \frac{(2,1)^2 (\text{эВ})^2}{2 \cdot 22 \cdot 10^9 \text{ эВ}} \approx 10^{-10} \text{ эВ!}$$

Она оказывается ничтожно малой по сравнению с естественной шириной уровня $\Gamma \approx 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}$.

Как же все-таки наблюдать γ -резонанс? В принципе, можно компенсировать энергетический сдвиг $2R$ с помощью эффекта Доплера, который состоит в изменении частоты излучения, а значит, энергии фотонов, при движении источника (или поглотителя)*). Действительно, если движение отдачи разрушает резонанс, то противоположное, компенсирующее отдачу движение должно восстановить его. Но какова при этом должна быть скорость движения?

Рассмотрим случай, когда поглощающее ядро покоится, а излучаю-

щее ядро движется к нему навстречу. Пусть частота излучения неподвижного ядра-источника равна ν_γ . Тогда при движении этого ядра со скоростью v частота его излучения изменится, и по отношению к неподвижному ядру-поглотителю будет равна $\nu = (1 + v/c) \nu_\gamma$. Соответственно, энергия испускаемых фотонов будет $E = h\nu = (1 + v/c) h\nu_\gamma = (1 + v/c) E_\gamma$, где $E_\gamma = h\nu_\gamma$ — энергия фотонов, которые испускало бы неподвижное ядро-источник.

Итак, при движении ядра-источника «навстречу» энергия испускаемых им фотонов, попадающих на неподвижное ядро-поглотитель, увеличивается на величину

$$\delta E = E - E_\gamma = E_\gamma \frac{v}{c}. \quad (7)$$

Если окажется, что $\delta E = 2R$, то должен наблюдаться γ -резонанс. Пользуясь формулой (7), легко рассчитать, при какой скорости v выполняется это условие:

$$v = c \frac{2R}{E_\gamma}. \quad (8)$$

Так, для ядер ^{119}Sn эта скорость равна примерно 60 м/с.

Основанные на этой идее опыты на ядрах ртути были проведены в 1953 году П. Муном и А. Сторустом. Они смонтировали источник с возбужденными ядрами ртути на плече центрифуги. Плечо приводилось во вращение, и тогда наблюдался резонанс в покоящемся ртутном поглотителе. Скорость движения, необходимая для компенсации ядерной отдачи в ртути, была порядка скорости звука! Подобные опыты по γ -резонансу имели ограниченное применение, были технически сложны и поэтому проводились крайне редко.

Так продолжалось до 1958 года, когда положение радикально изменилось благодаря открытию молодого немецкого физика Рудольфа Мёссбауэра. Открытие состояло в том, что Мёссбауэр нашел, как избежать затраты части энергии на отдачу ядер и наблюдать γ -резонанс без отдачи. Если опыты Муна и Сторуста показали, как компенсировать отдачу, то опыты Мёссбауэра показали, как ее уничтожить.

*) См. статью Я. Смородинского, А. Урнова «Эффект Доплера» («Квант», 1980, № 8).

Чтобы избавить ружье при выстреле от движения отдачи и тем самым всю энергию заряда передать пуле, надо, очевидно, опереть ружье, связать его с каким-нибудь массивным телом. Но обо что «опереть» ядро, испускающее или поглощающее γ -квант, как сделать его неподвижным? Оказалось, что при определенных условиях ядра можно «закрепить» в решетке кристалла. Именно кристаллическая решетка, в которой ядра прочно «скованы» друг с другом цепями химических связей, и сыграла роль массивного тела, предотвращающего отдачу.

Как же происходит процесс поглощения и испускания γ -квантов ядрами, входящими в состав кристаллической решетки?

Наиболее прост случай, когда энергия отдачи превышает энергию связи ядра в решетке, которая довольно велика — она составляет $10 \div 30$ эВ. Формула (4) показывает, что такой случай реализуется лишь при больших энергиях γ -квантов ($E_\gamma > 1$ МэВ). При этом связь ядра становится несущественной, и мы, по существу, имеем дело со свободным ядром.

При испускании γ -квантов с $E_\gamma < 1$ МэВ энергия отдачи недостаточна для вырывания ядра из кристаллической решетки, а импульс ядра в той или иной форме передается всему кристаллу. Чаще всего энергия отдачи переходит в звуковые колебания решетки. Такой процесс очевиден. В результате отдачи ядро сдвигается со своего места, но не теряет связи с решеткой. Оно отдает свой импульс соседним ядрам, те передают его своим соседям — и в кристаллической решетке возбуждается механическая волна.

Известно, что кристаллическая решетка это квантовая система, которая, подобно атому, не может возбуждаться произвольным образом. «Вследствие квантования собственной энергии кристалла он может поглощать энергию отдачи лишь дискретными порциями. При понижении температуры вероятность возбуждения собственных уровней кристалла уменьшается, поэтому при испускании γ -квантов малой энергии

($E_\gamma \lesssim 100$ кэВ) некоторая часть переходов происходит так, что импульс отдачи воспринимает весь кристалл в целом» — писал Р. Мёссбауэр в своей статье. Таким образом, в кристалле возможен случай, когда никакого возбуждения колебаний вообще не происходит! Тогда отдачу испытывает вся решетка как целое. В формулу (5), определяющую энергию отдачи, вместо ядра следует теперь подставлять массу всего кристалла. В результате энергия отдачи понижается на 20 порядков и оказывается много меньше ширины линии Γ . В этом случае γ -резонанс сравнительно легко наблюдается.

Такое упругое, то есть без отдачи, испускание и поглощение γ -квантов в кристаллах и носит название эффекта Мёссбауэра.

Конечно, мы не можем проследить за каждым отдельно взятым атомом или γ -квантом. Все рассмотренные процессы носят случайный характер. Поэтому ясно, что даже при низкой температуре отнюдь не все ядра в кристалле испускают γ -кванты без отдачи, а только некоторая их часть. Чем ниже температура, тем большая доля ядер излучает «резонансные» γ -кванты. В первых опытах Мёссбауэра, где в качестве источника γ -лучей использовался радиоактивный иридий ^{191}Ir , при температуре жидкого азота $T \approx 80$ К доля резонансных квантов не превышала нескольких процентов. В настоящее время известны радиоактивные соединения, в излучении которых даже при комнатной температуре доля резонансных квантов составляет почти половину всего излучения. Для проведения γ -резонансных опытов с такими источниками совсем не требуется их охлаждения.

Замечательной особенностью γ -резонанса является его необычайно высокая добротность. Так, для изотопа олова ^{119}Sn с энергией γ -квантов $E = 2,38 \cdot 10^4$ эВ и шириной резонансного уровня $\Gamma = 3 \cdot 10^{-8}$ эВ добротность равна

$$Q = \frac{E}{\Gamma} \approx 0,8 \cdot 10^{12}.$$

Это почти в 20 тысяч раз лучше, чем для оптического резонанса зна-

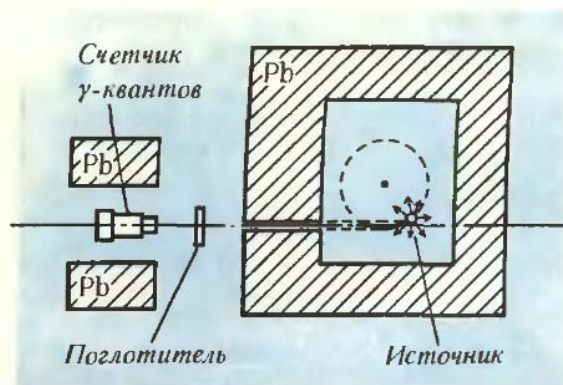


Рис. 5.

менитой желтой линии натрия. Для ядер железа ^{57}Fe добротность γ -резонанса выше еще в три раза, а для цинка ^{67}Zn она равна $2 \cdot 10^{15}$!

Высокая добротность γ -резонанса превратила его в инструмент измерений исключительной точности. Например, для олова достаточно с помощью эффекта Доплера изменить энергию γ -квантов на одну триллионную часть, чтобы уйти за пределы естественной ширины возбужденного уровня и разрушить резонанс. На этом условии «расстройки» основан метод наблюдения резонансного поглощения γ -квантов, предложенный Мёссбауэром. Рассмотрим его.

Пусть ядра источника и поглотителя находятся в идентичных кристаллах и при одинаковой температуре. Тогда линия испускания полностью перекрывается с линией поглощения, и число γ -квантов, резонансно поглощенных поглотителем, будет максимальным при неподвижных источнике и поглотителе ($v=0$). Если теперь поглотителю (или источнику) сообщить небольшую скорость, то произойдет сдвиг линий испускания и поглощения (его называют доплеровским сдвигом), и резонанс будет нарушаться. Такое разрушение резонанса происходит уже при ничтожных скоростях.

Оценим величину скорости для ^{119}Sn . Подставляя в формулу (8) вместо R естественную ширину линии $\Gamma = 3 \cdot 10^{-8}$ эВ, мы найдем, что для нарушения резонанса достаточно перемещать поглотитель или источник со скоростью порядка миллиметра в секунду! (Вместо 60 м/с для получения резонанса на свободных ядрах.) Таким образом, изменяя

энергию γ -квантов с помощью эффекта Доплера можно уходить от резонанса или восстанавливать его.

На рисунке 5 показана схема одной из первых экспериментальных установок Мёссбауэра для наблюдения γ -резонансного поглощения на ядрах иридия ^{191}Ir с энергией γ -квантов $E_\gamma = 129$ кэВ.

Радиоактивный источник, расположенный за свинцовой защитой, мог равномерно вращаться по окружности в ту или другую сторону*). γ -кванты, испускаемые источником при его движении на участке траектории, отмеченном на рисунке 5 жирной линией, попадали на неподвижный поглотитель (иридиевую фольгу). За поглотителем устанавливался счетчик γ -квантов. Благодаря специальному устройству счетчик регистрировал γ -кванты, прошедшие через поглотитель, только в то время, когда источник находился на «рабочем» участке траектории. При изменении угловой скорости вращения источник двигался навстречу поглотителю либо от него с различными строго контролируемыми скоростями.

В эксперименте исследовалась зависимость числа γ -квантов, попадающих в счетчик в единицу времени, от скорости движения источника. Для построения графика использовалась не сама скорость счета, а величина «амплитуды» эффекта, выраженная в процентах:

$$\epsilon(v) = \frac{I(v) - I(\infty)}{I(\infty)} \cdot 100\%,$$

где $I(v)$ — скорость счета квантов, прошедших через поглотитель при некоторой скорости v , $I(\infty)$ — скорость счета квантов при достаточно большой скорости, когда резонансное поглощение отсутствует. Величина $\epsilon(v)$ является отношением, и, следовательно, не зависит от активности источника.

Движение источника навстречу поглотителю или от него приводило благодаря эффекту Доплера к смещению линии испускания в сторону большей или меньшей энергии. Ре-

*) Интересно отметить, что в начале исследований по эффекту Мёссбауэра для перемещения источника или поглотителя с малой скоростью физики использовали диск проигрывателя, суппорт станка, диффузор репродуктора и т. п.

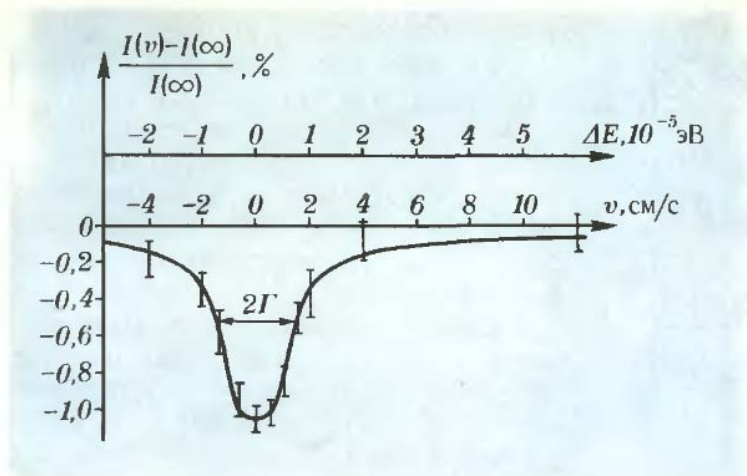


Рис. 6. Минимум скорости счета γ -квантов отвечает, очевидно, максимуму поглощения. В данном опыте источник и поглотитель находились в идентичных кристаллических решетках и потому минимум поглощения приходится на нулевую скорость.

зультаты измерений представлены на рисунке 6.

Такая кривая называется мёссбауэровским или γ -резонансным спектром. Измеряемая на опыте ширина резонансной линии представляет собой результат наложения линий источника и поглотителя. При тонком поглотителе и источнике и при отсутствии вибраций ширина линии равна удвоенной естественной ширине 2Γ . Измерив эту ширину, можно определить время жизни возбужденного состояния.

Дальнейшие работы показали, что любое внешнее воздействие, изменяющее первоначальную энергию ядер, может быть скомпенсировано при помощи относительного движения. Тогда величина изменения может быть определена по значению относительной скорости, необходимой для восстановления резонанса.

Таким образом, открытие Мёссбауэра дало способ точнейшей регистрации изменений энергии (именно изменений этой энергии) γ -квантов и легло в основу целой новой области — мёссбауэровской спектроскопии, в развитие которой заметный вклад внесли советские ученые.

В настоящее время эффект Мёссбауэра обнаружен более чем на 40 элементах таблицы Менделеева.

Применения эффекта Мёссбауэра многочисленны и основаны, главным образом, на использовании мёссбауэровских спектров как источников ценной информации об исследуемом объекте. Остановимся кратко на некоторых приложениях.

Еще совсем недавно трудно было представить, что можно заметить изменения энергии ядерного перехода в зависимости от характера химического окружения ядра. Однако оказалось, что при испускании и поглощении γ -квантов ядрами, входящими в состав химических соединений, максимум линии поглощения может наблюдаться при скорости, отличной от нуля. Это объясняется следующим. Энергия ядерного перехода зависит от электростатических сил взаимодействия ядра с окружающими его электронами. Но вклад этого взаимодействия настолько мал, что непосредственно наблюдаться не может. Однако в опытах по изучению эффекта Мёссбауэра положение меняется. В этом случае влияние электростатических сил на энергетические уровни ядра нужно сравнивать не с энергией γ -перехода, а с шириной линии резонансного поглощения. Смещение максимума мёссбауэровского спектра при этом легко замечается. Такие измерения, следовательно, дают информацию о характере химических связей.

Важным и плодотворным оказалось применение эффекта Мёссбауэра в физике твердого тела. Атомные ядра представляют собой маленькие магнитики, которые взаимодействуют с магнитными и электрическими полями окружающих электронов. Такие взаимодействия существенно влияют на мёссбауэровские спектры и потому могут детально изучаться. Именно с помощью эффекта Мёссбауэра впервые удалось измерить внутренние

(Окончание см. на с. 30)



Загадочный Плутон

Кандидат физико-математических наук
В. А. БРОНШТЭН

В 1930 году, то есть чуть более пятидесяти лет назад, была открыта девятая, самая удаленная от Солнца планета Солнечной системы — Плутон. Сравнительно быстро астрономы определили элементы орбиты новой планеты — среднее расстояние до Солнца, степень вытянутости (эксцентриситет) орбиты и наклонение к плоскости земной орбиты.

Гораздо труднее оказалось определить физические характеристики Плутона — его размеры, массу, плотность. Длительное время почему-то считалось, что по размерам и массе Плутон практически не отличается от Земли. Такие оценки вошли даже в астрономические справочники. Однако в 1950 году астрономы измерили диаметр диска Плутона и нашли его равным примерно 5000 км (напомним, что диаметр Земли $\approx 12\,750$ км). Спустя пятнадцать лет, наблюдения закрытия Плутоном слабой звезды показали, что диаметр планеты еще меньше, во всяком случае не превышает 4400 км.

В начале 70-х годов ученые попытались уточнить массу Плутона по возмущениям, создаваемым им в движении соседней планеты — Нептуна. Они получили оценку массы в 0,11 массы Земли. Но сразу стало ясно, что эта оценка завышена, так как при диаметре даже 4400 км она приводила к нереально большому значению средней плотности Плуто-

на — около 15 г/см^3 *) (из планет Солнечной системы самую большую плотность имеет Земля — $5,5 \text{ г/см}^3$).

Открытие в 1978 году спутника Плутона, названного Хароном, позволило определить массу планеты по периоду обращения и радиусу орбиты ее спутника. Она оказалась равной всего лишь 0,002 массы Земли (то есть в шесть раз меньше массы Луны). Вот почему все попытки определить массу Плутона по возмущениям в движении Нептуна были заранее обречены на неудачу — при такой ничтожной массе Плутон никак не мог влиять на движение своего в 7500 раз более массивного собрата.

Недавно был изобретен новый способ измерения диаметров небесных тел. Это дало возможность определить размеры Плутона с большей точностью, чем прежде. Оказалось, что его диаметр заключен в пределах от 3000 до 3600 км (это примерно в полтора раза меньше диаметра Меркурия, считавшегося самой маленькой планетой Солнечной системы).

Из оценок массы и диаметра следует, что плотность Плутона — от $0,5$ до $0,8 \text{ г/см}^3$. До сих пор планетой с наименьшей плотностью считался Сатурн: его средняя плотность равна $0,7 \text{ г/см}^3$. Уточнение размеров Плутона покажет, не отберет ли он у Сатурна первенства по самой низкой плотности.

И еще один своеобразный рекорд «установлен» Плутоном. Его спутник Харон лишь в двенадцать раз уступает своей планете по массе. Раньше считалось, что наименьшее отношение массы планеты к массе спутника у системы Земля — Луна, где оно равно 81.

Совсем недавно обнаружилось, что блеск Плутона испытывает колебания и кроме того интенсивно ослабевает, несмотря на приближение планеты к Солнцу (перигелий она пройдет в 1990 году). Пока объяснений этому нет. Возможно, будущие исследования прольют свет и на эту загадку.

*) В астрономии принято плотности небесных тел выражать в г/см^3 , а не в единицах СИ. (Прим. ред.)

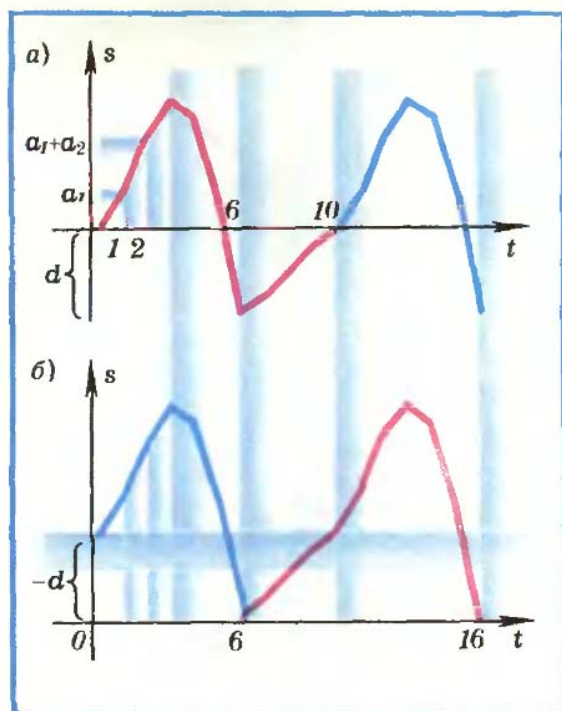


Рис. 7.

перенос начала координат в одну из вершин ломаной. Что означает неотрицательность сумм? Она означает, что все вершины ломаной лежат выше оси времени (или на ней). Сначала мы выбрали начальную точку произвольно (рис. 7, а). Теперь ясно, что если перенести начало координат в вершину ломаной, для которой значение наименьшее, и начать

отсчет от этой точки, то последовательные суммы будут неотрицательны (рис. 7, б).

9. На кольцевой дороге расположено 10 пунктов, в каждом из которых шофер может получить 20 литров бензина. На все кольцо ему нужно все 200 литров. Доказать, что он может так выбрать начальный пункт движения, что забирая по пути бензин, он сможет проехать все кольцо. Ограничений на объем бензобака нет.

10*. Несколько человек наблюдало за неравномерно ползущей улиткой. Каждый наблюдатель следил за улиткой одну минуту и отметил, что средняя скорость улитки на наблюдаемом участке равна 1 см/мин. Улитка ползла 6 минут и при этом в каждый момент времени за ней кто-нибудь наблюдал. Какое наименьшее и какое наибольшее расстояние могла проползти улитка?

Указание. Легко сообразить, что если улитка ползет равномерно, то за 6 минут она проползет 6 см. Попробуйте сначала заставить двигаться улитку и так организовать наблюдение за ней, чтобы она проползла при соблюдении условий задачи больше 6 см и меньше 6 см. «Сдвинувшись» с 6 см, вам проще будет получить правильный ответ.

Эффект Мёссбауэра

(Начало см. на с. 7)

магнитные и электрические поля во многих соединениях. Это позволило глубже понять механизм таких взаимодействий и сделать еще один шаг в познании внутренней структуры твердого тела.

В заключение рассмотрим еще одно интересное применение эффекта Мёссбауэра. Оказывается, при движении фотонов против сил тяготения происходит уменьшение их энергии и, следовательно, частоты света (увеличение длины волны), то есть наблюдается так называемое «красное» смещение спектра. При движении фотонов «по полю» должно наблюдаться «фиолетовое» смещение. Ис-

пользование эффекта Мёссбауэра позволило осуществить чрезвычайно тонкий красивый опыт по определению изменения энергии γ -фотонов при их движении в гравитационном поле.

В опыте Р. Паунда и Г. Ребки источник и поглотитель — железо ^{57}Fe — располагались в башне на высоте $H=22,6$ м друг от друга: источник наверху, а поглотитель с детектором у основания башни. Затем их меняли местами. Как показывает расчет, который мы здесь опускаем, в этом случае относительное изменение частоты квантов $\approx 2,5 \times 10^{-15}$. Эффект Мёссбауэра позволил заметить даже такое небольшое изменение частоты.

Можно с уверенностью сказать, что среди последних научных открытий эффект Мёссбауэра — одно из наиболее плодотворных.