

Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 6.1
(Общая физика: квантовая физика)

Эффект Мессбауэра

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2018 год

Цель работы: С помощью метода доплеровского сдвига мессбауэровской линии поглощения исследовать резонансное поглощение γ -лучей, испускаемых ядрами олова ^{119}Sn в соединении BaSnO_3 при комнатной температуре. Определить положение максимума резонансного поглощения, его величина, а также экспериментальная ширина линии $\Gamma_{\text{экс}}$. Оценить время жизни возбуждённого состояния ядра ^{119}Sn .

Оборудование:

1. Теоретическое введение

1.1 Испускание и поглощение в свободных атомах

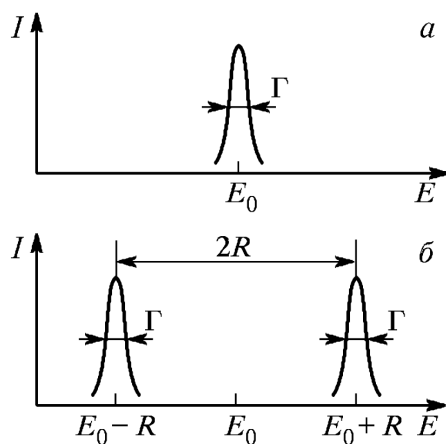


Рис. 1: Энергетическое распределение, характеризующее возбужденное состояние ядра (а), и сдвиг линий испускания и поглощения из-за отдачи при свободных ядрах (б)

Нуклоны (нейтроны и протоны) в атомном ядре, как и электроны в атоме, могут находиться в различных дискретных энергетических состояниях, или, как говорят, на различных энергетических уровнях. Самый низкий из уровней называется основным, остальные носят название возбужденных. Ядра, находящиеся в возбужденных состояниях, могут переходить на более низкие энергетические уровни, в том числе и на основной уровень. Такие переходы происходят самопроизвольно (спонтанно). Освобождающаяся энергия уносится фотоном. Так возникает γ -излучение.

Ядра атомов могут не только испускать, но и поглощать фотоны. Если попадающий в атомное ядро фотон имеет энергию, равную разности энергий между основным и каким-либо возбужденным состояниями, то ядро может поглотить фотон и перейти в соответствующее возбужденное состояние. Этот процесс возможен лишь для γ -лучей определенных энергий и носит, таким образом, резонансный характер.

На первый взгляд резонансное поглощение γ -лучей должно представлять собой распространенное и легко наблюдаемое явление. Казалось бы, для его обнаружения достаточно пропустить поток γ -лучей, испущенных радиоактивным источником, через поглотитель, содержащий те же ядра в невозбужденном состоянии. На самом деле это не так. Дело в том, что энергия E_γ , уносимая γ -квантом, оказывается меньше энергии E_0 перехода между уровнями. Небольшая, но вполне заметная доля энергии уносится ядром, которое вследствие отдачи начинает двигаться в сторону, противоположную направлению вылета γ -кванта.

При испускании фотона ядро приобретает энергию отдачи

$$R = \frac{p^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \quad (1)$$

Для ядра ^{119}Sn , который используется в работе, $E_0 \simeq E_\gamma = 23,8 \text{ кэВ}$, $R \simeq 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} \gg \Gamma/2 \simeq 3 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}$, где Γ — естественная ширина линии. Из-за такой разницы в порядках величин получается, что при смещении на величину $\pm R$ не перекрываются. Однако, это можно компенсировать эффектом Доплера, который возникает из-за теплового движения ядер. Для этого ядра должны двигаться относительно друг друга со скоростью

$$V = c \frac{2R}{E_\gamma} \quad (2)$$

Это примерно 60 м/с для ^{119}Sn . Из термодинамических соображений оценим скорость движения ядра v :

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{kT}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{kT}{M}}$$

Тогда величину D доплеровского «уширения» линии с учетом (1) можно оценить как

$$D = \frac{v}{c} E_\gamma = \sqrt{2RkT}$$

При комнатной температуре для ^{119}Sn эта величина будет примерно равна $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$, что на порядок больше R . Происходит перекрытие линий испускания и поглощения вследствие доплеровского уширения. Это обеспечивает возможность резонансного поглощения гамма-лучей.

1.2 Испускание и поглощение в твердых телах

Совсем иначе обстоит дело в твердых телах — в тех веществах с кристаллической решеткой, у которых энергия связи между атомами в решетке больше энергии отдачи. В таком случае при испускании/поглощении импульс в том или ином виде передается всем атомам в решетке, что часто вызывает ее колебания. Можно также сказать, что создаются кванты звуковых колебаний — фононы.

В данной работе изучается **эффект Мессбауэра — испускание и поглощение γ -квантов без создания фононов (звуковых колебаний)**. Его вероятность выражается формулой

$$f = \exp\left\{-\frac{4\pi\langle u^2 \rangle}{\lambda^2}\right\}$$

где $\langle u^2 \rangle$ — среднеквадратичное смещение ядер в процессе тепловых колебаний решетки (в направлении вылета γ -кванта), λ — длина волны γ -излучения. Таким образом, вероятность упругого испускания (и поглощения) γ -квантов уменьшается с температурой (с ростом $\langle u^2 \rangle$) и с ростом энергии перехода (с уменьшением длины волны λ).

Расчеты показывают, что для наблюдения эффекта энергия фотонов должна быть порядка 200 кэВ. Температурный порог может быть разным; в изучаемых нами ядрах олова ^{119}Sn в соединении BaSnO_3 это возможно и при комнатной температуре. Для наблюдения эффекта гамма-излучение сначала пропускается через резонансный поглотитель со стабильными ядрами ^{119}Sn . Пройдя через него, излучение регистрируется сцинтилляционным спектрометром.

Наблюдение резонансного поглощения основано на методе доплеровского сдвига линий испускания и поглощения. Для этого поглотителю придается небольшая скорость, рассчитанная по формуле (2), где вместо R подставлена Γ . Мессбауэровская линия очень узка, и для наблюдения резонанса хватает скорости порядка миллиметра в секунду.

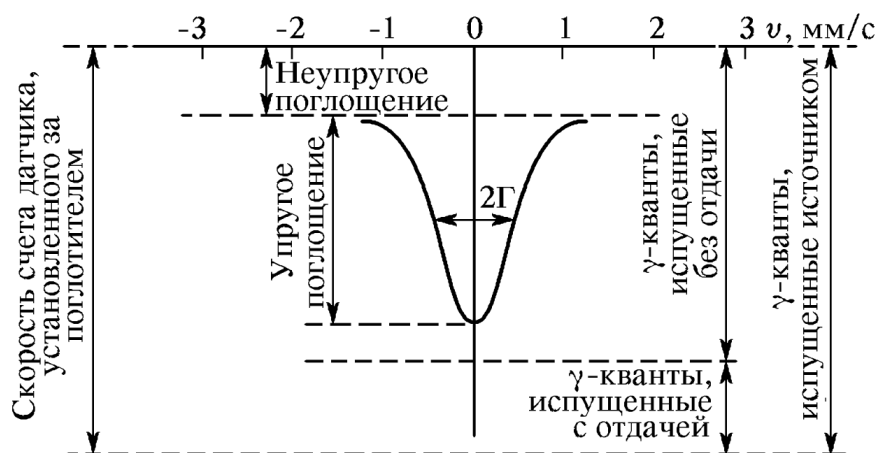


Рис. 2: Спектр упругого резонансного поглощения γ -квантов. Источник и поглотитель находятся в идентичных кристаллических решетках. Неупругое поглощение обусловлено главным образом взаимодействием γ -лучей с атомными электронами

Вообще говоря, при идентичных кристаллических решетках, линия испускания полностью перекрывается с линией поглощения, и максимальное поглощение наблюдается при нулевой скорости (рис. 2). Однако в химических сплавах (как наш BaSnO_3) из-за влияния электростатических сил происходит смещение максимума поглощения, и его можно «поймать» при отличной от нуля скорости. Такое смещение называется **химическим сдвигом**. Его можно рассчитать по формуле

$$v_p = \frac{\Delta E}{E_0} c$$

Для подсчета «амплитуды» эффекта Мессбауэра обычно определяется безразмерная величина

$$\varepsilon(v) = \frac{N(\text{inf}) - N(v)}{N(\text{inf}) - N_{\text{ф}}}$$

где $N(v)$ — скорость счета квантов, прошедших через поглотитель при некоторой скорости v , $N(\text{inf})$ — скорость счета квантов при достаточно большой скорости, когда резонансное поглощение отсутствует, $N_{\text{ф}}$ — скорость счета радиоактивного фона.

Измеряемая на опыте ширина резонансной линии $\Gamma_{\text{экс}}$ — результат наложения линий источника и поглотителя. При тонких поглотителях и источниках и при отсутствии вибраций ширина линии равна удвоенной естественной ширине 2Γ (см. рис. 2).

2. Экспериментальная установка

TODO

3. Выполнение работы

TODO

4. Вывод

TODO