

испускания наблюдаются дополнит. линии (сателлиты), отстоящие от несмещённой линии на расстояния  $\pm n\Omega$ , где  $n$  — целое число (рис. 2, а). Сателлиты соответствуют процессам испускания  $\gamma$ -квантов с возбуждением и поглощением УЗ-фононов.

В больших биол. молекулах или сложных хим. веществах отд. фрагменты молекул могут занимать не одно, а неск. устойчивых равновесных положений, и при достаточно высоких  $T$  происходят случайные переходы фрагмента из одного состояния в

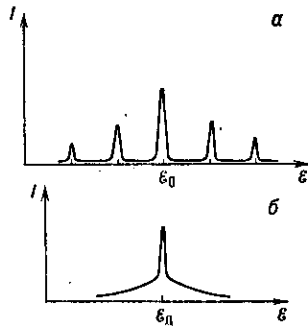


Рис. 2. Спектры испускания и поглощения  $\gamma$ -лучей в твёрдых телах при ультразвуковой накачке частоты (а) и при ограниченной диффузии (б).

другое. Т. к. движение фрагмента ограничено в пространстве, то спектры поглощения и испускания ядер, входящие в состав таких фрагментов, содержат несмещённую линию естеств. ширины. Кроме этой линии наблюдаются дополнит. линии лоренцевой формы (рис. 2, б), отражающие характер «перескокного» движения, к-рое можно рассматривать как диффузию в обратн. пространстве.

Движение ядер приводит к температурному сдвигу линии за счёт эффекта Доплера второго порядка на величину  $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 v^2 / 2c^2$ , где  $v$  — скорость движения излучающего или поглощающего ядра. Сдвиг очень мал ( $\mathcal{E}/\mathcal{E}_0 \sim 10^{-13}$ ), и только благодаря узости несмещённых линий его можно наблюдать. С увеличением темп-ры  $\Delta\mathcal{E}$  увеличивается и энергия испускаемых и поглощаемых  $\gamma$ -квантов уменьшается. При высоких  $T$  независимо от агрегатного состояния вещества  $v^2 = 3kT/Mc^2$  и соответственно:

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \frac{3kT}{2Mc^2}. \quad (4)$$

Эффект Доплера второго порядка проявляет себя по-разному в разл. агрегатных состояниях. В газах наряду со сдвигом линии  $\Delta\mathcal{E}$  возникает и уширение линии  $\delta\mathcal{E}$ , сравнимое с  $\Delta\mathcal{E}$ . В твёрдых телах  $\delta\mathcal{E}$  намного меньше сдвига линии и практически не наблюдается.

Наблюдение М. э. возможно с помощью спектрометра, схема к-рого приведена на рис. 3. Источнику  $\gamma$ -квантов сообщается скорость  $v$  (относительно) поглотителя, при этом энергия  $\gamma$ -кванта за счёт эффекта Доплера меняется на величину  $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 v/c$ . Скорости в интервале 0,1—10 см/с приводят к смещению линии на величину  $\sim \Gamma$ . Поглотитель содержит те же ядра, что и источник, но в основном состоянии. Меняя скорость  $v$ , можно совместить или раздвинуть линии испускания и поглощения.

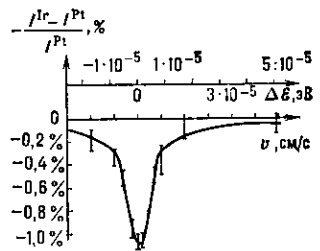
Если линии в источнике и поглотителе сильно раздвинуты, то поглощение  $\gamma$ -квантов происходит за счёт нерезонансных процессов (в основном за счёт фотоэлектрич. поглощения атомарными электронами и эффекта Комптона). При совмещении линии общее сечение поглощения увеличивается, а число прошедших через поглотитель  $\gamma$ -квантов, регистрируемых детектором, уменьшается.

Экспериментально можно не только обнаружить резонансное поглощение, но и исследовать форму линии поглощения. На рис. 4 приведены результаты экс-



Рис. 3. Схема мёссбауэровского спектрометра.

periments Мёссбауэра, в к-ром изучалось резонансное поглощение  $\gamma$ -лучей с энергией  $\mathcal{E}_0 = 129$  кэВ, испускаемых при переходе ядра  $^{191}\text{Ir}$  из первого возбуждённого состояния в основное (рис. 5). Источником служила пластинка металла  $^{191}\text{Os}$  (см. ниже). Источник и поглотитель  $^{191}\text{Ir}$  поддерживались при  $T = 77$  К (платиновый поглотитель использовался для изменения нерезонансного поглощения). Наблюдаемая ширина провала отвечает ширине возбуждённого



уровня  $^{191}\text{Ir}$  ( $\Gamma = 5 \cdot 10^{-6}$  эВ).

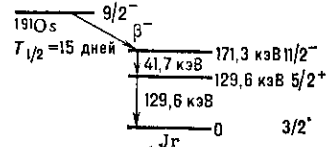


Рис. 5. Схема распада  $^{191}\text{Os}$ ; справа указаны спины  $I$  и чётности  $\pi$  состояний ( $I^\pi$ ).

Источники резонансных  $\gamma$ -квантов представляют собой обычно радиоакт. ядра с большим периодом полураспада  $T_{1/2}$ , введённые в твёрдотельную матрицу ( $T_{1/2}$  от неск. часов до неск. лет). В результате ядерных превращений ( $K$ -захвата или  $\alpha$ -распадов) и последующего каскада  $\gamma$ -переходов образуется возбуждённое ядро, испускающее резонансные  $\gamma$ -кванты (рис. 5). В первом эксперименте Мёссбауэра источником служил  $\beta$ -радиоактивный  $^{191}\text{Os}$ . Ядра в возбуждённом состоянии получают в ходе ядерных реакций [напр.,  $^{40}\text{K}$  в результате реакции  $(n, \gamma)$ ,  $^{57}\text{Fe} - (d, p)$ ] и при кулоновском возбуждении ядер ( $^{73}\text{Ge}$ ,  $^{61}\text{Ni}$ ). Удалось выделить резонансные  $\gamma$ -кванты из синхротронного излучения (с помощью дифракции  $\gamma$ -квантов на ядрах), в частности линию с энергией 14,4 кэВ, соответствующей энергии перехода ядра  $^{57}\text{Fe}$ , с монохроматичностью  $\sim 10^{-8}$  эВ, т. е. сравнимой с  $\Gamma$  переходом ядра  $^{57}\text{Fe}$ . Это открывает возможности получения мощных и узконаправленных источников резонансных  $\gamma$ -квантов.

Сечение резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов  $\sigma_{\text{рез}}$  в твёрдых телах определяется длиной волны  $\gamma$ -излучения, вероятностью М. э. ( $f_M$ ), спинами ядер в основном ( $I_0$ ) и возбуждённом ( $I_B$ ) состояниях, а также вероятностью процесса конверсии внутренней

$$\sigma_{\text{рез}} = f_M G_0(\mathcal{E}); \quad (5)$$

$$G_0(\mathcal{E}) = \frac{2I_B + 1}{2I_0 + 1} \cdot \frac{2\pi\lambda}{1 + K} \frac{\Gamma/2 + \xi(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0)}{(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0)^2 + \Gamma^2/4}. \quad (6)$$

Здесь  $K$  — коэф. внутренней конверсии. Величина  $K/(1 + K)$  определяет вероятность того, что поглотившее  $\gamma$ -квант ядро перейдёт затем в осн. состояние, передав энергию атомарным электронам. Коэф.  $\xi$  является следствием квантовомеханич. эффекта — интерференции резонансного и нерезонансного (фотоэффект) процессов поглощения, имеет заметную величину лишь для переходов мультипольности  $E1$ . Линии поглощения  $\gamma$ -квантов в переходах  $E1$  имеют ярко выраженную асимметрию (рис. 6). Для переходов др. мультипольности коэф.  $\xi$  пренебрежимо мал и энергетич. зависимость сечения поглощения имеет лоренцеву форму.

В твёрдом теле возможно упругое резонансное рассеяние  $\gamma$ -квантов на ядрах, при к-ром энергии рассеянных ( $\mathcal{E}'$ ) и падающих ( $\mathcal{E}$ )  $\gamma$ -квантов строго равны. Сечение такого процесса  $\sigma_{\text{упр}}$  пропорц. произведению ве-