

### Задача 11-3 Эффект Мёссбауэра и эффект Доплера.

Около 1852 Дж. Г. Стокс впервые наблюдал флуоресценцию — поглощение флюоритом падающего света с последующим испусканием света поглотителем. В 1900 П. Виллард обнаружил гамма-лучи — испускаемое радием монохроматическое электромагнитное излучение с высокой энергией фотонов. В 1904 Р. Вуд продемонстрировал резонансную оптическую флуоресценцию, которая характеризуется испусканием поглощённой световой энергии в виде излучения той же частоты.

Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс, открытый в 1958 году Рудольфом Мёссбауэром в Институте им. М. Планка в Гейдельберге (ФРГ), состоит в резонансном испускании или поглощении гамма-лучей без отдачи.

В 1961 году за открытие и теоретическое обоснование явления ядерного гамма-резонанса Р. Л. Мёссбауэру была присуждена Нобелевская премия по физике.

#### Введение.

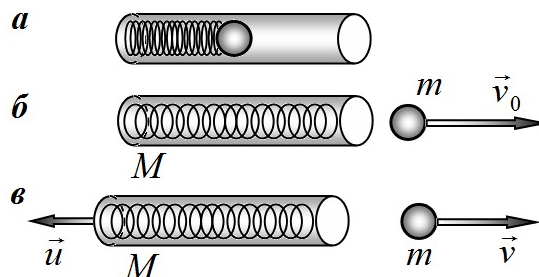
Не смотря на то, что процессы испускания и поглощения фотонов атомами и ядрами строго описываются только в рамках квантовых представлений, многие стороны этих явлений могут быть качественно объяснены в рамках классической физики. Так каждый атом имеет набор собственных частот, поэтому испускает электромагнитные волны со строго определенным набором частот (в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах). При поглощении света атомами поглощается излучение только тех частот, которые близки к собственным частотам колебаний, подобно традиционному резонансу в классических системах. Аналогичная ситуация и с излучением атомных ядер — только энергия квантов этого излучения лежит в области гамма-излучения (поэтому в этой области говорят не о частотах и длинах волн, а об энергии квантов).

Так как энергия (и импульс) гамма квантов велика, то при их испускании ядром, само ядро получает импульс отдачи. Следовательно, уносит часть энергии, уменьшая тем самым энергию испущенного гамма-кванта. Тем самым гамма-излучение, испущенное ядром не поглощается другим аналогичным ядром. Р. Мессбауэр показал, что в некоторых случаях излучение гамма-квантов может происходить без отдачи, следовательно, аналогичные ядра, находящиеся в аналогичных условиях могут сильно (резонансно) поглощать это излучение.

В задаче использованы материалы статьи самого Р. Мёссбауэра «РЕЗОНАНСНОЕ ЯДЕРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ  $\gamma$ -КВАНТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ БЕЗ ОТДАЧИ», опубликованной в журнале «Успехи физических наук» в декабре 1960 года (том LXXII, вып. 4)

#### Часть 1. Энергия отдачи.

Пружинная пушка состоит из цилиндрического закрытого с одной стороны ствола, внутри которого расположена упругая пружина (рис. 1 а). Пружина выталкивает шарик-снаряд. Отношение массы снаряда к массе пушки равно  $\frac{m}{M} = \mu$ . Если закрепить ствол, то снаряд вылетает из пушки со скоростью  $v_0$  (рис. 1 б). Считайте, что во всех случаях начальное сжатие пружины постоянно, а в процессе выстрела пружина полностью распрямляется.

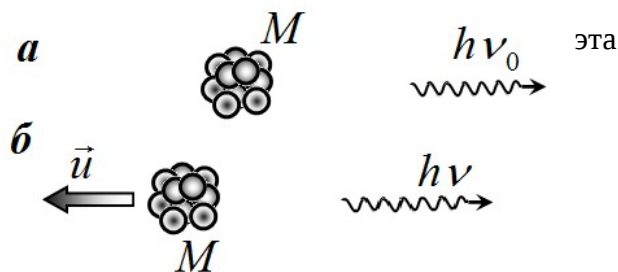


**1.1** Чему будет равна скорость снаряда  $V$ , если ствол пушки не закреплен и может свободно двигаться (рис. 1 в)?

1.2 Найдите относительное изменение скорости снаряда  $\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v - v_0}{v_0}$ , возникающее вследствие отдачи ствола, считая отношение массы снаряда к массе ствола  $\mu$  малым.

1.3 Найдите относительное изменение энергии снаряда  $\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E - E_0}{E_0}$ , возникающее вследствие отдачи ствола, считая отношение массы снаряда к массе ствола  $\mu$  малым.

1.4 Неподвижное ядро массы<sup>3</sup>  $M$  испускает гамма-квант с энергией  $h\nu_0$ . Чему будет равна энергия, если этот квант испускается свободным ядром? Чему равно относительное изменение энергии гамма кванта вследствие отдачи ядра. Ответы выразите через безразмерный параметр  $\mu$  равный отношению энергии гамма-кванта к энергии покоя ядра  $\varepsilon_0 = \frac{h\nu_0}{Mc^2}$



(здесь и далее  $c$  - скорость света,  $h$  - постоянная Планка). Также рекомендуем использовать величину  $\varepsilon = \frac{h\nu}{Mc^2}$  - отношение энергии гамма-кванта к энергии покоя ядра.

а) решите задачу, считая, что движение ядра подчиняется законам классической физики;

б) решите задачу в релятивистском приближении

Напоминание: в специальной теории относительности доказано, что энергия частицы  $E$  и ее импульс  $P$  связаны соотношением

$$E^2 = M^2 c^4 + p^2 c^2. \quad (1)$$

1.5 Найдите относительное изменение энергии гамма-кванта вследствие отдачи ядра, считая параметр  $\varepsilon_0$  малым. Сравните эти изменения, рассчитанные в классическом и релятивистском приближениях.

1.6 В своих экспериментах Р. Мёссбауэр использовал ядра одного из изотопов иридия  $Ir^{191}$ , испускающего кванты с энергией<sup>4</sup>  $E_0 = 129 \text{ кЭв}$ .

Найдите энергию покоя ядра иридия  $Ir^{191}$  в электронвольтах.

Оцените параметр  $\varepsilon_0$  для этого ядра.

Оцените скорость ядра  $Ir^{191}$  после испускания гамма-кванта.

Можно ли для описания эффектов отдачи пользоваться классическим приближением?

Масса протона (и примерно ей равная масса нейтрона) равна  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , скорость света  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ , заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

1.7 Рассчитайте относительный сдвиг энергии гамма-кванта, возникающий вследствие отдачи ядра.

<sup>3</sup> Здесь и далее речь идет о массе покоя, с современной точки зрения нет смысла говорить о массе движущегося тела.

<sup>4</sup> В ядерной физике энергию принято измерять в Эв (электронвольтах). 1Эв – энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 вольт.

1.8 Ядро может поглотить гамма-квант, если во внутреннюю энергию переходит энергия  $E_0$ , равная энергии гамма-кванта, испущенного таким же неподвижным ядром. должна равняться энергия гамма-кванта  $E = h\nu$ , что бы он мог поглотиться свободным ядром  $Ir^{191}$ ? Найдите только относительную разность этих энергий  $\frac{\Delta E}{E_0}$ .

## Часть 2. Эффект Доплера.

2.1 Неподвижный источник, испускает волну с частотой  $\nu_0$ . Чему будет равна частота волны, если источник движется с постоянной скоростью  $V$  в направлении распространения волны? Скорость волны равна  $C$ .

## Часть 3. За что дают Нобелевские премии?

3.1 Для компенсации сдвига энергий гамма-квантов, предлагается использовать эффект Доплера. Для этого источник, содержащий атомы  $Ir^{191}$ , приближают к поглотителю, также содержащему атомы  $Ir^{191}$ . Оцените скорость, с которой должен приближаться источник к поглотителю, чтобы началось эффективное резонансное поглощение гамма-квантов? (рис. из статьи Мёссбауэра).

Считайте, что все атомы иридия (в источнике и в поглотителе) свободны и изначально покоятся

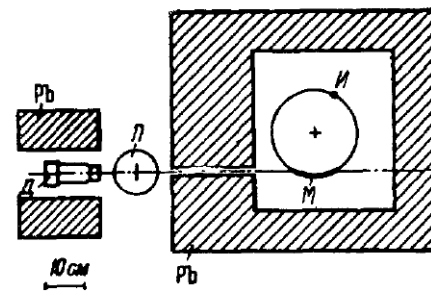


Рис. 2. Геометрия опыта.  $Н$  — криостат с поглотителем ( $T = 88$  К);  $М$  — вращающийся криостат с источником ( $T = 88$  К);  $Д$  — детектор;  $И$  — источник.

Р.

3.2 Качественно опишите влияние температуры на эффективность поглощения?

3.3 Свои эксперименты Р. Мёссбауэр проводил при низких температурах. В результате проведенных измерений оказалось, что зависимость эффективности поглощения от скорости источника имеет вид, показанный на рисунке (обратите внимание — шкала скоростей в см/с).

Р. Мёссбауэр предположил (и оказался прав), что при определенных условиях атомы в кристаллах оказываются жестко связанными, поэтому импульс отдачи передается не отдельному атому, а всему кристаллу.

Чему равен параметр  $\epsilon_0$  в этом случае?

3.4 Ядро, как и атом, испускает не одну единственную частоту, а частот в некотором малом интервале  $\Delta\nu$ . Причем энергии квантов лежат в некотором диапазоне шириной  $\Delta E$ , который определяется соотношением

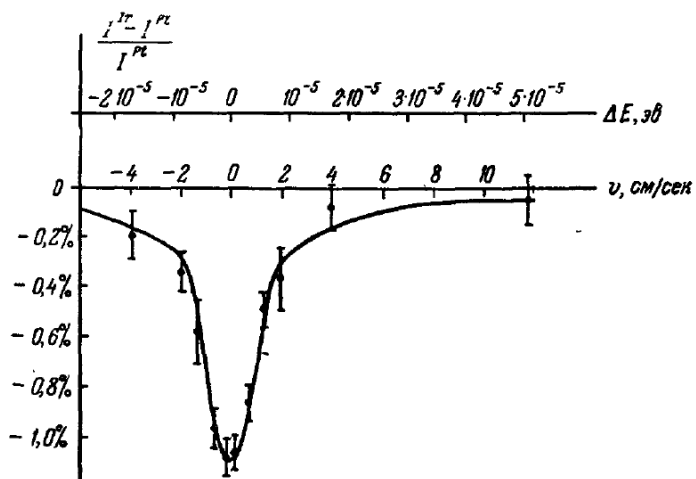


Рис. 3. Относительная разность интенсивностей  $\gamma$ -излучения, проходящего через иридиевый и платиновый поглотители, в функции относительной скорости источника и поглотителя.

ядру,

строга  
набор

неопределенности

$\Delta E \cdot \tau \approx h$ , где  $\tau$  - время жизни ядра в возбужденном состоянии. Используя приведенный график, оцените время жизни ядра  $Ir^{191}$  в возбужденном состоянии.

Постоянная Планка равна  $h = 6,64 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с .