

Условие

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.

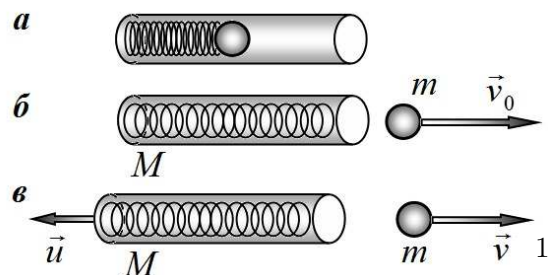
Не смотря на то, что процессы испускания и поглощения фотонов атомами и ядрами строго описываются только в рамках квантовых представлений, многие стороны этих явлений могут быть качественно объяснены в рамках классической физики. Так каждый атом имеет набор собственных частот, поэтому испускает электромагнитные 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 γ -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



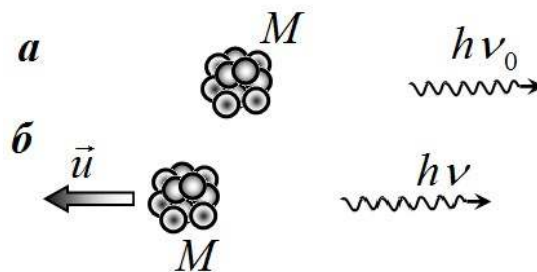
(рис. 1 б). Считайте, что во всех случаях начальное сжатие пружины постоянно, а в процессе выстрела пружина полностью распрямляется.

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 μ 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 μ малым.

1.4 Неподвижное ядро массы³ 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 μ 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

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

1.5 Найдите относительное изменение энергии гамма-кванта вследствие отдачи ядра, считая параметр ε_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 энергией⁴ $E_0 = 129$ кЭв. Найдите энергию покоя ядра иридия Ir^{191} в электронвольтах. Оцените параметр ε_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 $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, скорость света $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с, заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

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

³ Здесь и далее речь идет о массе покоя, с современной точки зрения нет смысла говорить о массе движущегося тела. ⁴ 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 ν_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

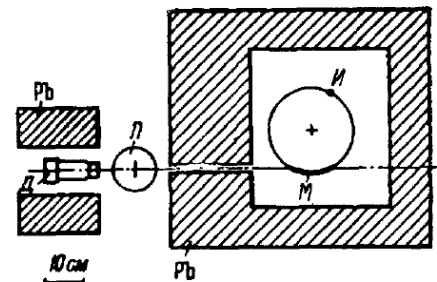


Рис. 2. Геометрия опыта. И — криостат с поглотителем ($T = 88^\circ \text{K}$); М — вращающийся криостат с источником ($T = 88^\circ \text{K}$); Д — детектор; Пб — источник.

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).

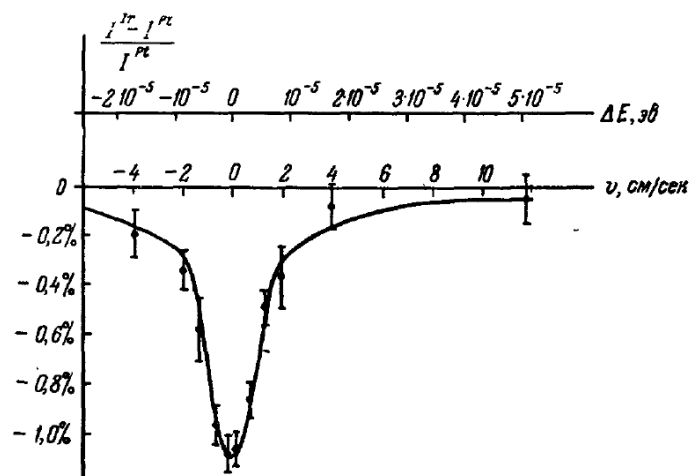


Рис. 3. Относительная разность интенсивностей γ -излучения, проходящего через иридиевый и платиновый поглотители, в функции относительной скорости источника и поглотителя.

Р. Мессбауэр 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 ε_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 ΔE , который определяется соотношением

неопределенности $\Delta E \cdot \tau \approx h$, где τ - 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.

³ Здесь и далее речь идет о массе покоя, с современной точки зрения нет смысла говорить о массе движущегося тела. ⁴ В ядерной физике энергию принято измерять в Эв (электрон-вольтах) . 1Эв – энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 вольт.