

стороны фотонов на линзу. Абсолютная величина этой силы легко находится из треугольника по теореме косинусов:

$$F = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \alpha} = \frac{W}{2\pi c} \sqrt{5-4 \cos \alpha} \approx 1 \text{ Н.}$$

**Задача 3.** Образовавшееся в результате ядерной реакции неподвижное ядро калия  ${}^{40}_{19}\text{K}$  испускает  $\gamma$ -квант с энергией  $E_\gamma = 29,4$  кэВ. Определите кинетическую энергию ядра после испускания  $\gamma$ -кванта. Одной атомной единице массы соответствует энергия  $E_1 = 931,5$  МэВ.

Сначала разберемся с ядром калия: из чего оно состоит и почему оно излучает  $\gamma$ -квант? Массовое число  $A = 40$ , следовательно, ядро состоит из 40 нуклонов, из которых 19 протонов, а остальные — нейтроны. Очевидно, что ядро находилось в возбужденном состоянии, а испущенный  $\gamma$ -квант является результатом перехода ядра либо в новое возбужденное состояние с меньшей энергией, либо в свое основное (устойчивое) состояние.

Кинетическую энергию ядра, появившуюся в результате отдачи, можно найти с помощью закона сохранения импульса системы ядро —  $\gamma$ -квант. До вылета  $\gamma$ -кванта импульс ядра был равен нулю, и после вылета  $\gamma$ -кванта импульс системы должен остаться нулевым:

$$p_\alpha - \frac{E_\gamma}{c} = 0,$$

где  $p_\alpha$  — импульс ядра. Кинетическая энергия ядра равна

$$E_k = \frac{p_\alpha^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2},$$

где  $M$  — масса ядра, а  $Mc^2$  — энергия покоя ядра. По условию,

$$Mc^2 = AE_1.$$

После подстановки получим

$$E_k = \frac{E_\gamma^2}{2AE_1} \approx 0,01 \text{ эВ.}$$

Скажем несколько слов об энергии. Если к энергии  $\gamma$ -кванта добавить кинетическую энергию ядра, то получим разность энергий тех состояний ядра, в которых оно находилось до испускания  $\gamma$ -кванта и после испускания.

**Задача 4.** При распаде нейтрального  $\pi$ -мезона образовались два  $\gamma$ -кванта с энергиями  $E_1 = 71$  МэВ и  $E_2 = 64$  МэВ, которые летят в противоположных направлениях. Определите

энергию покоя  $\pi$ -мезона и его скорость до распада. Указание: рассмотрите нерелятивистский случай.

Обозначим через  $p$  импульс  $\pi$ -мезона до распада. О том, что  $\pi$ -мезон распался на лету, говорит тот факт, что энергии образовавшихся  $\gamma$ -квантов не равны. Мы будем рассматривать нерелятивистский случай — об этом можно судить по тому факту, что  $E_1 - E_2 \ll E_1$ .

По закону сохранения импульса можно записать

$$p = \frac{E_1}{c} - \frac{E_2}{c}.$$

Кинетическая энергия  $\pi$ -мезона до распада равна

$$E_k = \frac{p^2}{2M} = \frac{(E_1 - E_2)^2}{2Mc^2},$$

где  $M$  — масса  $\pi$ -мезона. Закон сохранения энергии позволяет записать

$$Mc^2 + E_k = E_1 + E_2,$$

или

$$Mc^2 + \frac{(E_1 - E_2)^2}{2Mc^2} = E_1 + E_2.$$

Для определения энергии покоя  $\pi$ -мезона получим квадратное уравнение

$$(Mc^2)^2 - (E_1 + E_2)Mc^2 + 0,5(E_1 - E_2)^2 = 0,$$

откуда

$$Mc^2 = 134,8 \text{ МэВ.}$$

Понятно, что это значение близко к суммарной энергии  $\gamma$ -квантов.

Для определения скорости  $v$   $\pi$ -мезона выразим его кинетическую энергию через эту скорость и приравняем к полученному ранее выражению для  $E_k$ :

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{(E_1 - E_2)^2}{2Mc^2}.$$

Отсюда

$$v = \frac{(E_1 - E_2)c}{Mc^2} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

**Задача 5.** Катод фотоэлемента освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda_1$  (рис. 3). При отрицательном потенциале на аноде  $U_1 = 1,6$  В ток в цепи прекращается. При изменении длины волны света в  $\beta = 1,5$  раза для прекращения тока потребовалось подать на анод отрицательный потенциал  $U_2 = -1,8$  В. Определите работу выхода материала катода.

Сначала разберемся, почему при нулевой разности потенциалов между катодом и анодом в замкнутой цепи фотоэлемента течет ток и почему необ-

ходимо прикладывать задерживающую разность потенциалов, чтобы ток стал равным нулю.

При освещении фотокатода светом происходит взаимодействие квантов

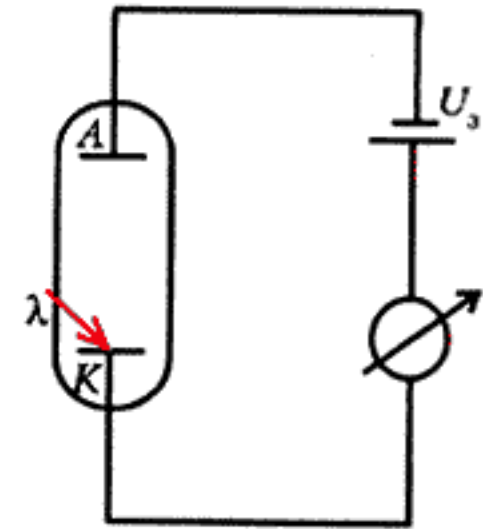


Рис. 3

света с электронами вещества, причем в случае внешнего фотоэффекта речь идет о слабо связанных с атомами электронах проводимости. Есть вероятность, что в результате этого взаимодействия фотон будет полностью поглощен электроном. (Это чисто релятивистский эффект, который невозможно понять и объяснить, основываясь на обычных классических представлениях.) Поглощенная электроном энергия кванта света переходит в его кинетическую энергию, и, если импульс электрона направлен к поверхности освещаемого катода, он может выйти за пределы катода в вакуум. Максимальная кинетическая энергия  $E_k$  электрона за пределами катода определяется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта:

$$E_k = h \frac{c}{\lambda} - A,$$

где  $A$  — минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из вещества в вакуум, которую и называют работой выхода. Поэтому, если  $E_k > 0$ , вылетевшие электроны смогут достигнуть анода, т.е. в цепи будет течь ток. Очевидно, что фототок станет равным нулю, если задерживающая разность потенциалов между катодом и анодом составит по модулю

$$U_s = \frac{E_k}{e},$$

где  $e$  — заряд электрона.

Теперь перейдем к решению нашей задачи. При освещении катода светом с длиной волны  $\lambda_1$  можно записать

$$|U_1| = \frac{hc / \lambda_1 - A}{e}.$$

Во втором случае абсолютная величина задерживающего потенциала увеличилась, следовательно, длина волны света