

кновения – появление нейтрального атома. Примеры легко умножить.

А может ли элементарная частица (в данном случае это – бесструктурная частица, она может только перемещаться в пространстве), столкнувшись с фотоном или какой-нибудь другой квазичастицей, «проглотить» ее? Или: может ли элементарная частица «родить» какую-либо из квазичастиц? Этот вопрос можно задать на «волновом языке»: может ли частица, двигающаяся с постоянной скоростью, излучить волну (при такой формулировке не обязательно использовать термин «столкновение»)?

Одно общее замечание. Элементарные процессы обратимы. Что это означает? В данном случае следующее: если частица может «проглотить» квазичастицу, то может ее и «родить». Достаточно исследовать один из процессов: либо рождение квазичастицы (излучение волны), либо поглощение квазичастицы. Остановимся на рождении (излучении).

Думаю, ни у кого не вызовут сомнений уравнения, которые будут сейчас предъявлены:

$$\vec{p} = \vec{p}' + \hbar \vec{k}, \quad \varepsilon(\vec{p}) = \varepsilon(\vec{p}') + \hbar \omega(\vec{k}). \quad (9)$$

На всякий случай, все же скажем словами: частица, импульс которой \vec{p} , а энергия $\varepsilon = \varepsilon(\vec{p})$, рождает квазичастицу – излучает волну с волновым вектором \vec{k} и частотой ω (ω – функция \vec{k}). Это событие может произойти, если законы сохранения (уравнения (9)) выполняются. Их мы и должны проанализировать.

Конечно, для того чтобы иметь возможность проанализировать уравнения (9), необходимо знать зависимости входящих в них функций от их аргументов. Много интересного и важного можно обнаружить, не выходя за пределы простых соотношений

$$\varepsilon = \frac{p^2}{2m}, \quad \omega = uk. \quad (10)$$

Вы, надеюсь, понимаете, что первое равенство тождественно более привычному $\varepsilon = \frac{mv^2}{2}$ (см. (2)), так как $\vec{p} = m\vec{v}$ (m – масса излучающей частицы). Второе равенство может относиться и к фотону (тогда u –

скорость света), и к фону (тогда u – скорость звука).

Итак, импульс частицы после излучения \vec{p}' можно вовсе исключить:

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{(\vec{p} - \hbar \vec{k})^2}{2m} + \hbar \omega(\vec{k}).$$

Отсюда, учитывая, что скалярное произведение двух векторов \vec{p} и \vec{k} есть $\vec{p}\vec{k} = pk \cos \theta$, где θ – угол

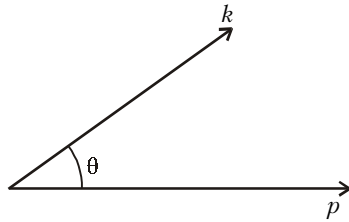


Рис. 4. Направление полета квазичастицы (угол θ) отсчитывается от импульса частицы \vec{p} .

между этими векторами (рис. 4), имеем

$$\frac{\hbar pk \cos \theta}{m} = \hbar \omega(k) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m},$$

или

$$vk \cos \theta = \omega(k) + \frac{\hbar k^2}{2m}.$$

Условие излучения сводится к утверждению, что $\cos \theta$ не должен по модулю превышать единицу, т.е.

$$-1 \leq \cos \theta = \frac{\omega(k)}{kv} + \frac{\hbar k}{2mv} \leq 1. \quad (11)$$

Условие (11) мы взяли в рамку неспроста. Обсуждение его – главное содержание оставшейся части статьи.

Классический предел. Излучение Черенкова

Условие (11) допускает переход к классической физике (пренебрежение квантовыми эффектами): для этого просто(!) надо положить $\hbar = 0$. Конечно, потом надо убедиться, что делать это дозволено (см. ниже). Тогда условие излучения выглядит совсем просто:

$$v > \frac{\omega}{k} = v_\phi. \quad (12)$$

Здесь v_ϕ – фазовая скорость волны. Частица способна излучить волну, если ее скорость превышает фазовую скорость этой волны.

В 1934 году аспирант С.И.Вавилова П.А.Черенков обнаружил необычное излучение. Оказалось, электроны, летящие через вещество со сверхсветовой скоростью, излучают свет. Теорию этого излучения, получившего название черенковского, построили И.Е.Тамм и И.М.Франк в 1937 году (Нобелевская премия 1958 г. «за открытие и объяснение эффекта Вавилова – Черенкова» присуждена Тамму, Франку и Черенкову).

Как известно, скорость света в пустоте c – предельная скорость движения материальных тел, здесь частицы не могут лететь со скоростью, большей c . Со *сверхсветовой* скоростью они могут лететь лишь в *среде*, где скорость света u меньше скорости света в пустоте.

Проверим, можно ли было пренебречь вторым слагаемым в правой части условия (11). Считаем: $v \approx c$,

$m = m_e$ – масса электрона, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (здесь λ – длина волны излученного света); для отброшенного члена

получаем: $\sim \frac{\hbar}{m_e c \lambda}$, т.е. отброшенное

слагаемое есть отношение комптоновской длины волны к длине волны света. Но, как мы уже знаем, это отношение очень мало для волн видимого света. Пренебрежение оправдано.

Надо сказать, теория черенковского излучения строилась и обычно строится на основе классического (неквантового) рассмотрения. Вывод условия излучения (12) проще, если использовать квантовый подход.

Тяжелое тело, пуля, самолет, ракета не могут лететь со сверхсветовой скоростью (возможно, пока). А вот со сверхзвуковой *уже* могут. В условии (11) в случае макроскопического тела вторым слагаемым заведомо можно пренебречь: оно столь мало, что о нем попросту не стоит говорить. Мы приходим к естественному выводу: если тело летит со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе, то оно излучает звуковые волны. О самолете в таких случаях говорят, что он преодолел звуковой барьер. Этот факт можно засвидетельствовать на земле: до земли доходит «пакет» волн, испущенных самолетом. Часто это приводит к тому, что в домах дребезжат окна, а иногда и выпадают.