

физическую природу происходящего в бесстолкновительной плазме можно.

Давайте проквантуем волну поля и посмотрим, может ли «фотон» поглотиться частицами плазмы. Для выяснения этого, как мы знаем, надо посмотреть, удовлетворяются ли законы сохранения энергии и импульса. Сведенные вместе, они запишутся так:

$$\varepsilon(\vec{p}) + \hbar\omega = \varepsilon(\vec{p} + \hbar\vec{k}).$$

При расчете электромагнитного поля надо учитывать взаимодействие с ним *всех* частиц. Это означает, что расчет предполагает суммирование по всем частицам (интегрирование по всем импульсам). Поэтому безразлично, возможности какой частицы рассматривать. Давайте займемся частицами, импульс которых равен  $\vec{p}' = \vec{p} + \frac{\hbar\vec{k}}{2}$ . Тогда уравнение, описывающее законы сохранения, оказывается симметричным:

$$\varepsilon\left(\vec{p} + \frac{\hbar\vec{k}}{2}\right) - \varepsilon\left(\vec{p} - \frac{\hbar\vec{k}}{2}\right) = \hbar\omega. \quad (15)$$

Так как  $\varepsilon = \frac{p^2}{2m}$ , а  $\frac{\vec{p}}{m} = \vec{v}$ , то из (15) следует условие (14).

Итак, условие (14) – условие возможности поглощения «фотона». Поглощение должно приводить к затуханию электромагнитной волны с параметрами, удовлетворяющими условию (14). Аппарат теоретической физики позволяет вычислить коэффициент затухания. Его и называют затуханием Ландау.<sup>7</sup>

Во многих случаях затухание Ландау – важный механизм, ограничивающий амплитуду электромагнитного поля. Иногда учет его необходим для наведения порядка в теоретических уравнениях. И то и другое весьма важно.

Обратите внимание, что поглощение звука электронами металла, описанное в предыдущем разделе, по сути дела, проявление затухания Ландау при взаимодействии звуковой волны с электронами проводимо-

сти. Должен сказать, это не сразу было понято.

## Критерий сверхтекучести

Этот 1998 год можно считать юбилейным не только потому, что отмечается девяностолетие Ландау. Шестьдесят лет назад Петр Леонидович Капица открыл сверхтекучесть – способность жидкого гелия при температурах ниже 2,19 К (гелий II) протекать без вязкости через тонкие капилляры. Обнаружение движения жидкости без трения, а также понимание того, что в гелии при низких температурах возможно два типа движения: обычное (нормальное, как говорят) и сверхтекучее, позволяет объяснять большое число удивительных свойств гелия («за открытия в области физики низких температур» П.Л.Капица удостоен Нобелевской премии 1978 г.).

В 1941 году Л.Д.Ландау построил теорию сверхтекучести. Одно из основных положений этой теории – *критерий сверхтекучести*, о котором мы постараемся рассказать, используя законы сохранения.

Задумаемся, что означает *течение без трения*? Это означает, что энергия упорядоченного движения жидкости не переходит в тепло, не рассеивается – значит, движение не тормозится, не затухает.

Тепловое движение – это беспорядочное движение атомов, молекул. В разных агрегатных состояниях атомные частицы движутся по-разному: в твердых телах колеблются вокруг своих положений равновесия, в газах движутся как свободные частицы, изредка сталкиваясь с себе подобными. В обычной жидкости тепловое движение частиц сложно: они и колеблются, и перемещаются в пространстве на большие расстояния. Но в гелии II, в гелии при температуре ниже 2,19 К, ситуация иная. Переход в сверхтекучее состояние означает возникновение своеобразного коллективного состояния всех атомов гелия. Атомы гелия в этом новом состоянии не могут двигаться независимо друг от друга. Единственное доступное им движение представляет собой звуковые волны. Звуковые волны, как мы знаем, можно проквантовать. Так вводятся фононы. Если нам известна зависимость частоты  $\omega$  звуковой волны от волнового вектора  $\vec{k}$ , то, тем самым, известна зависимость энергии фоно-

на  $\varepsilon$  от его импульса  $\vec{p}$ :

$$\varepsilon = \varepsilon(p). \quad (16)$$

Так как гелий изотропен, энергия не зависит от направления импульса, а зависит только от его величины.

Теперь тепловое движение в гелии при низкой температуре получает наглядное представление: при температуре  $T \neq 0$  в массе гелия «растворен» газ фононов. Чем температура выше, тем фононов больше. Надеюсь, вы понимаете, что сказанное – удобный, наглядный образ. Не более того. Но и не менее, так как используя это представление, можно вычислить зависимость различных характеристик гелия от температуры и выяснить, как зависит энергия фонона от импульса, т.е. построить функцию (16). Она показана на рисунке 5.

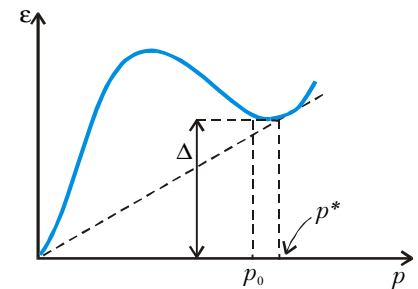


Рис.5. Зависимость энергии фонона в гелии II от импульса. В отмеченной точке (при  $p = p_0$ ) прямая, проведенная из начала координат, касается кривой  $\varepsilon = \varepsilon(p)$

Надо подчеркнуть, что зависимость  $\varepsilon$  от  $p$  при  $p \rightarrow 0$  известна была априори: малый импульс соответствует малому волновому вектору  $k$  и, следовательно, большой длине волны  $\lambda$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ). Но при  $\lambda \gg a$ , где  $a$  – межатомное расстояние, волна, о которой идет речь, – обычная звуковая волна. Скорость ее хорошо известна:  $u \approx 240$  м/с, и

$$\varepsilon = up. \quad (17)$$

При импульсах, близких к минимуму энергии,

$$\varepsilon \approx \Delta + \frac{(p - p_0)^2}{2m^*}, \quad p \approx p_0, \quad (18)$$

где  $p_0/\hbar = 1,9 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>,  $\Delta = 8,7$  К,  $m^* = 0,16m_{\text{He}}$  ( $m_{\text{He}}$  – масса атома гелия).

Значения параметров  $p_0$ ,  $\Delta$  и  $m^*$  подобраны так, чтобы наилучшим образом описать температурные зависимости характеристик гелия II.

<sup>7</sup> Слово «фотон» взято в кавычки, так как речь идет не об электромагнитной волне в вакууме. Квазичастицу в плазме называют плазмоном.