

ведь поток тепла течет от горячего конца тела к холодному.

Если взять производную по  $x$  от правой и левой частей уравнения (2), то с помощью выражения (1) можно исключить  $q_x$ . Полученное уравнение для  $T$  (его называют уравнением теплопроводности) имеет следующий смысл: скорость изменения температуры со временем пропорциональна второй производной от температуры по координате. Коэффициент пропорциональности  $\chi = \lambda / C$  называют *температуропроводностью*.

Не привлекая каких-либо представлений о механизме переноса тепла, можно (нужно) обратить внимание на то, что если тепло проходит через границу двух сред, то должны быть выполнены два условия, означающие непрерывность процесса переноса тепла из одной среды в другую:

$$\text{на границе } T_1 = T_2, - \lambda_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x} = - \lambda_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x}$$

(ось  $X$  направлена перпендикулярно границе сред).

Чтобы понять механизм переноса тепла, рассмотрим два существенно разных случая:

– перенос тепла по твердому телу, но не по металлу (далее будет понятно, почему мы исключили металл);

– перенос тепла газом, скажем по воздуху в нашей комнате или на улице, или в поле (вспомним о ветре).

В *твердом теле* неоднородность температуры означает, что там, где температура выше, атомы (молекулы), из которых состоит тело, колеблются более интенсивно, а там, где температура ниже, – менее интенсивно. Думаю, никого не удивит, если то же самое я скажу иначе: *там, где температура выше, число фононов в единице объема больше, чем там, где температура ниже.*<sup>2</sup>

Теплопроводность – это поток фононов из более горячих мест в более холодные. Надо подчеркнуть, что частицы, из которых построено тело, не перемещаются. Если не прибегать к представлению о фононах, то надо было бы рассмотреть взаимодействие между частицами, благодаря которому интенсивно колеблющиеся частицы вовлекают в свое движение сосед-

ние частицы, а те своих соседей – так тепло перемещается по телу. На языке фононов все значительно нагляднее.

Фононы двигаются хаотически, очень часто сталкиваются с различными препятствиями: с границами кристаллитов, с дислокациями, друг с другом. Мерой их свободного перемещения служит *длина свободного пробега*  $l$  – среднее расстояние между столкновениями. Геометрические представления могут помочь вычислить поток тепла, переносимый фононами, при заданной скорости изменения температуры, а тем самым – коэффициент теплопроводности:

$$\approx Cl\bar{v}. \quad (3)$$

Здесь  $C$  – по-прежнему теплоемкость единицы объема, но появилась и новая буква (да еще с чертой)  $\bar{v}$ . Это – средняя (поэтому с чертой) скорость фононов. Фононы – кванты звуковой энергии. Средняя скорость фононов порядка скорости звука  $u$  в твердом теле.

Следует обратить внимание на то, что коэффициент теплопроводности в формуле (3) состоит из трех сомножителей: фононной теплоемкости, длины пробега фононов, скорости фононов. Первый сомножитель указывает, что переносится, второй – на какое расстояние, третий – с какой скоростью. Так устроены многие кинетические коэффициенты.

Формула для  $\chi$ , как и большинство формул этой статьи, претендует на правильность *по порядку величины*, что подчеркивает значок « $\approx$ » вместо знака равенства.

В *газе* существуют два механизма переноса тепла. Газ отличается тем, что в нем наряду с хаотическим (тепловым) движением частиц возможно упорядоченное движение в виде направленного потока частиц. В потоке средняя скорость частиц отлична от нуля ( $\bar{v} \neq 0$ ). Такой поток, если температура в газе неоднородна, переносит тепло. Подобного механизма, естественно, нет в твердом теле. Если в среднем газ покоится ( $\bar{v} = 0$ ), то в результате столкновений частиц более интенсивное хаотическое (тепловое) движение распространяется по газу – переносится тепло. Этот механизм похож на перенос тепла в твердом теле. Только вводить фононы нет необходимости: перенос тепла осуществляют сами частицы газа. Коэффици-

циент переноса тепла выражается формулой, аналогичной предыдущей:

$$\approx Cl\bar{v}, \quad (3')$$

но здесь  $C$  – теплоемкость единицы объема газа,  $l$  – средняя длина свободного пробега частицы газа, а  $\bar{v} \approx \sqrt{kT/m}$  – средняя скорость хаотического движения частиц, где  $m$  – масса отдельной частицы.

Чтобы несколько перебить тяжеловесное изложение простого вопроса, скажем: специфически газовый механизм переноса тепла – попросту перемешивание, что особенно очевидно, если упорядоченное (нетепловое) движение газа циклично.

Теперь, наверное, ясно, почему мы исключили металлы, описывая теплопроводность твердых тел: в металлах есть свободные электроны (*газ электронов*). Электроны не просто принимают участие в теплопроводности. Их движение – *главный механизм теплопроводности металла*. Поэтому надо уточнить, *как* движутся, создавая поток тепла, электроны. Перенос тепла электронами называется теплопроводностью, если плотность тока в металле равна нулю, т.е. отсутствует упорядоченное движение электронов.

Перенос тепла электрическим током и возникновение тока (или разности потенциалов) под воздействием градиента температуры – все эти явления носят обобщающее название *термоэлектрических явлений*. Особенно большую роль они играют в полупроводниках, значительно более чувствительных к температуре, чем металлы.

\* \* \*

Теперь можно пытаться отвечать на вопросы, привлечшие мое внимание и послужившие поводом к написанию статьи.

Начнем с наших ощущений.

Дотронувшись до горячего или холодного предмета, сев в ванну с горячей или теплой водой, окунувшись в море, мы довольно точно определяем температуру того, с чем соприкасается наше тело. На ветру мы часто ошибаемся: в холодный ветреный день воздух нам кажется более холодным, чем показывает термометр (это и учитьвают синоптики). Что же мы чувствуем, если не температуру окружающей среды? Не вдаваясь в механизм ощущения (я в этом не разбира-

<sup>2</sup>Фонон – квант звуковых волн (так же, как фотон – квант электромагнитных волн). (Прим. ред.)