Чтобы эта задача не осталась лишь примером из школьной физики, придадим полученным формулам несколько другой вид. Если $\varepsilon_0 = \frac{mv_0^2}{2}$ и $\varepsilon = \frac{mv^2}{2}$ – энергии частицы с массой m до и после столкновения, а $p_0 = mv_0$ и $p = mv$ – ее импульсы, то

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{4M/m}{(1+M/m)^2}, \text{ где } \Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0,$$

$$\frac{\Delta p}{p_0} = -\frac{2M/m}{1+M/m}, \text{ где } \Delta p = p - p_0. \qquad (4)$$

Пусть масса M покоящейся до столкновения частицы значительно превосходит массу m налетающей на нее частицы ($M \gg m$). Тогда

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} \simeq 4\frac{m}{M} \ll 1, \quad \frac{\Delta p}{p_0} \simeq -2. \qquad (5)$$

Словами: легкая частица при столкновении с тяжелой, существенно изменяя свой импульс, почти не изменяет энергии. На научном жаргоне: столкновение легкой частицы с тяжелой *квазиупруго* (почти упруго; упругое столкновение – столкновение без передачи энергии, как при $M \to \infty$).

Теперь можно рассмотреть интересную, на мой взгляд, задачу из макрофизики. Представим себе ящик, наполненный газом тяжелых частиц (с массой M). Они, конечно, движутся, как им положено: если температура газа T, то средняя величина скорости частиц равна $V_T = \sqrt{\frac{2k_Б T}{M}}$, где $k_Б$ – постоянная Больцмана (скорость тем меньше, чем тяжелей частицы). В этот ящик «впрыскиваются» струи газа легких частиц (с массой $m \ll M$), причем энергия движения частиц в струях в расчете на одну частицу ε больше энергии теплового движения тяжелых частиц $k_Б T$. (Здесь ε – не энергия теплового движения: все частицы, возможно, имеют одну и ту же скорость v_0, а $\varepsilon = \frac{mv_0^2}{2}$.) «Впрыснули» газовые струи и закрыли ящик. Цель: изучить, что будет происходить дальше.

Чтобы было проще рассуждать, будем считать, что содержимое ящика полностью отгорожено от внешнего мира, а число «впрыснутых» легких частиц равно числу тяжелых. На это условие обратите особое внимание, читая последние абзацы этого раздела.

Легкие частицы сталкиваются с тяжелыми и друг с другом. При столкновении друг с другом они обмениваются энергиями и импульсами. Если бы тяжелых частиц не было вовсе, в газе легких частиц установилось бы равновесное распределение, причем температура газа соответствовала бы энергии движения частиц в струях. Если полный суммарный импульс частиц во всех струях не был равен нулю при «впрыскивании», то он обратится в ноль за счет столкновений (в том числе и со стенками). Время, которое пройдет после впрыскивания до установления равновесия, называется *временем релаксации.* Обозначим его буквой τ.

Что будет происходить, если в ящике есть тяжелые частицы? Сталкиваясь с ними, легкие частицы будут существенно изменять свой импульс. Тяжелые частицы при этом почти ничего не «почувствуют» – их скорость после столкновения практически не изменится (см. формулы (3)). Однако легким частицам для потери полного импульса уже нет необходимости долетать до стенок. Даже если ящик бесконечно большой, постепенно движение струй прекратится, и легкие частицы будут двигаться беспорядочно. Это означает, что суммарный импульс газа легких частиц обратился в ноль. Время, которое для этого необходимо, называется *временем релаксации импульса*. Обозначим его так: τ_p.

Столкновения с тяжелыми частицами, как мы знаем, почти не изменяют энергии легких частиц, т.е. они почти не передают свою энергию тяжелым частицам. Поэтому процесс релаксации в газе легких частиц будет идти так. Быстро, за время τ_p, обратится в ноль суммарный импульс легких частиц. Быстро в газе легких частиц установится равновесное распределение по энергиям (за счет столкновений легких частиц друг с другом), время этого процесса назовем $\tau_{вн}$.[3] Иными словами, за время $\tau_{вн}$ в газе легких частиц установится температура $T_л$, соответствующая энергии легких частиц в струях. По нашему предположению $T_л > T$, где T – температура тяжелых частиц. Потом медленно, за счет квазиупругих столкновений между легкими и тяжелыми частицами, будет идти процесс выравнивания температур в смеси двух газов. В конце концов установится единая температура. На это понадобится время τ_ε, значительно превосходящее τ_p и $\tau_{вн}$. Оно называется *временем энергетической релаксации.*

[3] *Индекс «вн» – сокращение слова «внутреннее».*

Перечитайте написанное и вы убедитесь, что описанный «сценарий» релаксации смеси газов основан на формулах (5) – следствиях законов сохранения при $M \gg m$. Но при чем здесь твердое тело, если речь шла о газах?

Пусть легкие частицы — это электроны, а тяжелые – примеси в полупроводнике. Ясно, что рассеяние электронов на примесях, которые в тысячи раз тяжелее электронов, происходит *почти упруго*, и релаксация в полупроводниках происходит приблизительно так, как мы описали выше.

В физике полупроводников существует целый раздел, носящий название *горячие электроны.* Горячие они потому, что их температуры выше, чем температура ионов кристаллической решетки. Теперь мы знаем, почему это возможно. Понимание свойств горячих электронов важно при практическом использовании полупроводников, а также при решении задач физики полупроводников – активно развивающейся области физики твердого тела.

И в физике плазмы, ведь плазма – смесь электронов и ионов, понимание почти упругого характера столкновений электронов с ионами тоже необходимо.

Так решение простой школьной задачи о столкновении двух шариков разных масс оказывается полезным в самых различных областях физики. Заметим (трудно удержаться): плазма — самое распространенное состояние вещества во Вселенной.

Частицы-волны, волны-частицы

В классической (доквантовой) физике описание почти любого явления требовало выбора «исполнителя»: либо частица, либо волна. Оказалось, понятия «частица» и «волна» не исключают друг друга. Микрочастицы иногда ведут себя как волны, а волны обладают свойствами частиц. Совокупность свойств, из которых