

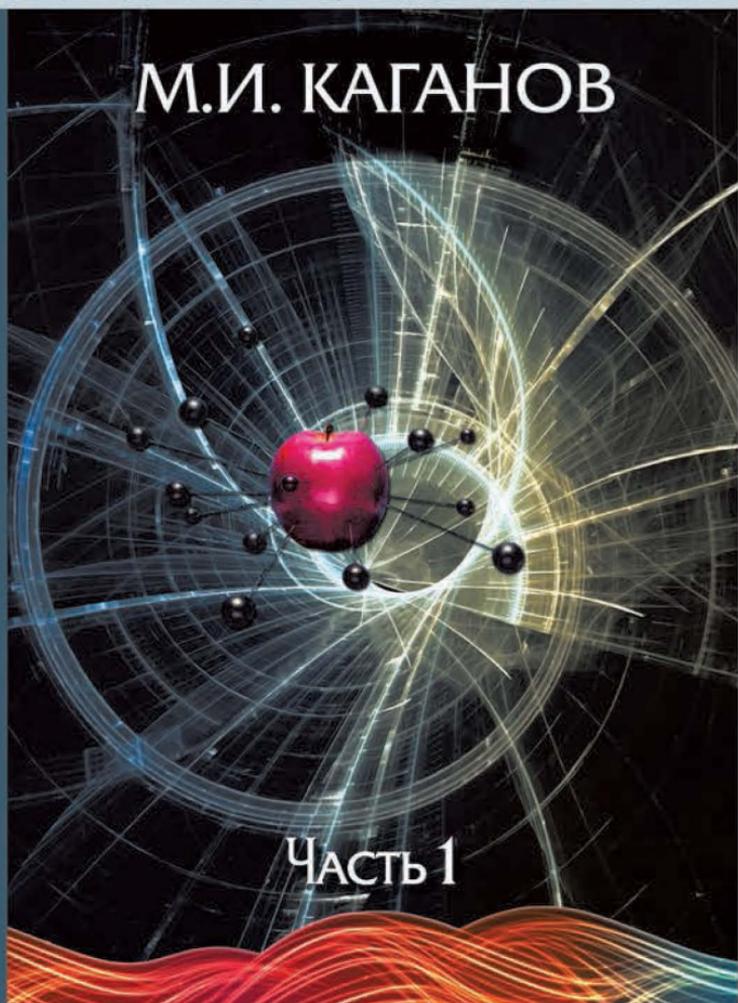
ВЫПУСК

129



Библиотечка КВАНТ

М.И. КАГАНОВ



Часть 1

ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА

Библиотечка «Квант»
Приложение к журналу «Квант» № 1/2014

М. И. Каганов

Физика глазами физика

Часть 1

Электронное издание

Москва
Издательство МПНМО

УДК 51(091)

ББК 22.3

К93

Каганов М. И.

Физика глазами физика. Часть 1.

Библиотечка «Квант». Вып. 129. Приложение к журналу «Квант» №1/2014.

Электронное издание.

М.: МЦНМО, 2016.

176 с.

ISBN 978-5-4439-2379-6

В книге собраны вместе все публиковавшиеся в журнале «Квант» статьи одного из самых постоянных и любимых авторов — Моисея Исааковича Каганова, физика-теоретика, специалиста в области квантовой теории твердого тела, одного из ярких представителей школы Ландау.

Статьи в сборнике расположены в хронологическом порядке. Первая статья была напечатана в журнале «Квант» №12 за 1970 год, последняя поступившая в редакцию статья будет опубликована во второй части предлагаемого сборника.

Книга адресована прежде всего тем молодым людям, кто в будущем видит себя финишом. Но, несомненно, она будет интересна и самому широкому кругу читателей.

Подготовлено на основе книги:

Каганов М. И. Физика глазами физика. Часть 1. — М.: МЦНМО, 2014. — 176 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 129. Приложение к журналу «Квант» №1/2014. — ISBN 978-5-4439-0618-8

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11,
тел. (499)241-08-04.
<http://www.mccme.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
О трении	5
О механике Аристотеля	18
Электрон движется с трением	29
Электрон излучает фотоны	38
Выдающийся физик-теоретик XX века	49
Много или мало?	56
Взглянув на термометр...	67
Письма о физике	75
Апология физики	82
Из жизни физиков и физики	90
Вокруг шарика	101
Как устроены металлы?	113
Просто физика	131
Законы сохранения помогают понять физические явления	146
Сверх...	164

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом и следующем выпусках Библиотечки «Квант» редколлегия решила сделать подарок читателям: собрать вместе все публиковавшиеся в «Кванте» статьи одного из самых постоянных и самых любимых авторов – Моисея Исааковича Каганова.

Моисей Исаакович Каганов – физик-теоретик, один из ярких представителей школы Ландау, специалист в области квантовой теории твердого тела. Доктор физико-математических наук, профессор МГУ имени М.В.Ломоносова и почетный доктор Вроцлавского технологического университета. Участник Великой Отечественной войны. В 1949 году окончил физико-математический факультет Харьковского государственного университета, с 1949 по 1970 год работал в Украинском физико-техническом институте, а с 1970 по 1994 год – в Институте физических проблем имени П.Л.Капицы. Одновременно преподавал – сначала в Харьковском университете, потом в Московском. Сейчас живет в США.

По замечательным научным монографиям Моисея Исааковича (с соавторами) воспитывалось несколько поколений молодых физиков, а его удивительные научно-популярные статьи и книги помогли многим школьникам выбрать свой жизненный путь.

В 2011 году Моисею Исааковичу исполнилось 90 лет, однако он продолжает активно работать. Его статья «Постоянная Планка – символ квантового века» написана совсем недавно и будет впервые опубликована во второй части предлагаемого вашему вниманию сборника.

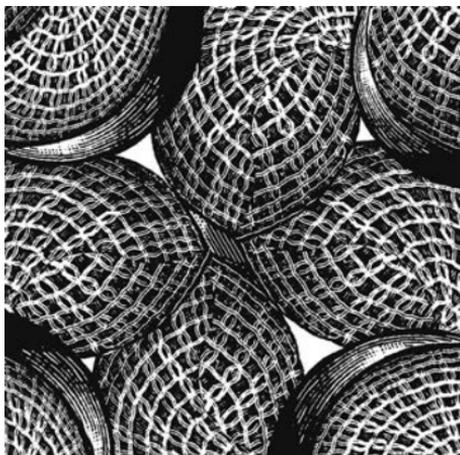
В чем ошибка Аристотеля

Аристотеля обычно вспоминают, чтобы покритиковать. И то у него неправильно, и это. Особенно достается ему в курсе механики. Ведь хорошо известно, что силе пропорционально ускорение тела, а тело, предоставленное само себе, движется с постоянной скоростью. А Аристотель утверждал нечто другое: скорость тела пропорциональна действующей на него силе. И если не прикладывать силу, то тело остановится. Правда, наш каждодневный опыт скорее подтверждает утверждения Аристотеля, чем Ньютона, два закона которого мы сформулировали выше. Действительно, чтобы тело двигалось, его надо толкать или тянуть, т.е. прикладывать к нему силу, а как только приложенная сила исчезает, тело останавливается. Утверждение Аристотеля, на первый взгляд, лучше согласуется с наблюдаемыми явлениями, чем законы Ньютона. Поэтому-то так трудно было бороться с авторитетом Аристотеля.

Согласие между теорией (законами Ньютона) и экспериментом (наблюдениями за движущимися предметами) обнаруживается, если учесть силы трения. Когда, как казалось Аристотелю, на тело ничто не действует и поэтому (!) оно останавливается, на него в действительности действует сила трения, которая и тормозит движение.

Что же такое сила трения? Какова ее природа?

Чаще всего мы вспоминаем о ней, изучая работу механизмов, задумываясь о скольжении санок по снежному насту или лодки по водной поверхности. В общих чертах понять, что происходит при соприкосновении двух тел, пожалуй, можно.



Трение и атомы

Атомы соприкасающихся тел (полозьев и снега или подшипника и обоймы) взаимодействуют друг с другом.¹ При движении атомы одного тела пытаются увлечь атомы другого. Если им удастся это, то одно из них или оба разрушаются. Мы говорим обычно – стираются. Давайте, чтобы не затруднять рассмотрение, пренебрежем стиранием. При не очень больших скоростях и достаточно твердых деталях это вполне допустимо. Итак, атомам одного тела не удастся увлечь атомы другого тела. Что же все-таки происходит? Атомы твердого тела (кристалла) располагаются в определенных позициях в положениях равновесия. Правда, термин «располагаются» несколько условен, так как атомы все время находятся в движении: они совершают малые колебания около положений равновесия. Интенсивность этих колебаний определяется температурой. Чем больше температура, тем больше энергия и амплитуда колебаний атомов. Атомы кристалла взаимодействуют друг с другом. Изменение движения одного атома или группы атомов передается соседним.

Когда одно тело движется относительно другого, касаясь его, атомы этих тел «цепляют» и раскачивают друг друга. Если не бояться вульгаризации, то этот процесс можно представить себе так: человек бежит мимо висящих рядом маятников и раскачивает их (рис.1). Или еще лучше: маятники связаны между собой. Качнув один или несколько, заставляют двигаться все остальные.

Колебания атомов, расположенных на поверхности тела, передаются атомам, расположенным в глубине. Передача энергии от поверхности в глубину тела – сложный процесс, не до конца прослеженный до сих пор (хотя общие черты его понятны). Пути передачи энергии существенно зависят от того, что представляет собой твердое тело. Например, в металлах энергию могут уносить электроны. Но, каков бы ни был путь отвода энергии от поверхности, в конечном счете трение одного тела о

¹ Несколько туманное слово «взаимодействуют» означает, что атомы либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. В действительности – и притягиваются, и отталкиваются. Вдали притягиваются, а вблизи отталкиваются. Надо только помнить, что масштабы в мире атомов – это ангстремы ($1\text{ \AA} = 10^{-8}$ см). «Вдали» означает расстояние много больше 1 \AA , вблизи – порядка 1 \AA . При соприкосновении атомы разных тел находятся друг от друга на расстояниях, значительно превышающих 1 \AA .

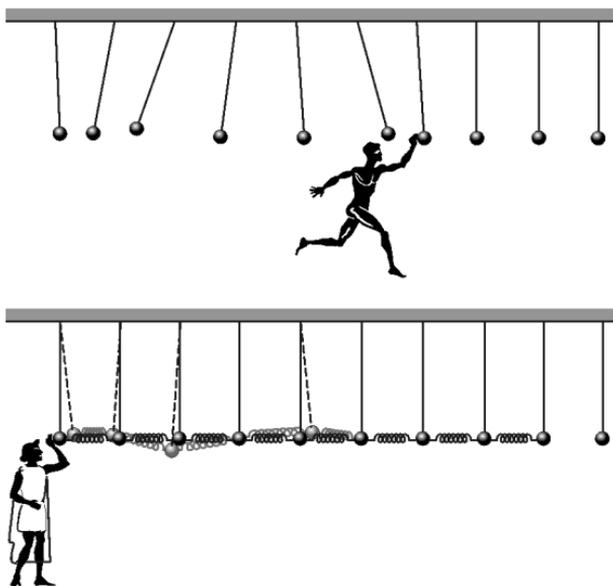


Рис. 1

другое приводит к повышению температуры. Кроме того, в процессе трения происходят изменения структуры трущихся поверхностей. Их необходимо учитывать при желании понять все явления, сопровождающие трение.² Однако, пока мы не пытаемся построить количественную теорию, нам не очень важно точно знать, что происходит в твердом теле. Существенно понять: энергия движущегося тела частично тратится на возбуждение движения атомных частиц, из которых состоят твердые тела.

Можно сказать, что трущиеся тела «работают», только работа эта делается впустую – энергия тратится на нагрев тела, которое чаще всего приходится искусственно охлаждать (человек каменного века, привыкший добывать огонь трением, не согласился бы с нами). Чем больше взаимная скорость тел, тем больше энергии расходуется на раскачку атомов, значит, тем большую работу производят тела. С другой стороны, известно, что работа в единицу времени (мощность) равна силе, умноженной на скорость. Эта сила и есть сила трения.

² Проблемой трения заняты коллективы ученых, которым приходится привлекать самые современные методы исследования и последние представления о движении атомных частиц в твердых телах.

Мы весьма формально «ввели» силу трения. Правда, попытались разъяснить ее природу.

Можно, поступить и несколько иначе. Выяснить, какое количество импульса (количество движения) теряет движущееся тело в единицу времени на возбуждение колебаний атомов. Согласно закону Ньютона изменение импульса тела в единицу времени равно действующей на него силе. Это дает нам возможность определить силу трения. Конечно, оба определения приводят к одному и тому же значению силы.

Сила трения характеризует взаимодействие между макроскопическими телами, и, хотя трение – результат взаимодействия отдельных атомных частиц, сила трения разительно отличается от сил, которые действуют между атомами и молекулами. Действительно, силы, действующие между атомами и молекулами, зависят только от расстояния между ними, а сила трения зависит от относительной скорости тел. Однако сила трения не только этим отличается от сил взаимодействия между микроскопическими телами. Она обладает свойством, называемым разными словами, смысл которых одинаков:

Необратимость, диссипация, потери

Под действием силы трения тело всегда теряет энергию, всегда тормозится. Это связано с тем, что энергия движения тел при трении расходуется на возбуждение движения атомных частиц. Атомов невообразимо много (в воздухе $\sim 10^{23}$ частиц в 1 см^3), движутся они беспорядочно. Переданная им энергия попросту рассеивается (диссипируется, от французского *dissiparer* – рассеивать) между бесчисленными атомами. Новые хозяева энергии непрерывно обмениваются ею друг с другом и вовсе «не склонны отдать долг» макроскопическому телу. Описанный процесс есть, конечно, переход кинетической энергии в тепловую. Мы видим, что этот процесс необратим.

Плодотворный метод обобщения понятий состоит в том, что одно из основных свойств, присущее данному понятию, принимают за его новое определение. Воспользуемся этим методом для обобщения понятия трения. Важнейшее свойство трения, как мы видели, это необратимость, связанная с переходом энергии упорядоченного движения в тепло. Примем это свойство за определение и отныне будем именовать трением всякий необратимый процесс, сопровождающийся переходом энергии упорядоченного движения в тепло. Теперь можно говорить о

трении двух встречных потоков газа – они взаимно тормозятся и нагреваются, о трении твердого тела о газ и так далее.

А сила трения? Она по-прежнему сопровождает процесс трения. В самом деле, в процессе трения энергия упорядоченного движения уменьшается, значит, уменьшается и его скорость. Иными словами, ускорение направлено в сторону, противоположную скорости тела. Вспомним второй закон Ньютона. Где есть ускорение, там есть и сила. Эта сила и есть сила трения. Она направлена в сторону, противоположную скорости, она всегда тормозит.

Простой случай

Бывают случаи, когда расчет силы трения сравнительно прост и не требует глубокого проникновения в теорию твердого тела. Пусть, например, твердое тело движется через достаточно разреженный газ. Тогда сила трения обусловлена столкновениями атомов газа с поверхностью тела.

Прежде чем приступить к расчету силы трения, рассмотрим отдельный акт столкновения. Частица с импульсом \vec{p} падает на поверхность тела. Столкновение атома с поверхностью – сложное событие. Подумаем, что может произойти. Атом может остаться на поверхности (прилипнуть), может глубоко проникнуть в тело, а может и отразиться от поверхности тела. При отражении (нас будет интересовать именно этот случай, мы дальше объясним почему) тоже возможны различные ситуации. Например, атом может ионизоваться или выбить атом с поверхности, молекула может распасться на составляющие ее атомы и так далее. Короче говоря, возможностей много, но будем считать, что атом просто отразился, как мяч от стенки. Не для упрощения, хотя эта ситуация действительно простейшая, а потому, что в подавляющем большинстве случаев при не слишком быстром движении тела через газ именно это и происходит – атомы просто отражаются (отскакивают) от поверхности тела.³ Более сложные ситуации (внедрение атомов в твердое тело, ионизация и др.), конечно, тоже наблюдаются и подробно исследованы. Каждый из этих процессов происходит с наибольшей вероятностью при определенной скорости частиц. Например, чем больше скорости частиц, тем больше вероятность того, что атом проникнет на сравнительно большую глубину в твер-

³ К счастью, очень редко молекулы воды из воздуха прилипают к летящему самолету. Иначе опасность оледенения возросла бы во много раз.

дое тело. Чтобы представить себе, о каких скоростях идет речь, отметим: атом кислорода, налетающий на поверхность твердого тела со скоростью 10^7 см/с, проникает приблизительно на 10–12 атомных расстояний в глубину твердого тела.⁴ Средняя тепловая скорость v атомов газа с массой m , как показывает молекулярно-кинетическая теория газов, равна $\sqrt{\frac{kT}{m}}$, где T – температура в абсолютных единицах, а k – так называемая постоянная Больцмана, равная $1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/град. При $T = 300$ К ($= 27$ °С) средняя скорость атома кислорода меньше 10^5 см/с. Если тело покоится в газе, то средняя скорость столкновений молекул газа с поверхностью тела приблизительно совпадает со средней тепловой скоростью; если же тело движется, то отличается от нее. Однако в том случае когда скорость движущегося тела мала по сравнению со средней тепловой скоростью (никогда не следует проходить мимо частных случаев, в которых исследуемый вопрос выглядит проще), скорость столкновения почти не отличается от тепловой, и энергии атома попросту недостаточно для проникновения вглубь твердого тела.

Хотя мы назвали случай отражения атомов от поверхности твердого тела простейшим, но и он нуждается в пояснении. И атом, и тем более твердое тело – сложные системы, состоящие из большого числа частиц. При отражении атома от поверхности тела часть его энергии может уйти на то, чтобы несколько изменить внутреннее состояние атома или твердого тела, попросту говоря, сдвинуть частицы, из которых состоят атом и твердое тело. Если это произошло, то столкновение называется неупругим. Если же нет, то упругим. Каждое столкновение обладает некоторой неупругостью, но если часть энергии, ушедшая на изменение внутреннего состояния сталкивающихся объектов (атома, твердого тела), мала по сравнению с энергией атома, то неупругостью можно пренебречь и считать столкновение полностью упругим. Мы будем рассматривать именно такие столкновения.

Несколько слов о мяче

Может и должен возникнуть вопрос: «Почему неупругость мала?» Ответить на него непросто. Разберем несколько подробнее отскок мяча от стенки или, что проще, от

⁴ Кинетическая энергия атома кислорода при этом равна 10 кэВ (см. ниже).

пола. Если столкновение упруго, то мяч, начавший движение с нулевой скоростью, после удара об пол подпрыгнет на высоту, с которой упал (трением о воздух пренебрегаем). Если столкновение неупруго, то мяч не долетит до начальной высоты. Опыт показывает, что твердый, хорошо надутый, мяч прыгает хорошо, а мягкий – плохо. И что от деревянного пола мяч отскакивает хорошо, а от песка – плохо. Все определяется тем, легко или трудно сдвинуть молекулы или атомы, из которых состоят сталкивающиеся тела (мяч, пол), относительно друг друга. Если легко (ненадутый мяч, отскок от песка), то соударение неупруго, если трудно, то – упруго. Казалось бы, должно быть иначе. Если трудно сдвинуть, то на это тратится большая часть энергии, если легко, то меньшая. Тогда было бы наоборот: мягкий мяч подпрыгивал бы на большую высоту, чем твердый. Хотя непосредственное наблюдение отвергает эту возможность, имеет смысл проверить себя расчетом.

Законы сохранения и неравенства

Рассмотрим столкновение двух элементарных частиц в том случае, когда одна из них гораздо тяжелее другой. Называя частицу элементарной, мы утверждаем, что внутреннее движение в частице отсутствует или не играет никакой роли в изучаемом явлении. Так, Землю можно было бы считать элементарной частицей при изучении движения Луны, если бы не приливы и отливы, «отсасывающие» ее энергию. Жесткий, хорошо надутый, мяч выступает в процессе столкновения как элементарная частица, а слабо надутый – как сложное тело.

Пусть тяжелая частица массой M до столкновения покоится. Обозначим через $\vec{p} = m\vec{v}$ импульс легкой частицы до столкновения. Для оценки импульсов и энергий частиц после столкновения воспользуемся законами сохранения энергии и импульса.

Ясно, что в результате столкновения кинетическая энергия тяжелой частицы может только увеличиться (напомним, что до столкновения она равнялась нулю). Так как полная энергия не изменяется, то кинетическая энергия легкой частицы, после столкновения уменьшается, а вместе с ней уменьшается скорость легкой частицы и величина ее импульса. Поэтому изменение импульса легкой частицы $\Delta\vec{p} = \vec{p}' - \vec{p}$ не превосходит по величине $2m\vec{v}$.

Применим теперь закон сохранения импульса. Он утверждает, что изменения импульсов $\Delta\vec{p}$ и $\Delta\vec{P}$ легкой и тяжелой частиц

равны по величине и противоположны по направлению: $\Delta\vec{p} = -\Delta\vec{P}$. С другой стороны, так как тяжелая частица до столкновения покоилась, то $\Delta p = \Delta P = MV'$ (V' – скорость тяжелой частицы после столкновения). Поэтому

$$V' \leq \frac{m}{M}v \text{ и } \frac{MV'^2}{2} \leq \frac{2m^2}{M}v^2 = \frac{4m}{M} \frac{mv^2}{2}.$$

Это означает, что

$$\frac{MV'^2}{2} : \frac{mv^2}{2} \leq 4 \frac{m}{M}.$$

Итак, отношение энергии, переданной тяжелой частице, к первоначальной энергии легкой частицы не может превысить значения $4 \frac{m}{M}$. Чем тяжелее тело, с которым сталкивается частица, тем меньше переданная энергия, тем ближе столкновение к упругому.

При столкновении с телом большой массы переданная ему энергия очень мала. Но ведь масса – мера инерции. Тело большой массы трудно сдвинуть.⁵ Таким образом, при столкновении с телом, которое трудно сдвинуть, передается малая доля энергии. Подтвердилось наше наблюдение над отскоком мяча.

Прочитав внимательно последние абзацы, можно убедиться, что, отказавшись от точных соотношений – равенств, мы смогли почти без труда получить существенные сведения о процессе столкновения.

Твердое тело с точки зрения атома

Теперь вернемся к столкновению атома с твердым телом. Прежде всего постараемся понять, почему атом ведет себя как надутый (жесткий, упругий) мяч, а не как мягкий, слабо надутый. Хорошо известно, что электроны в атоме находятся в определенных фиксированных (чаще говорят, дискретных) состояниях, каждому из которых соответствует определенная фиксированная энергия. Но это означает, что, для того чтобы изменить внутреннее состояние атома (перевести электроны или хотя бы один электрон из одного состояния в другое), нужно затратить энергию, равную разности энергий конечного и начального состояний (рис.2). Если кинетическая энергия $E_{кин}$ атома газа гораздо меньше, чем разность энергий двух электронных состояний в атоме, т.е. если

$$E_{кин} \leq \Delta E,$$

⁵ Одна и та же сила, приложенная к телам с разной массой, придает им ускорения, обратно пропорциональные массам.

то атом отражается упруго, ему попросту не хватает энергии для возбуждения своих электронов и приходится вести себя как элементарная частица.⁶ Как же обстоит дело в действительности? Обратимся к цифрам. Различие энергии ΔE между возбужденным состоянием и основным составляет несколько электрон-вольт. Когда речь идет о тепловых свойствах тел, энергию теплового движения атомов принято измерять в кельвинах.⁷ Различие энергии между возбужденным состоянием и основным составляет в градусном выражении примерно 10^5 К. В то же время температура земных газов, конечно, значительно меньше 10^5 К. Наша догадка подтвердилась – все дело в соотношении энергий.

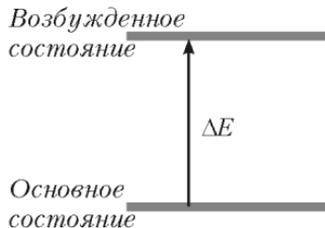


Рис. 2

Мы рассмотрели вопрос с точки зрения состояния атома, но ведь атом может потратить часть энергии на возбуждение движения в твердом теле. Что касается возбуждения электронов внутри атомов, составляющих твердое тело, то к ним полностью относится только что проведенное рассуждение: не хватает энергии. Но атом может качнуть атом (или атомы) твердого тела – заставить его колебаться. Однако надо помнить, что атомы в твердом теле связаны друг с другом (об этом мы говорили вначале). Один атом сдвинуть нельзя, можно возбудить в теле коллективное движение атомов, другими словами, возбудить звуковую волну. Этот процесс и есть главная причина неупругости столкновения атомов с твердым телом, если атомы падают на поверхность тела с не слишком большими скоростями. Однако, как показывает расчет, изменение энергии атома при этом мало. В данном случае твердое тело при взаимодействии с атомом «выступает» как макроскопическая система – «тяжелая на подъем», а, как мы убедились выше, это обстоятельство обеспечивает упругость столкновений.

Приведенные выше, конечно, очень приближенные рассуждения позволяют оценить, до каких скоростей атомов можно считать столкновения упругими. Пока падающий атом «воспринимает» твердое тело как целое, изменение энергии практически

⁶ Если вы зайдете в магазин, в котором стоимость самого дешевого предмета превышает сумму, имеющуюся в ваших карманах, то «столкновение» с магазином произойдет «упруго» – с чем зашел, с тем и вышел.

⁷ $1 \text{ K} = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} = 0,87 \cdot 10^4 \text{ эВ}$.

отсутствует – изменяется только направление импульса, а когда его энергии хватает на то, чтобы выбить атом твердого тела из его равновесного положения или возбудить электроны внутри себя или в атомах твердого тела, тогда столкновение существенно неупруго.

Так как потенциальная энергия взаимодействия атомов (или молекул) в твердом теле в расчете на одну частицу, как правило, меньше, чем энергия возбуждения электронов в атоме, то критическая скорость $v_{кр}$ (скорость, выше которой столкновение заведомо нельзя считать упругим) определяется энергией связи. Но энергия связи атомов в твердом теле равна (очень грубо) кинетической энергии молекул при температуре плавления:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT_{пл}.$$

Поэтому

$$v_{кр} \approx \sqrt{\frac{kT_{пл}}{m}},$$

где m – масса атома, сталкивающегося с твердым телом.

Может показаться, что нас сильно «увело» в сторону, что мы забыли, о чем ведем разговор – о природе сил трения. Это не так. Длинный разговор о столкновениях атома с твердым телом нам нужен, во-первых, для того, чтобы объяснить именно силу трения. Но, пожалуй, не менее важно и «во-вторых». Во-вторых, этот разговор нужен для того, чтобы показать сложность физических явлений, даже привычных, даже, казалось бы, совершенно элементарных. Можно было, конечно, просто сказать, что атом упруго (мы теперь понимаем, что означает этот термин) отражается от поверхности твердого тела. Но тогда из поля зрения выпала бы сложность взаимодействия атома с поверхностью твердого тела. И, пожалуй, главное: слишком упрощенное представление может привести к ошибкам. Например, если тело движется через газ с очень большой скоростью, то соответственно велика и скорость столкновения атомов с его поверхностью. Тут уже не учитывать неупругость нельзя.

Правда, к оценке «очень большой» надо подходить осторожно. Например, реактивный самолет, летящий с огромной сверхзвуковой скоростью через атмосферу, с точки зрения столкновений надо считать летящим медленно. Разнообразные сложности, возникающие при сверхзвуковом полете, обусловлены отнюдь не характером столкновений молекул воздуха с самолетом, а макроскопическими причинами – именно тем обстоятельством, что самолет летит быстрее звука, перегоняя звуковые волны, кото-

пульсах, т.е. при $p \ll mc$. Чаще это неравенство формулируют как признание того, что скорость частицы v мала по сравнению со скоростью света ($v \ll c$).

В механике Ньютона кинетическую энергию $\epsilon_{\text{кин}}$ принято отсчитывать от нуля, считая, что $\epsilon_{\text{кин}} = 0$ при $p = 0$. Поэтому, желая произвести предельный переход к классическому выражению для кинетической энергии, надо в формуле (16) прежде всего слева и справа вычесть mc^2 – энергию покоя:

$$\epsilon_{\text{кин}} = \epsilon - mc^2 = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2} - mc^2.$$

Домножив и разделив правую часть на $\sqrt{m^2c^4 + c^2p^2} + mc^2$, воспользовавшись алгебраической формулой для разности квадратов и положив в знаменателе $p = 0$ ($p \ll mc$), получим привычное выражение

$$\epsilon_{\text{кин}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}.$$

Формулы (15) и (16) – предвестники *квантовой механики*. Они сыграли важную роль: помогли Э.Шредингеру сформулировать свое знаменитое уравнение (уравнение Шредингера) – математическую основу квантовой механики (раньше ее называли волновой механикой). Но это – уже совсем другая тема...

Моисей Исаакович Каганов

ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА

Часть 1

Библиотечка «Квант». Выпуск 129

Приложение к журналу «Квант» №1/2014

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *М.Н.Грицук, Е.А.Митченко*

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская

Печать офсетная. Объем 5,5 печ.л. Тираж: 1-й завод 900 экз.

Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: math@kvant.ras.ru, phys@kvant.ras.ru

Отпечатано «ГДДС-СТОЛИЦА-8»

Тел.: 8(495)363-48-86, <http://capitalpress.ru>

Индекс 90964



Библиотечка КВАНТ

М.И. КАГАНОВ

Часть 1



ФИЗИКА ГЛАЗАМИ ФИЗИКА



ВЫПУСК

129