

# ДИАЛОГ О ТЕМПЕРАТУРЕ

М. Я. Азбель

Научно-популярная статья — всегда своеобразная игра Автора и Читателя, в которой Автору верят на слово (отсюда — не так уж редко реализуемая — возможность жульничества), но зато он не имеет права писать непонятно и нагонять скуку. Иначе — проигрыш Автора: статья не будет прочитана и, значит, писалась зря.

Обычно популярная статья выглядит как длинный монолог. Но уже древние греки понимали, что научный диалог гораздо интереснее. Поскольку это не нарушает правил игры, последуем их примеру. В результате Читатель получит возможность, проявив характер, попытаться сначала сам найти ответы на поставленные вопросы, каждый из которых — это физическая задача, а иногда и целая проблема.

Итак, занавес поднимается — мы начинаем.

**Автор**

Температура, пожалуй, первое количественное понятие, с которым сталкивается в своей жизни человек. Пятилетний ребенок еще не умеет считать, но уже сообщает: «Я здоров, у меня 36,6», — не понимая еще даже смысла произносимых слов (для десятичных дробей нужно вырасти вдвое). Это означает, что речь идет об одном из важнейших физических понятий. Человечество на протяжении всей своей истории пытается понять вещи, поражающие еще в детстве: пространство, время... Ибо чем привычнее понятие, чем проще формулируется вопрос, тем он обычно глубже и тем труднее на него ответить. Впрочем, тем труднее его и задать — настолько он кажется очевидным. Так, в одном из детективных рассказов сыщики сбиваются с ног, разыскивая то, что находится у них перед глазами.

**Читатель**

Бог с ними, и с сыщиками, и с философскими рассуждениями. Нельзя ли поконкретнее?

**Автор**

Пожалуйста. Вот вопрос, последовательное выяснение которого ведет нас в конце концов к основным

понятиям общей теории относительности.

Все методы измерения температуры основаны на выравнивании температур, то есть на том, что более горячее тело охлаждается, а более холодное — нагревается. Не так ли?

**Читатель**

Конечно.

**Автор**

А почему это происходит? Почему тепло всегда переходит от более нагретого тела к менее нагретому?

**Читатель**

Не всегда! Холодильник, например, охлаждается, хотя около него нет более холодного тела. Тепло здесь передается более теплоту телу — окружающему воздуху и всему тому, что находится в комнате.

**Автор**

Вы опередили ход моих рассуждений, сделав очень важное замечание. Действительно, если потрудиться и затратить работу, можно холодным телом нагреть горячее. Не зря холодильник включается в сеть. Но в системе, не взаимодействующей ни с какими другими объектами (такую систему физики называют замкнутой), температура всегда выравнивается,

тепло передается от горячего к холодному. Во всех случаях, когда этого не происходит, можно найти, где система «разомкнута». Так, в случае холодильника его охлаждение происходит за счет энергии, полученной от электростанции, или, в конечном счете, от остывающего Солнца.

**Читатель**

Все, что вы говорите, по-моему, совершенно очевидно.

**Автор**

Я уже предупреждал: источник самых глубоких идей — кажущаяся очевидность. Давайте сформулируем сказанное в виде физического закона и посмотрим, какие из него вытекают следствия. Этот закон сводится к так называемому «второму началу термодинамики» («первым началом» называют закон сохранения энергии), или «закону возрастания энтропии».

Обычно, когда результаты эксперимента противоречат теории, надо исправлять теорию. Если же эксперимент противоречит второму началу термодинамики, ищут ошибку в эксперименте. И всегда находят ее. Ибо за всю историю науки не было ни одного случая, чтобы нарушился этот закон, так же как за всю историю человечества не было ни одного случая бессмертия. (Аналогия, в действительности, очень глубокая.)

Второе начало термодинамики гласит: *«В замкнутой системе происходит выравнивание температур»*. Иначе говоря, тепло переходит от горячего тела к холодному. Первое охлаждается, а второе нагревается.

Для того, чтобы отнять энергию у более нагретого тела, надо затратить работу. Значит, невозможен не только «вечный двигатель первого рода», который совершает работу из «ничего», вопреки первому началу термодинамики — закону сохранения энергии. Невозможен также не противоречащий этому закону «вечный двигатель второго рода», который бы, вопреки сформулированному нами второму началу термодинамики, совершал работу, ох-

лаждая моря, океаны, материки. Запасы их тепловой энергии практически неисчерпаемы, но — увы — недоступны. Какие соблазнительные проекты погубило второе начало!

Итак, в замкнутой системе происходит выравнивание температур.

Этот процесс заканчивается, когда температуры тел становятся одинаковыми. Тогда наступает состояние равновесия, но не механического, а термодинамического.

Но отсюда немедленно следует вывод о «тепловой смерти Вселенной», принадлежащий немецкому ученому Клаузиусу. Раньше или позже остынут все звезды, во всем мире установится одна и та же температура, любые процессы окажутся невозможными — мир превратится в безжизненную пустыню. Все попытки понять, почему этого не произошло за время существования Вселенной, были бесплодны до появления общей теории относительности!

**Читатель**

А согласно теории относительности температуры не выравниваются?

**Автор**

Нет, ответ не столь прямолинеен. Но для того, чтобы понять, как расправилась общая теория относительности с тепловой смертью, надо хоть немного рассказать об основных понятиях этой теории.

**Читатель**

А это, скажете вы сейчас, школьнику недоступно...

**Автор**

Наоборот, уверен, что доступно. Считаю, что чем глубже физическая или математическая идея, тем проще ее изложить, не используя никаких специальных знаний.

**Читатель**

Так расскажите, пожалуйста, об общей теории относительности.

**Автор**

Это должно быть темой отдельной беседы. Сегодня мы говорим о температуре, и мне было важно лишь показать, что, размышляя над тем, как термометр измеряет температуру, мож-

но прийти к теории Эйнштейна; показать, как много проблем и перспектив можно увидеть, читая школьную физику. Как видите, размышления о температуре оказываются исключительно плодотворными. Что же такое температура?

**Читатель**

Из того, что вы говорили, я понял, что температура — это то, что выравнивается при контакте двух тел. В школе нам говорили, что температура — это величина, пропорциональная средней кинетической энергии молекул:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

где  $k \approx 10^{-21}$  Дж/град — постоянная Больцмана.

Выравнивание температур происходит потому, что при столкновении энергия передается от частиц с большей энергией к частицам с меньшей энергией.

**Автор**

Какова, по-вашему, потенциальная энергия взаимодействия частиц в кристалле при абсолютном нуле температуры?

**Читатель**

Мы преодолеваем эту энергию, превращая кристалл в газ. Значит, на каждый атом приходится энергия, равная примерно  $kT_k$ , где  $T_k$  — температура кипения.

**Автор**

Совершенно правильная оценка. Значит, по-вашему, кристалл, находящийся при абсолютном нуле температуры, может нагреть газ, имеющий температуру ниже температуры кипения кристалла?

**Читатель**

Нет, конечно. Я имел в виду не полную, а кинетическую энергию, которая тем выше, чем выше температура.

**Автор**

Хорошо. Рассмотрим, например, кусок льда. Над ним, конечно, есть водяной пар. Из-за выравнивания температур у льда и пара при равновесии температуры одинаковы. Значит, одинаковы и средние скорости молекул в паре и кристалле льда.

**Читатель** (озадаченно).

Нет, это что-то странно. Ведь в твердом льде молекулы почти неподвижны, а в паре носятся с огромными скоростями. Я хорошо помню, что при испарении жидкость охлаждается. Есть даже такой способ получения очень низких температур — испарение жидкого гелия. Это и понятно. За границы молекулярного притяжения в жидкости могут вылетать лишь самые быстрые молекулы. Остающиеся же медленные соответствуют более низкой температуре.

**Автор**

Но разве на преодоление молекулярного притяжения в жидкости не будет истрачена часть энергии? Разве из жидкости в пар молекула вылетит с той же скоростью, с какой начинала свой путь?

**Читатель**

Поистине, хорошее дело спорить. Я никогда не думал, что в споре на самом деле рождается истина! Я, кажется, понял все до конца! Действительно, испаряются те молекулы, которые были самыми быстрыми, поэтому вначале жидкость охлаждается. Преодолевая притяжение, молекулы теряют свою скорость, как ракета, вылетающая к Луне. Поэтому газ тоже состоит не из рекордно быстрых молекул и средние скорости молекул в газе и жидкости совпадают. Благодаря испарению устанавливается общая температура. Если вылетающие — бывшие быстрые — молекулы уносятся, как при испарении под откачкой, можно добиться заметного понижения температуры жидкости.

**Автор**

А как быть со скоростями молекул в кристалле?

**Читатель**

В кристалле молекулы движутся с теми же средними скоростями, что и в паре над ним, но совершают не свободное поступательное движение, слегка искажаемое редкими столкновениями, как в газе, а колеблются возле стандартных мест в кристаллической решетке...

### Автор

...которые называются узлами решетки. Совершенно верно.

Но я буду продолжать сбивать вас. Со временем вы научитесь делать это самостоятельно. Графоман ищет подтверждений любой своей идее — ученый сначала начинает поиски возможных опровержений.

Итак, вы сказали, что температура определяет среднюю скорость молекул. Это значит, что средние скорости молекул в любых телах, независимо от их состава и состояния (вода, железо, воздух), при одной и той же температуре одинаковы. А при абсолютном нуле скорости равны нулю. Но как же тогда быть с гелием, который даже при абсолютном нуле температуры остается жидким?

### Читатель

Но я читал, что абсолютный нуль недостижим. Кстати, почему?

### Автор

Для того чтобы разобраться почему, нужно поговорить об энтропии. Это сильно уведет нас в сторону. А то, что нуль недостижим, в нашем случае несущественно. Принципиально мы можем приблизиться к нему сколько угодно близко. Для нас важно лишь то, что при температуре в несколько градусов Кельвина средняя скорость атомов гелия уже слабо зависит от температуры, а при изменении температуры от 1 до  $10^{-6}$  градуса практически не меняется, хотя, казалось бы, должна была уменьшиться в тысячу раз.

### Читатель

Может быть, это связано с особыми свойствами гелия, с его сверхтекучестью?

### Автор

Некоторая общность между этими явлениями есть. Однако оставаться жидким при абсолютном нуле — свойство не только гелия. Как вы знаете, хорошая электропроводность металлов обусловлена свободными электронами. Их средняя кинетическая энергия практически не зависит от температуры металла, и если ее пе-

ресчитать на температуру по нашей формуле  $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ , то мы увидим, что она соответствует температуре  $10^5$ — $10^6$  градусов, то есть температуре внутри звезд!

### Читатель

Может быть, не совпадают температуры металла и электронов?

### Автор

Нет, в состоянии равновесия температуры, как мы говорили, всегда выравниваются. Дело здесь в другом. То определение температуры, которое вы дали, правильно — но только в классической механике. Такая «простая», хорошо всем знакомая и фундаментальная величина, как температура, строго говоря, имеет квантовый характер! Именно в этом связь сверхтекучести гелия и того, что он никогда не замерзает при атмосферном давлении, — оба эти свойства чисто квантовые. Как видите, в поисках существенно квантовых эффектов не обязательно искать пути в микромир — эти эффекты перед глазами.

К сожалению, в квантовом случае смысл температуры не столь нагляден, как в классическом. Начнем с абсолютного нуля температуры и рассмотрим чисто квантовый эффект — определим кинетическую энергию при абсолютном нуле, то есть величину, в классической теории равную в точности нулю. Это позволит нам узнать, все ли вещества остаются твердыми при нулевой температуре, всегда ли способствует затвердеванию увеличение давления и каково состояние вещества в недрах Земли и в глубинах звезд.

Все эти выводы могут быть получены из одного важнейшего квантового закона — принципа неопределенности.

### Читатель

Принцип неопределенности в применении к координате и импульсу частицы я знаю. Координата и импульс не могут быть точно измерены, так как они не имеют одновременно определенного значения. При измерении им-

пульса частицы  $p$  и координаты  $x$  мы узнаем значения этих величин с некоторыми погрешностями  $\Delta p$  и  $\Delta x$ . Свойства этих двух величин таковы, что никоим образом нельзя сделать так, чтобы произведение этих погрешностей (иногда говорят «неопределенностей») было меньше, чем  $\hbar$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$

$$\left( \hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 10^{-32} \frac{\text{дж}}{\text{сек}} \right): \Delta p \Delta x \geq \hbar.$$

**Автор**

В объекте, состоящем из одинаковых атомов, все они тождественны, и потому их положение нельзя измерить с точностью большей, чем расстояние между ними. Если  $\Delta x \sim a$ , то каково наименьшее возможное значение импульса?

**Читатель**

Конечно,  $\frac{\hbar}{a}$ ! Если бы я сказал, что импульс, например, меньше  $0,1 \frac{\hbar}{a}$ , то это означало бы измерение его с точностью  $0,1 \frac{\hbar}{a}$ , что невозможно!

**Автор**

Значит, наименьшая возможная кинетическая энергия...

**Читатель**

$$\dots \text{равна } \frac{mv^2}{2} = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2ma^2},$$

то есть тем больше, чем меньше масса! Интересно, какой температуре соответствует такая энергия в классической механике? Среднее расстояние между атомами и электронами в металлах  $a \approx 10^{-10}$  м, масса электрона  $10^{-27}$  г, масса атома гелия  $10^{-23}$  г. Из формулы

$$\frac{3}{2} kT = \frac{mv^2}{2} = \frac{\hbar^2}{2ma^2}$$

мы получим, что для электронов температура равна

$$T = \frac{\hbar^2}{3kma^2} = \frac{10^{-63}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-21} \cdot 10^{-30} \cdot 10^{-20}} \approx \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

Больше миллиона градусов! Для гелия

мы таким же образом получили бы температуру  $1^\circ \text{K}$ .

**Автор**

Как раз те цифры, о которых шла речь раньше. Теперь вам уже нетрудно выяснить, каким будет вещество при нулевой температуре — твердым или нет. Но сначала подумайте, почему вообще телам свойственно твердеть при низких температурах.

**Читатель**

Очевидно, потому что при низких температурах кинетическая энергия частиц становится малой.

**Автор**

Что значит малой? По сравнению с чем?

**Читатель**

По-видимому, по сравнению с потенциальной энергией взаимодействия частиц между собой. Когда потенциальная энергия становится значительно больше кинетической, она заставляет атомы занять определенные места в кристаллической решетке. Поэтому, для того чтобы сказать, каким будет вещество при нулевой температуре, нужно знать, как зависит потенциальная энергия взаимодействия частиц от расстояния между ними.

Теперь мне ясно, что жидкости, не замерзающие при абсолютном нуле температуры, следует искать среди веществ, обладающих атомами легкими и слабо взаимодействующими, — где побольше минимальная кинетическая энергия атомов и поменьше потенциальная энергия взаимодействия  $U$ . Гелий — легчайший инертный газ, атомы которого слабо взаимодействуют друг с другом (как, впрочем, и с другими атомами — в этом и состоит их «инертность»). Очевидно, он удовлетворяет обоим условиям.

В случае электронного газа потенциальная энергия взаимодействия соответствует закону Кулона:  $U(a) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$ , где  $e$  — заряд электрона, равный примерно  $1,6 \cdot 10^{-18}$  к, и  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx$

$\approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{н.м}^2}{\text{к}}$ . При  $a \approx 10^{-10}$  м минимальная кинетическая энергия электронов

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\hbar^2}{2ma^2} \approx \frac{10^{-61}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-20}} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ дж, а}$$

$$U(a) \approx \frac{2,6 \cdot 10^{-36} \cdot 9 \cdot 10^9}{10^{-10}} \approx 2,3 \cdot 10^{-16} \text{ дж.}$$

$U(a)$  получается примерно такой же, как минимальная кинетическая энергия электронов! Поэтому электронный газ и не может затвердеть.

#### Автор

Интересно, что уже из принципа неопределенности следует отсутствие электронов в ядре, размер  $R$  которого порядка  $10^{-13}$  см. Там он должен был бы иметь скорость  $v \geq \frac{\hbar}{mR} \sim 6 \times 10^{11} \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ , то есть в 2000 раз больше скорости света!

Теперь вы можете проследить, что будет происходить с веществом при  $T=0$  по мере роста давления, то есть по мере уменьшения межатомного расстояния.

#### Читатель

Ну да, все определяется соотношением потенциальной и кинетической энергий:  $U(a)$  и  $\frac{\hbar^2}{2ma^2}$ . Если  $2ma^2 U(a) \gg \hbar^2$ , получится кристалл, в обратном случае — жидкость или газ.

#### Автор

Если вещество сжать настолько, чтобы «раздавить» и ионизовать атомы, то  $U(a)$  пропорциональна  $\frac{1}{a}$ .

#### Читатель

Поэтому при  $a \rightarrow 0$  тело будет все более газообразным! Давление приводит к плавлению — очень интересно!

#### Автор

При очень больших давлениях, когда разваливаются ядра, потен-

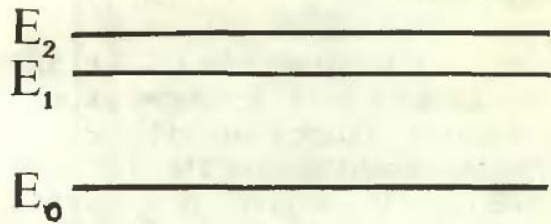


Рис. 1.

циальная энергия быстро растет с уменьшением  $a$ , и вещество опять затвердевает. Затем в области сверхвысоких плотностей, соответствующих, например, нейтронным звездам, определяющей становится энергия гравитационного взаимодействия, и вновь может наступить плавление.

Существуют звезды, меняющие свой блеск и имеющие размер около 10 км и массу, сравнимую с массой Солнца. У них твердая кора (плотность ее меняется от  $10^6$  до  $5 \cdot 10^{13} \text{ г/см}^3$ ) и жидкая сердцевина с плотностью  $5 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$ .

#### Читатель

Все это очень интересно, но я так и не понял, что же такое температура с точки зрения квантовой механики.

#### Автор

Мы определили пока только минимальную энергию атома или молекулы. Однако это еще не определяет кинетической энергии вещества. Надо иметь в виду следующее. Согласно законам квантовой механики энергия частицы не может быть любой. Она может принимать только вполне определенные значения, или, как говорят, частицы могут находиться на определенных энергетических уровнях. Их обычно изображают в виде расположенных одна над другой горизонтальных линий (рис. 1). Система энергетических уровней — это что-то вроде книжного шкафа с полками. Книжки могут стоять на полках, но не между ними.

#### Читатель

А распределение частиц по полкам-уровням чисто случайное, беспорядочное?

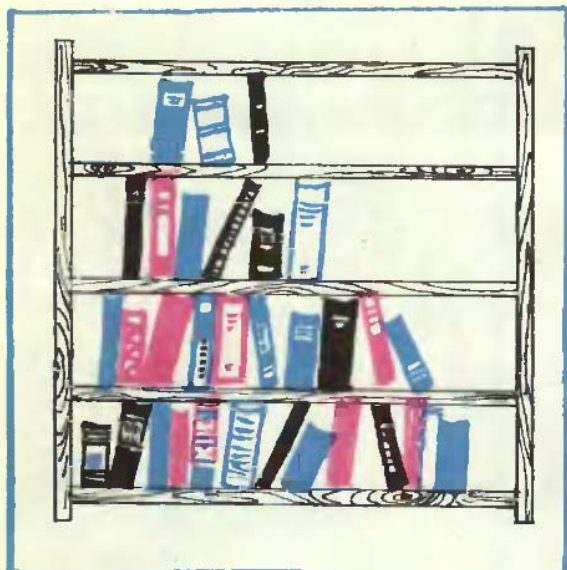


Рис. 2.

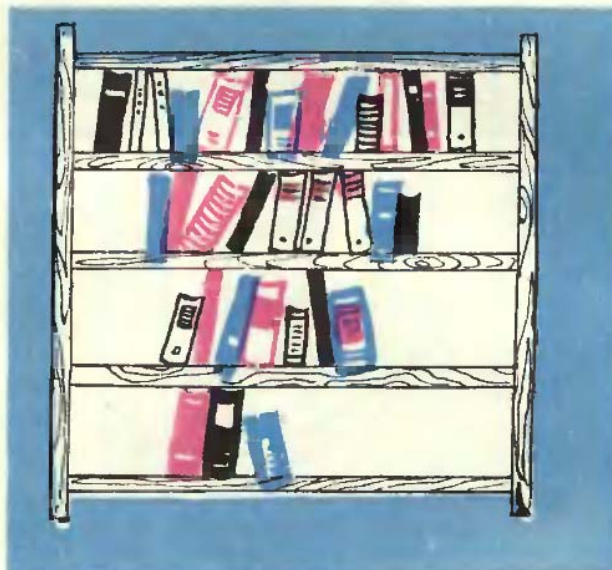


Рис. 3.

### Автор

Нет. Именно оно-то и определяется температурой.

Существуют два принципиально возможных типа частиц: одни «независимы» и готовы к «равноправью» — любое их количество может принципиально иметь одинаковую энергию. Такие частицы называются «бозонами». Для других, фермионов, одну и ту же энергию может иметь только определенное число частиц. А в одном и том же квантовом состоянии может находиться не более одной частицы. В результате ситуация при нулевой температуре напоминает наиболее выгодное в смысле потенциальной энергии распределение книг в книжном шкафу — с бесконечно широкими полками в случае бозонов и с полками конечной ширины в случае фермионов. Книги-бозоны все помещаются на нижней полке, фермионы при заданном объеме заполняют тем больше полок, чем их (книг-фермионов) больше. Но дело сейчас не в этом. Для нас важно, что распределение частиц по энергетическим полкам связано с температурой.

Буду говорить для наглядности о частицах-книгах в книжном шкафу, где номер полки определяет энергию

частицы. «Температура» книг в шкафу определяет их распределение по полкам (рис. 2): чем выше температура, тем больше книг «перебираются» вверх. При заданном количестве книг температура может служить характеристикой рассеянности хозяина шкафа, решившего заполнять только самые низкие возможные полки. Абсолютная аккуратность соответствует  $T=0$ , абсолютная безалаберность, когда книги равномерно распределены по всем полкам, соответствует  $T \rightarrow \infty$ .

### Читатель

Но тогда получается, что в шкафу может установиться и отрицательная температура, если на верхних полках окажется больше книг, чем на нижних (рис. 3)? И эта отрицательная температура в смысле энергии выше положительной? Ведь для того, чтобы достигнуть ее, системе нужно сообщить энергию, переставляя книги на более высокие полки. Причем самой высокой будет температура, при которой заполнены только верхние полки?

### Автор

Вам, видимо, кажется, что вы довели рассуждения до абсурда, а между тем вы говорили абсолютно правильные вещи. Более того, вещи очень важные не только для «чистой»

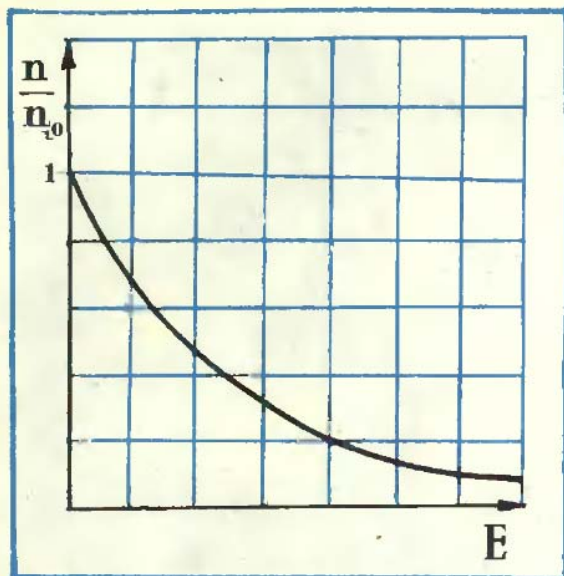


Рис. 4.

науки, но и для техники. В знаменитых квантовых генераторах — лазерах и мазерах — специально создают отрицательную температуру в том именно смысле, о котором вы говорили, а затем быстро «высвечивают» скопленную энергию.

**Читатель**

Разве температура определяет распределение частиц по энергетическим уровням только в квантовой механике?

**Автор**

Конечно нет. Это верно и в классической механике. Например, распределение по энергиям молекул «классического» идеального газа такое, как показано на рисунке 4. Оно определяется формулой

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{E}{kT}}.$$

Здесь  $n_0$  — число частиц в том состоянии, с которого мы начинаем отсчет энергии частицы  $E$ ;  $n$  — это число частиц с энергией  $E$ ;  $e = 2,718$  — основание натуральных логарифмов,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура газа.

**Читатель**

Если преобразовать эту формулу, прологарифмировав обе части равенства, то она примет вид

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{E}{kT}.$$

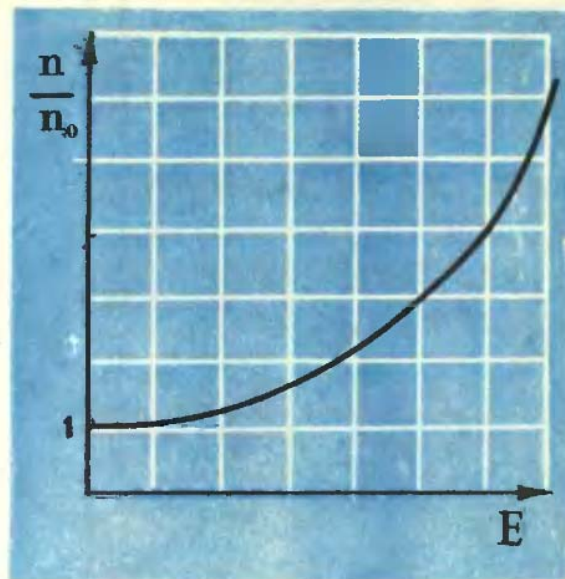


Рис. 5.

Отсюда

$$T = -\frac{E}{k(\ln n - \ln n_0)}.$$

Если к газу подводить энергию, то мы будем повышать его температуру, переводя все больше частиц с нижних энергетических уровней на верхние. При этом мы можем добиться того, что  $n$  станет больше  $n_0$  и  $\ln n$  больше  $\ln n_0$ . Это будет означать, что температура газа отрицательна! Мне кажется, мы пришли к абсурду. Говорить об отрицательной температуре идеального газа, по моему, бессмысленно.

**Автор**

Если мы будем рассматривать только несколько энергетических уровней, то мы можем сделать так, что на верхних из них будет больше молекул газа, чем на нижних. Однако нельзя добиться того, чтобы распределение молекул по энергиям было таким, как показано на рисунке 5: зависимость числа частиц от энергии экспоненциальная и на достаточно высоких уровнях находится больше частиц, чем на нижних.

Все дело в том, что наш вывод о возможности отрицательных температур справедлив не для любой системы частиц, а только для такой, у

которой число энергетических уровней конечное. Ведь обычно в энергию входит составной частью энергия кинетическая, а она может быть сколь угодно большой. На квантовом языке это означает, что число энергетических уровней бесконечно велико. Но в таком случае нельзя даже равномерно распределить конечное число частиц по бесконечно большому числу энергетических уровней, не говоря уже о том, чтобы получить отрицательную температуру. Значит, наши рассуждения верны для систем, энергия которых не связана с кинетической энергией.

#### **Читатель**

Это очень трудно понять. Я что-то никогда не слышал, чтобы кто-то держал в руках или видел тело с отрицательной температурой.

#### **Автор**

В этом нет ничего удивительного. В стабильном, равновесном состоянии отрицательная температура невозможна. Состояние с отрицательной температурой — это, как говорят, метастабильное состояние. Возникнув, оно существует обычно недолго (хотя бывают и весьма долговечные метастабильные состояния, например стекло, которое в равновесном состоянии — непрозрачный кристалл). Например, когда в рабочем веществе лазера создается отрицательная температура, оно очень быстро переходит в состояние с положитель-

ной температурой: частицы с высоких энергетических уровней переходят, как бы «сваливаются» на более низкие уровни, а теряемая при этом энергия выделяется в виде лазерного луча.

#### **Читатель**

Но я хотел бы вернуться к температуре. Если я правильно вас понял, температура — это понятие, у которого много разных сторон. С одной стороны, температура — это величина, характеризующая состояние тела, замечательная тем, что при переходе какой-нибудь системы к равновесию она оказывается одинаковой во всех частях системы. С другой стороны, температура связана со средней кинетической энергией частиц, составляющих тело. Наконец, в квантовой механике она выступает как величина, определяющая распределение частиц по энергетическим состояниям. Легко заметить, что во всех трех проявлениях температура самым тесным образом связана с другой физической величиной — энергией. Но раньше вы упомянули еще об одной величине, совсем мне незнакомой, — об энтропии. Она тоже имеет отношение к температуре?

#### **Автор**

Самое непосредственное. И рассказ о температуре не может быть полным, если не рассказать и об энтропии. Но беседа об энтропии должна занять не меньше места, чем та, которую теперь пора закончить.