

ЛЕКЦИЯ 1

ГЛАВА 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ И МАГНЕТИЗМЕ.

§ 1.1. Обзор квантовой физики

В этой части курса мы будем изучать физику атомов, ядер и элементарных частиц [1]. При этом познакомимся с еще неизвестными нам свойствами природы, а именно с *квантовыми явлениями*.

«Квантовую физику» не следует считать изолированной частью физики, не связанной с макроскопическим миром. В действительности она охватывает всю физику, и ее законы в том виде, как они известны теперь, являются наиболее общими законами природы.

До настоящего времени мы изучали физические явления макромира. Законы природы, с которыми мы познакомились, относятся к *классической физике*. В общем, можно сказать, что классическая физика имеет дело с явлениями, где вопрос о микростроении вещества не играет большой роли. Здесь мы займемся изучением элементарных частиц и рассмотрим законы, объясняющие их свойства. Наше внимание мы, естественно, обратим к тем явлениям, в которых действие этих законов выявлено наиболее ясно. Это означает, что мы будем рассматривать лишь ситуации, в которых участвует небольшое число частиц.

Таким образом, большая часть рассматриваемых в этой книге явлений относится к *микрофизике*.

Когда мы применяем законы классической физики к макроскопическим системам, то пытаемся описать лишь глобальные свойства таких систем. Нас интересует, например, движение твердого тела как целого, но мы отвлекаемся от движения элементарных частиц, из которых оно состоит. Такова характерная особенность классических теорий: применяя их к макросистемам, мы игнорируем тонкие детали поведения последних и не делаем попыток рассмотреть все аспекты ситуации.

Таким образом, законы классической физики имеют приближенный характер. Они являются предельным случаем более мощных и общих законов квантовой физики.

Иными словами, классические теории являются *феноменологическими теориями*. Они описывают и обобщают экспериментальные данные в определенных областях физики. Феноменологические теории не претендуют на объяснение всех явлений в физике, но хорошая феноменологическая теория должна очень точно объяснить все явления в своей ограниченной области применения. Философски настроенный читатель, возможно, скажет, что, в сущности, *любая* физическая теория является «феноменологической» и различие между «фундаментальной» и «феноменологической» теориями есть всего лишь вопрос подхода. Как физики, мы ясно ощущаем, однако, различие между обоими типами теорий. *Фундаментальные* законы природы отличаются большой общностью, их

применимость не знает исключений. Мы рассматриваем их как универсальные и точные, пока эксперимент не докажет нам противного. Что касается законов, полученных из феноменологической теории, то мы с самого начала не считаем их универсальными; мы знаем, что они годятся (т. е. достаточно точны) лишь для ограниченной области явлений и за ее пределами могут полностью потерять свое значение.

§ 1.2. Атомы и элементарные частицы

Перейдем к идее элементарных частиц [1]. Греческим философам принадлежит заслуга введения в теорию вещества идеи об атомах. (Не исключено, что аналогичные соображения развивались другими народами гораздо раньше.) Следует сразу же отметить, что «атомы» древних сильно отличаются от атомов, с которыми имеем дело мы. Нелегко точно понять, что подразумевали греческие философы под этим термином, но основной проблемой, интересовавшей их, был вопрос о том, бесконечна ли делимость вещества. Если вещество нельзя дробить бесконечно, то в конце концов мы приходим к идее об элементарной частице вещества, т. е. об «атоме». Возьмем некоторое вещество и будем делить его на всё более мелкие части. Настанет предел, когда дальнейшее деление невозможно. Слово «атом» как раз означает «неделимый».

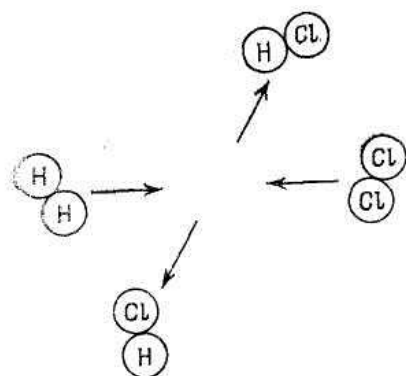


Рис. 1. Схематическое представление химической реакции $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$, показывающее, что она заключается в перераспределении исходных «элементов». В действительности процессы, происходящие при «сгорании» газообразного водорода в атмосфере хлора, очень сложны: происходит выделение энергии в форме света и кинетической энергии продуктов реакции, газы нагреваются, и молекулы H_2 и Cl_2 диссоциируют на атомы, которые соединяются в молекулы HCl . Играют роль и другие процессы, которые заключаются в возбуждении атомов и молекул светом или через столкновение

Греческие атомисты верили, что любое вещество построено из «атомов», и, вероятно, чувствовали, что бесконечное многообразие свойств вещества должно быть объяснено конфигурацией (и движением?) «атомов». Эти идеи довольно близки к современным, но существует огромное различие между нашими количественными теориями, основанными на опыте, и туманными размышлениями древних.

Как доказать, что электрон действительно элементарен? Окажется ли объект, представляющийся сегодня элементарным, завтра сложным? В конце концов, то, что мы сегодня считаем атомами, в прошлом столетии было элементарными частицами. Не может ли история повториться?

Существует большое число экспериментальных фактов, показывающих, что история не повторится: частицы, подобные электрону, протону или нейтрону,

никогда не окажутся сложными в том же смысле, в каком сложен атом водорода. Попытаемся понять смысл этих фактов.

Если два кусочка мрамора, направленные навстречу друг другу с большой скоростью, столкнутся, то они разлетятся на более мелкие осколки. Аналогично, две молекулы водорода, если их энергия достаточно велика, сталкиваясь, образуют осколки. Если энергия не была *слишком* велика, то среди осколков мы обнаружим атомы водорода, протоны, электроны, иными словами - объекты, из которых построены молекулы водорода. То, что произошло в этих случаях, может быть описано следующим образом. При столкновении действовали силы, превосходящие силы сцепления, удерживающие отдельные части как мрамора, так и молекулы водорода, и эти объекты развалились. Аналогичным образом можно интерпретировать множество ядерных реакций. Ядра состоят из протонов и нейтронов, и если протон, обладающий большой энергией, попадает в ядро, он может выбить из него несколько протонов и нейтронов.

Однако если мы изучаем столкновения двух элементарных частиц, например двух протонов, при достаточно большой энергии, то обнаружим явления, *качественно отличные* от рассмотренных выше. Например, если протон очень большой энергии сталкивается с другим протоном, то после столкновения оба протона останутся протонами, но мы обнаружим также среди продуктов реакции одну или несколько новых элементарных частиц, например π -мезоны. Мы говорим, что в такой реакции *родились* π -мезоны (их называют также пионами).

Чтобы выяснить экспериментально, является ли частица элементарной или сложной, мы создаем условия для столкновения двух частиц и исследуем продукты реакции. Действуя этим методом, нам удастся расщепить молекулу на отдельные атомы, а атомы - на электроны и ядра. Именно поэтому можно утверждать, что молекулы состоят из атомов, которые, в свою очередь, построены из электронов и ядер. Физики XIX столетия ошибались, полагая, что атомы неразрушимы и неделимы. Оказалось, что атом можно разрушить. То же следует сказать и о ядре. Его разрушение требует, однако, затраты гораздо большей энергии, чем разрушение атома. В этом смысле ядро несравненно более устойчиво, чем атом.

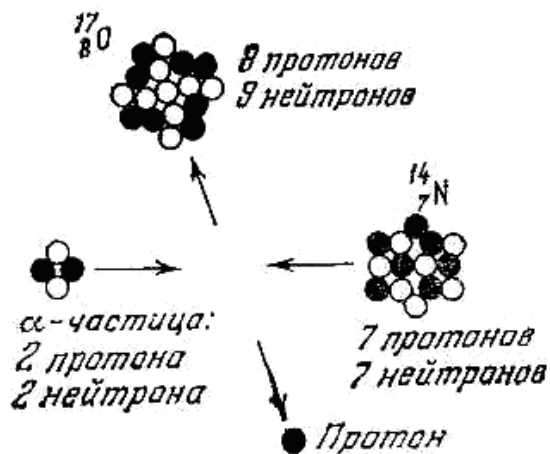


Рис. 2

Схематическое представление ядерной реакции: α -частица (ядро гелия) сталкивается с ядром азота, в результате образуется ядро кислорода и протон. Именно эта реакция, открытая Резерфордом в 1919 г., была первым наблюдением превращения одних стабильных ядер в другие. В опыте Резерфорда азот бомбардировался α -частицами радиоактивного источника, а реакция идентифицировалась по наблюдению испущенных протонов. Этот рисунок показывает, что ядра состоят из протонов и нейтронов, а ядерная реакция заключается (при малых энергиях) в перераспределении этих частиц между ядрами. Такой рисунок не следует понимать буквально: ядра «не похожи» на то, что показано на рисунке.

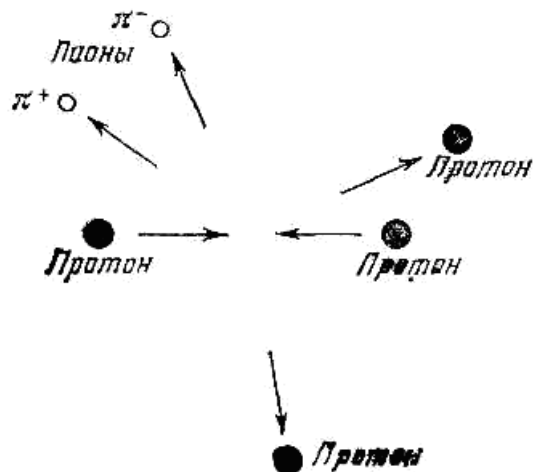


Рис. 3

Схема, иллюстрирующая рождение двух пионов при столкновении двух протонов большой энергии. Заряд одного пиона равен $+e$, второго $-e$ (e - элементарный заряд). Полный заряд в рассматриваемой реакции, конечно, сохраняется. После столкновения оба протона продолжают существовать и возникают две новые частицы. Очевидно, что наивные модели, подобные показанным на рис. 1 и 2, здесь не годятся: явление нельзя рассматривать как «перегруппировку» неких элементов, из которых «состоят» протоны.

Современные ускорители дают пучки частиц, обладающих огромной энергией. Таким образом, мы располагаем подходящими средствами, чтобы попытаться разрушить электроны, протоны или нейтроны. Оказывается, однако, что, в отличие от атомов или ядер, эти частицы разрушить невозможно. Происходит нечто совсем иное.

В наше время никто не станет пытаться создать теорию вещества, основанную на предположении о его бесконечной делимости. Такая теория не может быть верной. Допустим, однако, что такая теория существует, и рассмотрим одну ее характерную особенность. Возьмем кусок меди и будем делить его на всё меньшие и меньшие кусочки. Как бы малы эти кусочки не были, они все же остаются медью. Что это значит? Лишь то, что физические законы, определяющие свойства *больших* кусков меди, не отличаются от законов, управляющих поведением *малых* кусков меди; наша физическая система беспредельно уменьшается, но при этом остается подобной себе.

«Сохранение формы физических законов» при изменении масштаба представляет собой естественное свойство бесконечно делимого вещества. Но оно отсутствует, если вещество построено из элементарных частиц. Атом меди ни в каком отношении не похож на макроскопический кусок меди. Это нечто совершенно другое, и нет никаких оснований предполагать, что физические законы, описывающие поведение макроскопических систем, будут пригодны для описания атомов и элементарных частиц.

Нетрудно принять в качестве абстрактного принципа, что классические идеи могут оказаться неприменимыми к атому и что электрон действительно есть элементарная частица. Однако гораздо труднее совместить в сознании классические и новые идеи. Обычно мы с большим трудом расстаемся с привычными идеями. Начав изучение физики с явлений в макроскопических системах, мы приобрели ряд «классических предрассудков», которые придется преодолеть, чтобы понять квантовую физику.

§ 1.3. Пределы применимости классической теории

В специальной теории относительности скорость света, равная $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с $= 3 \cdot 10^8$ м/с, имеет первостепенное значение [1]. Это верхний предел для скорости любой материальной частицы и для скорости распространения энергии или любой информации в физическом пространстве. Скорость света сдает нам простой и естественный критерий, с помощью которого можно решить, каково физическое явление - «нерелятивистское» или «релятивистское». Грубо говоря, нерелятивистский подход справедлив, т. е. дает достаточно точные результаты, в тех случаях, когда все относящиеся к задаче скорости малы по сравнению со скоростью света.

Можно спросить, существует ли аналогичный критерий, показывающий, в каких случаях надо использовать квантовую механику и когда можно ограничиться классическими теориями, т. е. существует ли другая мировая постоянная, «аналогичная» скорости света, с помощью которой можно сформулировать этот критерий? Такая постоянная существует и называется *постоянной Планка*. Значение постоянной Планка (ее обозначают буквой h) равно

$$h = 6,626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Физическая размерность постоянной Планка равна

$$(\text{время}) \times (\text{энергия}) = (\text{длина}) \times (\text{импульс}) = (\text{момент импульса}).$$

Величина с такой размерностью называется *действием*, и постоянную Планка называют также элементарным *квантом действия*.

Интересующий нас грубый критерий заключается в следующем. Если в данной физической системе численное значение некоторой «естественной» динамической переменной* с размерностью действия сравнимо с постоянной Планка h , то поведение этой системы описывается в рамках квантовой механики. С другой стороны, если все переменные, имеющие размерность действия, очень велики по сравнению с h , то систему с достаточной точностью описывают законы классической физики.

Целью настоящих лекций является рассмотрение важнейших экспериментальных данных, на которых основаны наши современные понятия о строении атома. Атом следует рассматривать не как статическое образование, состоящее из частиц в фиксированных положениях, а скорее как динамическое образование, изменяющееся в соответствии с внешними воздействиями. Такая система, подвергаясь воздействию внешних агентов, сама оказывает на них влияние. Изучая явления, происходящие при этих воздействиях, мы получаем сведения как о строении атома, так и о природе тех причин, которые вызывают эти изменения или являются результатом их. Имеющиеся экспериментальные данные, особенно в области электрохимии и электрического разряда в газах, ясно показывают электрическую природу атома. Поэтому следует коротко рассмотреть те основные понятия электричества и магнетизма, которые играют существенную роль при изучении строения атома.

§ 1.4. Открытие постоянной Планка

Обратимся теперь к истории открытия постоянной Планка [1]. Интересно проследить появление и триумфальный путь этой константы в физике. Нам следует вернуться к началу нашего века и рассмотреть некоторые не решенные в то время проблемы:

- 1) проблема излучения черного тела;
- 2) проблема фотоэлектрического эффекта;
- 3) проблема стабильности и размера атомов.

Это далеко не единственные проблемы, занимавшие физиков той эпохи, но в них наиболее отчетливо проявились противоречия классической физики.

С исторической точки зрения наш обзор более чем схематичен. Вопрос о развитии квантовой механики невозможно уложить в несколько страниц. Рассматривая ситуацию начала века из сегодняшнего дня, мы понимаем, что три перечисленные задачи были ключевыми.

Под «потерянной константой» мы подразумеваем, конечно, постоянную Планка h . В чисто классической теории такой константы не существует. Рассмотрим поэтому некоторые основные физические константы, играющие важную роль при классическом описании явлений.

1. Скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. К 1900 г. эта константа была известна с большой точностью.

2. Постоянная Авогадро $N_0 = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, представляющая собой число молекул в моле любого газа. В 1900 г. было известно *грубое* значение этой величины, полученное из кинетической теории газов.

3. Масса атома водорода $M_H = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г. С погрешностью до 1/2000 эта величина равна массе протона M_p . Поскольку масса моля водорода (H₂) очень близка к 2 г, то

* *Динамической переменной* называется любая переменная, характеризующая состояние системы, например координата, составляющая импульса или момента импульса, составляющая скорости, полная энергия и т. п.

$$N_0 M_H \approx N_0 M_p \approx 1 \text{ г/моль.} \quad (1.1)$$

Таким образом, зная постоянную Авогадро, мы знаем и величину M_H .

4. Элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ}_q$. Заряд электрона равен $-e$, а заряд протона равен $+e$. Заряд, переносимый молекулами однократно заряженных ионов (каждый ион переносит заряд e), носит название *постоянной Фарадея*. Таким образом,

$$F = N_0 e = 96\,487 \text{ Кл/моль.} \quad (1.2)$$

Постоянная Фарадея F легко измеряется в опытах по электролизу. Она равна, например, заряду, который должен пройти через электролит, чтобы на электроде выделился моль серебра (т. е. 107,88 г серебра, так как относительная атомная масса серебра равна 107,88).

5. Отношение заряда электрона к его массе $e/m = 1,76 \cdot 10^8 \text{ Кл/г}$, и то же отношение для протона $e/M_p = 9,6 \cdot 10^4 \text{ Кл/г}$. Эти постоянные можно измерить в опытах по отклонению электронных и протонных пучков в электрических и магнитных полях. Таким методом Томсон получил в 1897 г. значение e/m . Заметим, что

$$\frac{e}{M_p} = \frac{F}{N_0 M_p} \quad (1.3)$$

и эта константа зависит от констант, рассмотренных выше.

Следует также отметить, что, имея точные значения e/m и e/M_p , мы получаем точное значение величины

$$\frac{M_p}{m} = \frac{e/m}{e/M_p} \quad (1.4)$$

даже не имея точного значения элементарного заряда e . При этом мы предполагали, разумеется, что заряд протона равен по модулю заряду электрона.

6. Масса электрона $m = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$. Эта константа может быть получена из e и e/m .

Постоянная Авогадро N_0 служит звеном, соединяющим макро- и микрофизику. Огромная величина этой постоянной показывает, сколь в действительности малы атомы и молекулы и почему зернистая структура вещества не проявляет себя в макроскопическом мире. Как мы уже упоминали, в конце прошлого века постоянная Авогадро была известна с малой точностью. Постоянные F , e/m и m/M_p были измерены намного точнее. Независимые и точные измерения N_0 или e должны были бы дать точные значения таких основных констант, как e , m и M_p . Важной особенностью планковской теории излучения абсолютно черного тела как раз и является, как мы увидим дальше, возможность независимого и точного определения N_0 .

Примерно через 10 лет Милликен в своих знаменитых опытах с каплями масла, помещенными между обкладками конденсатора, измерил заряд электрона e непосредственно. Идея метода заключалась в наблюдении за падением в воздухе наэлектризованных капель масла, находящихся под действием сил тяжести и электрического поля. Этот опыт не мог дать очень точного значения заряда e , но играл, однако, большую роль как независимый и идейно очень простой метод измерения элементарного заряда.

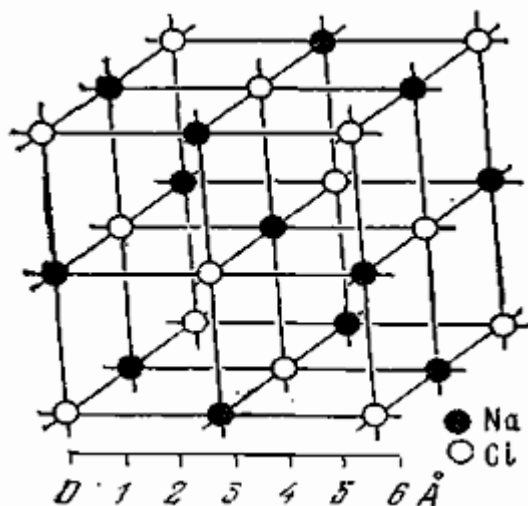


Рис. 4

Строение кристаллов NaCl. Решетка кристалла кубическая, в вершинах куба попеременно помещены атомы Na и Cl. Центры малых сфер, показанных на рисунке, соответствуют средним положениям атомов. Размеры сфер даны, разумеется, не в масштабе, и по ним невозможно судить о размерах атомов или ядер

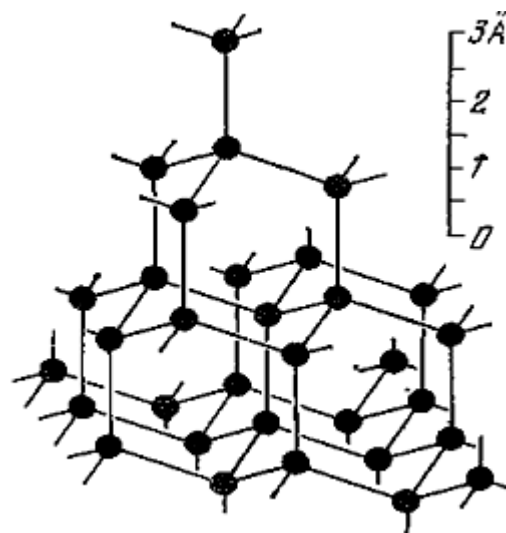


Рис. 5

Строение кристаллов алмаза. Каждый атом углерода имеет четырех ближайших соседей, расположенных в вершинах тетраэдра (к ближайшим соседям проведены черточки)

Продолжим наш исторический обзор и заметим, что существует прямой метод измерения постоянной Авогадро N_0 . Он заключается в подсчете числа атомов в кристалле. Атомы кристалла образуют регулярную решетку, которая в некоторых случаях имеет, например, кубическую форму. Если мы сможем определить так называемую *постоянную решетки*, т. е. расстояние между соседними атомами, то легко найдем N_0 . Постоянная решетки может быть измерена по дифракции рентгеновских лучей при условии, что их длина волны нам известна из независимых опытов, например, по их дифракции на механически сделанной «макроскопической» решетке. Величина N_0 действительно была определена этим методом.

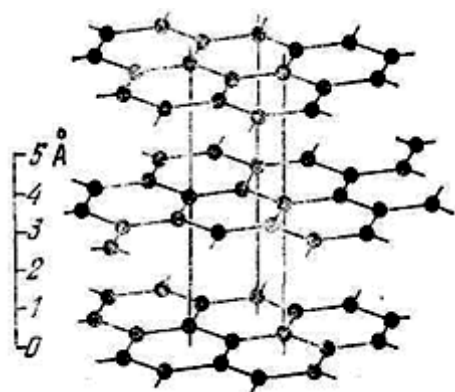


Рис. 6. Строение кристаллов графита. Алмаз и графит построены из одних атомов углерода. Огромное различие свойств этих двух веществ объясняется различным строением кристаллической решетки. Решетка графита состоит из параллельных плоскостей. Расстояние между смежными плоскостями одно и то же, и в каждой плоскости атомы углерода расположены в вершинах шестиугольника. Сравните эту решетку

Великолепная идея, что сама природа снабдила нас готовыми дифракционными решетками в форме кристаллов, принадлежит М. Лауэ. По его предложению В. Фридрих и П. Книппинг в 1912 г. впервые получили картину дифракционного рассеяния рентгеновских лучей на кристаллах и тем подтвердили

волновую природу рентгеновского излучения.

Чтобы понять идеи, связанные с излучением абсолютно черного тела, следует рассмотреть понятия тепла и температуры, необходимые для описания поведения вещества в целом, при тепловом равновесии.

Тепловой энергией называется энергия, связанная с беспорядочным движением частиц макроскопического тела. Тепло - это переданная (от одного тела другому) тепловая энергия. Что такое температура?

Дать краткое, но точное определение температуры не так-то просто. Казалось бы, мы «знаем», что такое температура, и даже можем ее измерить с помощью термометра. Термометром может служить любое тело или система тел, для которых данному изменению температуры отвечает измеримое изменение длины, или объема, или электрического сопротивления, или других параметров. Рассмотрим в качестве примера ртутный термометр. Чтобы определить по нему температуру, необходимо засечь уровень ртути в капиллярной трубке постоянного сечения. Чтобы установить температурную шкалу, за 0° можно принять температуру тающего льда, а за 100° — температуру кипящей воды, промежуточные же значения температуры можно определить, разделив расстояние между этими реперными уровнями ртути в капилляре на 100 равных частей. Хотя таким способом мы действительно можем измерять температуру, однако он имеет существенный дефект (с точки зрения физической теории), ибо наша шкала температуры зависит от свойств произвольно выбранного вещества, в данном случае - ртути.

Для целей физики важно иметь температурную шкалу, которая не зависела бы от свойств любого данного вещества. Такая шкала называется *термодинамической шкалой* температуры. В ней температура измеряется в кельвинах и обозначается К. Нуль термодинамической шкалы (0 К) представляет собой самую низкую из возможных температур. Она соответствует приблизительно - 273°C . Для удобства размер кельвина выбран так, чтобы данная *разность* температур в обеих шкалах выражалась одинаковым числом. Таким образом, по определению:

$$(\text{температура в К}) = (\text{температура в } ^\circ\text{C}) + 273,15.$$

Постараемся понять, хотя бы качественно, что значит «температура» с точки зрения микрофизики. Основная идея заключается в следующем. По мере роста температуры увеличивается средняя энергия, связанная с хаотическим движением элементарных составных частиц макроскопического тела. При температуре 0 К всякое *хаотическое* движение прекращается, и физически это значит - достигнута наинизшая возможная температура. (Подчеркиваем слово *хаотическое*.)

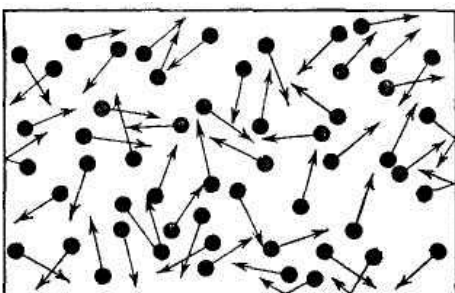


Рис. 7. Объяснение уравнения $PV=(2/3)N_0E_k$. Пусть в сосуде объемом V находится N_0 молекул. Предположим, что все молекулы имеют скорость v и движутся вправо. Число молекул, сталкивающихся с единичной поверхностью стенки в единицу времени, равно в этом случае $v(N_0/V)$. Каждая молекула передает стенке импульс, равный $2mv$. Давление P' равно импульсу, переданному за единицу

времени единице поверхности стенки, и мы имеем $P' = 2m\bar{v}^2 (N_0/V) = 4E_k(N_0/V)$. В действительности все направления скорости равновероятны истинное давление $P = (1/6) P'$, что приводит к уравнению (1.5). Чтобы понять происхождение коэффициента 1/6, предположим, что молекулы движутся в шести определенных направлениях, совпадающих с направлениями (положительными и отрицательными) координатных осей. Тогда только 1/6 часть молекул примет участие в столкновениях с правой стенкой

В статистической физике вместо реального газа часто рассматривают в качестве модели идеальный газ. Мы предполагаем, что молекулы идеального газа движутся хаотически и практически не взаимодействуют друг с другом. Такая модель может быть хорошим описанием *разреженного* реального газа. Если наш газ состоит из атомов, мы говорим об идеальном одноатомном газе. Легко показать, что для 1 моля идеального газа справедливо уравнение

$$PV = (2/3) N_0 E_k, \quad (1.5)$$

где P - давление; V - объем сосуда; E_k - среднее значение кинетической энергии атома.

В рамках этой модели термодинамическая температура связана со средней кинетической энергией E_k простым соотношением:

$$E_k = (3/2) kT. \quad (1.6)$$

Коэффициент пропорциональности k носит название *постоянной Больцмана*. Мы можем теперь записать (1.5) в виде

$$PV = N_0 kT = RT. \quad (1.7)$$

Постоянная $R = N_0 k$ называется *универсальной газовой постоянной*.

Этот закон, как показывает опыт, приближенно справедлив для всех достаточно разреженных газов. Любой реальный газ тем лучше удовлетворяет уравнению (1.48), чем больше он разрежен. Мы можем воспользоваться этим экспериментальным фактом, чтобы построить газовый термометр, показывающий термодинамическую температуру.

Универсальная газовая постоянная равна:

$$R = N_0 k = 8,314 \cdot 10^7 \text{ эрг}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = 1,986 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (1.8)$$

Эту макроскопическую константу легко измерить, зная уравнение (1.7).

Постоянная Больцмана $k = R/N_0$ представляет собой газовую постоянную, приходящуюся на одну молекулу. Ее легко вычислить, если N_0 известно:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг}/\text{К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}. \quad (1.9)$$

Постоянная Больцмана является множителем перехода от температуры к энергии.

* Параграфы, отмеченные звездочкой, предназначены для самостоятельного изучения.