

Используя их, а также формулу (73.6), находим

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} v_0, \quad n = n_0 \sqrt{\frac{8\pi}{\pi}}, \quad T = \frac{mv_0^2}{4k}.$$

8. В тонкостенном сосуде, содержащем одноатомный идеальный газ при температуре T , имеется очень маленькое отверстие, через которое молекулы вылетают в вакуум. Определить среднее значение $\langle \varepsilon \rangle$ кинетической энергии вылетевшей молекулы в предположении, что за время опыта изменения числа молекул и температуры газа в сосуде пренебрежимо малы.

О т в е т. $\langle \varepsilon \rangle = 2kT$.

9. Определить, какая часть молекул идеального газа, столкнувшись со стенкой сосуда за определенное время (например, за одну секунду), имеет кинетическую энергию, превосходящую ε .

О т в е т. $\alpha = \left(1 + \frac{\varepsilon}{kT}\right) e^{-\varepsilon/kT}$.

10. Вольфрамовая нить, испаряясь в высокий вакуум при температуре $T = 2000$ К, уменьшается в весе, как показали измерения, со скоростью $q = 1,14 \cdot 10^{-13}$ г·с⁻¹·см⁻². Оценить давление насыщенного пара вольфрама при этой температуре.

Р е ш е н и е. На основании изложенного в пункте 4 этого параграфа скорость испарения дается формулой

$$q = \frac{1}{4} nm \langle v \rangle,$$

где n — концентрация атомов насыщенного пара вольфрама. Его давление будет

$$P = \frac{1}{3} nm \langle v^2 \rangle = \frac{4}{3} q \frac{\langle v^2 \rangle}{\langle v \rangle}.$$

При максвелловском распределении

$$\frac{\langle v^2 \rangle}{\langle v \rangle} = 3 \sqrt{\frac{\pi kT}{8m}} = 3 \sqrt{\frac{\pi RT}{8A}},$$

где A — атомный вес, равный для вольфрама 184. Окончательно получаем

$$P = q \sqrt{\frac{2\pi RT}{A}}.$$

Подставив сюда численные значения, найдем для давления насыщенных паров вольфрама при $T = 2000$ К: $P = 8,6 \cdot 10^{-9}$ дин/см² $= 6,4 \cdot 10^{-12}$ мм рт. ст. Ввиду малости этой величины ее трудно измерить прямым методом.

§ 76. Опытная проверка закона распределения скоростей Максвелла

1. Одна из первых проверок закона распределения скоростей Максвелла была осуществлена Ричардсоном (1879 — 1959) в 1921 г. Если раскаленная поверхность металла граничит с вакуумом, то она испускает электроны. Это явление называется *термоэлектронной эмиссией* и имеет разнообразнейшие научно-технические применения. В состоянии статистического равновесия над поверхностью металла образуется насыщенный пар из электронов. Ричардсон показал экспериментально, что распределение скоростей электронов пара подчиняется закону Максвелла. Это объясняется тем, что

при малой концентрации электронов над поверхностью металла электронный пар может рассматриваться классически, так как температура вырождения, вычисленная по формуле (71.8), значительно ниже температуры электронного газа (равной температуре металла). Обратное соотношение, как было показано в § 71, имеет место для электронов внутри самого металла. Здесь электронный газ вырожден и поэтому должен рассматриваться как квантовая система. Максвелловское распределение для него не справедливо и должно быть заменено *распределением Ферми — Дирака* (см. § 82).

2. Для целей нашего курса основной интерес представляет проверка закона распределения скоростей Максвелла для *молекулярных и атомных газов*. Все опыты, относящиеся сюда, были выполнены с атомными пучками. Пионером в этой области был Отто Штерн, впервые измеривший средние скорости атомов в таких пучках. Как уже указывалось в § 60, опыты Штерна показали,

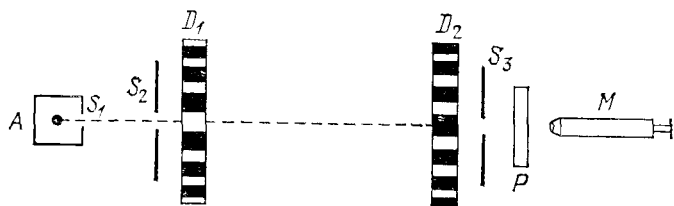


Рис. 62.

что атомы в пучке летят с различными скоростями. В дальнейшем эти опыты были специально приспособлены для изучения распределения атомов по скоростям. Элдридж (1927) и Ламмерт (1926—1929) сконструировали селекторы скоростей, работавшие на принципе зубчатого колеса, с помощью которого в середине прошлого столетия Физо (1819—1896) измерил скорость света.

Схема опыта показана на рис. 62. Атомы легкоплавкого металла, испаряясь в печи А, выходят наружу через узкую щель S_1 . На своем пути они встречают вторую щель S_2 , вырезающую узкий атомный пучок. Пучок попадает на прорези диска D_1 , представляющего собой подобие зубчатого колеса. На оси этого диска насажен второй такой же диск D_2 , но прорези в нем смещены относительно прорезей первого диска на малый угол α (около 2°). За диском D_2 помещается третья щель S_3 , пройдя через которую, пучок попадает на стеклянную пластинку P , охлаждаемую жидким азотом, и конденсируется на ней. Пластинку можно было наблюдать с помощью микроскопа M . Вся система (за исключением, конечно, микроскопа) помещается в высоком вакууме, так что атомы пролетают через нее практически без столкновений друг с другом. Когда диски покоятся, то атомы пучка, пройдя через щели диска D_1 , попадают на зубцы диска D_2 и задерживаются ими. В этом случае на пластинку P они

попадать не могут. Однако, если диски привести во вращение, то атомы с определенными скоростями могут проходить через систему и оседать на пластинке P . Максимум прохождения будет тогда, когда за время пролета от диска D_1 до диска D_2 диски поворачиваются на угол α . Таким образом, при определенной скорости вращения система пропускает атомы только определенных скоростей. По скорости вращения дисков можно вычислить скорость прошедших атомов, осевших на пластинке P . Интенсивность прошедшего пучка, пропорциональную числу атомов в нем, можно оценить по времени, которое требуется на то, чтобы на пластинке появился осадок, видимый в микроскоп. Специально поставленные опыты показали,

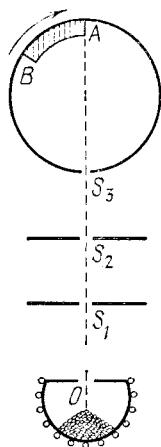


Рис. 63.

что видимый осадок появляется при вполне определенном и всегда одинаковом числе осевших атомов. Можно определять относительное число осевших атомов и другими способами, например по степени прозрачности пластинки P , измеряемой фотометрированием. Меняя угловую скорость вращения, можно выделять пучки с различными скоростями и таким путем изучать распределение атомов по скоростям. Обычно угловые скорости вращения, применявшиеся в опытах описанного типа, менялись, в пределах 10—50 об/сек.

3. Описанный прибор обладает следующим недостатком. Если атомы, имеющие определенную скорость, проходят через щели при угловой скорости вращения ω , то они пройдут через них и при угловых скоростях 2ω , 3ω и т. д. Значит, прибор выделяет пучки не с одной определенной скоростью, а с несколькими (кратными) скоростями.

Для устранения этого недостатка Миллер и Куш (1955 г.) заменили диски с зубцами сплошным металлическим цилиндром, вдоль боковой поверхности которого были прорезаны узкие винтовые канавки под малым углом α к образующим цилиндра. При вращении цилиндра через канавки могут пройти только те атомы, скорость которых v удовлетворяет условию $\operatorname{tg} \alpha = \omega R/v$, где R — радиус цилиндра.

4. Несколько иной метод для изучения распределения атомов по скоростям применялся в опытах Цартмана, прибор которого изображен на схематическом рис. 63. В электрической печи помещается чистый легкоплавкий металл. При нагревании образуются пары этого металла, которые могут вылетать через узкое отверстие O . Прибор помещен в высокому вакууме. Благодаря малости отверстия O плотность паров металла в печи довольно велика. Там происходят многочисленные столкновения между атомами. Поэтому можно ожидать, что скорости атомов металла в печи будут распределены по закону Максвелла. Вне печи, где поддерживается высокий

вакуум, атомы металла движутся практически без столкновений. Они проходят через узкие щели S_1 и S_2 и попадают внутрь вращающегося цилиндра в те моменты, когда щель S_3 расположена на одной прямой с щелями S_1 и S_2 . Если бы атомы летели с бесконечно большими скоростями, то они попали бы в точку A цилиндра, диаметрально противоположную щели S_3 . В действительности на прохождение диаметра цилиндра D атом затрачивает конечное время. Точка попадания смещается по поверхности цилиндра против вращения на расстояние

$$x = \frac{\omega DT}{2} = \frac{D^2\omega}{2v},$$

где v — скорость атома, ω — угловая скорость вращения цилиндра. К внутренней стенке цилиндра прикреплена согнутая в дугу стеклянная пластинка AB . Чтобы лучше задерживать атомы металла, пластинка предварительно покрывается тонким слоем того же металла и тщательно фотометрируется. Затем цилиндр приводят во вращение и включают печь. Опыт продолжается около 10 часов. После этого пластинка AB с осевшими на ней атомами металла вынимается и снова фотометрируется. По степени почернения пластинки можно определить плотность распределения металла, сконденсировавшегося на ней. Вблизи точки A распределятся атомы металла с наибольшими скоростями, вблизи B — с наименьшими. Предположив, что скорости атомов в парах металла внутри печи распределены по закону Максвелла, можно заранее рассчитать плотность распределения исследуемого металла на пластинке AB .

В опытах Эддрнджа исследовались пучки атомов кадмия, в опытах Ламмерта — ртути, в опытах Миллера и Куша — калия и таллия, в опытах Цартмана — висмута. Все эти опыты оказались в превосходном согласии с максвелловским законом распределения скоростей. Этого и следовало ожидать в связи с тем, что было сказано в конце § 71.

ЗАДАЧА

В опыте Штерна (см. рис. 44) на поверхности вращающегося цилиндра C конденсируются молекулы серебра с различными скоростями. Каким скоростям молекул, попадающих на пластинку DD' , соответствует ее наибольшее почернение?

Решение. Если установка неподвижна, то молекулы конденсируются в точке D . При вращении всей установки молекулы со скоростями v попадают в D' . Смещение по дуге DD' равно $x = C/v$, где C — постоянная прибора. Число молекул dN со скоростями между v и $v + dv$, ежесекундно испускаемых источником A , пропорционально $v^3 F(v) dv$. Выражая dv через dx , представим его в виде $dN = v^3 F(v) dx$. Отсюда видно, что линейная плотность распределения молекул, сконденсировавшихся на поверхности цилиндра, пропорциональна $v^3 F(v)$, т. е. $v^3 \exp(-v^2/v_m^2)$. Эта плотность максимальна при $v = \sqrt{5/2} v_m$, где v_m — наиболее вероятная скорость.