

§ 12.7. Броуновское движение

1. Броуновским движением называют наблюдающееся под микроскопом непрерывное хаотическое движение мелких частиц, взвешенных в жидкости или газе. Хаотическое движение небольших частиц обусловлено флуктуациями давления, производимого на частицы молекулами жидкости или газа. Броуновские частицы испытывают сравнительно небольшое число столкновений с молекулами за единицу времени и действующие на них силы не уравниваются.

Первые наблюдения за движением частиц, взвешенных в жидкости, были сделаны в 1827 г. английским ботаником Р. Броуном. Потребовалось более трех четвертей века, чтобы физики смогли понять причины этого явления и его важность для молекулярно-кинетической теории и термодинамики. Вначале пытались объяснить движение броуновской частицы простыми физическими причинами — встряхиванием, неоднородностью температуры, световыми, химическими или какими-либо другими воздействиями. Постепенно выяснились важнейшие особенности броуновского движения:

1) оно продолжается неограниченно долго без каких-либо видимых изменений;

2) интенсивность движения броуновских частиц зависит от их размеров, но не от природы частиц; она возрастает с ростом температуры и уменьшением вязкости жидкости.

Длительное экспериментальное изучение привело к выводу, что броуновские частицы подобны поплавкам на «молекулярном море» — их беспорядочное движение лишь выявляет беспорядочное движение самих молекул жидкости. Таким образом, броуновское движение является прямым доказательством существования молекул и их хаотического движения. При своем движении броуновские частицы могут перемещаться вверх, т. е. как бы «всплывать» в жидкости. Это происходит в тех случаях, когда молекулы жидкости, находящиеся ниже частицы, передают ей больший импульс, чем молекулы, расположенные над ней. Подъем вверх броуновской частицы означает увеличение ее потенциальной энергии за счет кинетической энергии соседних молекул, т. е. за счет местного охлаждения жидкости. Этот процесс противоречит второму закону термодинамики, так как увеличение механической энергии броуновской частицы происходит за счет охлаждения одного источника теплоты — жидкости. Следовательно, броуновское движение доказывает ограниченность второго закона термодинамики, его статистический характер.

2. Закономерности броуновского движения были подробно изучены А. Эйнштейном и М. Смолуховским в 1906 г. В основе работы Эйнштейна лежало предположение о том, что броуновские частицы подобны большому молекулам постороннего вещества, разбросанным среди молекул чистой жидкости или газа. Такие частицы должны подчиняться законам разбавленных растворов, которые совпадают с законами идеальных газов. Размеры броуновских частиц таковы, что с помощью микроскопа можно наблюдать за движением этих частиц. Оказывает-

ся, что среднее смещение $\langle x \rangle$ частицы вдоль произвольного направления равно нулю. Это свидетельствует о полной хаотичности движения броуновских частиц. В то же время средняя величина квадрата смещения $\langle x^2 \rangle$ пропорциональна времени t наблюдения над частицей:

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt, \quad (12.46)$$

здесь D — коэффициент диффузии броуновских частиц, который для шарообразной частицы равен:

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta a N_A}, \quad (12.47)$$

где N_A — число Авогадро, η — коэффициент вязкости жидкости, a — радиус частицы.

Из формул Эйнштейна видно, что смещение броуновских частиц определяется их размерами, а не природой частиц. Закономерности броуновского движения дают независимый метод экспериментального определения числа Авогадро. Такого рода опыты были проведены Ж. Перреном.

Вопросы для повторения

1. В чем различие между обратимыми и необратимыми процессами? Почему все реальные процессы необратимы?
2. Начертите обратимый цикл Карно и выведите выражение для его термического коэффициента полезного действия
3. В чем состоит второй закон термодинамики? Чем он дополняет первое начало термодинамики?
4. Каково статистическое истолкование второго закона термодинамики и каковы пределы его применимости?
5. Что такое энтропия и свободная энергия?
6. Что называют квадратичной, абсолютной и относительной флуктуациями?
7. Каковы причины и основные особенности броуновского движения?

Примеры решения задач

Задача 12.1. Какую работу совершают внешние силы в идеальной холодильной машине, работающей по обратному циклу Карно, для того, чтобы унести из холодильной камеры 10^5 Дж теплоты, если температура в камере 263 К, а температура охлаждающей воды 285 К?

Д а н о

$$\begin{aligned} Q_2 &= 10^5 \text{ Дж,} \\ T_2 &= 263 \text{ К,} \\ T_1 &= 285 \text{ К} \\ \hline A' &= ? \end{aligned}$$

Р е ш е н и е

Затраченную работу A' можно вычислить по формуле (12.7):

$$Q_2 = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot A', \quad (a)$$

где η — коэффициент полезного действия прямого цикла Карно, равный

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$