МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО"

Университет ИТМО

Физико-технический факультет

ОБЩАЯ ФИЗИКА
ЛЕКЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Методические рекомендации
к проведению лекционных демонстраций по разделам:
механика, термодинамика, электромагнетизм, оптика, атомная физика

Санкт-Петербург, 2020

1 Основные положения МКТ. Модель иедального газа в статистической физике. Основное уравнение МКТ. Температура и средняя кинетическая энергия движения молекул. Внутренняя энергия иедальнного газа. Теплоёмкость идеального газа (классическая и квантовая теории)

1.1 Модель Эйхенвальда (модель теплового движения молекул на кодоскопе)

1.1.1 Теория

Достаточно мелкие частицы, взвешенные в жидкости, при наблюдении под микроскопом представлются находящимися в непрерывном дрожании. Это дрожащее движение, не изменяющееся с течением времени и продолжающееся сколь угодно долго, называется *броуновским* по имени английского ботаника Р. Броуна (1827 г.). Броуновская частица движется под действием случайной силы, возникающий за счет беспорядочных ударов молекул среды, в которой находится.

Сущность движения: частицы вместе с молекулами жидкости образуют единую статистическую систему. В соотвествии с теоремой о равнораспределении энергии по степени свободы на каждую степень свободы броуновской частицы должна приходиться энергия $1/2\ kT$. Энергий $3/2\ kT$, приходящаяся на три поступательные степени свободы частицы, приводит к движению ее центра масс, которое и наблюдается под микроскопом в виде дрожания. Если броуновская частица достаточно жестка и ведет себя как твердое тело, то еще $3/2\ kT$ энергии приходится на ее вращательные степени свободы, поэтому при своем дрожащем движении она испытывает также и постоянные изменения ориентировки в пространстве.

Случайное блуждание

Уравнивание средних кинетических энергий происходит вследствие беспорядочных столкновений между частицами, а движение каждой из частиц в результате столкновений – случайный процесс.

Рассмотрим положение броуновской частицы через некоторые фиксированные промежутки времени. Начало координат – точка O, в которой частица находится в начальный момент времени, q_i – вектор, характеризующий перемещение частицы между $(i-1)$-м и i-м наблюдениями. По истечении n наблюдений частица сместится из нулевого положения в точку с радиус-вектором r_n (рис. 1):

$$r_n = \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{1}$$

Перемещение частицы в промежутках времени между моментами наблюдения происходит не по прямой линии, а по столь же сложной изломанной линии, как и перемещение от исходной точки к точке, характеризиемой радиус-вектором r_n. Можно произвести серию опытов, в каждом из которых броуновская частица выходит из начала и через n шагов приходит в некоторую точку с радиус-вектором r_n. Все r_n будут различными.

Вычислим средний квадрат удаления частицы от начала после n шагов в большой серии опытов.

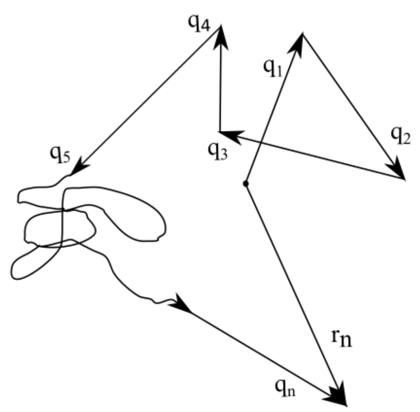

Рис. 1: Перемещение частицы при броуновском движении. Кривыми линиями обозначены шаги с 6-го по (n-1)-й.

$$< r_n^2 >=< \sum_{i,j=1}^{n} q_i g_j >= \sum_{i=1}^{n} < q_i^2 > + \sum_{i \neq j} < q_i q_j > \tag{2}$$

где $< q_i^2 >$ – средний квадрат смещения частицы на i-м шаге в серии опытов (он для всех шагов одинаков и равен какой-то положительной величине a^2); $< q_i q_j >$ во второй сумме – средняя величина скаляярного произведения при i-м шаге на перемещение при j-м шаге в различных опытах. Эти величины независимы друг от друга, одинаково часто встречаются как положительные значения скалярного произведения, так и отрицательные. В итоге, все члены второй суммы $< q_i q_j > = 0\ (i \neq j)$ и выражение принимает вид:

$$\boxed{< r_n^2 >= a^2 n = \frac{a^2}{\Delta t} t = \alpha t =< r_t^2 >} \tag{3}$$

где Δt – промежуток времени между наблюдениями; $t = \Delta t n$ – время, в течение которого средний квадрат удаления частицы стал равен $< r_t^2 >$. Несмотря на то что направления, в которых частица перемещается при каждом шаге, равновероятны, в среднем частица будет удаляться от начала [1].

1.1.2 Описание и ход демонстрации

Для визуализации броуновского движения используется нехитрая *модель Эйхенвальда*: стальные шарики, "молекулы идеального газа хаотично и беспорядочно двигаются, за счет быстрого вращения ручки, отвечающей за пружинку, и под их случайными ударами беспорядочно, хаотично и бесперырывно двигается больший по размеру диск – "броуновская частица-[2].

Рис. 2: Модель Эйхенвальда

Список литературы

[1] А. Н. Матвеев, Молекулярная физика, стр. 110

[2] Видеодемонстрация модели Эйхенвальда. Броуновское движение