



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 17-В

ОПЫТ ШТЕРНА

«ФИЗИКА»

Авторы
Жданова Т.П.,
Кудря А.П.,
Лемешко Г.Ф.,
Лещёва О.А.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Настоящая лабораторная работа посвящена знакомству с экспериментальной работой Штерна по проверке распределения Максвелла и определению наиболее вероятной скорости атомов вещества.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента.

Авторы

Жданова Т.П. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Кудря А.П. - старший преподаватель
кафедры «Физика»

Лемешко Г.Ф. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Лещёва О.А. – старший преподаватель кафедры
«Физика»

Оглавление

Опыт Штерна	1
Краткая теория.....	4
Проведение эксперимента	9
Задание 1.	9
Задание 2.	10
Контрольные вопросы	11
Список литературы.....	11

Цель работы: познакомиться с экспериментальной работой Штерна по проверке распределения Максвелла и определению наиболее вероятной скорости атомов вещества.

Оборудование: персональный компьютер с программным обеспечением модели опыта Штерна.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Предположим, что мы сделали «моментальную фотографию» небольшого объема газа, на которой указаны скорости каждой молекулы.

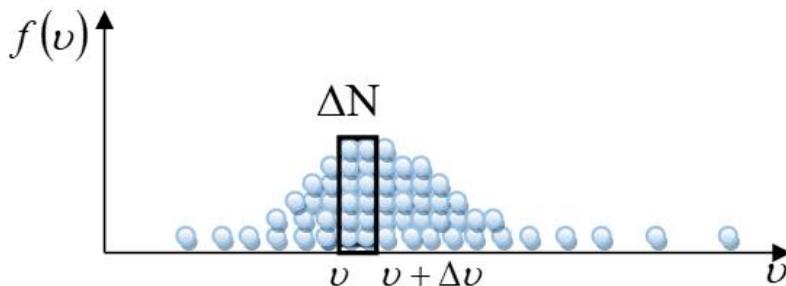


Рис.1

Расположим молекулы вдоль координаты скорости v в виде точек (рис.1). Скорости большинства молекул группируются в основном вблизи наиболее вероятного значения. Близкие к нулю и очень большие значения скорости встречаются сравнительно редко. Число молекул ΔN , скорости которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$, зависит от общего количества молекул N в выбранном объеме. Относительное число молекул $\frac{\Delta N}{N}$, скорости которых попадают внутрь интервала Δv , называется функцией распределения молекул по скоростям:

$$f(v) = \frac{\Delta N}{N \Delta v} . \quad (1)$$

Применяя методы теории вероятностей, Максвелл в 1860 году нашел функцию распределения молекул идеального газа по скоростям:

$$f(v) = A \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2kT}} \cdot v^2 ,$$

где A - множитель, не зависящий от скорости, m - масса молекулы, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Площадь, охватываемая кривой, равна единице.

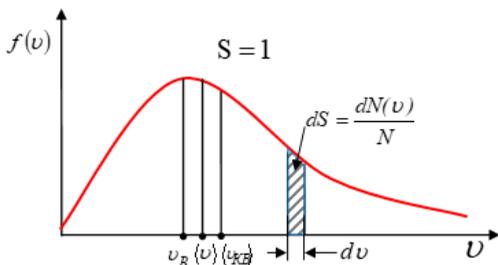


Рис.2

$$A \int_0^{\infty} e^{-\frac{m \cdot v^2}{2kT}} v^2 dv = 1.$$

Это условие носит название нормировки функции, а множитель A называется нормировочным. Вычисления дают для A значение:

$$A = 4 \cdot \pi \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Таким образом, функция распределения Максвелла имеет вид:

$$f(v) = 4 \cdot \pi \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2kT}} v^2. \quad (2)$$

Скорость, соответствующая максимальному значению функции распределения, является *наиболее вероятной* v_B .

Ее аналитическое выражение можно найти, исследовав функцию (2) на экстремум:

$$\frac{df(v)}{dv} = A \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2kT}} v \cdot \left(2 - \frac{m \cdot v^2}{k \cdot T} \right) = 0.$$

Выражение в скобках равно нулю, поэтому

$$v_B = \sqrt{\frac{2k \cdot T}{m}} = \sqrt{\frac{2R \cdot T}{M}}, \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К - постоянная Больцмана, T - абсолютная

температура, m – масса молекулы (атома), M – молярная масса, $R = 8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$ - универсальная газовая постоянная.

Подставив в (2) наиболее вероятную скорость, найдем максимальное значение функции распределения:

$$f(v_B) = \frac{4}{e} \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T}} \cdot \sqrt{\frac{m}{T}} \quad (4)$$

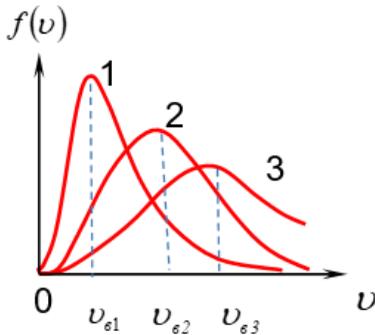


Рис.3

На рис.3 показаны функции распределения для $m_1 > m_2 > m_3$ при $T = const$ или $T_1 > T_2 > T_3$ при $m = const$.

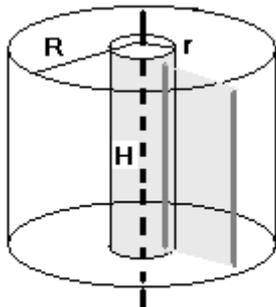


Рис.4

Первое экспериментальное определение скоростей молекул было осуществлено Штерном в 1920 г. Прибор Штерна состоял из двух коаксиальных цилиндров, радиусами R и r (рис.4), вдоль общей оси которых была натянута платиновая посеребренная нить H . Основания цилиндров были герметично закрыты и воздух из цилиндров откачан. При нагревании нити электрическим током с ее поверхности испарялись атомы серебра. Скорости испарившихся атомов соответствовали температуре нити. Покинув нить, атомы

двигались по радиальным направлениям. Внутренний цилиндр имел узкую продольную щель, через которую проходил узкий пучок атомов. Достигнув внутренней поверхности внешнего цилиндра, атомы серебра оседали на нее, образуя слой в виде узкой вертикальной полоски.

В компьютерной модели опыта Штерна (рис.5) показаны сечения цилиндров, а фрагмент внутренней поверхности внешнего цилиндра, для наглядности, вынесен за пределы прибора в отдельное окно. Начало координат совмещено с линией, куда оседают испаряющиеся с нити

атомы в состоянии покоя цилиндров. Кроме того, в компьютерной модели опыта Штерна вместо серебра используются другие вещества.

Если привести прибор во вращение, след, оставляемый пучком атомов, сместится по внутренней поверхности внешнего цилиндра на некоторую величину S .

Это произойдет потому, что за время, пока атомы вещества пролетают зазор между цилиндрами, прибор успевает повернуться на некоторый угол. Чем выше скорость атомов, тем они быстрее достигают поверхности цилиндра.

Зная цену деления координатной оси, можно оценить положение максимума распределения, соответствующего наиболее вероятной скорости молекул.

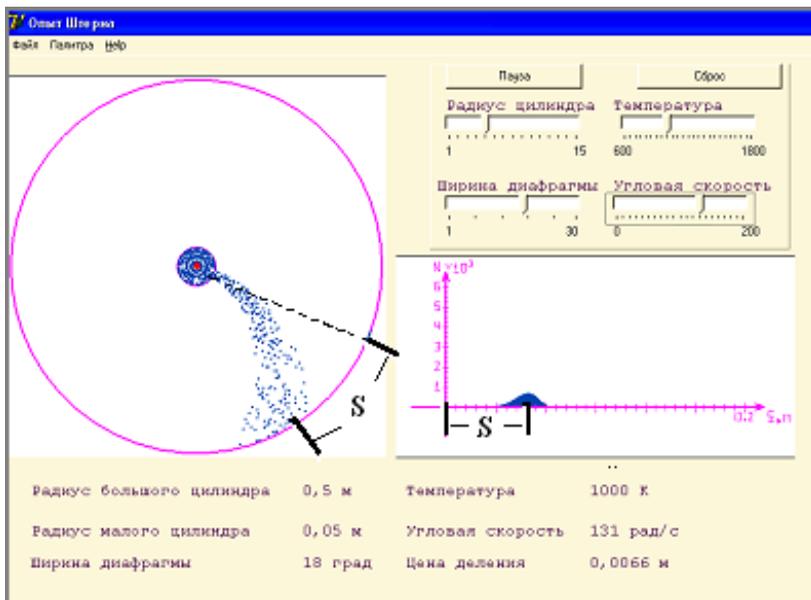


Рис. 5

Расстояние S между первоначальной и смещенной полосками осевшего вещества можно связать с угловой скоростью вращения цилиндров ω , геометрией прибора и скоростью молекул. Обозначив время пролета через Δt , можно отметить, что

$$S = v_R \cdot \Delta t = \omega \cdot R \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где v_R – линейная скорость точек внутренней поверхности внешнего цилиндра.

Физика

Время пролета молекул в пространстве между цилиндрами

$$\Delta t = \frac{R-r}{v}, \quad (6)$$

где v – скорость молекул исследуемого вещества.

Совместное решение уравнений (5) и (6) позволяет оценить наиболее вероятную скорость:

$$v_B = \frac{\omega \cdot R \cdot (R-r)}{S}. \quad (7)$$

Поперечный срез осевшего металла, сделанный Штерном, по форме совпадал с кривой распределения Максвелла, а вычисленная им наиболее вероятная скорость, по формуле (7), соответствовала теоретическому значению.

О программе

Программа выводит на монитор анимацию движения атомов вещества, испаряющихся с нити накала, относительно цилиндров и в хорошем приближении повторяет опыт Штерна по определению наиболее вероятной скорости молекул.

Подготовка к работе

1. Откройте папку «Штерн» и файл «Штерн. exe».
2. В закладке «Файл», «Теория» познакомьтесь с биографией ученого, теоретическими основами опыта Штерна и схемой экспериментальной установки.
3. Закройте информационные окна и выйдите в рабочую панель (рис.5).
4. С помощью регуляторов, расположенных на рабочей панели, установите:
 - температуру T из интервала 1000-1800 С;
 - радиус малого цилиндра r из интервала 0,01-0,05 м;
 - ширину диафрагмы малого цилиндра из интервала 10-20 град;
 - угловую скорость $\omega = 0$ рад/с.
5. Нажмите клавишу «Старт» и убедитесь в том, что атомы движутся вдоль радиальной линии и оседают на внутренней поверхности большего цилиндра вначале координатной оси S (часть этой поверхности отображается в отдельном окне). Вдоль оси «Y» отображается количество атомов, осевших на внутреннюю поверхность внешнего цилиндра за время наблюдения.
6. Остановите работу программы и обнулите результаты, последовательно нажав клавиши «Пауза» и «Сброс».

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
Задание 1.

1. Занесите в таблицу значения температуры T , радиусов большого R и малого r цилиндров.
2. С помощью регулятора «Угловая скорость» установите первое значение угловой скорости ω из интервала 100-200 рад/с. Занесите в таблицу 1.
3. Нажмите на клавишу «Старт» и в течение 1-2 минут наблюдайте за работой модели прибора Штерна.
4. Нажатием клавиши «Пауза» остановите работу программы и произведите измерение величины S , как показано на рис. 5.
5. Пункты 1-4 повторите 5 раз. При этом можно менять значения угловой скорости ω от опыта к опыту. Величины R , r и T остаются постоянными.
6. По формуле (7) вычислите наиболее вероятную скорость атомов v_B для каждого измерения.
7. Вычислите среднее значение $\langle v_B \rangle$.
8. Определите абсолютную погрешность каждого измерения по формуле $(\Delta v_B)_i = |\langle v_B \rangle - v_i|$.
9. Найдите среднее значение абсолютной погрешности $\langle \Delta v_B \rangle$.
10. Определите среднюю относительную погрешность по формуле
$$\delta v_B = \frac{\langle \Delta v_B \rangle}{\langle v_B \rangle} 100\%.$$
11. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$R = 0,5 \text{ м};$		$r =$		$T =$		цена дел.=0,0066 м/дел	
	ω , рад/с	S , дел	S , м	v_B , м/с	Δv_B , м/с	δv_B , %	
1							
2							
3							
4							
5							
ср							
$m =$			$M =$				

12. По формуле (3), используя среднее значение наиболее вероятной скорости $\langle v_B \rangle$, оцените массу атома m и молярную массу M вещества, используемого в эксперименте.

Задание 2.

1. Не меняя радиус малого цилиндра r и ширину его диафрагмы, установите угловую скорость $\omega = 100$ рад/с и температуру $T_1 = 600^\circ \text{C}$.
2. Запустите в работу программу и остановите ее через $n = 15$ оборотов цилиндра. По координате « N » оцените величину максимума функции $f(v_B)$.
3. Повторите пункты 1 и 2 для температуры $T_2 = 1800^\circ \text{C}$.
4. Занесите данные в таблицу 2.

Таблица 2

T_1	N_1	T_2	N_2	$\frac{N_1}{N_2} =$	$\frac{f_1(v_B)}{f_2(v_B)} =$
600°C		1800°C			

5. Разделив в уравнении (4) левые и правые части для каждого случая получаем:

$$\frac{f_1(v_B)}{f_2(v_B)} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

Это будет действительное значение отношения максимумов функции распределения.

6. Оцените результаты измерений по формуле:

$$\delta = \frac{|N_1 / N_2 - \sqrt{T_2 / T_1}|}{\sqrt{T_2 / T_1}} 100\% .$$

6. По проделанной работе сделайте вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как распределены молекулы газа по скоростям?
2. Нарисуйте график распределения молекул газа по скоростям.
3. Что понимают под функцией распределения молекул по скоростям и от чего она зависит?
4. Как меняется график функции распределения от температуры? Почему?
5. Какая скорость называется наиболее вероятной?
6. Формула наиболее вероятной скорости.
7. Объяснить опыт Штерна.
8. Сделать вывод расчетной формулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики Т.2. – М: Наука, 2005.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М: Высшая школа, 2019.