

**НАКОПЛЕНИЕ КОНТЕНТА ИНФОРМАЦИОННО-  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА ПО  
ФИЗИКЕ НА ПРИМЕРЕ ТЕМЫ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ПРОВЕРКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА»**

*К.К. Гаспарян<sup>1)</sup>, А.В. Паврозин<sup>2)</sup>*

1) студентка Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, [karinagasparyan7@mail.ru](mailto:karinagasparyan7@mail.ru)

2) к.п.н., доцент Армавирского механико–технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Армавир, Россия, [pavrosin@mail.ru](mailto:pavrosin@mail.ru)

**Аннотация:** Рассмотрены эксперименты О. Штерна, Б Ламмерта, Д. Элдриджа, Цартмана и И. Эстермана. Приведены схемы, формулы и графики, необходимые для понимания темы.

**Ключевые слова:** распределение Максвелла, распределение молекул по скоростям, экспериментальная проверка.

**THE ACCUMULATION CONTENT INFORMATION AND  
EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF TECHNICAL UNIVERSITY IN  
PHYSICS ON THE EXAMPLE OF THE THEME "EXPERIMENTAL  
VERIFICATION OF THE MAXWELL DISTRIBUTION»**

*K. K. Gasparyan<sup>1)</sup>, A.V. Pavrozin<sup>2)</sup>*

1) the student Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Armavir, Russia, [karinagasparyan7@mail.ru](mailto:karinagasparyan7@mail.ru)

2) Ph. D., associate Professor, Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Armavir, Russia, [pavrosin@mail.ru](mailto:pavrosin@mail.ru)

**Annotation:** The experiments of O. Stern, B Lammert, D. Eldridge, Zartman and I. Esterman are considered. The diagrams, formulas and graphs necessary for understanding the topic are given.

**Keywords:** Maxwell distribution, velocity distribution of molecules, experimental verification.

Молекулярно-кинетическая теория изучает особенности вещества на базе представлений об их строении и законах взаимодействия атомов (молекул). При этом подразумевается, что молекулы или атомы вещества постоянно находятся в беспорядочном движении. В 1860 году Д. Максвелл теоретически получил распределение молекул газа по скоростям при условии, что температура и давление газа внутри сосуда во всех точках одинаковы. Но даже в равновесном состоянии молекулы газа движутся хаотично и сталкиваются, как между собой, так и с сосудом, то есть с его стенкой, при этом постоянно изменяя свою скорость. Это означает, что в любой момент времени в газе существуют молекулы, которые имеют всевозможные скорости. Вместе с тем, из-за того, что температура и давление в газе остаются неизменными, то, независимо от изменения скорости молекул, среднее значение её квадрата будет постоянным. Это является возможным только при присутствии неизменного во времени и одинакового во всех частях сосуда распределения молекул по скоростям.

В 1920 году Отто Штерн, используя метод молекулярных пучков, экспериментом подтвердил закон Д. Максвелла. Чтобы измерить среднюю скорость движения молекул О. Штерн сконструировал экспериментальную установку. Прибор имел два крепко соединенных коаксиальных цилиндра, имеющих радиусы  $R$  и  $r$ . (Рис.1).

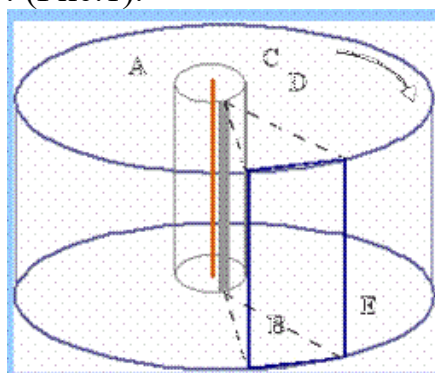


Рис.1 – Схема экспериментальной установки

Внутри цилиндра проходит платиновая нить (A), которая расположена прямо на оси. О. Штерн использовал в своём опыте разрезанные пары серебра. Эта нить, покрытая слоем серебра, нагревалась электрическим током, а слой, в свою очередь, испарял атомы. Эти атомы серебра, независимо от нити, рассеивались в разные стороны, так как воздух во внутреннем цилиндре был откачан. В маленьком цилиндре предварительно вдоль плоскости была высечена небольшая щель (C). Около этой щели находилась диафрагма, позволявшая «вырезать» тонкий пучок из потока атомов серебра. Благодаря механизму диафрагмы (D), все атомы серебра двигались в одинаковом направлении и далее попадали в оболочку большого цилиндра. Иными словами, диафрагма пропускала

через фильтр атомы, которые двигались исключительно в одном направлении. В вакуумной оболочке большого цилиндра создавался высокий уровень разреженности, около  $10^{-3} - 10^{-4}$  Па. Возможность соударения молекул воздуха с атомами серебра была ничтожно мала, поэтому и вероятность любого смещения атомов серебра при прямолинейном равномерном движении тоже невелика. На внутренней области большого цилиндра располагалась съёмная пластинка (В), которая имела комнатную температуру и была сделана из латуни. В среде (Е) на этой пластинке атомы серебра, приобретая более низкую температуру, то есть, охлаждаясь, опускались в виде тонкой серебряной полоски. С помощью определённого устройства эта установка могла вращаться вокруг своей оси с частотой от 25 до 45 оборотов в единицу времени.

Опыты проводились в следующем порядке. Сначала по оси малого цилиндра на нити, сделанной из платины, включали электрический ток. Нить имела толщину около 0,07-0,1 мм и являлась очень чувствительной составной частью датчика. Эта нить приобретала температуру, близкую к температуре плавления серебра ( $T_{\text{плав}} = 1235$  К), поэтому серебро при этой температуре начинало активно испаряться. Некоторая часть этого благородного металла пробивалась сквозь щель, о которой говорилось ранее. Далее прошедшие через фильтр атомы серебра двигались по радиальным каналам к внутренней области большого цилиндра. Его стенка охлаждалась, чтобы атомы, которые на неё попадали, «прилипали» к ней, тем самым образуя некий серебряный налёт в форме этой щели, только слегка больших размеров. Вначале прибор покоился, однако потом начинал вращаться с частотой 1500-2700 оборотов в минуту. Атомы двигаются прямолинейно, однако за некоторый промежуток времени, проходя щель, они долетают до латунной пластинки, которая успевает повернуться на определённый угол, и оседают на ней, уже не противоположно к щели, а несколько в стороне. (Рис.2)

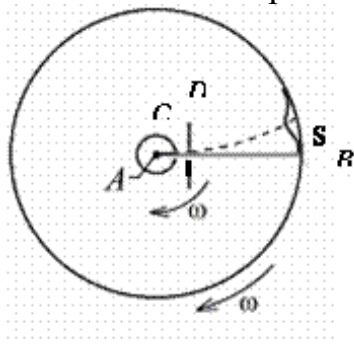


Рис.2 – Смещение налёта серебра при вращении прибора

При движении установки происходило изменение положения линии серебра, что позволяло найти скорость движения атомов серебра и сопоставить её с теоретическим значением. Метод определения скорости атомов серебра не был относительно сложным. Атом двигался со скоростью  $u$ , и проходил расстояние равное разности  $R$  и  $r$ :  $L = R - r = u \cdot \tau$ , где  $R$  – это радиус внешнего цилиндра,  $r$  – радиус внутреннего цилиндра,  $\tau$  – время, за которое атом прошёл это расстояние. За это время любая точка большого внешнего цилиндра проходила путь, равный  $s = \omega \cdot R \cdot \tau$ .

Решая эти два уравнения вместе, О.Штерн установил среднюю скорость движения атомов:

$$u = \frac{\omega \cdot R \cdot (R - r)}{s}$$

О. Штерн подтвердил правильность представлений о строении вещества и установил статистический характер закономерностей о молекулярных системах.

Графическая иллюстрация распределения молекул по скоростям, полученного Д. Максвеллом, представлена на Рис. 3. По оси абсцисс отложены различные значения скорости  $v$  молекул, а по оси ординат – отношение количества молекул к диапазону их скоростей  $\Delta N / \Delta v$ .

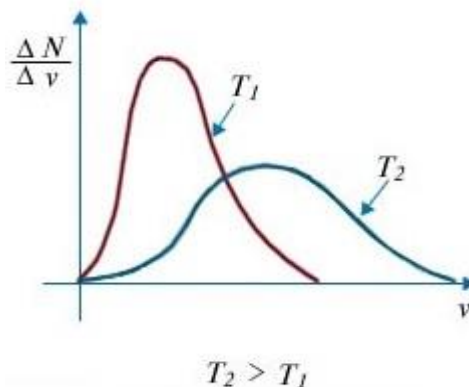


Рис.3 – Распределение молекул газа по скоростям

Эти кривые имеют некоторые особенности. Например, оба графика проходят через начало координат, имеют свои точки максимума и асимметричны. Если эти кривые проходят через начало координат, то это указывает на то, что молекул, которые находятся без движения, в газе нет. Результаты преимущественно возможной скорости молекул при движении соответствует максимуму линий распределения. Эта функция распределения молекул, которую Д. Максвелл смог найти теоретическим способом, на должном уровне сошлась с профилем налёта атомов серебра на пластинке, сделанной из латуни, в опыте Отто Штерна. Немецкий физик своим опытом был первым, кто смог доказать истинность молекулярно-

кинетической теории. В наши дни молекулярно-атомное учение доказано большим количеством опытов и является общепринятым. Наиболее точные измерения стали возможными, когда двое учёных – Б. Ламмерт и Д. Эддридж, независимо друг от друга использовали селекторы скоростей, которые работали на принципе зубчатых колёс. (Рис. 4).

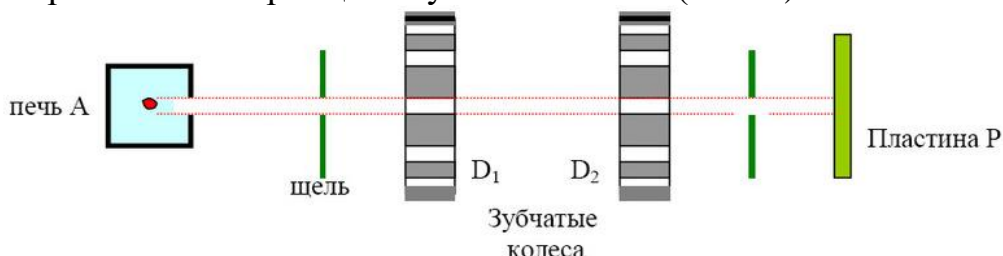


Рис. 4 – Общая схема установок Б. Ламмерта и Д. Эддриджа

Некий пучок молекул выходил из печи (А), преобразовывался в параллельный пучок на щелях и поступал на вращающиеся диски D<sub>1</sub> и D<sub>2</sub>.

Когда эти зубчатые диски не вращались, атомы не могли проходить к пластинке (Р), так как щель одного диска попадала на зуб другого. Когда же эти диски приходили в движение, то атомы могли пролетать расстояния между дисками D<sub>1</sub> и D<sub>2</sub> за время поворота их на угол  $\alpha=2^\circ$ .

По числу атомов, образовавшихся на пластинке (Р) в виде осадка, можно рассуждать о распределении молекул проекции скорости,двигающихся по направлению пучка. Из всего количества атомов, которые пролетели через щель в диске D<sub>1</sub>, через диск D<sub>2</sub> пролетают исключительно те, которые подлетают к нему в определённый момент, когда на пути пучка встаёт отверстие в диске D<sub>2</sub>. Соответственно, молекулы, движущиеся быстро, долетят до диска раньше, чем те молекулы, которые имеют маленькую скорость. Именно поэтому, это устройство способствует выделению атомов из пучка, которые обладают конкретной величиной скорости, притом из-за малой ширины щелей выделяются атомы, имеющие скорости, лежащие в некотором интервале  $\Delta v$ . Количество этих атомов для любого интервала скоростей зависит от времени экспонирования. Единственным минусом этого опыта – атомы на пластинке имеют разные скорости, когда поворот осуществляется на большие углы. Другой учёный – Цартман решил убрать этот недостаток, поэтому, усовершенствовал опыты. Как и в прошлом опыте Ламмерта и Эддриджа, пучок сначала выходил из печи, коллиминировался и попадал на цилиндр.

Однако теперь этот цилиндр имел некое отверстие (Рис.5).

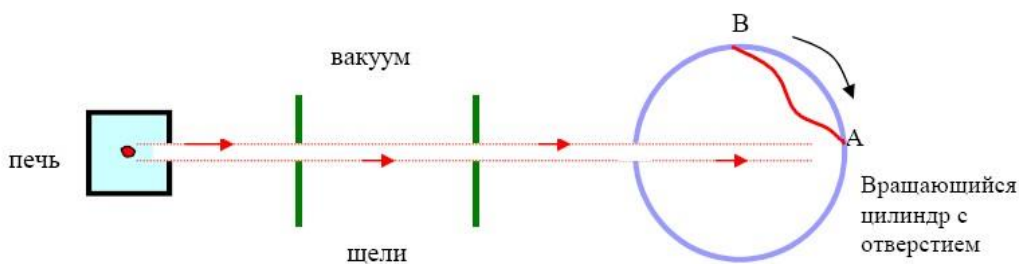


Рис.5 – Схема опыта Цартмана

При проникновении пучка в это отверстие, молекулы оседали на внутренней стенке цилиндра. У точки А накапливались молекулы (атомы), которые имели большие скорости, а у точки В – медленные молекулы.

Немного по-иному был проведен эксперимент немецким физиком И. Эстерманом в 1947 году. Экспериментатор использовал в своём опыте атомы цезия. Опыт И. Эстермана выглядел следующим образом (Рис.6).

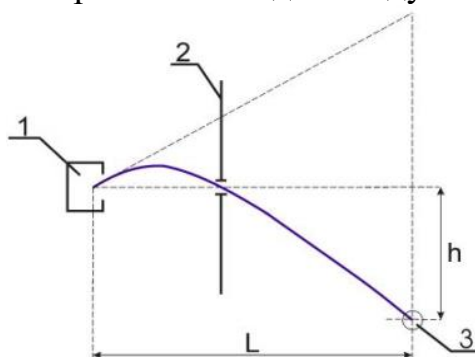


Рис.6 – Схема установки И. Эрстмана

Пучок вылетал со скоростью  $v$  через отверстие, которое находилось в печи 1, и под действием силы тяжести начинал двигаться по параболе.

Атомы цезия, которые проходили в диафрагме 2 через узкую щель, принимались детектором 3, который можно было располагать на разных высотах  $h$ . Скорость атома зависела от значения величины отклонения  $h$  пучка.

В данном опыте оно было равно нескольким долям миллиметра, с учётом того, что расстояние от детектора до печи составляло  $L=2$  м.

Переставляя датчик 2 и фиксируя число атомов цезия, которые попадали в детектор 3 за одну секунду, можно увидеть некую зависимость насыщенности пучка от значения  $h$ . Дальнейшие пересчёты, с учётом известной зависимости высоты  $h$  от скорости атома  $v$ , давал распределение по скоростям атомов цезия. Все проведённые опыты ещё раз доказали правильность распределения по скоростям для молекулярных и атомных пучков, который получил Максвелл.

Умение нахождения методов доказательства справедливости теоретических постулатов очень важно, когда объектом научных разработок являются предметы, неразличимые невооружённым глазом. Дальнейшая история науки, когда физика вступила в фазу рассмотрения строения атома в период поиска элементарных частиц, доказала это.

**Список использованных источников:**

1. <https://www.BiblioFond.ru/view.aspx?id=479089&key=a07e7e6f8acc94a0faafe418e22fa2b>
2. <https://www.studsell.com/view/49848/&key=29e985a3378aa58b3c8fdd0e24cf308c>
3. Смирнов Ю.М., Кенжин Б.М., Сон Т.Е. Эксперимент - основа обучения физике бакалавров техники и технологий // Russian Agricultural Science Review. 2015. Т. 5. № 5-2. С. 58-60.