

### ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА НЕОНОВОЙ ЛАМПЫ

**Цель работы:** построить градуировочную кривую спектроскопа; определить границы видимого спектра лампы накаливания.

**Приборы и принадлежности:** спектроскоп, неоновая лампа, лампа накаливания.

#### Введение

Все тела непрерывно излучают и поглощают энергию. Совокупность колебаний различных частот или длин волн, имеющих в данном излучении, называются спектром этого излучения. Непрерывным или сплошным спектром называется спектр, в котором длины волн следуют друг за другом непрерывно. Сплошные спектры излучаются нагретыми твёрдыми телами и жидкостями. Газы, состоящие из молекул, излучают полосатые спектры. Полосатые спектры состоят из большого количества близко расположенных линий, которые образуют отдельные группы (полосы). Газы, состоящие из атомов, излучают линейчатые спектры. Линейчатые спектры состоят из тонких линий, отчетливо отделяющихся друг от друга.

Все рассмотренные спектры называются спектрами испускания. Если на пути белых лучей поместить какое-либо тело, поглощающее те или иные лучи спектра, то мы получим на сплошном спектре темные линии или полосы, соответствующие поглощенным телом лучам спектра. Замечено, что линии поглощения атомов точно соответствуют их линиям испускания. Спектры раскалённых твердых тел или жидких, перерезанные тёмными линиями или полосами, которые получаются вследствие поглощения различными средами, называются спектрами поглощения.

Изучение линейчатых спектров привело к установлению определенных закономерностей в расположении составляющих их линий. Оказалось, что линии в атомных спектрах располагаются не беспорядочно, а составляют определённые группы или серии, разделённые значительными промежутками, не содержащими никаких линий.

Бальмер предположил простые формулы, по которым могут быть вычислены длины волн (или частоты) каждой серии спектра атома

водорода

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{c} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$
$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $\lambda$  - длина волны спектральной линии;  $\nu$  - частота спектральной линии;  $R = 3,288 \cdot 10^{15} \text{c}^{-1}$  - постоянная Ридберга;  $m$  и  $n$  - натуральные числа;  $c$  - скорость света в вакууме. Если положить  $m = 1$ , а  $n = 2, 3, \dots$ , получаются частоты и длины волн первой серии линий спектра водорода (так называемой серии Лаймана). При  $m = 2$ , а  $n = 3, 4, \dots$  получаются частоты и длины волн второй серии (серии Бальмера). Действуя также и далее можно рассчитать длины волн всего спектра водорода.

Совпадение вычисленных по формулам Бальмера и измеренных экспериментально длин волн выполняется с точностью до пятого знака. Такое точное совпадение вначале было непонятным, поскольку формула Бальмера не имела теоретического объяснения, за ней не скрывался никакой физический смысл, Бальмер просто угадал закономерность, не зная, почему она такова. Объяснение строения спектров дает только квантовая теория, основы которой были разработаны Бором. Согласно планетарной модели, атом состоит из положительно заряженного ядра и электронов, вращающихся вокруг ядра. Поведение электронов в атоме подчиняется трем постулатам Бора.

1. **Постулат квантования:** электрон может вращаться вокруг ядра только по таким стационарным орбитам, на которых момент количества движения электрона кратен постоянной Планка:

$$m_e v_n r_n = n \hbar \quad (2)$$

$m_e$  - масса электрона,  $v_n$  - его скорость на  $n$ -ой орбите,  $r_n$  - радиус  $n$ -ой орбиты,  $n = 1, 2, 3, \dots$  - номер орбиты,  $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка.

2. **Постулат устойчивости:** электрон сколь угодно долго может двигаться по стационарной орбите, не излучая энергию.

3. **Постулат излучения:** излучение атомом кванта энергии происходит при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую. Излученный квант света имеет энергию, равную разности энергии электрона на стационарных орбитах

$$\hbar \omega_{nm} = E_n - E_m. \quad (3)$$

Здесь  $E_n$  и  $E_m$  - значения энергии атома до и после перехода электрона с  $n$ -ой орбиты на  $m$ -ую,  $\omega_{mn}$  - круговая частота кванта света, испускаемого атомом при переходе электрона с  $n$ -ой орбиты на  $m$ -ую.

Поскольку номер орбиты может быть только целым числом и принимать только дискретный ряд значений, то и все параметры электронов на стационарных орбитах (скорость, радиус орбиты, энергия) также изменяются дискретно (скачкообразно) при изменении номера орбиты. Говорят, что значения этих параметров квантованны.

Так, например, значение энергии электрона на  $k$ -ой орбите связано с её номером следующим образом:

$$E_k = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2 (4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{k^2}, \quad (4)$$

где  $e$  - заряд электрона и  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума. Применение формул (3-4) для расчета частоты  $\nu_{nm}$  излучения кванта при переходе электрона с  $n$ -ой орбиты на  $m$ -ую дает следующий результат

$$\nu_{nm} = \frac{m_e e^4}{4\pi\hbar^3 (4\pi\epsilon_0)^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (5)$$

Подсчет величины  $m_e e^4 / (4\pi\hbar^3 (4\pi\epsilon_0)^2)$  показывает, что она совпадает с постоянной Ридберга  $R$ . Это означает, что формула (5) представляет собой формулу Бальмера, но полученную на основании квантовой теории атома водорода.

Теперь формула Бальмера и все входящие в неё величины получили простой физический смысл. Так, натуральные числа  $m$  и  $n$  означают ни что иное, как номера стационарных орбит, между которыми происходит переход электронов. Теперь можно сказать, что спектральная серия Лаймана ( $m = 1, n = 2, 3, \dots$ ) излучается при переходе электрона со второй, третьей и т.д. орбит на первую.

До сих пор речь шла о спектре излучения атома водорода - наиболее простого по строению атома. Атомы других химических элементов также излучают линейчатые спектры, отличающиеся друг от друга длинами волн, числом линий, расположением и яркостью линий.

На изучении линейчатых спектров основан спектральный анализ, т.е. умение распознавать химический состав веществ по их спектрам излучения. Для того, чтобы атом мог излучать квант энергии необходимо предварительно "поместить" электрон на более высокую орбиту (или, как говорят, на более высокий энергетический уровень), переход с

которой затем на более низкую и будет сопровождаться излучением кванта света соответствующей частоты. Переход электронов с низких орбит на более высокие сопровождается, естественно, поглощением атомом соответствующего кванта энергии величиной  $\hbar\omega_{mn}$ . Переходы электронов на более высокие орбиты, требующие затрат энергии, называются вынужденными, тогда как переходы на низкие орбиты - спонтанными (самопроизвольными). Названия процессов показывают, что для осуществления процессов, сопровождающихся излучением энергии, не требуется никаких дополнительных условий, тогда как для переходов электронов на более высокие орбиты необходим источник энергии и какой-то механизм передачи энергии атому.

Процесс передачи энергии атому, сопровождающийся переходом электрона на более высокий энергетический уровень, называется возбуждением атома. Энергия, необходимая для возбуждения атома, может быть доставлена ему различными способами.

Во-первых, атомы могут поглощать электромагнитную энергию (свет). Именно этот механизм приводит к образованию описанных выше спектров поглощения. Поскольку переходы электронов как при излучении света, так и при поглощении, происходят между одними и теми же энергетическими уровнями, положение линий в спектрах поглощения в точности совпадает с положением соответствующих линий в спектрах испускания.

Во-вторых, атомы возбуждаются, обмениваясь энергией, при столкновениях друг с другом. Ясно, что такого рода возбуждение тем более вероятно, чем выше скорости теплового движения атомов, т.е. чем выше температура газа. Таким образом, в горячих парах и газах идут быстро сменяя друг друга процессы возбуждения и излучения. Этим и объясняется свечение горячих газов (пламени газовой горелки, свечение газов при дуговом электрическом разряде).

И, наконец, третий способ возбуждения атомов газа - электронный удар-столкновение быстрого свободного электрона с атомом. Если энергия свободного электрона кратна разности энергий двух уровней  $E_m - E_n$ , то при таком столкновении свободный электрон передаёт свою кинетическую энергию атому, что приводит к переходу его электрона на более высокую орбиту.

В настоящей работе возбуждение атомов инертного газа неона заполняющего лампы, осуществляется электронным ударом.

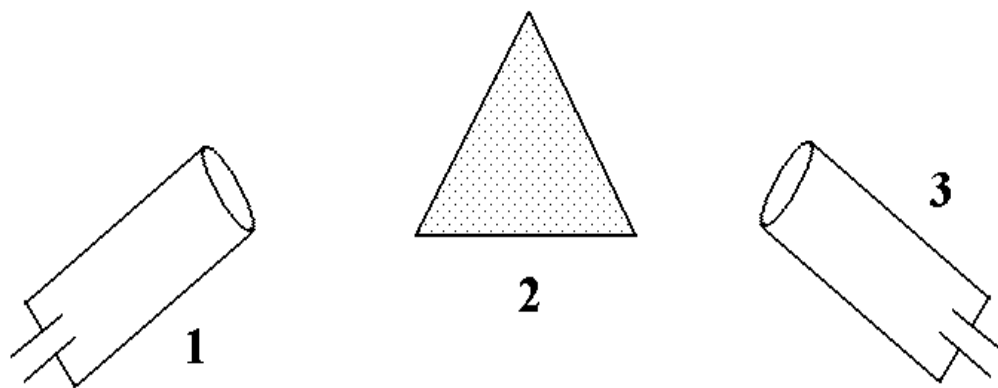


Рис. 1: Схема установки

### Приборы и методы измерений

В работе в качестве источника света известного спектрального состава используется неоновая лампа-баллон, заполненный неоном под давлением 10-20 мм рт. ст. Внутри баллона расположены два электрода на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. При включении лампы в сеть переменного тока электроды попеременно выполняют роль анода и катода. В неоновой лампе протекает самостоятельный газовый разряд. Электроны, вылетающие из катода, разгоняются электрическим полем на пути к аноду и, сталкиваясь с атомами неона, либо возбуждают их и заставляют тем самым светиться, либо (при большой энергии) ионизируют их, создавая свободные заряды, участвующие в переносе тока через лампу.

Видимый спектр неона имеет следующий состав:

№	Цвет спектральной линии	Длина волны, нм
1	Светло-зелёная	576,0
2	желтая	585,9
3	Оранжевая, одиночная	594,5
4	Красно-оранжевая из двух близких линий	614,5
5	Ярко-красная	640,2

В качестве спектрального прибора в настоящей работе используется спектроскоп, рабочим элементом которого является стеклянная призма.

Разложение призмой сложного света в спектр, т.е. отклонение призмой лучей различной длины волны на различные углы, происходит благодаря явлению дисперсии - зависимости показателя преломления материала призмы от длины волны света. Зависимость эта носит нелинейный характер и различна для различных сортов стекла. Таким образом, угол

отклонения призмой луча той или иной длины волны, а, следовательно, и положение этого луча в изображении спектра зависят сложным образом от длины волны. Зависимость эта не может быть выражена простой формулой, так что даже зная (измерив) угол, под которым распространяется луч света, мы, тем не менее, не можем узнать его длину волны. Поэтому каждый призмный спектральный прибор необходимо градуировать - установить зависимость угла или другой величины, которая используется для определения длины волны света, от длины волны. Зависимость эта устанавливается путем наблюдения с помощью градуируемого спектроскопа света с известным спектральным составом. Процесс градуировки заключается в установлении соответствия между известными длинами волн линий спектра и соответствующими показаниями прибора (количеством делений шкалы).

Имея градуировочную кривую зависимости длины волны от измеряемой величины, можно с её помощью определять значения длин волн неизвестных спектральных линий по показаниям измерительного прибора.

Спектроскоп состоит из следующих основных частей (см. рис.1):

1. Коллиматор - труба с одной стороны которой щель регулируемой ширины, а с другой - линза объектива. Щель располагается в главном фокусе линзы, поэтому лучи, выходящие из коллиматора, параллельны.

2. Стеклопризма, разлагающая в спектр попадающий на неё от коллиматора свет. Призма прикрыта колпачком, задерживающим лучи от посторонних источников света.

3. Оптическая труба, имеющая неподвижный объектив и подвижный окуляр. Проходя через объектив, лучи различной длины волны дают ряд разноцветных изображений щели, образующих спектр. Изображение спектра рассматривается через окуляр, в центре которого натянута вертикально паутинная нить. Оптическая труба при помощи микрометрического винта может поворачиваться относительно вертикальной оси прибора. На линейной шкале микрометрического винта и его головке нанесены деления. Совмещая вращением винта нить окуляра со спектральной линией, мы можем определить положение этой линии и выразить его в делениях шкалы микрометра.

### **Порядок выполнения работы**

1. Определить цену деления на головке микрометрического винта. Для этого необходимо определить число делений шкалы, на которое смещается

поступательно винт при одном полном обороте его головки.

2. Проверить совпадение нуля делений на головке винта с нулём шкалы винта. При необходимости ввести поправку.

3. Поместив неоновую лампу против щели коллиматора, получить изображение спектра в поле зрения объектива. Вращением головки винта микрометра совместить нить окуляра с крайней линией спектра.

4. Произвести отсчет по шкале микрометра и записать его в таблицу результатов.

5. Совместить нить со следующей яркой линией спектра, произвести отсчет и записать в таблицу. Пройти таким образом до конца спектра.

6. Повторить измерения для всех линий спектра не менее пяти раз.

7. Вычислить среднее значение делений шкалы для каждой линии и занести в таблицу.

8. Построить на миллиметровой бумаге градуировочную кривую спектроскопа.

9. Поместить вместо неоновой лампы лампу накаливания. Определить границы видимого спектра лампы накаливания.

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ

№	Цвет спектральной линии	Длина волны	Деления шкалы
1	Светло-зелёная	576,0	
2	желтая	585,9	
3	Оранжевая, одиночная	594,5	
4	Красно-оранжевая из двух близких линий	614,5	
5	Ярко-красная	640,2	

## Вопросы

1. Какие виды спектров испускания вы знаете? Какими телами излучается каждый вид спектра?

2. Что такое спектр поглощения?

3. Сформулируйте постулаты Бора.

4. Напишите формулу Бальмера и объясните физический смысл входящих в нее величин.

5. При каких переходах электронов в атоме излучается серия Бальмера спектра водорода?

6. Что такое спонтанные и вынужденные переходы электронов в атоме?

7. Какие механизмы возбуждения атомов вы знаете?

8. Почему положение светлых линий в спектре испускания совпадает с положением темных линий в спектре поглощения одного и того же вещества?

9. Чем вызвана необходимость градуировки призмных спектрометров?

### **Литература**

1. И. В. Савельев, Курс общей физики, т. 3, 1987, § 17.
2. Т. И. Трофимова, Курс физики, 1985, § 208-212.
3. Н. П. Калашников, М. А. Смондырев, т. 2, 2003, § 29.1.