

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СПЕКТРАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

Методические указания
к лабораторной работе № 6

Пенза 2015

УДК 530.145+535.32+535.338(075.8)

ББК 22.343я73

ИЗ9

Рекомендовано Редсоветом университета

Рецензент – доктор физико-математических наук,
профессор С.А. Степанов (ПГУАС)

ИЗ9 **Изучение** закономерностей в спектрах и определение постоянной Планка: методические указания к лабораторной работе № 6 / Н.А. Очкина, Т.С. Шмарова, З.А. Сидякина. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 12 с.

Приведена методика определения постоянной Планка с помощью спектров испускания и поглощения.

Методические указания подготовлены на кафедре физики и химии и предназначены для студентов, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство» при изучении дисциплины «Физика».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2015

© Очкина Н.А., Шмарова Т.С.,
Сидякина З.А., 2015

Цель работы: экспериментальное определение постоянной Планка с помощью спектров испускания и поглощения.

Приборы и принадлежности: спектроскоп, лампа накаливания, ртутная лампа, кювета с хромпиком.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Атом является наименьшей частицей химического элемента, определяющей его основные свойства. Опытами Э.Резерфорда была обоснована планетарная модель атома. В центре атома находится положительно заряженное ядро с зарядом $Z \cdot e$ (Z – число протонов в ядре, т.е. порядковый номер химического элемента периодической системы Менделеева; e – заряд протона, равный заряду электрона). Вокруг ядра движутся электроны в электрическом поле ядра.

Устойчивость такой системы атома обосновывается постулатами Бора.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в устойчивом состоянии атома электроны движутся по определенным стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии; стационарные орбиты электронов определяются по правилу квантования:

$$L = \frac{nh}{2\pi}, \quad (1)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число, определяющее энергетический уровень атома;

$L = m_e v r$ – момент импульса электрона;

здесь $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона;

v – скорость электрона;

r – радиус орбиты электрона.

Тогда

$$m_e v r = \frac{nh}{2\pi}. \quad (2)$$

На электрон, движущийся по орбите вокруг ядра, действует кулоновская сила:

$$F_K = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3)$$

Для атома водорода $Z = 1$. Тогда

$$F_K = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (2) и (4), можно определить:

а) радиус орбиты

$$r = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2; \quad (5)$$

б) скорость электрона

$$v = \frac{e^2}{2\pi\varepsilon_0 h n}; \quad (6)$$

в) энергию электрона

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}. \quad (7)$$

Энергетический уровень – энергия, которой обладает электрон атома в определенном стационарном состоянии.

Атом водорода имеет один электрон. Состояние атома с $n = 1$ называется основным состоянием. Энергия основного состояния $E_1 = -13,55$ эВ.

В основном состоянии атом способен только поглощать энергию.

При квантовых переходах атомы (молекулы) скачкообразно переходят из одного стационарного состояния в другое, т.е. с одного энергетического уровня на другой. Изменение состояния атомов (молекул) связано с энергетическими переходами электронов с одних стационарных орбит на другие. При этом излучаются или поглощаются электромагнитные волны различных частот.

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон с энергией

$$E = E_m - E_n, \quad (8)$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний (E_m и E_n – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения или поглощения).

Энергия излучается или поглощается отдельными порциями – квантами (фотонами), и энергия каждого кванта (фотона) связана с частотой ν излучаемых волн соотношением

$$E = h\nu, \quad (9)$$

где h – постоянная Планка. **Постоянная Планка** – одна из важнейших констант атомной физики, численно равная энергии одного кванта излучения при частоте излучения 1 Гц.

Учитывая это, уравнение (8) можно записать в виде

$$h\nu = E_m - E_n. \quad (10)$$

Совокупность электромагнитных волн всех частот, которые излучает и поглощает данный атом (молекула), составляет **спектр испускания или погло-**

щения данного вещества. Так как атом каждого вещества имеет свое внутреннее строение, поэтому каждый атом обладает индивидуальным, только ему присущим спектром. На этом основан спектральный анализ, открытый в 1859 г. Кирхгофом и Бунзеном.

Характеристика спектров испускания

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры можно разделить на три типа.

Непрерывные спектры. В непрерывном спектре представлены длины всех волн. В таком спектре нет разрывов, он состоит из участков разного цвета, переходящих один в другой.

Непрерывные (или сплошные) спектры дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии (лампа накаливания, расплавленная сталь и др.), а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры. Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма. Электромагнитные волны излучаются плазмой в основном при столкновении электронов с ионами.

Линейчатые спектры. Линейчатые спектры испускания состоят из отдельных спектральных линий, разделенных темными промежутками.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах).

Полосатые спектры. Полосатые спектры испускания состоят из отдельных групп линий, настолько близко расположенных, что они сливаются в полосы. Таким образом, полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками.

В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения атомарных и молекулярных спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

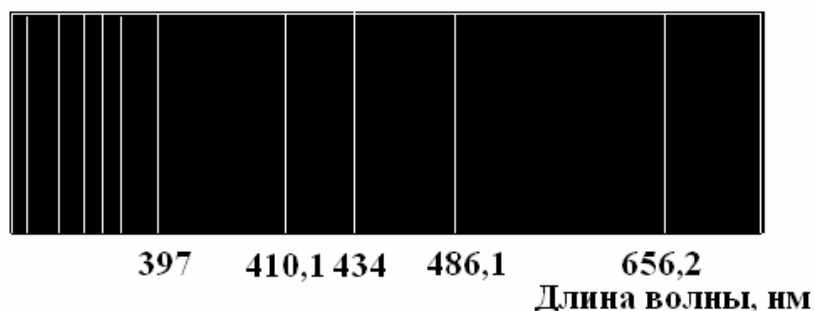
Характеристика спектров поглощения

Спектр поглощения можно наблюдать, если на пути излучения, идущего от источника, который дает сплошной спектр испускания, расположить вещество, поглощающее те или иные лучи различных длин волн.

В этом случае в поле зрения спектроскопа будут видны темные линии или полосы в тех местах сплошного спектра, которые соответствуют по-

глощению. Характер поглощения определяется природой и строением поглощающего вещества. Газ поглощает свет как раз тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии. На рис. 1 приведены спектры испускания и поглощения водорода.

Спектр испускания водорода



Спектр поглощения водорода

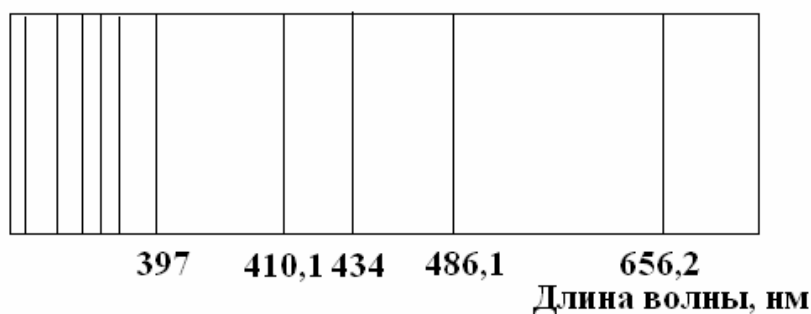


Рис. 1

Спектры поглощения, как и спектры испускания, делятся на сплошные, линейчатые и полосатые.

Сплошные спектры поглощения наблюдаются при поглощении веществом, находящимся в конденсированном состоянии.

Линейчатые спектры поглощения наблюдаются в случае, когда между источником сплошного спектра излучения и спектроскопом располагают поглощающее вещество в газообразном состоянии (атомарный газ).

Полосатые – при поглощении веществами, состоящими из молекул (растворы).

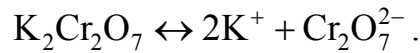
2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения полосатого спектра поглощения используют водный раствор хромпика, то есть двуххромовокислого калия $K_2Cr_2O_7$.

Согласно квантовой теории атомы, ионы и молекулы не только испускают энергию квантами, но также квантами и поглощают. Энергия кванта излучения и поглощения для определенного вещества (при определенной частоте ν) одинакова. Под действием света происходит химическое раз-

ложение молекул, вызвать которое может только квант света с энергией $h\nu_0$, достаточной (или большей) для разложения.

Рассмотрим водный раствор двуххромового калия $K_2Cr_2O_7$. В воде его молекулы диссоциируют на ионы следующим образом:



В процессе реакции в растворе появляются ионы $Cr_2O_7^{2-}$. Если осветить этот раствор белым (ахроматическим) светом, то под действием поглощенных хромпиком квантов света произойдет распад ионов $Cr_2O_7^{2-}$. При этом каждый ион «захватит» («поглотит») один квант облучающего излучения с энергией $h\nu$. В результате спектр будет иметь полосу поглощения, начало которой соответствует частоте ν_0 . Реакцию распада записывают следующим образом:



Энергия этой реакции для одного киломоля хромпика известна из опытов ($E = 2,228 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$).

Согласно закону Авогадро каждый киломоль вещества содержит одинаковое число атомов, равное числу Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$, поэтому для распада одного иона требуется энергия

$$E_1 = \frac{E}{N_A}. \quad (11)$$

Следовательно, энергия поглощенного светового кванта должна быть больше или равна энергии, необходимой для расщепления одного иона $Cr_2O_7^{2-}$, то есть $h\nu \geq E_1$. С помощью равенства

$$h\nu_0 = E_1 \quad (12)$$

определяют наименьшую частоту кванта, расщепляющего ион:

$$h\nu_0 = \frac{E}{N_A}, \quad (13)$$

где ν_0 – наименьшая частота в спектральной полосе поглощения (край полосы со стороны красного света).

Используя связь между частотой ν и длиной волны λ , выражение (13) записывают следующим образом:

$$h \frac{c}{\lambda_0} = \frac{E}{N_A}, \quad (14)$$

где c – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

Из равенства (14) определяют постоянную Планка

$$h = \frac{\lambda_0 E}{c N_A}. \quad (15)$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение длины волны λ_0 крайней линии (справа) в полосе поглощения при наблюдении спектра хромпика осуществляют в следующей последовательности:

1. Изучают устройство спектроскопа, который состоит из призмы Π и неподвижной коллиматорной K и подвижной зрительной $З$ труб, укрепленных на диске. На одном конце коллиматорной трубы находится щель S , освещаемая источником света (рис. 2), а на другом – собирающая линза L_1 . Лучи из коллиматора выходят параллельным пучком (так как длина коллиматора равна фокусному расстоянию линзы L_1). Дисперсия осуществляется в призме Π . Лучи каждого цвета выходят из призмы параллельными пучками и попадают в зрительную трубу $З$. В фокальной плоскости линзы L_2 образуется ряд изображений щели коллиматора, которые окрашены в различные цвета (сплошной спектр) и видны в окуляре O , когда источником света является обычная лампа накаливания. В поле зрения окуляра оказывается визирная линия (линия отсчета), которую устанавливают при измерениях на исследуемой спектральной линии путем вращения измерительного барабана с делениями. (Один оборот барабана соответствует перемещению визирной линии на пятьдесят делений.)

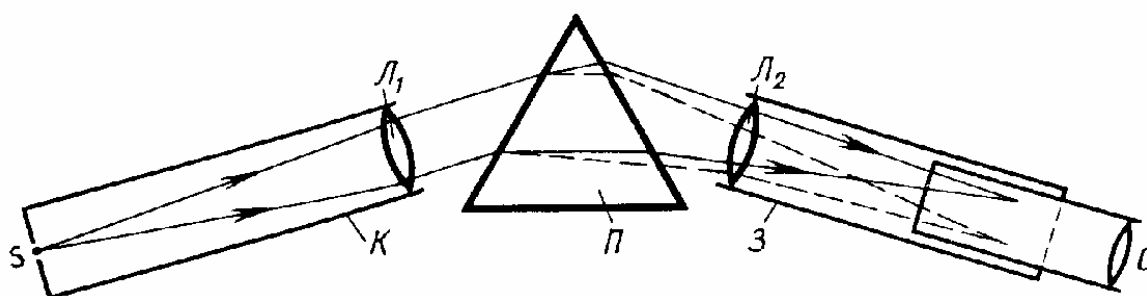


Рис. 2

2. Выполняют градуировку спектроскопа, пользуясь спектром излучения, а затем составляют и заполняют табл. 1 для построения градуировочной кривой.

Градуировку спектроскопа проводят в следующей последовательности:

- устанавливают перед щелью спектроскопа источник света, спектр которого является линейчатым (ртутная лампа, гелиевая трубка и т.п.) или сплошным (лампа накаливания). Пользуясь табл. 1, отмечают, какому числу n делений спектроскопа соответствует определенная линия (это выполняется для всех видимых линий), то есть получают для каждой линии значения n и откладывают их по оси абсцисс. Одновременно по таблице принимают значения длин волн для каждой линии и отмечают их по оси ординат λ . Полученные точки на пересечении соответствующих абсцисс и ординат соединяют плавной кривой;

• на большом листе миллиметровой бумаги по оси ординат откладывают значения длин волн λ в диапазоне видимой части сплошного или линейчатого спектра (400-750 нм), соблюдая при этом масштаб, а по оси абсцисс – значения n общего числа делений барабана спектрометра, перекрывающих весь диапазон сплошного или линейчатого спектров (400-750 нм), учитывая при этом, что один оборот барабана (микрометрического винта) соответствует $n = 50$, то есть пятидесяти делениям.

Т а б л и ц а 1

| Цвет участка спектра или линии | Длина волны, нм | Положение границ участков спектра или линий по спектрометру n , деление | |
|-------------------------------------|-----------------|---|-------|
| | | начало | конец |
| Для сплошного спектра | | | |
| Красный | 760-620 | | |
| Оранжевый | 620-590 | | |
| Желтый | 590-575 | | |
| Светло-зеленый | 575-550 | | |
| Зеленый | 550-510 | | |
| Голубой | 510-480 | | |
| Синий | 480-450 | | |
| Фиолетовый | 450-380 | | |
| Для линейчатого спектра паров ртути | | | |
| Темно-красная (средняя яркость) | 690,7 | | |
| Красная (средняя яркость) | 623,4 | | |
| Желтая 1 (яркая) | 579,1 | | |
| Желтая 2 (яркая) | 577,0 | | |
| Зеленая (очень яркая) | 546,1 | | |
| Фиолетовая 1 (очень яркая) | 435,8 | | |
| Фиолетовая 2 (слабая) | 407,8 | | |
| Фиолетовая 3 (средняя яркость) | 404,7 | | |

3. Устанавливают перед щелью спектрометра (спектрометра) кювету с хромпиком и наводят вертикальную нить этого спектрометра на край полосы поглощения (темной полосы). В этом положении фиксируют номер деления по спектрометру и с помощью градуировочной кривой определяют длину волны, соответствующую краю полосы поглощения. Опыт выполняют четыре-пять раз для получения среднего значения постоянной Планка $\langle h \rangle$, а также для вычисления погрешностей измерений.

4. Вычисляют по формуле (15) постоянную Планка для каждого измерения.

5. Определяют абсолютную погрешность каждого измерения, среднее значение абсолютной погрешности и относительную погрешность:

$$\Delta h_i = |\langle h \rangle - h_i|; \quad (16)$$

$$\langle \Delta h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_i}{N}; \quad (17)$$

$$\delta h = \frac{\langle \Delta h \rangle}{\langle h \rangle} \cdot 100\%. \quad (18)$$

6. Записывают результаты измерений и вычислений в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

| № опыта | n , деление | λ_i , нм | h_i , Дж·с | $\langle h \rangle$, Дж·с | Δh_i , Дж·с | $\langle \Delta h \rangle$, Дж·с | δh , % |
|---------|---------------|------------------|--------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

7. Записывают результат измерения в виде:

$$\langle h \rangle - \langle \Delta h \rangle \leq h_{\text{изм}} \leq \langle h \rangle + \langle \Delta h \rangle. \quad (19)$$

8. Проверяют принадлежность табличного значения постоянной Планка полученному интервалу (19).

Контрольные вопросы

1. Опишите планетарную модель атома.
2. Сформулируйте первый постулат Бора. Каково правило квантования орбиты электронов?
3. Какие значения могут принимать радиус орбиты, скорость и энергия электрона в атоме?
4. Что называется энергетическим уровнем?
5. Сформулируйте второй постулат Бора.
6. Чему равна энергия фотона?
7. В чем состоит физический смысл постоянной Планка? Чему она равна?
8. Охарактеризуйте спектры испускания. На какие виды они делятся? Что необходимо для наблюдения спектров испускания?
9. Охарактеризуйте спектры поглощения. На какие виды они делятся? Что необходимо для наблюдения спектров поглощения?
10. Опишите принцип действия и устройство спектроскопа.
11. В чем заключается градуировка спектроскопа? Какие спектры использовались для градуировки? Как, пользуясь градуировочной кривой спектроскопа, определить длину волны, соответствующую краю полосы поглощения?
12. Опишите порядок выполнения лабораторной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2014.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев: в 3 т. Т. 3. Оптика. Атомная физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: Наука, 2007.
3. Ландсберг, Г.С. Элементарный учебник физики [Текст] / Г.С. Ландсберг: в 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Физматлит, 2012.

Учебное издание

Очкина Наталья Александровна
Шмарова Татьяна Сергеевна
Сидякина Зоя Александровна

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В СПЕКТРАХ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА
Методические указания к лабораторной работе № 6

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.В. Кучина

Подписано в печать 15.01.15. Формат 60x84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 0,7 Уч.-изд. л. 0,75 Тираж 80.
Заказ № 36.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28