

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ**  
для студентов специальностей  
290300, 290600, 290700, 290800,  
291000, 291400, 291500

**Лабораторная работа № 61**

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ИЗМЕРЕНИЕ  
ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Казань  
2016

Составители: Л. И. Маклаков, В. В. Алексеев

УДК 539.475

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов специальностей 290300, 290600, 290700, 290800, 291000, 291400, 291500  
Часть 3. Строение атома. Лабораторная работа №61. "Спектральные методы и измерение длин волн спектральных линий". / Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Составители Л. И. Маклаков, В. В. Алексеев. Казань, 2016 — 12 с.

В методических указаниях изложены вопросы, связанные со строением атома. Рассмотрены спектры атомов и их экспериментальное наблюдение. Описывается экспериментальная установка для изучения спектров.

Стр. 12, илл. 6, табл. 3

Рецензент: доцент кафедры физики твёрдого тела  
Казанского госуниверситета

Л. Д. Зарипова

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2016г.

**Свет** — это электромагнитные волны с длиной волны в вакууме от 400 до 750 нм. В шкале электромагнитных волн (табл. 1) видимый свет занимает небольшую область и граничит с одной стороны с ультрафиолетовой, а с другой — с инфракрасной областью.

Таблица 1

Частота, Гц	Диапазон волн	Длина волн, м
$10^3 — 10^{12}$	Радиоволны	$3 \cdot 10^5 — 3 \cdot 10^{-4}$
$10^{12} — 10^{14}$	Инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-4} — 7,5 \cdot 10^{-7}$
$4 \cdot 10^{14} — 7,5 \cdot 10^{14}$	Видимый свет	$7,5 \cdot 10^{-7} — 4 \cdot 10^{-7}$
$7,5 \cdot 10^{14} — 10^{17}$	Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} — 10^{-9}$
$10^{17} — 10^{20}$	Рентгеновское излучение	$10^{-9} — 10^{-12}$
$10^{20} — 10^{23}$	$\gamma$ -излучение	$10^{-12} — 10^{-15}$

Какова природа возникновения световых волн? Они рождаются внутри атома и связаны с изменением структуры электронной оболочки при подведении энергии к атому, что происходит, например, при сильном нагреве вещества. Механизм излучения света был раскрыт при изучении спектров излучения света водородом, простейшим по структуре химическим элементом.

## ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ

Свет излучается нагретыми телами: солнцем, разогретой спиралью электрической лампочки, горящей свечой и т.д. Если разложить свет, излучаемый, например, солнцем в спектр, то есть пропустить его через призму, то получится сплошная радуга. Это означает, что солнце испускает все длины волн светового диапазона. Другая картина получается, если разложить в спектр излучение, получаемое при свечении разряда в трубке, наполненной газообразным водородом. Оказалось, что в этом случае спектр получается не сплошной, а линейчатый, то есть в приборе видны отдельные светящиеся линии (рис. 1). Иначе говоря, спектр водорода состоит из электромагнитных волн только с некоторыми вполне определёнными длинами волн: 656; 486, 434 нм и т.д.

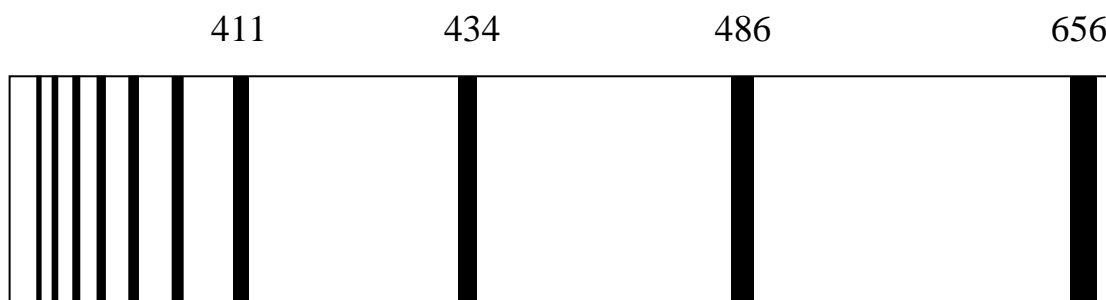


Рис. 1

Линейчатый характер атомных спектров объясняется с помощью постулатов Бора. Вспомним, что в атоме водорода электрон вращается по некоторой круговой орбите. Такая модель называется «планетарной», поскольку аналогично вращаются планеты вокруг Солнца. В принципе, радиусы орбит планет могут быть любыми. Однако в атоме, как мы увидим, это не так. При комнатной температуре, то есть в обычном (невозбужденном) состоянии, электрон в атоме водорода вращается по некоторой орбите и обладает вполне определённой энергией. Если водород разогреть (например, пропустить через него электрический ток), то электрон в атоме приобретает дополнительную кинетическую энергию и получает возможность двигаться по другим, более удалённым от ядра орбитам. В этом случае говорят, что атом находится в возбуждённом состоянии. В отличие от планет, орбиты электронов не могут быть любыми, и поведение их определяется первым постулатом Бора.

**Первый постулат.** Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, в действительности осуществляются только некоторые орбиты с вполне определёнными энергиями  $W_1, W_2, W_3$  и т.д. Находясь на этих орбитах, электрон не излучает энергию. В этом случае говорят, что электроны и атом в целом находятся в стационарном состоянии.

**Второй постулат.** Как следует из первого постулата, энергии атомов не являются непрерывными величинами, они могут меняться только скачком. Такие величины называются *дискретными*. Электрон, совершая круговое движение вокруг ядра, обладает орбитальным моментом импульса  $L = mvr$ . Здесь  $m$  и  $v$  — масса и скорость электрона,  $r$  — радиус орбиты. Бор постулировал, что момент импульса также может принимать только дискретные значения. Математическая формулировка второго постулата Бора гласит: электроны, двигаясь вокруг ядра, обладают орбитальным моментом импульса, который определяется по формуле:  $L = l \cdot \frac{h}{2\pi}$ , где  $l$  — целое число, которое называется *орбитальным квантовым числом*,  $h$  — *постоянная Планка*.

Строгая теория атома уточнила эту формулу, и она записывается в виде

$$L_l = \sqrt{l(l+1)} \cdot \frac{h}{2\pi}. \quad (1)$$

**Третий постулат.** В стационарных состояниях атом обладает определёнными энергиями. Испускание света атомом происходит, когда электрон переходит из одного стационарного состояния с энергией  $W_m$  в другое

с меньшей энергией  $W_n$ . При этом испускается электромагнитная волна, энергия которой определяется соотношением

$$h\nu = W_m - W_n. \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота излучаемого света,  $h\nu$  — величина, введённая Планком, которая называется **квантом энергии**. (Понятие кванта энергии лежит в основе всей атомной физики.) Отсюда следует, что частота излучённого фотона равна

$$\nu = \frac{W_m - W_n}{h}. \quad (3)$$

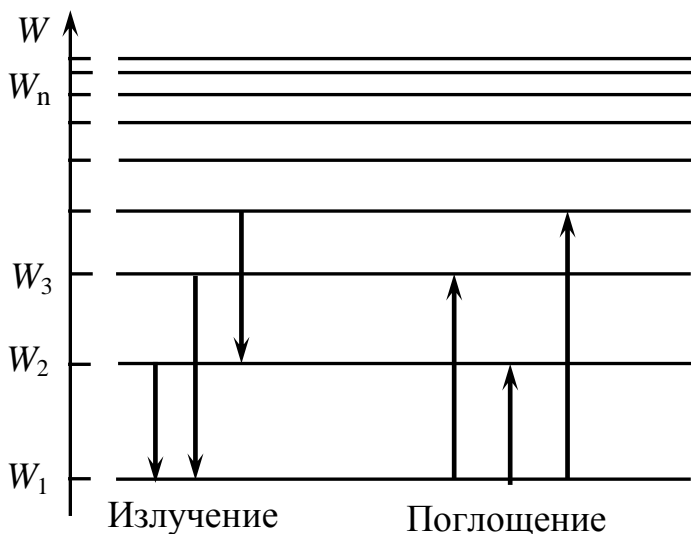


Рис. 2

Если происходит переход из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией, то наблюдается поглощение света такой же энергии.

Отметим, что раньше говорилось о длинах волн  $\lambda$  линейчатого спектра, а затем перешли на частоты  $\nu$ . Однако спектральные линии можно характеризовать и теми и другими величинами, поскольку длина волны в вакууме связана с частотой соотношением:  $\lambda = c/\nu$ ,

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Возникновение спектральных линий излучения и поглощения света атомом, которое описывается соотношением (3), можно проиллюстрировать на рис. 2. Отложим по вертикальной оси значения энергии и каждому значению энергии атома  $W_1, W_2, \dots, W_n$  сопоставим горизонтальную прямую, называемую **энергетическим уровнем**. Стрелками изображаются переходы электронов из одних энергетических состояний в другие. При переходе с верхних энергетических состояний на нижние состояния происходит излучение, т.е. атом выбрасывает излишнюю энергию в виде светового кванта. При обратном переходе происходит поглощение электромагнитной волны атомом. Из соотношения (3) и рис. 2 видно, что излучение (или поглощение) электромагнитных волн должно происходить только на определённых частотах (длинах волн). Этим и объясняется природа линейчатых спектров. Линейчатые спектры обусловлены электромагнитными волнами с длиной волны 100 — 1000 нм, т.е. занимают ультрафиолетовую, видимую и частично инфракрасную область шкалы электромагнитных волн.

### СПЕКТРЫ И ПРАВИЛА ОТБОРА

Изучая соотношение частот разных спектральных линий в видимой области спектра атома водорода, Бальмер вывел эмпирическую формулу, которая описала наблюдаемые частоты.

Позднее другими исследователями были получены аналогичные соотношения для частот спектральных линий, входящих в другие области спектра водорода (ультрафиолетовую и инфракрасную). С учётом всех этих данных обобщённая формула Бальмера имеет вид:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4)$$

где  $\nu$  — частота, испускаемого света;  $R = 3,28 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  — постоянная Ридберга,  $m = 1, 2, 3$  — целое число, характеризующее серию линий,  $n = m + 1, m + 2, \dots$  — целое число, характеризующее конкретную линию серии. Таким образом,

а) при  $m = 1$  и  $n = 2, 3, 4 \dots$  наблюдается серия линий в ультрафиолетовой области (серия Лаймана),

б) при  $m = 2$  и  $n = 3, 4, 5, \dots$  — серия в видимой области (серия Бальмера),

в) при  $m = 3$  и  $n = 4, 5, 6, \dots$  — серии в инфракрасной области (серия Пашена).

Физический смысл формулы Бальмера выясняется с помощью третьего постулата Бора. Сравнивая формулы (3) и (4), получаем выражение для энергии атома

$$W_n = \frac{Rh}{n^2}. \quad (5)$$

Видно, что энергия атома определяется целым числом  $n$ , которое в атомной физике называется *главным квантовым числом*

Таким образом, состояние атома определяется главным квантовым числом  $n$  и орбитальным квантовым числом  $l$ . (Отметим, что в атомной физике существуют и другие квантовые числа, связанные с более тонкими аспектами строения атома). Теория показывает, что  $n$  может принимать значения  $1, 2, 3, \dots, \infty$ , а  $l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ , то есть число значений  $l$  ограничивается главным квантовым числом  $n$ .

В атомной физике применяются условные обозначения состояний электрона с различными значениями орбитального квантового числа. Электрон, находящийся в состоянии с  $l = 0$ , называют  $s$ -электроном (соответствующее состояние  $s$ -состоянием), с  $l = 1$  —  $p$ -электроном, с  $l = 2$  —  $d$ -электроном, с  $l = 3$  —  $f$ - электроном, затем идут  $g, h$  и т.д. уже по алфавиту. Значение главного квантового числа указывается перед условным обозначением квантового числа  $l$ . Поэтому, например, электрон в состоянии с  $n = 1$  и  $l = 0$  обозначается символом  $1s$ , а с  $n = 2$  и  $l = 1$  —  $2p$ .

Линии в спектре описываются переходами между различными состояниями. Однако не все переходы возможны. В квантовой механике вводятся **правила отбора**, то есть правила, которые отбирают из всех возможных переходов только переходы, осуществляющиеся в природе. Именно эти переходы и проявляются в линейчатых спектрах атомов, остальные переходы запрещены. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено одно из основных правил отбора: **разрешены только те переходы, при которых изменение орбитального квантового числа удовлетворяет условию**

$$\Delta l = \pm 1. \quad (6)$$

На рис. 3 приведена схема переходов между энергетическими уровнями для атома водорода с учётом этого правила, которые описывают спектральные линии атома водорода. Серии Лаймана соответствуют переходы  $np \rightarrow 1s$  ( $n = 2, 3, \dots$ ), серии Бальмера —  $np \rightarrow 2s, ns \rightarrow 2p, nd \rightarrow 2p$  ( $n = 3, 4, \dots$ ) и т.д. Переходы типа  $ns \rightarrow 1s$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) (на рис. 3 изображены пунктирными линиями) запрещены, так как в этом случае  $\Delta l = 0$ . При изучении этой схемы обратите внимание на то, что уровням с одинаковыми  $n$ , но с разными  $l$ , соответствует

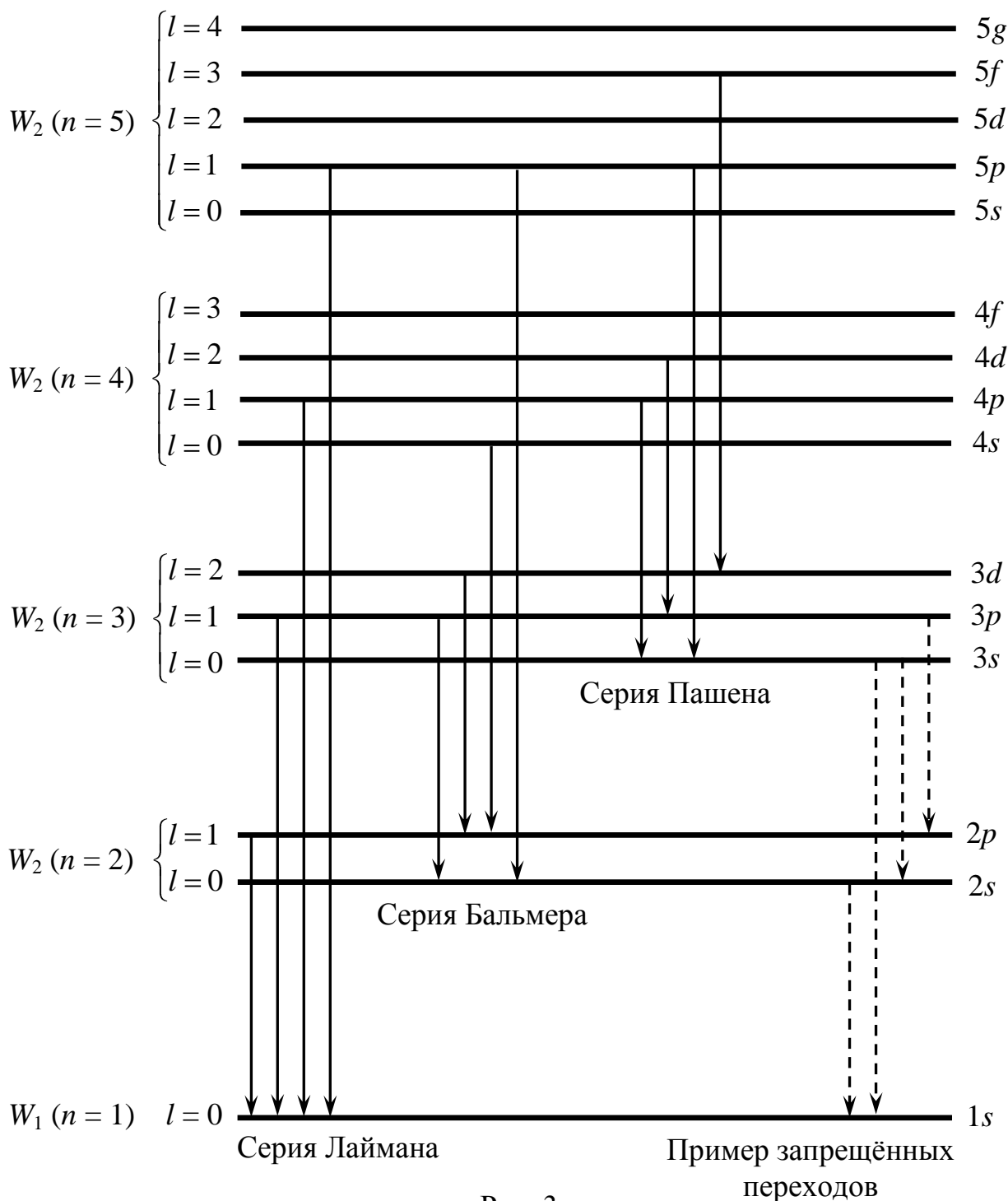


Рис. 3

одна и та же энергия. Сопоставьте рисунок и правила, которые написаны выше, для разных серий. Уясните с помощью рисунка правило отбора (6).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Рассмотрим принцип получения оптических спектров. Для наблюдения спектров в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазоне длин электромагнитных волн используются приборы, называемые

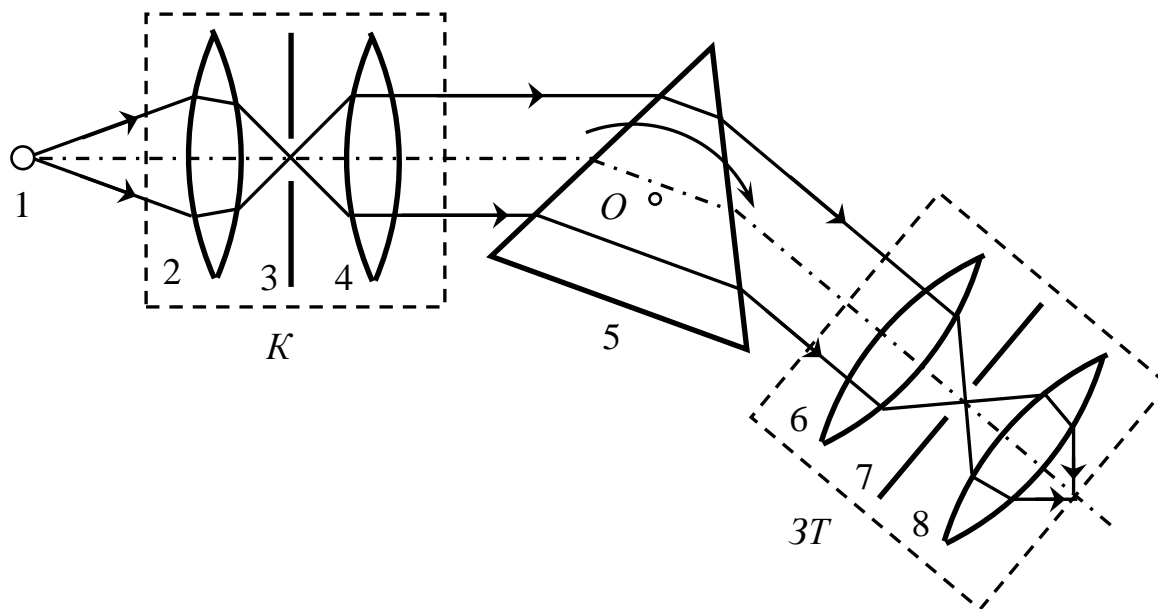


Рис. 4

**монохроматорами.** Принципиальная схема монохроматора, т.е. схема, где приведены лишь основные узлы прибора и опущены технические детали, усложняющие понимание и не имеющие существенного значения, приведена на рис. 4. Схема состоит из трёх основных частей: коллиматора  $K$ , служащего для получения параллельного пучка света, призмы 5 или дифракционной решётки, разлагающей свет в спектр, и зрительной трубы  $ЗТ$  для наблюдения спектра. Рассмотрим принцип

действия такого монохроматора. Свет от источника 1 проходит через конденсор 2 и освещает щель 3, которая расположена в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора. Из объектива 4 коллиматора параллельный пучок света падает на призму 5. Вследствие того, что световые волны различных длин волн по-разному преломляются в призме, происходит разложение света на монохроматические составляющие. Поэтому из призмы выходят параллельные пучки света, соответствующие волнам определённой длины  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и т.д. Эти параллельные световые пучки в виде спектра собираются в фокальной плоскости, в которой находится щель 7 объектива 6 зрительной трубы. Если поворачивать призму 5 вокруг оси  $O$ , то через щель 7 будут последовательно проходить различные участки спектра. Это наблюдается глазом через окуляр 8.



В современных приборах спектр регистрируется непосредственно в виде записи на бумаге, либо выводится на экран монитора.

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Теория линейчатых спектров, изложенная выше, связывалась с рассмотрением поведения лишь одного электрона в атоме водорода. Но все другие химические элементы имеют сложную электронную оболочку. Рассмотренные теоретические положения в целом применимы к любым атомам. Дело в том, что за проявление спектра в видимой и ультрафиолетовой области отвечают только внешние (валентные) электроны, которые ведут себя аналогично атому водорода: проявляется дискретность уровней энергии, применимы постулаты Бора и т.д. Однако энергии электронов, совершающих переходы, во многом зависят от взаимодействия с другими электронами данного атома. Поэтому энергетические уровни у атомов разной природы разные. Отсюда следует, что и спектры должны быть разными. **Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры других элементов.** Кроме того, экспериментально найдено, что длины волн линейчатого спектра какого-либо вещества зависят только от свойств атомов этого вещества и не зависят от способа возбуждения свечения атомов. На этом и основан спектральный анализ — метод определения химического состава вещества по его спектру. В настоящее время изучены спектры всех атомов и составлены таблицы их частот. Всё это позволяет расшифровать спектр любого вещества и установить, из каких элементов состоит оно. Отметим, что с помощью спектрального анализа были открыты новые химические элементы: рубидий, цезий, гелий.

По спектрам часто удаётся определить количество изучаемого химического элемента в данной массе вещества. Это основывается на том факте, что интенсивность той или иной спектральной линии излучения  $I_\lambda$  зависит от концентрации  $c$  интересующего соединения ( $\ln I_\lambda \sim c$ ). Атомная спектроскопия, позволяющая устанавливать наличие и количество какого-либо элемента в веществе, широко применяется в металлургии, машиностроении, геологии, атомной индустрии. Метод обладает высокой чувствительностью и способен определять примеси с концентрацией  $10^{-5}$  —  $10^{-6}\%$ . Атомная спектроскопия применяется в астрофизике для определения состава космических объектов.

Целью данной работы является знакомство с оптическими спектрами, методами получения спектров, градуировки монохроматора и измерения длин волн исследуемого источника света.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Для получения спектров излучения в данной работе используется установка, состоящая из источника излучения в виде ртутной и исследуемой ламп и монохроматора, принципиальная схема которого изображена на рис. 4. Для визуального наблюдения участков спектра через окуляр призма

монохроматора поворачивается с помощью барабана. Чтобы с помощью монохроматора можно было измерять длины волн спектральных линий, его нужно градуировать, т.е. установить, какому делению барабана какая длина волны соответствует. Для градуировки прибора в данной работе используется излучение ртутной лампы, длины волн спектральных линий которых известны (см. табл. 2 или 3), и в виде графика строится зависимость длина волны — деление барабана. Поэтому графика определяются длины волн спектральных линий исследуемой лампы, установив деления барабана соответствующие им.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ №52

1. Включите прибор в сеть.
2. Переверните тумблер «РТ. Л.» в верхнее положение. Он находится на деревянной доске, укрепленной на станине монохроматора, под окуляром. Если при этом лампа не загорается, то нажмите кнопку, расположенную рядом с тумблером. Через 3 — 5 минут горение лампы входит в номинальный режим.
3. Вращая барабан, поставьте его в положение с нулевым отсчётом на шкале (крайнее левое положение). Медленно поворачивая барабан против часовой стрелки, подводите слева изображения изучаемых спектральных линий к непрозрачной рамке, расположенной в средней части поля зрения. Показания с барабана снимаются в тот момент, когда изучаемая спектральная линия входит в рамку слева и становится невидимой. При дальнейшем повороте барабана линия вновь появляется. Отсчёт делений барабана производится так: деления на неподвижной части дают целые значения, а на подвижной части — сотые доли (рис. 5). На рис. 5 стоит отсчёт 3,69.
4. Занесите результаты в табл. 2.
5. Отключите ртутную лампу тумблером «РТ. Л.».
6. Включите исследуемую лампу тумблером, находящимся на деревянной доске слева.
7. Снимите показания барабана для любых двух спектральных линий красного и двух линий жёлтого цвета так, как описано в пункте 3. Данные также занесите в табл. 2.
8. Тумблером отключите исследуемую лампу.

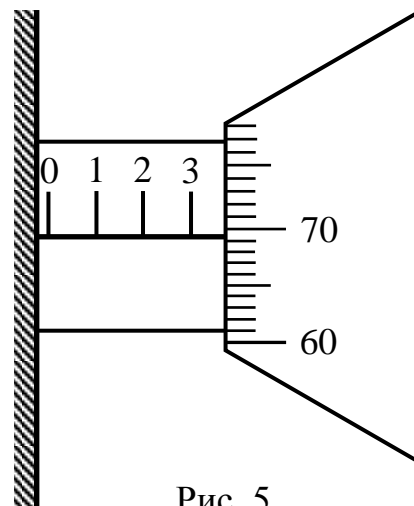


Рис. 5

9. Постройте градуировочный график в координатах: длина волны (ось ординат)

Таблица 2

Цвет	Показание отсчётного барабана	Длина волны, нм
	Ртутная лампа	
Красный	0,03	704
Красный	0,18	663
Красный	0,41	623
Красный	0,48	612
Красный	0,53	607
Жёлтый		579
Жёлтый		577
Зелёный		546
	Исследуемая лампа	

и деления барабана (ось абсцисс) по спектру ртутной лампы. (Примечание. Поскольку интенсивность спектральных линий красного цвета ртути крайне мала, то наблюдать их с помощью данного прибора невозможно. Поэтому деления, соответствующие им, приведены в табл. 2).

10. Из графика определите длины волн спектральных линий исследуемой лампы, соответствующие показаниям барабана для измеренных линий.

### ПОРЯДОК РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ №40

1. Включите установку в сеть.
2. Включите тумблер «РТ. Л.», расположенный на задней стенке кожуха, внутри которого находятся ртутная и исследуемая лампы. Если при этом лампа не загорается, то нажмите кнопку, расположенную между тумблерами. Через 3 — 5 минут горение лампы входит в номинальный режим.
3. Вращая барабан против часовой стрелки, поставьте его в положение с нулевым отсчётом на шкале. Затем, вращая барабан по часовой стрелке, поставьте его на деление 13,0. Далее, медленно поворачивая барабан в ту же сторону, подводите изображения изучаемых спектральных линий к щели, расположенной в средней части поля зрения. Показания с барабана снимаются в тот момент, когда

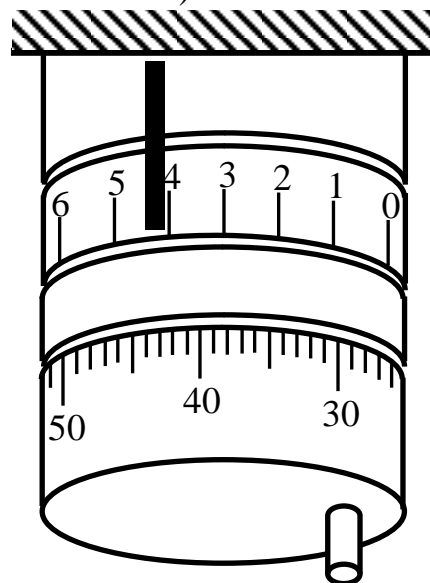


Рис. 6

изучаемая спектральная линия находится в щели. Отсчёт делений барабана производится по левому краю латунной планки (рис. 6). На этом рисунке стоит отсчёт 4,44.

4. Занесите результаты в табл. 3.
5. Отключите ртутную лампу тумблером «РТ. Л.».
6. Включите исследуемую лампу тумблером «И. Л.», который расположен над тумблером ртутной лампы на задней стенке кожуха.
7. Снимите показания барабана для любых двух спектральных линий красного и двух линий жёлтого цвета так, как описано в пункте 3. Данные занесите также в табл. 3.
8. Отключите исследуемую лампу.
9. Постройте градуировочный график в координатах: длина волны (ось ординат) и деления барабана (ось абсцисс) по спектру ртутной лампы. (Примечание. Поскольку интенсивность спектральных линий красного цвета ртути крайне мала, то увидеть их с помощью данного прибора невозможно. Поэтому деления, соответствующие им, приведены в табл. 3).
10. Из графика определите длины волн спектральных линий исследуемой лампы, соответствующие показаниям барабана.

Таблица 3

Цвет	Показание отсчётного барабана	Длина волны, нм
	Ртутная лампа	
Красный	23,8	704
Красный	20,2	663
Красный	17,8	623
Красный	17,3	612
Красный	17,1	607
Жёлтый		579
Жёлтый		577
Зелёный		546
	Исследуемая лампа	

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Шкала электромагнитных волн и место, которое занимают в ней световые волны.
2. Постулаты Бора.

3. Что такое линейчатый спектр? Как он объясняется с точки зрения постулатов Бора?
4. Каковы правила отбора переходов в атоме?
5. Опишите принципиальную схему монохроматора и принцип его действия.
6. Какова цель при выполнении данной задачи?