

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СпбГУТ)

В. М. Деткова, О. А. Долматова

**ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ АТОМОВ ГАЗОВ
ИНЕРТНОЙ ГРУППЫ С ПОМОЩЬЮ
УЧЕБНОГО ПРИЗМЕННОГО СПЕКТРО-
СКОПА**

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ**

Спб ГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Цель работы

Определение длин волн видимой части спектров атомов инертных газов, измерение постоянной экранирования и эффективного заряда ядра для неона и гелия.

Состав оборудования

Комплект учебно-лабораторного оборудования «Установка для изучения спектра атома водорода и атомов других газов (инертная группа) с помощью учебного призменного спектроскопа» включает следующие элементы (рис. 1–3):

1. основание,
2. подвижная рама,
3. призменный спектроскоп,
4. видеокамера с адаптером,
5. зрительная труба,
6. рукоятка вращения зрительной трубы,
7. осветитель для подсветки шкалы,
8. крышка спектроскопа,
9. щель с регулировкой ширины,
10. коллиматор,
11. спектральная лампа,
12. блок питания для спектральных трубок с защитным экраном,
13. окуляры,
14. винты для фиксации осветителя,
15. ограничители движения,
16. треугольная призма,
17. винт регулировки ширины щели,
18. подвижная пластина,
19. шторка.

Лабораторный стенд, изображенный на рис. 1, представляет собой составную конструкцию с общим основанием (1), на котором закреплены два основных элемента: призменный спектроскоп (3) на подвижной раме (2) и блок питания (12) для спектральных ламп (11).

Спектроскоп (3) используется для наблюдения непрерывного или дискретного спектра излучения светящихся тел. Он оснащен зрительной трубой (5), коллиматором (10) и трубой с осветителем для линейной шкалы (7). Вид сверху с открытой крышкой изображен на рис. 2.

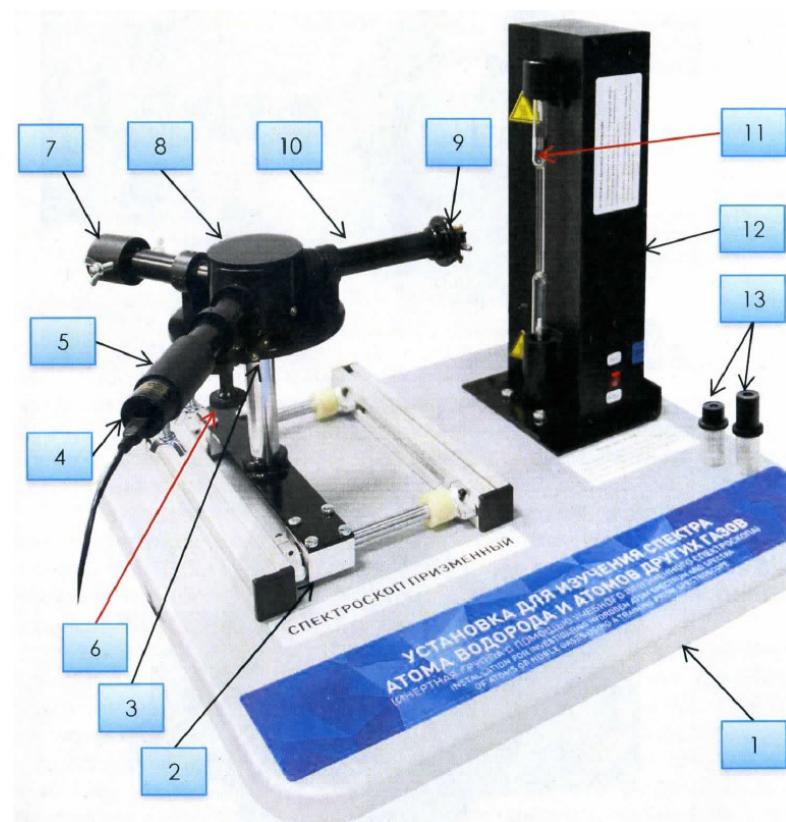


Рис. 1. Внешний вид установки.

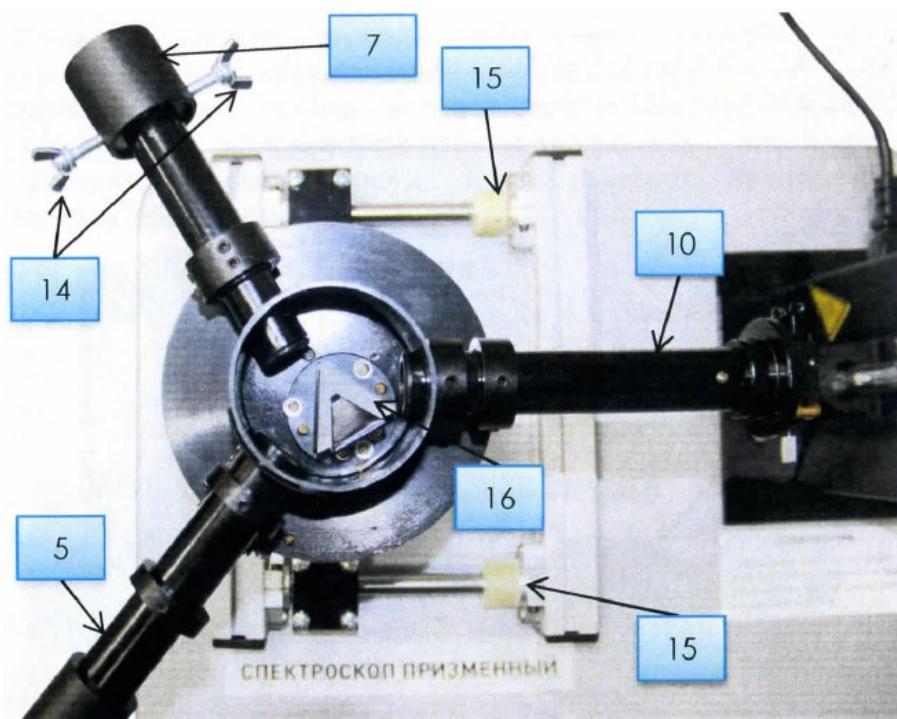


Рис. 2. Призменный спектроскоп, вид сверху.

Зрительная труба (5) имеет рукоятку для ее передвижения относительно треугольной призмы (16), находящейся под крышкой корпуса (8). На конце зрительной трубы возможно снятие и установка двух различных окуляров (13). Осветитель имеет винты (14) для фиксации корпуса на конце трубы со шкалой. Коллиматорная труба (рис. 3) с винтом (17) и шторкой (19) позволяют настроить резкость и положение спектральных полос в зрительной трубе. Вращение винта перемещает подвижную пластину (18) относительно неподвижной, а также положение спектральных полос относительно линейной шкалы.

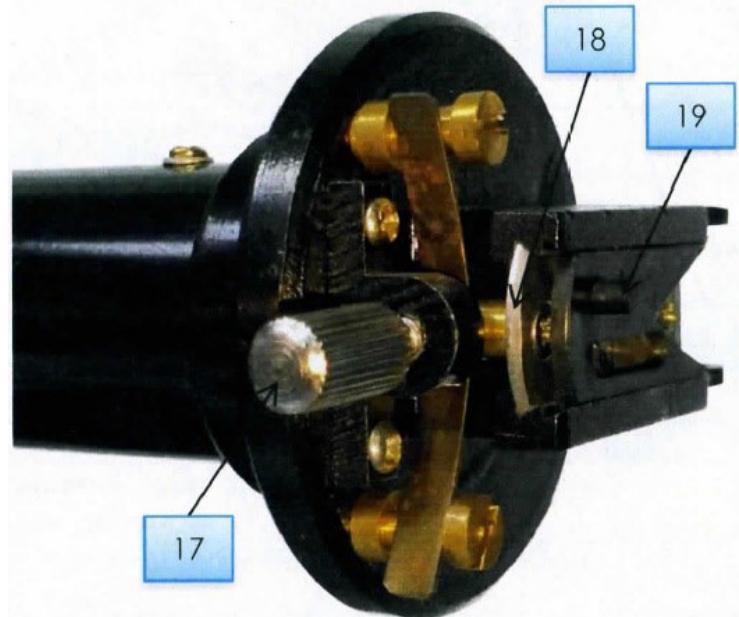


Рис. 3. Коллиматорная труба с регулировкой ширины щели.

Во избежание касания коллиматора (10) со спектральной лампой, на подвижной раме спектроскопа установлены ограничители (15), а также пластиковый защитный экран-кожух (рис.1), надевающийся на блок питания спектральных ламп.

Блок питания (12) предназначен для работы с разрядными лампами, наполненные различными газами.

При эксплуатации:

- не оставлять без присмотра включенный прибор;
- запрещено извлечение и/или установка спектральной трубы при включенном источнике питания;
- запрещено включение блока питания без надетого на него защитного экрана;
- во избежание разрушения трубы устанавливать аккуратно без усилий.

Во избежание преждевременного выхода из строя трубы не оставлять источник с лампой более 45 минут. Не рекомендуется дотрагиваться до нее

руками, извлекать и устанавливать трубку в тканевых перчатках или чистой салфеткой.

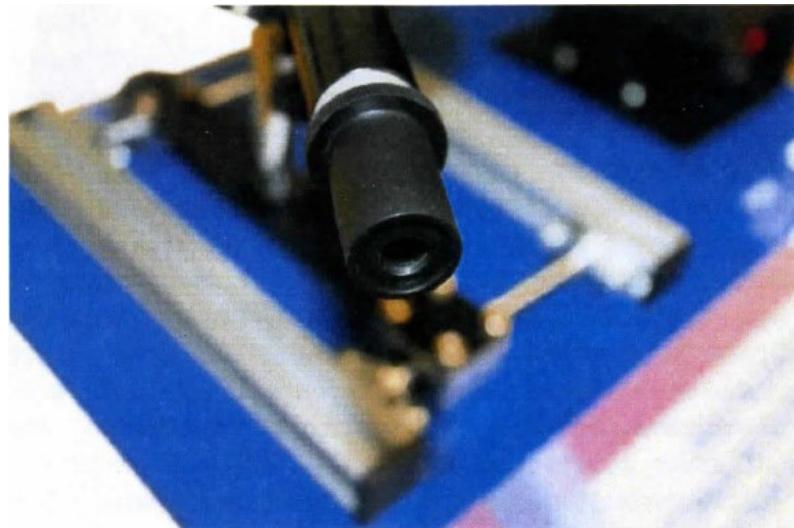


Рис. 4. Окуляр в зрительной трубе.

В комплекте предусмотрены два сменных окуляра ((13) на рис. 1) с различным увеличением ($F = 25$ мм и $F = 12,5$ мм). Окуляр, установленный на зрительную трубу, изображен на рис. 4. Наблюдая в окуляр за подсвеченной шкалой длин волн, поступательными движениями окуляра в зрительной трубе можно настраивать его положение, пока изображение не станет отчетливым (рис. 5).

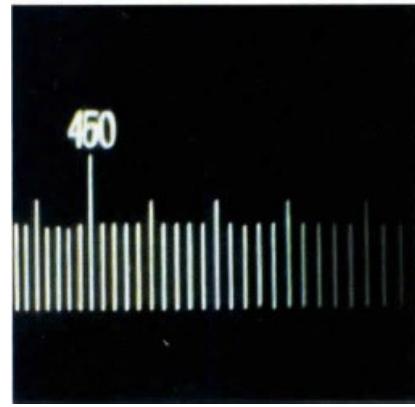


Рис. 5. Изображение шкалы длин волн в фокусе окуляра.

Перед началом работы внимательно ознакомьтесь с руководством по эксплуатации и методическими рекомендациями на комплект учебно-лабораторного оборудования. В ходе выполнения эксперимента необходимо:

- 1) переместить спектроскоп (3) по направляющим влево, на максимальное расстояние от блока питания (12);
- 2) снять пластиковый защитный экран-кожух с блока питания;
- 3) установить газоразрядную водородную (H_2) спектральную лампу в пружинные контакты блока питания;

ВНИМАНИЕ! Спектральная трубка устанавливается преподавателем или лаборантом только при выключенном блоке питания. Кнопка питания должна находиться в положении «Выкл».

4) включить блок питания (12), при этом соединительный шнур должен быть подсоединен к сетевому фильтру, кнопку включения перевести в положение «Вкл»;

5) включить подсветку шкалы, подсоединив адаптер питания осветителя к сетевому фильтру;

6) расположить щель коллиматора (9) вплотную к защитному экрану, передвинув спектроскоп по направляющим;

7) настроить окуляр на резкость и, вращая винт (6), постепенно зафиксировать все области спектра;

8) определить по шкале спектроскопа длину волны каждой спектральной линии излучения атома водорода. При необходимости, вращением винта (6), поворачивать зрительную трубу для визуализации всех линий спектра.

Теоретическое обоснование ***Многоэлектронные атомы***

Опыты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц привели к планетарной модели атома: в центре атома находится массивное положительно заряженное ядро очень малого радиуса, и вокруг ядра вращаются электроны. Такая модель была совершенно непонятной с точки зрения классической физики, т.к. противоречила либо закону сохранения энергии, либо законам классической электродинамики. Нильс Бор (учеником Резерфорда) предложил теорию, которая на основе планетарной модели атома объясняла спектр излучения простейшего атома – водорода. При этом, чтобы обеспечить устойчивость атома и совместить квантовую гипотезу с классической механикой Н. Бор был вынужден ввести несколько постулатов:

1 постулат: существуют стационарные круговые орбиты, по которым электрон может вращаться вокруг ядра сколь угодно долго, не теряя энергию;

2 постулат: момент количества движения электрона на стационарных орбитах может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка $\hbar = h/2\pi$:

$$L = m_e v r = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где v – скорость движения электрона, r – радиус орбиты, m_e – масса электрона, n – квантовое число, нумерующее стационарные орбиты;

3 постулат: при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую испускается (или поглощается) квант электромагнитного излучения с энергией, равной по модулю разности энергий электрона на начальной и конечной орбитах:

$$h\nu = |E_1 - E_2|. \quad (2)$$

Последний постулат позволяет определить возможные частоты излучения (или поглощения) и содержит требование выполнения закона сохранения энергии в процессах излучения.

Водородоподобными называют атомы или ионы с зарядом ядра $Z \cdot e$ ($Z = 1, 2, 3, \dots$, e – заряд электрона) и одним электроном, вращающимся по круговой орбите. К ним относятся, конечно, сам атом водорода ($Z = 1$), ион гелия ($Z = 2$), дважды ионизированный литий ($Z = 3$). Потенциальная энергия в таких системах есть энергия взаимодействия двух точечных зарядов и зависит только от расстояния между ядром и электроном:

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Стационарным орбитам отвечают дискретные отрицательные значения энергии

$$E_n = -\frac{m_e}{2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right)^2 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (3)$$

где m_e – масса электрона, n – квантовое число, нумерующее стационарные орбиты. Значения энергии электрона на стационарных орбитах (3) позволяют определить спектр излучения (или поглощения) водородоподобного атома. Согласно третьему постулату Бора, при переходе со стационарной орбиты с большим номером n на другую стационарную орбиту с номером $m < n$ испускается фотон, уносящий избыток энергии электрона. Энергия фотона по закону сохранения энергии равна разности энергий начального и конечного состояний электрона:

$$h\nu = E_1 - E_2 = \frac{m_e}{2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4)$$

Вследствие дискретности значений энергии электрона (3) частота испускаемого или поглощаемого света тоже принимает дискретные значения. Поэтому спектры испускания и поглощения атомарного водорода (или водородоподобных атомов) состоят из отдельных линий. Эти линии принято разделять на *спектральные серии* – группы спектральных линий, возникающих при переходе электрона на некоторый уровень со всех уровней с большей энергией.

Из (4) можно получить формулу для длин волн всех линий спектра водородоподобного атома:

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (5)$$

где $R' = \frac{R}{c} = 1,0973731 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга, а R определяется

выражением $R = \frac{m_e e^4}{8\hbar^3 \epsilon_0^2 c}$, где m_e , e – масса и заряд электрона,

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, Z – порядковый номер атома или заряд ядра, в случае водорода $Z = 1$, $\hbar = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

К несомненным достоинствам теории Бора следует отнести ее удивительную простоту и изящество. Но главное – полное (и с хорошей точностью) совпадение ее предсказаний с экспериментом. Небольшое расхождение с наблюдаемыми значениями частот, как позже оказалось, было связано с неучтенными (и неизвестными в то время) фактами, как наличие спина у электрона и т. д.

К сожалению, построить столь же простую теорию какого-нибудь многоэлектронного атома (хотя бы атома гелия) не удалось. Так что успех теории Бора оказался уникальным явлением. И причина здесь кроется во внутренней противоречивости теории: ведь аппарат классической механики применяется в ней одновременно с постулатами, которые противоречат основным ее принципам.

Противоречивость основных положений теории ставила в тупик исследователя: было не понятно, какие допущения, утверждения или принципы можно или нельзя использовать. Так что теория Бора оказалась переходным этапом от классической физики к новой квантовой физике, столь же последовательной и непротиворечивой. И на этом пути заслуга теории Бора несомненна: она продемонстрировала необходимость и возможность успешного применения квантовой гипотезы не только к электромагнитному излучению, но и другим материальным объектам.

С позиции современной физики, атом является физической системой, которая, заведомо, не может быть описана классической теорией, не учитывающей волновых свойств движущегося в атоме электрона. Только современная квантовая теория формулирует и решает проблему описания атомных систем, для рассмотрения которых следует обязательно использовать законы квантовой механики. При этом существенно, что для такого описания квантовая механика не требует каких-либо дополнительных предположений, условий и постулатов, аналогичных постулатам в теории Бора.

Квантовая механика постулирует существование некой специальной функции Ψ , с помощью которой могут быть установлены вероятные значения всех характеристик (координат, импульса, энергии и т. д.) электрона или иной микрочастицы, определяющих ее состояние.

Набор волновых функций, необходимых для определения вероятностных значений свойств частицы, находят, решая для нее основное уравнение квантовой механики – уравнение Шредингера:

$$\nabla^2\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\Psi = 0 \quad (6)$$

Атом водорода, состоящий из одного протона и одного электрона, является одной из немногих систем, для которых уравнение Шредингера может быть решено строго.

В принципе, уравнение (6) применяется и для описания любого многоэлектронного атома, но это уже будет довольно сложная математическая задача, для которой современная вычислительная техника позволяет вычислять с достаточно высокой степенью точности приближенные значения характеристик многоэлектронного атома.

При описании атомных систем широко используются и менее строгие, но более наглядные подходы, которые, будучи основаны на определенных допущениях, тем не менее приводят к результатам, удовлетворительно согласующимся с экспериментом. Среди таких подходов весьма результативной и простой является концепция водородного (одноэлектронного) приближения, которая позволяет построить электронные формулы (электронные конфигурации) атомов, отражающие распределение электронов по энергетическим уровням и подуровням.

В сложных атомах, содержащих более одного электрона, структура энергетического спектра намного богаче, чем в атоме водорода. Основные причины:

- кулоновское отталкивание между электронами;
- спин–орбитальное взаимодействие и релятивистские поправки;
- неразличимость электронов в атоме, что позволяет говорить только о полной энергии всех электронов атома, а не каждого электрона в отдельности. Все эти факторы влияют на последовательность возрастания энергии подуровней многоэлектронных атомов.

В данной лабораторной работе остановимся лишь на попытке учесть в первом приближении упомянутое выше межэлектронное отталкивание. Это взаимодействие является причиной двух эффектов, влияющих на распределение электронов в электронной оболочке.

Эффект экранирования ядра

В многоэлектронном атоме электроны внешнего электронного слоя испытывают отталкивание со стороны электронов более глубоких внутренних слоев, в результате чего энергия валентных электронов повышается, а их связь с ядром ослабевает. Внутренние электроны как бы экранируют ядро, вследствие чего последнее действует на валентные электроны так, как будто заряд его меньше действительного, равного порядковому номеру элемента. Так, для атома натрия ядро с зарядом +11 экранируют 10 электронов, находящихся на 1s-, 2s- и 2p- подуровнях. Если бы в атоме

натрия имел место только эффект экранирования, ядро притягивало валентный электрон так, как если бы его заряд был равен +1.

Эффект проникновения электрона к ядру

Вероятностная модель атома предполагает, что электрон может находиться на любом расстоянии от ядра, хотя и с разной вероятностью. Наиболее вероятное расстояние между ядром и электроном определяется положением главного максимума на кривой радиальной вероятности (рис. 6), однако любой электрон, в том числе и валентный, часть времени пребывает на меньших расстояниях от ядра, как бы погружаясь под внутренние слои электронов. При этом энергия электрона уменьшается, а притяжение его ядром усиливается, как если бы произошло увеличение заряда ядра. Каждый заряд ядра, соответственно которому ядро действует на внешние электроны, называется эффективным зарядом ядра ($Z_{\text{эфф}}$). Эффективный заряд ядра: $Z_{\text{эфф}} = Z - \sigma$, где Z – истинный заряд ядра, а σ – константа экранирования, значение которой определяется характером внутренних подуровней, заполненных электронами. Так, например, для натрия ($Z = 11$) максимальное значение поправки σ равно 10.

Учет экранирования приводит лишь к замене в формуле (5) истинного заряда ядра Z на эффективный заряд $Z_{\text{эфф}} = Z - \sigma$:

$$\frac{1}{\lambda} = (Z - \sigma)^2 \cdot R! \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) может быть использовано для оценки длин волн в спектре излучения многоэлектронных атомов.

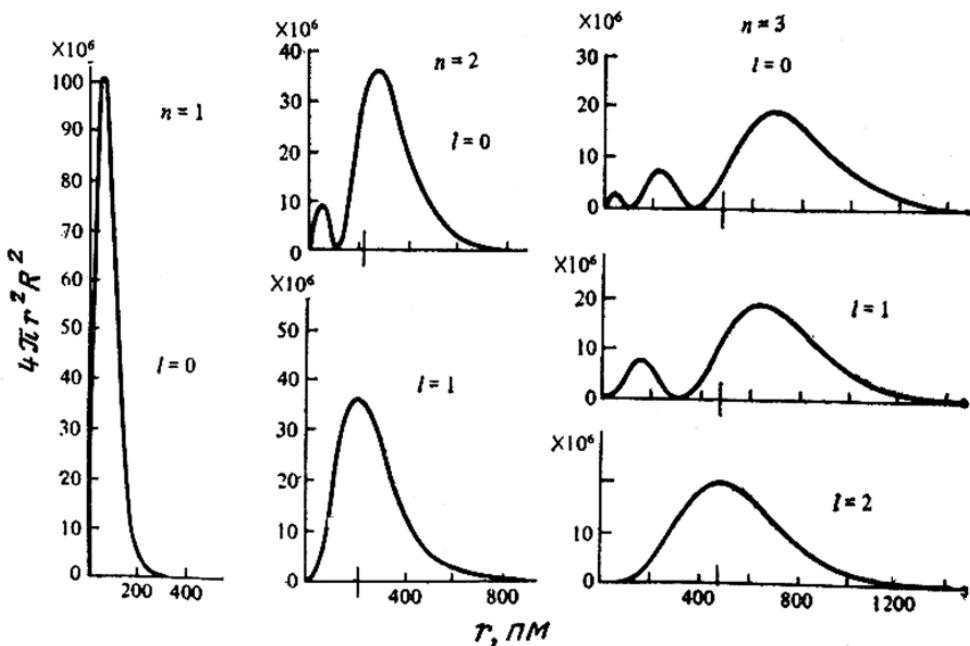


Рис. 6. Функции радиального распределения вероятности нахождения электрона в атоме водорода для $n = 1, 2, 3$.

Порядок выполнения работы

1. Изучение оптического спектра атомов неона с помощью призменного спектроскопа

Неоновая лампа является газоразрядным источником света, в котором оптическое излучение возникает при электрическом разряде. Большинство ламп наполняется не чистым неоном, а неоногелиевой смесью с небольшой добавкой аргона, чтобы понизить напряжение зажигания.

Поэтому свечение ламп имеет оранжево-красный цвет. Оно видно на далекие расстояния, невозможно спутать его с другими источниками света, даже туман ему не помеха. Широко используется в качестве световых индикаторов напряжения и тока в системах сигнализации, контрольно-измерительной аппаратуре, а также для освещения. Спектр излучения чистого одноатомного газа – неона представлен на рис. 7.

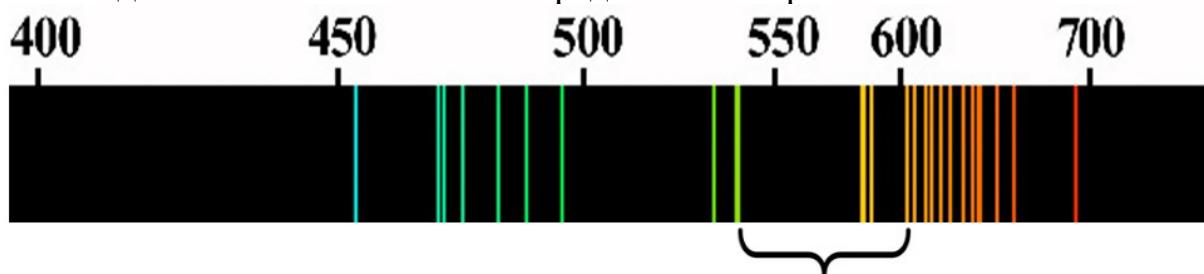


Рис. 7. Спектр излучения неона в видимой области.

Обратитесь к преподавателю или лаборанту для замены трубки с водородом на трубку с неоном, определите длины волн в спектре неона в диапазоне, выделенном фигурной скобкой на рис. 7. Полученные значения занесите в табл. 1.

Таблица 1

Спектральная линия неона	m	n	Длина волны спектроскопа λ_{Ne} , нм
Красно-оранжевая	2	3	
Желтый дублет	2	4	
Зеленая	2	5	

2. Изучение оптического спектра атомов гелия с помощью призменного спектроскопа

При пропускании тока через заполненную гелием трубку наблюдаются разряды различных цветов, зависящих главным образом от давления газа в трубке. Обычно видимый свет спектра гелия имеет жёлтую окраску. По мере уменьшения давления происходит смена цветов на розовый, оранжевый, жёлтый, ярко-жёлтый, жёлто-зелёный и зелёный. Это связано с присутствием в спектре гелия нескольких серий линий, расположенных в диапазоне между инфракрасной и ультрафиолетовой частями

спектра. Важнейшие линии гелия в видимой части спектра лежат между 706,62 нм и 447,14 нм (рис. 8).

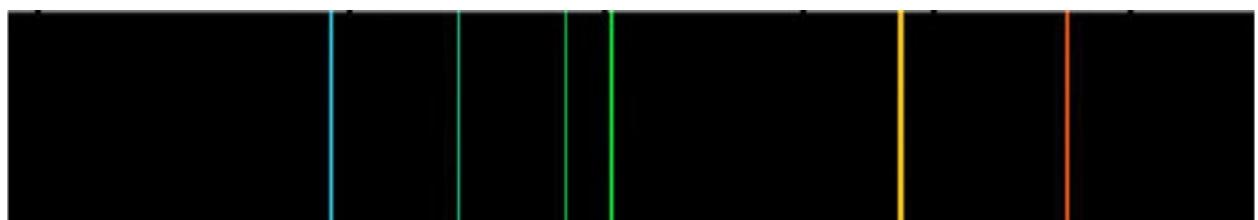


Рис. 8. Спектральные линии гелия в видимой области.

Диаграмма уровней энергий атома гелия и возможные переходы изображены на рис. 9.

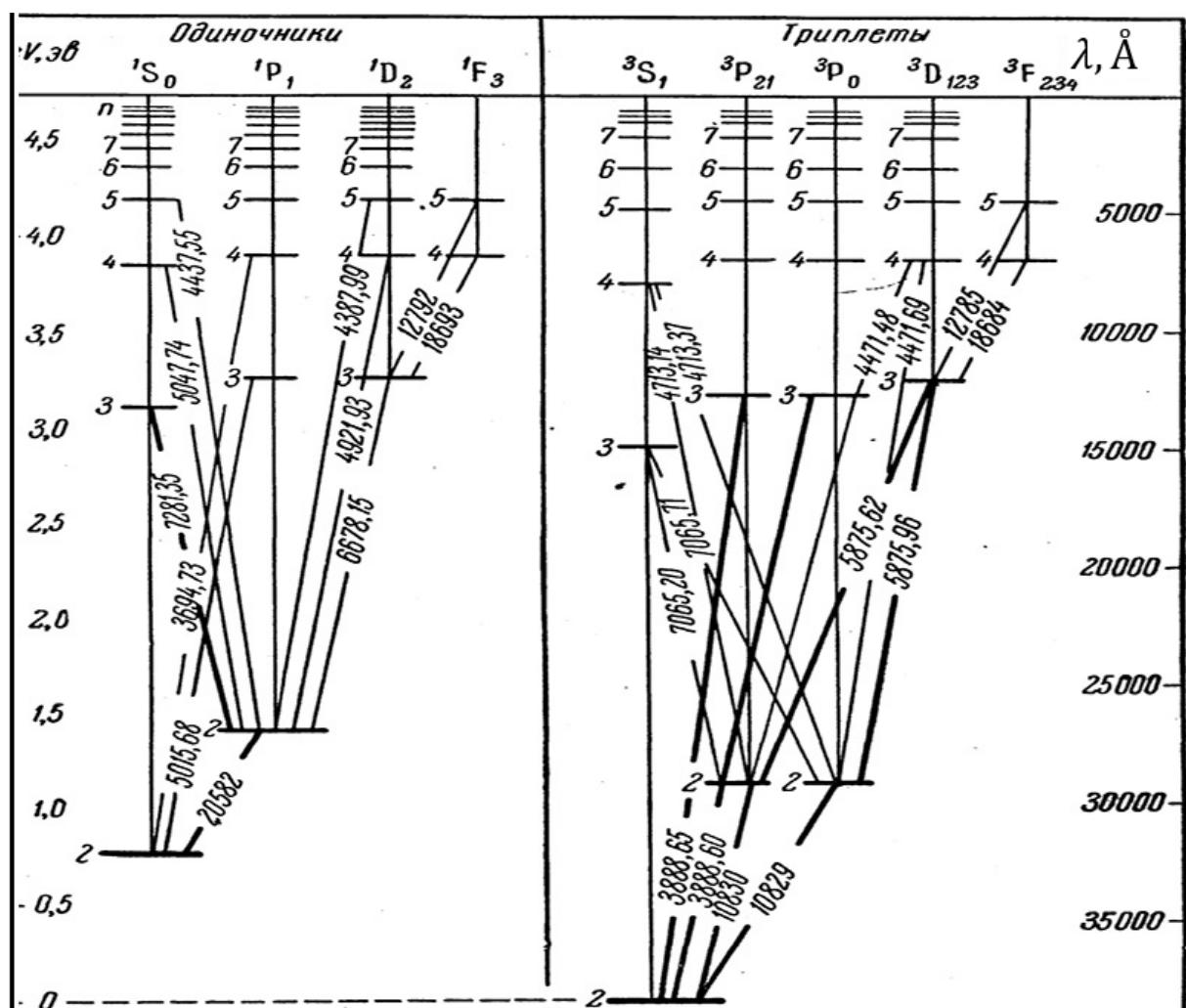


Рис. 9. Синглетные и триплетные переходы в атоме гелия.

Обратитесь к преподавателю или лаборанту для замены трубы с неоном на трубку с гелием, определите длины волн в спектре гелия и занесите их в табл. 2.

Таблица 2

Спектральная линия гелия	Длина волны спектроскопа λ_{He} , нм
Красная	
Желтая (оранжевая)	
Зеленая	
Синяя (голубая)	
Фиолетовая	

Обработка результатов измерений

1. Измерение постоянной экранирования заряда ядра для неона.

Подставьте измеренные длины волн в спектре неона λ_{Ne} и соответствующие значения n и m , приведенные в табл. 2, в формулу (7) и вычислите три значения константы экранирования

$$\sigma = Z - \frac{n \cdot m}{\sqrt{\lambda R} \cdot \sqrt{n^2 - m^2}}.$$

Определите величины экранированного заряда ядра атома неона по формуле:

$$Q = (Z - \sigma) \cdot |e|.$$

2. Измерение постоянной экранирования заряда ядра для гелия

Сопоставьте переходы на диаграмме уровней энергии атома гелия (рис. 9) и полученные длины волн из табл. 2. Определите квантовые числа n и m , нумерующее стационарные орбиты, отвечающие переходам, и внесите их значения в табл. 3:

Таблица 3

Спектральная линия	m	n	Длина волны спектроскопа λ_{He} , нм
Красная			
Желтая (оранжевая)			
Зеленая			
Синяя (голубая)			
Фиолетовая			

Аналогично первому пункту вычислите константы экранирования и величины экранированного заряда ядра атома гелия.

3. Рассчитать теоретические значения констант экранирования и эффективного заряда ядра для атомов гелия и неона.

1) Запишите электронную конфигурацию элемента в виде $(1s^2) (2s^2, 2p^6) (3s^2, 3p^6) (3d^{10}) (4s^2, 4p^6) (4d^{10}) (4f^{14}) (5s^2, 5p^6) (5d^{10}) \dots$ Расположите электроны по оболочкам. Любые электроны, расположенные справа от

интересующего вас электрона, не оказывают влияния на константу экранирования.

2) Константа экранирования для каждой группы рассчитывается как сумма следующих составляющих:

а. Все остальные электроны, находящиеся в одной группе с интересующим нас электроном, экранируют 0,35 единиц заряда ядра. Исключение составляет $1s$ -группа, где один электрон считается только за 0,30.

б. В случае группы, относящейся к $[s, p]$ типу, берут 0,85 единиц на каждый электрон ($n-1$) оболочки и 1,00 единицу на каждый электрон ($n-2$) и следующих оболочек.

с. В случае группы, относящейся к $[d]$ или $[f]$ типу, берут 1,00 единицу на каждый электрон, находящийся слева от этой орбитали.

Если на орбитали находится только один электрон, то экранирующий эффект отсутствует. В случае, если в атоме находится нечетное количество электронов, число должно быть уменьшено на единицу, прежде чем вы умножите его на соответствующее число, чтобы получить фактический эффект экранирования.

Пример. Рассчитайте эффективный заряд ядра для $2p$ в атоме азота:
электронная конфигурация – $(1s^2) (2s^2, 2p^3)$.

константа экранирования $\sigma = (0,35 \cdot 4) + (0,85 \cdot 2) = 3,10$

эффективный заряд ядра $Z^* = Z - \sigma = 7 - 3,10 = 3,90$

Сравните полученные значения с константами экранирования для атомов гелия и неона, определенными в п.1–2.

Контрольные вопросы

1. Каково содержание постулатов Бора?
2. Какова зависимость между энергией E_n и главным квантовым числом n в атоме водорода?
3. Какая формула может быть использована для оценки длин волн в спектре излучения многоэлектронных атомов?
4. Почему возникает эффект экранирования заряда ядра?
5. Что такое эффективный заряд ядра?
6. Объясните смысл постоянной экранирования.

Список литературы

1. Андреев, А. Д. Физика. Квантовая физика: учебное пособие / А. Д. Андреев, Ф. Ф. Павлов, В. Б. Федюшин, Л. М. Черных; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2020. – 52 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 5 т. / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – Т. 5. – 352 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва : Высш. шк., 2006. – 560 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	3
Описание лабораторной установки.....	3
Теоретическое обоснование.....	7
Порядок выполнения работы.....	12
Обработка результатов измерений.....	14
Контрольные вопросы.....	15
Список литературы	16