

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Методические указания к лабораторной работе № 24 по физике для студентов,
обучающихся по инженерно-техническим направлениям подготовки и
специальностям

Екатеринбург
2017

Авторы: Повзнер А.А., Гук В.Г., Ходак Е.А., Московских О.П.

Научный редактор проф., д.ф.-м.н. А.А. Повзнер

Определение постоянной Планка спектроскопическим методом: методические указания к лабораторной работе № 24 / Повзнер А.А., Гук В.Г., Ходак Е.А., Московских О.П. Екатеринбург: УрФУ, 2017. 17с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы. В теоретической части рассматриваются основные закономерности атомарных спектров. Экспериментальная часть позволяет на основе измерений длин волн в спектре испускания атомов натрия рассчитать постоянную Планка.

Библ.: 4 назв., 4 рис.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский Федеральный Университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
© Повзнер А.А., Гук В.Г., Ходак Е.А., Московских О.П.
2017.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Градуировка монохроматора.
2. Определение длин волн в спектре испускания атомов натрия.
3. Расчет постоянной Планка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Излучение энергии атомами, ее дальнейшее распространение в пространстве и взаимодействие с веществом происходит в виде определенных порций (квантов), локализованных и перемещающихся как целое со скоростью света c . Эти порции энергии можно представить как элементарные световые частицы – фотоны.

Энергия ε фотона пропорциональна линейной частоте ν излучения

$$\varepsilon = h\nu \quad (1.1)$$

Коэффициент пропорциональности h называется постоянной Планка и имеет размерность "энергия - время". В механике величины с такой размерностью называют действием. Поэтому постоянную Планка иногда называют «квантом действия».

Постоянная Планка входит во многие физические соотношения, в связи с чем может быть определена различными методами. Один из таких методов – спектроскопический – основан на измерениях длин волн в спектрах излучения или поглощения.

В данной работе измеряются длины волн в спектре излучения атомарного натрия.

2. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

Любое излучение можно представить как набор монохроматических (с определенной длиной волны λ) излучений. Такой набор излучений называется спектром. Атомы вещества, находящиеся в возбужденном состоянии, самопроизвольно переходят в более низкие энергетические состояния, испуская при этом спектр, состоящий из отдельных спектральных линий (линейчатый спектр). Возбудить атомы, т.е. сообщить им добавочную по отношению к основному состоянию энергию, можно за счет нагревания, воздействия электрическим полем и т.д.

В спектре излучения натрия, как и в спектрах других атомов, наблюдаются серийные закономерности, т.е. спектральные линии располагаются с определенной закономерностью в ряды или серии.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ АТОМА НАТРИЯ

Основные закономерности атомарных спектров удастся объяснить только с точки зрения квантовой механики.

Вероятность P обнаружить микрочастицу в какой-либо области пространства объема V равна

$$P = \int_V |\Psi|^2 dV, \quad (3.1)$$

где Ψ - волновая функция, зависящая от координат и времени;
Функция Ψ определяется решением уравнения Шредингера

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (3.2)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, m - масса частицы, ∇^2 - оператор Лапласа, U - потенциальная энергия частицы.

Если рассматривать атом как систему, состоящую из неподвижного ядра с зарядом $Z \cdot e$ и движущегося вокруг него одного электрона (водородоподобный атом), то уравнение Шредингера в этом случае будет иметь вид:

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\Psi = 0. \quad (3.3)$$

Потенциальная энергия электрона в этом случае равна

$$U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (3.4)$$

Решение уравнения (3.3) приводит к следующему результату: энергия электрона может принимать дискретный ряд значений, равный

$$E_n = -\frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (3.5)$$

где n - главное квантовое число. Каждому собственному значению энергии E_n соответствует несколько значений функции $\Psi_{n,l,m}$, отличающихся значениями квантовых чисел l и m .

В атомах щелочных металлов, к которым принадлежит натрий, каждый электрон движется в усредненном поле, созданном ядром и другими электронами. При этом в зависимости от глубины проникновения электрона в атом заряд ядра будет для данного электрона в большей или меньшей степени экранироваться другими электронами, так что его энергия оказывается зависящей не только от главного n , но и от орбитального (азимутального) квантового числа l

$$E_{n,l} = -\frac{me^4 (Z - a_{n,l})^2}{8\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2}. \quad (3.6)$$

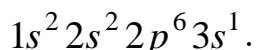
В формуле (3.6) поправка $a_{n,l}$ по смыслу определяет степень экранирования заряда ядра. Для натрия ($Z = 11$) максимальное значение поправки $a_{n,l}$ равно десяти.

В атомной физике применяются следующие условные обозначения различных состояний электронов. Электрон, находящийся в состоянии с $l = 0$, называют s -электроном (s -состояние), с $l = 1$ - p -электроном, с $l = 2$ -

d -электроном, с $l = 3 - f$ - электроном, затем идут g , h и т.д. по алфавиту. Значение главного квантового числа указывается перед условным обозначением квантового числа l .

Распределение электронов по энергетическим состояниям происходит в соответствии с принципом Паули и определяет так называемую электронную конфигурацию атома.

Для натрия она может быть записана



Электрон, находящийся в состоянии $3s$, связан с ядром слабее других и является валентным электроном. Так как все состояния с более низкой энергией заняты, то состояние $3s$ для валентного электрона является основным. При возбуждении атома щелочного металла и при испускании им кванта света изменяется состояние только валентного электрона, который поэтому называют оптическим электроном. Орбитальное квантовое число L атомов щелочных металлов совпадает с орбитальным квантовым числом l оптического электрона.

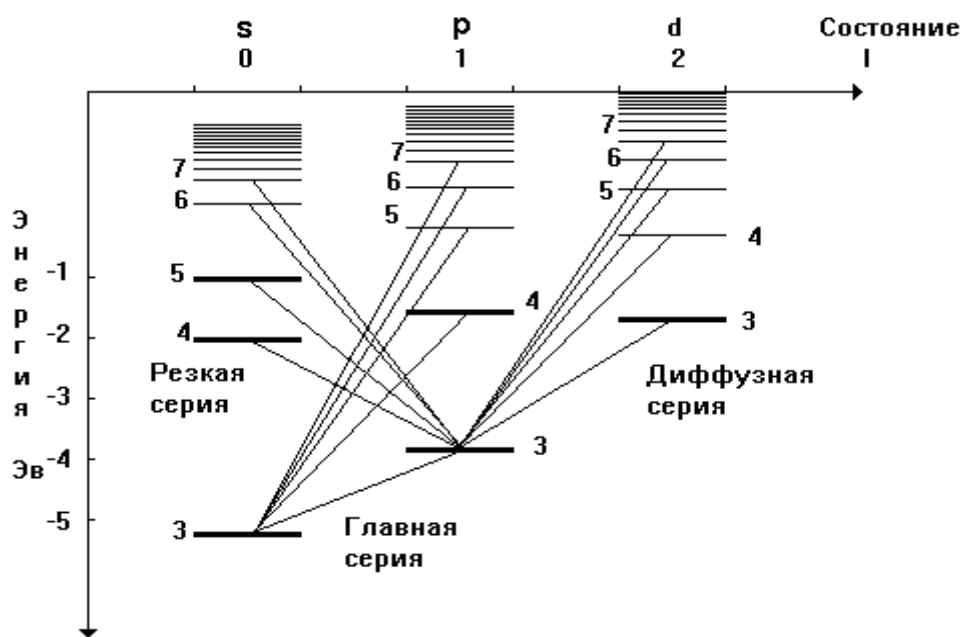


Рис. 3.1. Схема энергетических уровней натрия

На рис. 3.1 изображен фрагмент схемы энергетических уровней атомов натрия. На схеме видно, что в каждом ряду энергия принимает различный набор значений в зависимости от главного квантового числа n (цифры слева у каждого уровня). Ряды отличаются различными значениями l и обозначены в соответствии с этим.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

На основе схемы энергетических уровней могут быть объяснены закономерности оптического спектра, излучаемого натрием. Величина кванта излучения (фотона) равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый переход электрона

$$h\nu = E' - E \quad (4.1)$$

Квантовая механика позволяет определить вероятность различных переходов из одного состояния в другое. Соотношения, соответствующие переходам, являются наиболее вероятными и называются правилами отбора. Правила отбора - это следствие фундаментальных законов физики. Так, например, одно из таких правил

$$\Delta l = \pm 1 \quad (4.2)$$

является следствием закона сохранения момента импульса.

При переходах оптических электронов с вышележащих энергетических состояний в основное состояние $3s$ излучается главная серия. В видимую область спектра в этой серии попадает только одна спектральная линия (желтая). Диффузная серия, для которой характерно некоторое размытие спектральных линий, наблюдается при переходах электронов из состояний с $n > 3$, $l = 2$ в состояние $3p$. Следующая серия, возникающая при переходах электронов в первое возбужденное состояние 3 из состояний с $n > 3$ и $l = 0$, называется резкой. Спектральные линии резкой и диффузной серий, в основном, лежат в видимой части спектра.

Используя соотношения (3.6) и (4.1), можно найти связь длины волны λ с квантовым числом соответствующих переходов:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 ch^3} \left[\left(\frac{Z - a_{n,l}}{n} \right)^2 - \left(\frac{Z - a_{n',l'}}{n'} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

где n, l - квантовые числа, определяющие более низкое энергетическое состояние, а n' и l' - более высокое.

Из формулы (4.3) видно, что, измерив длины волн спектральных линий, можно вычислить постоянную Планка:

$$h = 3 \sqrt{\frac{me^4 \lambda}{8\varepsilon_0^2 c} \left[\left(\frac{Z - a_{n,l}}{n} \right)^2 - \left(\frac{Z - a_{n',l'}}{n'} \right)^2 \right]} \quad (4.4)$$

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

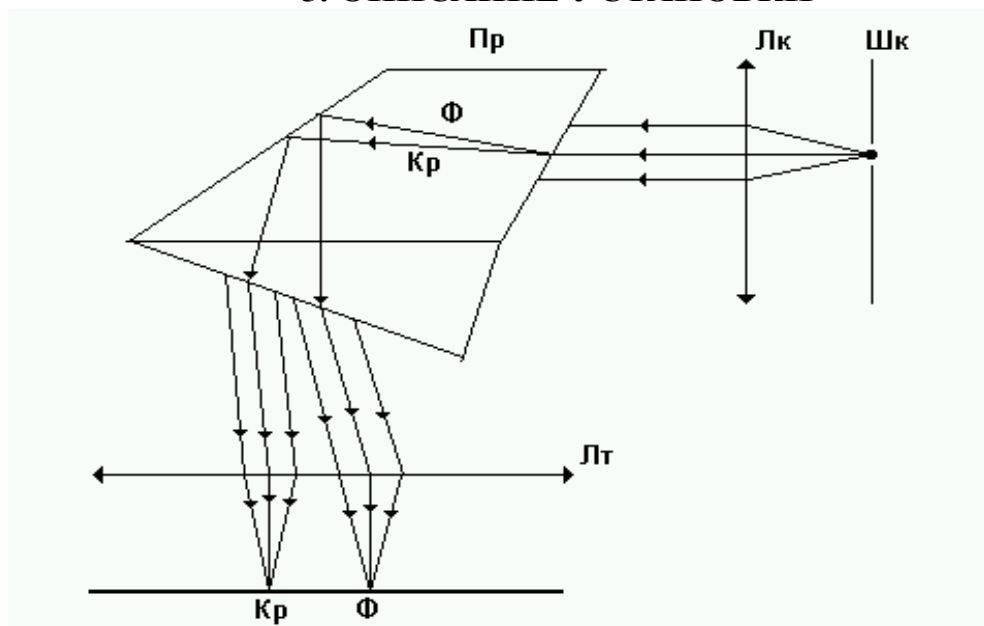


Рис. 5.1. Оптическая схема спектрографа

В работе в качестве спектрографа используется прибор типа УМ-2, рассеивающим элементом которого является стеклянная призма.

Принципиальная оптическая схема спектрографа изображена на рис. 5.1. Свет от источника попадает на входную щель Шк.

Объектив Лк создает параллельный пучок излучения и направляет его на сложную спектральную призму Пр, состоящую из трех склеенных призм. Две из них изготовлены из материала, обладающего большой дисперсией. Промежуточная призма поворачивает лучи на 90^0 , в результате чего дисперсии двух первых призм складываются. В призме свет преобразуется в систему параллельных пучков, выходящих под различными углами, в зависимости от длины волны λ .

На рис. 5.1 показано разделение только одного из лучей, попадающих на призму. Естественно, что таким же образом разделяются и другие лучи. Объектив зрительной трубы Лт фокусирует отдельные параллельные пучки и образует в своей фокальной плоскости совокупность разноцветных полос (спектральных линий).

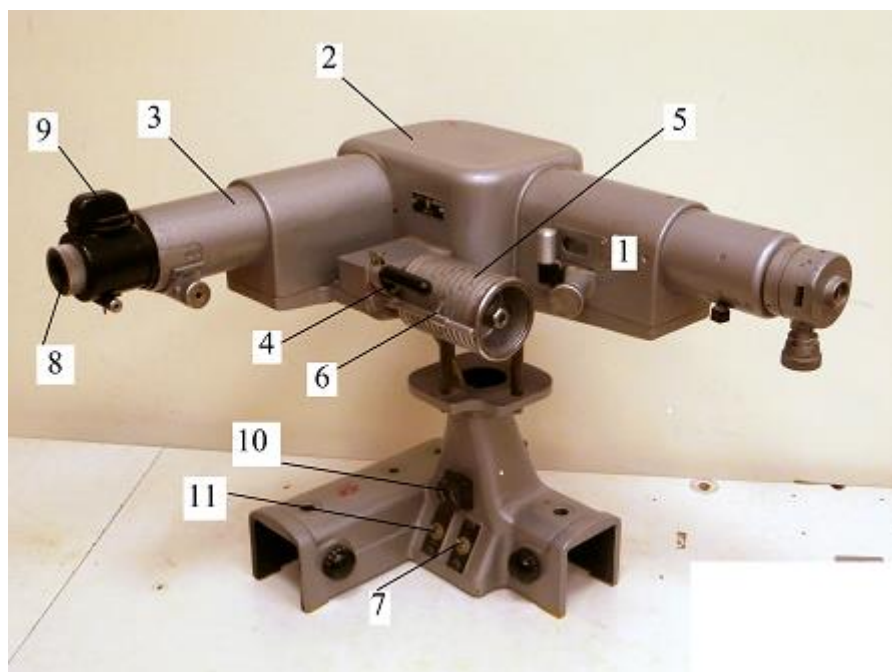


Рис. 5.2. Схема общего вида спектрокопа УМ-2

На рис. 5.2 показаны основные части УМ-2: коллиматор со щелью 1, зрительная труба 3, под защитным кожухом 2 – призма на поворотном столике. Призменный столик приводится в движение микроскопическим винтом 4 при вращении барабана 5, на котором нанесены относительные деления – градусы, отсчет читается против черты индекса 6, скользящего по спиральной канавке. Освещение шкалы включается тумблером 7.

Наблюдение спектра осуществляется визуально через окуляр зрительной трубы 8. В фокальной плоскости зрительной трубы находится указатель, освещаемый лампочкой через сменные светофильтры в оправе 9, освещение регулируется реостатом 10 с тумблером 11. Спектральная линия совмещается с острием указателя поворотом барабана 5.

При работе со спектрокопом УМ-2 удастся отметить строго фиксированное положение угла φ спектральных линий в условных единицах – градусах. Поскольку измерительный барабан 5 проградуирован в градусах, то для определения длины волны он нуждается в предварительной градуировке, которая свяжет длину волны, соответствующую линии в спектре, с делениями шкалы барабана. Для этого строится градуировочная кривая, построенная в координатах «длина волны, λ – φ , отсчет по шкале, град».

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.1. Построение градуировочной кривой.

Градуировочная кривая строится по измерениям положений спектральных линий с известной длиной волны, определяемых в градусах (**расположение цветных полос в указаниях к лабораторной работе на рабочем столе**).

В качестве эталонных веществ используются линии спектров паров ртути и неона. Градуировку проводят в следующей последовательности:

6.1.1. Перед входной щелью спектроסקопа устанавливают газоразрядную лампу с парами ртути;

6.1.2. Включают освещение указателя зрительной трубы;

6.1.3. Глядя в окуляр зрительной трубы спектроסקопа, добиваются четкой видимости спектральных линий. Ширину линий при этом регулируют микрометрическим винтом 4, резкость указателя шкалы - перемещением окуляра 8;

6.1.4. Вращением барабана 5 совмещают острие указателя с серединой одной из спектральных линий;

6.1.5. Против черты индекса 6 производят отсчет на барабане 5;

6.1.6. Полученные данные заносятся в табл.6.1;

6.1.7. Измерения по пп. (6.1.1-6.1.6) проводятся для всех **наиболее ярких** спектральных линий ртути (см. табл.6.1).

Затем вместо газоразрядной лампы с парами ртути перед входной щелью устанавливают неоновую лампочку и производят измерения положения трех **наиболее ярких и тонких** линий спектра неона (см. табл.6.1), повторяя п.п. (6.1.4-6.1.6).

По данным табл. 6.1 строят градуировочную кривую, приведенную в отчете на рис. 6.1.1.

6.2. Определение длины волны спектральных линий натрия.

Перед входной щелью объектива спектроסקопа устанавливают лампу, наполненную парами натрия, включают тумблер питания и прогревают 8-10 мин.

После этого необходимо произвести измерения положений всех **наиболее ярких** линий спектра натрия. Измерения проводят в соответствии с п.п. (6.1.4-6.1.6) предыдущего параграфа.

Полученные данные заносят в табл. 6.2. С помощью градуировочной кривой по известным показаниям прибора определяют длины волн спектральных линий натрия, которые также заносят в табл. 6.2 и табл. 6.3.

6.3. Определение постоянной Планка.

В табл. 6.3, кроме полученных длин волн спектральных линий натрия, указаны также значения квантовых чисел n и l и постоянных экранирования $a_{n,l}, a_{n',l'}$, соответствующие каждой длине волны. По данным табл. 6.3 и формуле (4.4) рассчитывают постоянную Планка h_i (для каждой длины волны λ_i). Пример расчета приводят для одного значения постоянной Планка.

Затем определяют среднее значение $\langle h \rangle$ и доверительную границу случайной погрешности $\varepsilon_{\langle h \rangle}$ по формулам:

$$\langle h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (6.1)$$

$$S_{\langle h \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_{\langle h \rangle} = S_{\langle h \rangle} t_{p,n} \quad (6.3)$$

где n - число полученных значений h , $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента для данного n и доверительной вероятности p .

Систематической погрешностью в определении h пренебрегаем вследствие ее малости, следовательно:

$$\Delta_{\langle h \rangle} = \varepsilon_{\langle h \rangle} \quad (6.4)$$

Окончательный результат записывается в виде:

$$h = \langle h \rangle \pm \Delta_{\langle h \rangle}, \quad P=0,95 \quad (6.5)$$

Таблица 6.1

Спектральная линия		Длина волны, нм	Отсчет, град.
Р	Желтая 2	579	
Т	Желтая 1	577	
У	Зеленая	546	
Т	Фиолетовая	436	
Б			
Н	Красная	640	
Е	Красно-оранжевая	638	
О	Желтая	585	
Н			

Таблица 6.2

Спектральная линия		Отсчет φ , град.	Длина волны, λ нм.
Н	Красно-оранжевая		
А	Желтая		
Т	Зеленая		
Р	Зелено-голубая		
И	Сине-голубая		
Й			

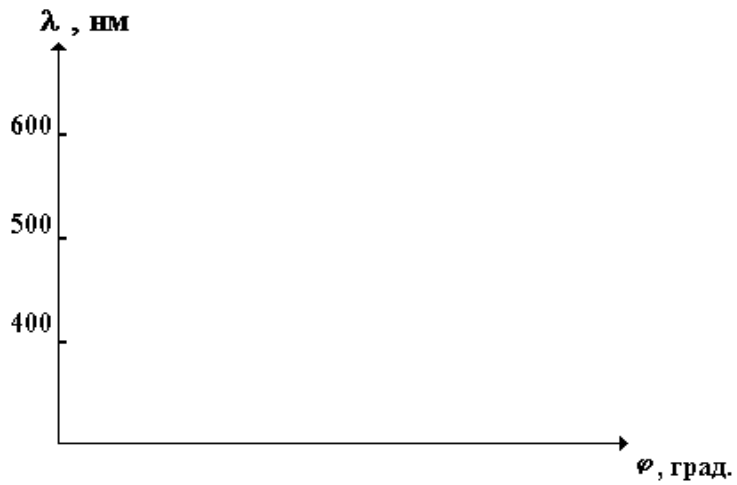


Рис. 6.1.1. Зависимость длины волны λ от значения шкалы φ

Таблица 6.3

№ п/п	Серия	λ нм	n	l	$a_{n,l}$	n'	l'	$a_{n',l'}$	h_i $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	$h_i - \langle h \rangle$ Дж·с	$(h_i - \langle h \rangle)^2$ (Дж·с) ²
1	Красно-оранжевая		3	1	9,583	5	0	9,629			
2	желтая (яркая)		3	0	9,156	3	1	9,583			
3	зеленая		3	1	9,583	6	0	9,710			
4	зелено-голубая		3	1	9,583	5	2	10,00			
5	сине-голубая		3	1	9,583	6	2	10,00			

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеет оптический спектр атомарного натрия?
2. Какие значения энергии может принимать электрон в атоме Na? От чего зависит эта энергия?
3. Какой электрон называется оптическим?
4. Запишите электронную конфигурацию атома натрия.
5. Каким переходам оптического электрона соответствуют видимые линии в спектре натрия?
6. Получите расчетную формулу для определения постоянной Планка по спектру испускания щелочных металлов.
7. Перечислите способы возбуждения атомов. Какой способ возбуждения свечения используется в данной работе?
8. Опишите принцип действия и устройство спектроскопа.
9. В чем состоит градуировка спектроскопа? Какие газы используются для градуировки? Как, пользуясь градуировочной кривой спектроскопа, определить длину волны спектральной линии водорода?
10. Опишите порядок проведения работы.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Кафедра физики

О Т Ч Е Т
по лабораторной работе № 24

Определение постоянной Планка спектроскопическим методом

Студент(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

1. Расчетная формула:

$$h = 3 \sqrt{\frac{me^4 \lambda}{8\epsilon_0^2 c} \left[\left(\frac{Z - a_{n,l}}{n} \right)^2 - \left(\frac{Z - a_{n',l'}}{n'} \right)^2 \right]}$$

где h – постоянная Планка;

e – заряд электрона;

c – скорость света;

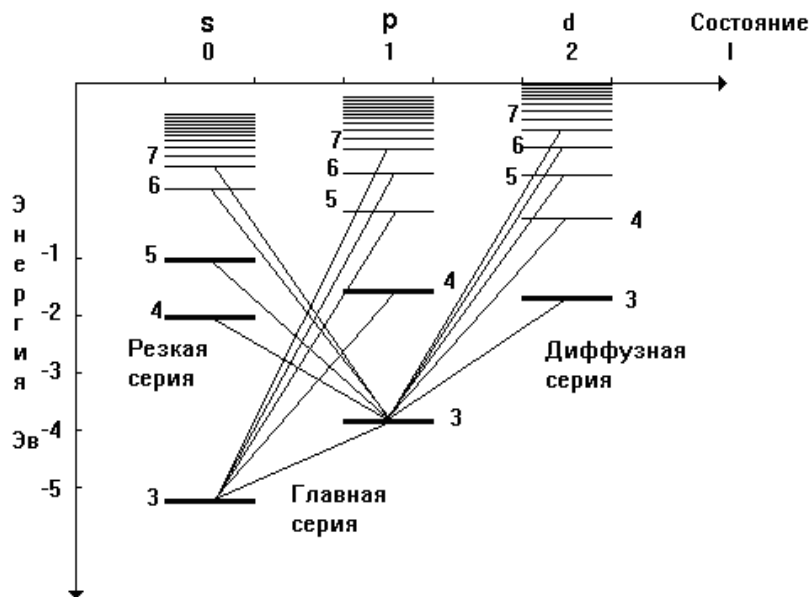
ϵ_0 – электрическая постоянная;

Z – порядковый номер натрия в табл. Менделеева;

n и l – главное и орбитальное квантовые числа соответствующих переходов;

$a_{n,l}, a_{n',l'}$ – постоянные экранирования (приведены в таблице).

2. Уровневая схема для Na.



3. Приборы и их характеристики. Номер установки – .

№ п/п	Наименование прибора и его тип	Назначение прибора	Предел измерений или постоянная характеристика	Цена деления шкалы

4. Построение градуировочной кривой «длина волны, λ – φ , отсчет по шкале, град».

Спектральная линия		Длина волны, нм	Отсчет, град.
Р	Фиолетовая	436	
Т	Зеленая	546	
У	Желтая 1	577	
Т	Желтая 2	579	
Б			
Н	Желтая	585	
Е	Красная 1	638	
О	Красная 2	640	
Н			

Построить график $\lambda = f(\varphi)$.

5. Определение длин волн спектральных линий натрия, используя график $\lambda=f(\varphi)$.

Спектральная линия			Отсчет φ , град.	Длина волны, λ нм
Н А Т Р И Й	1	Красно-оранжевая		
	2	желтая (яркая)		
	3	зеленая		
	4	зелено-голубая		
	5	сине-голубая		

6. Определение постоянной Планка по формуле 1.

(Пример расчета одного значения постоянной Планка):

$$h = 3 \sqrt{\frac{me^4 \lambda}{8\epsilon_0^2 c} \left[\left(\frac{Z - a_{n,l}}{n} \right)^2 - \left(\frac{Z - a_{n',l'}}{n'} \right)^2 \right]} =$$

№ п/п	Серия	λ нм	n	l	$a_{n,l}$	n'	l'	$a_{n',l'}$	h_i $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	$h_i - \langle h \rangle$ Дж·с	$(h_i - \langle h \rangle)^2$ (Дж·с) ²
1	Красно- оранжевая		3	1	9,583	5	0	9,629			
2	желтая (яркая)		3	0	9,156	3	1	9,583			
3	зеленая		3	1	9,583	6	0	9,710			
4	зелено- голубая		3	1	9,583	5	2	10,00			
5	сине- голубая		3	1	9,583	6	2	10,00			

7. Определение среднего значения постоянной Планка:

$$\langle h \rangle = \frac{\sum_{l=1}^n h_i}{n} =$$

8. Оценка погрешности измерений:

$$S_{\langle h \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n (h_i - \langle h \rangle)^2}{n(n-1)}} =$$

$$\varepsilon_{\langle h \rangle} = S_{\langle h \rangle} \cdot t_{p,n} =$$

$$\Delta_{\langle h \rangle} = \varepsilon_{\langle h \rangle} =$$

9. Окончательный результат:

$$h = \langle h \rangle \pm \Delta_{\langle h \rangle} =$$

$P=0,95$

10. Выводы.