

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Д. И. Вайсбурд  
А. В. Макиенко**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**

**ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ  
АТОМОВ НАТРИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы А-12  
по курсу «Общая физика» для студентов всех специальностей,  
«Атомная физика» для студентов физико-технических специальностей

Издательство  
Томского политехнического университета  
Томск 2007

УДК 539  
В 14

**Вайсбурд Д. И., Макиенко А. В.**

В 14 Лабораторный практикум по атомной физике /Д. И. Вайсбурд, А. В. Макиенко. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 120 с.

Лабораторный практикум составлен в соответствии с программой курса "Атомная физика" для физико-технического факультета ТПУ и содержит описание 11 лабораторных работ. Каждая работа включает краткое теоретическое описание изучаемого явления, изложение методики выполнения лабораторной работы, описание конструкции установки, задание. В конце каждой работы имеется перечень вопросов для самопроверки. Лабораторные работы практикума тематически сгруппированы в четыре отдельных цикла: 1 – квантовые свойства излучения, 2 – ядерная структура атома, 3 – спектры внутренней энергии атомов, молекул и твердых тел, 4 – магнитные свойства атомов, ядер, элементарных частиц.

Пособие предназначено для студентов физико-технических специальностей, изучающих атомную физику в виде отдельной дисциплины и для студентов, изучающих атомную физику как раздел общего курса физики.

УДК 539

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета

*Рецензенты*

*Доктор физико-математических наук, профессор*  
Томского государственного университета

*Л. В. Горчаков*

Кандидат физико-технических наук, доцент  
Томского государственного педагогического университета

*Б. Г. Чернявский*

© Томский политехнический университет, 2007  
© Вайсбурд Д. И., Макиенко А. В., 2007  
© Оформление. Изд-во Томского политехнического ун-та, 2007

# ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АТОМОВ НАТРИЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** исследование спектра излучения атомов натрия и определение постоянной тонкой структуры.

## Введение

Так же как и атом водорода, многоэлектронный атом при переходе из состояния с энергией  $E_2$  в состояние с энергией  $E_1$  испускает фотон, энергия которого равна:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Энергетический спектр атома с большим порядковым номером сложнее, чем атома водорода, поэтому и спектр излучения в общем случае оказывается сложным.

Расчет энергетических спектров многоэлектронных атомов, представляющих собой систему нескольких взаимодействующих электронов в центральном поле, является трудной задачей. Имеется, однако, группа атомов, спектральные свойства которых могут быть объяснены при помощи приближенного расчета, лишь немного отличающегося от задачи для водородоподобных атомов. Это атомы щелочных металлов – Li, Na, K, Rb, Cs.

Особенности спектров излучения атомов щелочных металлов качественно могут быть объяснены уже в рамках теории Бора при помощи так называемой модели **излучающего электрона**.

Согласно этой модели предполагается, что электроны внутренних оболочек расположены близко к ядру, а внешний (валентный) слабосвязанный с ядром электрон находится на достаточно большом расстоянии от ядра. В таком случае  $(Z - 1)$  внутренних электронов вместе с ядром, заряд которого  $+Ze$ , образуют устойчивый "остов", напоминающий ядро с зарядом  $+e$ . В поле этого "эффективного ядра" движется один слабосвязанный электрон, обычно называемый оптическим или валентным.

Такое рассмотрение, учитывающее взаимодействие этого электрона с остальными электронами в атоме как небольшое возмущение, приводит к выражению для энергии, аналогичному выражению для энергии атома водорода:

$$E_{nl} = -\frac{Rhc}{(n+\sigma)^2}, \quad (3.1)$$

где  $R = 10^5 \text{ см}^{-1}$  – постоянная Ридберга,  $n = 1, 2, 3, \dots$  – главное квантовое число,  $\sigma$  – квантовый дефект (причем  $\sigma < 0$ ), величина которого определяется, в основном, значением орбитального квантового числа  $l$ .

Энергетические уровни такого атома расположены ниже соответствующих уровней атома водорода, для которых справедливо соотношение:

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad (3.2)$$

На рис.1 представлен энергетический спектр для атома водорода и атома щелочного элемента

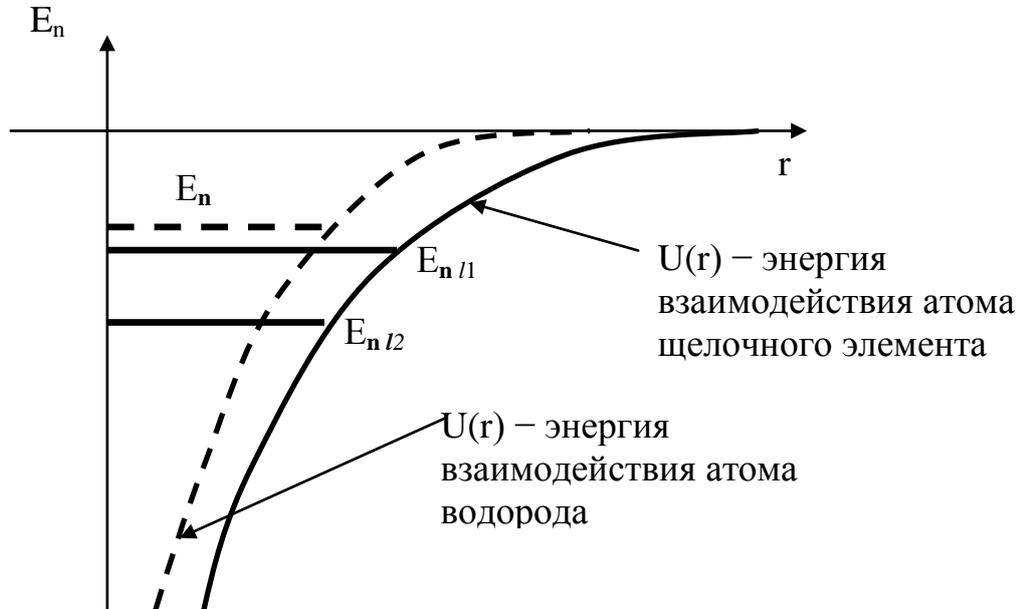


Рис. 1

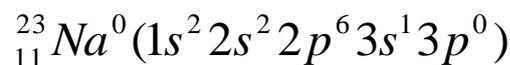
Соотношение (3.1) можно записать в виде

$$E_{nl} = -\frac{Rhc}{n^2} (z - a)^2 \quad (3.3)$$

где  $\alpha = Z - \frac{n}{n+\sigma}$  – постоянная экранирования.

### 1. Спектр излучения атома натрия

Согласно оболочечной структуре атома электронная конфигурация атома натрия имеет вид



В современной теории атома состояние электронов в атоме может быть охарактеризовано набором из четырех квантовых чисел:  $n, l, j, m_j$ , где  $n$  – главное квантовое число,  $l$  – орбитальное квантовое число, которое при заданном  $n$  принимает значения  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$ . Соответствующие

разным значениям чисел  $l$  состояния обозначаются **s**, **p**, **d**, **f** и далее по алфавиту.

$J$  – полное квантовое число, которое при заданных  $l$  и  $s$  (спиновое квантовое число) принимает значения  $j = |l - s|, \dots, |l + s|$ , всего  $(2s+1)$  значений;

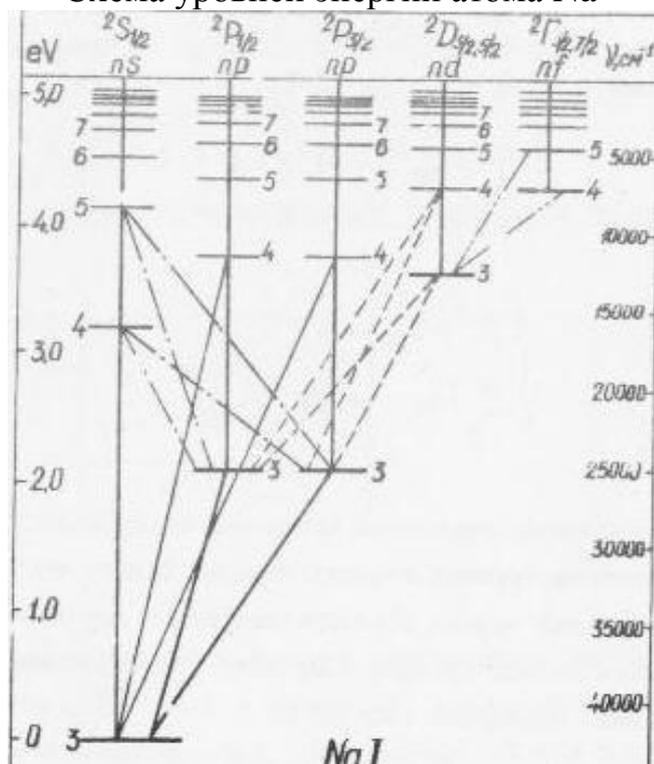
$m_j$  – полное магнитное квантовое число, которое при заданном  $j$  принимает значения  $m_j = j, j-1, \dots, -j$ , всего  $(2j+1)$  значений.

Для обозначения состояния электрона в атоме применяется специальная символика, т.е. определенная форма записи заданного набора квантовых чисел. Например, энергетический уровень  $3^2p_{1/2}$  – первая цифра 3 указывает значение главного квантового числа  $n = 3$ , буква p соответствует значению орбитального квантового числа  $l = 1$ . Справа от этой буквы внизу пишется значение полного квантового числа  $j = 1/2$ , слева вверху – значение  $(2s+1)$ , так называемая мультиплетность.

При оптических переходах из одного состояния в другое должны выполняться правила отбора:

$$\Delta n - \text{произвольно}, \Delta l = \pm 1, \Delta s = 0, \Delta j = 0, \pm 1.$$

Схема уровней энергии атома Na



Спектр излучения натрия состоит из нескольких перекрывающихся серий спектральных линий с систематически убывающими расстояниями между линиями и уменьшающейся интенсивностью.

Главная серия с яркими линиями и с желтым дублетом обусловлена переходом атома Na из nP-состояния в основное состояние 3S.

Положение спектральной линии соответствующей серии может быть описано общей формулой Ридберга:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[ \frac{1}{n_1^{*2}} - \frac{1}{n_k^{*2}} \right]. \quad (3.4)$$

В этой формуле "эффективные" квантовые числа  $n_1^*$  и  $n_k^*$ , в отличие от формулы Бальмера для водорода, уже не являются целыми:

$$n_1^* = n_1 + \sigma,$$

где  $n_1$  – целое число,  $\sigma$  – квантовый дефект (квантовая поправка).

Таблица 1

Значения квантовых поправок  $\sigma$  для атома натрия

n	l		
	0(S)	1(P)	2(D)
3	-1.373	-0.883	-0.013
4	-1.358	-0.867	-0.013
5	-1.353	-0.862	–

## 2. Тонкая структура спектральных линий атома натрия

Наличие спина у валентного электрона атома натрия ( $s = 1/2$ ) объясняет ряд тонких спектральных эффектов. Вследствие спин-орбитального взаимодействия все уровни атома натрия (за исключением S-уровней) расщепляются на два подуровня по числу возможных значений полного квантового числа  $j = \{|l-s|, \dots, |l+s|\}$ , то есть на  $(2s+1)$ -подуровней. Это расщепление, поскольку его масштаб мал, называется тонким или мультиплетным расщеплением:

$$\text{Главная серия: } nP - 3S \quad \begin{cases} n^2P_{1/2} - 3^2S_{1/2} \\ n^2P_{3/2} - 3^2S_{1/2} \end{cases} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Тонкая структура спектральной (желтой) линии, соответствующей главной серии, представлена на рис. 2.

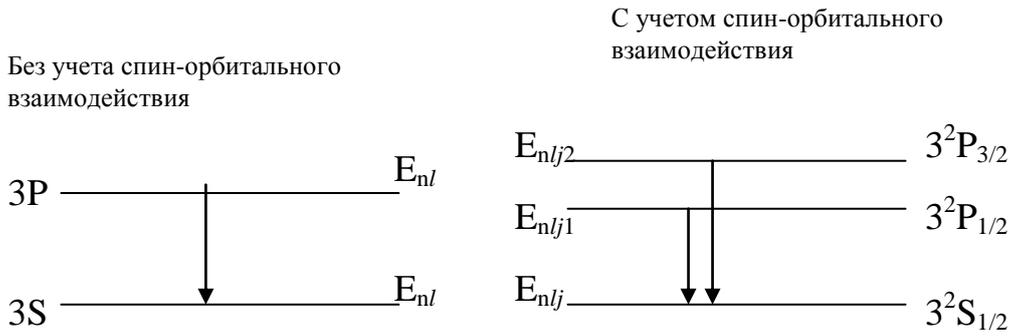


Рис. 2

Учет спин-орбитального взаимодействия приводит к тому, что вместо уровня с энергией  $E_{nl}$  появится  $(2s+1)$ -уровней с энергией  $E_{nlj}$ . Расчет энергетического спектра атома Na с учетом спин-орбитального взаимодействия и релятивистских поправок приводит соотношение (3.3) к виду

$$E_{nlj} = E_{nl} \left[ 1 + \frac{\alpha^2 (z - a_1)^4}{n(z - a)^2} \left( \frac{1}{j + 1/2} - \frac{3}{4n} \right) \right], \quad (3.5)$$

где  $E_{nl} = -\frac{Rhc}{n^2} (z - a)^2$ ,  $a$  – постоянная экранирования,

$a_1$  – постоянная внутреннего экранирования, определяет энергию спин-орбитального взаимодействия,

$\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137}$  – постоянная тонкой структуры.

Из (3.5) следует, что величина расщепления уровня (разница энергий между подуровнями  $j_1 = l + 1/2$  и  $j_2 = l - 1/2$  одного и того же уровня  $n, l$ ) равна:

$$\Delta E_{j_1 j_2} = \frac{Rhc}{n^2} \cdot \frac{\alpha^2 (z - a_1)^4}{n} \cdot \frac{1}{l(l+1)}. \quad (3.6)$$

Таблица 2.

Значения постоянных  $a$  и  $a_1$  для атома натрия

Z	элемент	$a$	$a_1$
11	Na	9.58	7.45

Можно видеть, что линии главной серии атома Na имеют сложную структуру – они **дублетны**. Дублетность обусловлена расщеплением верхнего уровня  $n^2P$  на две компоненты с  $j = 1/2$  и  $j = 3/2$ .

Введя обозначение  $(z - a_1) = z_0$ , формулу (3,6) перепишем в виде:

$$\Delta E = \frac{Rhc\alpha^2}{n^3l(l+1)} z_0^4 \quad (3.7)$$

Измерив в эксперименте разность длин волн  $\Delta\lambda$  между линиями желтого дублета главной серии спектра излучения атома Na и рассчитав величину соответствующего энергетического расщепления, можно по формуле (3.7) определить постоянную тонкой структуры  $\alpha$ .

### Описание установки

Исследование тонкой структуры спектральных линий атома натрия осуществляется на спектрометре, имеющем гониометр Г5 и дифракционную решетку ( $600 \text{ мм}^{-1}$ ). Оптическая схема изображена на рис. 3.

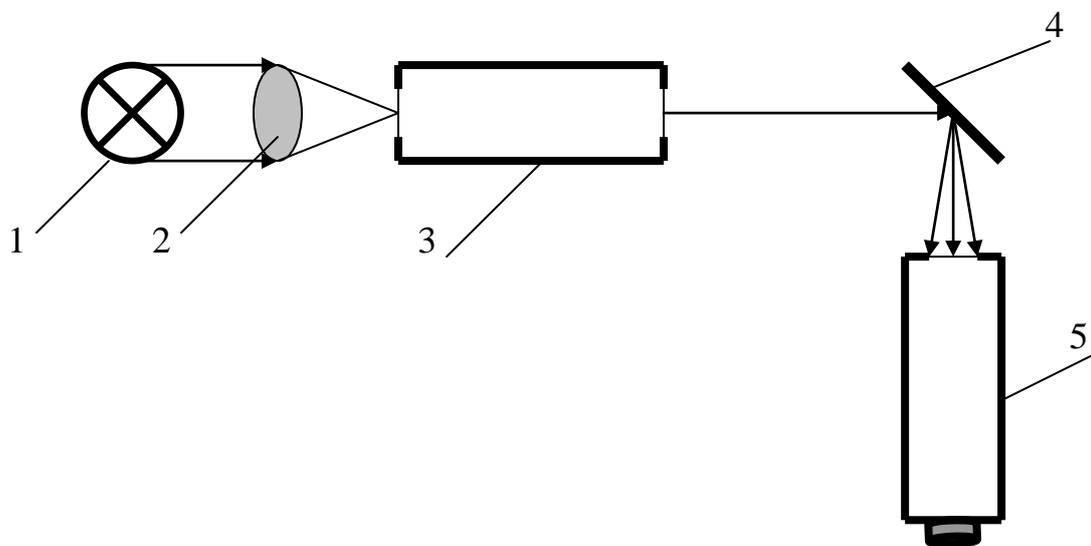


Рис. 3. Оптическая схема: 1) – источник излучения; 2) – собирающая линза; 3) – коллиматор гониометра; 4) – дифракционная решетка; 5) – зрительная труба гониометра

Источником исследуемого спектра служит дуговая натриевая лампа. Источником излучения, спектр которого известен, – дуговая ртутная лампа. Спектр излучения ртути используется для определения угловой дисперсии спектрального прибора. Обе лампы установлены на одной оптической скамье, имеют однотипные схемы включения, а также один блок питания.

Гониометр Г5 является точным измерительным оптическим прибором и предназначен для измерения углов (предел допустимой погрешности при однократном измерении угла не более 5").

Прибор состоит из коллиматора, зрительной трубы, основания с осевой системой и столика, на который устанавливается плоская отражающая дифракционная решетка.

Источник излучения через собирающую линзу попадает на входную щель коллиматора. Коллиматор формирует параллельный пучок лучей, который падает на дифракционную решетку. Лучи различных длин волн отражаются решеткой под разными углами. Лучи от дифракционной решетки проходят через зрительную трубу, оптическая схема которой формирует изображение спектральной линии, которая наблюдается через окуляр зрительной трубы.

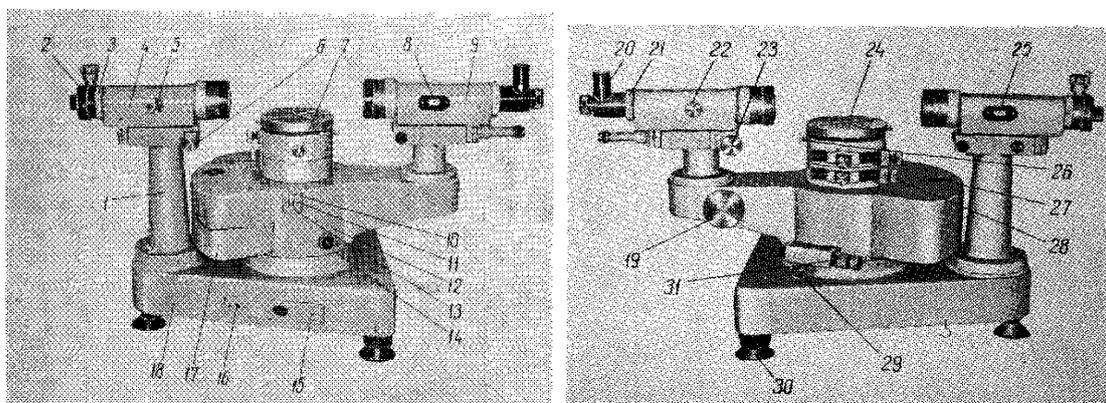


Рис. 4 . Общий вид гониометра Г5:

- 1 — стойка коллиматора; 2—раздвижная щель; 3 — кольцо;
- 4 — коллиматор; 5 — маховик фокусировки коллиматора;
- 6 — юстировочный винт; 7 — винт наклона столика; 8 — шкала;
- 9 — зрительная труба; 10, 11 — рычажки; 12 — алидада (поворотный узел)
- 13 — механизм соединения лимба с алидадой; 14 — маховик;
- 15 — общий выключатель; 16— переключатель; 17— подсветка;
- 18 — основание; 19 — маховик оптического микрометра;
- 20 — автоколлимационный окуляр-куб; 21— кольцо;
- 22 — маховик фокусировки трубы; 23 — юстировочный винт;
- 24 — столик; 25 — шкала; 26 — винт наклона столика;
- 27 — уровень; 28 — микрометрический винт лимба;
- 29 — зажимной винт; 30 —подъемный винт; 31 — микрометрический винт

Фокусировка зрительной трубы и коллиматора производится маховиками 5 и 22 по шкалам 25 и 8, на которых имеется индекс "∞" и деления. Цена одного деления равна 1 мм. Зрительная труба 9 со стойкой крепится к поворотному узлу 12. Коллиматор установлен на стойке 1, которая закреплена неподвижно на основании 18. Алидада вращается относительно оси прибора и установленного на ней лимба грубо от руки и

точно микрометрическим винтом 31 при зажатом винте 29. Включение и выключение лимба для совместного или отдельного вращения с алидадой осуществляется рычажками 10 и 11. Столик 24 используется для установки дифракционной решетки. Наклон столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях производится винтами 7. Важнейший узел гониометра – оптический микрометр, который смонтирован в алидаде 12.

Отсчет значений угла проводится с помощью отсчетного микроскопа. В левом угле поля зрения микроскопа наблюдается изображение противоположных участков шкалы и индекса для отсчета градусов. В правом окне находится шкала оптического микрометра и горизонтальный индекс для отсчета минут и секунд.

Чтобы снять отсчет, необходимо повернуть маховик 19 оптического микрометра настолько, чтобы верхние и нижние изображения штрихов в левом окне точно совместились. Число градусов будет равно видимой ближайшей цифре шкалы слева от вертикального индекса. Число десятков минут – число интервалов, заключенных между верхним штрихом, соответствующим отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, расположенным справа от вертикального индекса. Число единиц минут отсчитывается по шкале, расположенной в правой части окна поля зрения по левому ряду чисел вертикальной шкалы. Число секунд – в том же окне по правому ряду чисел.

### **ВНИМАНИЕ!**

- Запрещается работать с гониометром до ознакомления с его устройством.
- Запрещается прикасаться к поверхностям дифракционной решетки и линзы.
- Работая с юстировочными винтами и отсчетным устройством гониометра, необходимо прикладывать минимальные усилия.

### **ЗАДАНИЕ**

1. Изучить теорию излучения атомов щелочных металлов.
2. Определить угловую дисперсию спектрометра, для чего необходимо:
  - Включить ртутную лампу и сфокусировать излучение на щели гониометра.
  - Подключить гониометр к сети и включить подсветку окуляра. Вращая окуляр, получить резкое изображение визирной линии (здесь и далее смотрите описание гониометра).
  - Маховиком 5 сфокусировать коллиматор на " $\infty$ ", для чего на шкале 25 совместить " $\infty$ " и "0".

- Установить на столик гониометра дифракционную решетку и с помощью регулировочных винтов 7 установить столик горизонтально.
- Отпустить зажимной винт 29 алидады, отвести зрительную трубу в сторону и невооруженным глазом увидеть спектр.
- Установить трубу так, чтобы видеть линии спектра. Вращая маховик 5 получить резкое изображение спектральных линий.
- Провести измерение углов по отсчетному устройству оптического микрометра, совмещая спектральные линии ртути, соответствующие табл. 3, с визиром. Результаты измерений занести в таблицу наблюдений 4.
- По данным табл. 4 построить зависимость угла от длины волны и по графику определить угловую дисперсию установки.

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}$$

Таблица 3

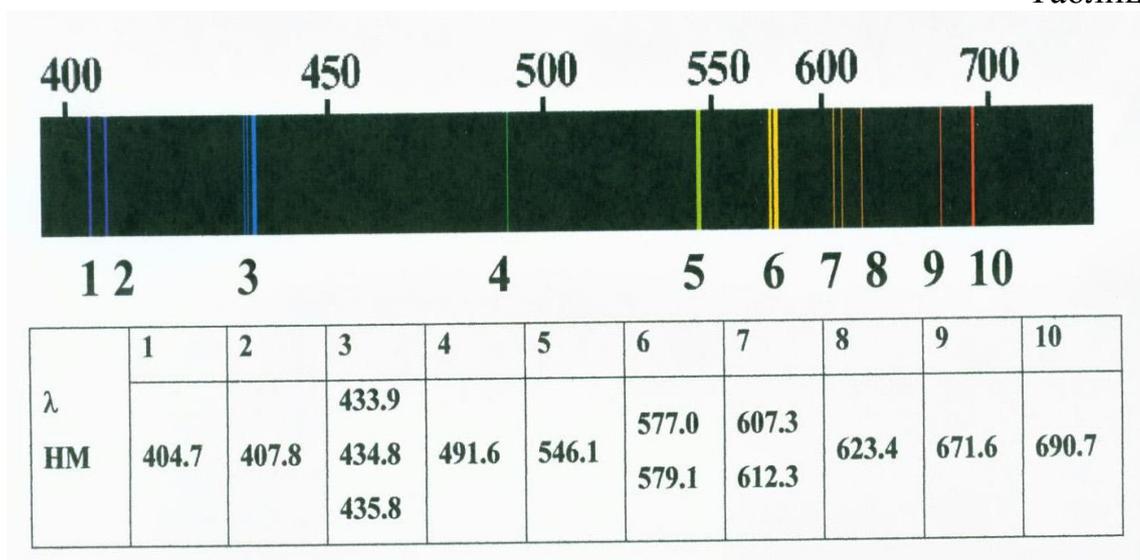


Таблица наблюдений 4

Длина волны $\lambda$	Угол $\varphi$			
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_{\text{ср}}$

3. Измерить угловое расстояние  $\Delta\varphi$  между линиями желтого дублета спектра излучения натрия. Для этого необходимо:

- Включить натриевую лампу, отключив при этом ртутную.
- Поворачивая зрительную трубу, найти изображение двух близко расположенных желтых линий (дублет натрия).
- Совместить визир с одной из линий дублета и произвести отсчет угла по оптическому микрометру.
- Совместить визир с другой линией и также произвести отсчет угла (измерения углов произвести не менее трех раз).
- По результатам измерений найти среднее угловое расстояние между линиями дублета  $\Delta\varphi_{\text{ср}}$ .
- Результаты измерений занести в табл. 5.

Таблица 5

$\varphi$ ДЛИНА ВОЛНЫ	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_{\text{ср}}$	$\Delta\varphi_{\text{ср}}$	$\Delta\lambda_{\text{ср}}$
$\lambda_{1\text{ж}}$						
$\lambda_{2\text{ж}}$						

4. По градуировочному графику определить длину волны одной из линий дублета, а также разность длин волн линий дублета по формуле:

$$\Delta\lambda = 1/D \cdot \Delta\varphi_{\text{ср}}, \text{ где } D - \text{угловая дисперсия.}$$

5. Рассчитать величину энергетического расщепления уровня  $3^2P$  по найденному значению  $\Delta\lambda$  и  $\lambda_{\dots}$ .

6. Используя соотношение (3.7), определить постоянную тонкой структуры  $\alpha$  и сравнить с табличным значением.

7. Объяснить наблюдаемое в эксперименте превращение желтых линий дублета в темные при больших токах натриевой лампы.

### Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение гониометра?
2. Как изменится положение линий спектра при увеличении дисперсии и разрешающей способности дифракционной решетки?
3. В чем состоит модель излучающего электрона?
4. Чем определяется поправка  $\sigma$ ? От каких квантовых чисел зависит?
5. Какими квантовыми числами характеризуется состояние электрона в атоме?
6. Какому квантовому переходу соответствует головная линия главной серии спектра натрия?
7. С чем связано расщепление энергетических уровней натрия и от чего зависит число подуровней?
8. Почему спектральные линии главной серии в спектре Na имеют дублетную структуру?

**Давид Израйлевич Вайсбурд**

**Антонина Васильевна Макиенко**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**

Научный редактор В.Ф. Пичугин, д-р физико-матем. наук, профессор

Редактор О.Н. Свинцова

Подписано к печати 01.10.2007. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. 6,38. Уч.-изд.л.6,32.

Заказ . Тираж 50 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.