

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Научно\_исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В.Скобельцына

**Атомный практикум**

**Спектр поглощения атома натрия**

Лабораторная работа № 6

**Тонкая структура спектральных линий  
атома натрия**

Лабораторная работа № 7

*УНЦ ДО  
Москва  
2005*

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Научно\_исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В.Скобельцына

**Атомный практикум**

**С.В.Ищенко, С.С.Красильников, Н.А.Красильникова,  
И.А.Савченко, А.В.Смирнов, В.В.Тарасова.**

**Спектр поглощения атома натрия**

Лабораторная работа № 6

**Тонкая структура спектральных линий  
атома натрия**

Лабораторная работа № 7

**Под редакцией  
Красильникова С. С.**

*УНЦ ДО  
Москва  
2005*

УДК  
ББК

**С.В.Ищенко, С.С.Красильников, Н.А.Красильникова,  
И.А.Савченко, А.В.Смирнов, В.В.Тарасова.**

Спектр поглощения атома натрия. Тонкая структура спектральных линий атома натрия. Лабораторные работы № 6, 7.  
/Под редакцией Красильникова С.С.. Учебное пособие.-  
М.:Издательский отдел УНЦ ДО, 2005.- 46 с.

ISBN 5-211-03287

Лабораторная работа из цикла «Атомный практикум»  
физического факультета МГУ по общему курсу  
«Атомная физика».  
Для студентов физического факультета МГУ.

Под редакцией Красильникова С.С.

ISBN 5-211-03287

© С.В.Ищенко, С.С.Красильников,  
Н.А.Красильникова, И.А.Савченко,  
А.В.Смирнов, В.В.Тарасова.

© Московский государственный  
университет, 2005

## СПЕКТРЫ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ.

### ВВЕДЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ NN 6 и 7.

#### 1. Спектр энергий атомов щелочных металлов.

Расчет спектра энергий атома щелочного металла, представляющего собой систему многих электронов в кулоновском поле ядра, является сложной задачей. Поэтому прибегают к следующему методу [1]: предполагая, что электроны внутренних оболочек расположены близко к ядру (ядро и электроны внутренних оболочек образуют атомный остаток), а внешний (валентный), слабо связанный с атомом электрон, наоборот, находится на достаточно большом расстоянии от ядра, рассматривают атом щелочного металла как некоторую "водородоподобную" систему (внешний электрон – атомный остаток). Такое рассмотрение, учитывающее взаимодействие внешнего электрона с остальными электронами в атоме как небольшое возмущение, налагающееся на кулоновское притяжение атомного остатка, приводит к выражению для энергии, аналогичному выражению для энергии атома водорода:

$$E_{nl} = -\frac{Ry}{(n - \Delta_l)^2} = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2_{эфф}}. \quad (B.1)$$

Для изоэлектронного ряда щелочноподобных ионов формула (B.1) принимает вид:

$$E_{nl} = -\frac{RyZ^2}{(n - \Delta_l)^2}, \quad (B.2)$$

где  $Z_a e$  - заряд ядра (иона), в котором движется электрон. (Изоэлектронными называются ионы, содержащие во внешней оболочке одинаковое число электронов).

Длины волн линий атома щелочного металла определяются по формуле:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[ \frac{1}{(n_1 - \Delta_i)^2} - \frac{1}{(n_2 - \Delta_k)^2} \right]. \quad (B.3)$$

В ф-лах (B.1-3)  $\hbar$  - постоянная Планка,  $m$  - масса покоя электрона,  $e$  - его заряд,  $n_1, n_2$  - главные квантовые числа,

$R = me^4 / 4\pi\hbar^3 c$  - постоянная Ридберга,

$Ry = me^4 / 2\hbar^2$  - ридберг,  $n_{эфф}$  - эффективное квантовое число.

Отличие от атома водорода состоит в том, что  $n_{эфф} = n - \Delta_l$  уже не целое число, как в случае водорода, а отличается от соответствующего главного квантового числа  $n$  на величину  $\Delta$  ( $\Delta > 0$ ), называемую квантовым дефектом. В формуле (B.3) индексы  $i, k$  означают зависимость квантового дефекта от орбитального квантового числа  $l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ , которое для одноэлектронных атомов принято обозначать строчными латинскими буквами соответственно

квантовое число  $l$       0, 1, 2, 3, ...,  
 символ состояния      s, p, d, f, ...,

Соответствующие квантовые дефекты обозначаются как  $\Delta_s, \Delta_p$  и т.д.

Величина квантового дефекта  $\Delta_l$ , в основном, определяется значением орбитального квантового числа  $l$ : при данном  $n$  квантовый дефект резко уменьшается при увеличении квантового числа  $l$  (табл.1). Значения квантового дефекта, приведенные в таблице, определены экспериментальным путем.

#### Значения квантового дефекта для атома натрия

$n$	$l$		
	s	p	d
3	1,373	0,883	0,013
4	1,358	0,867	0,011
5	1,353	0,862	-

Из (B.1) видно, что энергетические уровни щелочного атома расположены ниже соответствующих уровней атома водорода, для которых справедливо соотношение

$$E_n = - \frac{Ry}{n^2}. \quad (B.4)$$

Кроме того, поскольку квантовый дефект  $\Delta_l$  сильно зависит от орбитального квантового числа  $l$ , энергия внешнего (валентного) электрона в атоме щелочного элемента зависит не только от величины главного квантового числа  $n$ , но и от орбитального квантового числа  $l$ , возрастая с ростом  $l$  (см. табл.1 и соотношение (B.1)), т.е. в щелочных металлах снимается вырождение по орбитальному квантовому числу, наблюдаемое в атоме водорода и водородоподобных ионах.

Указанные зависимости имеют простое классическое толкование. В "одноэлектронных" атомах щелочной группы единственный наружный электрон движется в потенциале, отличном от кулоновского, точечное ядро (заряд  $Ze$ ) окружено

объемным зарядом  $(Z - l)$  электронов. Ядро и электроны образуют атомный остаток (ион).

Потенциальная энергия электрона в поле иона близка к кулоновской (с зарядом, равным 1) лишь на расстояниях, много больших радиуса иона  $r_i$ :

$$U(r) \approx -\frac{e^2}{r} \quad \text{при} \quad r \gg r_i. \quad (\text{B.5})$$

С приближением к ядру, на расстояниях порядка радиуса иона, из-за экранировки потенциал спадает более круто, нежели кулоновский; "внутри" иона, вблизи ядра, он вновь становится кулоновским, но с большей величиной заряда

$$U(r) \approx -\frac{Ze^2}{r} \quad \text{при} \quad r \ll r_i. \quad (\text{B.6})$$

В целом, потенциал в этих атомах оказывается глубже кулоновского с единичным зарядом и с более крутой зависимостью от радиуса (рис.1). В таких потенциалах уровни энергии электрона расположены ниже водородных при том же значении главного квантового числа  $n$ . Соотношение (B.1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} E_{nl} &= -\frac{Ry}{(n - \Delta_l)^2} = \\ &= -\frac{Ry(Z - a)^2}{n^2} = -\frac{RyZ^{*2}}{n^2}, \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

внеся поправку не в главное квантовое число  $n$ , а в заряд ядра  $Z$ . Здесь постоянная экранирования

$$a = Z - \frac{n}{n - \Delta_l}, \quad (\text{B.8})$$

$Z^*$  - эффективный заряд.

Для изоэлектронного ряда, в согласии с формулой (B.2)

$$a = Z - \frac{Z a n}{n - \Delta_l} \quad (\text{B.9})$$

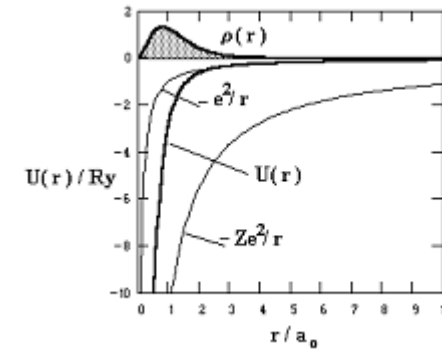


Рис.1. Потенциальная энергия электрона в атоме водорода, валентного электрона в атоме щелочного металла  $U(r)$ , потенциальная энергия электрона в поле незэкранированного ядра  $-Ze^2/r$  распределение плотности электронов атомного остатка  $\rho(r)$ .

## 2. Тонкая структура энергетических уровней.

В формулах (B.1), (B.7) не учитывается влияние спин-орбитального взаимодействия на энергию электрона и, соответ-

ственно, на структуру энергетических уровней. Энергия спин - орбитального взаимодействия определяется как возмущение энергии атома, рассчитанной из уравнения Шредингера [1]. Это возмущение выражается как:

$$V = - ( \vec{\mu}_s \vec{H} ), \quad (\text{B.10})$$

где

$$\vec{\mu}_s = - \frac{e}{mc} \vec{s} \quad (\text{B.11})$$

$$\left| \vec{\mu}_s \right| = 2 \mu_0 \sqrt{s(s+1)} = 2 \mu_0 s^* \quad (\text{B.12})$$

$$\left| \vec{s} \right| = \hbar \sqrt{s(s+1)} = \hbar s^* \quad (\text{B.13})$$

где  $\vec{\mu}_s$ ,  $\vec{s}$  - собственные магнитный и механический моменты электрона,  $S$  - спиновое квантовое число. Для электрона  $s = 1/2$ .  $\vec{H}$  - орбитальное магнитное поле, возникающее в системе координат электрона при его движении со скоростью  $\vec{v}$  в электростатическом поле ядра напряженности  $\vec{E}$ :

$$\vec{H} = - \frac{1}{c} \left[ \vec{E} \times \vec{v} \right] \quad (\text{B.14})$$

$$\vec{E} = \frac{1}{e} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (\text{B.15})$$

$U$  - потенциальная энергия электрона в центрально - симметричном поле.

Отсюда

$$\begin{aligned} \vec{H} &= \frac{1}{ec} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} \left[ \vec{r} \times \vec{v} \right] = \frac{1}{emc} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} \left[ \vec{r} \times m \vec{v} \right] = \\ &= \frac{1}{emc} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} \vec{l}, \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

где

$$\vec{l} = \left[ \vec{r} \times m \vec{v} \right] \quad (\text{B.17})$$

- орбитальный механический момент импульса электрона. Согласно правилу квантования моментов

$$\left| \vec{l} \right| = \hbar \sqrt{l(l+1)} = \hbar l^* \quad (\text{B.18})$$

$l$  - орбитальное квантовое число.

С учетом (B.12), (B.16) энергия возмущения

$$V = -(\vec{\mu}_s \vec{H}) = -\frac{1}{emc} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} (\vec{\mu}_s \vec{l}) = \quad (B.19)$$

$$= \frac{1}{m^2 c^2} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} (\vec{l} \vec{s}) =$$

$$= \frac{1}{m^2 c^2} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} \left| \vec{l} \right| \left| \vec{s} \right| \cos(\angle \vec{l} \vec{s})$$

Подставляя значения  $\left| \vec{l} \right|$ ,  $\left| \vec{s} \right|$  (формулы (B.13), (B.18)) и полученное из теоремы косинусов значение косинуса угла между  $\vec{l}$  и  $\vec{s}$  [1]

$$\cos(\angle \vec{l} \vec{s}) = \frac{j^{*2} - l^{*2} - s^{*2}}{2 l^* s^*} \quad (B.20)$$

получим

$$V = \frac{1}{2} \frac{\hbar^2}{m^2 c^2} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{j^{*2} - l^{*2} - s^{*2}}{2} \quad (B.21)$$

(множитель 1/2 – “множитель Томаса – Френкеля” появляется вследствие учета ускоренного движения электрона). Здесь  $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$  - полный момент количества движения электрона.

$$\left| \vec{j} \right| = \hbar \sqrt{j(j+1)} = \hbar j^* \quad (B.22)$$

$j$  - квантовое число полного момента количества движения.

Для одноэлектронного атома

$$j = l \pm 1/2 \quad (B.23)$$

Полученную в (B.21) добавочную энергию спин - орбитального взаимодействия мы можем рассматривать как малое возмущение по сравнению с энергией атома (B.1). Согласно теории возмущений [1], сдвиг уровня энергии, обусловленный возмущением  $V$ , можно вычислить, усредняя возмущение по волновым функциям  $\Psi_{nl}$  невозмущенного состояния. Тогда

$$\Delta E_{ls} = \int_0^\infty \Psi_{nl}^* V \Psi_{nl} d\tau \quad \text{или}$$

$$\Delta E_{ls} = \langle V \rangle =$$

$$= \frac{\hbar^2}{2m^2 c^2} \frac{j^{*2} - l^{*2} - s^{*2}}{2} \left\langle \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right\rangle_{nl} \quad (B.24)$$

В кулоновском поле

$$U = -\frac{Ze^2}{r} \quad (B.25)$$

и

$$\left\langle \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right\rangle_{nl} \sim \left\langle \frac{1}{r^3} \right\rangle_{nl} . \quad (\text{B.26})$$

Потенциал же атома щелочного металла, как было отмечено выше (см.рис.1), на расстояниях порядка радиуса иона, спадает быстрее, нежели кулоновский, и приближается к кулоновскому лишь при больших  $r$ . Соответственно

$$\left\langle \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right\rangle_{nl} \sim \left\langle \frac{1}{r^k} \right\rangle_{nl} ; \quad k > 3 \quad (\text{B.27})$$

Из (B.24) видно, что, т.к.  $j = l \pm 1/2$ , энергия спин - орбитального взаимодействия принимает два значения: уровень энергии одноэлектронного атома расщепляется на два подуровня. Расстояние между подуровнями определяется соотношением, аналогичным соотношению для водородоподобного атома [1,2] с помощью введения поправки внутреннего экранирования  $a_1$ , зависящей от  $l$  и  $n$

$$\Delta E_{j_1, j_2} = \frac{\alpha^2 Ry (Z - a_1)^4}{n^3 l(l+1)} \quad (\text{B.28})$$

где  $\alpha = e^2 / \hbar c$  - постоянная тонкой структуры.

Отличие приведенного соотношения (B.28) от аналогичного для водородоподобного атома состоит во введении поправки внутреннего экранирования  $a_1$ , зависящей от распределения электронной плотности **вблизи ядра** ( как  $1/r^k$ , см.(B.27)).

Постоянная же экранирования  $a$  определяет энергию оптического электрона (формула (B.7)) и зависит от распределения **всех** электронов атома в его объеме. Поэтому постоянная

$a$  не тождественна постоянной внутреннего экранирования  $a_1$ . Для элементов с  $Z > 10$  постоянная внутреннего экранирования  $a_1$  меньше постоянной  $a$  (см. табл.2).

Таблица 2

**Значения постоянных  $a$  и  $a_1$   
для атомов щелочных элементов [3]**

Z	Элемент	$a$	$a_1$
3	Li	1,98	2,02
11	Na	9,58	7,45
19	K	17,24	13,03
37	Rb	34,82	26,95
55	Cs	52,45	40,8

Величина расщепления уровня атома щелочного металла значительно больше, чем у атома водорода ( $(Z - a_1) > 1$ , у водорода  $Z = 1$ ) и быстро растет с увеличением  $Z$ .

Это связано со следующим обстоятельством. Как следует из формулы (B.27), величина расщепления уровня пропорциональна  $\left\langle 1/r^k \right\rangle$ , т.е. определяется областью малых значений  $r$ . На малых же расстояниях (внутри атомного остатка) заряд ядра не полностью экранируется электронами внутренних оболочек, поэтому  $(Z - a_1) > 1$ .

Остановимся более подробно на системе обозначений состояния электрона в атоме. Согласно современной теории атома (что частично видно из изложенного выше) состояние электрона в атоме может быть обозначено набором из четырех квантовых чисел, например:

$$n, l, j, m_j;$$

$n$  - главное квантовое число. Оно определяет в первом, самом грубом, приближении энергию электрона в атоме и принимает целочисленные значения:

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

При заданной величине главного квантового числа орбитальное квантовое число  $l$  ограничено условием

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1).$$

Состояния одного электрона, отличающиеся величиной орбитального квантового числа, принято, как отмечено выше, обозначать строчными латинскими буквами в соответствии со схемой:

квантовое число $l$	0, 1, 2, 3...
символ состояния	$s, p, d, f...$

Спиновое квантовое число электрона  $s = 1/2$  определяет величину собственного момента количества движения электрона,  $j$  квантовое число полного момента количества движения электрона. При заданных  $l$  и  $s$  квантовое число  $j$  принимает значения  $j = l + s, l + s - 1, \dots, |l - s|$ , т.е. всего  $2s + 1$  значение.  $m_j$  - магнитное квантовое число. Оно определяет величину проекции полного момента количества движения электрона на выделенное направление (например, направление магнитного поля). При заданном  $j$  оно принимает значения  $m_j = j, j - 1, \dots, -j$ , т.е. всего  $2j + 1$  значений. Если внешних полей нет, то, несмотря на то, что состояние движения электрона в атоме характеризуется **четырьмя** квантовыми числами, энергия валентного электрона в атоме с одним оптическим электроном определяется **тремя** квантовыми числами кванто-

выми числами  $n, l, j$  (внешнего поля нет и нет зависимости от ориентации момента, т.е. от  $m_j$ ; см.(В.24)). Заметим, что энергия водородоподобного атома зависит только от двух квантовых чисел:  $n$  и  $j$  (см.[1]).

Для обозначения состояния электрона в атоме применяется специальная символика, т.е. определенная форма записи заданного набора квантовых чисел. Записывается заглавная латинская буква, соответствующая орбитальному квантовому числу, внизу справа от этой буквы - значение квантового числа  $j$ , слева вверху - значение  $2s + 1$  (так называемая мультиплетность,  $s$  спиновое квантовое число). Перед латинской буквой пишется значение главного квантового числа  $n$ . Основное состояние оптического электрона в атоме щелочного элемента записывается как  $n^2S_{1/2}$ , что соответствует  $L=0, J=1/2, S=1/2, n=2$  для  $Li, n=3$  для  $Na$ , и т.д.

При оптических переходах из одного состояния в другое должны выполняться правила отбора. Эти правила (в дипольном приближении, см.[2]) гласят:

- $\Delta n$  - произвольно
- $\Delta l = \pm 1$
- $\Delta m_s = 0$
- $\Delta j = 0, \pm 1$ .

Т.к. щелочные атомы лишь условно являются одноэлектронными, то квантовые числа валентного электрона, хотя и совпадают с квантовыми числами одного электрона, но обычно изображаются большими буквами.

Для одноэлектронных атомов, уровни энергии которых всегда дублетны, используется также символика, где пишется **строчная латинская буква**, соответствующая орбитальному



квантовому числу, а справа внизу - значение  $j$ . Например:

$$s_{1/2}, p_{1/2}, p_{3/2} \text{ и т.д.}$$

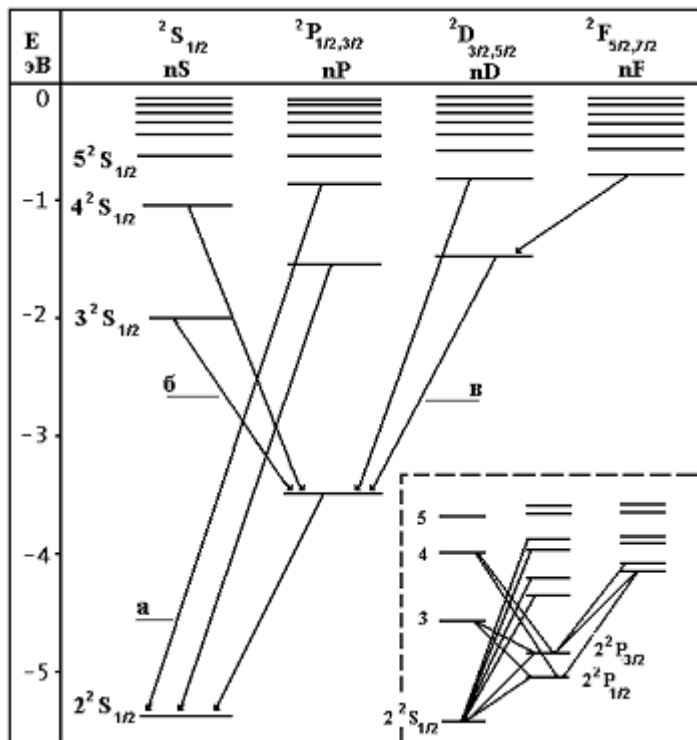


Рис.2 Спектр атома лития: а - главная серия;  
б - резкая серия; в - диффузная серия.

На основании (В.1), в согласии с последними замечаниями, можно графически представить энергетический спектр щелочного элемента, как это показано на рис.2.

Если атом (например, лития) находится в основном состоянии ( $2s$ ), то при возбуждении, согласно правилам отбора, возможны переходы только в  $p$  - состояния и, тем самым, появление главной серии ( $2s \rightarrow np, n=2, 3, 4, \dots$ ). Но  $p$ -

уровни - дублеты, поэтому главная серия будет дублетной (рис.2).

Если атом  $Li$  находится в  $2p$  состоянии, то возможны переходы в  $s$  и  $d$  состояния. При этом в согласии с правилами отбора возникнут дублетные линии резкой серии ( $2p \rightarrow ns, n=3, 4, \dots$ ), а также линии диффузной серии ( $2p \rightarrow nd, n=3, 4, \dots$ ), состоящие из трех компонент (сложный дублет). Резкая и диффузная серии наблюдаются, как правило, в спектрах испускания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. -М.: Наука, 1984, т. II.
2. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику.-М.:Наука, 1988, гл. VI.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.; Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962.
4. Матвеев А.Н. Атомная физика. -М.: Высшая школа, 1989.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.

### СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ АТОМА НАТРИЯ <sup>1</sup>.

Целью настоящей работы является изучение расположения энергетических уровней атомов щелочных металлов, соответствующих орбитальному квантовому числу  $l = 1$  (так называемых  $P$  - уровней), и проверка выражения для энергии атомов щелочных элементов (см. (B.1)):

$$E_{nl} = -\frac{Ry}{(n - \Delta_l)^2} \quad (1)$$

Здесь  $n$  - главное квантовое число;  $\Delta_l$  - квантовый дефект,

$Ry$  - ридберг (13,6 эВ).

Описываемый ниже метод позволяет легко установить положение довольно большого числа  $P$  - уровней щелочных элементов. Принцип метода состоит в следующем. Когда свет, характеризующийся сплошным спектром, проходит через кювету, наполненную парами щелочного металла, то он частично поглощается. Поглощение носит селективный характер, т.е. происходит при вполне определенных частотах. Положение этих частот в спектре зависит от состава и состояния вещества в кювете (т.е. от сорта и состояния атомов и от количества тех образований, которые могут появиться: так, если в кювете заключены, например, пары натрия, линии поглощения будут не

<sup>1</sup>Прежде чем ознакомиться с описанием данной задачи, необходимо изучить некоторые элементы спектроскопии атома и общие сведения о структуре энергетического спектра и спектральных линий атомов щелочных металлов, изложенные во введении к лабораторным работам 6 и 7.

только в области собственных частот атомов  $Na$ , но и в области собственных частот молекул  $Na_2$ , образующихся, в частности, при испарении натрия: например, при  $T = 527^\circ C$  в насыщенном паре содержится 95,5% атомов и 4,5% молекул натрия [2]).

Распределение атомов по уровням энергии при тепловом равновесии определяется законом Больцмана. В условиях проведения данного эксперимента ( $T \cong 500 K$ ) практически все атомы находятся в основном состоянии.

Применение правил отбора (см. (B.29)) показывает, что при поглощении возможны оптические переходы из основного состояния  $^2S_{1/2}$  только в  $^2P_{1/2}$  и  $^2P_{3/2}$  состояния (обратные переходы дают главную серию в излучении). Кроме этих переходов, из основного состояния возможны также переходы в неквантованные состояния: при таких переходах происходит ионизация атома. Зная длины волн линий поглощения, можно легко определить величины энергии  $^2P_{1/2}$  и  $^2P_{3/2}$  - уровней атома. Действительно, энергия  $i$ -го уровня есть  $E_i = E_0 + hc/\lambda_i$ , где  $E_0$  - энергия ионизации атома (со знаком минус). Если  $E_0$  - в электронвольтах, то расчетная формула приобретает вид

$$E_i = E_0 + \frac{hc}{\lambda_i \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \quad (\text{эВ}), \quad (2)$$

где

$$E_0 = - \frac{hc}{\lambda_\infty \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \quad (\text{эВ}) . \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_\infty$  - предельное значение  $\lambda$  (метод определения см. далее);  $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$  эрг·с;  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с;  $\lambda_i$ ,  $\lambda_\infty$  - в сантиметрах.

Как указывалось во "Введении к лабораторным работам N 6 и 7", линии главной серии атомов щелочных металлов (переходы  $2P_{1/2, 3/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ ) имеют сложную структуру - они дублетны.

К сожалению, с помощью спектрографа ИСП-30 дублетное расщепление линий натрия можно наблюдать лишь визуально для первой линии исследуемой главной серии при малых температурах печи (см. ниже).

### 1. Описание установки.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.3. Свет от источника 1 через конденсор 2 направляется на кювету 3 с парами щелочного элемента. Затем прошедший через кювету свет для анализа спектрального состава конденсором 4 направляется на входную щель спектрографа 5.

1. Источником света, обладающим сплошным спектром в области длин волн ниже  $6000 \text{ \AA}$ , является водородная лампа 1 (рис.3) типа ДВС-25. Лампа представляет собой баллон, заполненный водородом, с впаянными внутрь баллона электродами - катодом и анодом. Анод лампы имеет в центре небольшое круглое отверстие для вывода излучения из области разряда. В соответствующем месте стеклянного баллона лампы имеется окошко из увиолевого стекла, пропускающее излучение в ультрафиолетовой области спектра.

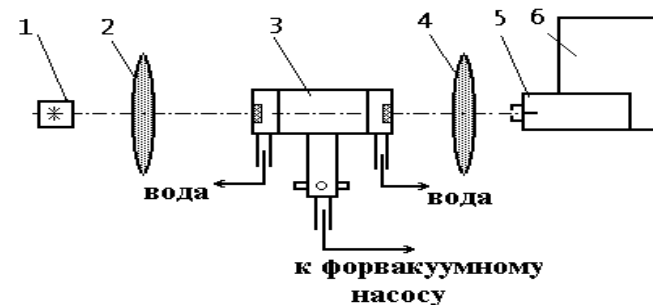


Рис. 3. Блок-схема установки: 1-спектральная лампа (ртутная или водородная); 2-конденсор; 3-кювета; 4-конденсор; 5-спектрограф ИСП-30; 6-блок управления.

Разряд в лампе возникает при столкновении ускоренных электронов с молекулами водорода. Образующиеся при этом электроны и ионы поддерживают разряд. Эти же частицы ответственны за появление интенсивного рекомбинационного свечения разряда в ультрафиолетовой области спектра. При сближении электрона и иона может образоваться нейтральный атом. Поскольку энергия нейтрального атома меньше, чем сумма энергий исходных частиц, избыток энергии выделяется в виде фотона соответствующей частоты. Частота эта может быть определена из условия

$$\hbar\omega = E_{n0} + \frac{\mu v^2}{2}. \quad (4)$$

Здесь  $E_{n0}$  - энергия связи электрона в атоме,  $v$  - относительная скорость электрона и иона,  $\mu$  - их приведенная масса. Энергия связи электрона в атоме - определенная величина (мы обозначили ее  $E_{n0}$ , а не  $E_0$ , чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что образовавшийся при рекомбинации иона

атом может быть и не в основном состоянии; скорость же  $v$  может иметь различные значения в разных элементарных актах). Рассмотрим совокупность тех актов рекомбинации, в результате которых возникли атомы, находящиеся в связанном состоянии с энергией  $E_{n0}$ . Частота излучения, возникающего при рекомбинации, есть

$$\omega = \frac{1}{\hbar} \left( E_{n0} + \frac{\mu v^2}{2} \right) = \omega_{n0} + \frac{1}{\hbar} \frac{\mu v^2}{2} \quad (5)$$

здесь :

$$\omega_{n0} = \frac{E_{n0}}{\hbar} .$$

Если  $v=0$ , то  $\omega = \omega_{n0}$ , если  $v \neq 0$ , то  $\omega > \omega_{n0}$ . Видно, что спектр излучения имеет "красную границу" -  $\omega_{n0}$ . Для различных энергетических уровней, характеризуемых значениями  $E_{n0}$ , "красные границы" будут, конечно, разными. Граница сплошного спектра со стороны больших частот ("фиолетовая граница") отсутствует.

Однако, вероятность рекомбинации при больших относительных скоростях иона и электрона мала, т.е. практически (на пластинке) всегда можно найти эту границу. В отличие от "красной границы", "фиолетовая граница" не является физической постоянной, а зависит от условий разряда в лампе. Кроме областей непрерывного спектра, при рекомбинации наблюдаются также спектральные линии, соответствующие обычному эмиссионному спектру. Они возникают за счет высвечивания атомов, образовавшихся в возбужденных состояниях.

2. Источником спектра сравнения, необходимого для построения градуировочной кривой спектрографа, по которой определяются

длины волн линий поглощения, является ртутная лампа 1 (рис.3) типа ДРГС-12. Длины волн спектра сравнения приведены на фотоконтактной пластинке, находящейся возле компаратора.

3. Кварцевые конденсоры 2 и 4 (рис.3) направляют свет, идущий от источников, на щель спектрографа.

4. Поглощающая среда создается следующим образом. Кусочек щелочного металла (натрия) помещается внутрь цилиндрической вакуумной кюветы из нержавеющей стали (рис.4) с внутренним диаметром в 30 мм. Торцы кюветы закрыты кварцевыми окошками 1, которые шайбами и винтами через резиновые вакуумные уплотнения прижаты к фланцу кюветы. Для того, чтобы щелочной металл не окислялся, кювета откачивается форвакуумным насосом до давления  $10^{-2} - 10^{-3}$  мм  $Hg$ , а затем для предохранения насоса от паров щелочного металла отключается от него зажимом.

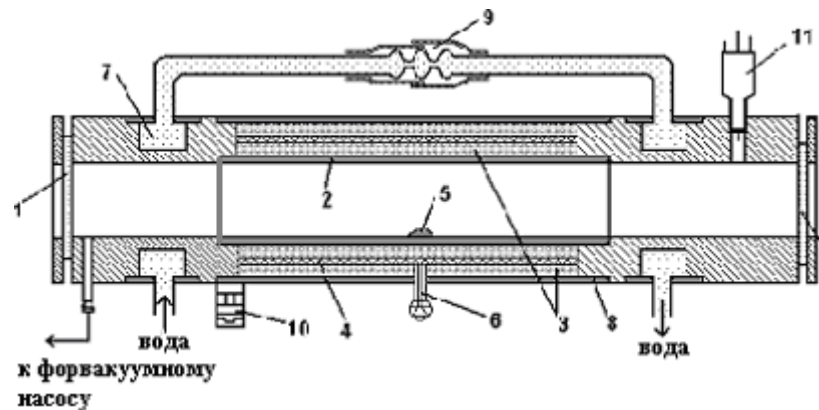


Рис.4. Схема кюветы: 1-кварцевые окна; 2-корпус кюветы; 3-асбестовые прокладки; 4-нихромовая спираль; 5-щелочной металл; 6-терморпара; 7-система охлаждения; 8-кожух; 9-сильфон (для предотвращения деформации корпуса кюветы при нагревании); 10-электроразъем; 11-ввод для манометрической лампы.

Для получения паров щелочного металла кювета нагревается с помощью намотанной на ее корпус 2 нихромовой спирали 4. Горячую кювету следует держать строго горизонтально, не допуская перекоса. Необходимо помнить, что щелочные металлы сильно взаимодействуют с кварцем, попадание капель расплавленного металла на окошки выводит их из строя. В целях предотвращения конденсации паров щелочного металла на торцевых кварцевых окошках 1 и предохранения их вакуумных резиновых уплотнений от воздействия повышенной температуры торцы кюветы охлаждаются водой (система 7).

Как уже указывалось, при прохождении света, имеющего непрерывный спектр, через кювету с парами щелочного металла происходит его поглощение. Спектр поглощения атомарного щелочного металла состоит из ряда отдельных линий и называется линейчатым спектром. Спектр поглощения молекул состоит из тесно расположенных повторяющихся групп линий и называется полосатым спектром поглощения.

Поскольку молекулы могут образовываться, в частности, при испарении щелочного металла, количество молекул в кювете (а, следовательно, и развитость полос поглощения) определяется, в конечном счете, температурой кюветы. Регулируя температуру, можно подобрать такую плотность поглотителя, в котором линии поглощения атомарного элемента резко выражены, а полосы поглощения практически отсутствуют. От температуры кюветы зависит также ширина линий поглощения. С увеличением температуры эта ширина растет (доплеровское уширение, уширение за счет столкновений - все это относится в равной мере как к линиям эмиссии, так и к линиям поглощения) и точность измерений уменьшается. Поэтому необходимо следить за температурой кюветы и не допускать ее перегрева.

При температуре печи, превышающей на  $150-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  температуру плавления щелочного металла, давление его паров достаточно, чтобы обеспечить необходимую для уверенной регистрации спектра поглощения оптическую длину при длине кюветы в 450 мм. Кювета с помощью специальных держателей размещается на оптической скамье между источником света и спектрографом (см.рис.3). Конструкция держателей позволяет, не снимая кюветы со скамьи, отводить ее в сторону от оптической оси установки, что дает возможность, не нарушая юстиров-

ки, впечатывать на пластинку, наряду со спектром поглощения, эталонный спектр, а также наблюдать и фотографировать спектры источников света.

5. Выбранная температура кюветы поддерживается постоянной с помощью терморегулятора ВРТ-3. Терморегулятор состоит из трех блоков: измерительного И-101, регулирующего Р-111 и усилителя У-252 с тиристорным выходным каскадом. Термопара 6 контролирует температуру кюветы в точке максимальной температуры в середине кюветы. Сигнал с термопары (напряжение, пропорциональное температуре) подается в измерительный блок: здесь происходит сравнение этого сигнала с опорным.



Рис.5. Передняя панель блока управления: 1-тумблер включения блока (сеть); 2, 3-тумблеры включения анода и накала лампы ДРГС-12 или ДВС-25 соответственно; 4-тумблер переключения питания на лампы ДРГС или ДВС; 5-тумблер включения печи кюветы; 6-тумблер переключения печи на режим терморегулирования или ручного управления (ЛАТР); 7-ЛАТР; 8-измерительный блок И-101; 9-переключатели установки напряжения датчика; 10-регулирующий блок Р-111; 11-переключатель режима работы Р-111; А—режим автоматического регулирования; В—выкл.; Д—режим дистанционного управления; 12-индикатор рабочего тока; 13-индикатор разбаланса.

Напряжение, пропорциональное разности этих двух сигналов поступает в блок Р-111, который формирует управляющий сигнал для усилителя У-252, включенного в цепь питания кюветы. Изменение сигнала управления на входе блока У-252 приводит к увеличению или уменьшению мощности в цепи активной нагрузки (кюветы) усилителя.

Схема расположения органов управления и индикаторов системы ВРТ-3 приводится на рис. 5.

Индикатор 12 контролирует рабочий ток системы, индикатор 13 - сигнал ошибки в задании температуры.

Тумблер 6 позволяет переключать систему в режим ручного управления. В этом случае в цепь питания кюветы вместо У-252 будет включен автотрансформатор. Его напряжение регулируется ручкой 7.

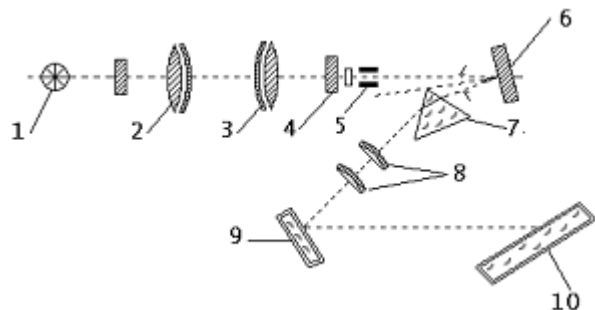


Рис.6. Оптическая схема спектрографа ИСП-30; 1-источник света; 2, 3, 4,-трехлинзовый осветитель; 5-щель; 6-коллиматор с зеркальным объективом, отклоняющий лучи; 7-призма; 8-объектив; 9-поворотное зеркало; 10-фотопластинка.

6.Поскольку в основной линии главной серии натрия лежат в ультрафиолетовой области, в работе используется кварцевый спектрограф ИСП-30, позволяющий фиксировать излучение в

диапазоне длин волн от 2000 до 6000  $\text{Å}$ . На рис.6 приведена его оптическая схема. Параллельный пучок от зеркального объектива 6 падает на призму 7, разлагающую его в спектр. Объектив 8 собирает лучи в фокальной плоскости. Зеркало 9 поворачи-

вает пучок. В фокальной плоскости объектива расположена фотопластинка 10.

## 2. Порядок выполнения работы.

1.Зарядите кассету. В середину кассеты закладывается пластинка, чувствительная к ультрафиолетовой области спектра (изоорто; 9x12). На этой пластинке фиксируется ультрафиолетовая область спектра с  $\lambda < 3500 \text{ Å}$ .

**Видимая область спектра, а именно желтая линия натрия, не попадает в поле зрения пластинки и не фиксируется ею.**

**Пластинки закладывают в кассету эмульсионной стороной к падающему на них свету.**

Режим обработки пластинок указан в фотокабине. При проявлении пластинки необходимо класть в ванночку с проявителем и фиксажем **эмульсией вверх** и следить, чтобы во время проявления они были полностью покрыты проявителем. Тщательно промойте пластинки после фиксирования (не менее 5 мин). Если на пластинке остался серый налет, продолжайте фиксирование.

2.Проверить ширину входной щели спектрографа. Рабочая ширина щели спектрографа должна быть 0,03 мм (см.[1]). Отсчет ширины щели производят по шкале барабанчика с ценой деления 0,001 мм. (Предварительно необходимо визуально определить положение нуля барабанчика).

Ограничить высоту щели. Это делают при помощи диафрагмы с вырезами (так называемая диафрагма Гартмана), которую помещают в насадке перед щелью.

В данной работе обычно используют либо прямоугольный вырез (в средней части диафрагмы) высотой 4 мм, либо так называемый "ласточкин хвост", установленный на эту же высоту. Это позволяет, перемещая кассету по высоте, фотографировать на одну и ту же пластинку как исследуемые спектры, так и спектры сравнения.

Следует отметить, что для очень точных измерений длин волн спектральных линий рекомендуется пользоваться стоящей

перед щелью диафрагмой Гартмана, а кассету не трогать. При этом диафрагму перемещают так, чтобы изучаемый спектр и спектр сравнения были слегка наложены друг на друга краями. Благодаря этому можно при компарировании достигнуть высокой точности в определении относительного расположения спектральных линий исследуемого спектра и спектра сравнения. В данном эксперименте применение такой методики не является обязательным вследствие значительной ширины линий поглощения.

Кассета перемещается по высоте автоматически (см. инструкцию). На рис.7 представлен общий вид спектрографа ИСП-30.

3. Провести внимательное визуальное наблюдение, а затем фотографирование на одну и ту же пластинку (перемещая кассету) спектров ртутной и водородной ламп. Кювета со щелочным металлом при этом должна быть отведена от оптической оси системы.

- (тумблер 3) и анод (тумблер 2) лампы ДРГС. Отъюстировать оптическую систему для получения максимальной освещенности входной щели спектрографа: лампу поместить в фокусе конденсора 2, расстояние между конденсорами 2 и 4 (рис.1) должно быть не меньше длины кюветы со щелочным металлом.
- Сфотографировать спектр (время экспозиции указано в паспорте задачи). Выключить ртутную лампу, т.е. выключить тумблер 2, а затем тумблер 3 (рис. 5);
- включить водородную лампу, для чего перевести переключатель 4 (рис.5) в положение "ДВС", а затем включить накал (тумблер 3) и анод (тумблер 2) лампы. Юстировку лампы и фотографирование ее спектра произвести как указано в п. "б" (см. паспорт задачи). Выключить водородную лампу (тумблеры 2 и 3);
- проявить пластинку. В спектре ртути должна быть хорошо выражена область длин волн  $3300 - 2300 \text{ \AA}$ .

4. Заложить новую пластинку в кассету. Переместить кювету с исследуемым веществом (**закладка щелочного металла в кювету производится только лаборантом**) на оптическую ось установки между конденсорами 2 и 4 (рис.3).

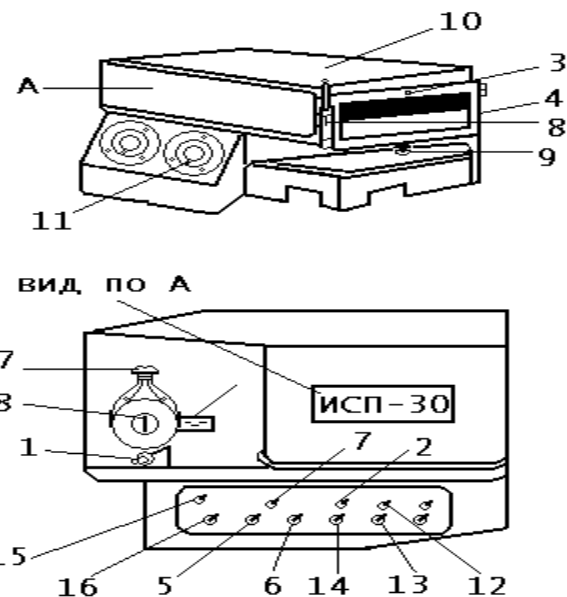


Рис.7. Общий вид спектрографа ИСП-30. 1-барabanчик для фокусировки щели; 2-выключатель затвора; 3- зажим для крепления кассеты; 4-кассетная рамка; 5,6-кнопки для опускания и подъема кассетной рамки; 7-переключатель скорости движения кассеты; 8-шкала для фиксации положения кассеты; 9-сигнальная лампочка; 10-кожух; 11-рукоятка реле времени; 12-выключатель реле времени; 13-кнопка запуска реле времени; 14-кнопка остановки кассетной рамки; 15-выключатель сети; 16-сигнальная лампочка; 17-барabanчик открытия щели; 18-щель прибора; 19-диафрагма Гартмана .

Включить водородную лампу. Установить высоту конденсоров так, чтобы свет от лампы проходил через кювету, не задевая

стенок, и попадал на щель спектрографа. Отъюстировать систему.

5. Включить форвакуумный насос и открыть установленный на нем вакуумный вентиль. При помощи вакуумметра ВИТ-2 (или ВИТ-3) убедиться, что насос откачивает объем. Затем снять зажим с резиновой трубки, соединяющей кювету с вакуумпроводом (рис.4), и **включить водяное охлаждение кюветы**. По истечении 10 мин. откачки кюветы отключить ее от вакуумпровода (пережать резиновую трубку зажимом. **Форвакуумный насос выключается лаборантом**). Далее следует включить печь. Для этого нужно:

- включить терморегулятор ВРТ-3 в режиме автоматического регулирования, т.е. перевести переключатель 6 (рис. 5) в положение "ВРТ", а переключатель 11 регулирующего блока в положение "А" (автоматическое регулирование).
- включить тумблером 5 печь кюветы.
- включить водородную лампу;

**(П.5 выполняется под наблюдением преподавателя или лаборанта).**

**Запрещается включать нагреватель печи, если не пережата резиновая трубка и не включено водяное охлаждение.**

6. Провести визуальное наблюдение спектра поглощения в видимой области спектра по мере постепенного нагревания кюветы: проследить появление первой линии главной серии (единственной линии, расположенной в видимой области), так называемой "D-линии" - желтого дублета натрия. Убедиться в том, что это дублет. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уширению линий и дублетная структура D-линии перестает решаться.

7. Сфотографировать спектры поглощения и сравнения (когда D-линия натрия станет интенсивного черного цвета шириной ~ 2 мм; нахождение стрелки индикатора разбаланса 13 (рис.5) вблизи нуля указывает на то, что в печи кюветы установилась заданная температура).

Для этого:

- сфотографировать спектр поглощения с тремя разными экспозициями;
- выключить водородную лампу;
- не выключая печь, осторожно отвести кювету от оптической оси установки;
- включить ртутную лампу и впечатать спектры сравнения между спектрами поглощения. Выключить ртутную лампу.

8. Проявить пластинки. Снимок считать удовлетворительным, если имеется не менее 15 линий поглощения. Если снимок оказался удовлетворительным, выключить печь, если нет - проанализировать причины неудачи и повторить п. 6 и п. 7.

### 3. Обработка результатов.

Предлагаются два варианта обработки результатов эксперимента:

- 1) на персональном компьютере,
- 2) с помощью построения градуировочной кривой спектрографа.

#### 3.1. Обработка результатов эксперимента на персональном компьютере.

1. Расшифровать спектр ртути с помощью компаратора, наложив полученную пластинку на эталонный образец (эталонный образец находится около компаратора. Он представляет собой отпечаток пластинки в масштабе 1:1 с расшифровкой спектра ртути).

2. Промерить на компараторе положение линий поглощения натрия и линий ртути (по три-четыре линии ртути в окрестности каждой линии поглощения). Измерения начинать с длинноволновой части спектра.

Обработка результатов проводится по описанной ниже программе.

Студент вводит данные обработки спектров натрия и ртути, полученные на компараторе (координаты линий ртути и натрия и длины волн спектра ртути). По известному спектру ртути ЭВМ рассчитывает длины волн линий спектра поглощения натрия.



Основной целью программы является определение квантовых дефектов S-и P- уровней, эффективных зарядов  $Z_{nl}^*$  и энергий  $E_{nl}$ .

#### Меню программы.

1. Введение.
2. Практикум. Обработка результатов. Спектр ртути.
3. Практикум. Обработка результатов. Спектр натрия.
4. Практикум. Таблица результатов. Спектр натрия.
5. Практикум. Распечатка полученных результатов.
6. Практикум. Распечатка сохраненных ранее результатов.
7. Выход.

#### Содержание пунктов меню.

**1. Введение.** Приводятся исходные формулы. Квантовые дефекты  $\Delta_{3s}$  и  $\Delta_{np}$  рассчитываются по полученным в эксперименте длинам волн поглощения натрия путем решения систем из двух уравнений:

$$\frac{1}{\lambda_{3, n_p}} = R \left( \frac{1}{(3 - \Delta_s)^2} - \frac{1}{(n_p - \Delta_p)^2} \right);$$

$$\frac{1}{\lambda_{3, n_p + k}} = R \left( \frac{1}{(3 - \Delta_s)^2} - \frac{1}{(n_p + k - \Delta_p)^2} \right)$$

$$n_p \geq 4; \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

Перебираются пары линий, одна из которых ( $n_p = 4$ ) фиксирована.

По найденным значениям  $\Delta_{3s}$  и  $\Delta_p$  рассчитываются

эффективный заряд  $Z_{nl}^*$  (В.7) и энергии уровней  $E_{nl}$  (В.1), а

также потенциал ионизации  $E_i$  атома натрия.

Во "Введении" даны также правила работы с программой.

Помощь по всем разделам программы вызывается клавишей <F1>. Калькулятор - <F9>. Рабочие клавиши во всех разделах меню расположены в нижней части экрана.

**2. Обработка результатов. Спектр ртути.** По данным расшифровки спектра ртути строится градуировочная кривая спектрографа. Вводятся координаты линий (X) и длины волн ( $\lambda$ ). Ввод чисел упрощается при нажатии клавиши <INS>.

**3. Обработка результатов. Спектр натрия.** Вводятся измеренные координаты линий натрия. По градуировочной кривой определяются длины волн спектра поглощения натрия, которые сведены в таблицу (<PgDn>).

**4. Таблица результатов. Спектр натрия.** Данные расчетов  $\Delta_{3s}$ ,  $\Delta_p$ ,  $Z_{nl}^*$ ,  $E_{nl}$  представлены в таблицах, которые затем распечатываются и предъявляются при сдаче задачи.

### 3.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ГРАДУИРОВОЧНОЙ КРИВОЙ.

1. Построить градуировочную кривую:

- расшифровать спектр ртути, используя эталонный образец (эталонный образец находится около компаратора).
- промерить на компараторе положение до 15 линий ртути в области длин волн от 3500 до 2300  $\text{Å}$ . Одновременно промерить и положение линий поглощения;
- построить градуировочную кривую спектрографа, откладывая по оси X расстояния спектральных линий от какой-либо линии, принимаемой за исходную, а по оси Y-длины волн соответствующих линий ртути.

Масштаб построения графика следует выбрать таким образом, чтобы точность определения длин волн с помощью графика была не хуже  $1 \text{ Å}$ . Такая точность необходима для определения  $\lambda_{\infty}$  (см. ниже).

2. Определить длины волн линий поглощения, используя градуировочную кривую.

3. Определить значения граничной длины волны  $\lambda_{\infty}$  используя полученные из градуировочной кривой значения  $\delta$  последних линий поглощения (в коротковолновой части спектра поглощения). Для этого построить график зависимости разностей  $\Delta\lambda$  между длинами волн соседних линий поглощения от длин волн линий поглощения. Затем экстраполировать полученную кривую до пересечения с осью длин волн (осью X). Точка пересечения дает значение граничной длины волны  $\lambda_{\infty}$ . Используя это значение, рассчитать потенциал ионизации щелочного металла.

4. Определить энергию Р-уровней атома натрия и построить диаграмму уровней, используя значения длин волн спектра поглощения.

5. Рассчитать значения квантовых дефектов для Р- и S- уровней, используя полученные значения потенциала ионизации и энергий Р- уровней.

**При сдаче работы предъявление пластинок обязательно.**

### ЛИТЕРАТУРА

1. Нагибина И.М., Прокофьев В.К. Спектральные приборы и техника спектроскопии. - Л.: Машиностроение, 1967.
2. Несмеянов А.Н. Давление паров химических элементов. - М.: Изд-во АН СССР, 1961.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7.

### ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АТОМА НАТРИЯ<sup>1</sup>.

#### 1. Экспериментальная установка.

Исследование тонкой структуры ряда спектральных линий атома натрия осуществляется на установке, общий вид которой изображен на рис. 8.

**Натриевая лампа.** Источником исследуемого спектра служит натриевая лампа ДНаС-18, представляющая собой стеклянную трубку, в которой разряд происходит в парах натрия. Электроны, ускоренные электрическим полем разряда, при неупругих столкновениях с атомами натрия передают им свою энергию. При этом внутренняя энергия атома возрастает - его оптический электрон переходит из основного состояния в возбужденное (т.е. на какой-либо вышерасположенный энергетический уровень). В возбужденном состоянии атом находится

$10^{-7} - 10^{-8}$  с. Затем оптический электрон с верхнего уровня переходит либо прямо в основное состояние (если это не запрещено правилами отбора), либо на какой-нибудь нижерасположенный уровень, а уже с него в основное (самое глубокое) состояние. При этих переходах электрона разность его энергий на различных уровнях будет излучаться в виде фотонов той или иной длины волны. Так возникает эмиссионный линейчатый спектр в натриевой лампе. Натриевая лампа 2 заключена в охранный металлический кожух и при помощи держателя устанавливается на оптической скамье перед входной щелью ДФС-12. Источником питания натриевой лампы служит блок 3, который включается в сеть тумблером 16. Натриевая лампа включается с помощью тумблера 17.

<sup>1</sup> Прежде чем ознакомиться с описанием данной задачи, необходимо изучить некоторые элементы спектроскопии атома и общие сведения о структуре энергетического спектра и спектральных линий атомов щелочных металлов, изложенные во введении к лабораторным работам 6 и 7.

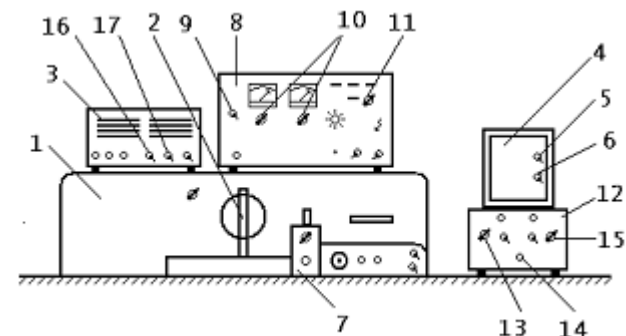


Рис.8. Общий вид установки: 1-двойной монохроматор ДФС-12; 2-натриевая лампа ДНаС-18; 3-блок питания натриевой лампы; 4-автоматический потенциометр КСП-4 (самописец); 5,6-тумблеры включения самописца; 7-блок ФЭУ; 8-блок питания ФЭУ (высоковольтный выпрямитель Б5-24А); 9-тумблер включения выпрямителя Б5-24А; 10-потенциометры установки величины выходного напряжения; 11-тумблер включения высокого напряжения; 12-блок питания самописца; 13-потенциометр установки нуля самописца; 14-тумблер включения блока питания самописца; 15-потенциометр, регулирующий коэффициент усиления ФЭУ; 16-тумблер включения блока питания натриевой лампы; 17-тумблер включения натриевой лампы.

**Двойной монохроматор ДФС-12.** Для исследования тонкой структуры спектральных линий атома натрия в лабораторной работе используется двойной монохроматор типа ДФС-12. Его оптическая схема приведена на рис.9.

Свет от натриевой лампы 1 (см.рис.9) через регулируемую входную щель 2 попадает на плоское поворотное зеркало 3. От него отраженный луч попадает на зеркальный параболический объектив 4, причем в его фокусе находится щель 2. От объектива 4 параллельный пучок света направляется на отражательную дифракционную решетку 5.

Отраженный от решетки 5 свет собирается зеркальным параболическим объективом 6 и направляется на щель 7, которая находится в его фокусе. Пройдя щель 7, монохроматический пучок попадает на параболический объектив 8, а от него на дифракционную решетку 9. Далее отраженный от решетки 9 свет

собирается параболическим зеркальным объективом 10 и направляется на поворотное зеркало 11 и на регулируемую выходную щель 12. Проекционная система 13 направляет световой поток на фотоумножитель 14. Кроме того, выходящий монохроматический луч можно наблюдать через микроскоп 15.

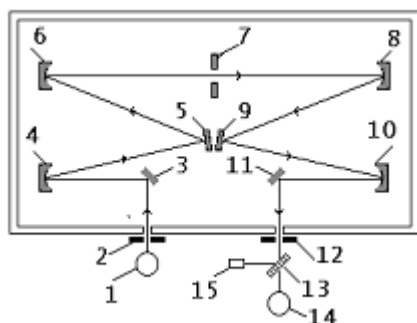


Рис.9. Оптическая схема двойного монохроматора ДФС-12.

Фотоэлектронный умножитель - линейный прибор, т.е. амплитуда сигнала с ФЭУ пропорциональна интенсивности светового потока. Однако, когда интенсивность светового потока велика, линейность может нарушаться из-за искажения поля пространственным зарядом в области анода и последних эмиттеров ФЭУ. Для питания ФЭУ используется высоковольтный выпрямитель Б5-24А (блок питания 8, рис.8). Сигнал с ФЭУ подается на автоматический потенциометр КСП-4 (самописец 4) для записи спектра и последующей ее обработки.

Обе дифракционные решетки 5 и 9 (см. рис. 9) монтируются на одной подставке и поворачиваются одним электродвигателем. Электродвигатель соединен с решетками через коробку передач, которая позволяет получить восемь различных скоростей вращения решеток. Кроме того, при помощи специального дифференциального устройства можно вращать дифракционные решетки вручную рукояткой 1 (см.рис.10). Скорость вращения столика с решетками устанавливается переключателем 2. Решетки будут вращаться с максимальной скоростью, если переключатель 2 установить на отметку "8". (Переключатель 2 можно

установить в восемь различных положений. Скорость вращения решеток увеличивается с изменением положения переключателя от отметки "1" до "8".)

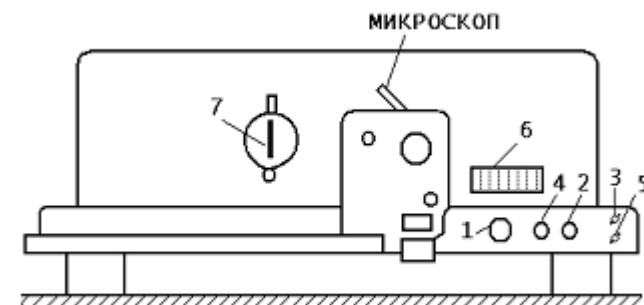


Рис.10. Общий вид двойного монохроматора ДФС-12. 1-рукоятка поворота вручную дифракционных решеток; 2-переключатель скоростей вращения столика с дифракционными решетками; 3-тумблер пуска электродвигателя; 4-тумблер переключения режима вращения (вручную, электродвигателем) столика с решетками; 5-тумблер изменения направления вращения решеток; 6-шкала длин волн; 7-входная щель ДФС-12. 8— фотоэлектронная приставка с выходной щелью и микроскопом.

Рекомендуется запись различных участков спектра натриевой лампы проводить при максимальной скорости вращения решеток. Пуск электродвигателя, вращающего решетки, осуществляется тумблером 3. Однако для того, чтобы решетки начали поворачиваться, необходимо зафиксировать рукоятку 1. При этом столик, на котором крепятся решетки, соединится с коробкой передач.

**Внимание!** Скорость вращения решеток (переключатель 2) устанавливается только при **ВЫКЛЮЧЕННОМ** электродвигателе (тумблер 3 выключен) и только при отключенном механизме поворота решеток (рукоятка 1).

Направление вращения решеток (прямое или обратное) задается тумблером 5 до момента пуска двигателя.

ДФС-12-спектральный прибор достаточно высокого разрешения. Поэтому даже при максимальной скорости вращения решеток запись широкого участка спектра требует значительного времени. При записи узких участков спектра решетки до начала опыта устанавливаются в требуемое положение. Для этого при выключенных тумблерах 3, 4 вручную с помощью шкива 1 поворачивают решетки на нужный угол, который контролируется по шкале 6 указателя длины волны света, попадающего от решетки на выходную щель ДФС-12 и, следовательно, на ФЭУ. Затем, включив тумблеры 3,4 и следя за шкалой длин волн 6, записывают нужный участок спектра.

Для записи спектра используется автоматический потенциометр 4 (рис.8) типа КСП-4, нуль которого устанавливается при помощи потенциометра 13 блока питания 12 (рис.8). На передней панели блока питания расположен тумблер 14 (рис.8), с помощью которого самописец включается в сеть. Высоковольтное напряжение на ФЭУ подается после включения тумблеров 9 и 11 (рис.8). В окне самописца непосредственно у бумажной ленты справа расположены тумблер 5 включения механизма протяжки бумажной ленты и тумблер 6, после включения которого сигнал ФЭУ поступает в блок управления работой пера самописца. Величина (усиление) сигнала ФЭУ регулируется потенциометром 15.

## 2. Задание.

1. До начала работы в лаборатории рассчитать уровни энергии атома натрия при помощи соотношения (см.(В.1))

$$E_{nl} = - \frac{Ry}{(n - \Delta_l)^2} .$$

и данных таблицы 1 (см. Введение п.1), а также (см. формулу (В.3)) длины волн, возникающие при переходах:

резкой серии	$3p \rightarrow 5s$ $3p \rightarrow 6s$
диффузной серии	$3p \rightarrow 4d$ $3p \rightarrow 5d$
главной серии	$3s \rightarrow 3p$ .

Определить число компонент тонкой структуры каждой из указанных линий.

2. Записать тонкую структуру спектральных линий, возникающих при указанных в п.1 переходах при помощи ДФС-12 и самописца.

3. Определить величину расщепления уровней натрия при помощи полученных спектрограмм. Установить, какими уровнями ( $p, d$ ) определяется это расщепление.

4. Определить поправку внутреннего экранирования  $a_1$  для атома  $Na$ , зная величину расщепления  $3p$  уровня натрия и используя соотношение (см. также формулу (В.28)):

$$\Delta E_{j_1, j_2} = \frac{\alpha^2 Ry (Z - a_1)^4}{n^3 l(l+1)} .$$

Сравнить ее с величиной поправки  $a$ , вычисленной по формуле (см.(В.8))

$$a = Z - \frac{n}{n - \Delta_l}$$

используя данные таблицы 1 ( см. Введение ).

5. Рассчитать по данным таблицы 3, где приведены величины энергий  $3p$ -уровней и значения  $\Delta E_{j_1, j_2}$  для уровня  $3p$ , по-

правки экранирования  $a$  изоэлектронного ряда (формула (В.9)), внутренние поправки экранирования  $a_l$  для расщепления уровней  $3p$  (формула (В.28)), а также величины  $n_{эфф}$  (формула (В.2)) для щелочноподобных ионов.

Таблица 3.

**Энергии  $E$  и мультиплетные расщепления  $\Delta E_{j_1, j_2}$  для  $3p$ -уровней изоэлектронного ряда.**

	$E, \text{см}^{-1}$ $3^2P$ Рассчитанное значение	$\Delta E, \text{см}^{-1}$ Эксп. значение
NaI	85537	91,55
MgII	175616	232,5
AlIII	292500	460,3
SiIV	435280	794,6
PV	603480	1263,0
SVI	797646	1890,0

### 3. Порядок выполнения работы.

1. Установить натриевую лампу точно перед входной щелью монохроматора ДФС-12, а затем включить ее. Для чего:

- тумблером 16 включить блок питания 3 натриевой лампы (рис.8)
- затем через 1-2 мин. тумблером 17 включить лампу. В правильности положения натриевой лампы относительно щели монохроматора можно убедиться при помощи микроскопа (см.рис.10). Для этого при помощи рукоятки 1 (см.рис.10). вручную повернуть дифракционные решетки на такой угол, чтобы вывести на выходную щель наиболее интенсивную линию спектра атома натрия - резонансную линию с  $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ , что контролируется по шкале 6 (см. рис.10). Затем, слегка перемещая натриевую лампу (по горизонтали и по вертикали) и одновременно наблюдая в микроскоп, добиться равномерной максимальной освещенности входной щели.

2. Включить ФЭУ. Для этого:

- установить при помощи потенциометров 10 (рис.8) величину выходного напряжения на выпрямителе 8, указанную в паспорте лабораторной работы;
- при помощи тумблера 9 включить выпрямитель 8;
- через 2-3 мин. с помощью переключателя 11 подать высокое напряжение на ФЭУ.

3. Убедившись в том, что тумблеры 3 и 4 (см. рис.10) выключены (пуск электродвигателя и переключение режима вращения решеток), включить тумблером 14 блок питания самописца 4 (см. рис.8).

4. Установить переключатель скорости вращения решеток 2 на отметку "8" (см. рис. 10).

**ВНИМАНИЕ! Не допускается переключение скоростей при включенном электромоторе и вращающихся решетках, т.е. при включенных тумблерах 3 и 4 (см. рис. 10).**

5. Вращая ручную рукоятку 1 (см. рис.10), установить на шкале 6 длину волны (т.е. повернуть решетки) в положение  $\lambda_i$ , где

$\lambda_i = \lambda_k \pm 20 \text{ \AA}$  (знак  $\pm$  в зависимости от направления вращения решеток), а  $\lambda_k$  одна из длин волн, подлежащих записи.

6. Включить механизм протяжки ленты (тумблер 5) на самописце (рис. 8); подать сигнал с ФЭУ на блок управления пером самописца (тумблер 6).

7. Установить перо самописца вблизи левого края бумажной ленты с помощью потенциометра 13 (рис. 8).

8. При медленном равномерном вращении ручную (рукоятка 1, рис.10) дифракционных решеток, подбирая для линии  $5890 \text{ \AA}$  ширины входной и выходной щелей и коэффициент усиления сигнала на самописце (потенциометр 15, рис.8), добиться хорошего разрешения и оптимальной величины амплитуды сигнала на самописце (сигнал не должен зашкаливать). Следите за тем, чтобы ширины входной и выходной щелей монохроматора были приблизительно равны.

9. Установив подобранные при выполнении п.8 ширины щелей и коэффициент усиления сигнала на самописце, включить электродвигатель (тумблер 3), механизм вращения решеток (тумблер 4, рис. 10) и записать линии автоматически. Те же самые операции повторить для остальных линий натрия. После записи линий необходимо выключить самописец (тумблеры 5 и 6, рис. 8) и электродвигатель монохроматора (тумблер 3, рис. 10).

10. Если запись окажется неудовлетворительной (не разрешается тонкая структура, нет четкого максимума в профиле линий), то ее следует повторить. Однако при этом необходимо предварительно так отрегулировать ширины входной 2 и выходной 12 щелей ДФС-12 (см. рис.9), величину сигнала с ФЭУ (потенциометр 15, рис.8), чтобы четко фиксировалась тонкая структура линии.

11. Отметить на ленте самописца длину волны, отвечающую максимальной величине сигнала. Длину волны установить по отсчетам со шкалы длин волн 6 (рис. 10).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. -М.: Наука, 1983, т. II.
2. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику. -М.: Наука, 1988, гл. VI.
3. Матвеев А.Н. Атомная физика. -М.: Высшая школа, 1989.

*Учебное издание*

**С.В.Ищенко, С.С.Красильников, Н.А.Красильникова,  
И.А.Савченко, А.В.Смирнов, В.В.Тарасова.**

**Спектр поглощения атома натрия**  
Лабораторная работа № 6

**Тонкая структура спектральных линий  
атома натрия**  
Лабораторная работа № 7

Методическое пособие для студентов 3-го курса физического  
факультета МГУ

ИД № 00545 от 06.12.1999

**Издательство УНЦ ДО**

117246, Москва, ул. Обручева, 55А  
119992, Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, Ж-105а  
Тел./факс (095) 718-6966, 939-3934  
e-mail: izdat@abiturcenter.ru  
<http://www.abiturcenter.ru>

Гигиенический сертификат № 77.99.2.925.П.9139.2.00 от 24.02.2000  
Налоговые льготы – Общероссийский классификатор продукции  
ОК – 005 – 93, том 1 – 953000

Заказное. Подписано в печать 01.06.2005 г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная № 2. Усл.печ.л. 1  
Тираж 70 экз. Заказ №

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО в  
полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета.