

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.6.

### СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Цель работы:** знакомство с проявлением спин-орбитального взаимодействия на примере изучения спектров натрия.

**Приборы и принадлежности:** отражательная дифракционная решетка, гониометр ГС-5, натриевая лампа.

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектров щелочных металлов при помощи приборов большой разрешающей способности показало, что некоторые линии спектра являются двойными, т.е. представляют собой дублет. Таким дублетом является, в частности, характерная желтая линия Na с  $\lambda_1 = 5890 \text{ \AA}$  и  $\lambda_2 = 5896 \text{ \AA}$ .

Использование гониометра ГС-5 с отражательной дифракционной решеткой, имеющей 600 штрихов на миллиметр, позволяет определить с точностью до  $\pm 0,5 \text{ \AA}$  длины волн желтого дублета в спектре атома Na и рассчитать разность энергий соответствующих уровней.

Расщепление энергетических уровней в атоме на несколько подуровней обусловлено релятивистской зависимостью энергии электрона от скорости и спин-орбитальным взаимодействием и называется *тонкой структурой*. Спин-орбитальное взаимодействие обусловлено взаимодействием собственного магнитного момента электрона с магнитным полем, создаваемым при орбитальном движении электрона в электростатическом поле ядра, и также имеет релятивистскую природу.

Атомы щелочных металлов – лития, натрия, калия, рубидия и т.д. имеют один валентный электрон, который в нормальном состоянии является S-электроном, т.е. обладает орбитальным моментом равным нулю. Атом Na ( $Z = 11$ ) содержит 11 электронов и имеет следующее распределение электронов в основном состоянии (электронную конфигурацию):  $1s^2 2p^2 2p^6 3s^1$ . Десять электронов образуют конфигурацию инертного газа с полностью заполненной оболочкой (внутренние электроны), составляя вместе с ядром атомный остаток – ион с зарядом, равным заряду протона, а 11-ый валентный электрон попадает в состояние  $3s$  и определяет химические свойства атома.

В отличие от атома водорода и водородоподобных ионов, в которых ядро непосредственно воздействует на единственный электрон, в атоме щелочных металлов на внешний электрон воздействует не только ядро, но и экранирующие его внутренние электроны. Из-за этого, к

$$\Delta_{3,0} = -1,37, \text{ для } \Delta_{3,1} = -0,883.$$

Для излучательных переходов выполняются правила отбора. Разрешенными являются переходы с изменением квантовых чисел:  $\Delta l$  – любое,  $\Delta l = \pm 1$ .

в спектре атомов натрия наблюдаются следующие серии (указанные на рис. 4.6.1):

*главная:*  $3s - np$ ,  $n = 3, 4, 5 \dots$

*резкая:*  $3p - ns$ ,  $n = 4, 5, 6 \dots$

*диффузная:*  $3p - nd$ ,  $n = 3, 4, 5 \dots$

*основная:*  $3d - nf$ ,  $n = 4, 5, 6 \dots$

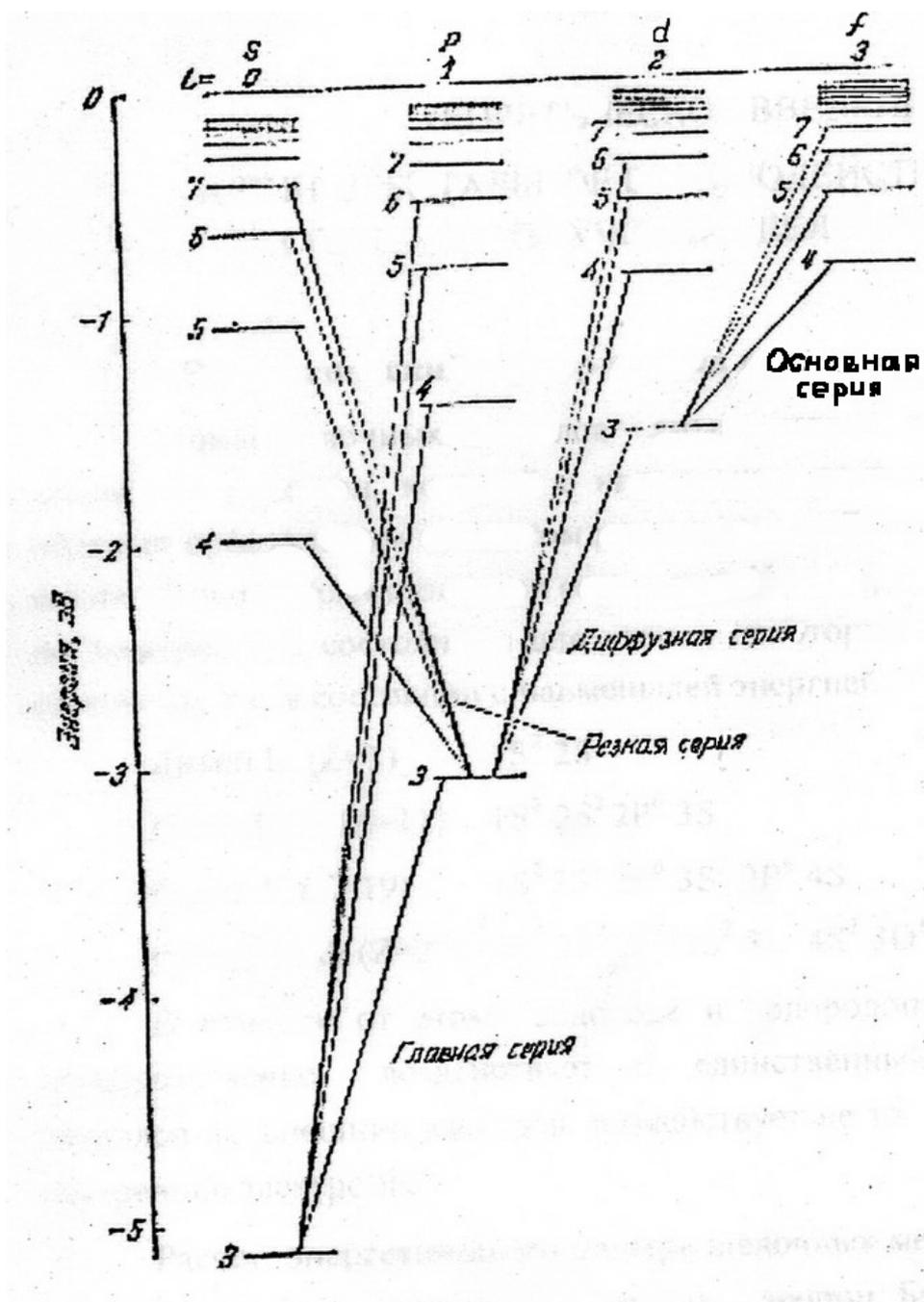


Рис. 4.6.1

При учете спин-орбитального взаимодействия энергия валентного электрона в атомах щелочных металлов оказывается зависящей не только от главного квантового числа  $n$  и орбитального числа  $l$ , но и от квантового числа полного момента импульса  $j = l \pm \frac{1}{2}$  (если  $l = 0$ , то  $j = \frac{1}{2}$ ). Для излучательных переходов выполняется правило отбора для числа  $j$ :  $\Delta j = \pm 1$  или  $\Delta j = 0$ .

Тонкая структура спектров обусловлена тонкой структурой уровней, т.е. зависимостью энергии от квантового числа  $j$ . В основном состоянии атомов щелочных металлов валентный электрон находится в  $ns$ -состоянии ( $l = 0$ ,  $j = \frac{1}{2}$ ). Ближайшее возбужденное состояние – это  $np$ -состояние ( $l = 1$ ,  $j = 1/2, 3/2$ ). Спин-орбитальное взаимодействие приводит к расщеплению  $p$ -уровня на два подуровня с  $j = 1/2$  и  $j = 3/2$ . Переходы между основным  $s$ -уровнем и возбужденными расщепленными  $p$ -уровнями

приводят к появлению дублетов в спектрах щелочных металлов.

В спектроскопии состояние электрона в атоме обозначают следующим образом:  $3S_{1/2}$  соответствует состоянию с  $n=3, l=0, j=1/2$ ;  $4P_{3/2}$  соответствует состоянию с  $n=4, l=1, j=3/2$  и т.д. Тонкая структура уровней приводит к расщеплению спектральных линий (рис. 4.6.2). В главной и резкой сериях наблюдаются дублеты (т.к.  $s$ -уровни не расщеплены, а  $p$ -уровни состоят из двух подуровней), а в диффузной серии – триплеты (т.к. оба уровня  $3p - nd$  расщеплены).

Исследуемый в данной работе дублет натрия соответствует переходам  $3S_{1/2} \leftarrow 3P_{1/2}$  и  $3S_{1/2} \leftarrow 3P_{3/2}$ . Эту двойную спектральную линию, принадлежащую главной серии, называют *резонансной* – она является самой интенсивной.

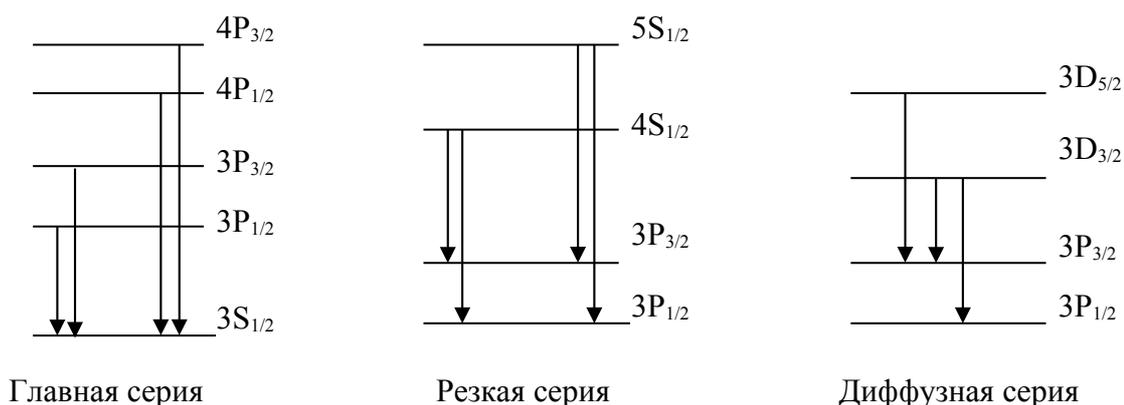


Рис. 4.6.2

Тонкая структура уровней присутствует и у атомов водорода. Энергетические уровни атома водорода и водородоподобных ионов определяются формулой тонкой структуры (формулой Дирака):

$$E_{nj} = -\frac{RhcZ^2}{n^2} \left[ 1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{n} \left( \frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) \right],$$

где  $R$  – постоянная Ридберга,  $\alpha = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}$  – постоянная тонкой структуры. Согласно этой формуле, расстояние  $\Delta E_n$  между подуровнями ( $n, j=1/2$ ) и ( $n, j=3/2$ ) составляет  $\Delta E_n = \frac{1}{2} \frac{Rhc \alpha^2 Z^4}{n^3}$ . Для уровня  $n=2$  атома водорода  $\Delta E_n = 0,45 \cdot 10^{-4}$  эВ. По порядку величины это значение совпадает с расщеплением  $3p$ -уровня атома натрия.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Прибором, осуществляющим спектральное разложение исследуемого излучения, является отражательная дифракционная решетка. Решетка представляет собой стеклянную пластинку, покрытую зеркально отражающим металлическим слоем, на поверхность которого с помощью алмазного резца нанесено большое число параллельных штрихов (в используемой установке – 600 штрихов на миллиметр).

Угол  $\varphi_m$ , определяющий направление на максимумы  $m$ -го порядка, связан с периодом решетки  $d$  и углом падения света на решетку  $\varphi_0$  (см. рис.4.6.3) условием

$$(\sin \varphi_0 - \sin \varphi_m) d = m\lambda \quad (1)$$

Эта формула дает возможность определять длины волн в спектре исследуемого излучения по измеренным значениям  $\varphi_0$  и  $\varphi_m$ . Эти углы измеряются с помощью гониометра (фото 1)

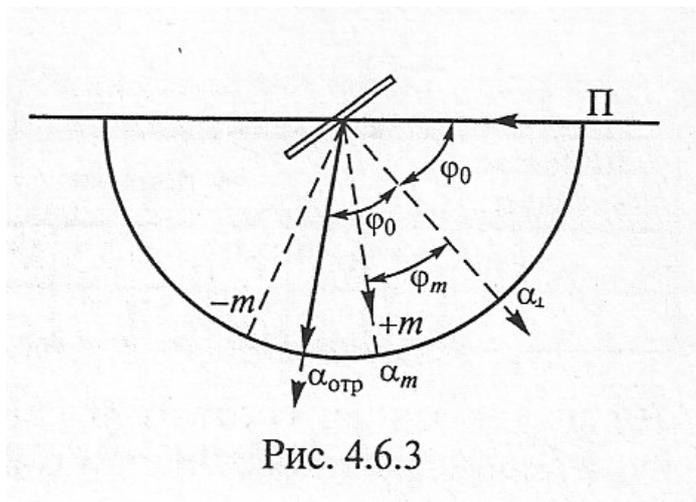


Рис. 4.6.3



Фото 1

### ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение длины волны какой-либо линии спектра предусматривает следующую последовательность операций.

1. Поворачивая столик гониометра, установите решетку так, чтобы пучок света, выходящий из коллиматора, падал на нее примерно под углом  $60^\circ$ .
2. Включите исследуемый источник излучения (натриевую лампу).
3. Освободив стопорный винт 10 (рис. 4.6.5.), поверните зрительную трубу и убедитесь, что при определенных положениях можно наблюдать дифракционные максимумы нулевого (зеркально отраженный свет), 1-го и 2-го порядков (при выбранном угле падения максимум 1-го порядка будет виден справа от максимума нулевого порядка, максимум 2-го порядка – справа от максимума 1-го порядка).

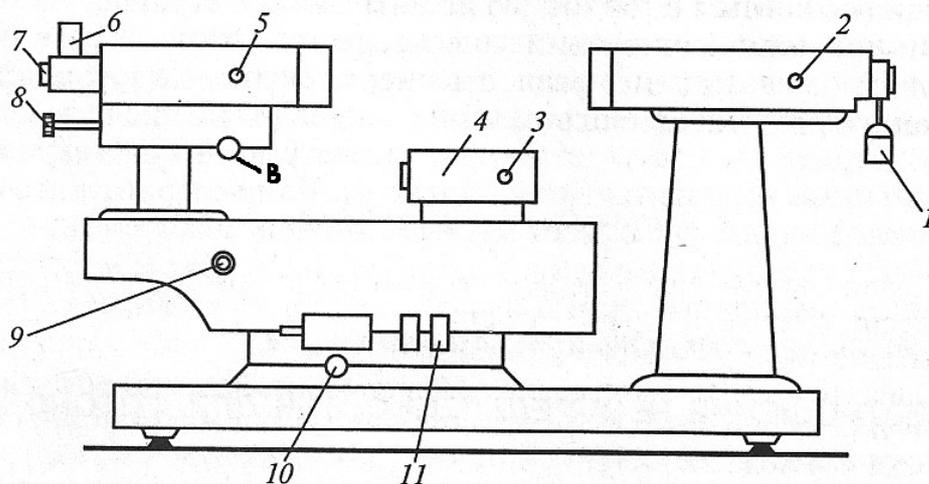


Рис. 4.6.5

#### 4. Измерьте угол падения $\varphi_0$ .

Как видно из рисунка 4.6.3,  $\phi_0 = \alpha_{отр} - \alpha_{\perp}$ , где  $\alpha_{отр}$  и  $\alpha_{\perp}$  – соответствующие этим углам отсчеты по шкале гониометра, которые можно определить, пользуясь автоколлимационной установкой зрительной трубы.

Для определения  $\alpha_{\perp}$  надо установить трубу так, чтобы ее ось была перпендикулярна плоскости решетки. Для этого поворачивайте трубу до тех пор, пока в ее поле зрения не появится второе изображение креста, обусловленное отражением выходящего из трубы пучка света от плоскости решетки (фото 2). С помощью винта 11 и винта В (он расположен под винтом 5) добейтесь точного совпадения изображения креста с самим визирным крестом (фото 3). Закрепите стопорный винт 10 и определите по шкалам гониометра значение  $\alpha_{\perp}$ .

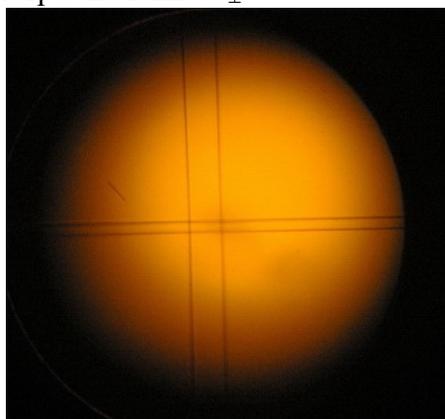


Фото 2

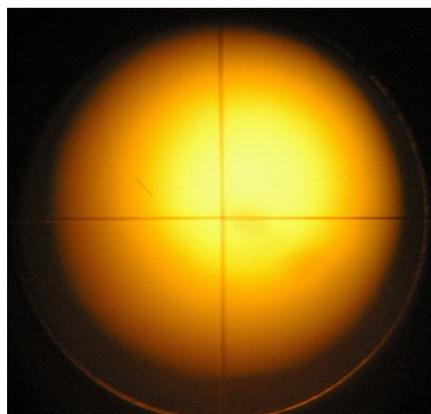


Фото 3

Затем переведите трубу (предварительно освободив винт 10) в положение, соответствующее зеркально отраженному пучку, и, совместив крест нитей с изображением линии, отсчитайте значение  $\alpha_{отр}$ .

Освободив стопорный винт 10, возвратите трубу в первоначальное положение и снова снимите отсчет  $\alpha_{\perp}$ , затем снова найдите  $\alpha_{отр}$ . т. д. Эту операцию проделайте два раза, после чего вычислите среднее значение  $\alpha_{\perp}$  и  $\alpha_{отр}$  точно до секунды.

5. Поворачивайте трубу вправо до тех пор, пока не увидите в поле зрения дублетную линию - спектр первого порядка (фото 4). Совместив вертикаль визирного креста с изображением сначала первой компоненты дублета, а затем второй, найдите, как описано выше, соответствующие им углы два значения  $\alpha_1^*$   $\alpha_1^{**}$ . Измерения проведите два

раза и найдите среднее значение для каждой компоненты. Аналогичные измерения сделайте и для линий в спектре 2-го порядка.

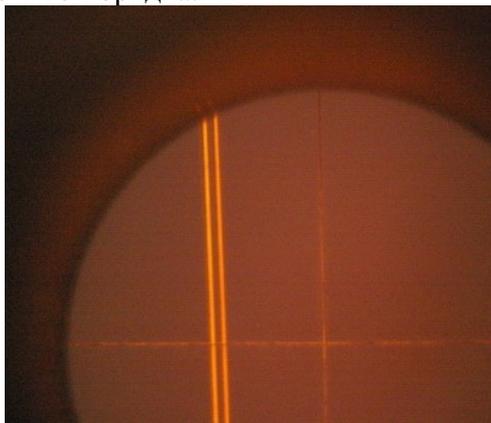


Фото 4

6. Пользуясь полученными средними значениями, найдите углы  $\phi_0 = \alpha_{\text{отр}} - \alpha_i$ ,  $\phi_1 = \alpha_1 - \alpha_i$  и т.д. Вычислите значения синусов этих углов с шестью значащими цифрами.

7. Используя формулу (1), рассчитайте искомую длину волны с точностью до 1Å.

**Задание 1. Измерение длины волн двух желтых линий дублета Na в спектре 1-го и 2-го порядков.**

Осветив щель гониометра натриевой лампой, найдите в спектрах 1-го и 2-го порядка характерный для излучения натрия дублет (две близко расположенные линии ярко желтого цвета в спектре 1-го порядка и две более бледные линии в спектре 2-го порядка). Пользуясь приведенной выше методикой, получите значения длин волн дублета натрия с точностью до  $\pm 0,5\text{Å}$ . Постоянная решетки берется с точностью до пяти значащих цифр. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Измерение угла падения				1-ый порядок								
$\alpha_{\text{отр}}$	$\alpha_{\perp}$	$\varphi_0$	$\sin \varphi_0$	$\alpha_1^*$	$\alpha_1^{**}$	$\varphi_1^*$	$\varphi_1^{**}$	$\sin \varphi_1^*$	$\sin \varphi_1^{**}$	$\lambda^*$	$\lambda^{**}$	$\Delta\lambda$
<i>p</i>												

2-ой порядок									
$\alpha_2^*$	$\alpha_2^{**}$	$\varphi_2^*$	$\varphi_2^{**}$	$\sin \varphi_2^*$	$\sin \varphi_2^{**}$	$\lambda^*$	$\lambda^{**}$	$\Delta\lambda$	

**Задание 2. Определение разности энергий линий дублета Na.**

Найдите разность энергий уровней дублета Na в электронвольтах

### ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Почему постоянная тонкой структуры играет важную роль в квантовой теории? Что она характеризует?
2. Убедиться, что  $\alpha$  – величина безразмерная.
3. Оценить расщепление уровней 2P состояния атома водорода и необходимую для наблюдения тонкой структуры 2P - 1S перехода разрешающую способность прибора.
4. Оценить разрешающую способность прибора, необходимую для наблюдения желтого дублета линии Na.
5. Приведите примеры и обозначьте на схеме разрешенные правилами отбора переходы, принадлежащие главной серии, резкой серии и диффузной серии атома Na.
6. Какими экспериментами подтверждается наличие спина у электрона?