

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В.Скобельцына

## **Атомный практикум**

**Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана**

Лабораторная работа №15

*Москва*  
*2020*

## **Оглавление**

1. Введение. ....	2
2. Общая теория. Атом в слабом магнитном поле. ....	3
3. Эффект Зеемана для атома цинка .....	6
4. Описание установки. ....	9
5. Порядок подготовки к выполнению работы. ....	13
6. Литература. ....	15
7. Руководство по работе с ПЗС-линейкой .....	16
8. Инструкция по обработке в программе Origin .....	21
9. Задание к сдаче. ....	25
Приложение. Интерферометр Фабри-Перо . ....	27

## 1. Введение.

Если источник излучения поместить в магнитное поле, то уровни энергии атомов расщепляются на ряд подуровней. Как следствие, спектр излучения, испускаемого этими атомами, изменяется: *каждая линия в оптической части спектра расщепляется на несколько компонент*. Это явление называется *эффектом Зеемана*, в честь физика, открывшего его в 1896 году.

В зависимости от напряженности магнитного поля можно наблюдать разные виды расщепления, есть разделение на случаи слабого и сильного поля. *Слабым* называется магнитное поле, в котором зеемановское расщепление (уровней или линий) значительно меньше их естественного расщепления, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием:  $\Delta E_{\text{магн}} \ll \Delta E_{LS}$ .

В слабом магнитном поле различают *простой* и *сложный* эффекты Зеемана. В *простом (нормальном)* эффекте Зеемана спектральная линия расщепляется в магнитном поле напряженности  $H$  на две компоненты, если наблюдение ведется вдоль силовых линий магнитного поля, или на три компоненты, если наблюдение ведется под прямым углом к направлению силовых линий. При этом интервал между зеемановскими компонентами составляет в первом случае  $2\Delta k_0$  (2 компоненты со смещением  $\pm \Delta k_0$  относительно линии, наблюдаемой без магнитного поля), во втором -  $\Delta k_0$  (3 компоненты со смещением 0 и  $\pm \Delta k_0$ ), где  $\Delta k_0$  – нормальное лоренцевское расщепление в волновых числах. Простой эффект Зеемана наблюдается на синглетных линиях (мультиплетность  $2S + 1$  равна единице).

В остальных случаях имеет место *сложный (аномальный)* эффект Зеемана. Интервалы между компонентами выражаются рациональными дробями от нормального расщепления  $\Delta k_0$  [1-3], а также число компонент, в общем

случае, отличается от наблюдаемого в простом эффекте Зеемана.

В **сильном** магнитном поле происходит разрыв  $LS$  связи, каждый из векторов орбитального  $\vec{L}$  и спинового момента  $\vec{S}$  независимо взаимодействует с магнитным полем, а также  $\Delta E_{LH}, \Delta E_{SH} \gg \Delta E_{LS}$

Это называется эффектом Пашена-Бака. При этом сложный эффект Зеемана переходит в простой.

Остаточная  $LS$ -связь проявляется в виде тонкой структуры зеемановских компонент, не зависящей от напряженности магнитного поля. Подробнее об этом, см. [1-3].

## 2. Общая теория. Атом в слабом магнитном поле.

Физической причиной появления эффекта Зеемана является расщепление уровней энергии атома в постоянном магнитном поле. Рассмотрим более подробно.

Атом представляет собой магнитный диполь с магнитным моментом  $\vec{\mu}$ , и дополнительная энергия, приобретаемая атомом в магнитном поле:

$$\Delta E_{\text{магн}} = -(\vec{\mu}\vec{H}) \quad (1)$$

Когда  $LS$ -связь не разорвана (слабое магнитное поле), магнитный момент  $\vec{\mu}$  представляется как полный магнитный момент:

$$\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S = (-\mu_B\vec{L}) + (-2\mu_B\vec{S}) \quad (2)$$

Здесь  $\vec{L}$  и  $\vec{\mu}_L$  – механический и соответствующий ему магнитный орбитальные моменты,  $\vec{\mu}_S$  – аналогично для спиновых моментов,  $\vec{\mu}_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 0.927 \cdot 10^{-20}$  эрг/Эрстед – магнетон Бора.

Из-за разных гиромагнитных соотношений для орбитального и спинового моментов вектор полного магнитного момента  $\vec{\mu}_j$  будет не коллинеарен вектору полного механического момента  $\vec{J}$ . Поэтому имеет смысл рассматривать

проекцию  $\vec{\mu}_{eff}$  полного магнитного момента на ось полного механического момента. И для нее возможно записать гиромагнитное соотношение:

$$\vec{\mu}_{eff} = -g\mu_B\vec{J} \quad (3)$$

Здесь вводится фактор Ланде  $g$ :

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (4)$$

Тогда энергия взаимодействия магнитного момента атома с магнитным полем есть

$$\Delta E_{\text{магн}} = \mu_B H g m_j \quad (5)$$

а полная энергия атома, помещенного в магнитное поле напряженности  $H$ , равна

$$E = E_0 + \Delta E_{\text{магн}} \quad (6)$$

$E_0$  - энергия атома без учета взаимодействия с магнитным полем ( $H = 0$ ).

В (4)-(5)  $S$  - квантовое число полного спинового момента,  $L$  - квантовое число полного орбитального момента,  $J$  - квантовое число полного момента количества движения,  $m_j$  - проекция полного момента количества движения на направление магнитного поля (магнитное квантовое число).

Проекция магнитного момента  $m_j$  может принимать значения от  $-J$  до  $J$  через единицу (всего  $2J + 1$  значение):

$$m_j = -J, -J + 1, \dots, J - 1, J$$

Следовательно каждый уровень энергии атома при  $H \neq 0$  расщепляется на  $2J + 1$  подуровней. Эти уровни будут иметь разные энергии, если фактор Ланде не равен нулю (состояний с  $g = 0$  не так много, но они есть!).

Величина расщепления линии определяется из разности энергий уровней, между которыми происходит переход:

$$\begin{aligned} \hbar\omega_{21} = E_2 - E_1 &= E_{02} - E_{01} + (\Delta E_2 - \Delta E_1) = \hbar\omega_0 + \hbar\Delta\omega = \\ &= \hbar\omega_0 + \mu_B H (g_2 m_{j_2} - g_1 m_{j_1}) \end{aligned}$$

где  $\omega_0$  – частота несмещенной компоненты ( $H = 0$ ),  $g_2, g_1, m_{J_2}, m_{J_1}$  – факторы Ланде и магнитные квантовые числа верхнего и нижнего уровней, соответственно.

Отсюда смещение по частоте:

$$\Delta\omega = \frac{\mu_B H}{\hbar} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = \Delta\omega_0 (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) \quad (7)$$

и смещение по волновому числу:

$$\begin{aligned} \Delta k &= \frac{\mu_B H}{hc} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = \Delta k_0 (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = \\ &= \frac{eH}{4\pi mc^2} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) \end{aligned} \quad (8)$$

где  $k = 1/\lambda$  – волновое число в  $\text{см}^{-1}$ , магнитное поле  $H$  – в Эрстедах.

Нормальное лоренцевское расщепление, пропорциональное напряженности магнитного поля, выраженное в  $\text{с}^{-1}$  или  $\text{см}^{-1}$ :

$$\Delta\omega_0 = \frac{\mu_B H}{\hbar} = 8,7897 \cdot 10^6 \cdot H \quad (\text{с}^{-1}) \quad (9)$$

$$\Delta k_0 = \frac{\mu_B H}{hc} = 4,67 \cdot 10^{-5} \cdot H \quad (\text{см}^{-1}) \quad (10)$$

Переходы между зеемановскими подуровнями разных состояний удовлетворяют правилам отбора

$$\begin{aligned} \Delta m_j &= m_{J_2} - m_{J_1} = \pm 1 \quad - \sigma\text{-компоненты} \\ \Delta m_j &= 0 \quad - \pi\text{-компоненты} \end{aligned} \quad (11)$$

$\pi$ -компоненты поляризованы линейно вдоль поля,  $\sigma$ -компоненты в продольном поле поляризованы по кругу.

Полученный результат (8) можно представить в другом виде:

$$\frac{\Delta k}{\Delta k_0} = g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1} = g_2 m_{J_2} - g_1 (m_{J_2} + \Delta m_j) \quad (12)$$

Согласно (11) для  $\pi$ -компонент:

$$\frac{\Delta k_{\pi}}{\Delta k_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1) \quad (13)$$

для  $\sigma$ -компонент

$$\frac{\Delta k_{\pi}}{\Delta k_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1) - \Delta m_J g_1 \quad (14)$$

Отсюда, используя экспериментальные данные, можно определить  $g_{2_{\text{эксп}}}$  и  $g_{1_{\text{эксп}}}$  для верхнего и нижнего уровней каждой линии и сравнить с их теоретическими значениями (4).

Повторим еще раз, что все приведенные соотношения действительны для *слабого* магнитного поля.

Также есть понятие **критического** поля, при котором энергия взаимодействия атома с магнитным полем сравнима с величиной спин-орбитального расщепления:

$$\mu_B H \sim \Delta E_{LS} \quad (15)$$

Для оценки  $\Delta E_{LS}$  у водородоподобных атомов существует формула Дирака, и она не годится для атома цинка, рассматриваемого в данной задаче. Кроме того, полезно будет напомнить, что спин-орбитальное расщепление – это разность энергий *разных состояний в одном терме*.

### 3. Эффект Зеемана для атома цинка

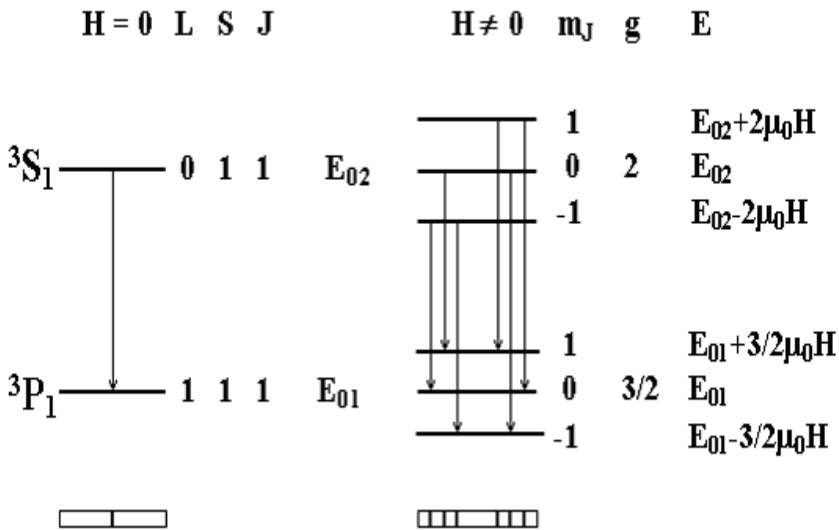
В настоящей работе изучается зеемановское расщепление линий атомов, имеющих два валентных электрона (цинк, кадмий, ртуть). В двухэлектронных атомах существуют уровни двух мультиплетностей - синглетные и триплетные. Поэтому одни линии дают простое зеемановское расщепление, другие - сложное. В дальнейшем мы будем рассматривать расщепление линий цинка, помещенного в магнитное поле.

Всего в задаче рассматриваются 4 перехода:

Электронные конфигурации	Состояния	Длины волн
$3d^{10}4s4p \rightarrow 3d^{10}4s4d$	$^1D_2 \rightarrow ^1P_1$	6362.34 Å
$3d^{10}4s5s \rightarrow 3d^{10}4s4p$	$^3S_1 \rightarrow ^3P_0$	4680.14 Å
	$^3S_1 \rightarrow ^3P_1$	4722.16 Å
	$^3S_1 \rightarrow ^3P_2$	4810.53 Å

**Табл.1.** Рассматриваемые переходы между электронными конфигурациями и соответствующими им состояниями.

В качестве примера рассмотрим расщепление в слабом магнитном поле одной из линий голубого триплетта цинка, изучаемого в данной работе. Эта линия соответствует переходу  $^3S_1 \rightarrow ^3P_1$ .



**Рис.1.** Расщепление состояний  $^3S_1$  и  $^3P_1$  в магнитном поле и переходы между ними.

Состояние  $^3S_1$ :  $L_2 = 0, S_2 = 1, J_2 = 1 \rightarrow g_2 = 2$   
 $m_{J_2} = 0, \pm 1$



Состояние  ${}^3P_1$ :  $L_1 = 1, S_1 = 1, J_1 = 1 \rightarrow g_1 = 3/2$   
 $m_{J_1} = 0, \pm 1$

Поскольку квантовое число полного момента у обоих состояний  $J$  равно 1 и фактор Ланде не равен нулю, то оба рассматриваемых уровня цинка расщепятся на 3 подуровня (см. рис.1). В согласии с правилами отбора (11) линия  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  расщепится на шесть компонент. Запишем их энергии:

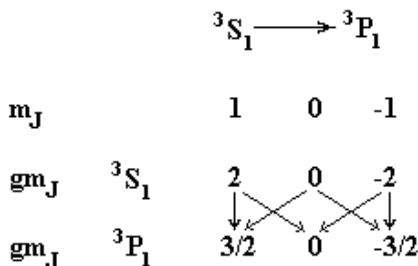
$m_{J_2} \rightarrow m_{J_1}$	$E_2 - E_1 = \hbar\omega_0 + \mu_B H (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1})$
1 → 1	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot (1/2)$
1 → 0	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot 2$
0 → 1	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot (-3/2)$
0 → 0	Этот переход запрещен правилами отбора, потому что $J_2 = J_1$ !
0 → -1	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot (3/2)$
-1 → 0	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot (-2)$
-1 → -1	$\hbar\omega_0 + \mu_B H \cdot (-1/2)$

**Табл.2** Энергии переходов для линии  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$

Компонента, соответствующая переходу  $m_{J_2} = m_{J_1} = 0$ , отсутствует, т.к. при переходах между уровнями с одинаковыми  $J$  этот переход запрещен правилами отбора.

Поскольку получилось 6 разных энергий, то в итоговом спектре будут наблюдаться 6 компонент, и это сложный эффект Зеемана.

Результаты иногда удобно записывать в таком виде:



В согласии с (7), (9) и правилами отбора линия  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  расщепится в магнитном поле на следующие шесть компонент:

$$\Delta k = \Delta k_0(-2; -3/2; -1/2; 1/2; 3/2; 2)$$

или в другой записи

$$\Delta k = \Delta k_0 \left( \frac{(1) \ 3 \ 4}{2} \right)$$

где над чертой выписаны значения числителей отдельных компонент, под чертой - значение их общего знаменателя, причем значения, относящиеся к  $\pi$ -компонентам, поставлены в скобки. Дроби в больших скобках называются дробями Рунге. Коэффициент перед большими скобками  $\Delta k_0$  - нормальное лоренцевское расщепление в  $\text{см}^{-1}$ . Поскольку члены в скобках порядка единицы, зеemanовское расщепление в полях  $\sim 10^4$  Эрстед оказывается порядка  $0.1 \text{ см}^{-1}$ .

***Подчеркнем, что написанные выше формулы дают значения расщеплений, отсчитываемые от несмещенной линии.***

#### 4. Описание установки.

Принципиальная схема установки изображена на рис.2. Свет от источника (1), расположенного между полюсами электромагнита (2), попадает на щель (3) спектрографа ИСП-51. Источниками света могут служить цинковая, кад-

миевая или ртутная лампы. Ниже речь идет о цинковой спектральной лампе ДЦНС-20.

Наиболее яркими линиями цинка в видимой области спектра являются: красная линия  $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$  и линии голубого триплета, обусловленные переходами с уровня  $^3S_1$  на уровни  $^3P_2$ ,  $^3P_1$ ,  $^3P_0$ . Для грубой монохроматизации излучения источника света служит спектрограф ИСП-51. Поскольку, как отмечалось выше, зеемановское расщепление очень невелико ( $\Delta k \sim 0,1 \text{ см}^{-1}$ ), для его наблюдения служит прибор высокой разрешающей силы - интерферометр Фабри-Перо (5), принцип действия которого описан в приложении.

Интерферометр установлен между объективом коллиматора и призмами (6) спектрографа. Дисперсии спектрографа и интерферометра скрещены - спектрограф обладает горизонтальной дисперсией, а интерферометр - вертикальной.

### Наблюдаемая картина

Каждая спектральная линия (монохроматическая) в фокальной плоскости объектива даёт следующую картину.

1. **Если** интерферометр Фабри-Перо **отсутствует** – видно вертикальное изображение **входной** щели спектрографа в соответствующем цвете.
2. **Если** отсутствует входная щель – видна система интерференционных колец Фабри-Перо.
3. **Если** входная щель и интерферометр Фабри-Перо установлены :
  - a. Интерферометр Фабри-Перо и спектрограф **соосны** – изображение щели расположено на **диаметре интерференционных колец** (см рис.3.1, 3.2); отрезки колец «перпендикулярны» изображению щели.
  - b. Интерферометр Фабри-Перо и спектрограф **не соосны** – изображение щели расположено на **хорде интерференционной картины** (см рис.3.3); отрезки колец «наклонны» к изображению щели.. В этом случае обработка интерференционной картины стан-

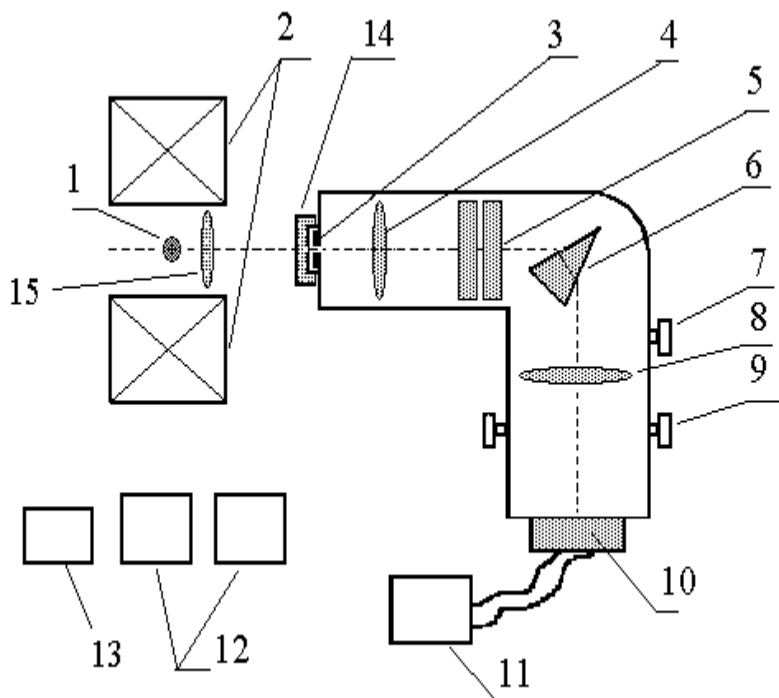
дартными средствами даст **неправильный результат.**

В фокальной плоскости спектрографа видны четыре спектральных линии: красная (синглет) и синий триплет. При включении магнитного поля каждый из отрезков колец разделяется на компоненты в соответствии с законом зеемановского расщепления данной спектральной линии.

Приемником излучения служит ПЗС-линейка (10), установленная на выходной прорези кассетной части спектрографа, сигнал с нее подается на компьютер (11). Настройка изображения интерференционной картины на плоскость линейки проводится с помощью ручек (7) (поворот призмы) и (9) (фокусировка). Подробно порядок работы с ПЗС-линейкой описан ниже.

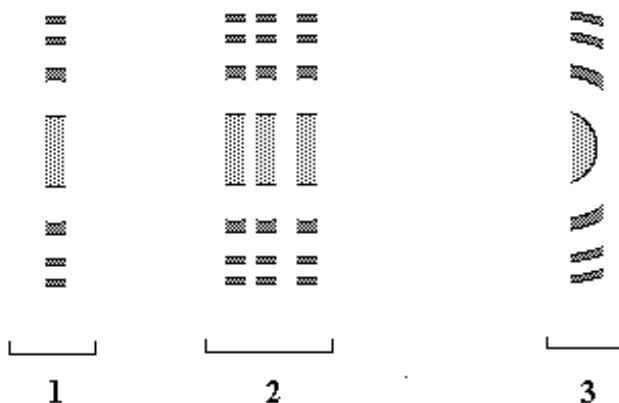
Для питания электромагнита служат выпрямители (12), для питания ламп – блок (13).

Перед входной щелью спектрографа устанавливается поляризатор. Поворот поляризатора позволяет изменять относительные интенсивности  $\pi$  - и  $\sigma$  - компонент.



**Рис. 2.** Общий вид установки.

- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1 – спектральная лампа,     | 2 – электромагнит,        |
| 3 – входная щель,           | 4 – объектив коллиматора, |
| 5 – эталон Фабри-Перо,      | 6 – призма спектрографа,  |
| 7 – барабан поворота призм, | 8 – объектив,             |
| 9 – ручка фокусировки,      | 10 – линейка ПЗС,         |
| 11 – компьютер,             | 12 – выпрямители,         |
| 13 – блок питания лампы,    | 14 – поляризатор,         |
| 15 – конденсор.             |                           |



**Рис. 3.** Вид спектра цинка в отсутствие магнитного поля.

1 – красная линия,

2 – синий триплет.

3 – спектрограф и интерферометр не соосны .

## 5. Порядок подготовки к выполнению работы.

Во время подготовки к выполнению работы (до начала работы в практикуме) следует сделать задания допуска. Следует также нарисовать и объяснить вид спектра цинка в фокальной плоскости спектрографа при  $H \parallel$  и  $H \perp$ . Эти данные должны быть внесены в тетрадь.

Можно воспользоваться для справок книгой С.Э.Фриша [4], где на стр. 345 приведена сводная таблица различных случаев зеемановского расщепления.

Для общей подготовки по теории можно воспользоваться источником [1], обратите внимание на главы «Многоэлектронный атом» и «Атом в магнитном поле».

Получив разрешение преподавателя начать работу, необходимо сделать следующее:

Включить цинковую лампу, дать ей разогреться в течение 5-10 минут, повернуть магнит так, чтобы можно было наблюдать эффект Зеемана в поперечном поле.

Далее работа проводится с помощью ПЗС-линейки.

### **Задание для предварительной подготовки (допуск)**

1. Что такое терм? Что такое состояние? Как выглядит общая формула записи терма и состояния через квантовые числа? Как называются эти квантовые числа?
2. Что такое фактор Ланде? Как его посчитать?
3. В задаче рассматриваются четыре перехода между шестью состояниями. Рассчитайте для этих состояний фактор Ланде.
4. Как выглядят правила отбора для всех квантовых чисел, упоминаемых в этой задаче? ( $L, S, J, m_J$ )
5. Что такое эффект Зеемана? В каком случае он будет простым (нормальным), в каком – сложным (аномальным)? Что такое эффект Пашена-Бака?
6. (!) Для четырех переходов нарисовать картину расщепления в слабом магнитном поле, рассчитать число компонент в спектре и величину расщепления  $\Delta k$  ( $\text{см}^{-1}$ ). Определить состояние поляризации каждой из зеемановских компонент (указать  $\pi$ - и  $\sigma$ -компоненты). Какой эффект Зеемана наблюдается в каждом из этих случаев – простой или сложный?

### **Дополнительные теоретические вопросы:**

7. Каков физический смысл фактора Ланде? Какие значения может принимать фактор Ланде? Может ли он быть равен нулю? Меньше нуля?
8. Опишите иерархию взаимодействий для данной задачи. Как выглядит гамильтониан многоэлектронного атома в случае слабого магнитного поля? В случае сильного магнитного поля?
9. Как выглядит набор квантовых чисел в случае слабого поля? В случае сильного поля?
10. Выполняется ли правило интервалов Ланде для рассматриваемого терма  $^3P$ ?

## 6. Литература.

1. А.М. Попов, О.В. Тихонова. Атомная физика, изд.3, 2019
2. Шпольский Э.В. Атомная физика. -М.: Наука, 1984, т. II, с. 308-315.
3. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику. -М.: Наука, 1988, гл. VII, гл. VI, pp. 30, 33.
4. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. -М.: Физматгиз, 1963, с. 334-346.
5. Толанский С. Спектроскопия высокой разрешающей силы. -М.: ИЛ, с. 154-164.



## 7. Руководство по работе с ПЗС-линейкой

1. С помощью конденсора сфокусировать изображение источника на входную щель спектрографа. Рассмотреть в лупу красную линию и линии голубого триплета. Закрепить ПЗС-линейку на спектрографе.

2. Включить компьютер и монитор (имя пользователя АТРС).

Порядок входа в программу: на Рабочем столе открыть папку Практикум → Эффект Зеемана. Перед Вами появится экран оболочки, позволяющий войти в любую часть программы. Прежде всего, следует вписать в рабочее окно свою фамилию и группу. После нажатия клавиши «Да» Ваши данные появятся в нижней части экрана.

Работа начинается с команды «Записать» с подтверждением, которая запускает программу ПЗС-линейки.

Программа сделана в системе Windows-95, где, как обычно, в верхней части экрана расположены названия опций главного меню программы и кнопки быстрого доступа(см. ниже).

### **Порядок работы с программой.**

Вначале работа проводится в отсутствие магнитного поля.

**1. Параметры.** В появившемся окне установить время цикла накопления сигнала  $T = 100- 500$  мсек. Время цикла подбирается таким образом, чтобы интенсивность сигнала не превышала 3000 за кадр. В строке  $N=.....$ (число циклов накопления ) целесообразно, для получения первоначальной картины спектра, установить  $N = 1$ .

**2. Активизировать** п. меню «Циклический запуск»-загорается кнопка. Можно эту же операцию запустить, подведя стрелку мышки непосредственно к указанной кнопке и нажав левую клавишу мышки.

**3. Темновой ток.** В появившемся меню активизировать строку «Ввести темновой ток», предварительно закрыв шторкой выходное отверстие спектрографа. Активи-

зировать также «Вычитать темновой ток». При этом загорается кнопка **F**. То же можно сделать с помощью мышки, наведенной на эту кнопку.

**4. Файл.** В меню активизировать строку «Вести спектр с линейки», нажать кнопку “Старт” и в процессе накопления сигнала МЕДЛЕННЫМ поворотом призмы вывести искомую линию в поле зрения ПЗС-линейки. При этом, чтобы по оси абсцисс были отложены номера каналов, следует выключить кнопку **L**. Более подробно см 6.1.

Включение магнитного поля приводит к расщеплению спектральных линий. При включенной автоматической настройке масштаба по оси X (**A**) расщепление наблюдается с трудом. Для выведения более четкой картины на экран следует с помощью стрелок (правая верхняя часть экрана) растянуть полученный спектр по оси X (при этом автоматическая установка оси **A** должна быть выключена). Полученное изображение спектра выводится в поле зрения дисплея с помощью горизонтальной полосы прокрутки, расположенной в верхней части экрана.

**5. Сохранить** полученные на экране данные можно следующим образом: ФАЙЛ--→ SAVE SPECTRUM. В появившееся окно нужно ввести имя файла с расширением [ ] по своему выбору. После этого – выйти из программы. Опция ФАЙЛ позволяет также считать ранее записанный спектр.

#### **6. Дальнейшая работа с программой.**

6.1. В задаче «Эффект Зеемана» следует получить на экране дисплея расщепление в магнитном поле трех линий цинка: двух линий синего триплета ( $^3S_1 \rightarrow ^3P_1$ ,  $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$ ) и красной линии (синглет  $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ ). В начале работы, как указывалось выше, следует в отсутствие магнитного поля вывести в поле зрения линейки поочередно все три линии спектра цинка. Делается это следующим образом.

При введенных ранее параметрах ( $T_{\text{цикл}}$  и  $N$ ) и открытой шторке при команде «Вести спектр с линейки» (см. п.

4) *в процессе накопления сигнала* МЕДЛЕННЫМ поворотом призмы линия выводится в поле зрения ПЗС - линейки.. Далее следует закрыть выходную щель спектрографа шторкой и еще раз дать команду «Ввести темновой ток», а затем, открыв шторку, -команду «Ввести спектр с линейки» и с помощью ручек «Фокусировка» и «Поворот призмы» добиться четкого изображения спектра на экране. Интерферограмма представляется на экране дисплея в виде ряда максимумов по обе стороны от ее центра. С помощью ручек «Фокусировка» на тубусе спектрографа добиться четкого изображения интерферограммы (рис.4). Записать положение барабана поворота призмы для найденной линии.

Те же действия повторить для двух других исследуемых линий спектра.

ВСЕ ОПИСАННЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРОВОДЯТСЯ ПРИ ВКЛЮЧЕННОЙ КОМАНДЕ «ВВЕСТИ СПЕКТР С ЛИНЕЙКИ».

6.2. Найти линию  ${}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$  (красную). Включить магнитное поле, дать ток  $\sim 420$  mA. Ввести темновой ток, затем «Ввести спектр с линейки». Линия расщепляется на три компоненты. Фокусировку проводить при растянутом изображении спектра (см. п.4). Идентифицировать  $\pi$ - и  $\sigma$ - компоненты, показать преподавателю.

Повернуть поляризатор таким образом, чтобы интенсивность  $\sigma$ -компонент составляла примерно половину интенсивности  $\pi$ -компоненты.

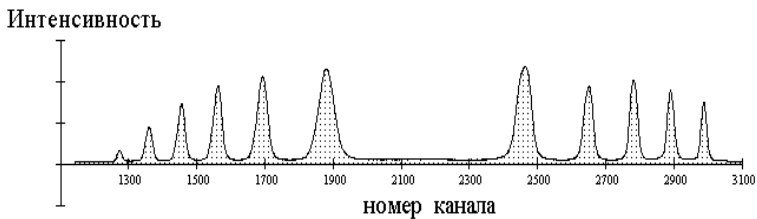


Рис.4.Типичная интерферограмма лобой одиночной спектральной линии .

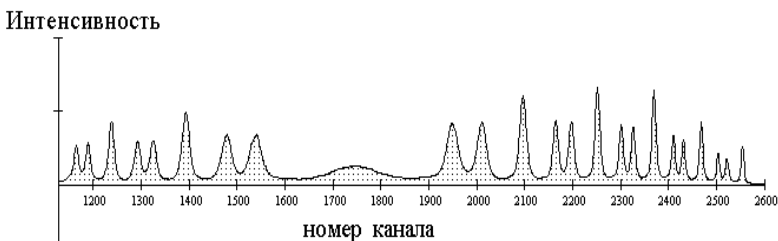


Рис.5.Интерферограмма спектральной линии  $\lambda = 6362 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 4680 \text{ \AA}$  ,  $N \neq 0$  .

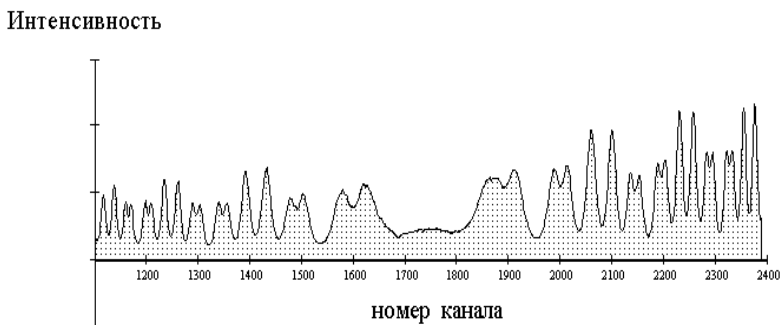


Рис.6.Интерферограмма спектральной линии  $\lambda = 4722 \text{ \AA}$  ,  $N \neq 0$  .

Изменить параметры:  $T=300 - 500$  мсек,  $N=50 - 100$ .  
 Режим накопления предназначен для увеличения отношения сигнал / шум при регистрации флуктуирующих сигналов. При поканальном сложении  $N$  спектров результирующий сигнал может быть представлен в виде:

$$\sum a_i = N \bar{a} + \sum \delta a_i$$

Здесь второй член представляет собой сумму случайных (знакопеременных !) флуктуаций и стремится к нулю при увеличении количества измерений . Ввести темновой фон при этих параметрах, а затем дать команду «Ввести спектр с линейки» и сразу выключить кнопку «Циклический запуск», чтобы ограничить время измерений одним циклом.

Дать команду «Сглаживание». Получившаяся картина должна быть аналогична представленной на рис.5..

Сохранить полученное изображение при  $H \neq 0$  в виде файла (см. п.5). По зеемановскому расщеплению красной линии определяется величина напряженности магнитного поля.

6.3. Аналогичным (п. 6.1, 6.2) способом получить интерферо-граммы линий  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  и  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_0$  в магнитном поле (рис. 5 и 6). Каждую полученную при  $H \neq 0$  линию следует сохранить в виде файла (см. п. 5).

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВКЛЮЧАТЬ ТОЛЬКО ПОСЛЕ ВЫВОДА ИНТЕРФЕРОГРАММЫ ИСКОМОЙ ЛИНИИ НА ЭКРАН ДИСПЛЕЯ. СЛЕДУЕТ ВКЛЮЧИТЬ СЕТЕВОЙ ТУМБЛЕР ВЫПРЯМИТЕЛЯ, ДАТЬ ПРОГРЕТЬСЯ В ТЕЧЕНИЕ 10 МИН И ЛИШЬ ЗАТЕМ ВКЛЮЧАТЬ ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ.**

**7. *Запись в память*** компьютера полученных на экране данных описана в п. 5.

Запишите все три линии цинка, прежде чем переходить к программам обработки спектров.

**ЗАПОМНИТЕ ИМЕНА ВВЕДЕННЫХ ВАМИ ФАЙЛОВ И ИХ СООТВЕТСТВИЕ ЛИНИЯМ СПЕКТРА ЦИНКА, ИНАЧЕ ВЫ МОЖЕТЕ СДЕЛАТЬ ОШИБКУ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА.**

**N.B.** После записи каждого файла снять высокое напряжение, не выключая питания выпрямителя и настроить прибор на следующую линию. Только после этого включать высокое напряжение. **СЛЕДИТЕ ЗА ПОСТОЯНСТВОМ ТОКА МАГНИТА!**

**8. Дать команду «Выход».** Перед Вами появляется первый экран со списком записанных Вами файлов. Отметив маркером нужный файл, запустите программу обработки спектров.

## 8. Инструкция по обработке в программе Origin

**1.** Сначала вычислите фокусное расстояние (**F**) для всех трех длин волн, поскольку прибор обладает хроматической абберацией.

Фокусное расстояние для 5000 ангстрем:  $F_{5000\text{Å}} = 272$  мм

Расчет фокусного расстояния для других длин волн:

$$F = F_{5000\text{Å}} + \frac{dF}{d\lambda} (\lambda(\text{Å}) - 5000\text{Å})$$
$$\frac{dF}{d\lambda} = 2.15 \cdot 10^{-3} \text{мм/Å}$$

**2.** Откройте программу Origin (Рабочий стол → папка «Обработка» → ярлык «Origin 6»)

В программе Origin выберите в меню пункт «File» → «Import» → «Single ASCII...» (горячая клавиша Ctrl+K) и откройте файл, сохраненный в формате .dat.

Файлы обычно сохраняются в своей папке по адресу «Мои документы» → «Pract» → «Ex15-Zeeman» → «Номер группы, Фамилия студента»

Все дальнейшие формулы в этой главе соответствуют тому виду, который требуется в Origin. В ячейку вбивается всё, что стоит после знака равенства. Вместо **F**, **Rcenter**, **k0** и **R0** должны быть числа.

3. В открывшейся таблице колонка **A** содержит номера каналов, колонка **C** – интенсивность сигнала в данном канале, данные в колонке **B** не несут полезной информации.

- Задайте колонке **B** формулу (для этого надо кликнуть правой кнопкой мыши по колонке **B**, выбрать Set Column Values):

$$\text{Col}(\mathbf{B})=\text{Col}(\mathbf{A})*0.008$$

Теперь в этой колонке будут координаты точек, выраженные в миллиметрах (период ПЗС-линейки = 8 микрон/канал).

- Щелкните правой кнопкой по колонке **B**, выберите Set as -> X.

4. Постройте график по данным колонок **B** и **C**: установить **C** как Y, выделить колонки **B** и **C**, нажать кнопку Line на панели быстрого доступа (или кликнуть правой кнопкой по названию колонки, выбрать в открывшемся меню Plot -> Line).

У построенной интерферограммы нужно найти центр. Найдите 2 группы пиков, соответствующие одному интерференционному кольцу (они симметричны, например, это первый и минус первый порядок на интерферограмме)

- Посчитайте **Rcenter** как полусумму координат соответствующих симметричных пиков. Для более точного расчета можно посчитать **Rcenter** для нескольких интерференционных колец (второй и минус второй порядки, третий и минус третий...) , а потом усреднить результат.
- Теперь нужно вычесть из всех координат **Rcenter**. Для этого измените формулу в колонке **B**:

$$\text{Col}(\mathbf{B})=\text{Col}(\mathbf{A})*0.008 - \mathbf{Rcenter}$$

Сейчас в этой колонке будут координаты каналов в миллиметрах относительно центра картины.

5. Добавьте к рабочему листу новую колонку **D** – это будет столбец, содержащий константу для промежуточных расчетов (формула (5) на странице 34 описания).

$$\text{Col}(\mathbf{D}) = \mathbf{k0} / (1 + \mathbf{R0}^2 / \mathbf{F}^2)^{0.5}$$

**R0** – радиус центра группы пиков (радиус кольца). Он определяется как координата центрального пика (в случае трех компонент) или центрального провала (6 компонент).

**k0=1/λ0** – волновое число исходной нерасщеплённой линии излучения в обратных сантиметрах. Можно не считать самому это значение, а вставить сразу в формулу для **D**, но не забудьте домножить на 10 в правильной степени, чтобы не получились обратные ангстремы! ☺

6. Добавьте к рабочему листу новую колонку **E** – это будет итоговый **X** в спектре:

$$\text{Col}(\mathbf{E}) = \text{Col}(\mathbf{D}) * (1 + \text{Col}(\mathbf{B})^2 / \mathbf{F}^2)^{0.5} - \mathbf{k0}$$

Это формула (6) на странице 34 описания.

- Кликните правой кнопкой мыши по колонке **E**, выберите Set as -> X.

7. Добавьте к рабочему листу новую колонку **F**, скопируйте туда данные колонки **C**.

- Постройте график по данным колонок **F** и **E**

Если всё сделано правильно на предыдущих этапах, то на экране будет зависимость, которая визуалью похожа на правую половину начального графика, но проведенную двойной линией (потому что отрицательные порядки интерферограммы наложились на парные положительные). При этом ноль на оси **X** должен располагаться в центре порядка, выбранного в пятом пункте. Если всё это выполнено, то **сохраните файл!**

8. Далее нужно в таблице данных удалить те строчки, которые не соответствуют обрабатываемой группе из 3 или



6 пиков (в том числе остальные интерференционные кольца и дублирующую линию обрабатываемого кольца). Наиболее просто это можно сделать следующим образом:

- Постройте график по колонкам А и С (зажать Ctrl, чтобы выделить два столбца).
- Записать координаты X1 и X2 – диапазон, в котором расположена обрабатываемая группа пиков. Данные таблицы устроены так, что X(номер канала) совпадает с номером строки в таблице.
- В колонке F сотрите данные с 1 строки до X1 и с X2 до конца (останутся только строки, соответствующие обрабатываемой группе пиков). Для быстрого выделения можно использовать клавишу Shift (кликнуть по первой ячейке, домотать до нужной, зажать Shift, кликнуть по ней).
- Постройте график по данным колонок **F** и **E**. Обязательно **переименуйте оси!**

9. Найдите на графике точные координаты максимумов исследуемых пиков (в волновых числах  $\Delta k$ ) по следующему алгоритму:

- Выберите в меню Analysis -> Fit Multi-peaks -> Gaussian
- Укажите число пиков
- Укажите начальную ширину пиков для аппроксимации (число появится автоматически, нажать Enter или Ok)
- Укажите мышкой примерное положение первого пика. Поменять положение можно стрелками на клавиатуре. Для подтверждения выбора нажмите Enter
- Повторите предыдущий пункт для всех пиков
- На графике появится аппроксимация данных и таблица с параметрами аппроксимирующих гауссов (координата центра и ширины)

- Убедитесь, что центр построенного вами спектра соответствует координате  $\Delta k = 0$  с погрешностью **не более 0.01** 1/см.
- Отправьте график на печать.

## 9. Задание к сдаче.

Инструкцию, приведенную в прошлой главе, нужно выполнить для всех снятых спектров (три спектра для красной линии при разных токах на катушке и все спектры для голубого триплета).

1. **Красная линия.** После обработки для каждого спектра выписать полученную величину нормального лоренцевского расщепления  $\Delta k_{0i}$ . С помощью формулы (10) можно определить соответствующую величину магнитного поля  $H_i$ .

Теперь нужно построить график зависимости напряженности магнитного поля от величины тока на катушке  $H(I)$ . Поскольку было снято три спектра, то на этом графике будет всего три точки. Далее следует аппроксимировать прямой  $H = AI + B$  и найти коэффициенты  $A$  и  $B$ . Сделайте это любым удобным Вам способом (в программах Excel, Origin, посчитайте МНК вручную или в онлайн-калькуляторах). Данный график является калибровочным для конкретно Вашей установки.

2. **Синий триплет.** По построенному в предыдущем пункте калибровочному графику определить соответствующее току магнитное поле, а по нему – величину лоренцевского расщепления  $\Delta k_0$  для каждого спектра.

Из каждого спектра возьмите величину расщепления  $\Delta k$  и с помощью табл.2 и формул (12)-(14) определите экспериментальные значения  $g_1$  и  $g_2$ . Сравните их с теоретическими значениями, рассчитанными по формуле (4).

Для линии  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_0$  записывается одно уравнение по формулам (12)-(14), для  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  и  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_2$  нужно

записать систему из двух уравнений. Для этого используйте пики, которые не симметричны друг другу!

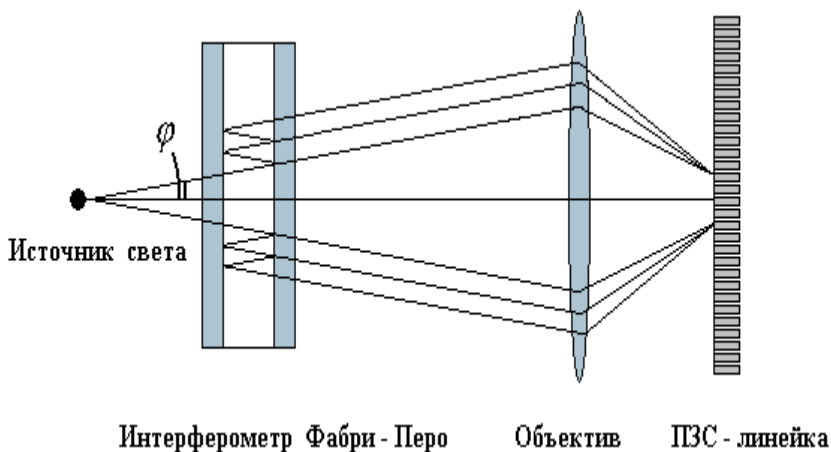
3. Оцените величину критического поля для исследуемого в работе голубого триплета. Сравните с полями, которые использовались в работе.

**К сдаче должны быть готовы:**

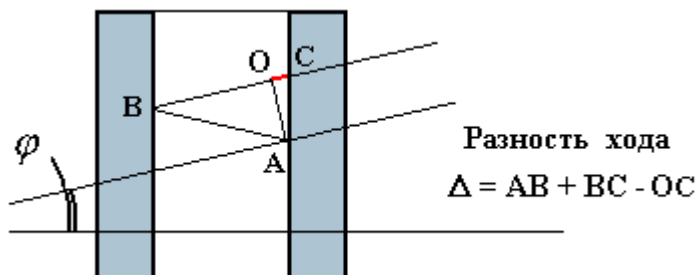
- обработанные спектры для красной линии при разных токах;
- построенный по ним калибровочный график  $H(I)$  для установки, по желанию график  $\Delta k_0(I)$ ;
- обработанные спектры для голубого триплета;
- рассчитанные по ним экспериментальные значения факторов Ланде  $g_{1\text{эксп}}$  и  $g_{2\text{эксп}}$ , сравнение с теоретическими значениями;
- оценка критического магнитного поля в Эрстедах для голубого триплета.

## Приложение. Интерферометр Фабри-Перо .

Интерферометр Фабри-Перо - спектральный прибор высокой разрешающей силы для измерения малых отличий длин волн ( $R \sim \lambda / \Delta\lambda \gg \dots > 1$ ) в спектрах оптического диапазона. Оптическая схема использования интерферометра изображена на рисунке.



В фокальной плоскости объектива образуются яркие интерференционные максимумы плотности излучения в том случае, если разность хода интерферирующих лучей равна целому числу длин волн, а разность фаз равна  $2\pi m$ ,  $m$  - целое число, порядок интерференции.



Разность хода в интерферометре Фабри-Перо.

В интерференционном максимуме порядок интерференции (см. рисунок ) оказывается равным

$$2hk \cos \varphi = m ; \quad m - \text{целое} ; \quad k = 1/\lambda;$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} ; \quad \operatorname{tg} \varphi = r/f;$$

(1)

Здесь  $k = 1/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны,  $r$  - радиус интерференционного кольца Фабри-Перо,  $f$  - фокусное расстояние объектива.

Радиусы наблюдаемых колец ограничены апертурой спектрографа и обычно малы по сравнению с фокусным расстоянием объектива  $r / f \ll 1$  , поэтому с высокой точностью можно считать

$$2 h k \left( 1 - 1/2 \frac{r^2}{f^2} \right) \cong m . \quad (2)$$

Отметим, что порядок интерференции, и, следовательно, разрешающая сила, уменьшаются с ростом радиуса кольца.

Соотношение (2) определяет радиусы колец для излучения с заданной величиной волнового числа, соседние кольца отличаются по порядку интерференции на единицу.

При достаточно широком спектре излучения различные кольца могут перекрываться; в частности соседние ( $\Delta m = 1$ ) кольца совпадут, если они отличаются по волновому числу на величину  $\Delta k$ , определяемую условиями:

$$2 h k \left( 1 - 1/2 \frac{r^2}{f^2} \right) = m - 1$$

$$2 h (k + \Delta k) \left( 1 - 1/2 \frac{r^2}{f^2} \right) = m . \quad (3)$$

Эти условия определяют *спектральную ширину* интерферометра Фабри-Перо:

$$\Delta k = \frac{1}{2h} \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{f^2}} \cong \frac{1}{2h} . \quad (4)$$

Спектральные линии, отличающиеся по волновому числу не более, чем на  $\Delta k$ , образуют выраженные непрерывающиеся кольца, в **каждом кольце - один и тот же порядок интерференции  $m$  для всех компонентов наблюдаемого мультиплета.**

Отметим, что в пределах кольца  $\frac{\Delta k}{k} \approx \frac{1}{m} \ll 1$ .

Интерферометр Фабри-Перо, как и всякий интерферометр, измеряет разности ( или отношения ) волновых чисел ( длин волн, частот), но не само по себе волновое число, **поэтому один из компонентов мультиплета должен быть известен.**

В пределах одного кольца (  $m = \text{const}$  ) для компонента с волновым числом  $k = k_0 + dk$  из пары соотношений (1) имеем:

$$k = k_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{r^2}{f^2}}{1 + \frac{r_0^2}{f^2}}}, \quad (5)$$

или

$$dk = k_0 \left( \sqrt{\frac{1 + \frac{r^2}{f^2}}{1 + \frac{r_0^2}{f^2}}} - 1 \right),$$

индекс «ноль» отмечает волновое число  $k_0$  и радиус  $r_0$  кольца **известного** компонента мультиплета ;  $r$  - радиус кольца

**неизвестного** компонента мультиплета,  $r$  и  $r_0$  - измеряемые по интерферограмме величины.

Формулы (5) и (6) решают поставленную задачу - нахождение спектра мультиплета.

**Отметим:**

- 1) Если на интерферограмме имеется выраженный центр, то для нахождения спектра достаточно измерения **радиусов** в одном (любом) кольце;
- 2) Если выраженный центр отсутствует (односторонние кольца), то для нахождения положения центра необходимы не менее трех колец;
- 3) фокусное расстояние объектива должно учитывать его хроматическую аберрацию.

В пределах одного кольца можно сопоставить каждому значению радиуса определенное волновое число, тогда формулы (5) и (6) дают возможность преобразования одного (любого) кольца интерферограммы Фабри-Перо (распределения интенсивности излучения по радиусу) в «*спектр*» -распределение интенсивности по волновому числу (длине волны). Из (6) находим :

$$r(dk) = f \sqrt{\left(1 + \frac{r_0^2}{f^2}\right) \left(1 + \frac{dk}{k_0}\right)^2 - 1} \quad , \quad (7)$$

после чего распределение интенсивности излучения по радиусу преобразуется в *спектр* :

$$I(r) \Rightarrow I(r(dk)) \quad .$$



Условия , позволяющие результат преобразования считать *спектром* ( аппаратная функция ) , в настоящем приложении не обсуждаются.

### **Литература.**

1. Зайдель А.Н., Островская Ю.И. Техника и практика спектроскопии. -М.: Наука, ГИФМЛ, 1972.