

## 1. Введение.

Если источник излучения поместить в магнитное поле, то уровни энергии атомов расщепляются на ряд подуровней, и 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 слабом магнитном поле различают простой и сложный эффекты Зеемана. СЛАБЫМ называется магнитное поле, в котором зеемановское расщепление (уровней, линий) значительно меньше их естественного расщепления, обусловленного спин – орбитальным взаимодействием. В простом 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. Интервал между зеемановскими компонентами ( $\text{см}^{-1}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) составляет в первом случае  $2\Delta k_0$ , во втором -  $\Delta k_0$ , где  $\Delta k_0(\text{см}^{-1}) = eH/4\pi mc^2$  - нормальное лоренцевское расщепление в волновых числах. Нормальный эффект Зеемана наблюдается на синглетных линиях.

В остальных случаях имеет место сложный эффект Зеемана, при котором интервалы между компонентами выражаются рациональными дробями от нормального расщепления  $\Delta k_0$  [1-3] и число компонент, в общем случае, отличается от наблюдаемого в простом эффекте Зеемана.

Физической причиной появления эффекта Зеемана является расщепление уровней энергии атома в постоянном магнитном поле. Атом представляет собой магнитный диполь с магнитным моментом  $\mu$  и дополнительная энергия, приобретаемая атомом в магнитном поле

$$\Delta E = -(\vec{\mu}\vec{B}) \quad (1)$$

В слабом магнитном поле, когда LS связь не разорвана, магнитный момент  $\vec{\mu}$  представляется как  $\vec{\mu}_J$  и связан с механическим моментом  $\vec{J}$  ( $\vec{J}$  существует!) гиромагнитным соотношением

$$\vec{\mu}_J = g \frac{e}{2mc} \vec{J} \quad (2)$$

а модуль магнитного момента атома

$$\mu_J = g \frac{e\hbar}{2mc} \sqrt{J(J+1)} = g m_0 \sqrt{J(J+1)} \quad (3)$$

Проекция магнитного момента атома на направление магнитного поля

$$M_{JH} = M_0 g m_J, \quad (4)$$

где

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad \text{-фактор Ланде} \quad (5)$$

$$m_0 = \frac{e\hbar}{2mc} = 9,274 \cdot 10^{-21} \text{ эрг/эрстед} \quad \text{- магнетон Бора.} \quad (6)$$

Тогда

$$(7) \quad \Delta E_{JH} = \mu_0 H g m_J,$$

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

$$E = E_0 + \Delta E_{JH}, \quad (8)$$

$E_0$  - энергия атома при  $H = 0$ .

В (5)  $S$  - квантовое число полного спинового момента,  $L$  - квантовое число полного орбитального момента,  $J$  - квантовое число полного момента количества движения.  $m_J$ - магнитное квантовое число - принимает значения

$$m_J = -J, -J+1, \dots, J-1, J \quad (9)$$

всего  $2J+1$  значений. В согласии с (7) каждый уровень энергии атома при  $H \neq 0$  расщепляется на  $2J+1$  подуровней.

Величина расщепления линии определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \hbar \omega &= E_2 - E_1 = E_{02} - E_{01} + (\Delta E_2 - \Delta E_1) = \hbar \omega_0 + \hbar \Delta \omega = \\ &= \hbar \omega_0 + \mu_0 H (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}), \end{aligned}$$

где  $\omega_0$  - частота несмещенной компоненты,  $g_2, g_1, m_{J_2}, m_{J_1}$  - факторы Ланде и магнитные квантовые числа верхнего и нижнего уровней соответственно.

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta \omega (c^{-1}) &= \frac{\mu_0 H}{\hbar} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = \\ &= \Delta \omega_0 (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\Delta k(\text{см}^{-1}) &= \frac{m_0 H}{hc} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = \\ &= \frac{eH}{4\pi m c^2} (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}) = Dk_0 (g_2 m_{J_2} - g_1 m_{J_1}),\end{aligned}\quad (11)$$

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

$$\Delta\omega_0(\text{с}^{-1}) = \frac{m_0 H}{\hbar} = 8,7897 \cdot 10^6 \text{ Н с}^{-1} \quad (12)$$

$$\Delta k_0(\text{см}^{-1}) = \frac{m_0 H}{hc} = 4,67 \cdot 10^{-5} \text{ Н см}^{-1} \quad (13)$$

- нормальное лоренцевское расщепление соответственно в  $\text{с}^{-1}$  и  $\text{см}^{-1}$ .

Переходы между зеемановскими подуровнями разных уровней удовлетворяют правилам отбора

$$\begin{aligned}\Delta m_J &= 0 && \pi\text{-компоненты,} \\ \Delta m_J &= m_{J_1} - m_{J_2} = \pm 1 && \sigma\text{-компоненты.}\end{aligned}\quad (14)$$

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

Полученный результат (11) можно представить в другом виде

$$\frac{\Delta k}{\Delta k_0} = m_{J_2} g_2 - g_1 (m_{J_2} + \Delta m_J).$$

Согласно (14) для  $\pi$  - компонент

$$\frac{Dk_p}{Dk_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1), \quad (15)$$

для  $\sigma$ -компонент

$$\frac{Dk_y}{Dk_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1) - Dm_J g_1. \quad (16)$$

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 (5).

Все приведенные соотношения действительны для слабого поля. **Слабым** называется магнитное поле, в котором энергия взаимодействия  $\Delta E_{JH}$  полного момента  $\vec{J}$  с магнитным полем значительно меньше энергии спин-орбитального взаимодействия  $\Delta E_{LS}$ , т.е.  $\Delta E_{JH} \ll \Delta E_{LS}$ .

В **сильном** магнитном поле происходит разрыв LS связи, каждый из векторов  $\vec{L}$  и  $\vec{S}$  независимо взаимодействует с магнитным полем и

сложный эффект Зеемана переходит в простой. При этом  $\Delta E_{LH}, \Delta E_{SH} \gg \Delta E_{LS}$ .

Эффект Зеемана в сильных полях называется эффектом Пашена-Бака. Остаточная LS связь проявляется в виде тонкой структуры зеемановских компонент, не зависящей от напряженности магнитного поля. Подробнее об этом. см. [1-3]. **Критическим** считается поле, при котором  $\mu_0 H \sim \Delta E_{LS}$ .

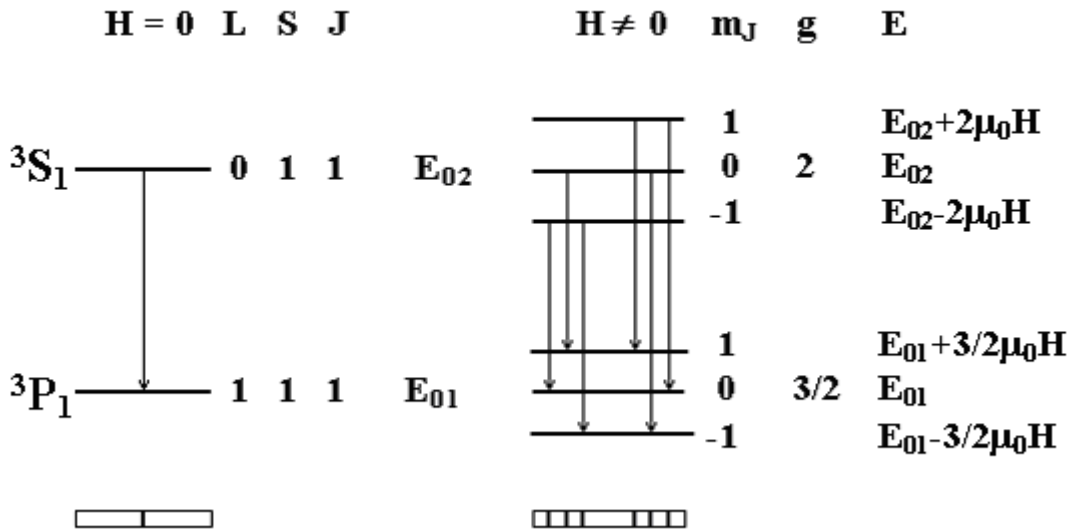


Рис.1 Расщепление уровней  ${}^3S_1$  и  ${}^3P_1$  в магнитном поле и переходы между ними.

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.

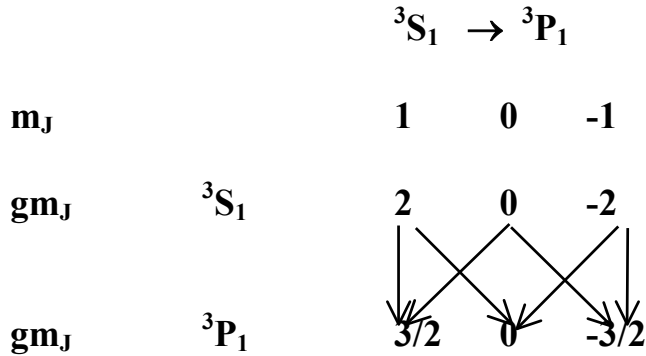
В качестве примера рассмотрим расщепление в слабом магнитном поле одной из линий голубого триплета цинка, изучаемого в данной работе. Эта линия соответствует переходу  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$ .

Для состояния  ${}^3S_1$ :  $L=0, S=1, J=1, m_J=0, \pm 1, g=2$ .

Для состояния  ${}^3P_1$ :  $L=1, S=1, J=1, m_J=0, \pm 1, g=3/2$ .

Из (7) и (9) следует, что каждый из рассматриваемых уровней атома цинка расщепится в магнитном поле на 3 подуровня (см. рис.1). В согласии с правилами отбора (14) линия  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  расщепится на шесть компонент. Компонента, соответствующая переходу  $m_{J1}=m_{J2}=0$  отсутствует, т.к. при

переходах между уровнями с одинаковыми  $J$  этот переход запрещен правилами отбора. Результаты рис.1 удобно записать 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, зеемановское расщепление в полях  $\sim 10^4$  эрстед оказывается порядка  $10^{-1} \text{см}^{-1}$ .

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

## 2. 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, кадмиевая 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 :

3а. Интерферометр Фабри - Перо и спектрограф **соосны** - изображение щели расположено на **диаметре интерференционных колец** ( см рис.3-1, 3-2 ); отрезки колец «перпендикулярны» изображению щели.

3б. 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 стандартными 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 поляриод. Поворот поляриода позволяет изменять относительные интенсивности  $\pi$ - и  $\sigma$ - компонент.

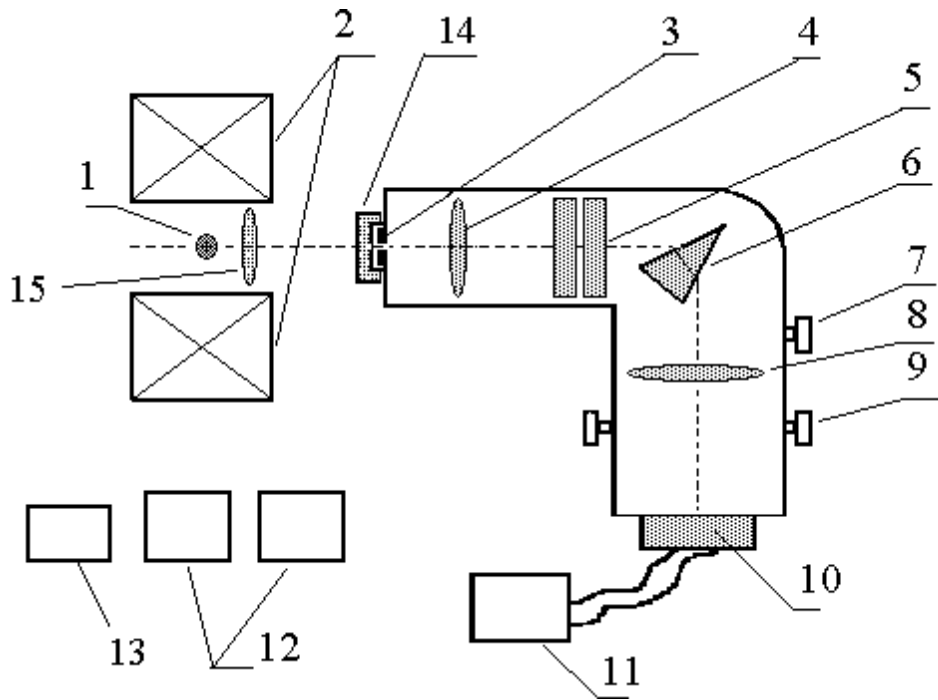


Рис. 2 Общий вид установки.

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.

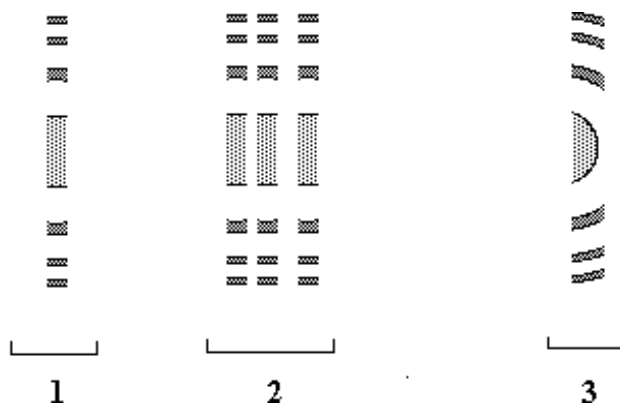


Рис. 3 Вид спектра цинка ( $H=0$ ).

1 - красная линия,  
2 - синий триплет.  
3 - спектрограф и интерферометр не соосны .

### 3. Порядок подготовки к выполнению работы.

Во время подготовки к выполнению работы (до начала работы в практикуме) следует: *рассчитать число компонент расщепления и  $\Delta k$  ( $\text{см}^{-1}$ ) для красной линии ( ${}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$ ) и каждой из линий голубого триплета ( ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_0$ ,  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$ ,  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_2$ ), определить состояние поляризации каждой из зеемановских компонент (указать  $\pi$ - и  $\sigma$ -компоненты).* Следует также нарисовать и объяснить вид спектра цинка в фокальной плоскости спектрографа при  $H_{||}$  и  $H_{\perp}$ . Эти данные должны быть внесены в тетрадь.

Можно воспользоваться для справок книгой С.Э.Фриша [3], где на стр. 345 приведена сводная таблица различных случаев зеемановского расщепления.

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.

### Литература.

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



## **РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ С ПЗС-ЛИНЕЙКОЙ НА ЗАДАЧЕ «ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА» (Версия DOS).**

**1. С помощью конденсора(15)**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 через Windows: 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.

**3. В верхней части** экрана возникнет рабочее поле со строкой, состоящей из разделов меню:

<b>опции</b>	<b>спектры</b>	<b>серия</b>	<b>параметры</b>	<b>операции</b>	<b>буфер</b>	<b>выход</b>
--------------	----------------	--------------	------------------	-----------------	--------------	--------------

Чтобы выполнить команду меню, следует, подведя стрелку мышки к названию раздела (чтобы название «загорелось»), нажать на левую кнопку мышки.

**ОТ ОДНОЙ КОМАНДЫ К ДРУГОЙ СЛЕДУЕТ ПЕРЕХОДИТЬ ТОЛЬКО ПОСЛЕ ПОЯВЛЕНИЯ «МЫШКИ» НА ЭКРАНЕ** (клавиша «Пробел» или «Esc»).

На экране появится выпадающее вниз вертикальное подменю, состоящее из команд данного раздела. Выполнение команд производится аналогично.

### **Порядок работы.**

**4. Выбрать раздел ОПЦИИ.** В появившемся подменю пометить пункты

- Циклический запуск
- Автоматическая шкала Y
- Учет темного фона

Отмеченному пункту соответствует галочка в соответствующей строке подменю.

**5. Выбрать раздел ПАРАМЕТРЫ.** В строке  $T_{\text{цикл}}$  (время цикла накопления спектра) установить, например,  $T_{\text{цикл}} \sim 100 - 300$  мсек, чтобы интенсивность не превышала 3000 за кадр. В строке  $N_{\text{эксп}}$  (число циклов накопления) целесообразно, для получения первоначальной картины спектра, установить  $N_{\text{эксп}} = 1$ .

**6. Выбрать раздел СПЕКТРЫ.** Перед Вами появится спектр, записанный последним или пустая страница.

По оси абсцисс отложены номера каналов. По окончании накопления ранее введенный спектр заменяется новым.

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

Те же действия повторить для остальных исследуемых линий спектра.

ПРЕРЫВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ КЛАВИШЕЙ «ПРОБЕЛ.»

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

6.2. Найти линию  $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$  (красную). Включить магнитное поле, дать ток  $i \sim 420$  мА. Ввести темновой фон, затем «Ввести спектр». Линия расщепляется на три компоненты. Идентифицировать  $\pi$ - и  $\sigma$ -компоненты, показать преподавателю.

Повернуть поляризатор таким образом, чтобы интенсивность  $\sigma$ -компонент составляла примерно половину интенсивности  $\pi$ -компоненты. Четкой картины расщепления линий добиваются с помощью ручек «Фокусировка» и «Поворот призмы».

Изменить параметры:  $T=300 - 500$  ms,  $N=50 - 100$ . Режим накопления предназначен для увеличения отношения сигнал/шум при регистрации флуктуирующих сигналов. При поканальном сложении 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» и сразу нажать на клавишу «Пробел», чтобы ограничить время измерений выбранным числом циклов.

В пункте меню «Операции» дать команду «Сглаживание», и ввести число 5. Получившаяся картина должна быть аналогична представленной на рис.5.

Участок спектра для получения более точных данных следует выделить с помощью «лупы». «Лупа» приводится в действие таким образом: стрелка «мышки» помещается непосредственно на оси абсцисс. После нажатия левой клавиши появляется белая полоска, растягивается до нужного положения и фиксируется щелчком левой клавиши. Так можно вывести на экран любое число максимумов, вплоть до одного.

**ВЫШЕОПИСАННУЮ НАСТРОЙКУ СЛЕДУЕТ ПРОИЗВОДИТЬ ПРИ РАСТЯНУТОМ ИЗОБРАЖЕНИИ.** Сохранить полученное изображение при  $N \neq 0$  в виде файла (см. п. 7).

По зеемановскому расщеплению красной линии будет определяться величина напряженности магнитного поля.

6.3. Аналогичным (п. 6.1,6.2) способом получить интерферограммы линий  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_1$  и  ${}^3S_1 \rightarrow {}^3P_0$  в магнитном поле (рис. 5 и 6). Каждую полученную при  $N \neq 0$  линию следует сохранить в виде файла (см. п.7).

**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. Записать в память** компьютера полученные на экране данные можно следующим образом: в разделе меню СПЕКТРЫ выбрать команду «Сохранить страницу». Нажатие на кнопку «Выполнить» открывает окно для ввода имени файла по Вашему выбору. Дополнительно Вы можете ввести комментарий, который будет записан в файл вместе с позицией.

*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.**

**Н.В.** 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. Задание см. ниже (стр.20).

## **РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ С ПЗС-ЛИНЕЙКОЙ НА ЗАДАЧЕ «ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА»**

**(Версия WINDOWS).**

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 через Windows: 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. Активизировать 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 «Ввести 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  . Более подробно см 6.1.

Включение магнитного поля приводит к расщеплению спектральных линий. При включенной автоматической настройке масштаба по оси X () 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  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 «Ввести 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.

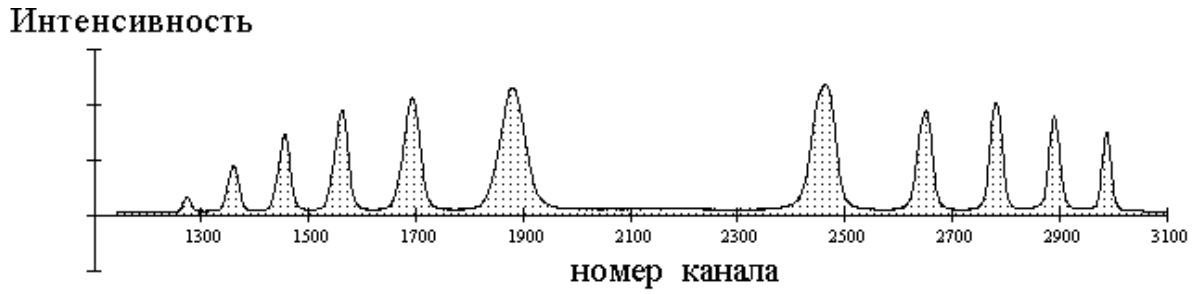


Рис.4.Типичная интерферограмма любой одиночной спектральной линии .

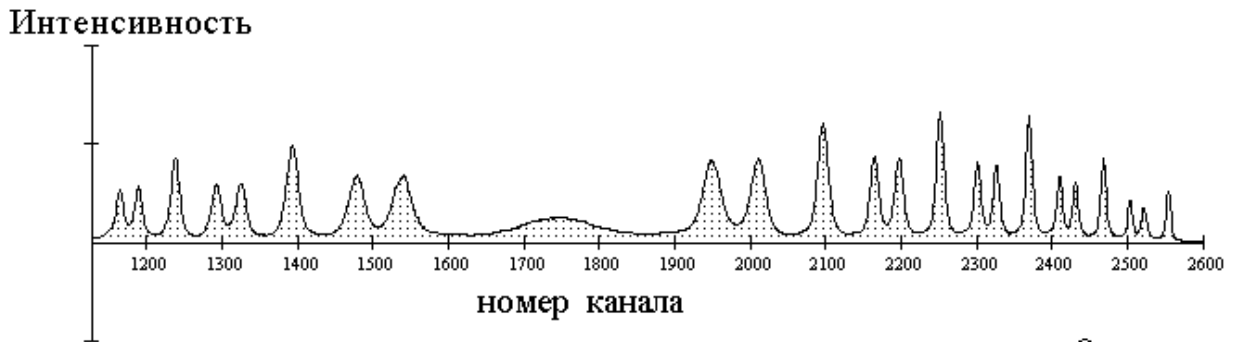


Рис.5.Интерферограмма спектральной линии  $\lambda = 6362 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 4680 \text{ \AA}$  ,  $H \neq 0$  .



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

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.

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 зеemannовскому 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.

**Н.В.** 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.

### **Обработка результатов задачи «Эффект Зеемана.»**

Для того, чтобы войти в программу обработки, следует пометить введенный ранее файл, а затем дать команду «Обработка». Программа сделана в системе «Windows-95» и управляется стандартным способом.

Прежде всего, Вы должны ввести длину волны исследуемой линии **в ангстремах** и фокусное расстояние для нее (прибор обладает хроматической аберрацией), период ПЗС линейки-8 микрон.

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

$$F = F_{5000} + \frac{dF}{d\lambda} (\lambda(\text{ангстрем}) - 5000)$$

$$\frac{dF}{d\lambda} = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ мм / ангстрем}$$

На экране появляется интерферограмма зеемановского расщепления выбранной линии.

1. Согласно формуле (6п) «Приложения» для определения  $\Delta k$ ,  $\text{см}^{-1}$  следует найти положение центра колец интерферограммы, от которого будут отсчитываться их радиусы. Нужно выбрать максимумы, симметричные относительно центра интерферограммы и пометить другим цветом участок между ними (<Shift><→>, <←>). (Ускоренное движение маркера осуществляется клавишами <Shift>+<PgDn> или <Shift>+<PgUp>). Для получения данных необходимо точно определить положения выбранных максимумов, следя за числом в окне «Интенсивность». Пометить участок



интерферограммы можно также, двигая «мышку» при нажатой левой клавише.

При приведении в действие операции «Установка нуля» центральному каналу помеченного участка интерферограммы присваивается номер 0.

2. В дальнейшем Вы будете работать с **(одним!)** кольцом интерферограммы, расщепленным вследствие взаимодействия атома с магнитным полем (см. рис.5,6). Выделить это кольцо можно указанным выше способом. Кольцо содержит 3 или 6 компонент, симметричных относительно несмещенной линии. Структура интерферограммы в магнитном поле наглядно представлена на рис.5 и 6. Затем картина с помощью «лупы» растягивается на весь экран. При этом активизируются все остальные элементы панели инструментов.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** При затруднениях с выбором кольца полезно предварительно с помощью «лупы» растянуть выбранный Вами участок интерферограммы, чтобы структура колец была видна яснее.

3. Нажмите кнопку «Волновые числа» панели инструментов, которая переводит распределение интенсивности по каналам (**по радиусу**) в распределение **по волновым числам**  $\Delta k$ ,  $\text{см}^{-1}$  (см. «Приложение»).

Для получения зеemanовского расщепления линии в единицах  $\Delta k$  ( $\text{см}^{-1}$ ) следует найти центр выбранного кольца, т.е. положение несмещенной компоненты.

В трехкомпонентных линиях ( $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$  и  $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$ ) центр совпадает с центральным максимумом ( $\pi$ -компонента). Чтобы зафиксировать центр, следует совместить маркер с центральным максимумом (следите за числами в окне «Интенсивность») и нажать кнопку «Установка нуля». При этом нуль на оси  $\Delta k$  совместится с положением маркера (и несмещенной компоненты).

Если же центральный максимум отсутствует (линия  $^3S_1 \rightarrow ^3P_1$ ), положение центра кольца рекомендуется определять следующим образом. Маркер совмещается с максимумом одной из зеemanовских компонент и операцией «Установка нуля» в эту точку на оси  $\Delta k$  помещается нуль отсчета. Затем маркер устанавливается на максимум симметричной компоненты и полусумма двух значений  $\Delta k$  даст положение несмещенной линии  $\Delta k(0)$ .

Это и есть нуль отсчета  $\Delta k$ . Маркер устанавливается в точке  $\Delta k(0)$  и «Установкой нуля» здесь помещается нуль отсчета, от которого и отсчитывается  $\Delta k$  для всех зеemanовских компонент.

Затем, помещая маркер в максимумы интенсивности, отметьте с помощью операции «Результаты работы» положения максимумов ( $\Delta k$ -расстояние от несмещенной линии) всех компонент зеemanовского расщепления исследуемой линии.

Под кнопкой «Результаты работы» появляется таблица данных  $\Delta k$ , отсчитанных от несмещенной линии, положение которой отмечено Вами ранее.

Все расчеты проведены машиной по формуле (6п).

Результаты Вы получите в виде распечатки (операция «Печать»), где будут представлены графики распределения интенсивности по волновому числу  $\Delta k$  и измеренные значения  $\Delta k$ , см<sup>-1</sup> для каждой линии. Здесь же будут указаны Ваша фамилия, группа, даты проведения эксперимента и его обработки.

Операции следует провести для всех измеренных линий.

### Задание.

а) По результатам, полученным для красной линии  ${}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$ , следует определить величину напряженности магнитного поля  $H$  в эрстедах.

б) Результаты для двух остальных линий позволяют определить факторы Ланде для верхнего ( $g_2$ ) и нижнего ( $g_1$ ) уровней каждой линии.

Как указано выше, формулу (11) можно преобразовать к виду

$$\frac{\Delta k}{\Delta k_0} = m_{J_2} g_2 - g_1 (m_{J_2} + \Delta m_J).$$

Для  $\pi$ -компонент ( $\Delta m_J = 0$ )

$$\frac{\Delta k_p}{\Delta k_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1),$$

для  $\sigma$ -компонент ( $\Delta m_J = m_{J_1} - m_{J_2} = \pm 1$ )

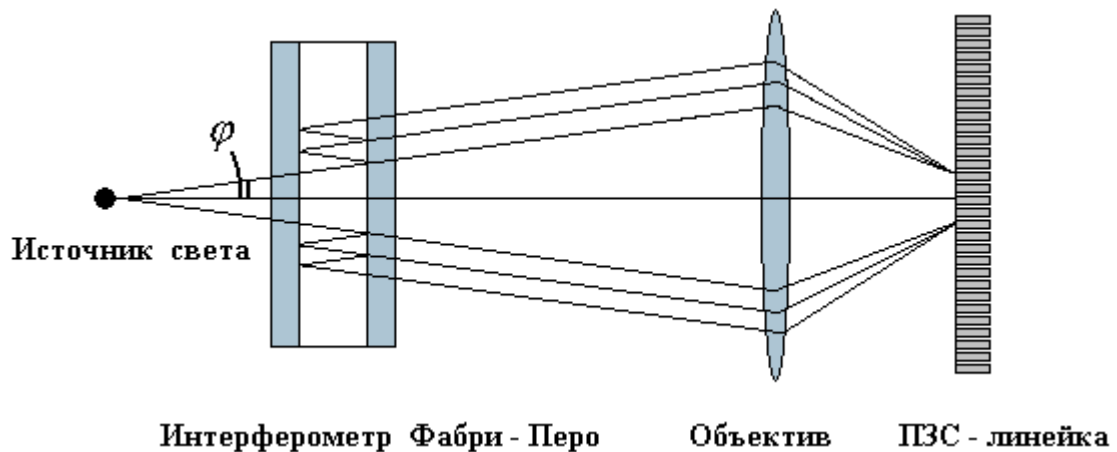
$$\frac{\Delta k_y}{\Delta k_0} = m_{J_2} (g_2 - g_1) - \Delta m_J g_1.$$

Отсюда, используя экспериментальные данные, рассчитываются  $g_{2\text{эксп}}$  и  $g_{1\text{эксп}}$  и сравниваются с их теоретическими значениями.

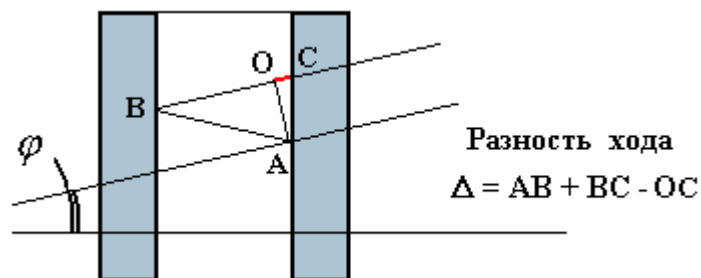
## Приложение.

### 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

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

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

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:

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

Спектральные линии, отличающиеся по волновому числу не более, чем на  $\Delta k$ , образуют выраженные неперекрывающиеся 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 :

$$dk = k_0 \left( \sqrt{\frac{1 + \frac{r^2}{f^2}}{1 + \frac{r_0^2}{f^2}}} - 1 \right) , \quad (6)$$

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) для нахождения спектра достаточно измерения **радиусов** в одном (любом) кольце;

2) фокусное расстояние объектива должно учитывать его хроматическую aberrацию.

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 :

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

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

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

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.