

## Измерение зависимости расщепления красной линии кадмия от величины магнитного поля - спектроскопия с использованием эталона Фабри-Перо

### Цель эксперимента

■ Наблюдение Зеемановского расщепления с использованием интерферометра Фабри-Перо – с помощью VideoCom.

■ Определение магнетона Бора  $\mu_B$  и удельного заряда электрона  $\frac{e}{m_e}$

### Основные принципы

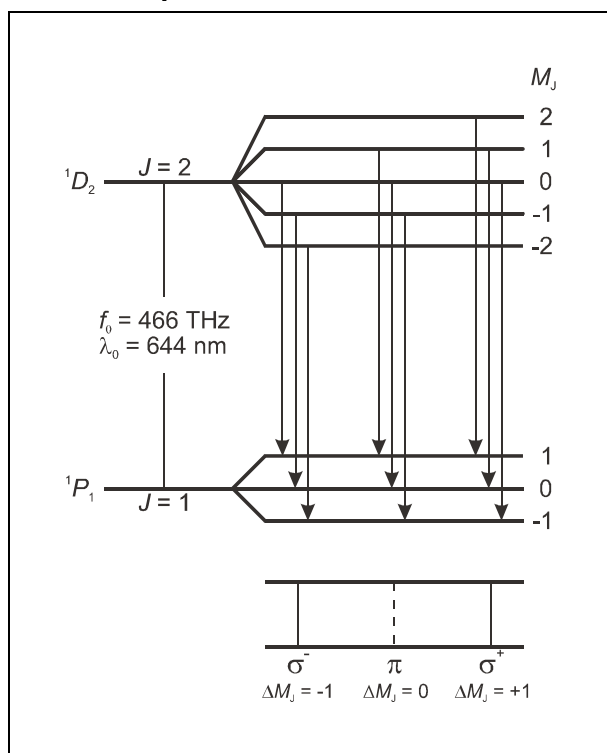


Рис. 1. Расщепление уровней при нормальном эффекте Зеемана в кадмии.

Эффект Зеемана - название эффекта при котором происходит расщепления энергетических уровней атома или спектральных линий под действием внешнего магнитного поля. Эффект был впервые предсказан Г. А. Лоренцом в 1895 году как часть своей классической теории электрона, и экспериментально подтверждена несколькими годами позже П. Зееманом. Зееман наблюдал триплет линии вместо одной спектральной линии под прямым углом к магнитному полю, и дублетную линию параллельно магнитному полю. Позже, наблюдались более сложные расщепления спектральных линий, которые стали известны как аномальный эффект Зеемана.

Для объяснения этого явления, Гаудсмит и Уленбек впервые ввели гипотезу о спине электрона в 1925 году. В конце концов, стало очевидным, что аномальный эффект Зеемана был на самом деле это правилом и "нормальный" эффект Зеемана исключение. Нормальный эффект Зеемана происходит только при переходах между состояниями атомов с суммарным спином  $S = 0$ . Тогда, полный угловой момент  $J = L + S$  состояния является чистым орбитальным моментом ( $J = L$ ). Для соответствующего магнитного момента, мы можем просто сказать, что:

$$\mu = \frac{\mu_B}{\hbar} J \quad (I)$$

где

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (II)$$

( $\mu_B$ =магнетон Бора,  $m_e$ =масса электрона,  $e$ =элементарный заряд  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  = постоянная Планка).

Во внешнем магнитном поле  $B$ , магнитный момент имеет энергию

$$E = -\mu \cdot B \quad (III)$$

Компоненты углового момента в направлении магнитного поля могут иметь значения

$$J_z = M_J \cdot \hbar \text{ with } M_J = J, J-1, \dots, -J \quad (IV)$$

Таким образом, член с угловым моментом  $J$  разделяется на  $2J+1$  равностоящих зеемановских компонент, которые отличаются только величиной  $M_J$ . Энергетический интервал между соседними компонентами  $M_J$ ,  $M_J + 1$

$$\Delta E = -\mu_B \cdot B \quad (V).$$

Мы можем наблюдать нормального эффекта Зеемана, например, в красной спектральной линии кадмия ( $\lambda_0=643,8$  нм,  $f_0=465,7$  ТГц). Это соответствует переходу  $1D_2$  ( $J = 2$ ,  $S = 0$ )  $\rightarrow$   $1P_1$  ( $J = 1$ ,  $S = 0$ ) электрона пятой оболочки (см. 1). В магнитном поле, уровень  $1D_2$  расщепляется на пять зеемановских компонент, а уровень  $1P_1$  расщепляется на три компоненты, имеющие расстояние, вычисляемые с помощью уравнения (V).

Оптические переходы между этими уровнями возможны только в виде электрического дипольного излучения. Имеется следующее правило отбора магнитных квантовых чисел  $M_J$  для энергетических состояний:

$$\begin{aligned} \Delta M_J &= \pm 1 && \text{для } \sigma \text{ компоненты} \\ &= 0 && \text{для } \pi \text{ компоненты} \end{aligned} \quad (\text{VI})$$

Таким образом, мы наблюдаем в общей сложности три спектральных линии (см. 1); р компонента не сдвигается, а два S компоненты сдвигаются на

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (\text{VII})$$

по отношению к исходной частоте. В этом уравнении,  $\Delta E$  является равноудаленными энергиями расщепления и вычисляется с помощью уравнения (V).

Эффект Зеемана позволяет спектроскопически разделить поляризованных компонент. Чтобы распознать сдвиг, однако, нам требуется спектральный аппарат с очень высоким разрешением, так как две S компоненты в красной линии кадмия сдвинуты, например, при плотности магнитного поля  $B=1$  Т только на  $\Delta f = 14$  GHz, соответственно  $\Delta \lambda = 0,02$  nm.

В эксперименте используется эталон Фабри-Перо. Это стеклянная пластина, которая находится в одной плоскости с очень высокой точностью, и алюминизированы с обеих сторон. Слегка отклоненный свет входит в эталон, который ориентирован перпендикулярно по отношению к оптической оси. Когда свет отражается назад и вперед несколько раз, часть его выходит наружу каждый раз (см. 2). Благодаря алюминизации наружу выходящая часть света очень мала, и происходит интерференция отраженных лучей. За эталоном лучи фокусируются линзой на фокальной плоскости объектива. На экране расположенной в фокальной плоскости формируется круговая концентрическая интерференционная картина, связанная с определенной длиной волны  $\lambda$ . Угол апертуры кольца совпадает с углом преломления частичных лучей от эталона Фабри-Перо. Лучи, выходящие под углом  $\alpha$  интерферируют друг с другом, когда две соседние лучи выполнить условие "когерентности" (см фиг. 4):

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad (\text{VIII})$$

( $\Delta$  = разность пути лучей,  $d$  = толщина эталона,  $n$  = показатель преломления стекла,  $k$  = порядок интерференции)).

Изменение длины волны  $d\lambda$  рассматривается как изменение угла апертуры  $d\alpha$ . В зависимости от фокусного расстояния объектива, угол апертура соответствует радиусу  $R$  и изменение угла  $d\alpha$  к изменению радиуса  $dr$ . Если спектральная линия содержит несколько компонент с расстоянием  $\tau$ , каждый интерференционный круг разделяется на несколько компонент с радиальным расстоянием  $\tau$ . Таким образом дублетная линия спектра распознается как дублетная структура и триплетная линия спектра как триплетная структура по круговой интерференционной картине.

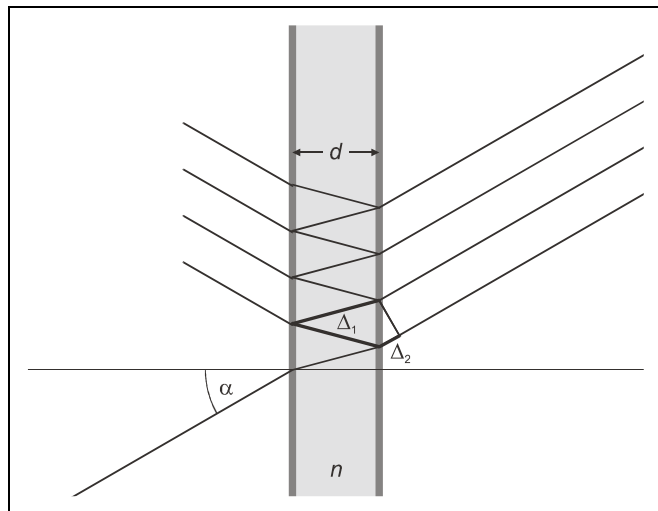


Рис. 2: Эталон Фабри-Перо как интерференционный спектрометр. Траектория луча нарисована при значении угла  $\alpha > 0$  по отношению к оптической оси. Оптическая разность хода между двумя соседними лучами  $D = n \cdot D_1 - D_2$ .

В эксперименте измеряется зависимость зеемановского расщепления красной линии кадмия от магнитного поля  $B$ . Энергетический интервал компонентов триплета (см. уравнения (II) и (V),

$$E = \frac{h}{4\pi} \frac{e}{m_e} \cdot B \quad (\text{VIII})$$

используется, чтобы вычислить удельный заряд электрона.

Чтобы достигнуть спектрального разделения Зеемановских компонент красной спектральной линии кадмия, система оптических колец интерферометра Фабри-Перо отображается с помощью Video-Com CCD (без линзы камеры) с использованием линзы отображения. CCD обнаруживает диаметрально сечение через систему оптических колец.

## Аппаратура

1 Кадмиевая лампа.....	451 12
1 Универсальный дроссель в корпусе .....	451 30
1 Высокоамперный источник питания.....	521 55
1 U-образный сердечник с хомутом .....	562 11
2 Катушка, 10 А, 480 витков .....	562 131
1 Пара полюсных наконечников с большим отверстием .....	560 315
1 Эталон Фабри-Перо .....	471 221
1 Высокоточная оптическая скамья, 1 м .....	460 32
1 Ридер с резьбовой основой .....	460 381
5 Оптические ридерс 60/50 .....	460 373
2 Линзы, $f = +150$ мм .....	460 08
1 Держатель для интерференционных фильтров..	468 41
1 Интерференционный фильтр, 644 нм ....	468 400
1 VideoCom USB .....	337 47USB
1 Универсальный измерительный прибор физики	531 835
или	
1 Мобильный CASSY .....	524 009
1 Комбинированный В-сенсор S.....	524 0381
1 Удлинитель, 15 полюсный.....	501 11
1 Подставка, V-образный, 20 см .....	300 02
1 Стержень подставки, 47 см .....	300 42
1 мультizaжимы LD.....	301 01
3 Соединительные провода, 100 см .....	501 33

дополнительно требуется ПК с Windows 98 или выше

## Техника безопасности

Электрические провода на кадмиевой лампе и на резисторах стартовых электродов открыты и легко доступны: Не прикасайтесь к токопроводящим (опасно!) частям. Свободные ферромагнитные части могут сильно притягиваться к электромагниту и может повредить кварцевую нить накаливания кадмиевой лампы.

Проверьте и убедитесь, что полюсные наконечники прикреплены плотно перед включением тока к магниту. Когда ток магнита включается, не работайте ферромагнитными предметами в непосредственной близости от кадмиевой лампы. Снятие корпуса лампы, когда лампа нагрета, может привести к разрушению кварцевую лампу накаливания. Никогда не берите на руки кварцевую лампу накаливания от кадмиевой лампы с голыми руками.

Месторождения секрций оболочки могут разрушить кварцевый сосуд кадмиевой лампы, когда она становится горячим.

Никогда не обращайтесь с кварцевым сосудом кадмиевой лампы с Вашими голыми руками.

## Установка

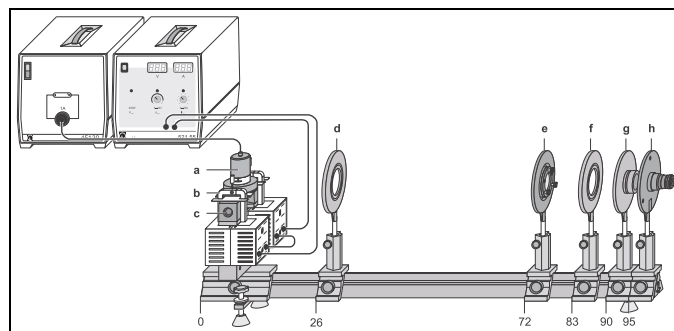


Рис. 3: Экспериментальная установка для наблюдения Эффект Зеемана в поперечной конфигурации. Положение левого края оптических ридерсов даны в см.

- |   |  |
|---|--|
| a | Кадмиевая лампа с крепежной пластиной                  |
| b | Хомуты   |
| c | Полюсный наконечник                                    |
| d | Собирающая линза, $F = 150$ мм (Линза)                 |
| e | Эталон Фабри-Перо                                      |
| f | Собирающая линза, $F = 150$ мм (линза отображения)     |
| g | Фильтр для подавления помех в штативе                  |
| h | VideoCom (полезно использовать окуляр для регулировки) |

Собранная экспериментальная установка в поперечной конфигурации и показана на рис. 3.

**Механическая часть установки:**

Завинтите резьбовой стержень штатива у ридерса. Поместите U-образный сердечник на резьбовом стержне на штатив и чтобы он свободно вращался и вставьте катушки. Установите полюсные наконечники и удерживающую пластину с кадмиевой лампой с помощью зажимов так, чтобы расстояние составлял приблизительно 10 мм между наконечниками и отверстием на пластине задней части. Пока не затягивайте винты зажимов. Осторожно вставляйте кадмиевую лампу между наконечниками полюса. Проследите, чтобы кадмиевая лампа была установлена точно в середине наконечниками, точка крепления лампы располагалась в задней части и провода питания удалены из траектории луча, насколько это возможно. Должна быть обеспечена возможность сдвига и удаления кадмиевой лампы с крепежной пластины при измерении магнитного поля. Закрепите полюсные и удерживающей пластины с помощью винтов зажимов. Установите наконечники и крепите зажима винтами. Установить В-сенсор с помощью материала подставки, так что бы было возможно провести касательную на зонд по вертикали в середине наконечниками.

**Электрические соединения:**

Присоедините катушки электромагнита последовательно между собой и затем к высокоамперному источнику питания.

Присоедините В-сенсор с универсальным измерительным прибором физики или мобильному CASSY.

Присоедините кадмиевую лампу с универсальным дросселем. Присоедините VideoCom к компьютеру.

**Наладка оптики наблюдения:**

Установите оптические компоненты в соответствии с рис. 3. После включения универсального штутцера, подождите 5 минут, пока световое излучение не является достаточно сильным и стабильным. Если есть возможность, используйте с начала окуляра (например, 460 135 Окуляр со шкалой), чтобы получить четкое изображение системы колец. В дальнейшем, CCD-VideoCom должен быть помещен в оптической плоскости изображения.

**VideoCom:**

Можно оптимизировать время экспозиции таким образом, что пики имели интенсивность примерно на 50%.

Для того, чтобы гарантировать, что CCD находится в фокальной плоскости линзы формирования изображения, переместите линзу изображения по оптической оси, пока наблюдаемые пики не были резкими и максимальными по интенсивности. В этом случае центр системы колец должны быть отображены на линии CCD. Для этого вы можете либо сдвигать VideoCom перпендикулярно к оптической оси или наклонить эталон слегка используя регулировочные винты. Вы найдёте центр системы колец, тогда если дальнейшая регулировка не вызывает появления каких-либо других пиков, и два центральных пика (левый и правый, самые внутренние кольца) находятся на максимальном расстоянии друг от друга.

Переместите конденсатора линз до тех пор, пока не будет получено наиболее равномерное возможное освещение всей линии CCD, при этом максимумы находятся в середине при той же интенсивности (см. Рис.4).

**Калибровка VideoCom**

Для угловой калибровки, задается фокусное расстояние линзы формирования изображения (здесь  $F = 150$  мм). Для смещения нулевой точки, определите углы двух центральных пиков с помощью функции "Calculate Peak Center" и введите отрицательное среднее значение двух пик центров вручную. Это устанавливает центр системы колец к  $0^\circ$  по угловой шкале.

**Проведение эксперимента****а) Измерение магнитного поля**

Вставьте тангенциальный зонд вертикально в центре между полюсами магнита, до укрепления кадмиевой лампы. Увеличивая ток катушки измерьте зависимость магнитного поля от тока, см.. Таблица 1.

**б) Измерение расщепления кадмиевой линии.**

Осторожно вставляйте кадмиевую лампу между наконечниками полюса, не изменяя интервал между наконечниками (см. Механическую часть установки). Запустите программу "VideoComInt" и настройте оптического наблюдения.

Интенсивность пика должна быть около 50% (если необходимо, измените яркость Cd лампы установленной в магнитном поле).

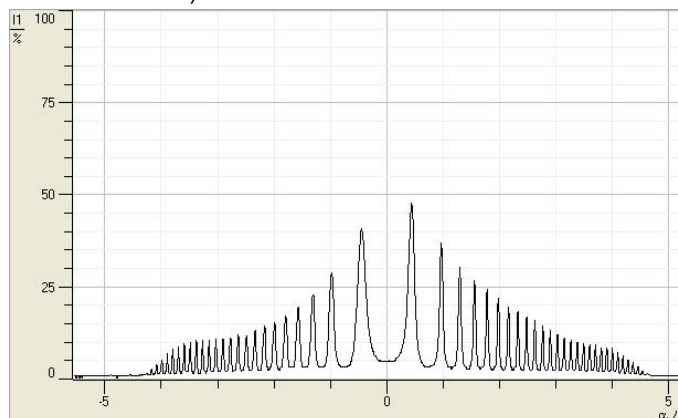


Рис.4: Зависимость интенсивности от угла при  $B = 0$

"Зеемановская" таблица предназначена для оценки результатов; можно переключиться на эту таблицу, нажав на соответствующую вкладку. Эта таблица содержит значений в столбцах для магнитного поля  $B$ , угла  $\alpha_1$  не перемещенной линии ( $\pi$ -компонента), угла  $\alpha_2$  смещенной линии ( $\sigma^+$  или  $\sigma^-$ ) и соответствующих длин волн и энергетических сдвигов. Последние два значения вычисляются автоматически после ввода  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , используя

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1} - 1 \quad \text{ещё} \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n = 1.46 \quad \text{для эталона и}$$

$$\Delta E \approx -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot E = -hc \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad \text{где } \lambda = 643.8 \text{ нм для линии Cd}$$

Начните оценку пометив пика ( $\pi$ ) в "Calculate Peak Center".

Переведите эти значение в "зеемановскую" таблицу, перетаскив его из строки состояния  $\alpha_1$  столбца таблицы (перетаскивания). Для определения координат на диаграмме, перетаскивайте значение в колонке  $\alpha_2$ , и введите значение 0 в столбце  $B$  (кольцо не перемещено без магнитного поля).

Далее, рассмотрим кольцо, как она разделяется в магнитном поле ( $\sigma^+$  или  $\sigma^-$ ). Опять же, определить, угол перемещения  $\alpha_2$ , используя "Calculate Peak Center" и перетаскивайте его в колонку  $\alpha_2$  в таблицу "зеемана". Неперемещенный угол  $\alpha_1$  остается неизменным (например, вы можете импортировать его из предыдущего измерения с перетаскиванием), и плотность магнитного потока тоже вводится. Используя эти значения, программа вычисляет процентное изменение длины волны и энергию расщепления. Кроме того, соответствующая точка значении показана на диаграмме. (Для того, чтобы подтвердить эффект для других колец при одинаковой плотности магнитного потока или для повторения с различной плотностью магнитного потока, необходимо исследовать пики с одинаковыми компонентами ( $\sigma^+$  или  $\sigma^-$ ) каждый раз.)

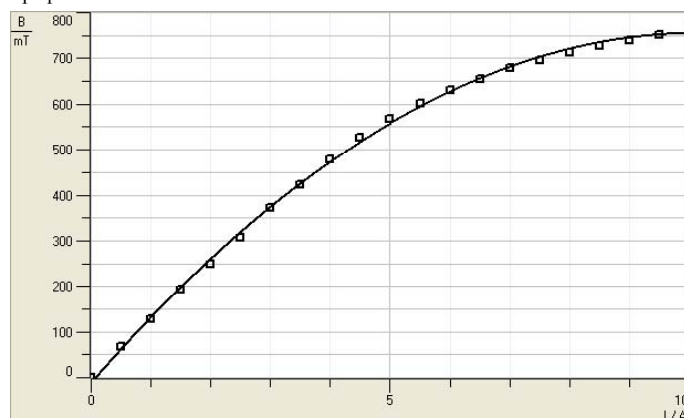
## Примеры измерения

### а) Измерение магнитного поля

Таблица 1: Зависимость магнитного поля В от тока I

$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{mT}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{mT}$
0.0	0		
0.5	68	5.5	601
1.0	127	6.0	631
1.5	194	6.5	655
2.0	249	7.0	678
2.5	307	7.5	695
3.0	373	8.0	713
3.5	423	8.5	728
4.0	479	9.0	739
4.5	528	9.5	752
5.0	569	10.0	765

График 1: Зависимость магнитного поля В от тока I



## Оценка

Градиенты  $A$  для компонентов кривой  $\sigma_+$  или  $\sigma_-$

$$A = 56.7 \frac{\mu\text{eV}}{\text{T}} \text{ and } A = -58.8 \frac{\mu\text{eV}}{\text{T}}$$

Средняя величина для магнетона Бора:

$$\mu_B = 57.8 \frac{\mu\text{eV}}{\text{T}} = 9.26 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Js}}{\text{T}}$$

здесь  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ :

$$\frac{e}{m_e} = \frac{4\pi \mu_B}{h} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Литературное значение

$$\mu_B = 57.9 \frac{\mu\text{eV}}{\text{T}}$$

$$\frac{e}{m_e} = 1.759 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

### б) Измерение расщепления кадмиевой линии

Рис. 5: Экранная таблица и график "эффекта Зеемана"

