

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТОГО
ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА**

Методические указания

Иркутск 2007

Лабораторная работа №7. Изучение простого эффекта Зеемана.

Оборудование. Сканирующий и простой интерферометры Фабри-Перо, газоразрядные спектральные лампы, электромагнит, регулятор напряжения, измерительный микроскоп ИЗА-2, зрительная труба.

Цель работы. Исследование расщепления спектральных линий в магнитном поле и определение спектроскопическим методом удельного заряда электрона и напряженности магнитного поля.

Если поместить вещество, которое излучает или поглощает свет, во внешнее магнитное поле, то возникают оптические явления: изменяются спектры испускания и поглощения вещества, поляризационные характеристики света, скорость его распространения и т.д. В спектрах испускания и поглощения появляется расщепление спектральных линий на несколько компонент, которое получило название **эффекта Зеемана**. В зависимости от числа расщеплённых линий различают простой (нормальный) эффект Зеемана и сложный (аномальный) эффект Зеемана. Картина расщепления спектральных линий при наблюдении вдоль направления внешнего магнитного поля называется **продольным** эффектом Зеемана, а для направления, перпендикулярного полю, – **поперечным** эффектом Зеемана.

При отсутствии внешнего магнитного поля электроны в атомах участвуют в орбитальном движении по замкнутым орбитам вокруг ядра и одновременно совершают вращение вокруг собственной оси (спин электрона). Таким образом, электроны в атомах обладают орбитальным механическим моментом \vec{P}_l и собственным моментом – спином \vec{P}_s . Соответственно электронам в атоме присущи магнитные моменты орбитального и спинового движения. Наличие спина электрона в атомах приводит к так называемой тонкой (мультиплетной) структуре их спектральных линий, а у атомов, помещённых в магнитное поле, – к сложному (аномальному) эффекту Зеемана. Спины отдельных электронов в атоме могут быть ориентированы либо параллельно, либо антипараллельно друг другу. Если все спиновые моменты скомпенсированы, то суммарный спиновый момент \vec{P}_s электронной оболочки атома равен нулю. Наблюдаемое при этом расщепление спектральных линий во внешнем магнитном поле называется **простым** или нормальным эффектом Зеемана.

Электронная теория. В случае простого эффекта Зеемана число компонент расщепления, смещение частот спектральных линий и характер поляризации излучения достаточно полно объясняются с помощью классической электронной теории Лоренца. В этой теории излучение монохроматического света рассматривается как результат движения электрона по простому гармоническому закону, т.е. под действием квазиупругой силы, а изменение излучения под

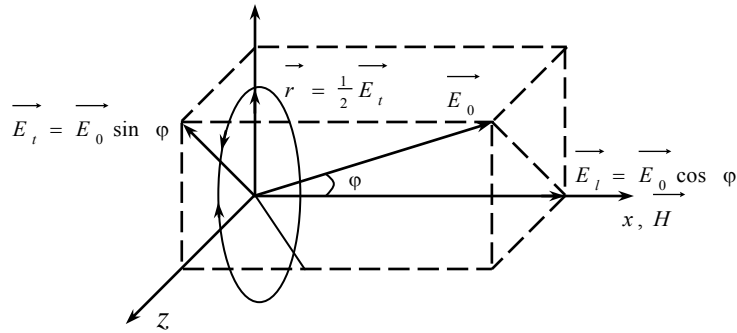


Рис. 1. Разложение линейного движения на два кругополяризованных вращения с противоположными фазами

действием магнитного поля – как следствие изменения характера движения электрона в связи с появлением добавочной силы магнитного воздействия на движущийся электрон.

Рассмотрение простого эффекта Зеемана в классической электронной теории основывается на разложении орбитального движения электрона на два линейных гармонических колебания по двум взаимно перпендикулярным направлениям, т.е. со сдвигом фаз на $\pi/2$, частотой ν_0 и амплитудой E_0 (рис. 1), из которых первое колебание E_l совершается вдоль налагаемого внешнего магнитного поля \vec{H} , а другое E_t – перпендикулярно полю \vec{H} . Компоненту E_t можно рассматривать как результат двух равномерных и противоположно направленных круговых движений с одинаковыми радиусами $r = E_0/2$ и частотой ν_0 в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля \vec{H} .

При наложении внешнего магнитного поля на движущийся электрон действует добавочная сила Лоренца

$$\vec{F} = -\frac{e}{c} [\vec{V} \vec{H}], \quad (1)$$

где e – заряд электрона; V – скорость его движения; c – скорость света. Действие магнитного поля на продольную компоненту E_l отсутствует, поэтому гармоническое колебание вдоль поля остаётся неизменным и сохраняет первоначальную частоту ν_0 . Действие же магнитного поля \vec{H} на круговое движение в плоскости, перпендикулярной \vec{H} , будет приводить при постоянном радиусе орбиты к изменению скорости вращения электрона.

Условие механической устойчивости атома при отсутствии внешнего магнитного поля таково:

$$m_e \omega_0^2 r = \frac{Z e^2}{r^2}, \quad (2)$$

где ω_0 – круговая частота электрона при отсутствии магнитного поля. При наложении магнитного поля центробежная сила для круговых движений изменится вследствие добавления силы Лоренца, и условия механической устойчивости атома соответственно для правого и левого круга примут вид:

$$m_e \omega_d^2 r = m_e \omega_0^2 r + \frac{e}{c} V_d H ; \quad (3)$$

$$m_e \omega_g^2 r = m_e \omega_0^2 r - \frac{e}{c} V_g H ,$$

где ω_d и ω_g – круговые частоты для правого и левого круговых движений при наложении магнитного поля.

Линейные скорости движения электрона соответственно $V_d = \omega_d r$ и $V_g = \omega_g r$, поэтому уравнения (3) запишутся в виде;

$$\omega_d^2 - \frac{e}{m_e} \frac{H}{c} \omega_d - \omega_0^2 = 0 ; \quad (4)$$

$$\omega_g^2 + \frac{e}{m_e} \frac{H}{c} \omega_g - \omega_0^2 = 0 .$$

Их решения имеют вид

$$\omega_d = \frac{e}{2 m_e} \frac{H}{c} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{e}{m_e} \frac{H}{c}\right)^2 + 4 \omega_0^2} ; \quad (5)$$

$$\omega_g = -\frac{e}{2 m_e} \frac{H}{c} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{e}{m_e} \frac{H}{c}\right)^2 + 4 \omega_0^2} .$$

Величина $\frac{e}{2 m_e c} = 8,8 \cdot 10^6$ (в системе CGSM), $\frac{eH}{2 m_e c} = 8,8 \cdot 10^6 H \sim 10^{12} c^{-1}$ при

полях напряжённости $H \sim 10^5$ Э. Между тем ω_0 для спектральных линий, лежащих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, имеет порядок величины $\sim 10^5 c^{-1}$. Следовательно, выполняется условие $\frac{eH}{m_e c} \ll \omega_0$.

Пренебрегая под радикалом членом $\left(\frac{e}{m_e} \frac{H}{c}\right)^2$ по сравнению с $4 \omega_0^2$, из четырёх решений для линейных частот излучений ν_d и ν_g имеем

$$\nu_d = \nu_0 + \frac{1}{4 \pi c} \left(\frac{e}{m_e}\right) H ; \quad (6)$$

$$\nu_g = \nu_0 - \frac{1}{4 \pi c} \left(\frac{e}{m_e}\right) H .$$

Из электродинамики известно, что движущийся по орбите электрон в атоме можно рассматривать как диполь – гармонический осциллятор. Такой диполь, осциллирующий с определённой частотой, представляет собой источник монохроматического излучения той же частоты. Если в отсутствие магнитного поля спектральный аппарат независимо от направления наблюдений в спектрах испускания или поглощения обнаруживает несмещённую неполяризованную

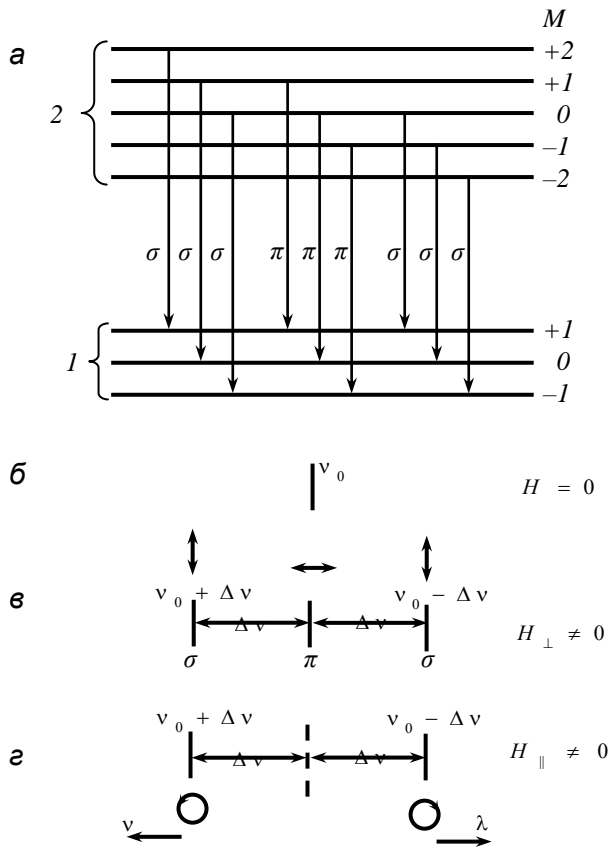


Рис. 2. Схема расщепления энергетических уровней (а) и структура спектральных линий без наложения поля (б), при поперечном (в) и продольном (з) наблюдениях в простом эффекте Зеемана.

вектором \vec{E}_I , перпендикулярным магнитному полю \vec{H} . Расстояние между компонентами

$$\Delta \nu_0 = \frac{1}{4\pi c} \left(\frac{e}{m_e} \right) H. \quad (7)$$

При наблюдении вдоль магнитного поля (продольный эффект Зеемана) в спектрах испускания и поглощения спектральный аппарат обнаруживает дублет (рис. 2,з) – две симметрично смещённые спектральные линии с частотами $(\nu_0 - \Delta \nu)$, $(\nu_0 + \Delta \nu)$ и с расстоянием между компонентами

$$2 \Delta \nu_0 = \frac{1}{2\pi c} \left(\frac{e}{m_e} \right) H. \quad (8)$$

Обе линии оказываются поляризованными по кругу, причём спектральная линия с частотой $(\nu_0 - \Delta \nu)$, смещённая в красную сторону (красная компонента), поляризована по левому кругу, а линия с частотой $(\nu_0 + \Delta \nu)$, смещённая в фиолетовую сторону (фиолетовая компонента), – по правому кругу. При продольном наблюдении несмещённая спектральная компонента отсутствует, так как из законов электродинамики следует, что осциллирующий диполь в

спектральную линию частоты ν_0 (рис. 2,б), то при наложении магнитного поля движение электрона становится сложным. Соответственно будет сложным и спектр излучения электрона; его можно представить как совокупность трёх монохроматических волн различной частоты – $(\nu_0 - \Delta \nu)$, ν_0 , $(\nu_0 + \Delta \nu)$ в разных состояниях поляризации.

При наблюдении в магнитном поле H в направлении, перпендикулярном полю (поперечный эффект Зеемана) в спектрах излучения и поглощения спектральный аппарат обнаруживает триплет (рис. 2,в) – три линейно-поляризованные спектральные линии: несмещённую спектральную линию первоначальной частоты ν_0 с электрическим вектором \vec{E}_I , направленным вдоль магнитного поля \vec{H} , и две смещённые спектральные линии с частотами $(\nu_0 - \Delta \nu)$, $(\nu_0 + \Delta \nu)$ и электрическим

направлении своей оси, совпадающей в данном случае с направлением магнитного поля \vec{H} , света не излучает.

В шкале длин волн величина расщепления спектральных линий в магнитном поле выражается формулой

$$\Delta \lambda = \frac{1}{4 \pi c^2} \left(\frac{e}{m_e} \right) \lambda^2 H . \quad (9)$$

Компонента магнитного расщепления с направлением колебаний электрического вектора \vec{E} вдоль направления силовых линий магнитного поля называется π -компонентой (параллельно-компонентой), а компоненты с направлением колебаний \vec{E} , перпендикулярным магнитному полю \vec{H} , — σ -компонентой (перпендикулярно-компонентой). По интенсивности π -компонента в 2 раза сильнее, чем каждая из σ -компонент. Кругополяризованные компоненты продольного эффекта по интенсивности совпадают с σ -компонентой поперечного эффекта Зеемана (рис. 2,а).

Объясняемый теорией Лоренца простой эффект Зеемана наблюдается лишь для одиночных, или «синглетных», спектральных линий. У сложных спектральных линий при слабых магнитных полях наблюдается эффект Зеемана, при этом в сильных магнитных полях сложное расщепление упрощается и отмечается простое расщепление Зеемана (так называемый эффект Пашена-Бака).

Квантовая теория. Согласно квантовой теории, полная энергия электрона в атоме, находящемся в магнитном поле \vec{H} , равна

$$E(n, l, M) = E_0(n, l) - \frac{eh}{4 \pi m_e c} HM , \quad (10)$$

где $E_0(n, l)$ — полная энергия электрона в атоме при отсутствии магнитного поля и без учёта спина электрона; n, l, M — соответственно главное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Изменение энергии атома в магнитном поле равно:

$$\Delta E = E(n, l, M) - E_0(n, l) = -\mu_0 HM , \quad (11)$$

где $\mu_0 = \frac{h}{4 \pi c} \left(\frac{e}{m_e} \right)$ — магнетон Бора.

При переходе электрона из состояния с квантовыми числами n_1, l_1, M_1 в состояние с квантовыми числами n_2, l_2, M_2 испускается или поглощается монохроматическая волна с частотой

$$\nu = \frac{E(n_1, l_1, M_1) - E(n_2, l_2, M_2)}{h} = \frac{E_0(n_1, l_1) - E_0(n_2, l_2)}{h} + \mu_0 H \Delta M . \quad (12)$$

По правилу отбора для магнитного квантового числа M разрешены только такие переходы, когда

$$\Delta M = M_2 - M_1 = 0, \pm 1 , \quad (13)$$

Поэтому спектральная линия, испускаемая или поглощаемая при $H = 0$, в магнитном поле расщепляется на три линии: несмещённую ν_0 (ей соответствует $\Delta M = 0$) и две симметрично смещённые ($\Delta M = \pm 1$), расстояние между которыми

вычисляется по формуле (7), что полностью совпадает с выводами электронной теории. Следует подчеркнуть, что без учёта спина электрона квантовая теория объясняет лишь простой эффект Зеемана.

По квантовой теории с учётом спина электрона простой эффект Зеемана получается в слабом магнитном поле и лишь в некоторых вполне определённых частных случаях, а именно:

1. При переходах между одиночными уровнями, когда излучаются или поглощаются синглетные линии. В этом случае суммарный спин $\vec{P}_S = 0$, полный механический момент электронной оболочки атома является чисто орбитальным, т.е. $\vec{P}_J = \vec{P}_L$ и для всех одиночных линий множитель Ланде, определяемый выражением

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}, \quad (14)$$

равен единице ($g_J = 1$). Получаются зеемановские триплеты с нормальным расщеплением $\Delta \nu_0 = \mu_0 H$.

2. При переходе между уровнями, для которых полный орбитальный момент электронной оболочки атома равен нулю, т.е. $\vec{P}_L = 0$. В этом случае полный момент электронной оболочки атома является чисто спиновым, т.е. $\vec{P}_J = \vec{P}_S$. Для всех таких уровней множитель Ланде $g_J = 2$. Получаются зеемановские триплеты с расщеплением $\Delta \nu_0 = 2\mu_0 H$, вдвое превышающим нормальное.

3. При переходах между уровнями с $J = 1$ и $J = 0$. Второй уровень не расщепляется ($M = 0$), а первый расщепляется на три подуровня с $M = 0, \pm 1$. Спектральная линия расщепляется на три компоненты, давая зеемановский триплет с расщеплением $\Delta \nu_0 = g_J \mu_0 H$, где множитель g_J относится к уровню с $J = 1$. Величина расщепления спектральных линий в магнитном поле невелика и в полях порядка 10000 Э составляет несколько сотых долей ангстрема. Поэтому для наблюдения такого эффекта нужны спектроскопы с высокой разрешающей

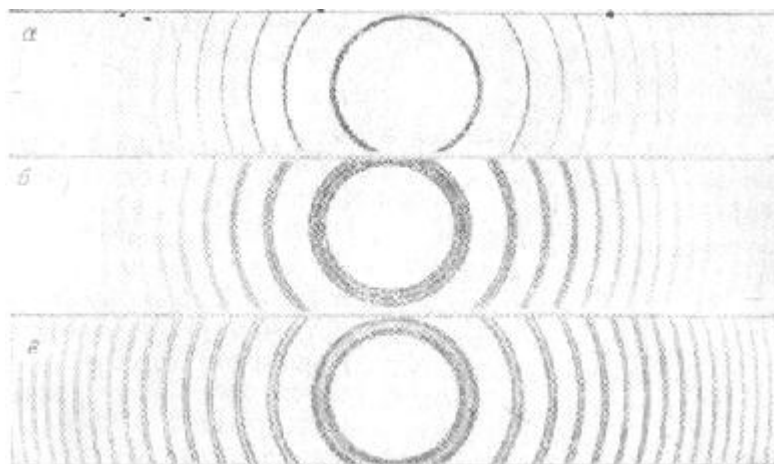


Рис. 3. Интерферограммы расщепления синглетной линии кадмия с $\lambda = 6438,47 \text{ \AA}$ в магнитном поле:

а – без магнитного поля; б – поперечное наблюдение; в – продольное наблюдение.

способностью, например, интерферометры Фабри-Перо и пластинки Люммера-Герке.

Из формулы (7) видно, что удельный заряд электрона e/m_e можно определить спектроскопическим методом по экспериментально измеренным значениям $\Delta\nu_0$ и H . Можно также измерить напряжённость магнитного поля по найденным значениям $\Delta\nu_0$ и e/m_e . Следует отметить, что спектроскопический метод определения удельного заряда — один из наиболее точных способов измерения этой величины, а измерения магнитного поля по эффекту Зеемана приобретают особую актуальность в плазменных исследованиях, когда зондовые измерения ограничены. Для примера на рис. 3 приведены интерферограммы расщепления синглетной красной линии кадмия, полученные на экспериментальной установке с помощью интерферометра Фабри-Перо.

Описание установки

Работа выполняется на экспериментальной установке, оптическая схема которой приведена на рис. 4. Установка позволяет наблюдать и исследовать расщепление спектральных линий в поперечном к полю направлении (поперечный эффект Зеемана). В качестве рабочих спектральных линий могут применяться синглетные линии таких элементов, как, например, линии $Zn I$ с $\lambda = 6362$ и $4680,14 \text{ \AA}$, $Hg I$ с $\lambda = 5790$ и 4046 \AA , некоторые линии натрия, линии кадмия с $\lambda = 6348,47$ и $4678,149 \text{ \AA}$. Исследование проводится на спектральной линии ртути, дающей простой эффект Зеемана. Источником света служит газоразрядная спектральная ртутная лампа. Пистание лампы осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В через пусковое устройство. Для разгорания лампы необходимо 5–10 минут: установление нормального режима излучения лампы контролируется по появлению характерного интенсивного свечения. Сила тока в нормальном режиме работы лампы не более $1,25 \text{ А}$.

Источник света располагается между полюсами P_1 и P_2 сильного электромагнита ЭМ, который питается от выпрямителя ВСА-4. Входное напряжение выпрямителя регулируется с помощью автотрансформатора ЛАТР-1. Величина постоянного тока, протекающего через обмотки электромагнита, контролируется амперметром. Напряжённость магнитного поля может изменяться от 0 до 6000 Э за счёт изменения величины тока. Максимальная величина тока не должна превышать 3 А . Ток через электромагнит необходимо включать и выключать при полностью выведенном в ноль положении ручки регулятора напряжения. В противном случае экстраток размыкания может вызвать пробой обмоток электромагнита. На сердечнике электромагнита надеты две пары обмоток — основные с большим числом витков и дополнительные с небольшим числом витков. Последовательное соединение дополнительных обмоток с основными обмотками электромагнита позволяет менять общее число витков обмоток электромагнита и тем самым даёт возможность получать разные по величине напряжённости магнитного поля при одинаковых токах. Необходимость этого связана с тем, что изучаемый нормальный эффект Зеемана в поперечном магнитном поле используется для измерения величины напряжённости магнитного поля и градуировки электромагнита. Сердечник электромагнита просверлен вдоль оси для наблюдения продольного эффекта Зеемана.

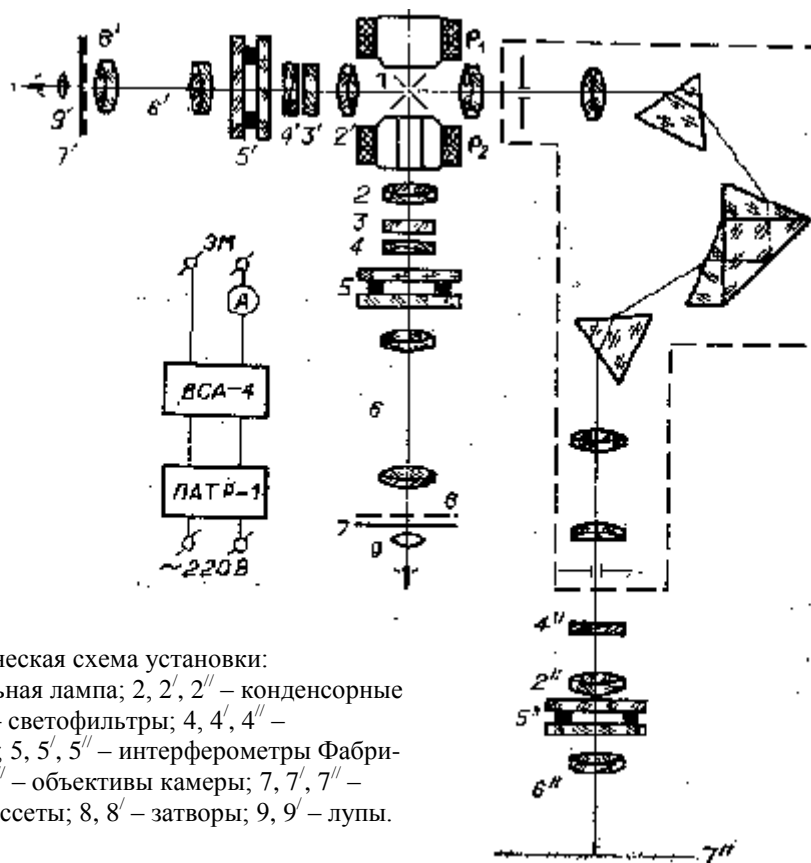


Рис. 4. Оптическая схема установки:
 1 – спектральная лампа; 2, 2', 2'' – конденсорные линзы; 3, 3' – светофильтры; 4, 4', 4'' – анализаторы; 5, 5', 5'' – интерферометры Фабри-Перо; 6, 6', 6'' – объективы камеры; 7, 7', 7'' – плоскости кассеты; 8, 8' – затворы; 9, 9' – лупы.

Свет от источника **1**, проходит через конденсатор с диафрагмой **2**, слегка сходящимся пучком падает на узкополосный соответствующий наблюдаемой линии светофильтр **3**, закрепленный в оправе револьверного диска, затем проходит через анализатор **4** и интерферометр Фабри-Перо **5**; интерференционная картина наблюдается визуально через лупу **9** небольшого увеличения или фотографируется на фотопластинку в фокальной плоскости **7** камерного объектива **6**. Поляризатором света является магнитное поле. Анализатор **4** нужен для проведения поляризационных измерений η , т.е. для выделения π - и σ -компонент расщепления. Вместо светофильтра для выделения монохроматической линии может также использоваться спектрограф ИСП-51. Затвор **8** камеры используется для фотографирования интерференционной картины.

Примечание. 1. Из-за сильного нагревания электромагнит следует включать только на период наблюдения и фотографирования картины расщепления. Время работы спектральных ламп также ограничивается. 2. Газоразрядные лампы типа ДКдС20, ДЦнС20 и ДРС50 излучают ультрафиолетовые лучи, поэтому без защитных очков смотреть на лампу в рабочем режиме не рекомендуется.

Выполнение работы

Упражнение 1. Исследование поперечного эффекта Зеемана

Ртутную лампу включают в присутствии лаборанта. После установления нормального режима работы газоразрядной лампы выполняют при необходимости юстировку. При правильной юстировке интерферометра интерференционная картина представляет собой систему резких, равномерно освещённых колец.

Поместив в фокальной плоскости экран с матовым стеклом, фокусировкой камерного объектива добиваются получения резкой, симметрично расположенной интерференционной картины в фокальной плоскости камерного объектива.

Включают выпрямитель и, постепенно увеличивая ток, в поперечном к полю направлении наблюдают за расщеплением спектральной линии. При определённой напряжённости магнитного поля (порядка 3000 Э), вращая анализатор вокруг оптической оси (если есть такая возможность), определяют состояние поляризации центральной и двух боковых компонент и наблюдают за соответствующим изменением интенсивности этих компонент. Находят положения анализатора, когда он пропускает только центральную несмещённую π -компоненту, боковые смещённые σ -компоненты и уравнивают интенсивности всех трёх компонент. Эти положения фиксируются по показанию лимба оправы анализатора.

После проведения визуальных наблюдений приступают к фотографированию интерференционных картин. Предварительно поставив анализатор в положение, когда уравниваются интенсивности всех трёх компонент, на одной фотопластинке производят съёмки при наложении магнитного поля разных напряжённостей. Время экспозиции каждого снимка, положения кассеты, соответствующие разным снимкам, и режим обработки фотопластинки (или фотоплёнки) указаны в таблице, прилагаемой к установке. Заряжать кассету и проявлять фотопластинки нужно в полной темноте. После проявления и фиксирования фотопластинка должна быть тщательно промыта в проточной воде (не менее 5 мин) и высушена.

Примечания. 1. По мере возрастания напряжённости магнитного поля интенсивность излучения газоразрядной лампы увеличивается, поэтому необходимо соответственно уменьшать время экспозиции снимков. 2. Рекомендуются производить съёмки так же и в положении поляроида, когда выделяются только смещённые σ -компоненты расщепления.

Упражнение 2. Определение удельного заряда электрона

Используя результаты измерений расщепления спектральной линии в поперечном эффекте Зеемана, по расчётной формуле

$$\frac{e}{m_e} = \frac{4\pi c}{h} \Delta \nu_0$$

определяют отношение заряда электрона к массе.

Упражнение 3. Дисперсия и разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо

Используя результаты обработки снимка интерференционной картины, снятой при отсутствии магнитного поля, вычисляют длину волны рабочей спектральной линии и по формуле

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2t}$$

определяют область дисперсии интерферометра Фабри-Перо.

Для определения реальной разрешающей способности интерферометра поступают следующим образом. На установке для исследования продольного эффекта Зеемана медленно увеличивают ток через обмотки электромагнита.

Наблюдая через лупу за поведением спектральной линии, фиксируют момент, когда линия становится «дублетом» (двойная линия), и отмечают значение силы тока через обмотки электромагнита и соответствующее значение напряжённости H магнитного поля. С помощью градуировочного графика находят напряжённость магнитного поля, при которой обе компоненты видны раздельно. Из графика $\Delta\lambda = \varphi(H)$ определяют минимальное наблюдаемое расщепление. Эта величина является пределом разрешения $\delta\lambda$ интерферометра Фабри-Перо. По формуле $R = \lambda/\delta\lambda$ вычисляется реальная разрешающая способность интерферометра.

Определение разрешающей способности интерферометра можно выполнить и на установке для исследования поперечного эффекта Зеемана. При этом с помощью анализатора выделяют только σ -компоненты исследуемой спектральной линии.

В установках данной работы предусмотрена замена камерного объектива зрительной трубой с отсчётным окуляр-микрометром МОВ-1-15. Такая замена позволяет выполнять упражнения без фотоснимков непосредственным наблюдением и измерениями картины расщепления спектральной линии визуально.

Упражнение 4. Распределение интенсивности между расщеплёнными компонентами и построение контура спектральной линии

Для построения контура линии натрия и исследования распределения интенсивности между π - и σ -компонентами при расщеплении её в магнитном поле на установке для наблюдения поперечного эффекта Зеемана при отсутствии анализатора делают два снимка на панхроматическую фотопластинку — при отсутствии магнитного поля и при наложении максимально возможного магнитного поля. Распределение интенсивности в логарифмическом масштабе записывается на регистрирующем микрофотометре МФ-4. Для получения истинного распределения от логарифмического масштаба следует перейти к линейному и полученные результаты представить в виде графика.

Упражнение 5. Измерение напряжённости магнитного поля

К электромагниту подключают дополнительные катушки и выполняют измерения, аналогичные описанным в упражнении 1. Используя результаты измерений расщепления изучаемой спектральной линии и удельного заряда электрона, измеряют спектроскопическим методом напряжённость магнитного поля, и результаты измерений представляют в виде графика зависимости $H = f(\Delta\nu_0)$.

Отчёт составляется в следующей последовательности: цель работы и её краткая теория с выводами основных формул, описание установки и её основные характеристики, полученные экспериментально интерферограммы, графики и основные результаты измерений, оценка точности измерений.

Рекомендуемая литература

1. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М., 1963
2. Кондратьев В.Н. Структура атома и молекул. М., 1959.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1963.
4. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. М., 1963.
5. Шпольский Э.В. Атомная физика. М., 1974, т.1.