

М.В. Иванцовский

Изучение простого эффекта Зеемана¹

Оборудование: кадмиевая лампа, электромагнит, поляризатор, твердотельный эталон Фабри-Перо, интерферометр Фабри-Перо с воздушным зазором, видеокамера персональный компьютер.

Цель работы: изучение спектральных и поляризационных характеристик излучения вещества, помещенного в магнитное поле на примере синглета кадмия $\lambda = 643.8$ нм; определение зависимости величины расщепления линий от напряженности магнитного поля.

Краткая теория

Эффект Зеемана – это расщепление спектральных линий излучения (поглощения) атомов, молекул и кристаллов в магнитном поле. Впервые этот эффект был обнаружен голландским физиком П. Зееманом в 1896 г. при исследовании спектров испускания натриевой горелки, помещенной в магнитное поле.

В опыте Зеемана исследовалась очень узкая зелено-голубая линия кадмия и применялись магнитные поля с напряженностью 1-1.5 Тл.

В первых опытах Зееман обнаружил, что при наблюдении поперек поля спектральная линия расщепляется на три линейно поляризованные компоненты. Средняя компонента не смещена, крайние смещены в противоположные стороны на одинаковые расстояния (в шкале частот). Смещение пропорционально напряженности внешнего магнитного поля B . В средней компоненте электрический вектор направлен параллельно магнитному полю (такие компоненты называются π -компонентами), в крайних – перпендикулярно к нему (такие компоненты называются σ -компонентами). Интенсивность π -компоненты вдвое, а каждой из σ -компонент в четыре раза меньше интенсивности исходной линии.

При наблюдении вдоль магнитного поля получается такое же смещение (при одинаково напряженности магнитного поля), что и в предыдущем случае, но не смещенная компонента отсутствует. Интенсивность каждой компоненты вдвое меньше интенсивности исходной спектральной линии. Обе компоненты поляризованы по кругу в противоположных направлениях (их принято называть так же σ -компонентами). Если свет распространяется в направлении магнитного поля, то σ -компонента с меньшей частотой поляризована по

¹ Питер Зееман (1865 - 1943), - нидерландский физик лауреат Нобелевской премии по физике за 1902 год (совместно с Хендриком Лоренцем) за исследования влияния магнитного поля на излучение (расщепление Зеемана, эффект Зеемана). Открытие дало важный толчок построению квантовой теории. Был опытным экспериментатором, кроме этих исследований занимался измерением скорости света в движущихся средах (стекло, кварц), подтвердив выводы теории относительности Эйнштейна, разработал методику разделения атомов различных элементов в электромагнитном поле, открыл наличие изотопов - (химических элементов, атомы которых обладают разными массами, но одинаковым зарядом ядра).

правому, а с большей – по левому кругу. При изменении магнитного поля на противоположное меняется на противоположную и круговая поляризация обеих компонент.

Картина, наблюдаемая вдоль и поперек магнитного поля, представлена схематически на рис.1.

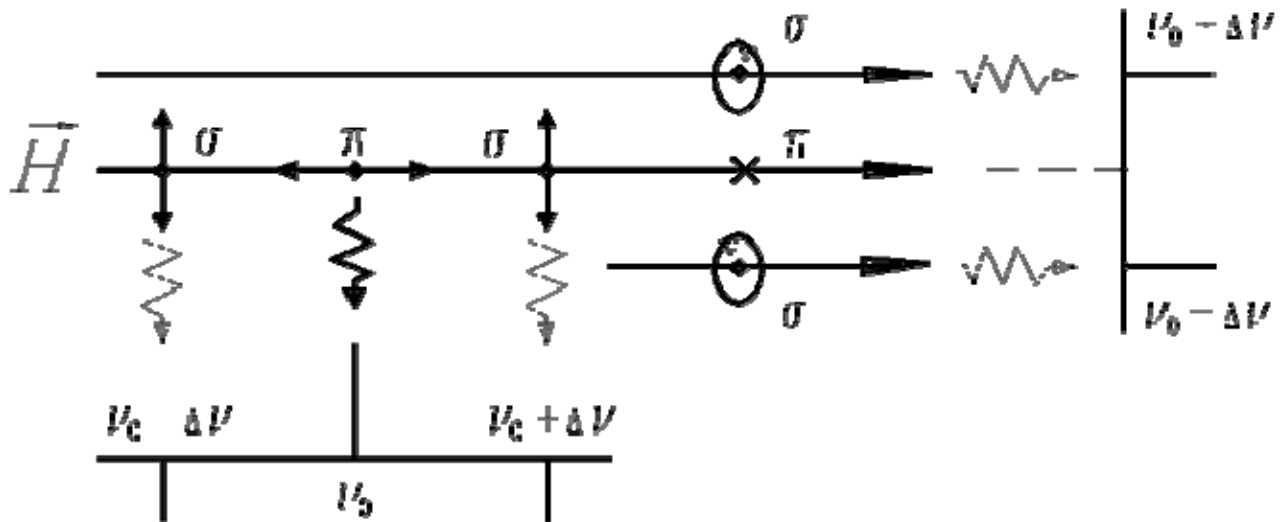


Рис.1. Характер поляризации света при наблюдении эффекта Зеемана

Объяснение эффекта в классической теории Лоренца.

Это классическая теория, в простейшей форме которой излучающими центрами являются гармонические осцилляторы в виде квазиупруго связанных электронов. В отсутствие внешнего магнитного поля уравнение движения такого электрона имеет вид

$$\ddot{r} + \omega_0^2 r = 0, \quad (1)$$

где ω_0 – собственная частота электрона. При наличии постоянного магнитного поля на электрон действует еще и сила Лоренца $-\frac{e}{c}[\dot{r}B]$ (e – заряд электрона). Тогда, уравнение движения электрона примет вид:

$$\ddot{r} + \omega_0^2 r = -\frac{e}{mc}[\dot{r}B], \quad (2)$$

где m – масса электрона. Подставим в уравнение ларморовскую частоту²

² **Джозеф Лармор** (англ. Sir Joseph Larmor, 11 июля 1857, Северная Ирландия — 19 мая 1942) — ирландский физик и математик. С 1903 по 1932 профессор на кафедре математики Кембриджского университета. Научные труды по электронной теории, электродинамике движущихся сред и математической физике. Впервые описал явление т. н. Лармора прецессии (1895). В 1900 независимо от Х.А. Лоренца пришёл к релятивистским преобразованиям координат и времени (так называемого Лоренца преобразования) и формуле сложения скоростей.

$$\Omega = \frac{e}{2mc} B, \quad (3)$$

получим:

$$\ddot{r} + 2[i\Omega] + \omega_0^2 r = 0. \quad (4)$$

Классическая теория сводится к решению этого уравнения. Для решения уравнения (4) перейдем к координатной форме. Для этого необходимо ввести систему координат. Направим ось Z прямоугольной системы координат вдоль магнитного поля B . Тогда предыдущее уравнение сведется к системе трех скалярных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\Omega\dot{y} + \omega_0^2 x = 0, \\ \ddot{y} + 2\Omega\dot{x} + \omega_0^2 y = 0, \\ \ddot{z} + \omega_0^2 z = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Из последнего уравнения видно, что магнитное поле не влияет на движение электрона вдоль магнитного поля в соответствии с тем, как направлена сила Лоренца. Кроме того видно что уравнения в системе разделились, что позволяет нам решать уже систему из 2х уравнений. Интегрирование первых двух уравнений (5) удобно провести в комплексной форме. Объединим x и y в комплексную координату $\beta = x + iy$. Она определяет положение электрона в координатной плоскости (X,Y). Заметив, что $-i\dot{\beta} = \dot{y} - i\dot{x}$, умножим второе уравнение (5) на i и сложим с первым. Тогда

$$\ddot{\beta} - i2\Omega\dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = 0. \quad (6)$$

Ищем решение этого уравнения в виде $\beta = e^{i\omega t}$. Постоянная ω найдется из квадратного уравнения

Частица с зарядом e и произвольным направлением начальной скорости движения в строго однородном магнитном поле движется, в общем случае, по винтовой линии вокруг силовой линии магнитного поля. Чем сильнее поле, тем уже винтовая траектория. Геометрия движения в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю – круг. Радиус этой окружности называется Ларморовским радиусом и записывается как: $r_{lar} = \frac{mV_{\perp}c}{eB}$, где m – масса частицы, V_{\perp} – поперечная (к магнитному полю) составляющая скорости частицы, c – скорость света, B – магнитная индукция. В свою очередь, угловая частота вращения этой частицы называется Ларморовской или циклотронной и записывается как: $\Omega = \frac{e}{mc} B$. Отличие в $\frac{1}{2}$ от уравнения (3) объясняется переобозначением для удобства решения диф. уравнения.

$$-\omega^2 + 2\Omega\omega + \omega_0^2 = 0, \quad (7)$$

которое дает

$$\omega = \Omega \pm \sqrt{\omega_0^2 + \Omega^2}. \quad (8)$$

Даже в очень сильных магнитных полях квадратом ларморовской частоты можно пренебречь по сравнению с ω_0^2 . Например, если $B = 10^4$ Гс, то формула (3) дает $\Omega \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$, тогда как для видимого света ($\lambda = 500 \text{ нм}$) $\omega \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, получаем $\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2 \sim 10^9$.

Таким образом, с большой точностью

$$\omega = \Omega \pm \omega_0. \quad (9)$$

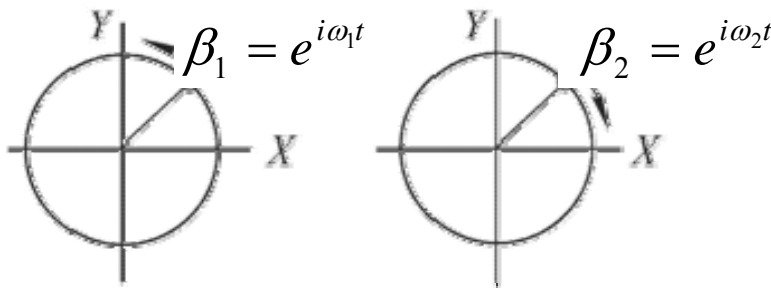


Рис. 2 Направление вращения для различных решений

Что бы не пользоваться отрицательными частотами, введем переобозначение, положив $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$, $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$. Тогда полученные два решения запишутся в виде

$$\beta_1 = e^{i\omega_1 t}, \quad \beta_2 = e^{i\omega_2 t}. \quad (10)$$

Первое решение представляет круговое движение, в котором электрон вращается против часовой стрелки с угловой частотой ω_1 , второе – также круговое движение, но по часовой стрелке и с частотой ω_2 (рис.2). Общее решение соответствует наложению таких двух вращений.

Перейдем теперь, непосредственно, к объяснению расщепления спектральных линий в магнитном поле. Колеблющийся электрон излучает электромагнитные волны. Излучение максимально в направлении, перпендикулярном к ускорению электрона, а в направлении ускорения отсутствует в соответствии с диаграммой направленности излучения диполя. Согласно классической теории, частота излучаемого света совпадает с частотой колебания электрона. Но последняя меняется при включении магнитного поля. Поэтому должна измениться и частота излучаемого света. При наблюдении вдоль магнитного поля колебание в том же направлении излучения не дает. Излучение создается только круговыми

вращениями электрона. В результате наблюдается только две σ -компоненты с круговой поляризацией и частотами $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$ (рис. 1).

При наблюдении поперек магнитного поля B колебания электрона, параллельные B , дают максимум излучения. Им соответствует несмещенная π -компонента, в которой электрический вектор параллелен B . Оба круговых движения совершаются в плоскости, перпендикулярной к B . Разложим каждое из них на гармоническое колебание вдоль линии наблюдения и перпендикулярное к нему. Только колебания, перпендикулярные к линии наблюдения, сопровождаются излучением и дают две σ -компоненты с частотами $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$, в которых электрические векторы перпендикулярны к B .

Таково объяснение расщепления спектральных линий, наблюдавшееся в экспериментах Зеемана. Если учесть, что отсутствие магнитного поля все направления движения электрона равновероятны, то нетрудно объяснить и относительные интенсивности спектральных линий в этих опытах.

Сложный (аномальный) эффект Зеемана.

Дальнейшие опыты показали, что явление Зеемана в том виде, в каком оно наблюдалось сначала и нашло объяснение в теории Лоренца – лорентцовский триплет, состоящий из одной π -компоненты и двух σ -компонент, а также дублет из двух σ -компонент, поляризованных по кругу, - наблюдается крайне редко. Такое расщепление называется простым или нормальным эффектом Зеемана. Простой эффект дают так называемые синглетные, т.е. одиночные, практически монохроматические спектральные линии. Подавляющее большинство спектральных линий являются мультиплетами (дублетами, триплетами, квартетами и т.д.), т.е. состоят из нескольких тесно расположенных линий.

Мультиплеты в магнитных полях дают значительно более сложную картину расщепления, чем расщепление в простом эффекте Зеемана. Примером может служить дублет натрия ($\lambda_1=589,6$ нм; $\lambda_2=589$ нм). Первая линия здесь расщепляется на четыре линии, средние из них являются π -, а крайние - σ -компонентами. Вторая же линия расщепляется на шесть компонент: две средние являются π -, а крайние - σ -компонентами. Таким образом, весь дублет расщепляется на 10 линий. Наблюдаются и значительно более сложные картины расщепления мультиплетов. Такие расщепления называются сложным или аномальным эффектом Зеемана. Предпочтителен термин «сложный эффект», так как именно сложный, а не простой эффект является правилом, а не исключением.

Объяснение сложного эффекта Зеемана дала квантовая теория, да и то после того, как был открыт спин (т.е. собственный момент количества движения) и связанный с ним

магнитный момент электрона. В случае синглетных спектральных линий теория приводит к тем же результатам, что и простая теория Лоренца.

Квантовая теория эффекта Зеемана

Если поместить атом в магнитное поле, то его энергетические уровни (*термы*) изменяются. Изменение энергии связано с взаимодействием магнитного момента уровня атома с внешним магнитным полем, а его величина в случае слабого поля равна

$$\Delta E = -(\boldsymbol{\mu} \mathbf{H}) \quad (11)$$

где $\boldsymbol{\mu}$ магнитный момент уровня, \mathbf{H} – магнитное поле.

Магнитный момент терма пропорционален его полному механическому моменту \mathbf{J} составляющих его электронов:

$$\boldsymbol{\mu} = -\mu_B g_J \mathbf{J} \quad (12)$$

где магнетон Бора³ $\mu_B = e\hbar / 2m_e c = 9,273 \cdot 10^{-21}$ (эрг / Гс), g_J – множитель Ланде, или g-фактор.

Проекция M полного механического момента \mathbf{J} на какое-либо направление (например, направление магнитного поля \mathbf{H}) квантуется, т. е. может принимать лишь строго определенные значения, а именно $M = 0, \pm 1, \dots, \pm J$. Поскольку энергия взаимодействия магнитного момента с магнитным полем зависит от величины проекции момента m , то уровень с моментом \mathbf{J} в присутствии магнитного поля расщепляется на $2J + 1$ компоненту. Говорят, что магнитное поле снимает вырождение уровня по магнитному квантовому числу m . Изменение энергии для каждой компоненты уровня:

$$\Delta E = \mu_B g_J m H. \quad (13)$$

Это расщепление симметрично относительно начального нерасщепленного уровня, а абсолютная величина определяется g-фактором и магнитным полем H . Величина g-фактора существенно зависит от типа связи электронов в атоме (LS - или jj -тип) и в случае чистой LS -связи равна

³ Данная величина названа в честь Нильса Бора. Нильс Хенрик Давид Бор (1885 - 1962) - датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939. Был членом более чем 20 академий наук мира, в том числе иностранным почётным членом АН СССР (1929; членом-корреспондентом - с 1924). Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Внёс значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.

$$g_{\text{LS}} = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (14)$$

Известно, что переходы между уровнями в атомах подчиняются *правилам отбора*: $\Delta m = 0 \pm 1$. Эти правила относятся к наиболее вероятному электродипольному типу переходов. Другие типы переходов, с другими правилами отбора, возможны, но их вероятность значительно меньше. Переходы с $\Delta m = 0$ называются π -компонентами, а с $\Delta m = \pm 1$ — σ -компонентами. Зеемановские компоненты спектральной линии поляризованы. Характер поляризации зависит от направления наблюдения, каким образом, было описано выше.

В данной работе для наблюдения эффекта Зеемана выбрана красная линия кадмия **Cd** с длиной волны $\lambda = 6438 \text{ \AA}$. (рис. 3)

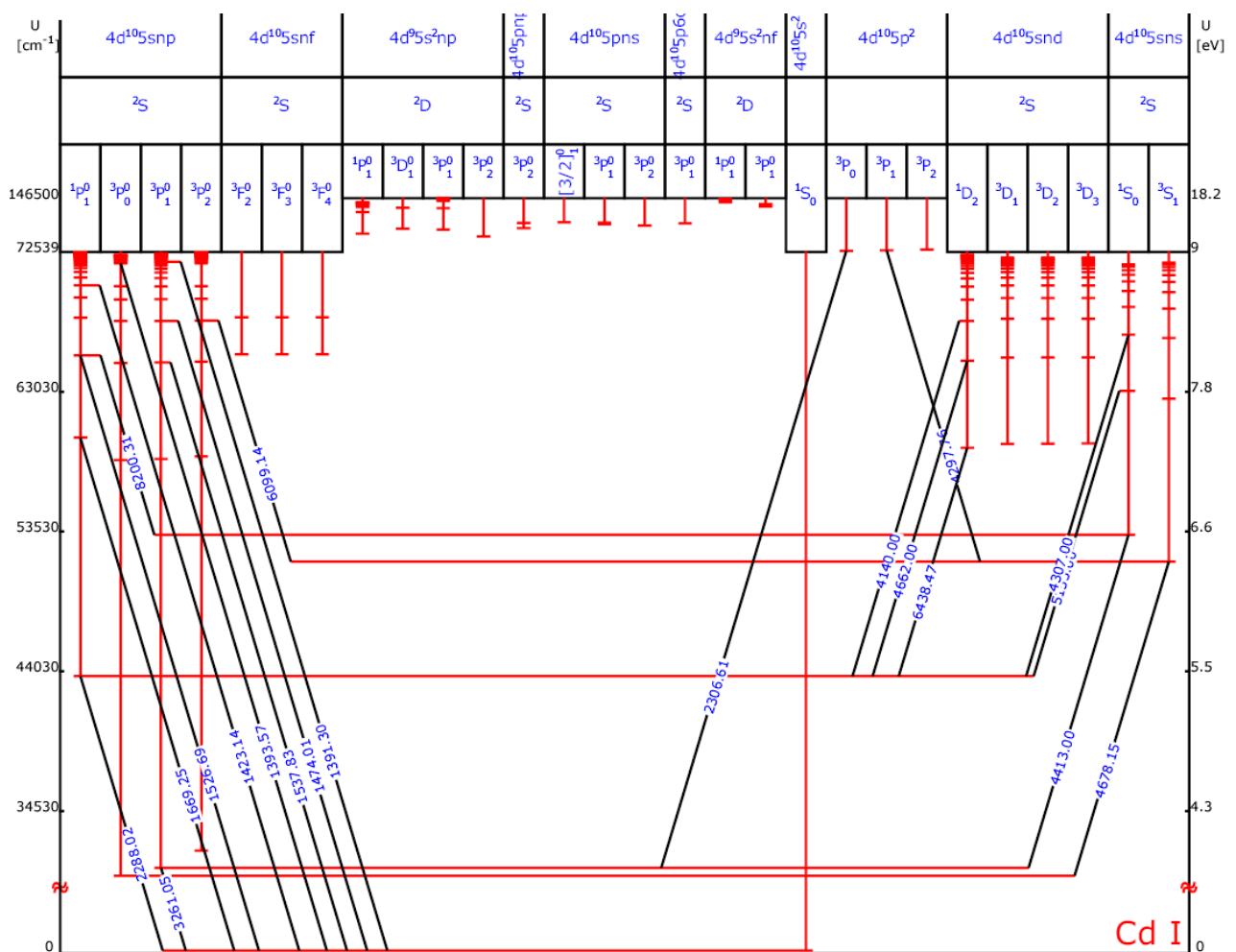


Рис. 3. Диаграмма Гротриана для атома кадмия

Эта линия соответствует атомному переходу $5^1P_1 - 6^1D_2$. Здесь для описания терма приняты обозначения $n^{2S+1}L_J$, n – главное квантовое число (номер электронной оболочки в атоме $n=1, 2, \dots$), S – суммарный спиновый момент ($S=0, 1/2, 1\dots$), L – орбитальный момент ($L=S, P, D\dots$), J – полный момент состояния ($J=|L-S|, \dots, |L+S|$). Для выбранного

перехода $S = 0$ и $J = L$, следовательно, g -фактор начального и конечного состояния одинаков и равен 1. В совокупности с правилами отбора это приводит к тому, что линия, соответствующая рассматриваемому переходу, расщепляется в магнитном поле на 3 компоненты, причем π -компонента остается несмещенной. Такая упрощенная картина расщепления линии в магнитном поле называется простым эффектом Зеемана. В случае, когда g -факторы уровней, между которыми происходит переход, не равны и полный механический момент J не равен 0, картина заметно усложняется. В этом случае говорят о сложном (аномальном) эффекте Зеемана.

Величина зеемановского расщепления невелика и линейно связана с напряженностью магнитного поля:

$$\delta\lambda = \mu_B \frac{\lambda^2}{2\pi\hbar c} H \quad (15)$$

т. е. при $\lambda = 6438 \text{ \AA}$ и $H = 5 \text{ кГс}$, $\delta\lambda \approx 0,1 \text{ \AA}$.

Поэтому наблюдение этого эффекта возможно только в спектральных приборах с высокой разрешающей силой. В качестве такого прибора в лабораторной работе используется интерферометр Фабри–Перо.

Схема эксперимента.

На рис. 3, 4 приведены оптическая схема лабораторной работы для наблюдения эффекта Зеемана и ее внешний вид. Для создания магнитного поля в работе используются электромагниты (2) между полюсами которых размещена кадмиевая лампа (1). В качестве спектрального прибора для разложения излучения лампы в спектр используются эталон Фабри-Перо (9) и интерферометр Фабри-Перо (10). Для того чтобы эти спектральные приборы корректно работали, необходимо обеспечить, чтобы падающий свет имел очень узкий спектральный диапазон, и обладал практически плоским волновым фронтом. Узость спектрального диапазона источника обеспечивается светофильтром (8) или как в нашем случае, набором из двух светофильтров и ограничивается областью свободной дисперсии используемого интерферометра/эталона Фабри–Перо. Плоский волновой фронт на входе в интерферометр/эталон формируется с помощью линзы (4), в фокальной плоскости которой размещается источник света. Обратите внимание, что для наблюдения продольного эффекта в сердечнике одного из магнитов (3) сделано сквозное отверстие. Качество интерференционной картины сильно зависит от качества изготовления эталона Фабри-Перо. В частности от таких характеристик как: однородность напыления зеркал на стеклянную пластину, равномерности коэффициента отражения по всей поверхности зеркал и качества поверхности самой пластины. Все это приводит к ухудшению картинки в плоскости изображения, а конкретно, к размытию (уширению) линий. Для повышения четкости

спектральных колец установлена диафрагма (7), которая коллимирует световой поток вблизи оси, где качество эталона всегда выше, чем на краях пластины. После эталона, установлен объектив (11), который строит изображение интерференционной картины на светочувствительный элемент телекамеры (12) – ПЗС-матрицу. С телекамеры изображение передается либо на монитор, либо на персональный компьютер, в зависимости от того, куда подключен сигнальный кабель видеокамеры. Для визуального контроля эффекта поперек магнитного поля необходимо установить в рабочее положение поворотное зеркало (13), которое отражает выходящий из интерферометра свет в зрительную трубу (14), через которую наблюдатель (15) может наблюдать интерференционную картину.

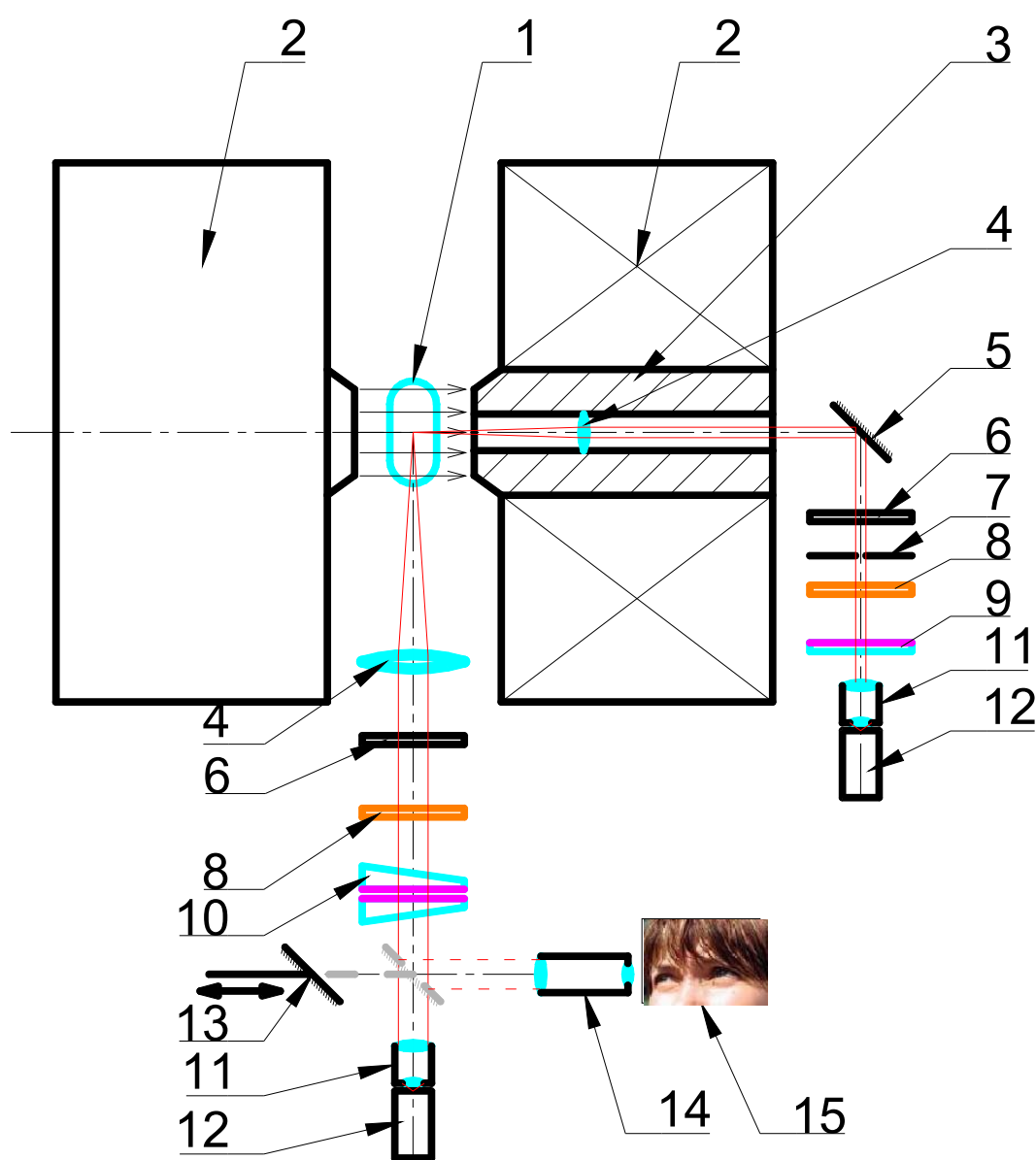


Рис. 3 Схема установки.

- | | |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1. Кадмиевая лампа | 8. Светофильтр |
| 2. Электромагнит | 9. Твёрдый эталон Фабри-Перо |
| 3. Сердечник электромагнита с отверстием | 10. Эталон Фабри-Перо с воздушным зазором |
| 4. Линза | 11. Объектив |
| 5. Поворотная призма | 12. Видеокамера |
| 6. Поляризатор | 13. Подвижное поворотное зеркало |
| 7. Диафрагма | 14. Зрительная труба |
| | 15. Наблюдатель |

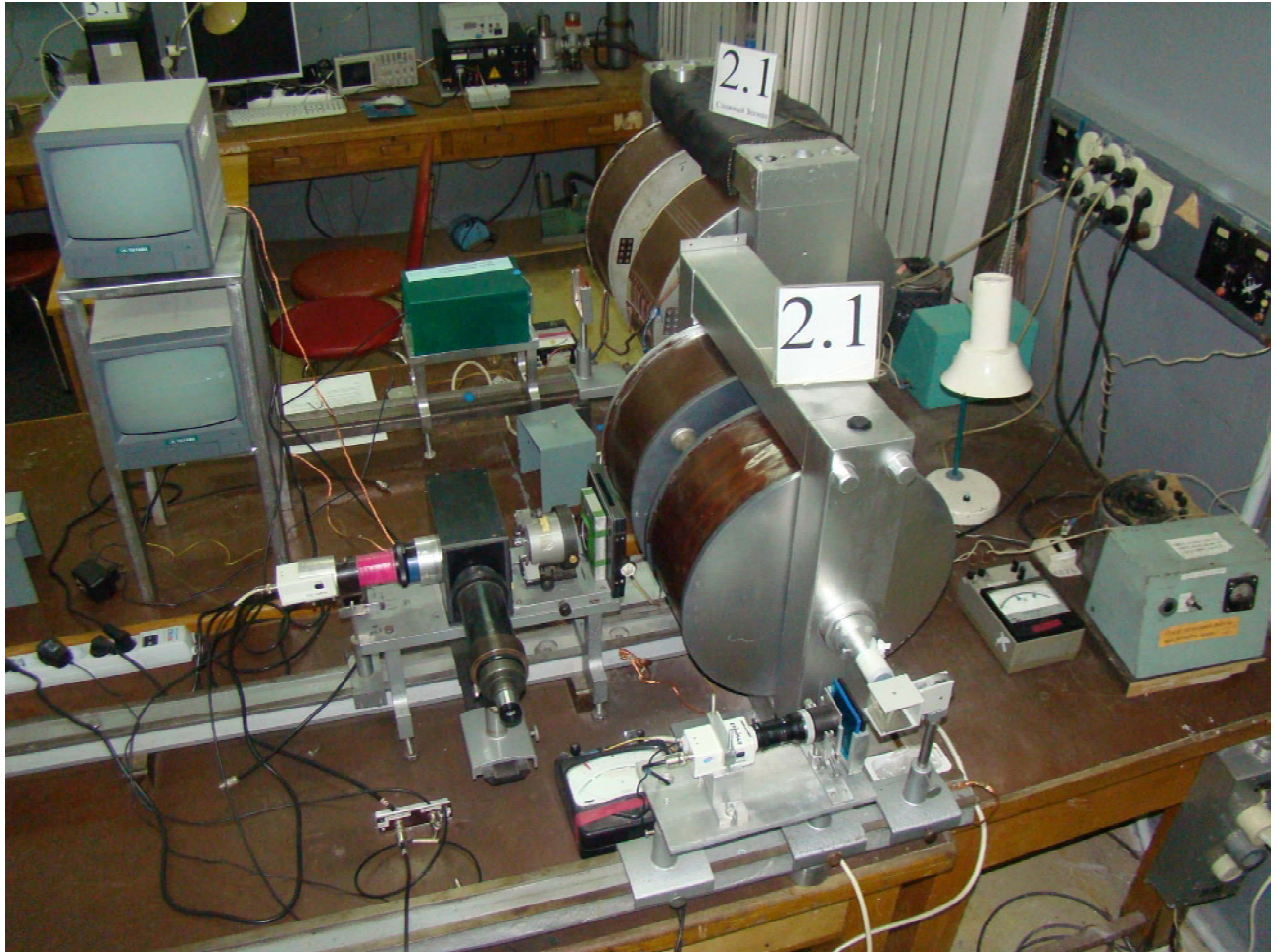


Рис. 4. Внешний вид установки

Задания.

1. Измерьте расщепление линии при наблюдении поперек магнитного поля в Ангстремах и Гц при постепенном увеличении тока катушек от 0 до 0,8 А и определите величину магнитного поля. Для этого используйте рис.8, формулы (15), (21) и (26). Длина волны линии Cd 643.8 нм, воздушный зазор в эталоне Фабри-Перо = 6 мм.

Поставьте полученные экспериментальные точки в координатах $H(I)$. Впишите в экспериментальные точки методом наименьших квадратов, теоретическую функцию.

Диаметры колец D измеряются в условных единицах – пикселях.

В отчете приведите одну из интерферограмм (пример на рис. 7) и срез интенсивности линий (пример на рис. 6).

2. Проведите измерения расщепления линии при наблюдении вдоль магнитного поля, при тех же условиях. Рассчитайте толщину твердотельного эталона Фабри-Перо, используя величину расщепления, при максимальном поле полученную в предыдущем пункте (помните, что в этом эталоне нет воздушного зазора). Используя рассчитанную толщину эталона, определите величину магнитного поля и добавьте точки на график из первого задания.

В отчете приведите одну из интерферограмм (пример на рис. 7) и срез интенсивности линий (пример на рис. 6).

3. Проведите сравнение экспериментальных данных наблюдения вдоль и поперек магнитного поля. Сделайте выводы.
4. Проведите измерения интенсивности не расщепленной линии и сравните ее с интенсивностью каждой из расщепленных компонент для обоих направлений наблюдения. Сделайте заключение о полученных отношениях (определите относительные интенсивности). Проведите сравнение полученных данных с теорией.

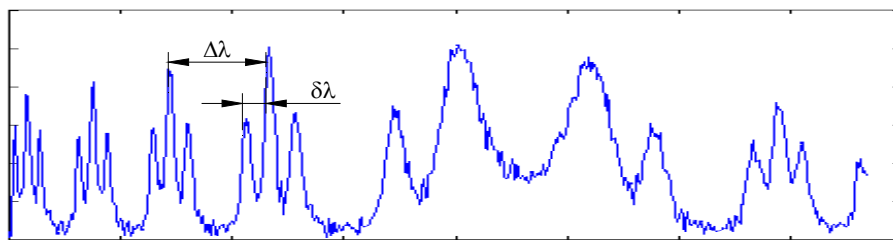


Рис. 6 Расщепление линии кадмия в магнитном поле. $\Delta\lambda$ - область свободной дисперсии, $\delta\lambda$ - величина расщепления. График соответствует интенсивности линий на фотографии с рис. 7. где D – диаметр колец в фокальной плоскости объектива (на ПЗС матрице).

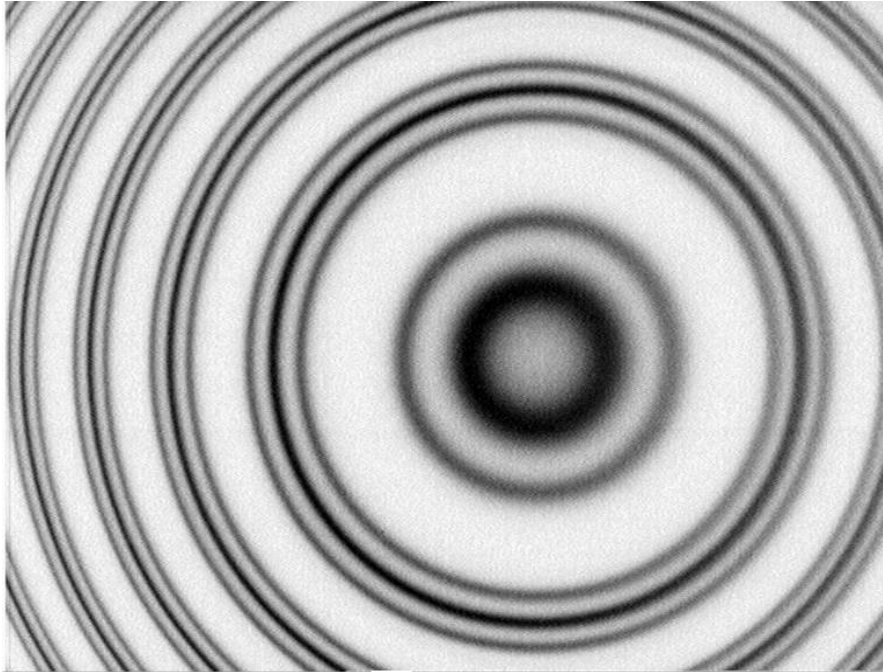


Рис. 7 Пример интерференционной картины полученной при наблюдении эффекта Зеемана поперек магнитного поля (изображение инвертировано, т.е. черные кольца – это максимумы).

Историческая справка.

В конце XIX столетия, когда Питер Зееман решил провести серию опытов и проверить, обладают ли атомы магнитными свойствами, всё было, однако, далеко не столь очевидно. Ученый поместил крошечный образец натрия между полюсами регулируемого магнита и стал изучать влияние магнитного поля на спектральные линии излучения атомов натрия. Выяснилось, что при усилении магнитного поля спектральные линии в каждой группе частот размываются, то есть в них появляются новые частоты излучения. Так было впервые однозначно подтверждено существование эффекта, который впоследствии будет назван эффектом Зеемана.

Применение Эффекта Зеемана.

В настоящее время эффект Зеемана применяется в спектроскопии для исследования тонкой структуры вещества, в устройствах квантовой электроники и для измерения магнитных полей в лабораторных условиях и магнитных полей космических объектов.

1. Космические исследования.

Эффект Зеемана нашел очень полезное применение в астрономии, поскольку по расщеплению линий в спектре излучения небесных тел можно судить о напряженности их

магнитных полей. Главный метод измерения магнитных полей, который успешно применяется в астрономии, основан на использовании эффекта Зеемана. В результате магнитного расщепления атомных уровней и их неравновесного заселения в звездных атмосферах излучение в спектральных линиях оказывается поляризованным, причем поляризация возникает в линиях излучения и поглощения. Уровень поляризации напрямую связан с магнитным полем, что позволяет непосредственно определять величину этого поля.

Например, именно по эффекту Зеемана астрофизикам удалось установить, что пятна на Солнце являются следствием возмущения мощных магнитных полей вблизи его поверхности — солнечных магнитных бурь.

В космических условиях эффект Зеемана часто настолько мал, что линии не разделяются, но тогда можно заметить различную поляризацию правой и левой стороны профиля линии. Т.о. был обнаружен эффект Зеемана в солнечных и звёздных магнитных полях, а также у линии 21 см межзвёздного водорода.

Оборудование.

В качестве примера оборудования, использующегося для таких измерений, можно

привести **солнечный магнитограф**. Это прибор для измерения магнитного поля на Солнце. Основные элементы магнитографа: электрооптический светомодулятор, спектрограф, светоприёмники (фотоумножители), записывающее устройство. Метод измерения основан на Зеемана эффекте, в результате которого спектральная линия расщепляется на две s-компоненты, поляризованные по кругу в противоположных направлениях. Изображение Солнца

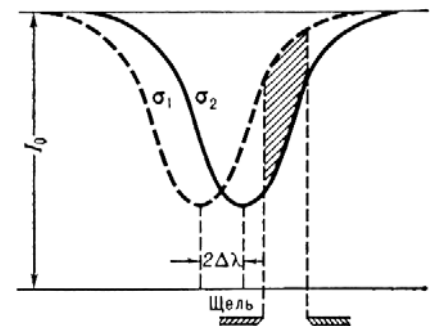


Рис. 9 Смещение линии на щели спектрографа.

фокусируется на щель спектрографа, за которой установлен электрооптический кристалл в комбинации с поляризатором. Под действием переменного электрического напряжения устройство пропускает s-компоненты, поочередно сдвигая линию на величину 2 дельта лямбда (см. рис. 9). В фокальной плоскости спектрографа свет от крыла линии проходит через щель и падает на фотоумножитель, соединённый с усилителем, переменный сигнал которого регистрируется. Заштрихованная на рисунке площадь пропорциональна изменению интенсивности света, проходящего через щель, при очередном пропускании поляризованных компонент линий s1 и s2. При небольших расщеплениях сигнал солнечного магнитографа пропорционален напряжённости продольного поля. [1-3].

2. Обнаружение и измерение малых концентраций веществ.

Во многих областях человеческой деятельности (таких как: контроль окружающей среды (вода, воздух, почва), санитарно-гигиенические исследования, контроль продуктов питания, биотехнология, медицина, научные исследования, геология, нефтехимия и др.) есть необходимость в количественных измерениях малых концентраций каких-либо примесей в основной массе образца. Одним из способов обнаружения примесей и их количественного анализа является атомно-абсорбционная спектроскопия [4-8].

Оборудование.

Атомно-абсорбционные спектрометры (ААС) - приборы, предназначенные для проведения количественного элементного анализа (до 70 элементов) по атомным спектрам поглощения, в первую очередь для определения содержания металлов в растворах их солей: в природных и сточных водах, в растворах-минерализатах консистентных продуктов, технологических и прочих растворах.

Принцип действия атомно-абсорбционного спектрометра основан на измерении величины поглощения луча света, проходящего через атомный пар исследуемой пробы. Для превращения исследуемого вещества в атомный пар используется атолизатор (графитовая печь). В качестве источника света используются различные узкополосные источники света.

После прохождения через атомные пары исследуемой пробы луч света поступает на монохроматор, а затем на приёмник, который и регистрирует интенсивность излучения.

ААС с коррекций фона основе эффекта Зеемана.

Если в атолизаторе (графитовой печи) создать магнитное поле, то спектральные линии поглощения атомов определяемого элемента расщепляются на три компоненты, при этом π компоненту можно удалить из спектра с помощью поляризатора.

Для коррекции фона с помощью эффекта Зеемана последовательно включают и отключают сильное магнитное поле. Общую оптическую плотность (селективное поглощение элемента + неселективное фоновое поглощение) измеряют при отключенном магнитном поле, а фоновое поглощение – при включенном магнитном поле. Разность между этими двумя значениями дает скорректированное селективное поглощение атомов анализируемого элемента.

Даже при такой схеме измерений на результаты измерения ААС существенно влияют два фактора: нестабильность интенсивности резонансного излучения и излучение от посторонних источников (в том числе свечение электротермического атолизатора). Для решения этих проблем в ААС применяют метод Зеемановской модуляционной поляризационной спектрометрии (ЗМПС). Зеемановская поляризационная атомно-абсорбционная спектрометрия (ЗП-ААС) отличается от традиционных методов ААС тем, что

измерение резонансного атомного поглощения производится по углу поворота плоскости поляризации пучка излучения после прохождения поглощающей среды.

ЗП-АА-спектрометры.

Принцип работы ЗП-АА-спектрометра состоит в том, что сквозь поглощающую среду, содержащую резонансно-поглощающие атомы, пропускают резонансное излучение, предварительно поляризованное под углом 45° к направлению магнитного поля. Свет такой поляризации можно разложить на равные по амплитуде составляющие: параллельную и перпендикулярную магнитному полю. Благодаря различию в пропускании излучения различной поляризации, возникающему вследствие эффекта Зеемана, после прохождения среды эти составляющие будут ослабляться в разной степени: компонента с поляризацией, перпендикулярной магнитному полю ослабнет за счет нерезонансного (неселективного) поглощения, в то время как компонента с поляризацией, параллельной магнитному полю, ослабнет как за счет неселективного поглощения, так и за счет резонансного (селективного) поглощения. В результате, после прохождения среды, угол наклона плоскости поляризации пучка будет отличаться от исходного, и это отличие будет тем больше, чем больше селективное поглощение. Таким образом, измеряя поворот плоскости поляризации пучка после прохождения поглощающей среды, можно измерить количество селективно поглощающих атомов в среде [9].

Т.о. современные атомно-абсорбционные спектрометры при количественном определении элементов в жидких пробах различного происхождения и состава достигли чувствительности на уровне долей нг/л.

3. Измерение магнитных полей в лабораторных условиях.

Специальное оборудование.

Тесламетры с оптическим возбуждением (оптической накачкой) используют зеемановское или сверхтонкое расщепление уровней энергии в магнитном поле. Определенный фиксированный уровень в атоме имеет определенное «вырождение», т. е. несколько состояний могут иметь одну и ту же энергию. При наложении внешнего магнитного поля вырождение снимается, т. е. полный момент электрона в атоме, спиновый, орбитальный, прецессируя вокруг направления внешнего поля, получают дополнительную энергию. Значение добавочной энергии зависит от величины магнитного поля. При наложении магнитного поля на ансамбль излучающих атомов большинство линий расщепляется на несколько линий, расстояние между которыми пропорционально величине магнитному полю.

Измерение магнитного поля, сводится к измерению разности частот между компонентами зеемановской структуры [10].

В плазме.

С развитием спектроскопических комплексов стало возможным измерять форму спектральных линий с достаточной точностью для разделения различных эффектов, влияющих на профиль линии (температурного уширения, зеемановского расщепления, штарковского уширения, изотопного сдвига).

Одной из задач, которая может быть решена при помощи измерения этих эффектов, является определение топологии магнитного поля в нутрии плазмы при достаточно большой величине β . Для определения величины магнитного поля удобно использовать яркие спектральные переходы атомов и ионов примесей, содержащихся в плазме.

В качестве примера, на рисунке 10 приведены измерения, проведенные на плазменной установке ГОЛ-3⁴[11]. Для определения величины магнитного поля удобно использовать яркие спектральные переходы атомов и ионов примесей. В данном случае это дублет натрия 588,99 нм, 589,59 нм.

На рисунке приведены кадры, полученные с помощью электронно-оптического преобразователя, с детектором на основе ПЗС матрицы, на каждом из которых одновременно регистрируются спектры σ - и π - поляризованного излучения в интервале по длинам волн около 2 нм. В центре на кадрах непрерывными линиями показаны контуры наблюдаемых спектральных линий, которые были рассчитаны для условий, соответствующих эксперименту.

Для сравнения на рис. 10 показаны контуры линий Na в сильном и слабом поле.

⁴ ГОЛ-3 (Гофрированная открытая ловушка) – это плазменная установка, расположенная в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (см. цветную вставку).. Основные направления исследований: взаимодействие электронных пучков с плазмой, нагрев и удержание субтермоядерной плазмы, воздействие высоко энергетичных пучково-плазменных потоков на материалы.

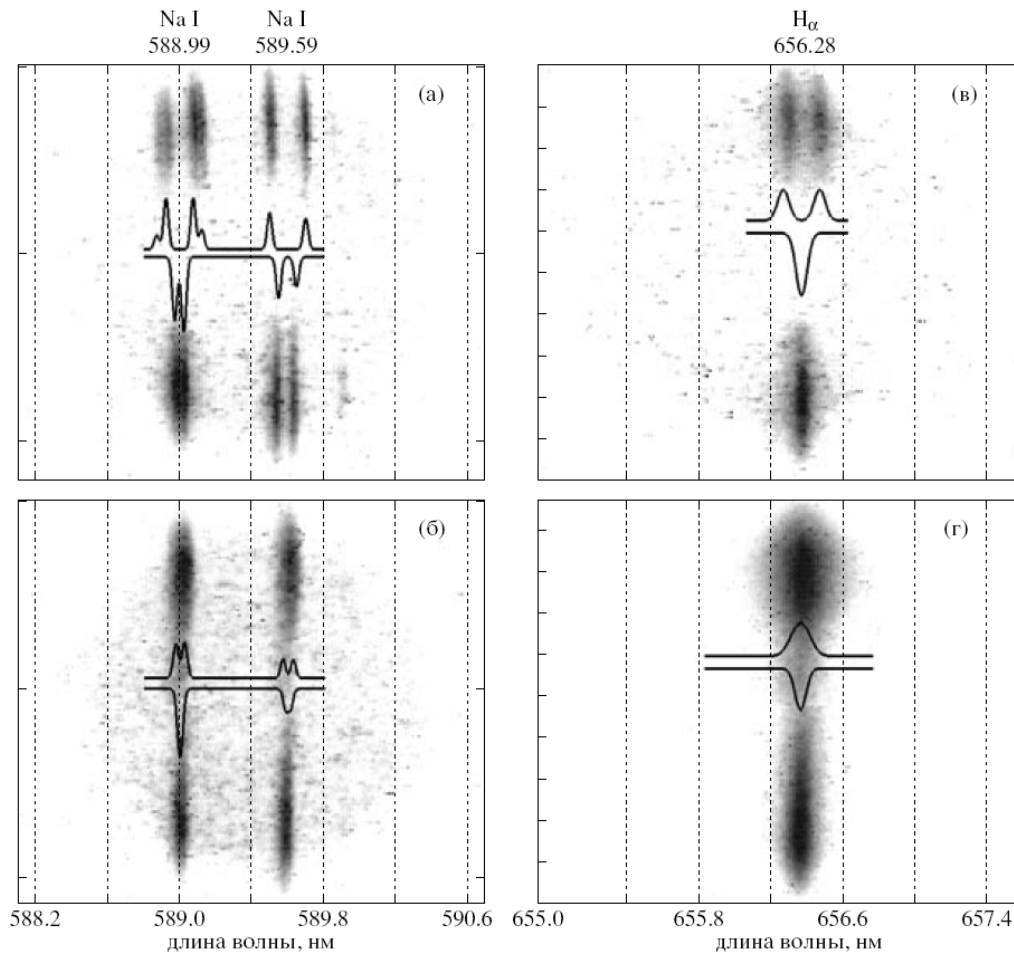


Рис.10 Зеемановское расщепление спектральных линий в магнитном поле, а), б) – дублет Na I; в), г) – линия H_{α} водорода. Измерения проводились в магнитном поле 4.3 Тл для случаев а), в) и 1.3 Тл для случаев б), г). Верхняя часть кадров - σ -поляризация, нижняя - π -поляризация; линии – расчет контуров для соответствующего магнитного поля и поляризации.

4. Методы исследований основанные на эффекте Зеемана.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР, электронный спиновый резонанс).

Метод ЭПР основан на эффекте Зеемана, заключающемся в том, что при введении парамагнитной частицы, характеризующейся квантовым числом S , в постоянное магнитное поле, ее основной энергетический уровень расщепится на $2S + 1$ подуровней, отделенных друг от друга интервалами энергии. При облучении таких частиц, происходит резонансное поглощение падающего излучения, что можно использовать для изучения структуры парамагнитных частиц.

ЭПР является одним из методов радиоспектроскопии. ЭПР используется для изучения систем с ненулевым электронным спиновым магнитным моментом (т.е. обладающих одним или несколькими неспаренными электронами): атомов, свободных радикалов в газовой,

жидкой и твердой фазах, точечных дефектов в твердых телах, систем в триплетном состоянии, ионов переходных металлов.[12]

Так же метод ЭПР нашел широкое применение при исследовании строения комплексов переходных металлов, археологии и палеонтологии (твердотельная дозиметрия ионизирующих излучений, определение возраста минералов) и д.р.

Подробнее смотрите описание лабораторной работы «Электронный парамагнитный резонанс»

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР).

ЯМР имеет ту же природу, что и эффект Зеемана расщепления электронных уровней в магнитном поле.

ЯМР - резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер.

Одни и те же ядра атомов в различных окружениях в молекуле показывают различные сигналы ЯМР. Отличие такого сигнала ЯМР от сигнала стандартного вещества позволяет определить так называемый химический сдвиг, который обусловлен химическим строением изучаемого вещества. В методиках ЯМР есть много возможностей определять химическое строение веществ, конформации молекул, эффекты взаимного влияния, внутримолекулярные превращения.

ЯМР-интроскопия (магнитно-резонансная томография)

Явление ядерного магнитного резонанса можно применять не только в физике и химии, но и в медицине: организм человека — это совокупность все тех, же органических и неорганических молекул.

Сущность ЯМР-интроскопии (или магнитно-резонансной томографии) состоит, по сути дела, в реализации особого рода количественного анализа по амплитуде сигнала ядерного магнитного резонанса. В обычной ЯМР-спектроскопии стремятся реализовать, по возможности, наилучшее разрешение спектральных линий. Для этого магнитные системы регулируются таким образом, чтобы в пределах образца создать как можно лучшую однородность поля. В методах ЯМР-интроскопии, напротив, магнитное поле создается заведомо неоднородным. Тогда есть основание ожидать, что частота ядерного магнитного резонанса в каждой точке образца имеет свое собственное значение, отличающееся от значений в других частях. Задав какой-либо код для градаций амплитуды ЯМР-сигналов (яркость или цвет на экране монитора), можно получить условное изображение (томограмму) срезов внутренней структуры объекта.

Подробнее смотрите описание работы «Ядерный магнитный резонанс»

Вопросы

1. Как соотносятся интенсивности, не расщепленной линии с расщепленными компонентами? Объяснить, почему это соотношение именно такое?
2. Почему расщепления вдоль и поперек магнитного поля (в шкале частот) равны?
3. Когда Вы наблюдали кольца через зрительную трубу, какого цвета они были? Почему именно такого?
4. Объяснить принцип работы электромагнита.
5. Объяснить принцип работы интерферометра Фабри-Перо.
6. Что такое эталон Фабри-Перо? Объясните его отличие от интерферометра Фабри-Перо.
7. Как объясняется в классической теории Лоренца расщепление линий в магнитном поле?
8. Квантовая теория эффекта Зеемана
9. Поляризация линий при зеемановском расщеплении.
10. Выписать заполнение электронных оболочек в атоме кадмия.
11. Почему на выбранной линии кадмия наблюдается нормальный эффект Зеемана?
12. Критерий определения «нормальности» эффекта Зеемана.
13. Оптическая схема установки (нарисовать).
14. Принцип действия интерферометра Фабри-Перо. Зачем нужны светофильтры перед интерферометром?
15. Почему для того, чтобы увидеть кольца глазом, нужно использовать лупу или подзорную трубу?
16. Какой минимальный размер должен иметь источник излучения, чтобы при имеющихся параметрах интерферометра Фабри-Перо и фокусном расстоянии первой линзы 100 мм можно было зарегистрировать 5 порядков интерференционной картины?
17. Полученные величины расщепления и соответствующие им магнитные поля (общий вопрос).
18. Чему равна длина волны перехода между зеемановскими сателлитами при максимальном зарегистрированном расщеплении?
19. Оценить силу притяжения между катушками электромагнита при максимальном зарегистрированном поле.
20. Экспериментальные результаты (общий вопрос)

Список литературы.

1. Степанов В. Е., Северный А. Б., Фотоэлектрический метод измерения величины и направления магнитного поля на поверхности Солнца, "Известия Крымской астрофизической обсерватории", 1962, т. 28;
2. Solar magnetic fields, ed. R. Howard, Dordrecht, 1971.
3. БСЭ
4. Львов Б. В., Атомно-абсорбционный спектральный анализ, М, 1966;

5. Прайс В., Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия, пер. с англ., М., 1976;
6. Харламов И.П., Еремина Г. В., Атомно-абсорбционный анализ в черной металлургии, М., 1982;
7. Николаев Г. И., Немец А. М., Атомно-абсорбционная спектроскопия в исследовании испарения металлов, М., 1982;
8. Хавезов И., Цалев Д., Атомно-абсорбционный анализ, пер. с болг., Л., 1983.
9. Михновец Павел Владимирович Атомно-абсорбционный спектрометр с коррекцией неселективного поглощения на основе эффекта Зеемана в постоянном магнитном поле АВТОРЕФЕРАТ ,Санкт-Петербург, 2010
10. Козлов М.Г. Метрология и стандартизация. Учебник. М., СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2001.
11. *А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, С.А. Кузнецов, К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.Л. Синицкий, Ю.С. Суляев, А.А. Шошин.* Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3. // Физика плазмы, том 31, № 6, 2005, с.506-520.
12. Вертц Дж., Болтон Дж., Теория и практические приложения метода ЭПР, М., 1975;

Полезная литература

- Оптика и атомная физика / Под ред. Солоухина. 1976.
- Тарасов К. И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1968.
- Шпольский Э. В. Атомная физика. М.: Наука, 1980. Т. 2.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т.IV. Оптика.- 3е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.- 792 с.- ISBN 5-9221-0228-1.
- Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов.- 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.- 848 с.- ISBN 5-9221-0314-8.
- http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zasov/zadacha_10.htm
- Лукьянов В.С., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: МИФИ, 1997.- 432 с.

Фотография экспериментальной установки для лабораторной работы №2.1.



Фотография установки ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН).