

Z5 – BADANIE EFEKTU ZEEMANA W WIDMIE ATOMOWYM Hg ZA POMOCĄ INTERFEROMETRU FABRY’EGO-PÉROTA

II Pracownia Fizyczna

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński

Celem ćwiczenia jest wszechstronne zapoznanie studenta z teorią i problemami doświadczalnymi klasycznej metody badań spektroskopowych wysokiej zdolności rozdzielczej, na przykładzie badania rozszczepienia zeemanowskiego linii rtęci Hg (długość fali $\lambda = 546.1$ nm) w polu magnetycznym o regulowanej wartości do około 1.5 T. Jako przyrządu wysokiej zdolności rozdzielczej używa się przestrajanego interferometru Fabry’ego-Pérot’a ze zwierciadłami dielektrycznymi odległymi o $d = 3.54$ mm, a przestrajanie odbywa się poprzez zmianę ciśnienia dwutlenku węgla w komorze interferometru. Dzięki użyciu polaryzatora obserwowane są osobno składowe π oraz σ widma zeemanowskiego w obserwacji poprzecznej względem kierunku pola magnetycznego. Możliwa jest również obserwacja składowych σ^\pm w obserwacji podłużnej. Na podstawie analizy zarejestrowanych interferogramów wyznaczane jest rozszczepienie zeemanowskie badanej linii rtęci oraz wartość indukcji pola magnetycznego, w której to rozszczepienie nastąpiło.

Zagadnienia do przestudiowania

W pierwszym i drugim tygodniu zajęcia zaczynają się od ustnego sprawdzenia wiedzy oraz rozwiązań zadań wstępnych. Pierwszy tydzień: zagadnienia 1. i 2. oraz zadania 1. i 2. Drugi tydzień: zagadnienie 3. oraz zadanie 3. i ewentualnie 4.

Pierwszy tydzień:

1. Interferometr Fabry’ego-Pérot’a ([1, 2], [3] ćwicz. 11 oraz Uzupełnienia I i II, [5] str. 216-224, [6]):

- 1.1. podstawowe wiadomości dotyczące interferencji; spójność, interferencja wielowiązkowa,
- 1.2. budowa, zasada działania oraz zastosowanie interferometru Fabry’ego-Pérot’a,
- 1.3. parametry interferometru Fabry’ego-Pérot’a:

a) teoretyczna zdolność rozdzielcza R ([1] str. 414, [3] str. 94, 119):

- wzór definicyjny,
- porównanie kryterium Rayleigha zdolności rozdzielczej dla siatki dyfrakcyjnej i interferometru F-P,

b) aparaturowa szerokość linii $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$ ([1] str. 410-414, [3] str. 119):

- funkcja opisująca rozkład natężenia światła w prążku interferencyjnym (wzór Airy),
- definicja i wzór na aparaturową szerokość połówkową linii (w ułamku rzędu $\gamma_{1/2}$ oraz w liczbach falowych), $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$ [cm⁻¹],
- zastosowanie zwierciadeł dielektrycznych jako sposób na zmniejszenie szerokości aparaturowej $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$; budowa i cechy zwierciadeł dielektrycznych, porównanie z parametrami zwierciadeł metalicznych ([3] str. 129-131),

c) przedział dyspersji $\Delta\tilde{\nu}_{dysp}$ ([1] str. 412-414, [3] str. 119):

- definicja i wyjaśnienie sensu fizycznego,
- wyprowadzenie wzoru (w liczbach falowych $\Delta\tilde{\nu}_{dysp}$ oraz w długości fali $\Delta\tilde{\lambda}_{dysp}$,
- zależność zdolności rozdzielczej R od wielkości przedziału dyspersji,

d) finezja, rodzaje finezji,

e) dyspersja kątowna D_ϕ [1] strona 413, ([3] str. 118),

1.4. efekty wpływające na szerokość linii spektralnej (powodujące pogorszenie praktycznej zdolności rozdzielczej interferometru):

1.4.1. efekty aparaturowe związane z interferometrem:

- a) aparaturowa szerokość połówkowa linii $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$ (pkt 1.3.b powyżej),
- b) zmiana temperatury t w obszarze interferometru, $\Delta\tilde{\nu}_t$ ([2] str. 144, [3] str. 442),
- c) zmiana ciśnienia p w obszarze interferometru, ([2] str. 144, [3] str. 442),
- d) niedoskonałość powierzchni płytek interferometru (chropowatość oraz odstępstwa od płaskości), $\Delta\tilde{\nu}_{pow}$ ([2] str. 165),
- e) nierównoległość płytek interferometru spowodowana faktem, że stosowane metody justowania mają ograniczoną dokładność, $\Delta\tilde{\nu}_j$ (patrz pkt 1.5 poniżej),
- f) szerokość prostokątnego profilu $\Delta\nu_{apert}$ związanego ze skończoną średnicą D apertury kołowej umieszczonej przed okienkiem fotopowielacza (patrz zadanie 1.e poniżej),

1.4.2. efekty związane z zastosowanym źródłem światła (bez wyprowadzeń i wzorów) (np. [3, 4], [5] str. 86):

- a) efekt Dopplera $\Delta\nu_D$ ([3] str. 267-269), (patrz zadanie 1.a),
 - b) szerokość naturalna $\Delta\nu_{rad}$ ([3] str. 264),
 - c) poszerzenia ciśnieniowe i Starkowskie (np. [3] str. 277),
 - d) poszerzenie wywołane ewentualną niejednorodnością pola magnetycznego elektromagnesu w obszarze świecenia źródła.
- 1.5. sposoby justowania interferometru ([2] str. 138-144, [3] str. 437-443):
- a) justowanie wstępne, za pomocą odbić, bez posługiwania się obrazem interferencyjnym,
 - b) justowanie za pomocą prążków równej grubości (prążków Fizeau),
 - c) justowanie za pomocą prążków równego nachylenia,
- 1.6. obrazy wtórne w obrazie interferencyjnym (jak powstają, jak je wyeliminować z obszaru rejestrowania sygnału, czyli z centrum prążków interferencyjnych na ekranie E ; [2] str. 145).

2. Zasada działania fotopowielacza (np. [3] str. 31).

Drugi tydzień:

3. Efekt Zeemana (np. [3, 4]) – podstawowy opis, reguły wyboru dla promieniowania elektrycznego dipolowego, polaryzacja składowych zeemanowskich π , σ , σ^+ i σ^- .

Zadania obliczeniowe

Pierwszy tydzień:

1. Obliczyć w liczbach falowych [cm^{-1}] przyczynki do obserwowanej w eksperymencie efektywnej szerokości prążka interferencyjnego $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}^{exp}$, pochodzące od następujących efektów:
- (a) efekt Dopplera przy założeniu, że temperatura źródła światła leży w granicach 100–150°C; $\Delta\tilde{\nu}_D = 0,716 \cdot 10^{-6} \tilde{\nu} \sqrt{\frac{T}{M}}$ [cm^{-1}], gdzie T – temperatura w kelwinach, M – liczba masowa, oraz $\tilde{\nu}$ – liczba falowa badanej linii spektralnej Hg $\lambda = 546.1 \text{ nm}$,
 - (b) szerokość aparaturowa prążka interferencyjnego $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$; do obliczenia tej szerokości przyjąć wartości parametrów interferometru podane w opisie aparatury,
 - (c) efekt izotopowy i struktura nadsubtelna. Spektralna lampa rtęciowa używana w tym ćwiczeniu zawiera naturalny skład izotopowy, w wyniku czego badana linia spektralna

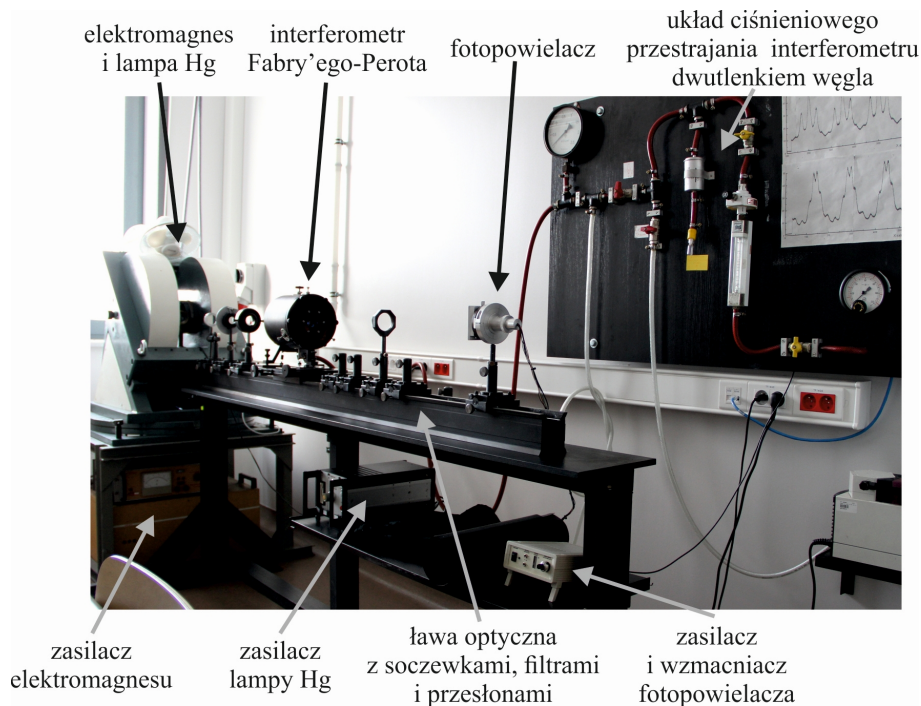
nie jest pojedyncza, lecz posiada strukturę izotopową i nadsubtelną; fakt ten stanowi pewne utrudnienie w doświadczalnym badaniu efektu Zeemana struktury subtelnej.

Posługując się danymi liczbowymi z podręcznika Sołouchina ([3] str. 260, tabela abundancji izotopów) porównać wielkość tych struktur z przedziałem dyspersji $\Delta\tilde{\nu}_{dysp}$ interferometru stosowanego w ćwiczeniu, oraz określić spodziewane poszerzenie linii $\Delta\tilde{\nu}_{izotop}$,

- (d) poszerzenie prążka interferencyjnego spowodowane niedoskonałością powierzchni płytek interferometru ([2] str. 165); w tym obliczeniu oszacować od dołu wielkość poszerzenia $\Delta\tilde{\nu}_{pow}$ zakładając, że płaskość każdej płytki jest $\lambda/200$, czyli taka, jaką gwarantują renomowane firmy optyczne. Płytki interferencyjne, które są do dyspozycji w ćwiczeniu Z5, mają nieco gorszą jakość,
- (e) szerokość prostokątnego profilu linii $\Delta\tilde{\nu}_{apert}$ związanego ze skończoną średnicą D apertury kołowej umieszczonej przed okienkiem fotopowielacza; do dyspozycji są trzy ekrany z otworami o średnicach: $D_1 = 2.20 \text{ mm}$, $D_2 = 1.55 \text{ mm}$ oraz $D_3 = 0.70 \text{ mm}$. Do obliczeń wystarczy przyjąć, że ogniskowa soczewki S3 odwzorowującej na ekranie obraz interferencyjny wynosi $f_3 = 45 \text{ cm}$. Wybrać do swojego eksperymentu właściwy rozmiar otworu D stosując kryterium, że wartość liczbową $\Delta\tilde{\nu}_{apert}$ nie powinna stanowić więcej, niż 10% ÷ 20% efektywnej szerokości połówkowej prążka interferencyjnego $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}^{exp}$ (patrz pkt 2 poniżej). Czy byłoby korzystne eksperymentalnie, gdyby wartość $\Delta\tilde{\nu}_{apert}$ była dużo mniejsza od określonej przez powyższe kryterium?

Wskazówka: Skorzystać z metody kwadratów średnic, interpretując szukaną szerokość $\Delta\tilde{\nu}_{apert}$ jako różnicę liczb falowych takich dwóch nieskończenie cienkich linii spektralnych $\tilde{\nu}_a$ i $\tilde{\nu}_b$, dla których maksima interferencyjne **tego samego rzędu** przypadają odpowiednio: w centrum obrazu interferencyjnego dla jednej linii oraz na obwodzie apertury D dla drugiej linii ([3] str. 447, wzór (14) z podstawieniem $d\lambda/\lambda = d\tilde{\nu}/\tilde{\nu}$ czyli $\Delta\tilde{\nu}_{apert} = \tilde{\nu}\{(D_{a,m}^2 - D_{b,m}^2)/(8f^2)\}$.

2. Wykorzystując wyniki poprzedniego zadania oszacować liczbowo (w cm^{-1}) efektywną szerokość połówkową prążka interferencyjnego, jaką spodziewamy się uzyskać doświadczalnie w realiach układu pomiarowego. Czy szukaną wartość $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}^{exp}$ jest sumą algebraiczną poszczególnych przyczynków $\Delta\tilde{\nu}_D$, $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$, $\Delta\tilde{\nu}_{izotop}$, $\Delta\tilde{\nu}_{pow}$ i $\Delta\tilde{\nu}_{apert}$, czy też w bardziej skomplikowany sposób składają się one na wypad-



Rysunek 1: Zestaw pomiarowy do obserwacji efektu Zeemana w kierunku poprzecznym.

kową szerokość prążka $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}^{exp}$? Pomocne są wiadomości o tym, jak oblicza się rozkład sumy niezależnych zmiennych losowych o znanych rozkładach, oraz w szczególności jak wyraża się szerokość połówkowa splotu dwóch rozkładów typu Gaussa, a jak typu Lorentza. W zadaniu można poprzestać na sumowaniu algebraicznym, gdyż pominięcie w powyższej liście (1. a÷e) kilku innych efektów wpływających w rzeczywistości na wartość $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}^{exp}$, powoduje, że nasze oszacowanie jest tylko od dołu.

Drugi tydzień:

3. Zadania dotyczące rozszczepienia zeemanowskiego linii Hg $\lambda = 546.1$ nm (rys. 3 i 4 w [7]):

- (a) Na podstawie rys. 3 z [7] określić konfigurację elektronową górnego i dolnego poziomu energetycznego linii Hg $\lambda = 546.1$ nm oraz odczytać oznaczenia tych poziomów w symbolice sprzężenia L-S.
- (b) Na podstawie rys. 4 z [7] przeanalizować schemat poziomów energetycznych rozszczepienia zeemanowskiego linii Hg $\lambda = 546.1$ nm w polu magnetycznym. Przejścia zeemanowskie zaznaczone są na rysunku w kolejności monotonicznej zmiany liczb falowych. Wielkość $\Delta\tilde{\nu}_0$ na tym rysunku oznacza odległość pomiędzy składowymi zeemanowskimi normalnego trypletu Lorentza ([3], str. 308). Określić polaryzację składowych w obserwacji poprzecznej i podłużnej względem kierunku wektora indukcji magnetycznej B ([3] str. 318).

- (c) Wyliczyć odległości spektralne (w cm^{-1}) pomiędzy składowymi zeemanowskimi przejść pomiędzy poziomami energetycznymi o zadanych liczbach kwantowych, w polu magnetycznym o indukcji 1.5 T (**patrz rys. 4 z [7]**, a także [3], str. 319, wzór 14). Zmiana energii ΔE danego poziomu w atomie znajdującym się w polu magnetycznym o indukcji B dana jest wzorem:

$$\Delta E = \mu_0 M_J g B,$$

gdzie: μ_0 – magneton Bohra równy $e\hbar/(2m_e)$ (m_e – masa elektronu), M_J – magnetyczna liczba kwantowa, $M_J = -J \dots J$, $M \in \mathbb{Z}$, g – czynnik Landégo dla poziomu opisanego liczbami kwantowymi L, S, J :

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

Uwaga: powyższy wzór na ΔE jest w przybliżeniu słuszny dla warunków eksperymentalnych w tym ćwiczeniu, ale nie jest wzorem ogólnym.

- (d) Na podstawie wzorów przedstawionych w Tabeli 1 w [7] obliczyć względne natężenia składowych zeemanowskich linii Hg $\lambda = 546.1$ nm w obserwacji poprzecznej i podłużnej względem kierunku wektora indukcji magnetycznej B .
4. W wersji rozszerzonej (obserwacja efektu Zeemana w kierunku podłużnym): w jaki sposób, przy pomocy płytki ćwierćfalowej i polaryzatora wyodrębnić w obserwowanym widmie tylko jedną ze składowych σ^+ albo σ^- ?

Aparatura i materiały

1. Interferometr Fabry'ego-Pérot'a wraz z układem próżniowym do ciśnieniowego przestrajania dwutlenkiem węgla. Stała interferometru wynosi $d = (3.540 \pm 0.005)$ mm, zastosowane są w nim zwierciadła dielektryczne o współczynniku odbicia $R = (0.94 \pm 0.01)$ dla przedziału długości fal 500 do 560 nm.
2. Spektralna lampa rtęciowa wraz z układem zasilania.
3. Elektromagnes wytwarzający pole magnetyczne o indukcji B do ok. 1.5 tesli [T].
4. Układ optyczny złożony z soczewek, przysłony irysowej, polaryzatora, płytki ćwierćfalowej (do obserwacji podłużnej), matówki i filtra optycznego oraz kompletu ekranów z otworami kołowymi o średnicach: $D_1 = 2.20$ mm, $D_2 = 1.55$ mm oraz $D_3 = 0.70$ mm.
5. Fotopowielacz modułowy Hamamatsu Photonics H10722 z zamontowanym filtrem optycznym oraz umieszczony w jednej obudowie: zasilacz fotopowielacza, regulowany wzmacniacz sygnału z fotopowielacza i przetwornik analogowo-cyfrowy. Sygnał z przetwornika jest przesyłany do komputera z programem RUM, służącym do wizualizacji i akwizycji danych.

Program ćwiczenia

1. Przygotowanie toru optycznego oraz wyjustowanie interferometru Fabry'ego-Pérot'a metodą prążków jednakowego nachylenia.
2. Analiza interferogramu zielonej linii rtęci 546.1 nm dla zerowego pola magnetycznego w obserwacji poprzecznej.
3. Pomiar rozszczepienia zeemanowskiego zielonej linii rtęci 546.1 nm dla składowych π w polu o kilku wartościach indukcji magnetycznej do 1.5 T, w obserwacji poprzecznej. Porównanie i interpretacja interferogramów dla składowych zeemanowskich π oraz σ . Wyliczenie wartości indukcji pola magnetycznego, w której nastąpiło rozszczepienie zeemanowskie dla składowych π .
4. Wykonanie aparatem cyfrowym zdjęcia prążków interferencyjnych z polem i bez pola magnetycznego.
5. W wersji rozszerzonej: obserwacja rozszczepienia zeemanowskiego w kierunku podłużnym (składowe σ^+ i σ^-). Wymaga to obrócenia elektromagnesu o 90° i może być wykonane jedynie w obecności prowadzącego ćwiczenie! Modyfikacji i optymalizacji wymaga wtedy również tor optyczny. Wyboru tylko jednej ze składowych σ^+/σ^- można

dokonać przy pomocy płytki ćwierćfalowej i polaryzatora.

Opracowanie wyników

Dla wszystkich zarejestrowanych interferogramów należy przeprowadzić analizę liniowości przestrajania interferometru w czasie. Następnie, znając przedział dyspersji interferometru (z odległości między lustrami), należy przeliczyć skalę czasową na skalę energii (liczb falowych). Uwaga: tego przeliczenia należy dokonać osobno dla każdego interferogramu – szybkość przestrajania interferometru może być bowiem nieco inna dla każdego pomiaru.

Dla tak przygotowanych interferogramów należy zmierzyć (i uśrednić) rozszczepienie zeemanowskie składowych π dla wszystkich zarejestrowanych rzędów dla danego prądu elektromagnesu. Ponadto, znając te rozszczepienia, wylicza się wielkości indukcji pola magnetycznego, w których te rozszczepienia nastąpiły.

Niepewności wyliczenia rozszczepień zeemanowskich i indukcji pola B szacuje się na podstawie: a) niepewności przeliczenia skali czasowej na skalę energii (liczb falowych), b) niepewności wyznaczenia położenia składowych zeemanowskich w interferogramie oraz c) rozrzutu wartości rozszczepień dla poszczególnych rzędów w danym interferogramie.

Zasady BHP

1. Magnes wymaga chłodzenia wodą. Po zakończeniu pracy należy wyłączyć dopływ wody.
2. Pole magnetyczne jest niebezpieczne dla osób z rozrusznikiem serca.
3. W pobliżu magnesów nie należy nosić przedmiotów mogących ulec zniszczeniu pod wpływem pola magnetycznego (ok. 1.5 T), np. zegarki, magnetyczne karty bankowe i telefoniczne, itp.
4. Lampa spektralna posiada wprowadzone przewody izolowane, mimo to należy zachować szczególną ostrożność i unikać ich dotykania.
5. Lampa podczas pracy nagrzewa się. Nie wolno jej dotykać. Należy również unikać dotykania wiatraczki chłodzącej lampę podczas jego pracy.
6. Nie należy patrzeć wprost na lampę, gdy włączone jest wyładowanie łukowe. Lampa Hg jest źródłem promieniowania UV.
7. Włączanie urządzeń elektrycznych oraz obsługa układu próżniowego może odbywać się wyłącznie za zgodą osoby prowadzącej ćwiczenie.

Literatura

- [1] K. Meissner, *Interference Spectroscopy*, part I, JOSA **31**, 405-426 (1941).

- [2] S. Tolansky, *High Resolution Spectroscopy*, chapter 9.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją R. I. Sołouchina, *Optyka i fizyka atomowa – ćwiczenia laboratoryjne*, PWN, 1982.
- [4] Z. Leś, *Wstęp do spektroskopii atomowej* lub inny podręcznik o tej samej tematyce.
- [5] A. N. Matveev, *Optics*, Mir Publishers 1988.
- [6] Obowiązują podstawowe wiadomości z optyki geometrycznej (soczewki) i falowej (interferencja) na poziomie kursu uniwersyteckiego *Fizyka Doświadczalna*.
- [7] Instrukcja do ćwiczenia Z5.