

Badanie struktury nadsubtelnej linii atomowych - zjawisko Zeemana

Monika Kubek

Numer indeksu: 270018

Pomiary przeprowadzono dnia 24 I 2017 roku na II Pracowni Fizycznej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Celem doświadczenia było zbadanie rozszczepienia linii widmowych kadmu w polu magnetycznym.

I. WSTĘP

Efekt Zeemana zachodzi wtedy, gdy umieścimy w polu magnetycznym próbkę emitującą promieniowanie, np atom, cząsteczkę. Wówczas poziomy energetyczne próbki ulegają rozszczepieniu a jako konsekwencję, zaobserwować można rozszczepienie linii widmowych emitowanego przez tę próbkę promieniowania. Efekt Zeemana dzielimy na normalny i anomalny.

Normalny efekt Zeemana występuje dla linii singletowych. Pojedynczej linii widmowej emitowanej w warunkach niewystępowania pola magnetycznego odpowiada trójka linii emitowanych w polu magnetycznym. Efekt Zeemana poprzeczny obserwujemy w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się linii sił pola magnetycznego, każda linia widmowa rozszczepia się na trzy linie składowe. Gdy obserwujemy natomiast w kierunku równoległym do linii sił pola, to widzimy dwie linie składowe. Dodatkowo normalny efekt Zeemana charakteryzuje się tym, że odstępów energetyczne podpoziomów Zeemanowskich są jednakowe dla obu poziomów, między którymi zachodzi przejście. Odległości te są zależne od indukcji pola magnetycznego i czynnika Landego. Warunkiem na to, by odległości kolejnych podpoziomów Zeemanowskich były jednakowe jest to, żeby czynniki Landego dla tych poziomów były jednakowe. Inaczej mówiąc, normalny efekt Zeemana występuje wtedy, gdy spin całkowity jest równy zero ($S = 0$). Zmiana energii atomu po umieszczeniu go w polu magnetycznym może być ob-

liczona ze wzoru:

$$\Delta E = m_J \mu_B B, \quad (1)$$

gdzie ΔE - zmiana energii, m_J - magnetyczna liczba kwantowa; B - indukcja magnetyczna; $\mu_B = e\hbar/2m_e$ - magneton Bohra.

W anomalnym efekcie Zeemana przejścia promieniste zachodzą pomiędzy poziomami o różnych wartościach czynnika Landego. Rozszczepienie poziomów energetycznych komplikuje się i liczba składowych struktury zeemanowskiej linii widmowych jest większa od trzech. Efekt ten zachodzi, gdy wypadkowy spin jest różny od zera ($S \neq 0$). Wtedy zmiana energii może być opisana wzorem:

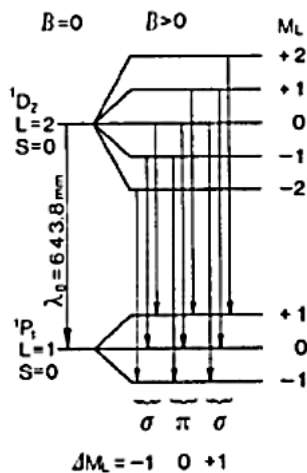
$$\Delta E = m_J \mu_B g B, \quad (2)$$

gdzie g to czynnik Landego. Zmianę energii fali elektromagnetycznej ogólnie zdefiniować można jako

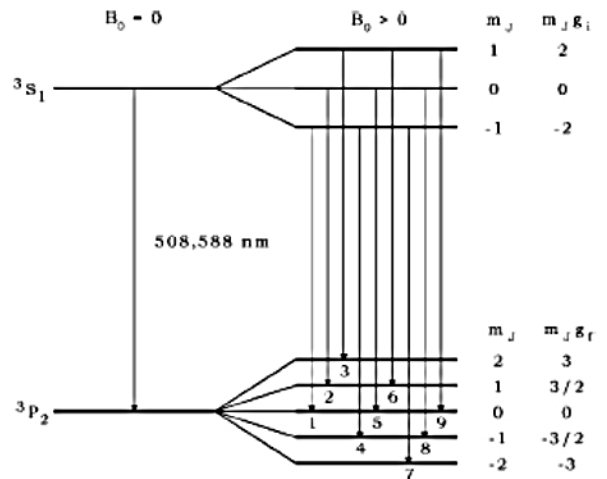
$$\Delta E = \hbar c \Delta k, \quad (3)$$

gdzie c - prędkość światła, Δk - zmiana wartości liczby falowej.

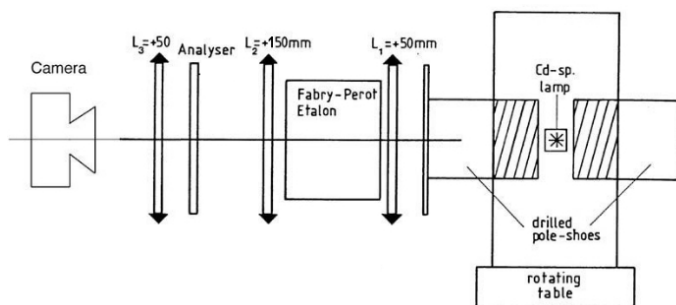
Kadm ma strukturę elektronową $(Kr)4d^{10}5s^2$. Przejście między poziomami wybrane do demonstracji normalnego efektu Zeemana to $3^1D_2 \rightarrow 2^1P_1$ o długości fali



Rysunek 1: Efekt normalny w kadmie.



Rysunek 2: Efekt anomalny w kadmie.



Rysunek 3: Układ doświadczalny [1]

643,847 nm (rysunek 1). Do anomального zjawiska Zeemana wybrano przejście $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_2$ z długością fali wynoszącą 508,588 nm (rysunek 2).

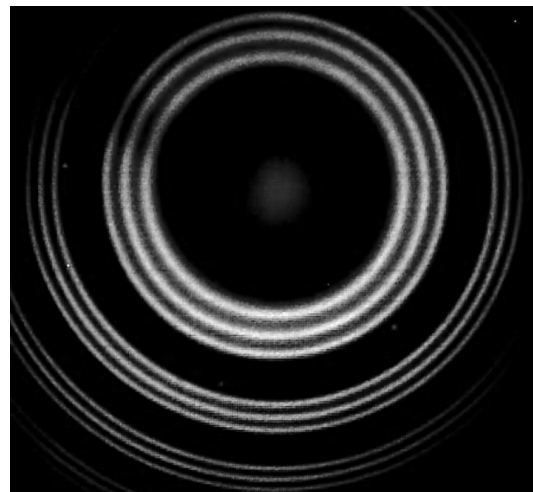
II. APARATURA I POMIAR

Do wykonania doświadczenia użyto kompletnego zestawu doświadczalnego firmy Phywe [1] przedstawionego na rysunku 3. Składał się on z lampy kadmowej i elektromagnesu na obrotowym stole, soczewek, interferometru Fabry'ego - Perota, polaryzatora i kamery CMOS. Użyte zostały także filtry czerwony i zielony, które można było stosować w zależności od badanego efektu. Elektromagnes został podłączony do zasilacza, umożliwiało to regulowanie napięcia na cewce w trakcie pomiarów. Polaryzator można ustawić tak, aby przepuszczał światło o takiej polaryzacji jaką chcemy badać. Kamery podłączono do komputera na którym było zainstalowane oprogramowanie, które pozwalało na podgląd obrazu na żywo, rejestrowanie zdjęć a także pomiar średnicy prążków interferencyjnych.

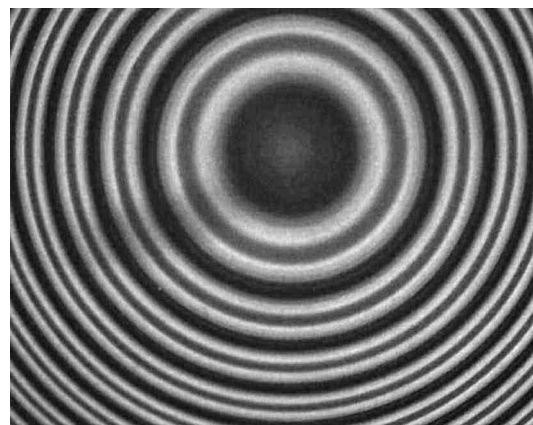
Najpierw badany jest normalny efekt Zeemana. Elektromagnes z lampą został ustawiony tak, że obserwuje się efekt w kierunku prostopadłym do linii pola magnetycznego. Wykonano serię zdjęć dla różnych natężeń prądu. Następnie stolicek z lampą został odwrócony tak, żeby obserwować efekt w kierunku równoległym do wytworzonych linii pola i wykonano kolejną serię zdjęć. Anomalny efekt Zeemana został zbadany analogicznie.

III. WYNIKI POMIARÓW

Z wielu zdjęć zostały wybrane te na których ustawienia filtra polaryzacyjnego i jakość zdjęcia pozwoliły odczytać promienie prążków interferencyjnych. Łatwo można było zobaczyć trzy linie składowe rozszczepienia w zjawisku normalnym. Trudniej jednak było dobrze określić linie w zjawisku anomальnym. Tylko część zdjęć, z odpowiednio



Rysunek 4: Przykładowy fragment zdjęcia przedstawiający efekt normalny.



Rysunek 5: Przykładowy fragment zdjęcia przedstawiający efekt anomálny.

ustawionym filtrem polaryzacyjnym, posłużyła do analizy. Dzięki użytemu programowi wyznaczenie promieni mogło być wykonane precyzyjniej. Odchylenie pojedynczych pomiarów od średniej nie było duże, a względny błąd pomiaru nie przekraczał $\Delta r/r = 1,65\%$. Wyniki zostały przedstawione w poniższych tabelach.

Rząd	I			II		
Rozszczepienie	1	2	3	1	2	3
Prąd [V]	Promień [px]			Promień [px]		
2,19	187,3	203,6	218,8	303,6	314,9	326,1
2,80	183,0	203,5	223,5	303,2	316,1	329,3
3,14	180,2	204,2	224,8	302,2	316,7	330,1
3,61	176,5	203,6	227,0	299,9	316,5	332,6
3,93	174,7	203,8	229,4	297,3	316,4	333,9

Tablica I: Wyniki pomiaru promieni dla efektu normalnego.

Rząd	I		II		III	
Rozszczepienie	1	2	1	2	1	2
Prąd [V]	Promień [px]		Promień [px]		Promień [px]	
2,81	138,6	187,8	253,7	285,0	331,7	356,4
3,31	134,7	192,4	249,7	288,0	330,8	358,2
2,91	140,6	189,7	252,8	284,7	332,8	356,4
3,36	135,0	195,0	251,8	288,5	330,9	358,8
4,00	130,1	198,5	247,9	291,7	326,4	362,0

Tablica II: Wyniki pomiaru promieni dla efektu anomalnego.

IV. ANALIZA POMIARÓW

A. Teoria

Użyty interferometr to etalon zbudowany z kwarcowej płytki (rysunek 6) o szerokości $t = 3\text{ mm}$. Dla fali o długości 509 nm współczynnik załamania dla kwarcu wynosi $\mu = 1,4519$, a dla fali 633 nm przyjmuje wartość $\mu = 1,4560$. Warunek na konstruktywną interferencję dla danej długości fali λ w zależności od kąta padania to

$$n\lambda = 2\mu \cos \theta, \quad (4)$$

gdzie $n = 1, 2, 3, \dots$. Dla danej wartości n promień wychodzący z etalonu pod małym kątem θ_n jest skupiany przez soczewkę o ogniskowej f na okręgu o promieniu

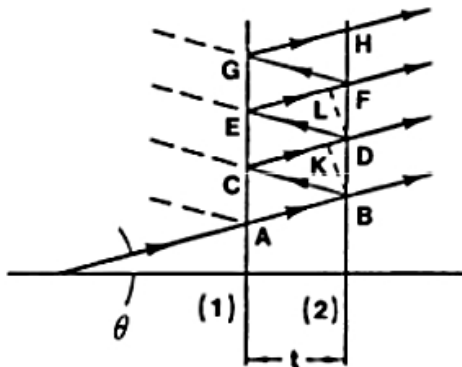
$$r_n \approx f\theta_n. \quad (5)$$

Z warunku (4) dla kąta $\theta = 0$ mamy

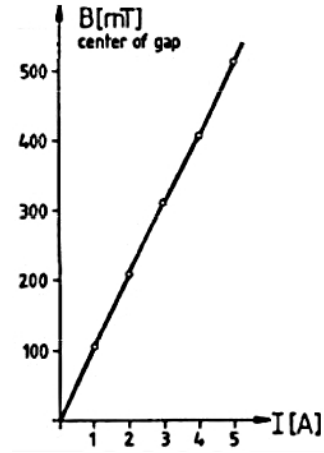
$$n_0 = \frac{2\mu}{\lambda}. \quad (6)$$

Oznaczmy rząd interferencji przez p , a dwie sąsiednie składowe danego rzędu w polu magnetycznym przez i, j . Różnica kwadratów promieni dwóch kolejnych rzędów interferencji dla tej samej składowej wynosi

$$\Delta_i^{p+1,p} = r_{p+1,i}^2 - r_{p,i}^2 = \frac{2f^2}{n_{0,i}}, \quad (7)$$



Rysunek 6: Droga promieni w etalonie.



Rysunek 7: Wykres zależności wartości indukcji pola magnetycznego od przyłożonego natężenia na cewce [1].

przyjmujemy

$$\Delta_i^{p+1,p} = \Delta_j^{p+1,p} \quad (8)$$

i podobnie dla różnicy promieni składowych tego samego rzędu

$$\delta_{i,j}^p = r_{p,i}^2 - r_{p,j}^2. \quad (9)$$

Powyższe równania są prawdziwe dla wszystkich rzędów interferencji p , można zatem obliczyć wartość średnią Δ i δ . Różnicę wartości liczby falowej dwóch składowych i oraz j możemy obliczyć ze stosunku różnicy promieni

$$\Delta k = \frac{1}{2\mu t} \frac{\delta}{\Delta} \quad (10)$$

skąd możemy zauważyć, że nie zależy ona od jednostki użytej do obliczenia poszczególnych promieni.

Możemy przyrównać do siebie wzory na zmianę energii 2 i 3 oraz wstawić 10 otrzymując

$$\frac{\delta}{\Delta} = \underbrace{\mu_B \frac{2\mu t g}{hc}}_a B. \quad (11)$$

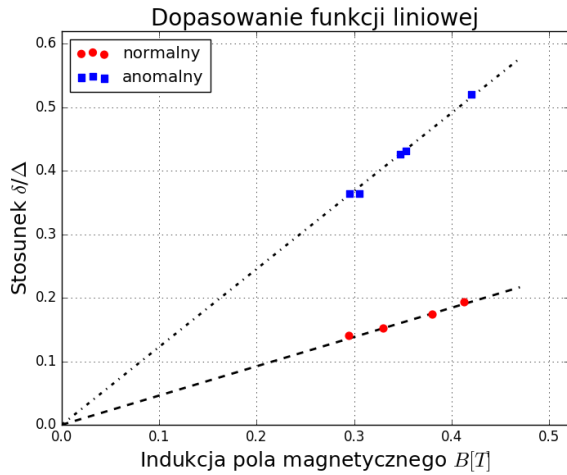
Współczynnik a stojący przy indukcji pola B jest stały. Możemy zatem dokonać dopasowania funkcji liniowej $\frac{\delta}{\Delta} = a \cdot B$ i z uzyskanej tym sposobem wartości współczynnika policzyć wartość magnetonu Bohra

$$\mu_B = \frac{hc}{2\mu t g} a. \quad (12)$$

Wartość indukcji pola magnetycznego dla użytej w doświadczeniu cewki czytać można z wykresu na rysunku 7.

B. Analiza

Współczynnik Landego w efekcie normalnym wynosi $g = 1$, a w efekcie anomalnym $g \approx 2$. Zostało wykonane



Rysunek 8: Dopasowanie funkcji liniowej do wyników pomiarowych.

dopasowanie liniowe pokazane na wykresie 8. Współczynniki nachylenia prostych posłużyły do wyznaczenia wartości magnetonu Bohra, w efekcie normalnym

$$\mu_{B,n} = (10,5 \pm 0,4) \times 10^{-24} \frac{J}{T} \quad (13)$$

i anomalnym

$$\mu_{B,a} = (13,95 \pm 0,94) \times 10^{-24} \frac{J}{T}. \quad (14)$$

Z czego została wyliczona wartość średnia

$$\mu_B = (12,2 \pm 0,7) \times 10^{-24} \frac{J}{T}. \quad (15)$$

C. Narzędzia

Wartości promieni zostały obliczone w oprogramowaniu Motic Image Plus. Analiza została wykonana za pomocą języka Python [4], biblioteki SciPy [5]. Wykresy stworzone zostały przy użyciu modułu Matplotlib.

V. PODSUMOWANIE

Otrzymana w wyniku pomiaru wartość jest o 30% większa od wartości literaturowej magnetonu Bohra, czyli $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} J/T$. Na wynik miało wpływ wiele czynników. Układ pomiarowy najprawdopodobniej nie był dokładnie ustawiony przez co nie otrzymano takich efektów i jakości pomiaru, na jakie pozwalają użyte przyrządy. Różnica trzydziestu procent wydaje się dużym błędem, jednak trzeba mieć na uwadze, że mimo tak prostego eksperymentu rząd wielkości to zaledwie 10^{-24} . Uzyskanie wyniki z dokładnością do tak małego rzędu wielkości można uznać za duży sukces.

Wykonane zdjęcia pokazują, że w efekcie normalnym wyraźnie widać rozszczepienie linii na trzy składowe. Używając filtra polaryzacyjnego można łatwo wyciąć linie o różnej polaryzacji. W efekcie anomalnym tylko odpowiednie ustawienie filtra pozwalało na wyróżnienie składowych rozszczepienia. W dodatku wyraźnie można było zobaczyć tylko dwa prążki, ponieważ poszczególne długości fali były do siebie zbliżone, przez co zlewały się w dwa maksima tworzone przez grupę trzech przejść każde. W każdym z efektów tylko obserwacja w kierunku prostopadłym do linii sił pola magnetycznego pozwalała uzyskać zdjęcia z wyraźnymi prążkami.

-
- [1] Zeeman effect with electromagnet and a CMOS camera including measurement software, www.phywe.com/en/zeeman-effect-with-electromagnet-and-a-cmos-camera-including-measurement-software.html [dostęp online: 2017-01-26]
 - [2] H. Haken, H. C. Wolf, Atomy i kwanty Wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej, PWN 2002.
 - [3] G. K. Woodgate, Struktura atomu, PWN 1974.

- [4] Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.5.2. Available at <http://www.python.org> [Online; accessed 2016-12-05].
- [5] Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/> [Online; accessed 2016-12-05].