

Pracownia Fizyczna

ćwiczenie PF-10:

Badanie widm emisyjnych za pomocą spektroskopu pryzmatycznego

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego Uniwersytet Jagielloński

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania spektroskopu pryzmatycznego, układów optycznych (kolimator, luneta), obserwacja widm emisyjnych liniowych, sporządzenie krzywej dyspersji spektroskopu i na jej podstawie określenie długości fal badanego pierwiastka.

Zagadnienia do przygotowania:

- budowa atomu, powstawanie widm atomowych, poziomy energetyczne atomu, związek pomiędzy energią przejścia a częstotliwością i długością fali;
- bieg wiązki światła w pryzmacie;
- kąt odchylenia i kąt najmniejszego odchylenia światła w pryzmacie;
- dyspersja normalna i anomalna;
- budowa, zasada działania i justowanie spektroskopu pryzmatycznego.

Podstawowe pojęcia i definicje

Model atomu

Atom zbudowany jest z niewielkiego ciężkiego jądra i elektronów. Ładunek dodatni zgromadzony jest w jądrze, ujemnie naładowane elektrony znajdują się w dużej odległości od jądra w porównaniu z jego rozmiarami. Ruch elektronów opisują orbitale, czyli funkcje falowe będące rozwiązaniem równania Schrödingera. Kwadrat funkcji falowej określa prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w danym punkcie. Z każdym orbitalem związana jest pewna charakterystyczna energia, którą posiada elektron w atomie. Energia ta nie przyjmuje dowolnych wartości, ale jest skwantowana, czyli przyjmuje wartości dyskretne. Atomy wszystkich pierwiastków zbudowane są w ten sam sposób, jednakże ze względu na różną liczbę atomową i liczbę elektronów, atom każdego pierwiastka posiada charakterystyczne poziomy energetyczne.

Widma atomowe

Widmo atomowe powstaje na skutek przejścia elektronów pomiędzy poziomami energetycznymi. Przejście elektronu z orbitalu o niższej energii na orbital o wyższej energii związane jest z dostarczeniem energii (wzbudzenie atomu, absorpcja). Natomiast przejście elektronu z orbitalu o wyższej energii na orbital o niższej energii powoduje emisję energii E_{em} o wartości równej różnicy energii pomiędzy energiami orbitalu początkowego E_p i końcowego E_k :

$$E_{em} = E_p - E_k = h\nu, \quad (1)$$

gdzie: h – stała Plancka, ν – częstotliwość emitowanej fali elektromagnetycznej. Z częstotliwością fali związana jest jej długość $\lambda = c/\nu$, c – prędkość światła w próżni.

W związku z tym, że każdy atom posiada charakterystyczne poziomy energetyczne elektronów, emituje (absorbuje) charakterystyczne dla siebie częstotliwości (długości fal) promieniowania elektromagnetycznego. Powstają widma złożone są z wyraźnie oddzielonych linii nazywanych liniami widmowymi. Dzięki temu, poprzez analizę widm emisyjnych można zidentyfikować skład substancji świecącej. Taka procedura nazywa się spektralną analizą widmową. Możliwa jest ona do przeprowadzenia w przypadku widm wysyłanych przez atomy.

Wiele substancji, w zależności od ich budowy mikroskopowej lub warunków w jakich się znajdują, ma bardziej skomplikowane widma. Widma pasmowe wysyłane są przez cząsteczki. Widma te składają się z bardzo blisko siebie leżących linii, które układają się w barwne pasma. Widma ciągłe emitowane są przez rozżarzone ciała stałe, ciecze oraz gazy pod dużym ciśnieniem. Charakter widm emisyjnych zależy od struktury poziomów energetycznych atomów i cząsteczek.

Widma absorpcyjne powstają w wyniku przejścia światła o widmie ciągłym przez ośrodek absorbujący, którym może być ciecz, warstwa gazu lub ciała stałego. Wtedy na tle widma ciągłego widoczne są ciemne linie absorpcyjne. Okazuje się, że linie absorpcyjne występują dla takich samych długości fali, dla których występowałyby linie emisyjne substancji absorbującej.

Dyspersja światła

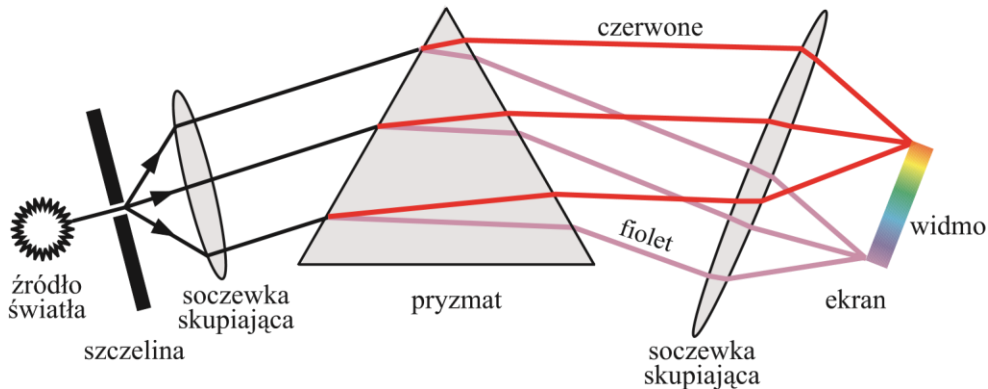
Aby dowiedzieć się jakie długości fali (lub częstotliwości) wysyła źródło światła trzeba przeprowadzić jego analizę. W tym celu wykorzystuje się zjawisko dyspersji, tzn. zależności współczynnika załamania od długości fali. Jeżeli w badanym zakresie długości fali nie leży obszar pochłaniania, dyspersja jest normalna. Zależność współczynnika załamania n od długości fali można przedstawić przez:

$$n^2 = A + B/\lambda^2, \quad (2)$$

gdzie A i B – stałe charakterystyczne dla ośrodka. Współczynnik załamania rośnie więc wraz ze wzrostem długości fali. W obszarze pochłaniania (w miejscu linii absorpcyjnej), współczynnik załamania zachowuje się inaczej, maleje wraz ze wzrostem długości fali. Jest to obszar dyspersji anomalnej.

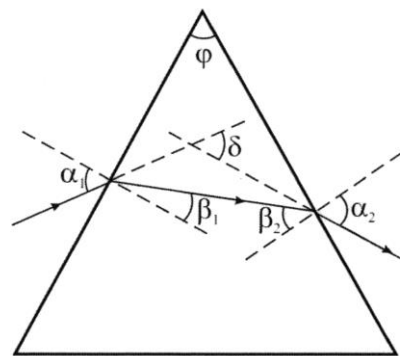
Pryzmat

Elementem dyspersyjnym używanym w tym eksperymencie jest pryzmat szklany – podstawowy element spektroskopu. Bieg wiązki światła w pryzmacie przedstawia rysunek 1. Na pierwszej ścianie pryzmatu, padająca wiązka światła ulega załamaniu i rozszczepieniu na barwy składowe. Wychodząc z pryzmatu następuje kolejne załamanie wcześniej



Rys. 1: Bieg wiązki światła w pryzmacie.

rozszczepionych promieni, w związku z czym „odległości” między nimi powiększają się. Używając odpowiedniego układu optycznego możliwa jest obserwacja analizowanego widma. Parametrem opisującym odchylenie wiązki światła w pryzmacie jest kąt odchylenia δ (rys. 2). Jest to kąt zawarty między kierunkiem wiązki wchodzącej do pryzmatu a kierunkiem wiązki wychodzącej z niego. Relację pomiędzy kątami padania α_1 i β_2 , kątami załamania β_1 i α_2 i współczynnikiem załamania opisuje prawo załamania światła.



Rys. 2: Zależności kątowe przy załamaniu światła monochromatycznego w pryzmacie.

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} \quad (3)$$

Korzystając z rysunku można łatwo znaleźć związki pomiędzy kątami

$$\begin{aligned} \delta &= (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) \\ \phi &= \beta_1 + \beta_2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta = \alpha_1 - \beta_1 + \alpha_2 - \phi + \beta_1 = \alpha_1 + \alpha_2 - \phi$$

Korzystając z zależności (3 i 4) można znaleźć zależność między α_2 i α_1

$$\sin \alpha_2 = n \sin \beta_2 = n \sin(\varphi - \beta_1) = n (\sin \varphi \cos \beta_1 - \cos \varphi \sin \beta_1)$$

β_1 można zastąpić przez α_1 korzystając z relacji (4.11.3) $\sin \beta_1 = \frac{\sin \alpha_1}{n}$ wtedy

$$\sin \alpha_2 = \sin \varphi \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \cos \varphi \sin \alpha_1$$

Wyliczając z tego równania n^2 i zastępując α_2 przez $\delta + \varphi - \alpha_1$ otrzymujemy

$$n^2 = \frac{(\sin(\delta + \varphi - \alpha_1) + \sin \alpha_1 \cos \varphi)^2 + \sin^2 \alpha_1 \sin^2 \varphi}{\sin^2 \varphi} \quad (5)$$

Dla stałego kąta padania światła na pryzmat α_1 i stałego kąta łamiącego pryzmatu φ otrzymane równanie wiąże kąt δ odchylenia wiązki światła po przejściu przez pryzmat ze współczynnikiem załamania n . Kąt odchylenia δ dla zadanej długości fali można wyrazić przez kąt najmniejszego odchylenia δ_m oraz pewien kąt γ

$$\delta = \delta_m + \gamma. \quad (6)$$

Jeżeli kąt γ jest mały to można dokonać przybliżenia $\sin \gamma \approx \gamma$, $\cos \gamma \approx 1$ i wtedy

$$\sin(\delta + \varphi - \alpha_1) = \sin(\delta_m + \varphi - \alpha_1) + \gamma \cos(\delta_m + \varphi - \alpha_1) \quad (7)$$

Korzystając z tego, można w równaniu (5) pozostawić jedynie wyrazy liniowe ze względu na γ zapisując go w postaci

$$n^2 = a_1 + b_1 \gamma \quad (8)$$

W ten sposób wiążemy współczynnik załamania n z kątem odchylenia γ mierzonym względem kąta najmniejszego odchylenia.

W przybliżeniu małych kątów położenie prążka na skali spektrometru x jest proporcjonalne do kąta γ . Stąd n^2 jest liniową funkcją położenia linii odczytywaną na skali spektrometru.

$$n^2 = a_2 + b_2 x. \quad (9)$$

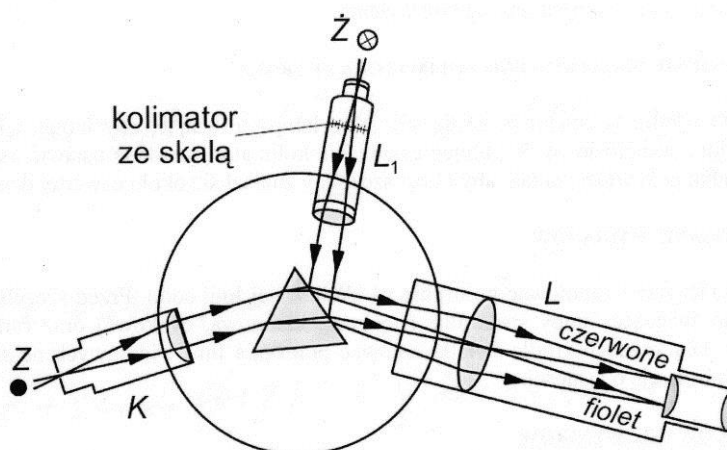
Łącząc równania (2) i (9) otrzymujemy zależność liniową odwrotności kwadratu długości fali od odpowiadającego jej położenia linii

$$\frac{1}{\lambda^2} = a + b x. \quad (10)$$

Spektroskop

Spektroskop składa się z kolimatora, pryzmatu i lunety (rysunek 3). Aby zoptymalizować działanie pryzmatu, należy uformować wiązkę światła padającą na pryzmat tak, aby była

równoległa. Wtedy wszystkie promienie padają na pryzmat pod tym samym kątem. Do tego służy kolimator K – układ optyczny zaopatrzony na wejściu w szczelinę o regulowanej szerokości, umieszczonej w ognisku soczewki znajdującej się na wyjściu kolimatora. Po wyjściu z pryzmatu, analizowana wiązka światła wpada do lunety L , w której dzięki układowi soczewek możemy oglądać obraz szczeliny w tylu kolorach, ile długości fali znajduje się w świetle padającym na szczelinę.



Rys. 3: Schemat spektroskopu.

Taka konstrukcja spektroskopu umożliwia obserwację widm optycznych. Aby zamienić spektroskop na spektrometr, zaopatrzone to urządzenie w układ optyczny L_1 zawierający podziałkę liniową niemiędianowaną. Wiązka światła białego, skierowana do takiego układu niesie obraz skali, który zostaje odbity od ściany pryzmatu i trafia do lunety razem z widmem analizowanego światła. Można więc określić położenie na skali każdej widocznej linii widmowej.

Jeżeli oświetlimy szczelinę światłem lamp spektralnych, których długości fal są znane, to w wyniku przyporządkowania każdej z nich położenia na skali liniowej można wykreślić tzw. krzywą dyspersji pryzmatu umieszczonego w spektroskopie, tzn. zależność długości fali od jej położenia na skali. Stosując kolejno kilka lamp spektralnych, otrzymamy dostatecznie dużo punktów, aby wykreślić gładką krzywą. Krzywa dyspersji daje możliwość określenia długości fali dowolnej obserwowanej linii widmowej, jeżeli znamy jej położenie na skali spektroskopu. Jest więc krzywą kalibracyjną używanego przyrządu.

Przebieg pomiarów

Przyrządy: spektroskop pryzmatyczny, lampy spektralne (Na, Cd, Zn, Hg) oraz rurki Geisslera (He, Ne).

Wykonanie pomiarów

Odczytać i zanotować położenie na skali żółtej linii sodu. Przed szczeliną umieszczać kolejno świecące lampy spektralne (rtęciową, kadmową, cynkową) oraz rurkę Geisslera z helem. Dla każdego źródła światła notować położenia linii widmowych na skali, jej barwę oraz informację o jasności.

Opracowanie wyników

Przypisać długości fali obserwowanym liniom widmowym pochodzącym z pięciu wybranych źródeł światła, korzystając z dostępnych tabeli lub tablic linii widmowych. W ten sposób każda linia spektralna będzie opisana parą liczb – położenie na skali oraz długość fali. Położenie linii na skali jest obarczone błędem odczytu, związanym m. in. z szerokością szczeliny i błędem paralaksy – należy oszacować te błędy w czasie wykonywania ćwiczenia i uwzględnić rysując krzywą dyspersji. Narysować krzywą dyspersji, czyli zależność długości fali od jej położenia na skali.

Sporządzić także wykres zależności odwrotności kwadratu długości fali od odpowiadającego jej położenia linii. Korzystając z regresji liniowej do punktów pomiarowych dopasować prostą zgodnie z równaniem (10). Na podstawie otrzymanych współczynników regresji obliczyć długości fali oraz niepewności pomiarowe dla przejść elektromagnetycznych szóstego źródła światła (nieużywanego do wykreślenia krzywej dyspersji). Otrzymane wyniki należy porównać z wartościami tablicowymi i skomentować.

Literatura

- [1] David Holliday, Robert Resnick: *Podstawy Fizyki tom II*, PWN Warszawa 2005;
- [2] Henryk Szydłowski: *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999;
- [3] Andrzej Magiera, *I Pracownia Fizyczna*, Instytut Fizyki Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2006.
- [4] J. Ciborski, M. Sobol, *Foton* 114(2011)46-49.