

Zeemanův jev

Andrea Hladíková, Gymnázium J.K.Tyla Hradec Králové, AJA.HLADIK@seznam.cz

Abstrakt

Tento článek je zaměřen na Zeemanův jev. Tento jev, objevený v roce 1896, se projevuje na atomech ve vnějším magnetickém poli, které způsobuje štěpení spektrálních čar. Tento jev byl pozorován za pomoci kadmiové výbojky a Fabry-Pérotova etanolu.

Úvod

V roce 1876 objevil P. Zeeman, že spektrální čáry se štěpí, pokud na atom působí vnější magnetické pole. Daný jev pozorujeme při přechodu elektronů z jednotlivých energetických hladin. Při přechodu elektronu z hladiny o vyšší energii do stavu s nižší energií dojde k vyzáření fotonu a proto jsou jednotlivé hodnoty vyzážené energie kantovány. Velikost rozštěpení hladin je přímoúměrná velikosti intenzity magnetického pole, kde konstanta úměrnosti je tzv. Bohrův magneton:

$$\Delta E = -\mu_B B.$$

Atom, jak víme, je základní stavební částicí hmoty, která je chemicky nedělitelná, ale má vnitřní strukturu. Skládá se z kladně nabitého jádra, které obsahuje nukleony, ty mají vnitřní strukturu, tzv. kvarky. Nadále se atom skládá ze záporně nabitého obalu, v němž obíhají elektrony. Elektrony jsou v obalu rozmístěny dle Hundových pravidel, které úzce souvisí s multiplicitou.

Každý elektron má vlastní elementární náboj, orbitální moment hybnosti a vnitřní moment hybnosti (spin). Moment hybnosti elektronu způsobuje elektrický proud, který indukuje magnetické pole, a proto u něj můžeme určit magnetický moment, který je roven:

$$\vec{\mu} = I\vec{A} = I\pi r^2 \vec{n} = \frac{evr}{2} \vec{n}$$

Energetické hladiny se zapisují takto:

$$^{2S+1}L_J$$

Popis energetických hladin využívá celkový moment hybnosti J a L je orbitální moment hybnosti, nadále se zde uplatňuje multiplicita, která je pro dané hodnoty celkového spinu S rovna 2S+1.

Pro náš experiment byl využit prvek kadmium, jehož elektronová konfigurace je [Kr] 4d¹⁰ 5s². Tento prvek je vhodný pro daný experiment, jelikož přechody elektronů v rámci tohoto světla vyzářují fotony, které mají vlnovou délku spadající do viditelného světla. U kadmia je velmi významný přechod ¹D₂ → ¹P₁, tento přechod se vyskytuje pouze mezi singlety. Tyto stavy se vyznačují tím, že celkový spin obou stavů je nula.

Zeemanův jev

Pokud se bude atom nacházet v magnetickém poli, bude na jeho elektrony působit magnetická indukce daného pole. Tato interakce způsobuje štěpení energetických hladin. Toto štěpení může probíhat jako normální či anomální Zeemanův jev. Normální Zeemanův jev byl brzy podpořen Lorenzovou teorií, která objasňuje polarizaci složek a odvozuje vztah pro velikost rozštěpení. Tato teorie vychází z představy klasického harmonického oscilátoru, tvořeného elektronem v poli odstředivých sil. Pokud by byl elektron v nulovém magnetickém poli, mohl by se pohybovat po přímce v libovolných směrech, pokud bude kmitat více elektronů s různým fázovým posunutím, poté můžeme docílit pohybů po kružnicích či elipsách. Pokud ale elektron umístíme do homogenního pole, poté může vykonávat jen tři druhy periodického pohybu, těmito pohyby odpovídají jednotlivé frekvence. Mezi tyto pohyby patří pohyb ve směru magnetického pole, nebo dva kruhové pohyby, které jsou v rovině kolmé k vektoru indukčního toku.

Elektron v homogenním magnetickém poli dočasně zvyšuje svoji potenciální energii, která je vyvolána jeho excitací. Magnetické pole rozštěpuje energetické hladiny, které mají následně nižší (rozlišné) energetické nároky na excitované elektrony.

Změna potenciální energie elektronu v magnetickém poli je udávána takto:

$$\Delta E = -\vec{\mu} * \vec{B} = \frac{e\hbar}{2m_e} \vec{L} \cdot \vec{B} = \frac{e}{2m_e} \vec{L} \cdot \vec{B}$$

Pro zjednodušení výpočtů se směr magnetického pole \vec{B} považuje za osu z, pokud využijeme tento směr, pak následně dostaneme, že platí $l_z = m_l * \hbar$, následně můžeme původní vzorec upravit do stavu:

$$\Delta E = \frac{e\hbar}{2m_e} m_l B = \mu_B m_l B$$

Z této rovnice dostáváme konstantu tzv. Bohrov magneton, který udává magnetický moment částic.

$$\mu_B = \frac{g\hbar}{2m_e}$$

Přechody mezi hladinami jsou řízeny jistými pravidly a proto nemohou probíhat naprosto libovolně. Při každém přechodu elektronu z jedné hladiny do druhé musí být dodržen zákon zachování momentu hybnosti, proto jsou možné jen přechody, které mají celkovou změnu spinu nulovou, tj. $\Delta S = 0$. Podle změny hlavního kvantového čísla rozlišujeme tři druhy polarizace (viz. výše Lorenzova teorie), změna hlavního kvantového čísla může probíhat v rámci tří cifer: -1, 0 a 1. Pokud bude změna hlavního kvantového čísla rovna nule tj.

$\Delta L = 0$, poté nastává lineární polarizace typu π . Pokud bude daná změna hlavního kvantového čísla rovna plus mínus jedné tj. $\Delta L = \pm 1$, poté nastává polarizace typu σ , neboli kruhová polarizace. Celkový moment hybnosti následně také nabývá hodnot $\Delta J = 0; \pm 1$.

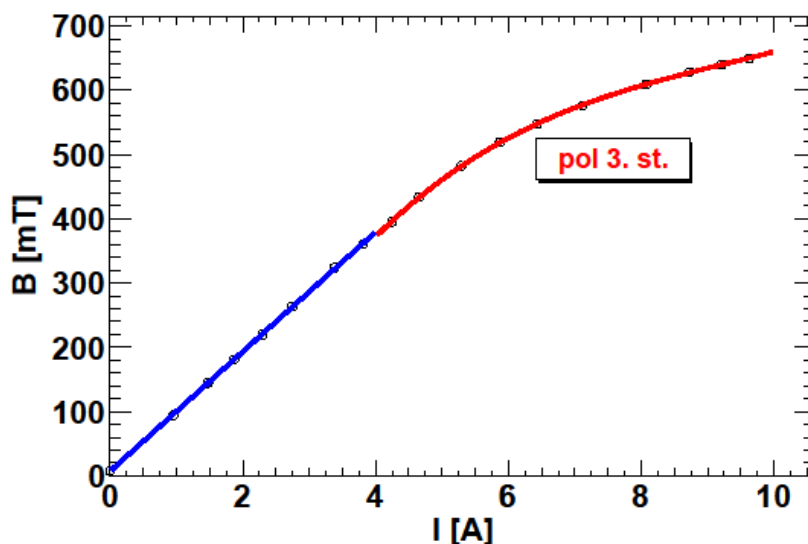
Polarizace neprobíhají současně, pokud máme optickou soustavu rovnoběžně s působením magnetického pole, poté pozorujeme kruhovou polarizaci, kruhové polarizace neboli σ^+ a σ^- jsou oproti sobě fázově posunuty, proto pro jejich rozlišení je možné použít polarizační filtr. Při manuálním pozorování zjišťujeme, že pokud se jedná o polarizaci σ^- , poté při přidání

magnetického pole se dané interferenční maxima přibližují středu, u σ^+ funguje tato skutečnost opačně.

Vlastní měření

K proběhnutí experimentu je zapotřebí použít Fabry – Pérotův etalon. Na tomto dokonale hladkém rozhraní dochází k mnoha lomům fotonů, na normálním hranolu by rozštěpení hladin nebylo pozorovatelné. Využitá optická aparatura se skládala, z kadmiové výbojky, která byla umístěna mezi cívkami, nadále jsme využili polarizační filtr, čtvrt-vlnné destičky, čočky, Fabry – Pérotova etalonu, monochromatického filtru (643,8 nm) a mikroskopu se stupnicí.

Před započítím pokusu museli jsme změřit intenzitu magnetického pole v místě, kde se bude při průběhu pokusu nacházet kadmiová výbojka. Tuto veličinu jsem změřili za pomoci Hallovy sondy. Naměřená data jsme vložili do grafu a následně jsme je proložili dvěma křivkami, první křivkou je lineární závislost, druhá křivka je polynomičká třetího řádu.



Obrázek 1: Závislost magnetického pole mezi dipóly na proudu protékajícího cívkami

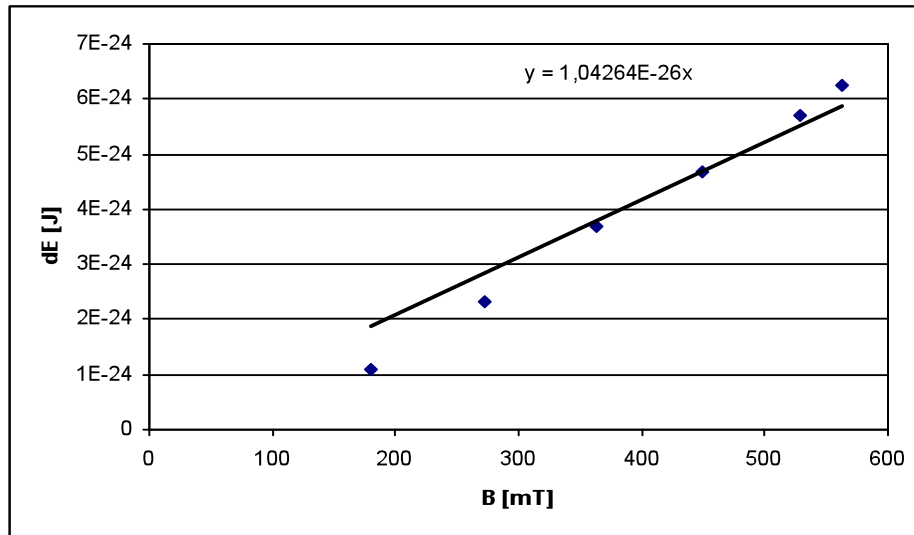
Tato křivka nám následně bude užitečná při měření Bohrova magnetonu, jelikož při samotném měření budeme mít pouze dostupné informace o proudu nikoli o velikosti magnetické indukce.

Manuální měření probíhá za pomoci vycentrované stupnice optické soustavy, na této stupnici jsme odečítali rozměry kroužků. Na základě kvadrátů těchto hodnot jsme sestavili přímkou, jejíž směrnici budeme nadále používat pod označením Δ . Za pomoci i dalších naměřených hodnot jsme již schopni vypočítat Bohrův magneton. Rozdíl energií emitovaného záření z rozštěpených hladin vypočítá následovně:

$$\Delta E = \frac{hc}{2dn} \frac{\delta}{\Delta}$$

kde h je redukovaná Planckova konstanta, d je tloušťka a n je index lomu Fabry – Pérotova etalonu, nadále $\delta = r^2 - R^2$, kde r vyjadřuje poloměr interferenčního kroužku při nenulovém

magnetickém poli a R je poloměr stejného kroužku při nulovém magnetickém poli. Hodnoty získané tímto vzorcem zaneseme do grafu v závislosti na indukci, kterou získáme z grafu závislosti magnetické indukce na proudu. Získaný graf proložíme přímkou, jejíž směrnice nabývá hodnoty Bohrova magnetonu.



Obrázek 2: Graf závislosti energie na intenzitě magnetického pole

Výsledná hodnota je $\mu_B = 10,4 \cdot 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$.

Závěr

Veškerá měření prokázala, že vztah mezi potenciální energií a magnetickou indukcí je přímo úměrný, koeficientem úměrnosti je tzv. Bohrov magneton. Tato konstanta má tabulkovou velikost $9,27 \cdot 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$. Naše měření vyšlo s chybou přibližně 10%, tato chyba je způsobena nedostatečným rozlišením mikroskopu.

Poděkování

Děkujeme supervisorovi, který nám poskytl náhled do zkoumané problematiky, Ing. Davidu Tlustému. Nadále děkujeme Ing. Vojtěchu Svobodovi CSc. za možnost účastnit se daného projektu a také všem ostatním organizátorům Týdne vědy na jaderce a ČVUT za poskytnutí zázemí.

Zdroje

- [1] <http://leccos.com/index.php/clanky/zeemanuv-jev>
- [2] http://artemis.osu.cz/mm fyz/am/am_4_2.htm
- [3] http://cs.wikipedia.org/wiki/Bohrův_magneton