

# EFFECTUL ZEEMAN NORMAL

## 1) Obiectivele lucrării

- Observarea unui triplet de linii în cazul efectului Zeeman normal în configurație transversală.
- Determinarea stării de polarizare a componentelor tripletului.
- Observarea unui dublet de linii în cazul efectului Zeeman normal în configurație longitudinală.
- Determinarea stării de polarizare a componentelor tripletului.

## 2) Principiile experienței

Prin efect Zeeman se înțelege despicierea nivelelor de energie și, în consecință, a liniilor spectrale sub acțiunea unui câmp magnetic extern. Efectul a fost prezis de *H. A. Lorentz* în 1895 ca o parte a teoriei sale clasice a electronului și confirmat experimental, câțiva ani mai târziu, de către *P. Zeeman*. Zeeman a observat un triplet de linii, în locul unei singure linii, atunci când observarea radiației emise se făcea perpendicular pe direcția câmpului magnetic și un dublet de linii în cazul observării paralele. Mai târziu, s-au observat despicieri mai complexe ale liniilor spectrale care au primit numele de efect Zeeman anomal. Pentru a explica acest fenomen, în 1925 *Goudsmit* și *Uhlenbeck* au emis ipoteza spinului electronului. În cele din urmă, a devenit evident că efectul Zeeman anomal este regula, iar efectul Zeeman “normal” este excepția.

Efectul Zeeman normal apare doar atunci când are loc tranziția între stările unui atom cu spinul total  $S = 0$ . Atunci, momentul cinetic total  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$  devine un moment cinetic orbital pur ( $\vec{J} = \vec{L}$ ). Momentul magnetic corespunzător va fi

$$\vec{\mu} = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{J} \quad (1)$$

unde

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (2)$$

( $\mu_B$  = magnetonul Bohr,  $m_e$  = masa electronului,  $e$  = sarcina elementara,

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $h$  = constanta lui Planck).

Intr-un camp magnetic atomul capata o energie suplimentara

$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (3)$$

Componenta momentului cinetic pe directia campului magnetic poate avea una din valorile

$$J_z = M_J \cdot \hbar \text{ cu } M_J = J, J-1, \dots, -J \quad (4)$$

In consecinta, termenul energetic caracterizat de o valoare a lui  $J$  se descompune in  $2J+1$  componente Zeeman echidistante ce difera intre ele prin valoarea lui  $M_J$ . Intervalul energetic intre componentele adiacente  $M_J, M_{J+1}$  este

$$\Delta E = \mu_B \cdot B \quad (5)$$

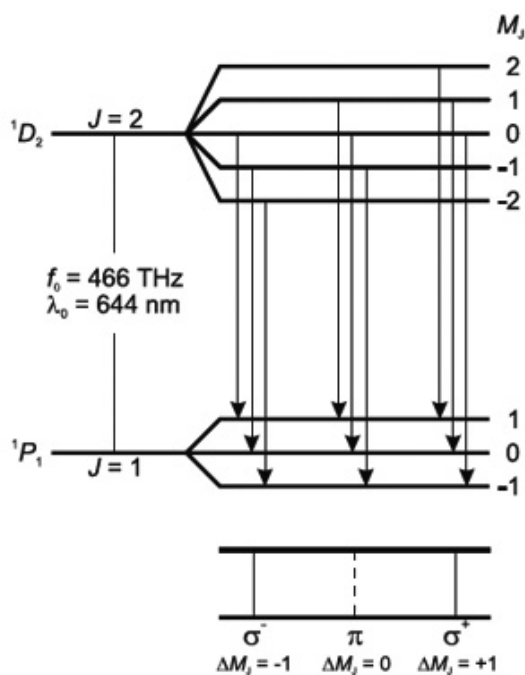


Fig.1 Efectul Zeeman Normal pentru cadmiu; despicarea nivelelor si tranzitiile permise

Se poate vedea acest efect Zeeman normal in cazul liniei rosii a cadmiului ( $\lambda_0 = 643,8 \text{ nm}$ ,  $\nu_0 = 465,7 \text{ THz}$ ). Ea corespunde tranzitiei  $^1D_2$  ( $J=2, S=0, L=2$ )  $\rightarrow$   $^1P_1$  ( $J=1, S=0, L=0$ ) unui electron din patura a cincea (vezi Fig.1). In camp magnetic nivelul  $^1D_2$  se descompune in cinci componente Zeeman, iar nivelul  $^1P_1$  se descompune in trei componente

Zeeman, avand distanta energetica precizata de formula (5).

Tranzitiile optice intre aceste nivele sunt posibile numai sub forma radiatiei dipolar electrice. In acest caz, intre numerele cuantice magnetice  $M_J$  ale starilor implicate se folosesc urmatoarele reguli de selectie:

$$\Delta M_J \begin{cases} = \pm 1 & \text{pentru componentele } \sigma \\ = 0 & \text{pentru componentele } \pi \end{cases} \quad (6)$$

Se observa astfel un numar de trei linii spectrale (Fig.1); componenta  $\pi$  nu este deplasata iar cele doua componente  $\sigma$  sunt deplasate cu

$$\Delta \nu = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (7)$$

in raport cu frecventa originara. In aceasta relatie,  $\Delta E$  este despicarea energetica (echidistanta) calculata in (5).

### 3) Distributia unghiulara si polarizarea

Fotonul emis are o anumita distributie unghiulara ce depinde de componenta  $\Delta M_J$  a momentului cinetic pe directia campului magnetic. Aceasta distributie unghiulara este prezentata in Fig.2 sub forma unor diagrame polare. Ea poate fi observata si experimental, intrucat campul magnetic induce aceeasi axa de cuantificare pentru toti atomii de cadmiu.

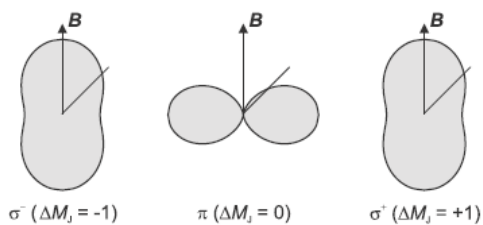


Fig.2 Distributia unghiulara a radiatiei dipolar electrice ( $\Delta M_J$ ; componentele momentului cinetic al fotonilor emisi pe directia campului magnetic)

In termenii fizicii clasice, cazul  $\Delta M_J = 0$  corespunde unui dipol oscilant infinezimal paralel cu campul magnetic. Nici o cuanta nu este emisa in directia campului magnetic, cu alte cuvinte componenta  $\pi$

nu se poate observa pe o directie paralela cu campul magnetic. Lumina emisa perpendicular pe directia campului magnetic este linear polarizata deoarece

vectorul  $\vec{E}$  oscileaza pe directia dipolului si deci, paralel cu campul magnetic (Fig.3).

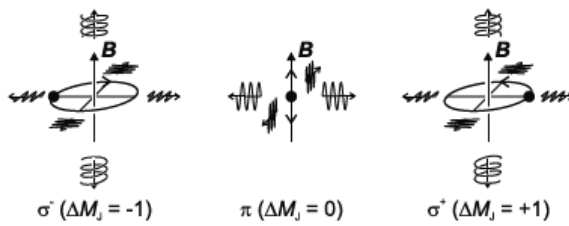


Fig.3 Reprezentarea schematica a polarizarii componentelor Zeeman ( $\Delta M$  ; componentele momentului cinetic al fotonilor emisi pe directia campului magnetic)

Pe de alta parte, in cazul  $\Delta M_J = \pm 1$  cele mai multe cuante sunt emise in directia campului magnetic. In termeni clasici, acest caz corespunde unor doi dipoli perpendiculari ce oscileaza cu o diferenta de faza de  $90^\circ$ .

Suprapunerea celor doi dipoli produce un curent pe o bucla circulara. Se emite astfel pe directia campului magnetic lumina circular polarizata; in sensul pozitiv al directiei campului ea este polarizata in sens orar pentru  $\Delta M_J = +1$  si anti-orar pentru  $\Delta M_J = -1$  (vezi Fig.3).

#### 4) Spectroscopia componentelor Zeeman

Efectul Zeeman permite separarea spectroscopica a componentelor cu diferite polarizari. Totusi, pentru a observa despicarea avem nevoie de un dispozitiv spectral cu o rezolutie foarte mare, intrucat cele doua componente  $\sigma$  ale liniei rosii a cadmiului sunt despicate, intr-un camp magnetic de inductie  $B=1 T$ ,

cu numai  $\Delta\nu = 14GHz$ , respectiv  $\Delta\lambda = 0,02 nm$ .

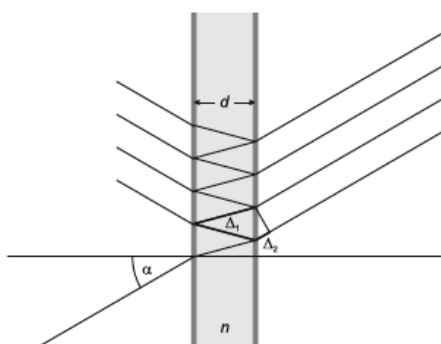


Fig.4 Etalonul Fabry-Perot ca spectrometru interferential. In desen este prezentat drumul unei raze ce face unghiul  $\alpha > 0$  cu axa optica. Diferenta de drum optic intre doua raze emergente adiacente este  $\Delta = n \Delta_1 - \Delta_2$

In aceasta lucrare se utilizeaza un etalon Fabry-Perot. El este o lama de sticla cu planele perfect paralele (eroarea de planeitate fiind mult mai mica decat lungimea de unda a radiatiei folosite) si acoperite cu un strat de aluminiu (partial

reflectorizant). Lumina usor divergenta ce intra in etalon – orientat perpendicular pe axa optica – este reflectata inainte si inapoi de multe ori, in timp ce o parte din ea emerge din etalon (Fig.4). Datorita stratului de aluminiu aceasta raza emergenta are o intensitate mica, adica vor exista foarte multe raze emergente ce vor interfera. Dupa etalon se afla o lentila convergenta ce strange razele emergente in planul sau focal. Cu ajutorul unui ocular se vor observa figuri de interferenta sub forma unor cercuri pentru o lungime de unda particulara,  $\lambda$ . Apertura unghiulara a unui astfel de cerc este egala cu unghiul de emergenta  $\alpha$  a razelor ce ies din etalonul Fabry-Perot. Razele care ies la un unghi de emergenta  $\alpha_k$  interfereaza constructiv atunci cand doua raze adiacente indeplinesc conditia “curbelor de egala inclinare” (Fig.4):

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \lambda \quad (7)$$

( $\Delta$ = diferenta de drum optic;  $d$ =grosimea etalonului;  $n$ =indicele de refractie al sticlei;  $k$ =ordinul de interferenta).

O modificare a lungimii de unda cu  $\delta\lambda$  este tradusa intr-o modificare a unghiului de apertura cu  $\delta\alpha$ . Depinzand de lungimea focala a lentilei, unghiul de apertura  $\alpha$  corespunde unei raze  $r$ , iar variatia unghiului  $\delta\lambda$  corespunde unei variatii  $\delta r$ . Daca o linie spectrala este compusa din diferite componente ce variaza cu  $\delta\lambda$  fiecare franja circulara de interferenta este despicata in tot atatea cercuri ce difera intre razele lor cu un  $\delta r$ . Astfel, o linie dublet va prezenta o structura de dublet a franjei circulare, iar o linie triplet va prezenta o structura circulara de triplet.

## 5) Dispozitivul experimental

In Fig.5 este prezentat dispozitivul experimental complet in configuratia transversala.

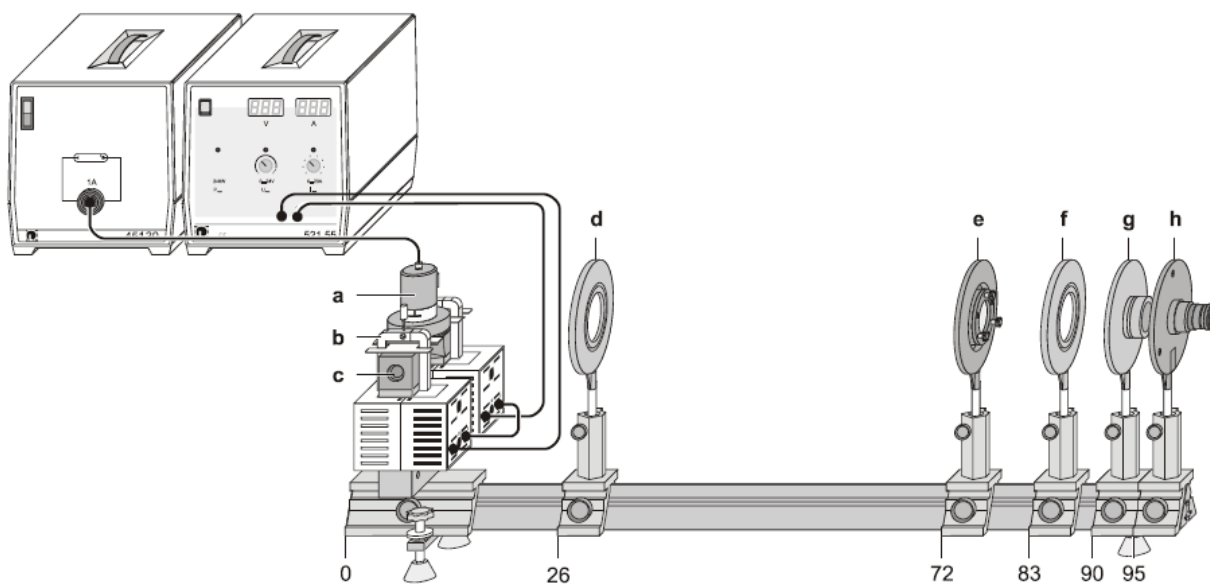


Fig.5 Dispozitivul experimental pentru observarea efectului Zeeman in configuratie transversala. Pozitia marginii din stanga a calaretului optic este data in *cm*.

- a** Lampa de cadmiu cu baza de sustinere
- b** Cleme
- c** Piese polare
- d** Lentila pozitiva (condensoare);  $f=150\text{ cm}$
- e** Etalon Fabry-Perot
- f** Lentila pozitiva ce formeaza imaginea de difractie;  $f=150\text{ cm}$
- g** filtru colorat (rosu) in montura
- h** Ocular cu rigla gradata

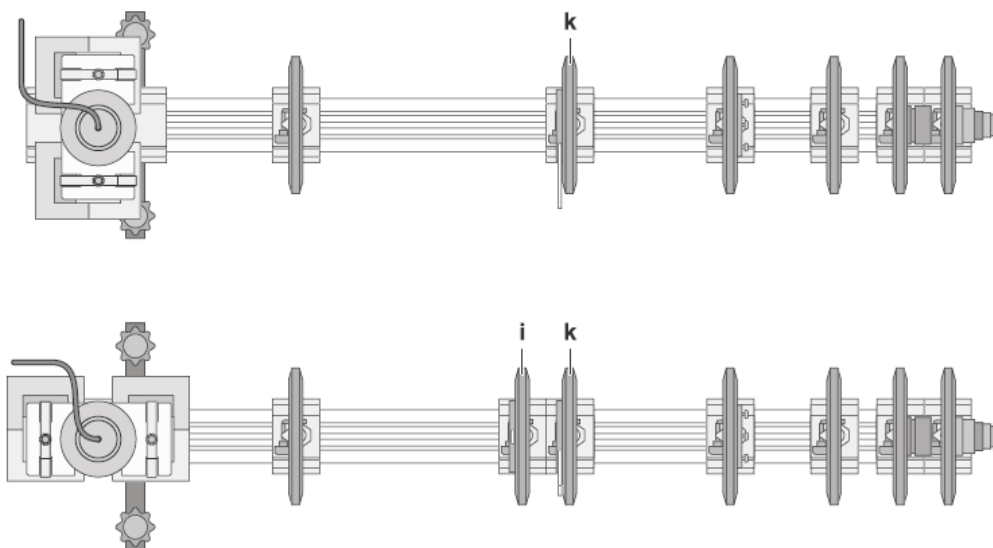


Fig.6 Dispozitivul experimental in configuratie transversala (sus) si longitudinala (jos); vedere de sus

- i** Lama sfert de unda
- j** Polarizor

## 6) Modul de lucru

### a) Observatii in configuratie transversala:

- Intai se vor observa franjele circulare de interferenta fara camp magnetic ( $I=0 A$ )
- Se creste incet curentul prin magnet pana la  $I=3 A$  cand franjele despicate sunt bine separate.

Pentru a distinge intre componentele  $\pi$  si  $\sigma$ .

- Introduceti polarizorul in drumul razei de lumina (Fig.6) si aduceti-l la  $90^\circ$  pana cand cele doua componente extreme ale structurii de triplet dispar.
- Fixati polarizorul la  $0^\circ$  pana cand componenta (nedeplasata) din mijloc dispara.

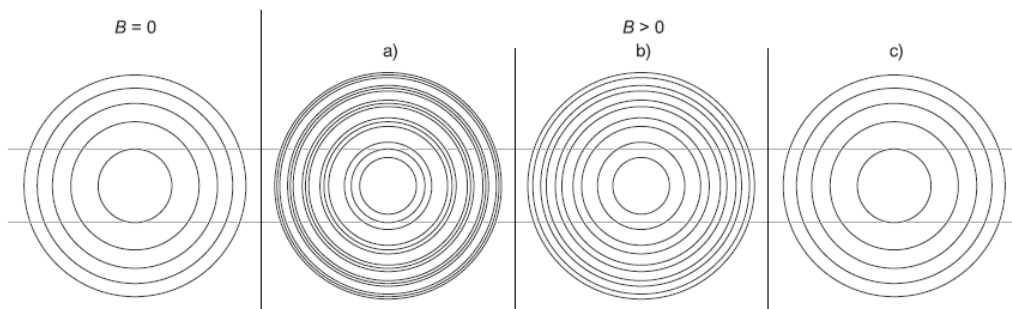


Fig.7 Figura de interferenta cu franje circulare asociata efectului Zeeman observat in configuratie transversala

- a) fara polarizor
- b) directia polarizarii perpendiculara pe cea a campului magnetic
- c) directia polarizarii paralela cu campul magnetic

### b) Observatii in configuratie longitudinala:

- Rotiti cu  $90^\circ$ , pe platforma calaretului, intregul dispozitiv al lampii de cadmiu impreuna cu piesele polare.
- Observati intai figura de interferenta in absenta campului magnetic ( $I=0$ ).

- Se creste incet curentul prin magnet pana la  $I=3\text{ A}$  cand franjele despicate sunt bine separate.

Pentru a distinge intre componentele  $\sigma_+$  si  $\sigma_-$ :

- Introduceti lama sfert de unda in drumul razei de lumina intre lampa de cadmiu si polarizor (vezi Fig.6) si fixati-o la  $0^\circ$ .
- Aduceti polarizorul la  $+45^\circ$  si la  $-45^\circ$ . In fiecare caz una dintre cele doua componente ale dubletului dispare.

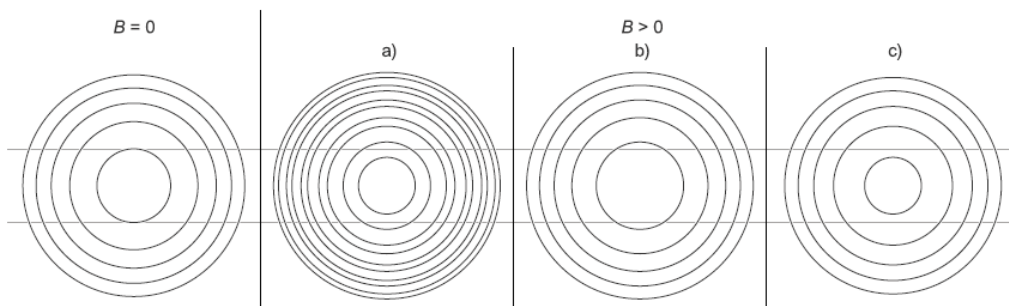


Fig.8 Figura de interferenta cu franje circulare asociata efectului Zeeman observat in configuratie longitudinala

- a) fara lama sfert de unda
- b) si c) cu lama sfert de unda si polarizor pentru a detecta lumina circular polarizata