

Zeemaneffekten

19 okt. 2026, 4 min läsning

UTKAST

#fysik #atomfysik #fenomen

Kurs: F0005T Förkunskaper: Kvanttal, Linjespektrum

I ett magnetfält splittras linjerna i ett linjespektrum. Förklaringen är att fältet bryter sfärens symmetri, så att degenererade nivåer med olika magnetiskt kvanttal $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ inte längre har samma energi. Den anomala Zeemaneffekten, som ger fler linjer än så, förklaras först när elektronspinnets räknas med – och det var så det magnetiska spinkvanttalet m_s upptäcktes.

Formeln, symbol för symbol

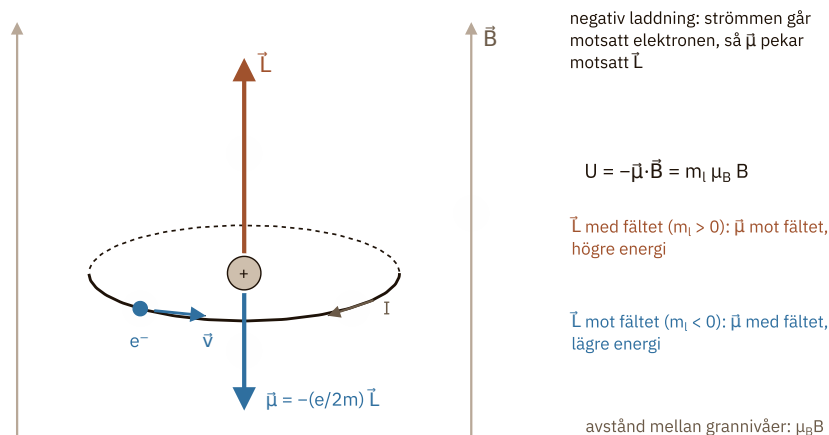
$$\underbrace{U}_{\text{energi-ändringen}} = \underbrace{m_l}_{-l, \dots, l} \underbrace{\mu_B}_{e\hbar/2m} \underbrace{B}_{\text{yttre fältet}}$$

Varje orientering av banan får sin egen energi, så nivån delas i $2l + 1$ steg med avståndet $\mu_B B$. Utan fält har alla samma energi, och ju starkare fältet är, desto större blir uppdelningen.

1. Banrörelsens magnetiska moment

En elektron som rör sig i en bana kring kärnan är en liten strömslinga och har därför ett magnetiskt dipolmoment. Momentet är proportionellt mot banrörelsemängdsmomentet och, eftersom laddningen är negativ, motriktat det:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L}$$



Elektronen i sin bana som en liten strömslinga. Laddningen är negativ, så strömmen I går åt motsatt håll mot elektronen och $\vec{\mu}$ pekar motsatt $\vec{L}$. I ett yttre fält $\vec{B}$ längs z får banan energin $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$, som beror på hur $\vec{L}$ står mot fältet.

Härledning av $\mu = (e/2m)L$

Strömmen. Elektronen går ett varv på tiden $T = 2\pi r/v$, så strömmens belopp är

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

Momentet. Slingans area är $A = \pi r^2$:

$$\mu = IA = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

Inför L . Med $L = mvr$:

$$\mu = \frac{e}{2m} mvr = \frac{e}{2m} L$$

Resultatet har härletts med en klassisk cirkelbana, men det gäller också kvantmekaniskt.

Komponenten längs z är kvantiserad eftersom $L_z = m_l \hbar$ är det (se [Kvanttal](#)):

$$\mu_z = -\frac{e}{2m} m_l \hbar = -m_l \mu_B$$

där **Bohrmagnetonen** är den naturliga enheten för atomära magnetiska moment:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ J/T} = 5,788 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T}$$

2. Energin i ett magnetfält

Vi lägger z-axeln längs fältet. En magnetisk dipol i fältet $\vec{B}$ har energin

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_z B$$

$$U = -(-m_l \mu_B) B$$

$$U = m_l \mu_B B$$

Vilken riktning fältet har spelar ingen roll: det är komponenten längs fältet som räknas, och z-axeln är bara ett namn på den riktningen.

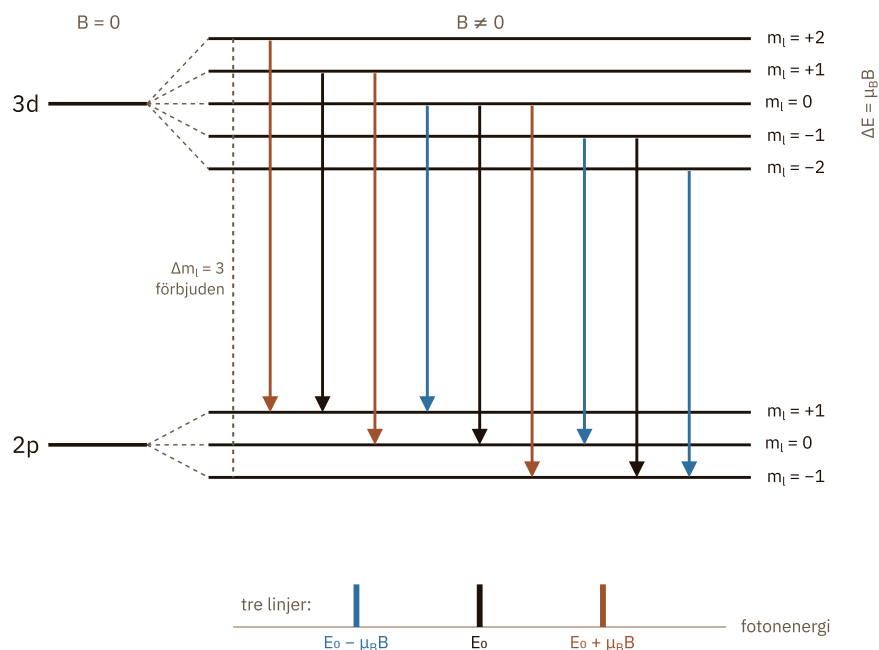
3. Uppsplittningen

En nivå med kvanttal l har $2l + 1$ tillstånd, som utan fält har samma energi. Fältet flyttar dem till

$$E = E_0 + m_l \mu_B B \quad m_l = -l, \dots, +l$$

så nivån splittras i $2l + 1$ lika tätt liggande nivåer med avståndet $\mu_B B$. En s-nivå ($l = 0$) påverkas inte alls.

För en övergång $3d \rightarrow 2p$ skulle $5 \cdot 3 = 15$ kombinationer vara tänkbara, men **urvalsregeln** $\Delta m_l = 0, \pm 1$ tillåter bara nio. De nio ger dessutom bara tre olika fotonenergier, eftersom nivåerna i båda skalen har samma avstånd $\mu_B B$:



Normal Zeemaneffekt för $3d \rightarrow 2p$. Fältet splittrar $3d$ i fem och $2p$ i tre nivåer (avståndet kraftigt överdrivet). De nio tillåtna övergångarna ger bara tre fotonenergier, E_0 och $E_0 \pm \mu_B B$. Streckat: en förbjuden övergång med $\Delta m_l = 3$.

Energiskiftet är litet jämfört med fotonenergin, så våglängdsförskjutningen fås genom att derivera $E = hc/\lambda$:

$$\frac{dE}{d\lambda} = -\frac{hc}{\lambda^2}$$

$$|\Delta\lambda| \approx \frac{\lambda^2}{hc} \Delta E$$

4. Normal och anomal Zeemaneffekt

Den normala effekten — tre linjer med avståndet $\mu_B B$ — bygger bara på banrörelsens moment. Den ses när elektronernas spinn tar ut varandra. I de flesta atomer bidrar också **spinnets** magnetiska moment, och eftersom det har ungefär dubbelt så stor kvot mellan moment och rörelsemängdsmoment blir mönstret ett annat, med fler och olika tätt liggande linjer. Det kallades normalt innan spinnets var känt. Även utan yttre fält ger spinnets en liten uppdelning, se **Spin-bankoppling**.

⚠ Vanliga fel

- **Fel enhet på μ_B .** $9,274 \cdot 10^{-24}$ J/T och $5,788 \cdot 10^{-5}$ eV/T är samma sak. Blanda inte J och eV i samma uttryck.
- **Antalet nivåer och antalet linjer blandas ihop.** En nivå splittras i $2l + 1$ delar, men den normala Zeemaneffekten ger alltid tre linjer.
- **$\Delta\lambda$ proportionellt mot λ .** Förskjutningen går som $\lambda^2 \Delta E / hc$, inte som $\lambda \Delta E$.
- **s-nivån splittras.** Med $l = 0$ finns bara $m_l = 0$, så banmomentet ger ingen uppsplittring av en s-nivå.

5. Lösta exempel

≡ Exempel — Lyman- α i ett magnetfält

Väteatomens Lyman- α -linje, 121,6 nm, kommer från övergången $2p \rightarrow 1s$. Atomerna placeras i ett magnetfält $B = 1,50$ T. Bortse från spinnets. Hur stor blir energiskillnaden mellan grannlinjerna, och hur stor är våglängdsförskjutningen?

 Lösning

Nivåerna. $2p$ splittras i tre nivåer ($m_l = -1, 0, +1$) och $1s$ påverkas inte, så linjen blir tre linjer med avståndet

$$\Delta E = \mu_B B = 5,788 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T} \cdot 1,50 \text{ T} = \boxed{8,68 \cdot 10^{-5} \text{ eV}}$$

Våglängdsförskjutningen. Med $|\Delta\lambda| = \lambda^2 \Delta E / hc$:

$$|\Delta\lambda| = \frac{(121,6 \text{ nm})^2 \cdot 8,68 \cdot 10^{-5} \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = \boxed{1,04 \cdot 10^{-3} \text{ nm}}$$

Fysika: $Te (hc)$

Rimlighetskontroll. Fotonenergin är $1240/121,6 = 10,2 \text{ eV}$, så den relativa ändringen är $8,68 \cdot 10^{-5} / 10,2 \approx 8,5 \cdot 10^{-6}$ – samma som $\Delta\lambda/\lambda$.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

 Exempel – Fältet ur linjeavståndet

En spektrallinje vid 500 nm uppvisar normal Zeemaneffekt. Hur starkt måste fältet vara för att grannlinjerna ska ligga $0,0100 \text{ nm}$ isär?

 Lösning

Energiskillnaden. Grannlinjerna skiljer sig med $\Delta E = \mu_B B$, och

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{(500 \text{ nm})^2} \cdot 0,0100 \text{ nm} = 4,96 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$$

Fältet.

$$B = \frac{\Delta E}{\mu_B} = \frac{4,96 \cdot 10^{-5} \text{ eV}}{5,788 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T}} = \boxed{0,857 \text{ T}}$$

Ett fält under en tesla räcker alltså för en uppdelning som en bra spektrometer kan se.

Ej kontrollerat mot facit — två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 41.4 The Zeeman Effect