

Ultrakolde atomer

Mads Peter Steenstrup

This work is licensed under a [Creative Commons](#) “Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported” license.



1 Introduktion

Ultrakolde atomer betegner fysikken med atomer på en temperatur under 10mK. Ved disse temperature vil de termiske fluktuationer næsten være væk og de kvantemekaniske effekter vil være tydelige. Atomerne vil ofte være af samme type og være en gas. For at holde atomerne afskærmet fra omgivelserne så de kan forblive kolde bliver atomerne holdt svævende i en glascelle. Der er forskellige måder at opnå det på, her vil vi se på en Magneto Optical Trap, MOT, hvor atomerne bliver holdt svævende af 6 laserstråler, se figur 4.

Arbejdet med at fange og køle atomer gav nobelprisen i 1997: The Nobel Prize in Physics 1997 was awarded jointly to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips "for development of methods to cool and trap atoms with laser light." [5]

Her er en god video om emnet, <https://www.youtube.com/watch?v=SDqCx4FiJS0>.

Et eksempel på den mærkelige fysik der foregår når temperaturen bliver lav nok er superfluidity og superconductivity. Når ledere bliver superledende forsvinder modstanden fuldstændigt. Vi kan derfor sende stor strømstyrke gennem et kredsløb, uden at det bliver opvarmet. Det har enorm teknisk betydning når man laver elektromagneter, eks. partikelacceleratore og PET scannere, hvor magnetfeltet er proportionalt med strømstyrken. Dette er et aktivt forskningsfelt og vi har stadig ikke den fulde teori og forståelse for hvordan det virker. Superfyldende væsker er et andet fænomen hvor viskositet bliver nul. Viskositeten er en indre friktion og afgør bl.a. hvor tyktflydende væsken er. Helium-4 har et kogepunkt på 4.2K og bliver superflydende ved 2.12K kaldet Lambda punktet, ved 1atm tryk. Her ses det i en video, <https://www.youtube.com/watch?v=2Z6UJbwxBZI>.

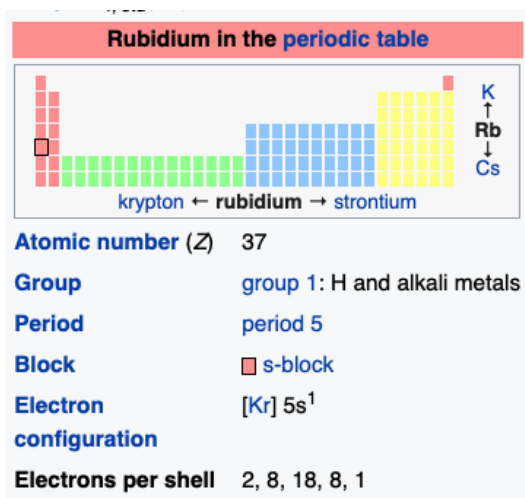
Noten er lavet som et supplement til 3.g fysikundervisningen. Noten gennemgår egenskaber ved Rubidiumatomet og hvordan en lidt mere detaljeret forståelse af atomets energiniveauer kan bruges til at køle og holde atomet fast. Det sker ved laserkøling og magnetisk fælde som undersøges eksperimentelt ved forsøg med dopplereffekten og spoler i anti-Helmholtz konfiguration.

2 Laserkøling

Hvordan kan man bruge en laser til at køle atomer?

2.1 Rubidium atomet

Vi vil bruge rubidium 87 som vores atom. Figur 1, viser at rubidium står i 1. hovedgruppe og derfor har én elektron i yderste skal. Vi kan derfor arbejde med det som var det et atom med kun én elektron, som brint.



Figur 1: Data om Rb.

Energiniveauerne er givet i figur 2, hvor S tilstanden har impulsmoment 0 og P har impulsmoment 1. Impulsmoment vil sige om de drejer rundt om atomet, hvilket er det samme som bevægelsesmængden for cirkelbevægelse. Som ved bevægelsesmængde er impulsmoment bevaret. Vi fokusere på den venstre side og glemmer opsplitningen til højre som skyldes eksterne magnetfelt. Elektronerne skifter orbitaler ved absorption og emission af fotoner, se FysikAbbogen2 s. 74 [3].

Øvelse 1

- Beregn energien i de to eksiterede tilstande i forhold til grundtilstanden, $D1$ og $D2$.

- Sammenlign med de to eksiterede tilstande i brint som har energierne,

$$E = -13.6\text{eV}/n^2 + 13.6\text{eV}/n^2, n = 1, m = 2, 3, \dots$$

2.1.1 Spin Orbit koblingen

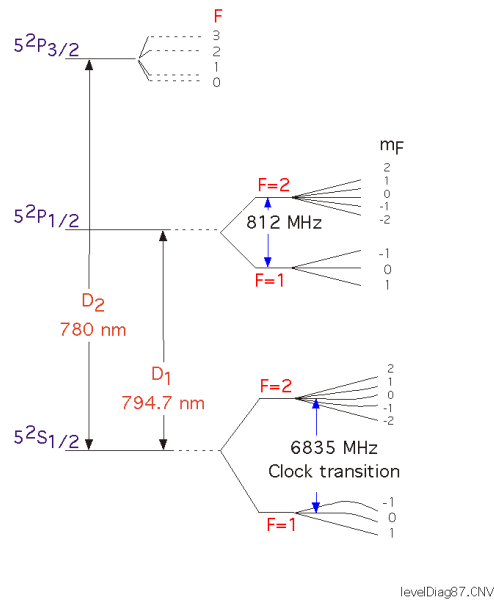
I figur 2 kan man se at energiniveauet for $P_{1/2} < P_{3/2}$. Det skyldes at elektronen både bevæger sig rundt om kerne og at elektronen har egenskaben spin. Når elektronen bevæger sig rundt svarer det til at der løbet en strøm og der bliver derfor skabt et magnetfelt. Dette magnetfelt påvirker så elektronen selv gennem elektronens spin, se figur 3a.

Vi vil undersøge sammenhængen mellem strøm i en spole og kraften på en magnet.

Vi antager at elektronen bevæger sig i cirkulær orbit omkring kernen. Figur 3b viser elektronen med positiv omløbsretning og spin ned.

- Argumenter for at strømmens retning er som vist på figuren.
- Brug højrehåndsreglen til at bestemme B-feltets retning.

⁸⁷Rb Ground and First Excited State Structure



Figur 2: Energiniveauer i Rb87. [4]



(a) Elektroners spin gør at de opfører sig som små magneter. (b) Elektroner i cirkulær orbit generere et magnetfelt og påvirker spin, grøn.

Figur 3: Spin-orbit

- Argumenter for at den potentielle energi er lavest når elektroner har spin ned, ved at bruge figur 3a.

I figur 2 svarer $P_{1/2}$ til at elektronen har spin ned og $P_{3/2}$ til spin op.

2.2 Temperatur og bevægelse

Temperaturen, i kelvin, i en gas er proportional med den gennemsnitlige kinetiske energi,

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T, \quad (1)$$

hvor $k = 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ er Boltzmann konstanten.

Vi kan nu udregne hastighederne af atomer og molekyler hvis vi kender deres temperatur.

Øvelse 2

- *Beregn den gennemsnitlige fart i N_2 og CO_2 molekylerne ved sturtemperatur, 20° C .*
- *Beregn den gennemsnitlige fart af $Rb87$ ved 20° C , 1 K og 1 nK .*

Hvis vi ønsker en bestemt temperatur skal vi derfor bremse atomerne, jo langsommere de bevæger sig jo lavere temperatur.

2.3 Hvordan man bremser med lys

Vi bruger laserlys til at bremse Rb atomerne. Lasere har den fordel at de har en afgrænset beam, så vi kan styre dem og de har veldefinerede bølglængder. Vi antager først at bølglængden svarer til $D1$ overgangen i Rb . Fotoner her bevægelsesmængden,

$$p_{foton} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (2)$$

hvor, $h = 6.626070040 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, er plancks konstant.

Vi har som altid bevarelse af bevægelsesmængden så ændringen Δp for atomet må være lig med bevægelsesmængden i den absorberede foton, $\Delta p = p_{foton}$. Ved emission vil atomet igen ændre bevægelsesmængde. Her er tricket at vi kan styre absorptionen til kun at komme fra en retning mens emissionen foregår i alle retninger. Hvis mange fotoner bliver absorberet og emitteret vil bidraget fra emissionen i gennemsnit blive nul.

Øvelse 3

Antag at vi har $Rb87$ atomer ved stuetemperatur og vi gerne vil køle dem og vi derfor sender en tynd laserstråle gennem gassen.

- *Argumenter for at vi kan nøjes med at koncentrere os om dem som bevæger sig imod laseren, da de andre vil forsvinde.*
- *Beregn hvor mange fotoner ét $Rb87$ atom, ved 20° C , skal absorbere for at blive bremset helt op.*
- *Antag at opbremsningen tager 1 ms og beregn accelerationen.*
- *Hvad skal effekten af laseren minimum være hvis vi gerne vil fange 10.000 $Rb87$ atomer?*

Det er desværre ikke muligt at få atomerne til at ligge helt stille. Forestil jer at atomet efter absorption ligger stille så vil den næste emission give atomet bevægelsesmængden p_{foton} .

Øvelse 4

- *Beregn minimumstemperaturen ved $D1$ overgangen, når en enkelt foton emitteres.*
- *Beregn den ved $D2$, hvorfor er der forskel?*

2.4 Doppler effekt

Ovenfor har vi argumenteret for at lys kan bruges til at bremse atomer som flyver mod laserlyset, ved absorption af fotoner med en energi som svarer til overgangen mellem to stationære tilstande for atomet. Et af problemerne i denne metode er at atomer som er blevet bremset derefter vil begynde at accelerere den modsatte vej, skubbet af laserlyset. Vi har brug for en metode hvor atomerne kun absorbere fotoner når de er på vej hen mod laseren. For at opnå det udnytter vi doppler effekten hvor bølglængden er kortere når atomerne bevæger sig hen mod laseren og længere når den bevæger sig væk. Effekten er den samme som ved lyd hvor en sirene fra en ambulance har en højere tone, kortere bølglængde, når ambulancen bevæger sig hen mod en og dybere når den bevæger sig væk. Det er beskrevet grundigt i Frede Vestergaards, Dopplereffekten [6].

Øvelse 5

- Gennemgå Vestergaards udledning af dopplereffekten side 3-4 i [6].
- Beskriv ligning 6.
- Diskuter animationerne på Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect#/media/File:Dopplereffectsourcemovingrightatmach0.7.gif.

Lys er som bekendt elektromagnetisk stråling og doppler effekten skal forklares med den specielle relativitetsteori. Vi vil ikke udlede den, se Mogens Dams note for udledning [1].

Sætning 1 (Dopplereffekt for elektromagnetiske bølger)

Hvis en bølge giver, der udsender elektromagnetiske bølger med frekvensen f , bevæger sig med hastigheden v i forhold til en iagttager, så vil det for iagttageren se ud som om bølgerne har en frekvens f_1 givet ved

$$f_1 = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \cdot f \quad (3)$$

Bølge giverens hastighed v regnes her positiv hen imod iagttageren og negativ væk fra.

Øvelse 6

I denne øvelse skal I beregne ændringen i bølgelængden som et Rb87 atom oplever. Brug hastighederne beregnet ovenfor for Rb87 ved 20°C, 1K og 1nK.

- Beregn ændringen i bølgelængde når atomerne bevæger sig mod lyset.
- Beregn ændringen i bølgelængde når atomerne bevæger sig væk fra lyset.

Som I har regnet ud er effekten stor ved store hastigheder og bliver mindre og mindre jo koldere atomerne bliver. Der er derfor en grænse for hvor meget man kan køle atomerne med denne teknik.

2.4.1 MOT opsætning

MOT står for en magneto-optical-trap, hvor atomerne fanges mellem 6 laserstråler. Vi starter lige med to.

Som I udledte ovenfor oplever atomer at lyset fra en laser har en kortere bølgelængde når de bevæger sig mod den end når de bevæger sig væk fra den.

Vi får brug for Bohrs postulat.

Sætning 2 (Bohrs frekvensbetingelse (energibevarelse))

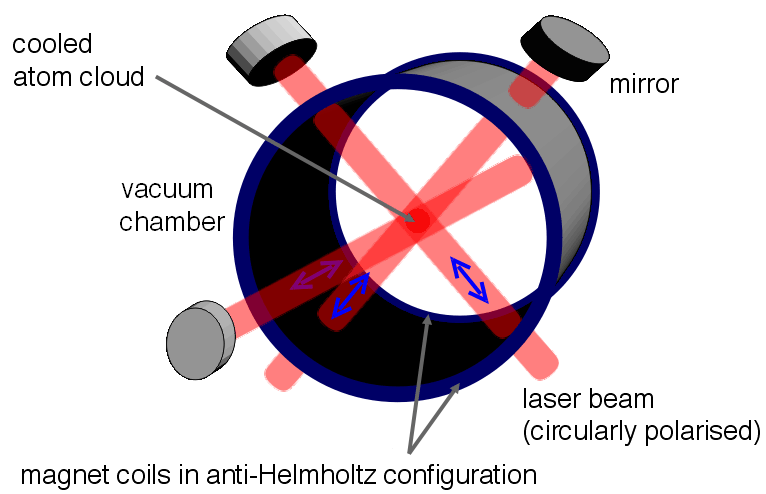
Overgangen mellem to stationære tilstande i et atom kan kun foregå hvis der sker en absorption eller emission af en foton med en energi svarende til energiforskellen mellem de to stationære tilstande.

Sætningen betyder at det kun er med fotoner med energier som ligger meget tæt på energiforskellen mellem to niveauer som interagerer med atomerne.

Øvelse 7

- Argumenter for at kortere bølgelængde giver mere energirige fotoner.
- Lav en tegning hvor to lasere peger mod hinanden og med atomer i midten.
- Argumenter for at atomerne bliver fanget hvis fotonerne har en energi som er lidt lavere end energiforskellen i atomerne.

Med to laserstråler kan vi altså presse atomerne sammen langs én akse. I figur 4 bliver atomerne samlet og holdt fast med 6 laserstråler to for hver x , y , z retning.



Figur 4: MOT setup.

2.5 Eksperimenter

Vi kan af gode grunde ikke eksperimentere med ultra kolde atomer, da det kræver avancerede laboratorier.

2.6 Dopplereffekten

Vi vil i forsøge undersøge dopplereffekten for lyd.

2.6.1 Teori

For en lydkilde som bevæger sig hen mod udsender en tone med frekvens f . Modtageren oplever frekvensen som

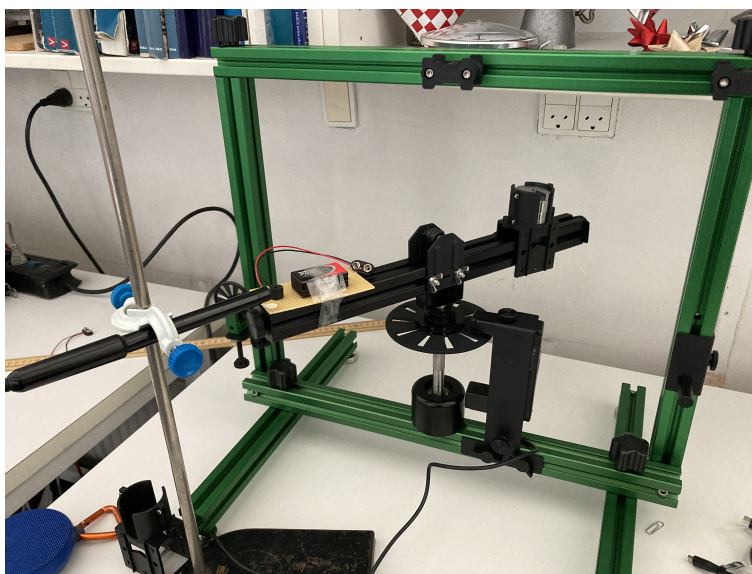
$$f_1 = \left(\frac{1}{1 - v/v_{lyd}}\right)f, \quad (4)$$

hvor v_{lyd} er lydens hastighed i luft.

- Argumenter for at minustegnet bliver til plus hvis lydkilden bevæger sig væk.

2.6.2 Eksperimentet setup

Figur 5 viser lydgiveren på en arm som kan rotere. En fotogate måler intervallerne mellem spalterne i det horisontale hjul.



Figur 5: Forsøgssopstilling.

2.6.3 Opsætning i Logger pro

Vi er interesserede i hastigheden og lydtrykket.

- Sæt tiden til 2s.
- I 'set up sensors' vælg 'labQuest mini', 'Photo gate', 'Set Distance or length', 'user defined'.
- Beregn længden som højttaleren har flyttet sig mellem hver spalte (10 på en omgang), når radius er $r = 16.8\text{cm}$.

2.6.4 Udførsel

Vi laver to datasæt

- Et med en stationær lyd giver.
- Et med en lyd giver i cirkelbevægelse.

2.6.5 Databehandling

- Brug hastighedsmålingen til at bestemme en teoretisk frekvens.
- lav en FFT graf og sammenlign

Forsøget er ikke et hvor man får rigtigt pæne resultater, men vurder hvorvidt forsøget underbygger teorien.

Hvis I vil forbedre forsøget kan I tage højde for at lydens hastighed er temperaturafhængig. Hastigheden er ca.

$$v_{luft}(T) \approx (331.4 + 0.6 \cdot T) \text{ m/s} \quad (5)$$

hvor T er temperaturen målt i grader celsius.

2.7 Atomer og magnetfelter

Som beskrevet i afsnit 2.1.1 kan vi betragte elektronen som en lille magnet som og vi argumenterede for at energien er lavest når elektronens spin ligger parallelt med magnetfeltet. Elektronen bevæger sig også rundt om kernen hvilket skaber en strøm og derved igen et magnetfelt. Vi kan styre atomets energiniveauer ved at placere dem i et eksterne magnetfelt og derved ændre på resonansfrekvensen.

2.7.1 Formål

Forålet er at undersøge B-feltet fra en flad spole. Vi ønsker at undersøge sammenhængen

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot r} \quad (6)$$

og bestemme hvor præcist b-feltet kan kontrolleres.

2.7.2 Teori

Magnetfelter er en relativistisk effekt af elektroners bevægelse i en leder. Man kan med højrehåndsreglen finde retningen magnetfeltet omkring en lige leder og tilsvarende i et loop. En flad spole består af n loops og B-feltet er beskrevet i figur 6, hvor $\mu_0 = 1.2566370614 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$ kaldes vacuumpermeabiliteten.

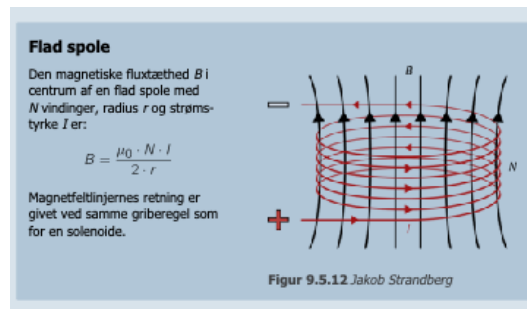
2.7.3 Forsøgsopstilling

apparatur: loggerPro, Hall sonde, spole, strømforsyning, amperemeter. Hall sonden er beskrevet i afsnit 2.8 og har specifikationer

Typical Resolution

± 0.32 mT range: 0.0002 mT

± 6.4 mT range: 0.004 mT



Figur 6: B-felt ved flad spole.

2.7.4 Udførsel

Hall sonden placeres i centrum af spolen.

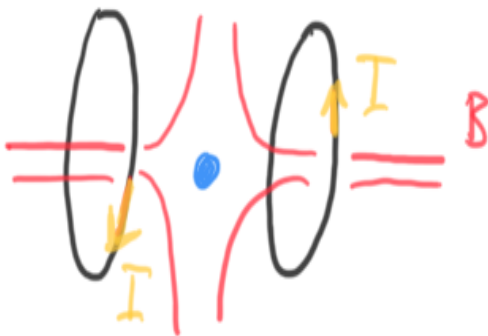
- Nulstil Hall sonden.
- Tag målinger strømstyrke og B-felt i intervallet $[0A : 5A]$. NB spolerne bliver varme så lad være med at hold dem på 5A for længe.

2.7.5 Databehandling

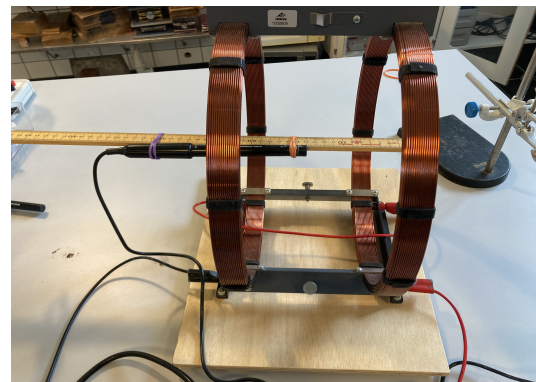
- Lav en (I, B) graf og undersøg sammenhængen.
- Vurder usikkerheden i jeres strømmåling.
- Vurder hvor præcist I kan styre magnetfeltet.

2.7.6 Anti-Helmholtz konfiguration

Vi vil undersøge magnetfeltet i midten af to spoler hvor strømmen løber hver sin vej.



(a) Anti-Helmholtz konfiguration af spoler.



(b) Forsøgsopstillingen.

Figur 7: Anti-Helmholtz konfiguration

2.7.7 Teori

Magnetfeltet bliver skabt af to spoler med.

- Brug højrehåndsreglen til at bestemme retningen af B-feltet på figur 7a

2.7.8 Opstilling

Hall sonden sættet på en lineal og kan flyttes frem og tilbage i mellem spolerne, se figur [7b](#).

2.7.9 Databehandling

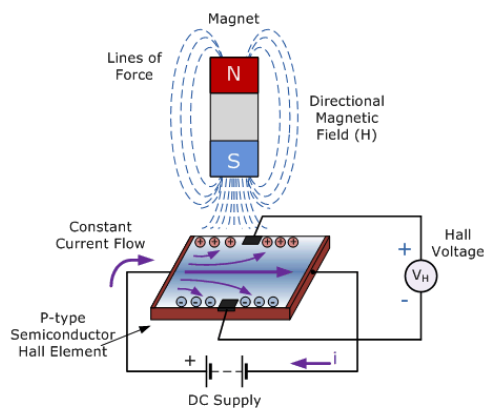
Data

```
"afstand fra centrum (cm)"
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
"Magnetic Field (mT)"
1.33677860122
1.17364879952
0.879375431759
0.496032700175
0.0624961834546
-0.391462314474
-0.781940437082
-1.08802410723
-1.2974109266
```

- Undersøg sammenhængen mellem afstanden fra centrum og det magnetiske felt.
- Undersøg om B-feltet er lineært omkring centrum.

2.8 Hall effekt

Hall sonden bruges til at måle magnetfelter ved at elektroner som bevæger sig i et magnetfelt bliver afbøjet. Figur 8 viser strømmen som løber fra venstre mod højre og elektronerne som bliver afbøjet i magnetfeltet. Der sker derfor en opbygning af spænding som er proportional til magnetfeltet. Denne spænding kan måles.



Figur 8: Hall sonde. [2]

References

- [1] Dam, Mogens. *Introduktion til den specielle relativitetsteori*. 2015. URL: <https://www.nbi.dk/~dam/sr09a.pdf>.
- [2] *electronics-tutorials*. 2021. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [3] Finn Elkjær, Torben Benoni. *FysikABbogen2*. Systime, 2006.
- [4] Phillips, David Forrest. *rb87level*. 2021. URL: <https://lweb.cfa.harvard.edu/~dphil/work/rbmaser/rb87level.html>.
- [5] Steven Chu Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips. *Nobel prize 1997*. 1997. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/summary/>.
- [6] Vestergaard, Erik. *Dopplereffekt*. 2012. URL: https://www.matematikfysik.dk/fys/noter_tillaeg/note_dopplereffekt.pdf.