

Kolde Atomer

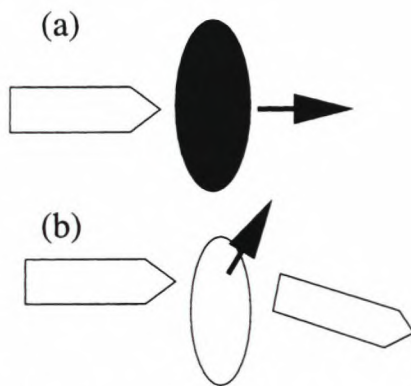
Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Årets Nobelpris i fysik blev tildelt Steven Chu, William D. Phillips, begge USA, og Claude Cohen-Tannoudji, Frankrig.

Disse tre forskere har siden midten af 80'erne, sammen med deres forskningsgrupper, været førende indenfor udviklingen af den proces, vi kalder laserkøling. Laserkøling er en metode til at køle atomare gasser, d.v.s. få atomerne til at ligge næsten stille. Den praktiseres i hundredevis af laboratorier over hele verden. Ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, har vi været med i udviklingen af laserkøling siden slutningen af 80'erne, og alle tre prismodtagere har haft studerende fra Institutet på længerevarende forsknings- og uddannelsesophold.

Dagene før prismodtagernes navne blev offentliggjort, afholdt vi ved Institutet et kursus om laserkøling for særligt interesserede 3.g. gymnasieelever fra hele landet. Eleverne fik adgang til Institutets kølingseksperimenter, hvor de selv kunne deltage i forsøgene, og de fik ved forelæsninger den grundlæggende fysik beskrevet. Nedenfor følger, lettere redigeret, den note, de fik udleveret til kurset.

I noten beskrives, hvordan man køler atomer ved hjælp af laserstråler og nogle af de ting, man kan bruge kolde atomare gasser til. Der gives også en sammenfatning af de sidste aktiviteter inden for Bose-Einstein-kondensering.

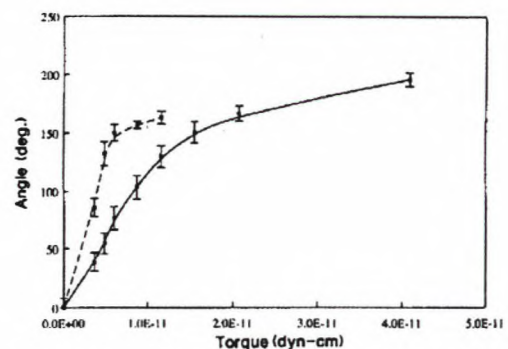
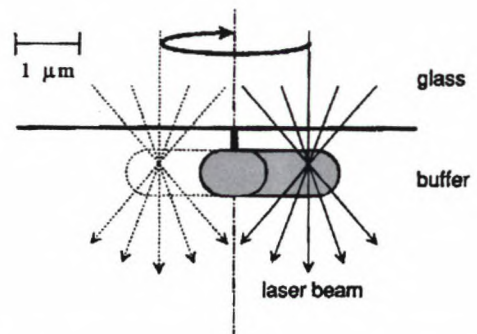


Figur 1. Impulsen i en lysstråle kan overføres 100 %, hvis strålen absorberes fuldstændigt af et legeme (a). Hvis strålen afbøjes, fx i en linse, vil kravet om impulsbevarelse medføre, at linsens impuls ændres i retning af vektorforskellen mellem den indkommende og den udgående lysstråle (b).

Indledning

Allerede i sidste århundrede var man klar over, at lys både har energi og impuls, og at disse størrelser er bevarede, når lyset absorberes eller afbøjes af materialer. Lige omkring århundredeskiftet lykkedes det eksperimentelt at bekræfte impulsbevarelsen, idet man kunne måle rekylbevægelsen

af legemer, som havde afbøjet lysstråler, se Fig. 1.



Figur 2. Objekterne i Fig. 1 kan være levende biologisk materiale. I øverste del af figuren vises, hvordan man kan dreje coli- og streptokok-bakterier rundt, mens de fastholdes i deres små svømme-"arme". Ved at dreje laserstrålens fokus rundt om bakteriens ophængningspunkt, skubbes eller trækkes bakterien med rundt, svarende til kraftpåvirkningen i Fig. 1.b. Den nederste figur sammenfatter, hvor stort et kraftmoment, der skal til for at dreje bakterien en given vinkel. Streptokok-bakterien er beskrevet ved den stiplede kurve, og den drejes mest ved små kraftpåvirkninger. Coli-bakterien ser ud til at ville vinde en armlægningskonkurrence mellem de to! (Den nederste skala går fra 0 til $5 \cdot 10^{-18}$ Nm).

De kræfter, man herved kunne udsætte forskellige materialer for, var yderst beskedne, især fordi man ikke havde særligt intense lyskilder, men siden laseren blev opfundet og udviklet igennem 1960'erne, har man fået mulighed for at fange og manipulere objekter med laserlys, og inden for biologi og medicin spås *den optiske pincet* en stor fremtid. Som eksempler på anvendelser kan nævnes måling af bakteriers "armkræfter", se Fig. 2., udstrækning og vibration af DNA molekyler, styrkemålinger på sædceller, omrokering af elementer inden for enkelte celler - emner af stor forskningsmæssig interesse indenfor medicin og biologi. Kræfterne på levende biologiske materialer fremkommer ved afbøjning snarere end absorption af lys, og der sker derfor typisk ikke nogen opvarmning og beskadigelse af dem. Anvendelser inden for fremstilling og justering af mikroskopiske komponenter i elektronik-

og optikbranchen findes naturligvis også.

Enkelte atomer kan også absorbere og afbøje lysstråler. Atomer vekselvirker kun med lys med helt bestemt frekvens og bølgelængde, og det betød, at kræfter på atomer oprindeligt var sværere at observere. Med laserens fremkomst er det problem delvist løst, og i midten af 1970'erne blev det teoretisk foreslået, at man kan benytte lys-atom vekselvirkningen til at *køle* atomare gasser, d.v.s. til at få atomerne til at bevæge sig meget langsomt. Laserkøling er i sig selv en interessant fysisk proces, og de kolde atomer giver en række muligheder for teknologiske anvendelser og for fundamentale fysiske undersøgelser. Med temperaturer på en milliontedel Kelvin eller herunder har man i laboratoriet atomare gasser, der er koldere end noget andet sted i verdensrummet. Laserkøling har haft indflydelse på udviklingen af præcise atomare ure og har åbnet for nye grene af fysikken som f.eks. atomoptik. Vi skal i de følgende afsnit gennemgå teorien for laserkøling, og til sidst vil vi vende tilbage til diskussionen af anvendelser.

Fotoner, energi og impuls

Lys kan opfattes som en strøm af fotoner hver med en energi proportional med lysets frekvens. Impulsen af en enkelt foton kan ikke som for sædvanlige partikler beregnes som produktet af dens masse og dens hastighed (massen er nul). Med forskellige argumenter når man frem til, at impulsen af en enkelt foton er dens energi divideret med lyshastigheden c (check selv, at dimensionen passer med en impuls). Et par formler for energien E_{foton} og impulsen p_{foton} af en foton:

$$\begin{aligned} E_{\text{foton}} &= h \cdot f = \hbar \cdot \omega \\ p_{\text{foton}} &= \hbar \cdot \omega / c = \hbar k = h / \lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

I formlerne betegner h Plancks konstant og f lysets frekvens (λ er lysets bølgelængde). Vi benytter det græske bogstav omega for 2π ganget med frekvensen, $\omega = 2\pi \cdot f$, mens symbolet $\hbar$, udtalt "h-streg", betegner Plancks konstant divideret med 2π , $\hbar = h/2\pi = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ i SI-enheder. $k = \omega/c$ kaldes bølgetallet for lysbølgen. Den rumlige afhængighed af en lysbølge er typisk en sinusfunktion i stedkoordinaten, $\sin(kz)$.

Typiske værdier for synligt (rødt) lys: $\omega = 3 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\lambda = 600 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, $E_{\text{foton}} = 3.3 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2.1 \text{ eV}$, $p_{\text{foton}} = 1.1 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ er en passende enhed for energi i atom- og laserfysikken).

Atomer, I: Bohrs frekvensbetingelse

I 1913 fremsatte Bohr sin berømte atommodel, ifølge hvilken elektronerne i atomet kun kan følge helt bestemte baner. Elektronerne kan skifte baner under udsendelse eller absorption af lys, men kun hvis fotonenergien passer med forskellen mellem energierne i de tilladte baner - et kriterium kendt som Bohrs frekvensbetingelse. Ved at kræve at frekvensen af det udsendte lys ved elektronovergange mellem højtliggende baner skal stemme

overens med elektronens omdrejningshastighed om kerne, så atomet i denne grænse kan opfattes som en klassisk antenne (korrespondensprincippet), kunne Bohr endda beregne de tilladte energier (energispektret) for brint-atomet, og de passede med de eksperimentelle målinger.

Bohrs model kom senere i vanskeligheder (energini-veauerne passede nemlig ikke helt med mere præcise målinger, og det var ikke umiddelbart muligt at generalisere modellen til atomer med flere elektroner), og i 1925-26 fik vi den egentlige formulering af atomfysikken: kvantemekanikken. Kvantemekanikken er en mere abstrakt, matematisk teori, og selvom der står Schrödinger og Heisenberg på fremsættelsen af kvanteteorien, fik Bohr et flot "come back" for sin dybe forståelse af kvanteteorien konsekvenser. Også inden for den korrekte kvantemekanik har atomer et antal diskrete energitilstande, og atomerne kan udsende og absorbere stråling, hvis fotonenergien, $\hbar\omega$, svarer til en energiforskel mellem to tilstande a og b i atomet:

$$\hbar\omega = E_a - E_b, \quad \text{Bohrs frekvensbetingelse.} \quad (2)$$

Typiske energiforskelle i atomer er i størrelsesorden 1 eV svarende til lys i, eller lige uden for, det synlige område. En række laserkølingsforsøg er derfor utroligt smukke at iagttage i laboratoriet.

Bohrs frekvensbetingelse udtrykker energibevarelse. Hvad sker der med impulsen af fotonen, når den absorberes? Den bevares også i processen, og ligesom ved stød mellem kugler er det tale om en impulsoverførsel, således at atomet efter absorption af fotonen får ændret sin impuls i fotonens udbredelsesretning med netop $\hbar k$, jvf. (1). Hvis en foton *udsendes* i en eller anden retning, oplever atomet et rekyl med værdien $\hbar k$ modsat fotonens udbredelsesretning, således at den totale impuls har samme værdi som før fotonudsendelsen. Vi kan også se på en spredningsproces bestående af den sammensatte proces af en absorption fulgt af en udsendelse. Vi skal regne med vektorer, da ikke kun længden, men også retningen af impulserne er vigtige.

Vi kan omsætte impulsændringen til en hastighedsændring af atomet ved at dividere med atomets masse. Atomer indeholder 1-100 kernepartikler med massen $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, og med typiske optiske fotoner får vi hastighedsændringer mellem lidt under en cm/s og få m/s. Det er en meget bekvem skala for fysiske eksperimenter!

Atomer, II: Einsteins henfaldsrate

I 1917 publicerede Einstein en teori, hvori han bestemte den rate hvormed atomer vil absorbere fotoner fra en lysstråle, og den tid, der typisk vil gå, før en elektron i en bane med højere energi end den laveste vil henfalde under lysudsendelse.

Vi skal betegne raten for spontant henfald med det græske bogstav gamma, Γ . Talværdien af Γ angiver sandsynligheden for at der sker et henfald indenfor det næste sekund. Eller rettere: $\Gamma \cdot \Delta t$ er sandsynligheden

Melles Griot makes OPTICS, OPTO-MECHANICS, LASERS, INSTRUMENTS, *and* FIBER OPTICS



Contact Melles Griot for a fast response to your photonics needs. Our vast product selection described in our detailed product literature will provide solutions for a successful product or experiment.

Whether you need a single lens, or thousands of laser assemblies, Melles Griot is ready to deliver. From a single prototype to full-scale production, we can ship to your schedule. Melles Griot has earned a 25 plus year reputation as a quality manufacturer of optics, opto-mechanics, lasers, instruments, and fiber optics.

We have facilities in North America, Europe, and the Asia Pacific staffed with applications engineers ready to fulfill your requirements. You can reach us by phone, FAX, or the INTERNET.

From simple lenses to advanced fiber optics — Melles Griot is your *first choice* in photonics!

**Call, FAX, or E-mail us today
for your photonics solutions!**

Melles Griot Danmark

Stenagervej 13 • DK-4100 Ringsted
Phone: 53 61 50 49 • Fax: 53 61 60 49
E-mail: 101456.567@compuserve.com



■ OPTICS

- Beam Expanders
- Beamsplitters
- Coatings
- Custom OEM Optics
- Custom Optical Assemblies
- Cylindrical Optics
- Diode Laser Optics
- Filters
- Invaritar Lenses
- Lenses
- Micro Optics
- Mirrors
- Optical Design Software
- Polarizers
- Prisms
- Shutters & Irises
- YAG Lenses

■ OPTO-MECHANICS

- Breadboards
- Optical Tables & Isolators
- Opto-Mechanical Mounts
- Positioning Equipment
- Workstations

■ LASERS

- Diode Lasers & Assemblies
- Helium Neon Lasers

■ INSTRUMENTS

- Amplifiers
- Beam Position Measurement
- Beam Profilers
- Diode Laser Drivers
- Diode Laser Controllers
- Optical Spectrum Analyzers
- Power & Energy Meters
- Power Supplies
- Wavefront Analyzers

■ FIBER OPTICS

- Reflective Fiber Gratings
- Circulators
- Isolators
- Tree Couplers
- Attenuators
- Fiber Collimators

MELLES GRIOT

Canada
(613) 226-5880

France
(01) 3012-0680

Germany
(06251) 84060

Japan
(03) 3407-3614

Netherlands
(0316) 333041

Singapore
743-5884

Sweden
(08) 630-8950

Taiwan
(035) 729-518

United Kingdom
(01223) 420071

United States
(714) 261-5600

for, at et atom henfalder inden for et kort tidsinterval Δt . Hvis $\Gamma \cdot \Delta t$ ikke er meget mindre end 1, skal man benytte exponential funktionen $\exp(-\Gamma \cdot \Delta t)$ i stedet for $1 - \Gamma \cdot \Delta t$ for overlevelsessandsynligheden i tilstanden med høj energi.

Typiske værdier for Γ i atomfysikken er $10^6 - 10^8 \text{ s}^{-1}$. Levetiden i en højtliggende bane er altså ca $10^{-6} - 10^{-8} \text{ s}$.

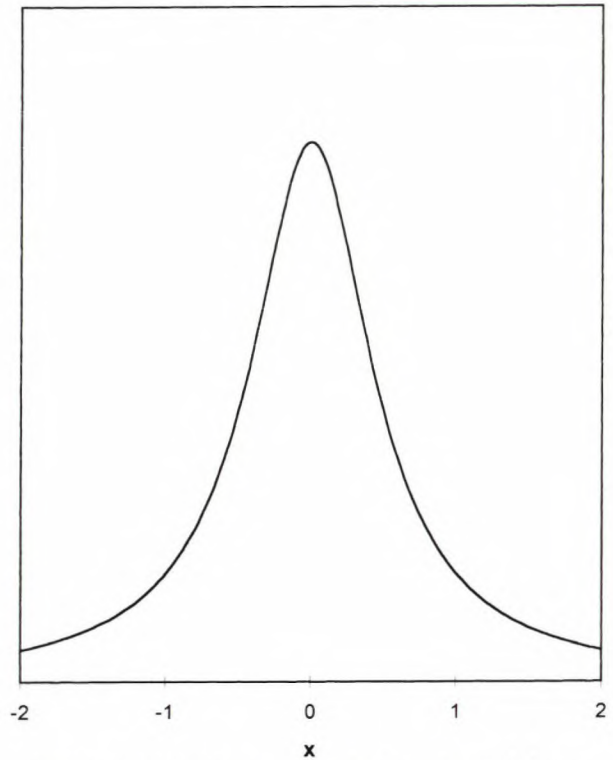
Hvis vi indsender laserlys på et atom, vil hver absorption give en impulsændring i lysstrålens retning, mens udsendelserne sker i tilfældige retninger. I gennemsnit vil udsendelserne altså ikke ændre atomets impuls, og den gennemsnitlige ændring per tidsenhed vil være absorptionsraten gange $\hbar k$ i lysstrålens retning. En impulsændring per tidsenhed er netop en kraft. Dividerer vi med atomets masse, får vi hastighedsændringen per tidsenhed, d.v.s. accelerationen. Man skulle tro, at kraften vil vokse med lysintensiteten, og det vil den også gøre indtil en vis lysstyrke. Det er nødvendigt for atomet at henfalde til den laveste tilstand før hver ny absorption og det spontane henfald med raten Γ er en flaskehals i denne proces, så den højeste kraft kan vurderes ved størrelsen $\hbar k \Gamma$. Indsætter vi typiske talværdier, får vi en maximal acceleration på $a = 10^4 - 10^8 \text{ m/s}^2$ - en betragtelig acceleration og fuldt tilstrækkelig til at manipulere atomer, hvis vi altså kan nå dette maximum.

Einstein omtalte atomernes rekyl allerede i sin artikel i 1917, men han vurderede, at de tilgængelige, meget lave lysintensiteter (korrekt i 1917 !) ikke ville give anledning til mærkbare effekter. Man skal naturligvis have indkommende lys nok. Og det indkommende lys skal opfylde Bohrs frekvensbetingelse, hvis man vil anslå atomet til en given højere liggende tilstand. Sammenfatter man Einsteins teori for henfald med Bohrs frekvensbetingelse, får man, at lysfrekvensen skal være lig med den atomare frekvens inden for en fejlmargen på Γ . Da typiske værdier for Γ er en faktor 10^7 mindre end værdierne for den optiske frekvens, ω , skal frekvensen af lyset altså have den rigtige værdi på de første 7 decimaler. Lys fra solen og almindelige lamper indeholder stort set alle farver, og af det lys er det derfor mindre end en milliontedel af fotonerne, der overhovedet kan absorberes af atomet. Laserlys er netop karakteriseret ved frekvenser, som kan bestemmes med 7 cifre eller mere, så i dag kan man opfylde frekvensbetingelsen og samtidigt have masser af fotoner.

Man kan karakterisere absorptionsratens afhængighed af lysets intensitet og frekvens mere præcist. For typiske ikke for stærke felter er absorptionsraten proportional med intensiteten, mens frekvensafhængigheden, skitseret i Fig.3, viser et maximum for $\omega = \omega_A \equiv (E_a - E_b)/\hbar$ og en hurtigt aftagende afhængighed, når den såkaldte *detuning*: $\omega - \omega_A$, bliver større end Γ .

Lorentz-funktionen i Fig.3 er iøvrigt fælles for alle svingninger med dæmpning: skub til lille Marie på gyn-gen med en lidt forkert frekvens, og se, hvordan hendes maksimale udsving (kvadreret) følger denne kurve; find P2 på en radio, hvor det er muligt at justere frekvensen meget fint, og observer, hvordan signalet er optimalt for en given frekvens, og hvordan det forsvinder, når man går

væk fra resonans.



Figur 3. Lysabsorptionsraten som funktion af lysets frekvens. Såkaldt arbitrære enheder er valgt på y-aksen - raten er typisk proportional med lysets intensitet. På x-aksen angives frekvensen ved argumentet $x = (\omega - \omega_A)/\Gamma$, som er dimensionsløst. Kurven, givet ved den matematiske form $1/(x^2 + 1/4)$, kaldes en Lorentz-funktion og beskriver generelt resonansfænomener.

Laserkøling

Temperaturbegrebet i termodynamikken er knyttet til den statistiske hastighedsfordeling af partiklerne, der udgør det pågældende fysiske system, gas, væske eller fast stof. Temperaturen er proportional med den kinetiske energi, og køling er ensbetydende med en reduktion af den kinetiske energi, d.v.s. hastighederne af partiklerne.

Vi har beskrevet, hvordan man med laserlys kan udsætte atomer for ganske betragtelige accelerationer. I 1974 blev det foreslået at gøre kraftpåvirkningen afhængig af atomernes hastigheder, så vi ikke bare accelererer gassen, men *indsnævrer hastighedsfordelingen*, så alle atomerne ender med at have en ganske lav hastighed. Det er denne proces, man kalder *laserkøling*.

Da gassen optindeligt vil indeholde atomer med alle mulige hastigheder, skal absorptionssandsynligheden variere fra at være stor for hurtige atomer til at være lille for atomer, der allerede er langsomme. Vi skal altså først give atomerne et speedometer, så de "ved", om de skal absorbere laserfotonerne eller ej.

Dopplereffekten, kølekraft

Når man passerer af en ambulance, hører man sirenens

tone blive dybere, fordi lydfrekvensen ændres, når man bevæger sig i forhold til lydkilden. Fænomenet kaldes Dopplereffekten, og det optræder også for lys. Vi kan forstå Dopplereffekten ved at tænke på en bølge, der udbreder sig henimod en modtager. Står modtageren stille, vil bølgetoppe passere forbi med frekvensen f , og er hastigheden af bølgen c og bølgelængden λ som i (1), har vi sammenhængen $c = f \cdot \lambda$. Hvis nu modtageren bevæger sig med hastigheden v i forhold til bølgen, vil flere eller færre bølgetoppe passere forbi per tidsenhed. For ikke alt for høje hastigheder skal c erstattes med $c + v$ eller $c - v$, og den frekvens, modtageren oplever, bliver derfor ændret til $f \cdot (1 \pm v/c)$. Den samme formel gælder mellem frekvenserne angivet med ω , og regner vi hastigheden med fortegn, så den er positiv for bevægelse i bølgens udbredelsesretning, kan vi skrive

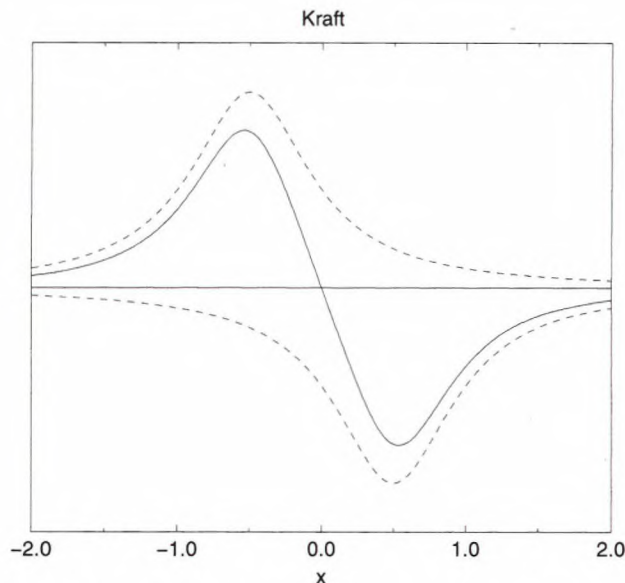
$$\omega(v) = \omega \cdot (1 - v/c) \quad (3)$$

for lysfrekvensen oplevet af atomet. Det er denne frekvens, der skal benyttes, når vi skal bestemme absorptionsraten fra en laserstråle for et atom, der bevæger sig.

Vi har nu ingredienserne til at foreslå et laserkølingseksperiment: Belys en atomar gas fra alle retninger med laserstråler med en frekvens, som er lidt mindre end den atomare overgangsfrekvens (for atomer i hvile). Et atom i bevægelse vil nærme sig en af lyskilderne og derfor opleve lyset fra denne kilde med en lidt højere frekvens iflg. (3), mens den lyskilde, som atomet fjerner sig fra, opleves med en lavere frekvens, som vi kender det for lyden fra en ambulance. For atomets absorption af lys fra de forskellige retninger har det som konsekvens, at atomet absorberer mest lys "forfra", fordi de pågældende fotoner er tættest på den atomare frekvens. Man kan bestemme kraften på atomerne som funktion af deres hastighed ved simpelthen at lægge påvirkningerne fra de forskellige stråler sammen. I én dimension er det vist i Fig.4, hvordan man blot skal tage absorptionsraterne, som vist i Fig.3, multipliceret med fotonimpulsen (regnet med fortegn i én dimension, som vektor i to eller tre dimensioner).

Det viser sig at være optimalt at vælge $\omega = \omega_A - \Gamma/2$. Så er kølekraften høj omkring de lave hastigheder og, som figuren viser, kraften er rimeligt stor for hastigheder, der opfylder $|k \cdot v| < \Gamma$. Laserkøling virker effektivt på atomer med hastigheder inden for et interval af størrelsesordenen nogle meter per sekund.

Hvis hurtigere atomer skal fanges, kan man udnytte Doppler-effekten og lade laserfrekvensen gennemløbe et interval, så man først "taler" med de hurtige atomer, som herved nedbremses, hvorefter man ændrer frekvensen, så man igen er resonant med atomerne. Nogle af de første forsøg ved lagringen ASTRID i Århus drejede sig netop om laserkøling af ioner i ringen, beskrevet i Kvant, september 1990. Man køler omkring en ønsket middelhastighed af ionerne, så de to laserstråler, der udbreder sig hhv. med og imod ionstrålen skal have forskellige frekvenser. Se Fig.5.



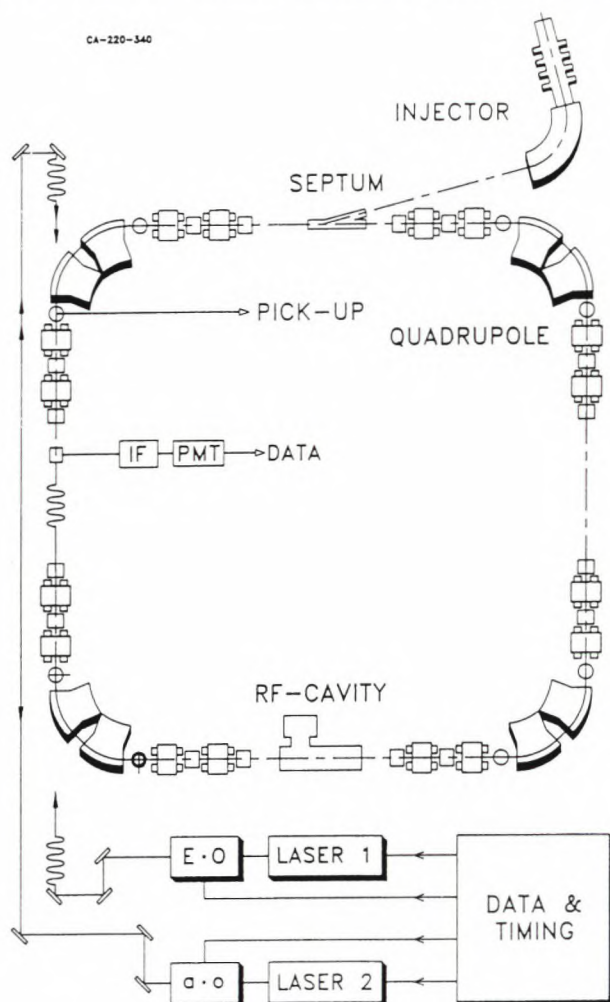
Figur 4. Den hastighedsafhængige kraft på atomer belyst fra to sider. Set fra atomet fører Dopplereffekten til en detuning $\omega \cdot v/c = kv$, og for fast laserfrekvens får man derfor en hastighedsafhængig absorptionsrate. Raterne hørende til to lasere med $\omega = \omega_A - \Gamma/2$ er vist i figuren med to stiplede kurver. Da fotonerne fra de to lasere har modsat udbredelsesretning, er den ene rate vist med negativt fortegn. Kraften på atomerne er givet ved summen af de to kurver multipliceret med $\hbar k$, og den er vist ved en fuldt optrukket kurve. På x-aksen benyttes det dimensionsløse mål for hastighed, $x = kv/\Gamma$. En værdi på $x = 1$ svarer til nogle få meter per sekund. Bemærk, at atomer i hvile ikke udsættes for nogen kraft, og at kraften for små hastigheder kan tilnærmes med en lineær funktion af v .

På grund af hastighedsspredningen ved injektionen af ionerne i ringen må man variere frekvensen af den ene laser. Som en sneplov akkumulerer lyskraften ionerne ved en hastighed, der varierer med lysets frekvens. Fordi flere og flere atomer bliver resonante med laserlyset, vokser den spontant udsendte lysintensitet, indtil atomerne ser begge laserstråler lige effektivt. Hvis ikke variationen af laserfrekvensen standses her, vil den oplevede lysfrekvens kort efter være højere end den atomare absorptionsfrekvens, og man kan overbevise sig om at kraften så får samme fortegn som hastigheden i Fig.4, så lyskraften vil ophede atomerne, og den udsendte intensitet vil falde brat, se Fig.7.

Fluktuationer og sluttemperatur

Atomer i hvile absorberer lige mange fotoner fra alle retninger og middeldkraften er nul. Men der er fluktuationer i denne kraft: enkelte absorptioner og tilfældige rekylpåvirkninger ved udsendelse af fotoner får atomerne til at flakke omkring ved lav hastighed. Der vil opstå en balance mellem kølingen og disse opvarmende fluktuationer, så gassen vil være karakteriseret ved en gennem-

snitlig kinetisk energi af atomerne. Teoretisk bestemmer vi denne energi til, ligesom kølekraften, at være en funktion af detuningen $\omega - \omega_A$. Den laveste energi opnås, ved at vælge en detuning lig med $-\Gamma/2$, og den gennemsnitlige kinetiske energi bliver her ca. $\hbar\Gamma/2$. Teorien er formuleret generelt for alle atomer, men forskellige atomer har forskellige værdier af henfaldsraten, og deres kinetiske energier bliver derfor forskellige. De tungeste atomer vil typisk kunne opnå de laveste sluthastigheder efter køling.



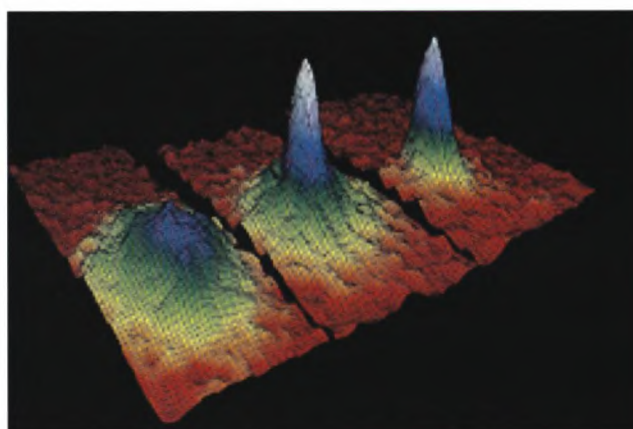
Figur 5. Skematisk tegning af ASTRID lagerringen. Nederst er vist de to lasere, der anvendes til laserkøling af ionerne, hver gang de passerer den ene rette sektion i ringen. E.O. og a.o. er optiske modulatorer, der benyttes til at tænde og slukke for laserne.

I 1985 lykkedes det en gruppe i USA, under ledelse af Steven Chu, at laserkøle neutrale atomer for første gang. I løbet af det næste par år kom der flere forsøg rundt omkring i verden, og i 1988 viste mere præcise målinger i William Phillips' gruppe, at teoretikerne havde taget fejl!

Det var en god nyhed, for Phillips' eksperimenter viste meget lavere energier end forudsagt. Fra 1988 til i dag er teorien for laserkøling blevet mere raffinet, og der kommer stadig nye forslag. Vi skal ikke her gå i detaljer, men blot nævne, at Dopplerkøling, som beskrevet ovenfor har et grovkornet speedometer for atomerne, følsomt over for hastigheder på $v \sim \Gamma/k \sim \text{få m/s}$, og at

mere avanceret atomfysik faktisk udruster atomerne med et finere speedometer. De typiske atomare hastigheder "måles" her med en nøjagtighed på nogle få gange $v_{\text{rekyl}} = \frac{\hbar k}{M} \sim \text{få cm/s}$ (se afsnit VII), svarende til at gassens temperatur er i området mellem 10^{-6} og 10^{-3} K (grader over det absolutte nulpunkt).

Claude Cohen-Tannoudji, har med sine kolleger udledt de nye relevante teorier og formuleret dem ved lettere forståelige billeder. F.eks. indførte Cohen-Tannoudji *Sisyfos-mekanismen* til forklaring af den effektive køling: i laserfeltet oplever de Dopplerkølede atomer et bakket landskab, hvor de løbende mister hastighed, når de bevæger sig op ad bakkerne. I stedet for at genvinde den tabte hastighed, når de "ruller" ned igen, kan en elektronisk overgang i atomerne føre til, at de ser landskabet i en ændret form, således at de nu befinder sig i en dal og skal til at rulle op igen - i analogi til den græske myte om Sisyfos, der hver dag måtte rulle den samme sten op ad et bjerg, hvorefter guderne lagde den tilbage i dalen, så han kunne begynde forfra. (Jeg foretrækker selv analogien til Tivoli Frihedens "Hurlumhejhus", som har en indgangstrappe, der er delt i to dele som skiftevis bevæger sig op og ned. Ved selv kun at gå fra side til side kan man derfor hele tiden bevæge sig nedad og derved miste energi.)

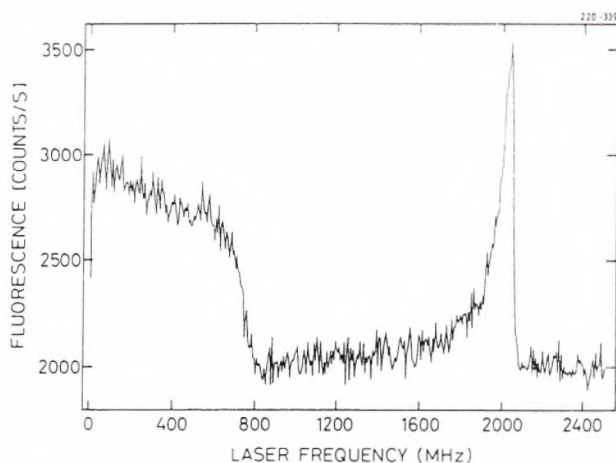


Figur 6. Figuren viser tre snap-shots af atomernes hastighedsfordeling i et af de første rubidiumeksperimenter ved JILA i Colorado, USA. Højden af bjergene angiver, hvor mange atomer, der har en given hastighed. På det første billede ses en almindelig gas, hvor hastighedsfordelingen er bred og uden struktur. På det andet billede, taget senere under fordampningskølingen, er der opstået en spids fordeling af meget langsomme atomer i midten; det er atomerne, som er kondenseret. På det tredje billede, taget endnu senere, er gassen så kold, at alle atomerne er i kondensatet, og man har kun den meget spidse fordeling.

Med Sisyfos mekanismen er den karakteristiske kinetiske energi for kølede atomer meget mindre end $\hbar\Gamma/2$. Grænsen sættes nu af de uundgåelige tilfældige rekylpåvirkninger af atomet, når det absorberer og udsender fotoner. D.v.s. typiske sluthastigheder er nogle få gange v_{rekyl} , og de kinetiske energier tilsvarende nogle få gange $\frac{1}{2} M v_{\text{rekyl}}^2$.

I 1988 demonstrerede Paris gruppen, at atomernes hastigheder endda kan gøres mindre end v_{rekyl} . Mekanis-

men kaldes, ikke særligt mundret, Velocity-Selective Coherent Population Trapping, VSCPT, og den er baseret på kvantemekanisk interferens: I spektroskopien kender man såkaldte mørke tilstande (dark states), som ikke absorberer lys, fordi absorptionssandsynligheden skyldes bidrag fra forskellige kvantemekaniske processer, som interfererer destruktivt. Den destruktive interferens fremkommer, hvis flere lavtliggende atomare tilstande drives af laserfeltet imod den samme højereliggende atomare tilstand, og Cohen-Tannoudji foreslog, at når man tager højde for atomernes bevægelse, vil de tilstande for atomerne, som ikke absorberer lys, være karakteriseret ved meget velbestemte hastigheder. Kølingsprocessen kan her beskrives som en slags "si", idet atomer, der er i den mørke tilstand vil forblive der, mens de andre vil absorbere og udsende fotoner og derfor have en chance for senere at blive fanget i den mørke tilstand. Der er ikke nogen nedre grænse for denne type køling, men for at opnå et givet antal atomer med en fastsat højeste hastighed kan man blive nødt til at køle meget længe. Steven Chu har vist, at man kan opnå en tilsvarende situation med pulserede lasere.



Figur 7. Intensiteten af det udsendte lys fra en $100 \text{ keV } ^7\text{Li}^+$ ionstråle under laserkøling. Intensiteten måles af fotomultiplieren, vist inde i ringen i Fig.5 (IF-PMT → DATA). Frekvensaksen angiver ændringen af den ene frekvens fra værdien ved injektionen af ionerne. Frekvensen ændres med en hastighed på 625 MHz/s , hvorfor akse samtidigt er en tidsakse, der begynder ved injektionen og slutter 4 sekunder senere. Det bratte fald i intensitet efter godt et sekund skyldes tab af ioner som følge af fordelingen af energi mellem bevægelse på langs og på tværs af ionstrålen efter injektionen. Det er i de sidste 2/3-dele af figuren at ionernes energi kontrolleres af laserkølingsprocessen.

En laserkølet gas "hænger" i nogle laserfelter uden at være i ligevægt med sine omgivelser, og derfor kan gassens temperatur være en milliard gange lavere end den beholder og det laboratorium, eksperimentet foregår i. Gassen er også meget koldere end det ydre rum, som har en temperatur på omkring 3 K; det er altså ikke helt forkert at tale om verdens koldeste gas i disse eksperimenter. En anden ting er så, at gassen egentligt ikke kan betegnes som et system i termodynamisk ligevægt, og at temperaturbegrebet ikke helt kan anvendes. Det

viser sig dog, at hastighedsfordelingen næsten har samme form som for gasser i sædvanlig termodynamik, og det er derfor meningsfyldt at benytte termodynamikkens relation mellem temperatur og kinetisk energi,

$$\frac{3}{2}k_B T = \overline{\frac{1}{2}M\vec{v}^2}, \quad (4)$$

hvor højre side er middelværdien af atomernes kinetiske energi, og hvor $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ er Boltzmanns konstant, som igen er lig med gaskonstanten R divideret med Avogadros tal.

Fælder for neutrale atomer

Ved hjælp af elektriske og magnetiske felter kan man indfange elektrisk ladede partikler, elektroner og ioner. Et af eksperimenterne ved IFA beskæftiger sig netop med køling af fangede ioner, både i små fælder og ved Instituttets lagerringsaccelerator ASTRID.

Midt i 1980'erne blev det foreslået at benytte principperne for laserkøling til også at indfange neutrale atomer og fastholde dem lokaliseret i rummet. Den *magneto-optiske fælde* udnytter, at atomer i magnetfelter får forstyrret deres energi-niveauer (fordi elektronerne i Bohrs "baner" følger magnetfelterne). Derved ændres de karakteristiske atomare energiforskelle og dermed Bohrs frekvensbetingelse for absorption af lys. Ved at gøre magnetfelternes retning og styrke rumligt afhængige får man, at atomerne vil absorbere mere eller mindre lys, afhængigt af hvor de opholder sig. På den måde kan kølekraften også blive en stedafhængig kraft, som kan lokalisere atomerne.

Mere end hundrede laboratorier i verden har i dag en magneto-optisk fælde. På forsiden af dette nummer af Kvant ses et billede af den magneto-optiske fælde i Kvantoptik-gruppen ved Aarhus Universitet. I fælden studeres i øjeblikket absorptionsprocesser, hvor kølede cæsium-atomer gennem absorption af to fotoner anslås fra grundtilstanden via et intermediært niveau til en højtliggende tilstand. Fotonerne har en frekvens udenfor det synlige område, og normalt kan laserkølede cæsium-atomer ikke ses med det blotte øje, men på grund af en direkte henfaldsmekanisme fra det øverste niveau tilbage til grundtilstanden under udsendelse af blå lys, bliver den kølede gas synlig i dette forsøg. Kvantoptik-gruppen er ikke specielt interesseret i laserkøling, men de lave hastigheder af atomerne giver ideelle betingelser for studiet af vekselvirkningen med lysfelterne.

Anvendelser af kolde atomer

Kolde atomer har mange anvendelser, både inden for grundforskningen og af mere teknologisk karakter.

I kemien og fysikken er det vigtigt at forstå, hvordan atomer og molekyler vekselvirker med hinanden. I store afstande følger neutrale atomer fx en meget svag tiltrækningskraft proportional med $1/R^7$ ($1/R^8$ ved endnu større afstande), hvor R er den indbyrdes afstand. Disse kræfter har størst betydning, når atomerne bevæger sig



Vacuum Generators NEW 'TRANSAX' bridges gap

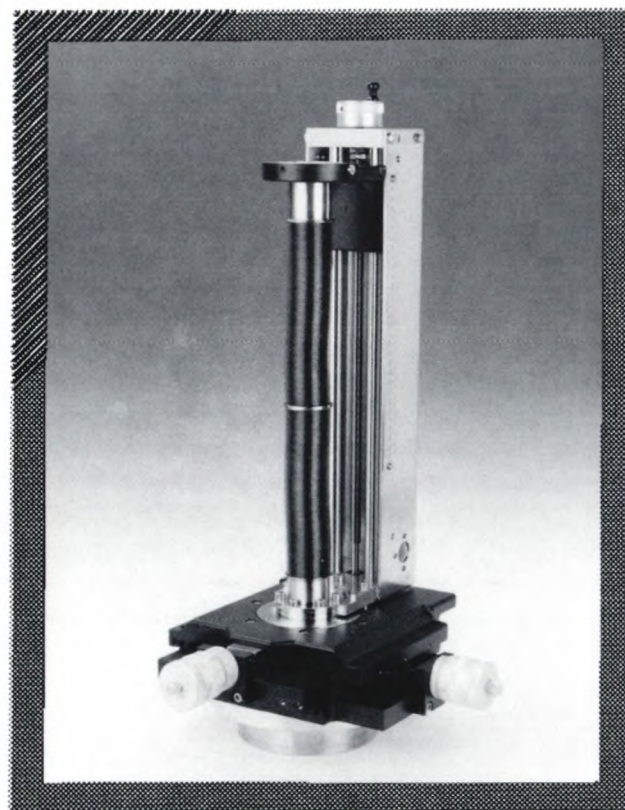
Vacuum Generators has introduced the TRANSAX^{XYZ} translator to bridge the gap between their user friendly HPT and the very high stability Omniax. The Transax is a fully UHV compatible double bellows translator constructed following the principle of the Omniax but providing a more cost effective solution where large capacity and extreme stability are not necessary. The basic Transax combines a linear Z-slide with an XY-table joined by a rigid interface that eliminates strain from the mating flanges of the Z-slide.

The design is thermally matched to allow repeated bakeout to 230°C in any orientation and has a support and guidance system that stabilises the sample and damps vibrations. Available with three standard Z travels with X and Y movements up to ± 25 mm the Transax is designed to accept the RD1 and RD2 rotary drives offered by Vacuum Generators and their range of sample handling equipment instrumentation and motorisation options.

For further information please contact Jonas Fång at

Thermo Instruments Nordic AB,

Gårdsfogdevägen 16, S-168 66 BROMMA, Sweden.
Tel. +46-8-629 24 00 Fax. +46-8-627 52 20, e-mail: jonasf@thinab.se



meget langsomt i forhold til hinanden, og det har fornyligt været muligt at "samle" laserkølede atomer til meget udstrekte og meget løst bundne molekyler.

Laserkøling kan også benyttes til at sortere atomare isotoper med forskellige absorptionsfrekvenser og til at opbevare særligt kostbare atomer, som måske kun kan produceres i meget ringe mængder.

Atomere ved stuetemperatur bevæger sig med hastigheder på flere hundrede meter per sekund, så hvis man vil studere det samme atom i længere tid, er det en fordel at få hastigheden bragt ned. At "studere" et atom betyder ofte at måle dets energiniveauer ved at bestemme frekvensen af lys der absorberes eller udsendes. Her kommer Doppler-effekten på banen igen og gør, at vi med kolde atomer kan måle disse frekvenser meget mere præcist. Lang måletid (mange svingninger) er i øvrigt også en forudsætning for at kunne bestemme frekvenser præcist.

Med den spektroskopiske opløsningsevne, kolde atomer giver, er det muligt at undersøge atomfysiske fænomener med meget stor præcision. Der er relativistiske, kerne- og partikelfysiske fænomener, der studeres i astrofysikken og på de store acceleratoranlæg, som har mikroskopiske effekter i atomer ved lave energier "på 12. ciffer i en absorptions-frekvens", og som derfor kan studeres med laserkølede gasser.

Ultrapræcise frekvensmålinger har også teknologiske anvendelser. Faktisk er det i dag sådan, at tids-

og længdeenhederne er *definerede* ud fra atomfysikken, således at ét sekund svarer til præcist 9.192.631.770 elektromagnetiske svingninger resonant med en bestemt overgang i cæsium-atomet. Man bruger altså målingen af denne frekvens til at kalibrere sine ure (i en håndfuld primære tidslaboratorier rundt om i verden). De herved kalibrerede og meget præcise ure danner grundlag for radiosignaler, som man overalt kan benytte til synkronisering, fx af en type ure, som man kan købe hos de fleste urmagere idag. Mens det nok ikke kommer sig så nøje om et vækkeur eller armbåndsur passer ned til 10^{-8} sekund, er denne tidsskala interessant for radioastronomi, satellit-navigation, telekommunikation og meget andet godt og skidt. Cohen-Tannoudji's gruppe har et cæsiumeksperiment, som de foretager i en flyvemaskine under 1.5 km frit fald - de opnår herved vægtløshed, og undgår at atomerne "falder ud af laserstrålerne". Forsøgene er en del af forstudierne til at anbringe laserkølingsopstillinger i satellitter, hvor de kan danne grundlag for meget præcise atomure.

Lyshastigheden har i dag en defineret værdi i antal meter per sekund, så med den ovenfor anførte fastlæggelse af varigheden af et sekund, får man også fastlagt længden af en meter udfra optik og atomfysik. Dansk industri stod på et tidspunkt til at miste kontrakter, fordi man ikke havde en laserbaseret længdestandard, så producenter kunne give den korrekt certificerede garanti på, at de holdt målene. Det kan de nu. William Phillip's forskningsgruppe hører i

øvrigt under det amerikanske handelsministerium !

Med laserstråler kan man ikke kun køle, men også styre atomers bevægelse ved design af specielt nyttige potentialer i form af "gitre", "spejle" og "tragte" af lys. Man kan f.eks. skrive med chrom-atomer på overflader og på den måde "trække ledninger" i mikroskopiske strukturer.

Det er ikke kun den indre bevægelse af elektronerne i atomerne, der skal beskrives kvantemekanisk. Atomerne skal også selv håndteres som bølger, selv om vi i teoriasnittet ovenfor benyttede en simplere klassisk formulering. Når atomernes ydre bevægelse bliver beskrevet ved bølger, fremkommer der interferenseffekter, som man kender dem for vand-, lyd- og lysbølger. Forsøg med atombølger udføres bedst med kolde atomer, fordi atombølgens udstrækning er omvendt proportional med atomets hastighedsspredning, $\delta x \cdot \delta p \sim \hbar$, d.v.s. kolde atomer er mest bølgeagtige og mindst partikelagtige. Når atombølger rammer laserfelter, bliver de styret i flere retninger på samme tid, og hvis bølgekomponenterne genforenes, kan man ud fra interferensmønstret meget detaljeret lære om de påvirkninger, atomerne har været udsat for undervejs.

Man har på den måde målt elektriske og magnetiske felter med stor præcision (og man har meget præcist bestemt styrken af atomers vekselvirkning med sådanne felter). Steven Chu har foretaget meget præcise målinger af tyngdekraften på et atom og målt tyngdeaccelerationen $g = 9.8...m/s^2$ med så stor præcision, at man seriøst planlægger at lave en miniudgave af forsøget, som kan fires ned i borehuller og måle variationer i den lokale værdi og retning af tyngdekraften. Herved bestemmes variationer i massetætheden og muligheden for forekomster af mineraler og olie.

Bose-Einstein-kondensering

Efter årelange internationale anstrengelser blev brugen af laserkøling det afgørende skridt, så det i 1995 lykkedes for tre uafhængige forskergrupper at observere Bose-Einstein-kondensering i kolde atomare gasser. Bose-Einstein kondensering blev foreslået teoretisk i 1925 ved en kombination af ideer af Albert Einstein og den indiske fysiker Satyendra Nath Bose.

Hvad er et Bose-Einstein-kondensat ?

I kvantemekanikken beskrives partikler som bølger, hvis rumlige udstrækning er omvendt proportional med deres impuls. Når en gas af atomer køles meget langt ned, kan bølgerne blive mere udstrakte end afstanden mellem de enkelte atomer, og en del af gassens atomer må beskrives ved den samme bølge - de er i den samme kvantemekaniske tilstand. En sådan samling af atomer, som alle er i den samme kvantemekaniske tilstand, kaldes et Bose-Einstein-kondensat. I modsætning til damp, der kondenserer på en kold overflade (kondensvand), fordi molekylerne tiltrækker hinanden skyldes Bose-Einstein-kondensering ikke en tiltrækning mellem atomerne, og kondensatet er da heller ikke karakteriseret ved at atomerne klumper sig sam-

men. Tværtimod er den fælles kvantetilstand for de mange atomer meget udstrakt i rummet (i forsøgene næsten op til 1 mm).

Bose-Einstein-kondensering vil ikke finde sted for alle partikler, hvis de køles ned. Partikler er opdelt i to grupper: fermioner og bosoner. Det er forbudt at have mere end én fermion i samme kvantemekaniske tilstand. Elektronen er en fermion, og forbudet kender vi som udelukkelsesprincippet i atomfysikken, der gør, at flere elektroner ikke må være i samme tilstand i et atom. De lægger sig uden på hinanden i skaller. Neutroner og protoner er også fermioner, og man har også skalstrukturer i atomkerner. Fotonen er en boson, bosoner elsker at være i samme tilstand (og de må godt), og det er derfor, man kan lave en laser, hvor alle fotonerne kommer ud i samme retning med samme frekvens. Atomer er enten bosoner eller fermioner: hvis antallet af protoner plus neutroner plus elektroner i atomet er ulige, er atomet en fermion, er tallet lige, er atomet en boson. Det er bosoners tilbøjelighed til at være i samme tilstand, der fører til Bose-Einstein-kondensering.

Det er svært at lave et Bose-Einstein kondensat, fordi kravene om høj tæthed og lav temperatur normalt vil føre til almindelig kondensering først: gassens atomer finder sammen i molekyler og dråber, og til sidst har man bare en væske i bunden af sit apparat. Løsningen er at have en meget tynd gas (lav tæthed) og gå til *meget* lav temperatur og så håbe, at den tid det tager gassen at blive væske, er længere end den tid, det tager at lave et Bose-Einstein-kondensat. Det lykkedes i 1995. Der er indtil i dag (oktober 1997) ialt 7 grupper, der har været i stand til at lave Bose-Einstein-kondensater. En af dem ledes af Lene Hau, som fik sin fysikuddannelse ved Aarhus Universitet, og som i dag arbejder ved Rowland Institutet i Boston.

Forsøg med Bose-Einstein kondensering

I de grupper, der har kondenseret atomer, er strategien følgende:

- Man laserkøler, så man får en kold gas med mange atomer (rubidium, natrium eller lithium). Atomernes hastigheder er lidt højere end rekyl-hastigheden v_{rekyl} , og det er for varmt !
- Man slukker nu for laserne, så atomerne ikke modtager flere tilfældige fotonrekylpåvirkninger, og man benytter herefter en teknik, kaldet *fordampningskøling*: Lader man en kop kaffe stå i kort tid, køles den ned fra kogepunktet til stuetemperatur. Denne nedkøling skyldes fordampning, idet det hele tiden er de hurtigste (varmeste) molekyler, der forlader væsken, så gennemsnitstemperaturen af de tilbageblevne molekyler falder. Kølingen er meget effektiv: ved at miste ca. 2 % molekylerne kan kaffen slippe af med ca. 20 % af sin temperatur målt i Kelvin (det er også derfor, sprit føles koldt på huden: spritten bliver faktisk kold i takt med, at den fordamper). Kan man få fordampningen til at fortsætte, kan man nå meget lave temperaturer.
- De laserkølede atomer holdes i et magnetisk poten-

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



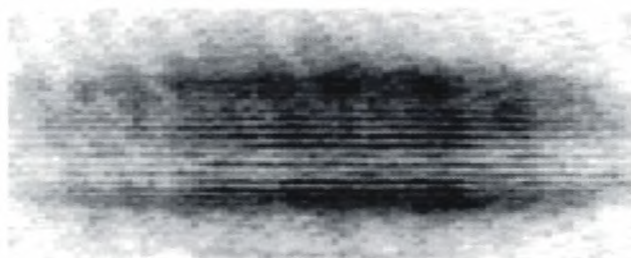
SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved højt tryk eller med aggressive gasser. Med en frekvensregulering kan pumpehastigheden fordobles, så man f.eks. hurtigt kan evakuere et anlæg og derefter anvende pumpen som holdepumpe ved lav hastighed. SASKIA's kemisk resistente membran-pumper har liniærdrevne membraner, hvilket sikrer en lang levetid og lavt effektforbrug. En membranpumpe på ca. 30 W kan med de store afgifter på brugsvand hurtigt tjene sig ind, hvis den erstatter en vandstråle-pumpe. SASKIA's TOWER pumpestande er kemipumpestande kombineret med kondensatorer og med instrumentering for indstilling af trykket. SASKIA leverer oliefri pumpestande kombineret med turbomolekularpumper i et handy design og rootspumpestande op til 20.000 m³h⁻¹.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

**WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93**

tial, hvis højde gradvist sænkes, så de "varmeste" atomer damper af. Fordi man starter tilstrækkeligt langt nede i temperatur og med tilstrækkeligt mange atomer, er det muligt at nå Bose-Einstein-kondenseringsbetingelsen og stadig have atomer til overs (ca. en million i eksperimenterne med rubidium og natrium, noget mindre for lithium).

For at kunne studere kondensaternes opførsel har det været nødvendigt at anvende forskellige detektionsprincipper. Bjerg-landskaberne i Fig.6 blev optaget ved at slippe kondensatet fri, og se hvordan atomerne fordelte sig i rummet efter en vis tidsforsinkelse. Herved ødelagde man altså kondensatet for hvert billede. Man kan ikke detektere atomernes position ved at lade dem absorbere og udsende lys, fordi rekyl-hastigheden ved blot en enkelt foton-absorption og -emission vil være stor nok til at slå atomerne ud af kondensatet. I stedet benyttes lys langt fra den atomare overgangsfrekvens, som ikke absorberes, men som alligevel oplever et faseskift under passage af kondensatet. Kondensatet optræder som et gennemsigtigt materiale (som glas) med et brydningsindex proportionalt med den lokale atomare tæthed. Faseskiftet kan nu måles forskellige steder på tværs af laserstrålen, og man får derved et billede af kondensatet. Ved MIT i Massachusetts kan man tage et billede for hver 50 ms, altså 20 billeder i sekundet, uden at ødelægge kondensatet, og på den måde kan man filme svingninger og udbredelse af lydbølger i kondensatet.



Figur 8. Figuren viser atomernes tæthed, når to Bose-Einstein-kondensater overlapper hinanden i rummet. Begge kondensater er uden indre struktur, men på grund af kvanteinterferens bliver tætheden moduleret i rummet. Billedet er optaget ved MIT med den ikke-destruktive fase-skifteteknik.

Hvad sker der i øjeblikket ?

Teoretikere og eksperimentalfysikere har siden 1995 undersøgt mange egenskaber ved Bose-Einstein-kondensaterne. Man kan på mange måder betragte lyset i en laser som et Bose-Einstein kondensat af fotoner, og et interessant projekt er at lave en "atom-laser", d.v.s. et apparat, som udsender en stråle af atomer, der ligesom fotonerne i en laserstråle alle har samme energi og bevægelsesretning. For nogle af de anvendelser af neutrale atomer, vi diskuterede i det foregående afsnit, vil en atom-laser måske byde på fremskridt af samme betydning, som laseren har gjort det i optikken. Den første atom-laser,

hvor et Bose-Einstein kondensat af natrium-atomer blev "tappet" for atomer, blev lavet i efteråret 1996, men der er stadig lang vej til et apparat med laserens gode egenskaber.

Et andet eksperiment, som illustrerer Bose-Einstein-kondensatets mere eksotiske egenskaber, er også blevet udført med natrium i 1996. I kvantefysikken beskrives partiklernes bevægelse ved bølger. Det gør den som bekendt ikke i den klassiske fysik, og når det ikke fører til nogen modstrid, er det fordi kvantemekanikken beskriver den mikroskopiske verden og den klassiske fysik den makroskopiske - vi er normalt ikke i tvivl om, hvilken beskrivelse der skal benyttes. Når nu millioner af atomer alle er i samme kvantetilstand, får vi et (næsten) makroskopisk system, som skal beskrives kvantemekanisk.

En af bølgelærens fremtrædende effekter er interferens. Under den korte beskrivelse af atominterferometri diskuterede vi, hvad interferens indebærer for enkelte atomer, der skilles og samles. Man har på tilsvarende vis ladet to kondensater med natriumatomer mødes. Og når man ser på den rumlige fordeling af atomerne i det område, hvor kondensaterne mødes, ser man tydelige interferensstriber: selv om de to kondensater hver for sig er uden struktur, er atomernes tæthedsfordeling moduleret med tydelige maksima og minima. På samme måde som interferens mellem fx to dybe nabotoner på et klaver (stødtoner) ikke skyldes, at strengene vekselvirker med hinanden, er interferensen i Fig.8 ikke udtryk for atomernes vekselvirkning, men en ren bølgeeffekt.

Afslutning

Laserkøling, som beskrevet ovenfor, er et felt med en meget hurtig historisk udvikling. De teoretiske ideer blev fremsat i 1970'erne. De første eksperimenter fandt sted i 1980'erne. Og allerede nu i 1990'erne har laserkøling i nogen grad mistet status som et forskningsemne i sig selv og er i stedet blevet en teknik til at skabe atomare systemer med ønskværdige egenskaber. Takket være udviklingen af lasere og atomfysikudstyr er det, der var umuligt for blot 10 år siden, nu hver fysikers eje, men det forhindrer naturligvis ikke, at der stadig kommer nye forslag og ideer.

Der er mange anvendelser af laserkølede atomer både i grundforskningen og i teknologien. Om udviklingen af Bose-Einstein-kondensaterne vil blive lige så hurtig og omfattende, og om kondensaterne med tiden vil vise sig lige så universelt anvendelige, må tiden vise.

Appendix. Taleksempler og historier bag køling af forskellige atomer

Man har til dato laserkølet mange forskellige ioner og atomer. Vi giver nedenfor nogle eksempler. Sammen med en lille historie om det enkelte system angiver vi $v_{rekyl} = \hbar k / M$, atomets hastighedsændring ved absorption af en enkelt foton. Med laserkøling kan man reducere atomernes hastigheder til nogle få gange v_{rekyl} og i visse tilfælde endda mindre endnu.

H, brint, det letteste grundstof. Brint absorberer kun fotoner med en meget høj frekvens og kræver derfor helt speciel laserteknologi. Fordi brint er så let, får det også et ordentligt spark ved absorption af en enkelt foton og har den største rekylhastighed blandt vores eksempler. $v_{rekyl} = 3.3$ m/s.

He, helium. Helium absorberer normalt kun fotoner med en så høj frekvens, at vi slet ikke har brugbare lasere til køling af helium. Man benytter så et trick til at anbringe helium atomerne i en højtliggende tilstand og laserkøler derefter ved absorptionsprocesser herfra til en nærtliggende tilstand, $v_{rekyl} = 0.9$ m/s.

Li, lithium. Lithium-ionen er blevet laserkølet ved lagringen i Århus, se Fig.5 og 7. Vi giver derfor de relevante tal for ionen og ikke for det neutrale lithium atom. Ligesom helium må lithium køles ved processer mellem højtliggende tilstande. $v_{rekyl} = 11$ cm/s.

Ne, neon. Neon køles med lys af den smukke, røde farve kendt fra helium-neon laseren i ethvert fysiklokale. Det første laserkølingseksperiment i Århus var med neutrale, hurtige neon-atomer. $v_{rekyl} = 3.1$ cm/s.

Na, natrium. Natrium var det første laserkølede atom (1985). Det er også et af de tre atomer, der er blevet Bose-Einstein kondenseret. I kondensationseksperimenter måles temperaturer ned til 0.2 nK (0.2 milliardtedel Kelvin), væsentligt under rekyl-kølegrænsen. Laserkøling suppleres her med en ekstra køleteknik. $v_{rekyl} = 3$ cm/s.

Mg, magnesium. Magnesium ionen køles i Aarhus, både i lagerringen og i fælder. Parametrene er for magnesiumionen $v_{rekyl} = 6.5$ cm/s.

Rb, rubidium. Rubidium var det første atom, der blev Bose-Einstein kondenseret først på sommeren 1995. Se Fig.6. $v_{rekyl} = 0.6$ cm/s.

Cs, cæsium. En bestemt overgang i cæsium tjener i dag som international tids- og længdestandard, og det er derfor særligt interessant at kunne køle cæsium. Forsidebilledet af Kvant er et fotografi af laserkølet cæsium i Århus. $v_{rekyl} = 0.35$ cm/s.

Fr, francium. Francium er et radioaktivt stof, der fremkommer i meget små mængder under en kernereaktion. En af franciums isotoper har en levetid på 3 minutter, hvilket er rigeligt til laserkøling. $v_{rekyl} = 0.26$ cm/s.

Referencer:

- 1) *New mechanisms for laser cooling* af Claude Cohen-Tannoudji og William D. Phillips i Physics Today, Oktober 1990, s.33, beskriver i nogen detalje de nye mekanismer, der forklarer køling under Dopplergrænsen.
- 2) *Laser trapping of neutral particles* af Steven Chu i Scientific American, februar 1992, s49, beskriver Doppler køling, nogle eksperimentelle finurligheder omkring frekvensmålinger, og lidt om anvendelser af den optiske pincet i biologi.

- 3) *Atomic physics in ion traps* af Christopher Monroe og John Bollinger, Physics World, marts 1997, s.37, beskriver forsøg med laserkølede ladede ioner. Forfatterne beskriver specielt bølgeaspekter af ionernes bevægelse, og de diskuterer også fremkomsten af strukturer i fælder med mange ioner.
- 4) *Bose-Einstein condensation* af Christopher Townsend, Wolfgang Ketterle og Sandro Stringari i Physics World, marts 1997, s. 29, fortæller om den seneste udvikling i Bose-Einstein-kondensering.
- 5) <http://www.lightforce.harvard.edu/lightforce/> er hjemmeside for et "consortium" af førende grupper, der arbejder med "light force dynamics". De har pædagogiske artikler om laserkøling, optiske pincetter, indfangning af neutrale atomer, atomlitterografi og -interferometri og masser af links og referencer.
- 6) <http://www.nobel.se> indeholder biografier for de tre Nobelprisvindere i Fysik, 1997, og beskrivelser af deres konkrete bidrag til udviklingen af laserkøling.

- 7) <http://bink.mit.edu/dallin/nat.html> indeholder en smuk præsentation af Bose-Einstein kondenseringsforsøgene med natrium ved MIT, USA. På video-sekvenser kan man se svingninger og en atom-laser, der udsender pulser af atomer.
- 8) <http://JILA.V1.COLORADO.EDU/bec/> er JILA-hjemmesiden, hvor Bose-Einstein-kondenseringsforsøgene med rubidium er godt beskrevet, og der er masser af links til yderligere information.



Klaus Mølmer er lektor i teoretisk atomfysik ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.



Anvendelse:

- ★ Kvalitetskontrol
- ★ Forskning og udvikling
- ★ Analyseudstyr
- ★ Høj -og ultrahøjvakuum

Læksøger på heliumbasis

Hvilke krav stilles der?

- ★ Hurtig
- ★ Nem og entydig betjening
- ★ Oliefri indsugning
- ★ Robust
- ★ Enkelt service
- ★ Prisbillig

Leybold ApS
Roskildevej 342A
2630 Tåstrup
Tlf.: 43996444
Fax: 43996544

