

KVANT November 3 1997

Fysisk Tidsskrift

8. årgang



- KOLDE ATOMER • NOBELPRISEN I FYSIK • VEJRET I RUMMET •
- FYSIKKENS IMAGE OG SELVFORSTÅELSE • JENS LINHARD IN MEMORIAM •

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

c/o Ørsted Laboratoriet
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Telefax : 35 32 04 60
E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab

Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Mads Hammerich (ansv.)
Experimentarium
Britt Larsen (annoncer)
Torsten Freltoft
NKT Research Centre
Jørgen Friis Bak
Naturvidenskabeligt fakultet, ÅU
Jørn Christiansen
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

KVANT udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år (i Danmark).

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og gælder for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til Britt Larsen, NKT Research Centre, telefon 43 48 35 00, telefax 43 63 00 99.

Oplag: 2000

Tryk: P.J.Schmidt, Vojens
ISSN 0905-8893

Indhold:

Kolde Atomer

Klaus Mølmer 1
Nobelprisen for 1997 blev tildelt tre pionerer indenfor laserkøling- og indfangning af atomer. Hvad der for ti år siden var et frontemne i eksperimentalfysikken er allerede blevet almindeligt tilgængeligt i mange laboratorier. Forfatteren gennemgår teknikken og dens anvendelser.

Fysikkens image og selvforståelse

Bent Jørgensen 13
I serien om fysikinstitutionernes syn på fysikkens stilling i Danmark lige nu, er vi kommet til de mindre fysikinstitutioner. Bent Jørgensen fra RUC melder ud i anledning af Dansk Fysisk Selskabs 25 års jubilæum.

Jens Linhard: Takketale for Ørsted medaljen

Jens Linhard 15
Med den triste anledning at Jens Linhard er død, bringer vi hans takketale for Ørstedmedaljen.

Vejrforudsigelser i det ydre rum

Hans Pécseli 18
Kan man overhovedet tale om "vejr" når trykket er en picobar? Og hvis man kan; hvad vedkommer det så os på Jorden? Forfatteren svarer ja til første spørgsmål og viser at vejret i rummet har konsekvenser for flere livsnerver i et højteknologisk samfund.

Mindeord om Jens Linhard

Jens Ulrik Andersen og Ejvind Bonderup Bagsiden

Forsiden:

Der skal færre og færre atomer til for at få Nobelprisen!

Her vises eksperimenter med laserkølede cæsium atomer. På billedet ses ind i den magnetooptiske atomfælde som benyttes af kvanteoptikgruppen ved Aarhus Universitet. Det blå lys stammer fra atomer der har absorberet to fotoner og nu henfalder til grundtilstanden.

Læs artiklen side 1.

Kolde Atomer

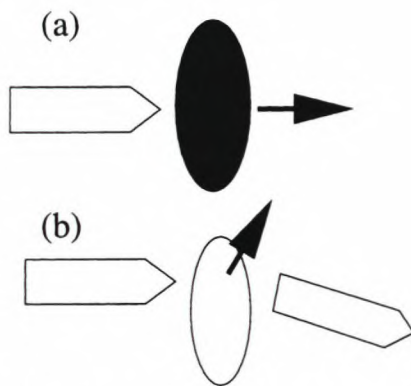
Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

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.

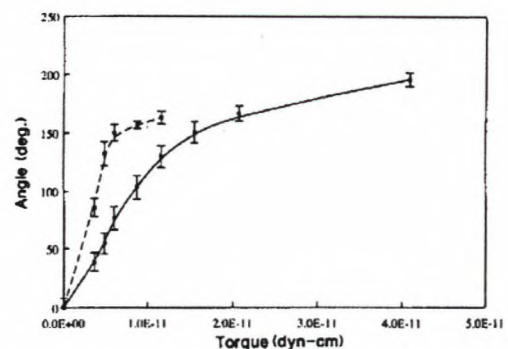
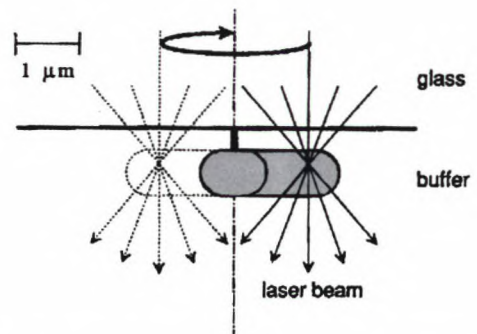


Figur 1. Impulsen i en lysstråle kan overføres 100 %, hvis strålen absorberes fuldstændigt af et legeme (a). Hvis strålen afbøjes, fx i en linse, vil kravet om impulsbevarelse medføre, at linsens impuls ændres i retning af vektorforskellen mellem den indkommende og den udgående lysstråle (b).

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 bølglængde, 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 bølglængde). 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

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 $10^{-6} - 10^{-8} \text{ s}$.

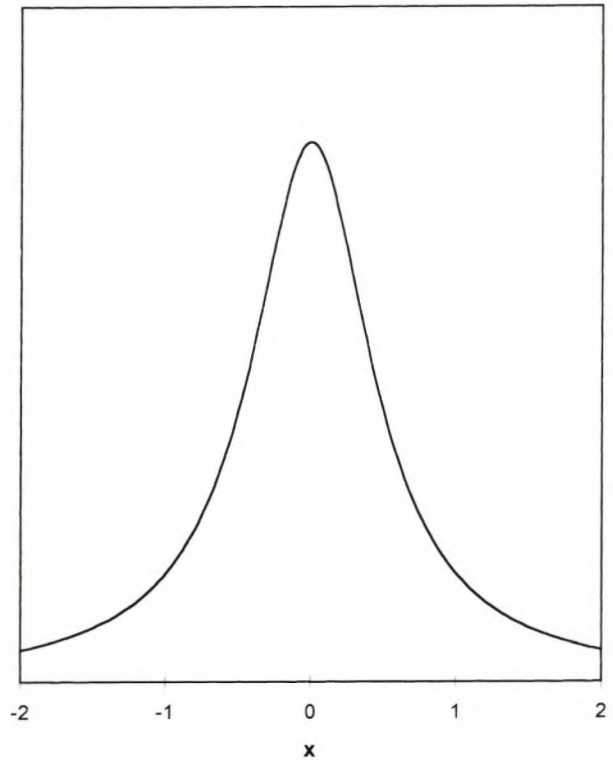
Hvis vi indsender laserlys på et atom, vil hver absorption give en impulsændring i lysstrålens retning, mens udsendelserne sker i tilfældige retninger. I gennemsnit vil udsendelserne altså ikke ændre atomets impuls, og den gennemsnitlige ændring per tidsenhed vil være absorptionsraten gange $\hbar k$ 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 sirenen

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

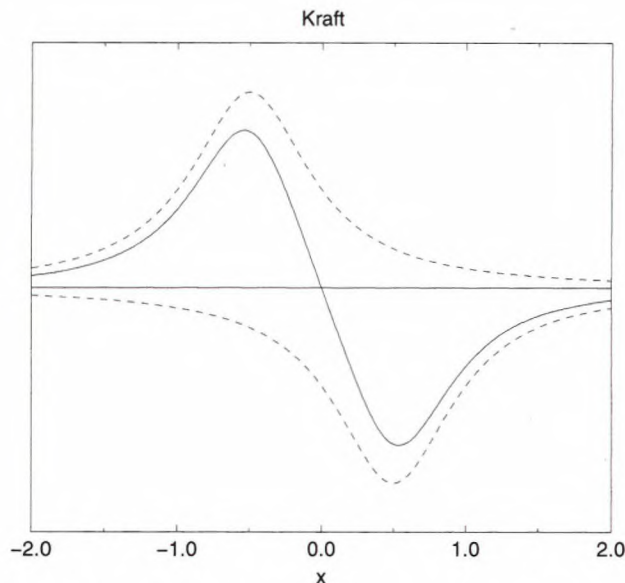
$$\omega(v) = \omega \cdot (1 - v/c) \quad (3)$$

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.



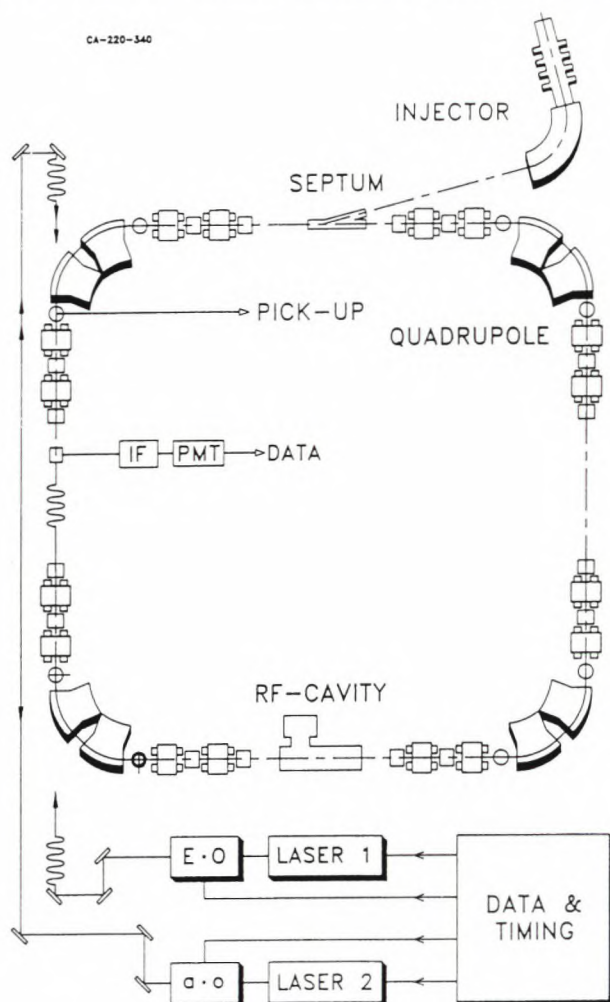
Figur 4. Den hastighedsafhængige kraft på atomer belyst fra to sider. Set fra atomet fører Dopplereffekten til en detuning $\omega \cdot v/c = kv$, og for fast laserfrekvens får man derfor en hastighedsafhængig absorptionsrate. Raterne hørende til to lasere med $\omega = \omega_A - \Gamma/2$ er vist 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 middelmakten 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.



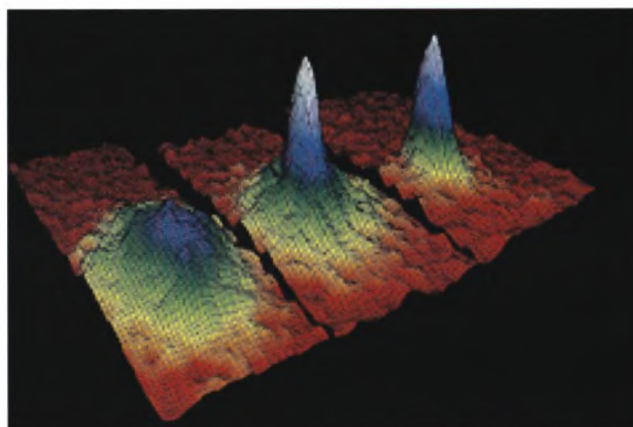
Figur 5. Skematisk tegning af ASTRID lagerringen. Nederst er vist de to lasere, der anvendes til laserkøling af ionerne, hver gang de passerer den ene rette sektion i ringen. E.O. og a.o. er optiske modulatorer, der benyttes til at tænde og slukke for laserne.

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.)

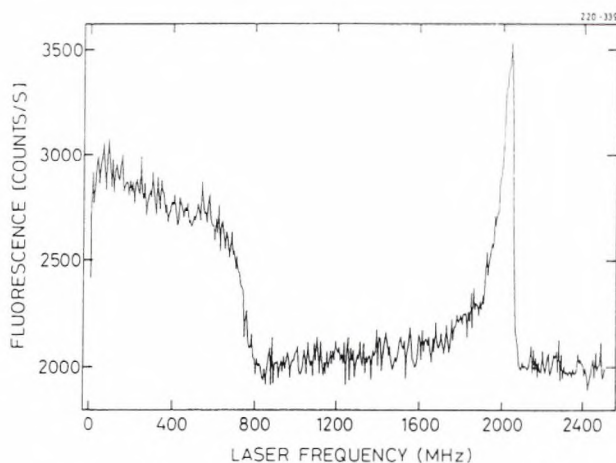


Figur 6. Figuren viser tre snap-shots af atomernes hastighedsfordeling i et af de første rubidumeksperimenter ved JILA i Colorado, USA. Højden af bjergene angiver, hvor mange atomer, der har en given hastighed. På det første billede ses en almindelig gas, hvor hastighedsfordelingen er bred og uden struktur. 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 samtidig 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 blått 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.

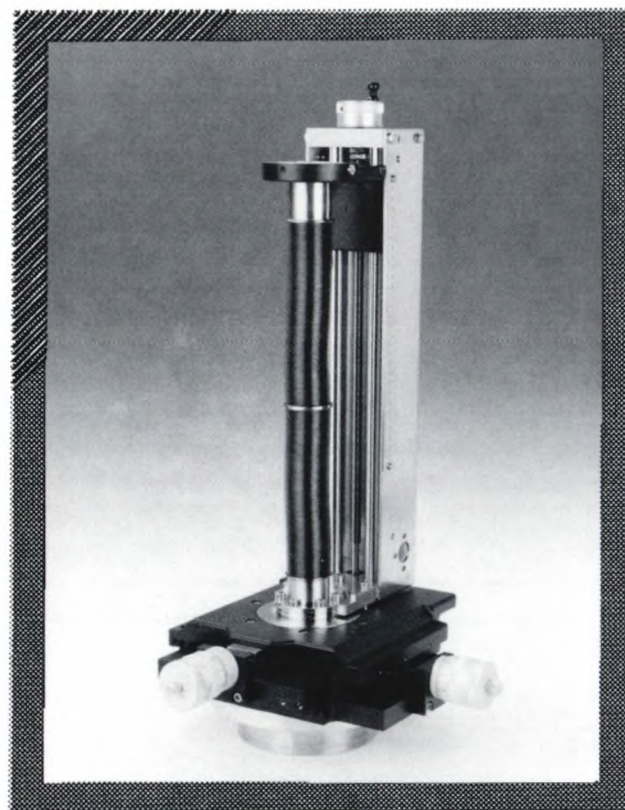
The design is thermally matched to allow repeated bakeout to 230°C in any orientation and has a support and guidance system that stabilises the sample and damps vibrations. Available with three standard Z travels with X and Y movements up to ± 25 mm the Transax is designed to accept the RD1 and RD2 rotary 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



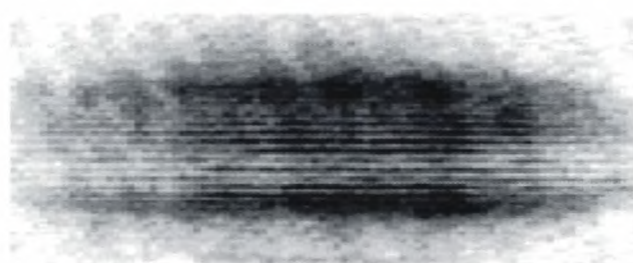
SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved 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



Fysikkens image og selvforståelse

Bent Jørgensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter

Fysik kan uden overdrivelse betegnes som en af de mest succesrige og samfundsmæssigt betydningsfulde videnskaber i det 20. århundrede.

Den første halvdel af århundredet bragte de store nybrud med fremkomsten af bl.a. relativitetsteorien, kvantemekanikken og atom- og kernefysikkens opdagelser. Efter anden verdenskrig, hvor en række teknologiske anvendelser af fysisk viden havde afgørende indflydelse på krigens udfald, satsede man i den industrialiserede verden meget store ressourcer på grundforskning i fysik for at stimulere teknologisk udvikling og skaffe øget velfærd for befolkningerne.

I Danmark opbyggedes fra midten af 50'erne og et par tiår frem, en stor forskningskapacitet ved universiteterne og særlige forskningsinstitutioner. Fysik tiltrak en stor talentmasse som studerende og ansatte ved institutionerne, og bevillinger til apparatur o.a. faciliteter var relativt rigelige.

Denne store satsning af økonomiske og menneskelige ressourcer har givet et stort udbytte i form af banebrydende forskningsresultater, teknologisk spin-off og højtuddannede fysikkandidater. Dansk fysik har opbygget et stort potentiale for fortsat frembringelse af ny erkendelse og bidrag til samfundshusholdningen.

Men trods de store videnskabelige landvindinger er samfundsinstitutionen fysik måske alligevel i en situation, hvor man har "sejret ad helvede til", som Thomas Nielsen - nok ufrivilligt tvetydigt - udtalte om fagbevægelsen, da han for nogle år siden forlod formandsstolen i LO.

I den ovennævnte ekspansive periode opbyggedes et specialiseret og effektivt net af forskningsinstitutioner. Efter stagnationen og senere nedgangen i tilførslen af ressourcer fra slutningen af 70'erne, er der gradvist opstået problemer med at sikre fornyelse af medarbejderstaben og inddrage nye forskningsfelter. Der er kun halvhjertet hjælp at hente hos politikerne, som i disse år vil tage sig betalt i form af større politisk styring af forskningens indhold. Jeg mener man skal være mest mulig tilbageholdende med at lade sig infiltrere af detaljeret politisk styring. Desuden bør der efter en periode med høj prioritering af "big science" og store forskningsgrupper satses lidt mere på nye områder, hvor mindre forskningsgrupper kan gøre sig gældende.

Et endnu større problem er svigtende rekruttering til universitetsuddannelserne i fysik og fysiktunge videregående uddannelser samt den generelle svækkelse af fagets stilling i undervisningen på alle niveauer. Fysik taber terræn, såvel i absolutte tal som ikke mindst i relativ andel af det samlede uddannelsesvolumen. Fysiks image blandt unge er, at det er kedeligt, vanskeligt og mest for nørd.

Der er tale om et internationalt fænomen (i hvert fald i de rige industrilande), og det har utvivlsomt dels baggrund i samfundsfaktorer som højt materielt velfærd, teknologiskepsis, individets identitetskriser pga. sociologiske ændringer af samfundet osv.

Men i en vis udstrækning udspringer fænomenet efter min opfattelse også af nogle faginterne udviklingstræk (som også kan genfindes i en række lande). I de "forgylde" årtier efter 2. verdenskrig havde fysik det i visse henseender for let. Der var en tilstrækkelig rekruttering af højtmodiverede og velbegavede studerende, som kunne "tage fra". Man behøvede ikke at bekymre sig synderligt om studiemiljø, pædagogik og undervisningsformer, eller didaktik og pensumvækst.

Udover forskningen orienterede man sig først og fremmest mod at optimere fysikuddannelsen m.h.p. forskningsrekruttering, medens andre behov for kandidater i fysik (som gymnasielærere, hospitalsfysikere og indenfor andre offentlige eller private ansættelsesområder) så kunne dækkes ved residualen af kandidater, når universitetet havde taget sin andel. Endnu mindre interesserede man sig for fagets funktioner som bi- og støttfag til andre fag og uddannelser, og her er det også gået derefter i form af en kraftig deroute.

Fysik er et elitært fag. Den type kvalifikationer, som dette fag i særlig grad kan bibringe eleven/den studerende, er vanskelig for de fleste at opnå.

Fysik har et højtudviklet sæt af begreber og teorier, som er vanskelige at tilegne sig og bringe i anvendelse overfor fysiske problemstillinger. Det er evnen til at reducere et fysisk system til en model, der rummer de væsentligste træk, at formalisere modellen og bringe de fysiske begreber og teorier i spil, at gennemføre ofte komplicerede regninger og derefter fortolke resultaterne, som beskæftigelse med fysik kan udvikle. Det kræver et kompleks af evne til at få ideer, kunne sortere dem, foretage spring i abstraktion og kunne arbejde med matematiske formalismer. Disse kvalifikationer har vist deres effektivitet i fysik. Men de har utvivlsomt store anvendelsesmuligheder i mange fag og problemfelter og på mange niveauer. De må efter min mening i vores type samfund anses for essentielle som et led i almindannelsen på linie med f.eks. sprogbeherskelse. Derfor er den samfundsmæssige betydning af at bibringe en stor del af ungdommen sådanne kvalifikationer på et tilpasset niveau i sig selv lige så stor eller større end betydningen af at forsyne samfundet med specialister med sådanne kvalifikationer.

Lidt tilspidset formuleret mener jeg altså, at det er en vigtig opgave for fysikerne/fysiklærerne at formidle det elitære fag fysiks særlige kvalificeringstilbud til et bredt udsnit af befolkningen, og ikke kun til en vis type elite.

Man skal ikke lade sig friste til en overspringshandling, hvor faget blot gøres til et blødere orienteringsfag, hvor der især "tegnes og fortælles" om fysik.

Fysik på RUC

Fysik på RUC har en særlig placering i forhold til det generelle udviklingsmønster. RUC blev etableret efter højkonjunkturperioden (i 1972), og de naturvidenskabelige fag har været igennem et meget langstrakt forløb for at nå op på en blot bæredygtig størrelse. Til gengæld har de ikke så store aldersprofilproblemer.

Matematik og fysik har siden 1978 været placeret i et institut (IMFUFA), som nu råder over godt 20 fastansatte videnskabelige medarbejdere, ligeligt fordelt på de to fag, og 5 - 6 løstansatte forskere. Der er endvidere tilknyttet 12 - 15 ph.d - studerende, 85 overbygningsstuderende i fysik, 120 ordinære og 65 åben - uddannelse overbygningsstuderende i matematik. Desuden varetager instituttet undervisningen i matematik og fysik af ca. 300 studerende på den 2 - årige naturvidenskabelige basisuddannelse.

En kandidatuddannelse består af den 2 - årige tværfaglige basisuddannelse, som den studerende i nogen grad kan tone efter sine videre studieplaner, og af to sides-tillede overbygningsfag af hvert halvandet års varighed. Her kan det ene overbygningsfag så være fysik, som dels kan kombineres med et af en række naturvidenskabelige fag (biologi, geografi, matematik og datalogi), og dels med samfundsvidenskabelige og humanistiske fag (økonomi - og forvaltningsfag, historie, kommunikation, pædagogik, filosofi, sprogfag etc.)

Denne kombinationsstruktur sammen med særlige studieformer med en ligelig fordeling af studiearbejdet på henholdsvis kurser og projekter giver selvsagt kandidaterne en anden kvalifikationsprofil end kandidaterne fra de traditionelle uddannelser i fysik på Københavns og Århus universiteter.

Godt halvdelen af kandidaterne kombinerer fysik med matematik, men kombinationer med kemi, geografi, historie, kommunikation og filosofi er også jævnligt forekommende. Deres ansættelsesområde er ret bredt, med ca. 1/3 til gymnasieskolen, ca. 1/3 til forskningsinstitutioner (især som ph.d - studerende) og ca. 1/3 til andre jobs f.eks. vedrørende formidling, administration eller IT.

Den særlige studieopbygning medfører selvsagt, at det kursusbundne pensum i fysik er mindre end i en traditionel hovedfagsuddannelse i fysik, for at skaffe plads til projektarbejdet og det bredere fagindhold. Det har ført til formodninger om, at kandidaterne trods deres dokumenteret gode jobmuligheder, ville have for svage faglige kvalifikationer til at gennemgå en forskeruddannelse. Sådan forholder det sig ikke. En stor og stigende andel opnår ph.d"-stipendier, fortrinsvis ved andre institutioner.

Hvad angår rekrutteringsproblemet er den naturvidenskabelige basisuddannelse ramt af den generelt svig-

tende søgning til naturvidenskabelige/tekniske uddannelser, omend der i de sidste år igen er en opadgående tendens. Hvad der imidlertid er særdeles interessant er, at andelen af basisstuderende, som ønsker at læse fysik (og matematik) vokser markant i løbet af basisuddannelsen. Ved hjælp af spørgeskemaer er der gennem en årrække foretaget undersøgelse af de studerendes studieønsker/ - planer ved optagelsen og efter 1. år. De viser, at der næsten sker en fordobling af tilvalg til fysik og matematik i løbet af de to år.

Instituttet betragter sin uddannelse i fysik (og matematik) som et supplement til det samlede udbud af fysikuddannelser i Danmark og vil koncentrere sig om at forbedre og udvikle den indenfor det nuværende koncept.

Instituttets forskningsprofil er bred i forhold til dets størrelse og omhandler såvel egentlig fysisk grundforskning som forsknings - og udviklingsarbejde indenfor anvendelses - og metafaglige områder. Et tyngdepunkt udgøres af forskning i amorfes stoffers struktur og dynamik, herunder væskers viscoelastiske egenskaber, bløde faste stoffers og komplekse væskers struktur og elektrontransport i uordnede systemer. Ca. halvdelen af instituttets fysikere arbejder med dette område, som gradvist er opbygget fra midten af 80'erne.

Et andet væsentligt område er fagdidaktik og pædagogiske og samfundsmæssige forhold vedrørende fysikundervisning, især på det gymnasiale niveau og i videregående uddannelser.

Disse aktiviteter har deres rod i det store udviklingsarbejde omkring etablering af centrets uddannelses - og undervisningsformer som har optaget det naturvidenskabelige personale meget stærkt, især i det første tiår. Forskningen foregår i tæt samarbejde med instituttets matematikere, og stimuleres af hele centrets særlige styrke på det pædagogisk - didaktiske område.

Valget af forskningsområder og bredden i den faglige profil skal først og fremmest tilgodese behovet for en forskningsmæssig forankring af undervisningen. Desuden er det tilstræbt at finde områder, der skønnedes lovende, men endnu relativt lidt opdyrkede i Danmark. Samtidigt er muligheden for at tiltrække dygtige forskere naturligvis helt afgørende.



Bent Jørgensen er lektor i fysik ved Roskilde Universitetscenter. Han er institutleder ved IMFUFA

Jens Ulrik Andersen og Ejvind Bonderup beder i mindeordene om Jens Linhard, om, at hans foredrag i anledning af modtagelsen af Ørsted medaljen bliver trykt igen. Redaktionen af KVANT følger gerne denne opfordring. Fra Fysisk Tidsskrift nr. 1 1974 genoptrykker vi derfor:

Takketales for Ørsted medaljen

Jens Linhard, Aarhus Universitet

..... Dronningen foretog overrækkelsen af medaljen; så fulgte professor Jens Lindhards foredrag:

Jeg vil gerne udtrykke min dybe tak til Selskabet for Naturlærens Udbredelse for tildelingen af H.C. Ørsted medaillen. Jeg vil også takke præsidenten, professor Højgaard Jensen, og mine kolleger, for de overmåde venlige ord og den overmåde venlige mening.

Jeg vil først sige lidt om det jeg ikke vil tale om i dag. For en snes år siden udførte jeg nogle arbejder vedrørende egenskaberne af en fri elektrongas: den såkaldte dielektriske beskrivelse. Elektrongassen er et idealiseret eksempel på, hvordan man udfører en systematisk perturbationssregning i et mangelegemeproblem, og hvordan lineære elektromagnetiske feltligninger kan fungere. Men samtidig er det også et eksempel hvor man har eksplicit irreversibilitet og bliver ført væk fra den reversible Hamiltonske beskrivelse, man starter fra.

Elektrongassen var imidlertid også knyttet til atomare stødproblemer. Niels Bohrs inspirerende diskussioner af atomare stødproblemer i fyrrerne gav for mig, som for mange andre, anledning til at studere sådanne spørgsmål. En særlig glæde for mig på den tid var samarbejdet med Morten Scharff, hvor vi sammen først forsøgte os med kantater og dernæst gennem en halv snes år udførte en række studier over atomare stødproblemer, hvoraf nogle blev publiceret. Efter Morten Scharffs død i 1961 er næsten alle vore fælles upublicerede arbejder blevet færdiggjort.

I fortsættelse af stødproblemerne var det en interessant udfordring, i 1964, at undersøge retningseffekten for hurtige ladede partikler i krystaller, hvor teorien i stor udstrækning kan stå på egne ben. Det grundlæggende fænomen er, at hurtige ladede partikler ganske vist kan gå durk igennem hvert enkelt atom -idet den kvantemekaniske Born approximation gælder - men drejer det sig om mange atomer på række, bliver det samlede stød klassisk. Langs atomrækkeme - strengene - opstår der da en total skyggende skærm, der kan gøres så lille som en milliardtedel af en centimeter eller ca. en tiendedel af atomernes radius. Denne skyggeeffekt kan benyttes til mange slags eksperimentelle undersøgelser, først og fremmest af krystallers egenskaber, men også f.eks. atomkernelevetider. På Det fysiske Institut i Århus har vi gennem årene haft meget udbytte af det samarbejde dette har

givet mellem eksperimentalfysikere og teoretikere.

Imidlertid tror jeg, at det i dag ikke vil være på sin plads at gå i tekniske detaljer med de mange interessante teoretiske og eksperimentelle problemer vedrørende streng-effekten. Det vil nok være rigtigere at forsøge at følge Ørsted og Bohr ved at udtrykke fysikken i ord (og ikke i formler), men også ved at efterstræbe enheden i fysikken. Eller, som Ørsted ville sige det, at søge Enheden i Naturen og i Naturtankerne.

Lad os betragte to begreber, der er stærkt knyttet til hinanden, og som ikke blot er centrale i fysikken og i naturvidenskaben, men også er dele af dagliglivet. De to begreber er sandsynlighed og irreversibilitet. En af vanskelighederne ved de to begreber er måske især, at de er så velkendte og almindelige, at man i utide kan forledes til at tro, at man forstår dem.

Uden at prøve at give en undskyldning for at tale om sandsynlighed og irreversibilitet, vil jeg gerne fremhæve, at de emner jeg nævnte før, atomare stødproblemer, mangeelektronproblemet, og retningseffekter, når man virkelig går i detalje med dem, kræver at man danner sig en definitiv forestilling om sandsynlighed og irreversibilitet. En direkte årsag til at genoptage studiet af sandsynlighed og irreversibilitet var netop problemerne vedrørende retningseffekter for ladede partikler i krystaller. I arbejdet vedrørende alle disse spørgsmål har jeg haft overordentlig stort udbytte af samarbejdet med Vibeke Nielsen gennem en halv snes år.

Når jeg nu vil diskutere sandsynlighed og irreversibilitet som to naturtanker på Ørsteds vis, så véd jeg vel, at der imod det jeg vil sige kan rettes en skarp kritik af den art, som Pauli kunne udtrykke med begejstring.

Pauli tegnede en ramme til et maleri, men lærredet i rammen var tomt. Nedenunder rammen stod en forklaring af billedet: Also I can paint like Tizian - only the technical details are missing. Sandsynlighed er et begreb vi alle benytter til daglig, måske uden af vi gør os det klart. Det er også et gammelt begreb:

"Der er i Verden et Uhyre,
som stopper Halvveis tit Geniets Fyre, -
det er Sandsynlighed."

Johan Herman Wessel var kommet i vanskeligheder i en af sine fortsatte fortællinger. Han følte selv, at den vist

var blevet lidt for usandsynlig. Vi gør ofte selv brug af en slags sandsynlighedsbetragtning, hvad enten det drejer sig om troværdighed af hvad en digter fortæller os, eller det gælder om at vurdere chancen for at nå gennem trafikken i København til et givet sted og en given tid. Det præcise sandsynlighedsbegreb opstod først på grund af hasard-spilleres forsøg på at forstå terningspil og udvikledes af matematikere. Vore forestillinger om sandsynlighed har nok siden da været bundet til terningkast, som det begreb ved hjælp af hvilket man skal kunne forestille sig sandsynlighed. I fysikken er sandsynlighed kommet ind på tre måder. Først gennem målinger, og den tilhørende usikkerhed. Dernæst gennem statistisk mekanik, og endelig gennem kvantemekanikken, hvor bølgefunktionens kvadrat blev knyttet til sandsynlighed på en særlig måde.

Samtidig har sandsynlighed af mange været opfattet som noget ufuldstændigt - en mangel på viden - og som noget man ikke kunne opbygge naturlovene på. Opfattelsen kom måske klarest til udtryk hos Einstein, der ganske vist benyttede sandsynlighed på en slående måde i statistisk mekanik, men ikke kunne acceptere sandsynlighedsbegrebet i kvantemekanikken. Einstein fremhævede i den forbindelse ofte, at han "glaubte nicht dass der liebe Gott würfelt".

Sandsynlighedens indførelse i mekaniske systemer skyldes især Boltzmann, og gav straks anledning til en række paradokser. Men først i Gibbs' statistiske mekanik fremgik det - gennem det såkaldte ensemble - at sandsynligheden medførte en dybtgående ændring af mekaniske billeder. Derfor er Gibbs' ensembler også ofte blevet opfattet som matematiske kunstgreb.

Disse bemærkninger lyder kan hende lidt trivielle, men jeg har søgt at fremhæve at vi, m ke ubevidst, henfører sandsynlighedsbegrebet til meget konkrete tankeeksperimenter, dvs. terningkast. I matematikken ville dette svare til at et tal, hvadenten det var irrationelt eller komplekst, altid skulle fortolkes ved hjælp af hele tal - dvs. for eksempel som et antal æbler. Det gør man ikke, for det er i stedet 'spillereglerne' for tallene man lægger vægt på.

I tilknytning hertil kommer der nu en mere vanskelig sag, nemlig spørgsmålet om omvendning af sandsynligheder. - Ofte lader man sig ved målinger nøje med at angive sandsynligheden for dette eller hint måleresultat, for givne fysiske parametre, svarende til at hvis man véd, at en ternings seks udfald er lige sandsynlige, kan man forudsige noget om udfaldet. Herved har man således en forbindelse fra parametre til måleresultater. Imidlertid er det ikke dette man er efter ved målinger i naturvidenskaben eller fysikken. Man ønsker en forbindelse fra måleresultater til parametre. Udtrykt igen ved terningspil, ønsker man ved en måling i fysikken et udsagn om hvor god eller falsk en terning er, alene ved observationer af udfaldene. Denne problemstilling blev erkendt af englænderen Bayes i det attende århundrede. Bayes gjorde et forsigtigt forslag til en mulig løsning af problemet. Dette forslag blev taget op med begejstring af Laplace, som mente at han dermed kunne angive sandsynligheden for næsten hvadsomhelst, f.eks. sandsynligheden

for at solen står op i morgen.

Spørgsmålet har siden givet anledning til en række skoler med stærkt forskellige synspunkter, hvoraf det mest extreme er, at alting har en *a priori* sandsynlighed, som er principielt ubekendt. Hovedvanskeligheden har været om man kan benytte begrebet sandsynlighed for en fast men ubekendt konstant, f.eks. en naturkonstant som forholdet mellem protonens og elektronens masse.

Man står selvfølgelig overfor et dilemma, hvis man ikke er sikker på at kunne give et konkret udtryk for en målings resultat. Imidlertid foretager man sædvanligvis blot tilstrækkelig mange målinger, for så skjules uklarheden. Dog kommer problemet ind særlig kritisk i den præcise formulering eller f.eks. hvis man diskuterer de tankeeksperimenter vedrørende kvantemekanikkens grundlag, som Bohr og Heisenberg har benyttet, thi dér foretager man blot én eller nogle få målinger.

Jeg mener imidlertid, at man virkelig kan finde definitive fordelingsfunktioner - omvendte sandsynligheder om man vil - for den ukendte faste parameter, udtrykt alene ved målingerne. I tilfælde af diskrete variable, som for terningen, indeholder fordelingen en skarpt afgrænset ubestemthed. For at udlede fordelingsfunktionen må man bygge alene på 'spillereglerne', som man gør det i matematikken. Herved indgår de såkaldte degradesfunktioner, som f.eks. entropien, automatisk i fordelingsfunktionerne. Det skal jeg vende tilbage til.

Jeg har forsøgt at antyde hvad man kan mene med ordet sandsynlighed (og med målinger), og vil nu vende mig til det andet begreb: irreversibilitet, der er nøje knyttet til sandsynlighed. Men først vil jeg fortælle en historie:

Piet Hein talte engang med en filosof, N.N., som var i færd med at læse Bohrs seneste afhandling om fysik og erkendelse. Eftersom Piet Hein netop var på vej til Bohr, blev han bedt om at viderebringe et spørgsmål om afhandlingen. N.N. var nemlig ret hurtigt stødt på en vanskelighed under læsningen: "På første side, første linie, benytter Bohr ordet 'virkelighed'. Hvad mener Bohr egentlig med ordet 'virkelighed'?" Da Piet Hein senere traf Bohr, berettede han om filosofens spørgsmål vedrørende ordet virkelighed. Bohr bad Piet Hein om først at forklare hvordan N.N. var indrettet. Piet Hein fortalte derfor, at N.N. var sådan og sådan indrettet. Bohr sagde da: "Vil De sige til N.N., at når jeg -eller nogen anden fysiker - benytter ordet 'virkelighed', så mener vi ingenting dermed!"

Betragt dernæst fænomenet irreversibilitet. Det kender man, mere indirekte, i det daglige som en forskel på fortid og fremtid, et fortegn på tidsaksen, som er fælles for alle eksperimenter og iagttagere. Det ytrer sig f.eks. direkte derved, at hvis man rører fløde rundt i en kop kaffe får man en jævn blanding, hvor man ikke kan genoprette den oprindelige situation. I termodynamikken udtrykkes det ved at entropi kun kan vokse som funktion af tiden, men ikke aftage. Entropien indføres i statistisk mekanik som logaritmen til antallet af forhåndenværende muligheder eller som middelværdien af logaritmen til sandsynligheden. At entropien vokser betyder da, at man går imod mere sandsynlige tilstande.

I den statistiske mekanik supplerer man de mekaniske, eller Hamiltonske, bevægelsesligninger med sandsynligheden. Imidlertid er de mekaniske bevægelsesligninger reversible, dvs. der er intet fortegn på tidsaksen. Man søger da at eftervise irreversibiliteten på basis af reversibilitet. Dette ejendommelige forhold har jo givet anledning til overordentlige vanskeligheder i tidens løb. Udover de mekaniske bevægelsesligninger må man indføre en irreversibel recept, som fuldstændig modificerer mekanikken. Dette kan tydeligt ses i den elektron-gas jeg omtalte i indledningen. Lad os derfor tænke på bevægelsesligninger som er explicit irreversible, f.eks. indeholdende en diffusionseffekt.

Den første overraskelse for mig var, at det er let at vise, at foruden den statistiske entropi (middelværdien af logaritmen af sandsynligheden) findes der en uendelig familie af degradationsfunktioner (middelværdien af potenser af sandsynligheden) alle med de samme egenskaber: additivitet for uafhængige systemer og monoton tilvækst ved irreversible processer. De vil desuden falde sammen med entropien i f.eks. begyndelses- og slutligevægtstilstande for et mekanisk system. Dette betyder imidlertid at det termodynamiske entropibegreb, som er baseret på ligevægtstilstande, ikke uden videre er entydigt under dynamiske processer.

Irreversibilitet har imidlertid flere konsekvenser. Thi degradationsfunktionerne, og entropien, viser sig ikke at være absolutte funktioner af t sandsynlighedsfelt, men kun relative funktioner af sandsynlighedsfeltet i forhold til ligevægtsfordelingen eller, mere almindeligt, af ét sandsynlighedsfelt i forhold til et andet. Nu gælder det i fysikken at, for en tidsuafhængig Hamiltonfunktion, er ligevægtsfordelingen simpelthen en konstant tæthed i faserummet. Man kan derfor tillade sig at glemme at degradationsfunktionerne er relative funktioner, såfremt sandsynlighedsfeltet måles i forhold til faserumsvoluminet.

Disse bemærkninger bringer et andet forskningsområde i søgelyset. I de seneste årtier har man i stigende grad søgt at tilskrive den statistiske entropi en universel betydning. Dette er især sket med udgangspunkt i informationsteorien, hvor antallet af mulige meddelelser knyttes til en entropi (logaritmen til antallet af muligheder) og entropien bliver da et mål for graden af uvidenhed. Men hvis entropien skal være veldefineret, er det, som sagt, ikke nok blot at have en sandsynlighedsfordeling. Der må også eksistere en ligevægtsfordeling, og derfor definitive bevægelsesligninger. I sig selv har disse informationsbegreber da ikke noget med entropi at gøre.

Lad mig vende tilbage til målinger, som jeg omtalte i forbindelse med sandsynligheder. Jeg nævnte, at fordelingsfunktionerne af det ukendte felt, der skal måles, automatisk bliver udtrykt ved hjælp af relative degradationsfunktioner eller relativ entropi. De to felter, der indgår, er dels det ukendte felt og dels de målte hyppigheder (tællinger). I praksis vil man ofte kunne komme ud for tre af degradationsfunktionerne: den ene er entropien, den anden er meget benyttet i matematisk statistik og indeholder kvadratet på det ene sandsynlighedsfelt. Den tredje er ret interessant: det er den eneste symmetriske degradationsfunktion, og den indeholder produktet af kvadratroden af de to felter.

Jeg bringer disse detailspørgsmål på bane, fordi der af sig selv viser sig en sammenhæng mellem på den ene side målinger og på den anden side irreversibilitet, gennem de abstrakte degradationsfunktioner. Samtidig er målinger vel netop hvad vi bør mene med at drage information ud af et fysisk system. Men i målinger optræder altid kun relative funktioner, i modsætning til de absolutte funktioner man taler om i informationsteorien.

Lad mig til slut nævne spørgsmålet om at finde et systems ligevægtsfordeling. Entropien eller degradationsfunktionerne har extremum i ligevægt, men det er i denne forbindelse ikke så nyttigt, eftersom de måler en fordeling i forhold til ligevægten. Entropien kan derfor ikke normalt benyttes til at bestemme ligevægtsfordelingen. Danner vi imidlertid den relative entropi mellem sandsynlighedsfeltet i to på hinanden følgende øjeblikke, får man en ny og absolut funktion af sandsynlighedsfeltet, Θ -funktionen, og alle de øvrige degradationsfunktioner fører også til Θ -funktionen. Denne funktion indeholder bevægelsesligningerne gennem kvadratet af den tidsafledede af kvadratroden af sandsynligheden og den har minimum i ligevægt. Der skulle være en mulighed for at Θ -funktionen kan benyttes til at finde temperaturligevægte ved variationsregning i mangelegemeproblemer.

Gennem disse korte bemærkninger har jeg forsøgt at antyde et systematisk synspunkt vedrørende sandsynlighed og irreversibilitet, således at de kan indgå som integrerende dele af fysikken og ikke blot som recepter. Jeg føler mig ingenlunde sikker på alle de ting jeg har prøvet at fremhæve i dag, men håber at problemerne er værd at beskæftige sig med, og at der en lille smule gælder det, som Bohr engang sagde om kvanteteorien: "Selvom man skulle vågne op en morgen og finde at kvantefysikken var en illusion, selvom det viste sig blot at have været en drøm det hele, så havde man dog lært noget".

Vejrforudsigelser i det ydre rum

Hans Pécseli, Fysisk Institut, Universitetet i Oslo

Ovenstående titel berører i virkeligheden to spørgsmål; for det første er begrebet vejrforudsigelse veldefineret i daglig tale; de fleste forbinder vel vejrkort, TV meteorologer og lignende med begrebet, og det er rimeligt at spørge om, i hvilket omfang, hvis overhovedet, betegnelsen kan anvendes på forhold i rummet. Et andet, og underforstået spørgsmål er selvfølgelig om det er noget vi behøver at interessere os for. I håb om at fastholde opmærksomheden for det følgende er det måske rimeligt allerede i udgangspunktet kort at svare bekræftende på begge spørgsmål: Selvom partikkeltætheden i Jordens ydre rum er relativt lille, er det også her muligt at tale om blæst, kraftige forstyrrelser og sågar storme. Disse forhold er typisk lokaliseret til afstande af nogle jordradier over jordoverfladen, og det hører til sjældenhederne, at de har en umiddelbart målelig konsekvens for forhold på Jorden. Det kunne derfor ventes, at mulige skadevirkninger kunne ignoreres, fordi de ikke var så hyppige. For et moderne industrialiseret samfund vil imidlertid selv sjældent forekommende uheld kunne få vidstrakte følgevirkninger. En konsekvensanalyse af uheld vil typisk multiplicere sandsynligheden for et uheld med et mål for dets konsekvenser, og dette produkt kan blive stort selv for sjældne uheld. Specielt uheldige vejrforhold i det ydre rum udgør en risiko for forhold på Jorden, som ikke kan ignoreres. For eksempel kan disse fænomener foranledige variationer i Jordens magnetfelt, hvorved der kan induceres uønskede strømme i elektriske højspændingsnet med udfald i strømforsyningen til følge.

Det må dernæst tilføjes, at mange af de omtalte forstyrrelser ofte er lokaliserede til områder, som kan give kraftige forstyrrelser på satellitter. Da moderne kommunikation og navigation i høj grad er afhængig af sådanne satellitter, kan det forventes, at forhold i det ydre rum er af betydning også for vor dagligdag. Korrekte vejrforudsigelser er i dag kritisk afhængige af meteorologiske satellitter, og disse oplysninger kan for visse erhverv, fiskeri fx, være livsvigtige.

Jordens magnetosfære

Det geomagnetiske felt kan i Jordens nærhed med en ganske god nøjagtighed beskrives som et magnetisk dipolfelt. For større afstande, typisk 5–10 jordradier, modificeres dette felt på grund af tilstedeværelsen af et plasma, den såkaldte solvind¹. Dette plasma kan betragtes som en gas bestående af frie elektroner og ioner, som kontinuert fordampes fra soloverfladen. Solvinden drives bort fra Solen af gradienten i trykket, men holdes tilbage af Solens tyngdefelt. Da denne tyngdekraft aftager med kvadratet på afstanden fra solens centrum, kan der opstå en situation, hvor trykkræfterne dominerer for store

afstande. Plasmaet kan da opnå en energi, der overstiger indfangningsenergien i solens tyngdefelt. Disse forhold kan beskrives ved en simplificeret model^{2,3}, hvor det antages, at forholdene er stationære og kuglesymmetriske. Massefluxen gennem en kugleflade med centrum i solcenteret må da være konstant, uafhængig af den aktuelle kugleskals radius r , eller med andre ord

$$4\pi r^2 \rho V = \text{const}, \quad (1)$$

hvor ρ er massetætheden af solvinden og V dens hastighed i den radiale retning. Newtons 2. lov giver for dette tilfælde

$$-\frac{dP}{dr} - \rho \frac{M_{\odot} G}{r^2} = \rho V \frac{dV}{dr}, \quad (2)$$

hvor $M_{\odot}$ er solmassen og G er gravitationskonstanten. Venstre side af (2) er summen af de lokale kraftpåvirkninger, der skyldes gradienten i trykket og Solens tiltrækning, mens højre siden udtrykker den acceleration et volumenelement af solvinden udsættes for ved sin radiale bevægelse.



optilas

*Optilas Danmark, den lokale internationale
leverandør med specialer indenfor:*

Optik og lasere til forskning og industri

Continuum, Inc. - Corion Corp. - CVI Laser Corp. - Ion Laser Technology, Inc. - Labsphere, Inc. - Laservision - Optical Surfaces Ltd. - Physical Optics Corp. - Research Electro Optics - Santa Fe Laser Co. - Synrad, Inc. - m.fl.



Spektroskopisk udstyr

Chromex, Inc. - McPherson Milton Roy - Photek Ltd. m.fl.



Elektronik

Directed Energy, Inc. - Maxwell Laboratories, Inc. - Quantum Design, Inc. - Stanford Research Systems, Inc. - Trek, Inc. - m. fl.

Optilas Danmark

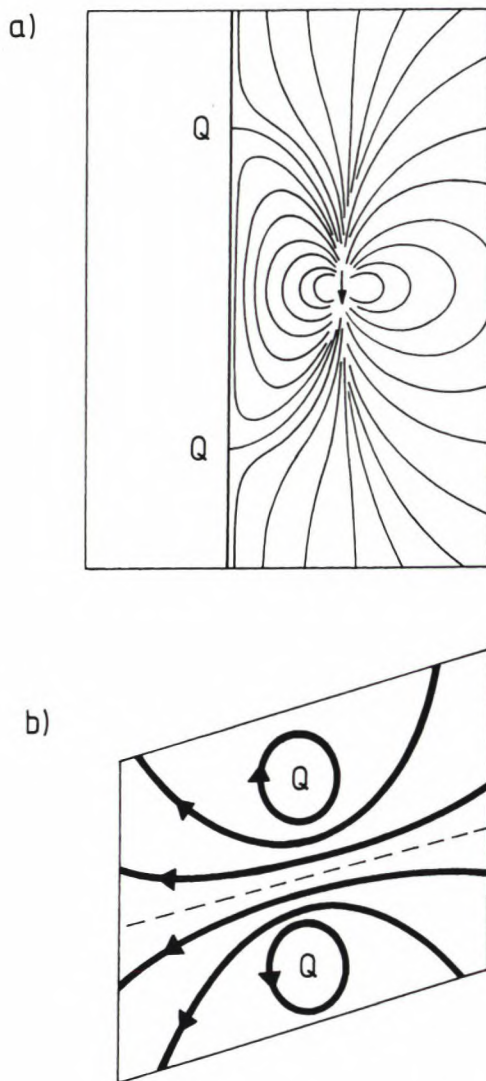
Billedvej 2

DK-2100 København Ø

Telefon: 3543 0133

Fax: 3543 8334

E-mail: optilas@inet.uni-c.dk



Figur 1. Et dipolfelt deformeres af en ideel leder som vist i a). Lederen antages at fylde halvrummet til venstre i figuren. I figur b) skitseres de inducerede overfladestrømme, som giver anledning til deformationen af dipolfeltet. Fladestrømtætheden varierer kontinuert hen over fladen; for nemheds skyld er kun enkelte strømbaner vist. Bemærk de to magnetiske nulpunkter på lederens overflade, mærket Q, som omslutes af overfladestrømmen. Gennem disse to punkter er der speciel simpel forbindelse til magnetosfæren fra solvinden.

Det antages nu, at udtrykket for en idealgas kan anvendes for trykket, i.e. $P = \kappa T n$ givet ved partikeltætheden af plasmaet $n \equiv \rho/m$, og at forholdene er isoterme med temperatur T , hvor Boltzmann's konstant κ er indført. Indsættes tætheden ρ fra (1) i (2) fås

$$\frac{1}{V} \left(\frac{V^2}{C_s^2} - 1 \right) \frac{dV}{dr} = \frac{1}{r} \left(2 - \frac{M_\odot G}{r C_s^2} \right), \quad (3)$$

hvor den isoterme lydshastighed $C_s = \sqrt{\kappa T/m}$ er indført. Ligning (3) har løsninger, hvor hastigheden V vokser monotont med radius r og bliver supersonisk, $V > C_s$, ved en kritisk afstand $r_c \equiv M_\odot G/2 C_s^2$. Denne løsning er aktuel for solvinden, og man finder $r_c \sim 2R_\odot$, hvor $R_\odot$ er Solens radius. ($R_\odot \approx 700 \cdot 10^3$ km, dvs. næsten

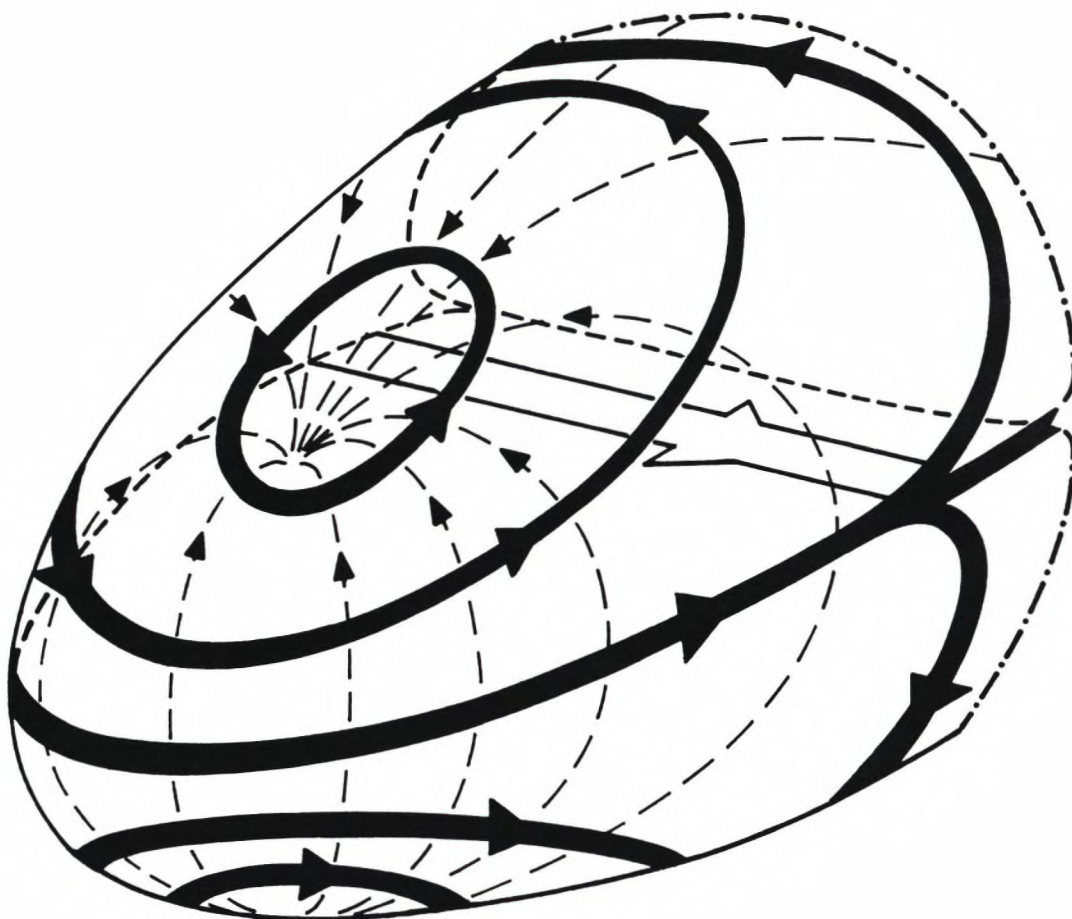
110 gange Jordens radius.) Udledningen her giver en korrekt beskrivelse af de faktiske forhold, og de fleste simplificerende antagelser kan udelades på bekostning af noget mere regnearbejde. Den matematiske beskrivelse af udstrømningsforholdene, der er skitserede, har en interessant analogi til en Laval-dyse².

Selvom partikeltætheden er lille, $n \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ ved 1 AU ("astronomical unit", en afstand fra Solens centrum svarende til jordbanens middellradius, $1 \text{ AU} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}$), er ladningsbærerne frit bevægelige, og solvindsplasmaet er karakteriseret ved en høj elektrisk ledningsevne, som i det relevante parameterområde er sammenlignelig med ledningsevnen for rent kobber.

Solvindens påvirkning af Jordens magnetfelt kan illustreres ved det simple eksempel givet på figur 1. Plasmaet repræsenteres her ved et ideelt ledende medium, hvor inducerede overfladestrømme i pladen giver anledning til en modifikation af det magnetiske felt som vist. Jordens magnetfelt trykkes sammen og deformeres kraftigt på den side, der vender mod lederen. Strømsystemet vist på figur 1b giver at kraft på dipolen, som skubber den bort fra den ideelle leder. Det kan vises, at den kraft, hvormed lederen må presses mod den magnetiske dipol er omvendt proportional med fjerde rod af afstanden mellem leder og dipol. Selvom figuren er stærkt idealiseret, indeholder den de vigtigste elementer af en mere detaljeret beskrivelse. For at retfærdiggøre dette synspunkt betragtes nogle af modellens begrænsninger: i) solvinden er en god men ikke ideel leder, og ii) da plasmaet er i gasfase, kan den ikke korrekt repræsenteres ved en fast væg.

En endelig ledningsevne vil give anledning til at det magnetiske felt forplanter sig ind i lederen. Så længe denne proces er langsom, kan den beskrives som en simpel diffusionsproces, hvor en lokal diffusionshastighed er proportional med resistiviteten $1/\sigma$ og den lokale gradient i magnetfeltet. Magnetfeltdiffusionen bringer til sidst feltet tilbage til den oprindelige dipolstruktur, som om der slet ikke var nogen leder til stede. Imidlertid modvirkes denne proces af strømningen i solvinden, som hele tiden bringer nyt plasma forbi Jorden. På figur 1 svarer dette til en bevægelse af lederen med konstant hastighed parallelt med grænsefladen.

Når et medie strømmer gennem et magnetfelt, induceres der elektriske felter med en intensitet proportional med strømningshastigheden U . Disse elektriske felter giver anledning til strømme, som skaber et nyt magnetfelt. Afbildes det resulterende magnetiske vektorfelt, vil det se ud som om magnetfeltlinierne "trækkes med" af strømningen, og kan dermed afvige markant fra den simple dipolstruktur. Den relative betydning af konvektions hastigheden og diffusionshastigheden på det magnetiske feltbillede måles ved et dimensionsløst magnetisk Reynold's tal $R_m \equiv \mu_0 \sigma L U$, hvor L er en karakteristisk længdeskala og U en typisk hastighed, mens μ_0 er vacuum permeabiliteten, se også boks. For store R_m er magnetfeltdiffusionens betydning forsvindende, mens på den anden side er konvektionen uden betydning for små R_m . Som et



Figur 2. Skematisk illustration af strømsystemerne ved Jordens magnetopause. Fladestrømtætheden varierer kontinuert hen over fladen; for nemheds skyld er også her kun enkelte strømkanaler vist. Figuren kan opfattes som en generalisering af figur 1b. Magnetfeltlinier er indikeret ved stiplede strek. Den neutrale fladestrøm er vist i hvidt på tværs af magnetosfæren bag Jorden.

regneeksempel, der er relevant for magnetosfæreforhold, betragtes $L \approx 10^3$ m, $U \approx 10^5$ m/s, og $\sigma \approx 5 \cdot 10^6$ S/m, hvilket giver $R_m \approx 6 \cdot 10^8 \gg 1$, det vil sige at i dette tilfælde kan vi forvente kraftige afvigelser fra det simple dipolfelt.

Som konklusion, vil figur 1 forblive kvalitativt korrekt, selv for et materiale med endelig ledningsevne forudsat at strømningshastigheden af mediet er stor. Resultatet bliver i det aktuelle tilfælde et grænselag med stærkt inhomogent magnetfelt som skiller solvinden og Jordens ionosfære. Grænselaget har form som en stående chockfront, der virker som en beskyttende kappe, der skærmer mod et bombardement af hurtige solpartikler, som ved specielt voldsom solaktivitet opnår relativistiske energier. Chockfronten selv har ikke form som den plane væg, der var skitseret på figur 1; siden solvindspasmaet er i gasfase, vil grænselaget folde sig rundt om Jordens magnetfelt, på samme måde som en ledende væske flyder rundt om en stærk magnet, som nedsænkes i væsken (hvis eksperimentet udføres i kviksølv, er resultatet dog skuffende; i dette tilfælde er ledningsevnen for dårlig, selv for meget rent kviksølv). En realistisk fremstilling af Jordens magne-

tosfære er forsøgt på figur 4, side 23 og strømsystemet ved magnetopausen er illustreret på figur 2. Det ses, hvorledes Jordens magnetfelt danner en kavititet i solvinden. Kaviteten er dog ikke et vakuum; dele af Jordens nære og fjerne omegn indeholder et ionosfærisk plasma.

Solvinden gennemtrænges af et svagt magnetfelt fra Solen. Dette felt har en intensitet af ca. 5 nT i en afstand af 1 AU fra Solen. Dette magnetfelt kan gennem magnetopausen koble til Jordens magnetfelt, ved at magnetfeltlinier kan skabe direkte forbindelse fra solvinden og ind i Jordmagnetosfæren. De topologiske forhold omkring denne kobling er imidlertid stærkt variable; Jordens magnetfelt har en fast polaritet, mens Solens kan skifte retning inden for bestemte sektorer, hvis udstrækning blandt andet afhænger af solaktiviteten. Koblingen mellem de to magnetfeltssystemer er specielt kraftig, når den lokale polaritet af Solens magnetfelt er modsat Jordens.

Forholdene i Jordens ionosfære

Den neutrale komponent af Jordens atmosfære aftager med højden over jordoverfladen, se figur 5. De øverste lag af denne atmosfære ioniseres af ultraviolet stråling fra Solen,

samtidig med at det meste af denne stråling absorberes. Denne ioniserede gas, et plasma, udgør Jordens ionosfære. Ionosfærens tæthed aftager hurtigt med højden på grund af den aftagende neutralitet, som bevirker, at der bliver få partikler at ionisere i store højder. På den anden side aftager plasmataetheden kraftigt for højder under ca. 90 km, da det meste af den ultraviolette stråling er absorberet over dette område. Denne nære ionosfære i højdeområdet over 90 km kan detekteres ved radarspredning og ved hjælp af instrumenterede raketter og satellitter.

Satellitmålinger har vist, at der, for højder over cirka 1400 km målt ved ækvator, findes en forøget koncentration af energirige partikler, de såkaldte strålingsbælter. En vigtig kilde til partikler i strålingsbælterne er neutroner, der bevæger sig upåvirket af magnetfeltet indtil de henfalder til elektron-proton par, som derefter er indfanget af Jordens magnetfelt. Ved henfaldet frigøres en energi på cirka 780 keV. De fleste af disse neutroner er sekundærpartikler produceret ved den kosmiske strålings vekselvirkning med Jordens atmosfære³.

Elektronerne og protonerne spirallerer omkring magnetfeltlinier og kan opfattes som små ringstrømme, eller magnetiske dipoler, som er påvirket af en kraft proportional med gradienten af det lokale magnetfelt, med retning mod den svage feltstyrke. Da magnetfeltet er kraftigst ved Jordens poler, se for eksempel figur 4, side 23, vil de fleste partikler blive reflekteret her og være indfanget mellem Jordens to magnetpoler, i princippet vilkårlig længe. Man taler om indfangning mellem to "magnetiske spejle". En global forstyrrelse af det magnetiske felt vil imidlertid medføre en tilsvarende forstyrrelse af partikelfordelingen i strålingsbælterne, hvorved en del af de ladede partikler undslipper de magnetiske spejlfelter. Jordens strålingsbælter består af energirige partikler, men tæthederne er relativt lave, omkring 10^6 m^{-3} .

Partikkeltæthederne i Jordens magnetosfære er således stærkt varierende både i tid og rum. Det kan imidlertid siges generelt, at tilstedeværelsen af frie ladningsbærere tillader lokale strømsystemer i tillæg til de strømme, der flyder i grænselaget mellem solvinden og magnetosfæren. Disse strømsystemer bidrager også til ændringer af det globale magnetfeltsbillede. På figur 2 vises specielt den neutrale fladestrøm ("neutral sheet current"), som flyder på tværs af magnetosfæren på jordens natside i symmetriplanet, hvor magnetfeltet er svagt. Denne strøm bidrager til en kraftig deformation af magnetfeltet, så det får form af en langstrakt hale ("magnetotail"), i stedet for et felt, der er nær et dipolfelt, se figur 4, side 23.

Forstyrrelser i magnetosfæren

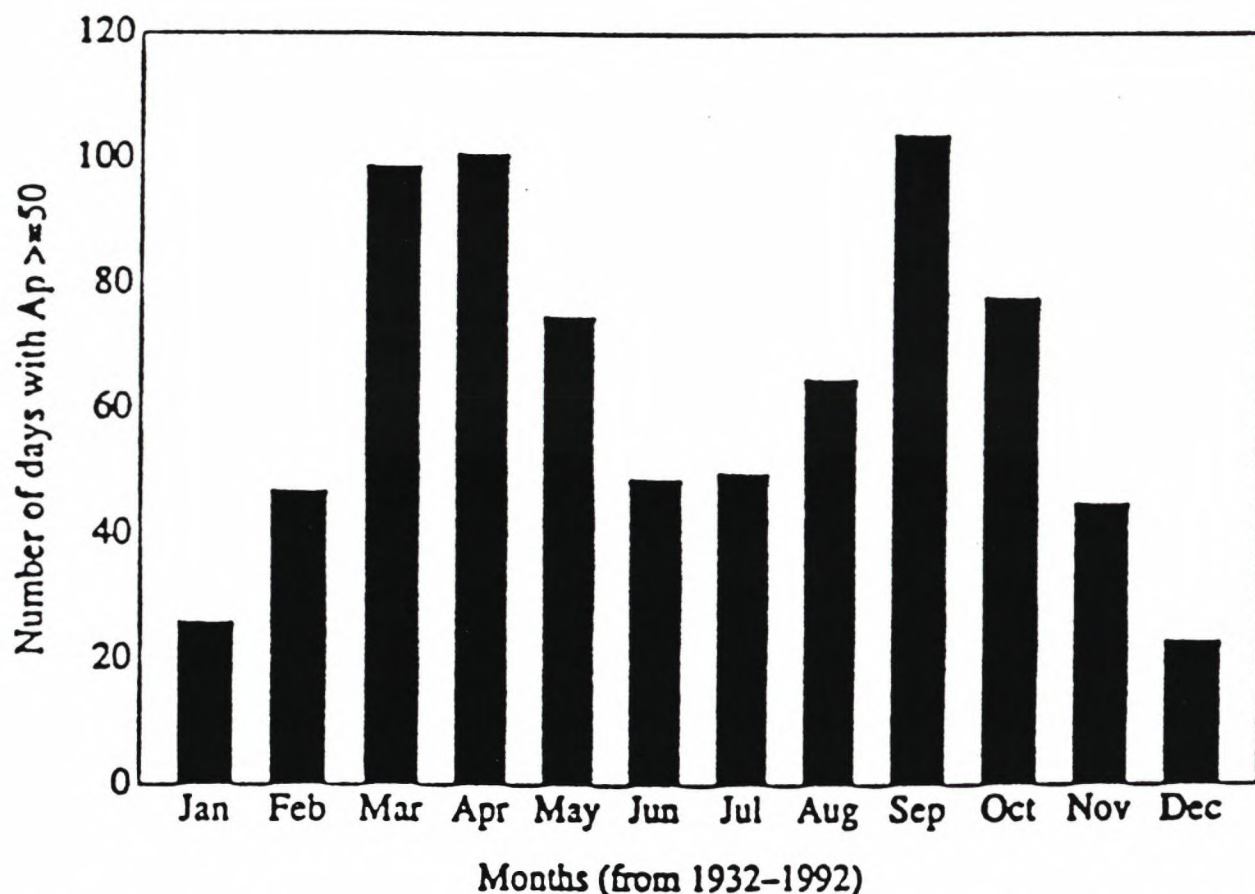
Jordens magnetfelt er overlejret en fluktuerende komponent, selv under normale forhold. For eksempel giver friktionen mellem den strømmende solvind og det stationære plasma, som er indfanget i Jordens magnetfelt, ofte anledning til ustabile forhold (Kelvin-Helmholtz instabilitet) og der genereres lavfrekvente fluktuationer, som giver anledning til målbare magnetiske forstyrrelser på

Jorden¹. Magnetiske pulsationer, micropulsationer, kan være regelmæssige eller uregelmæssige. Hver type kan optræde med perioder fra 1 til 10^3 sekunder. Disse magnetfeltsfluktuationer kan opfattes som magneto-hydrodynamiske bølger (ofte kaldet Alfvén bølger, se boks), som kan forplante sig i Jordens magnetosfære. Specielt kan der opstå stående bølger mellem Jordens magnetiske poler.

Selv hvis fluktuationer, der skyldes ustabile forhold var eliminerede, ville magnetfeltet på Jorden have en døgnrytme, der skyldes, at Jordens magnetiske akse ikke er sammenfaldende med omdrejningsaksen, med et drejet en vinkel på omtrent 11° . Som konsekvens af dette svinger den magnetiske hale ("magneto-tail"), se figur 4, side 23, med denne døgnrytme.

De før nævnte forstyrrelser er observerbare, men de giver ikke anledning til specielt dramatiske hændelser. Den stående magnetosfæriske chockfront omkring Jordens solside kan imidlertid sættes i kraftig bevægelse af "kast" i solvinden, der kan skyldes en forøgelse af enten hastigheden eller plasmataetheden i korte perioder, svarende til at den ledende væg på figur 1 presses kraftigere mod dipolen. Sådanne hændelser forekommer ofte, især i perioder med høj solaktivitet, hvor man skelner mellem flere forskellige hændelser; fx "solar flares", "coronal holes" og "coronal mass ejection (CME)", hvor en observation af CME vises i figur 6 side 26. Den samlede frigjorte energi i forbindelse med "solar flares" og CME kan være yderst varierende. Normalt ligger de aktuelle energier i området 10^{22} – 10^{25} J, altoverskende i form af kinetisk energi. Til sammenligning er Norges energiforbrug 10^{15} – 10^{16} J/døgn.

CME vil ofte give anledning til en chockfront i solvinden, og hvis en sådan front rammer jordmagnetosfæren, kan der opstå magnetiske storme, som manifesterer sig ved kraftige globale magnetiske forstyrrelser med op til et døgn varighed. Det kraftigt varierende magnetfelt (der er jævnlige tale om flere % relativ variation) kan ved jordoverfladen inducere elektriske felter, som kan forårsage alvorlige uheld^{4,5}. Selvom Jordens magnetfelt er svagt, kun cirka 50 μT ved polerne, og fluktuationerne langsomme, så kan der alligevel induceres uacceptabelt store strømme i et højspændingsnet på grund af dets store udstrækning. Den inducerede strøm i en lukket ledningskreds er lig den tidsafledede af dens omsluttede magnetfeltsflux divideret med kredsens samlede modstand. Modstanden øges proportionalt med ledningens længde, mens den omsluttede flux øges med kvadratet på længden, så et net med en stor udstrækning kan få induceret store strømme. Illustrer et højspændingsnet ved en kobberleder med 20 mm diameter, lukket i en ring med en radius på 500 km, vil en 1 Hz fluktuation på $\sim 2\%$ i Jordens magnetfelt inducere en strøm på ~ 80 A og strømstyrker væsentlig større end dette er blevet målt. Følgevirkningerne kan i ekstreme tilfælde være alvorlige. For eksempel faldt hele ledningsnettet for Hydro Quebec i Canada ud i 9 timer i forbindelse med en usædvanlig kraftig geomagnetisk storm 13. marts 1989.



Figur 3. Det såkaldte A_p index er et mål for den globale geomagnetiske aktivitet. På figuren vises en oversigt over tilfælde med $A_p \geq 50$ for årene 1932 til 1992 fordelt på måned⁴. Figuren viser en iøjenfaldende årstidsvariation forbundet med den varierende vinkel mellem Jordens og Solens magnetfelt.

Uheldet berørte 6 mill. forbrugere.

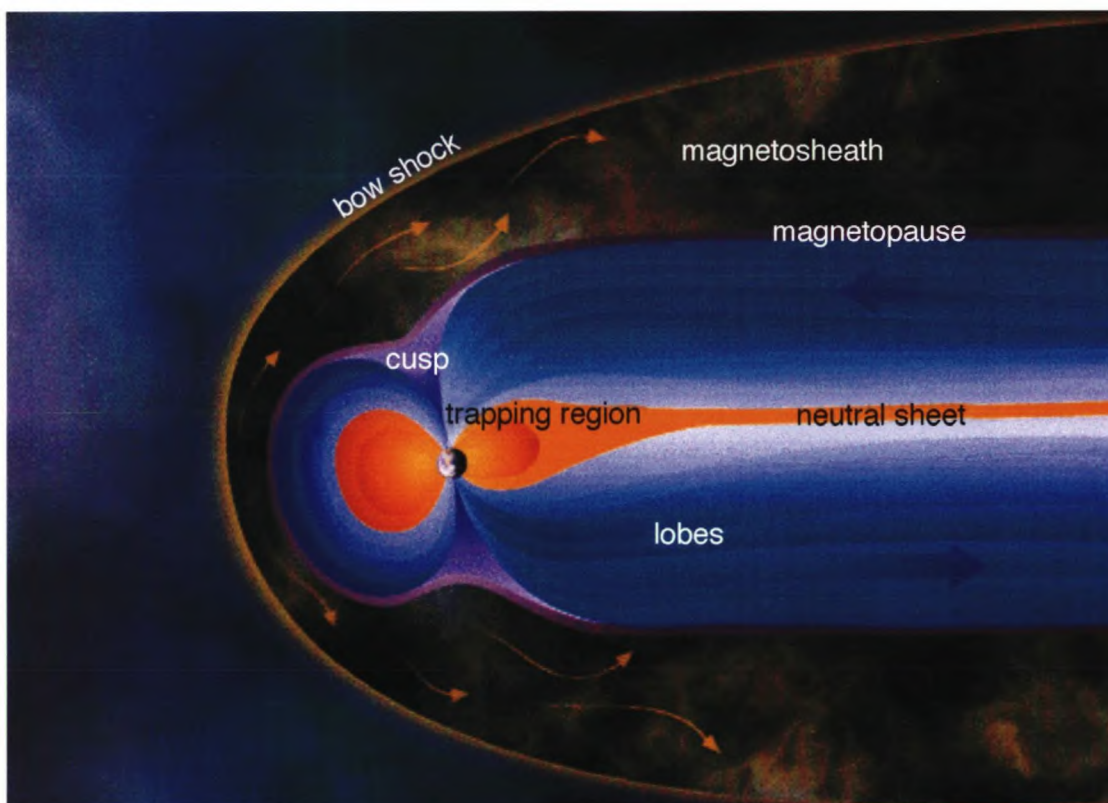
Man har indført et såkaldt A_p index som udtryk for geomagnetisk aktivitet. (A -et indikerer, at der er tale om en dagsmiddel, hvor et alternativ er en 3 timers middel, K -indekset. p -et henviser til, at der er tale om en global middelværdi, "planet-wide average". Der findes en mængde af sådanne index, hvor udvalgte geografiske områder vægtes specielt.) Det kan anføres at $A_p \geq 50$ er udtryk for en kraftig geomagnetisk storm. For at illustrere problemets omfang vises i figur 3 en optælling af det samlede antal stormdage fordelt på årets måneder i perioden januar 1932 til december 1992. Det fremgår, at man i denne 60 årige periode kunne forvente mere end én alvorlig magnetisk storm i hver af henved halvdelen af årets måneder.

Også andre former for forstyrrelser er kendte: De inducerede strømme vides at give anledning til forøget korrosion af lange rørledninger. Strømmene er lavfrekvente, i det mindste i sammenligning med vekselspændingsfrekvenser på 50 eller 60 Hz, og der er ved flere lejligheder observeret en strøm-bias i elektriske krafttransformatorer, som medfører uønsket opvarmning af transformator-kernen og en ofte uacceptabel harmonisk generering på grund af mætningsfænomener i jernkernen.

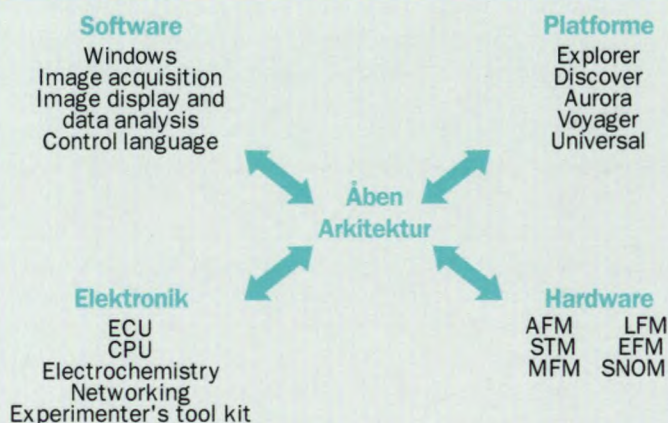
Disse og andre ledsagefænomener ved magnetosfæriske storme medfører store tab og udgifter, selvom størrelsen af de aktuelle tab er vanskelig at specificere. Forholdene, der er beskrevet her, er aktuelle især for den nordlige halvkugle, fx i Canada og nordlige Skandinavien. På den sydlige halvkugle er de tilsvarende områder stort set dækket af vand.

Forstyrrelser af satellitter

De kraftigste magnetosfæriske og ionosfæriske forstyrrelser er lokaliserede i områder, hvor der befinder sig mange kommercielle satellitter. Geostationære satellitter, med en omløbstid på 24 timer (mere nøjagtigt 23 timer og 56 minutter), befinder sig for eksempel over ækvator i en afstand $6.6 R_E$ fra Jordens centrum, hvor $R_E \approx 6.38 \cdot 10^3$ km er jordradien. Afstanden fra Jordens centrum til magnetopausen i retning mod Solen er under normale forhold $\sim 10 R_E$. Satellitter designet til normale forhold i denne afstand kan imidlertid lide varig skade, hvis magnetosfæren trykkes kraftigt sammen i forbindelse med voldsom solaktivitet. Ved sådanne forhold kan satellitten pludselig befinde sig i solvinden, hvor plasmatætheden kan være mærkbart større end i strålingsbælterne. I dette område kan instrumenterne og



Figur 4. Realistisk illustration af Jordens magnetosfære. Bemærk den langstrakte hale på Jordens natside.



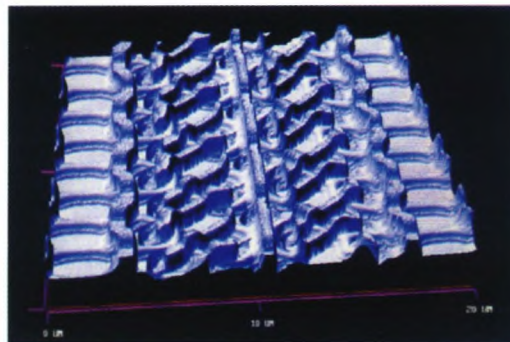
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for af se prøver ned til atomar størrelse. 3D-forstørrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

**AFM
billede af
multilags
semi-
conductor
taget
med
TopoMetrix
Voyager.**



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

solpanelerne udsættes for direkte bestråling af de energirige partikler (ofte med relativistiske hastigheder), som ledsager en voldsom solaktivitet. Det er muligt, at det er den heraf følgende elektrostatiske opladning af dele af satellitten, der er årsag til de problemer, som kan opstå. I begyndelsen af 1997 ophørte fx en kommunikationssatellit med at fungere i forbindelse med et sådant soludbrud, og den kunne ikke senere genaktiveres. Prisen på en sådan satellit er omtrent 400 mio. \$.

En rutinemæssig justering af satellitters retning består i at tilpasse en strøm gennem en strømkreds ombord på satellitten. Satellitten får da et drejningsmoment gennem vekselvirkningen mellem Jordens magnetfelt og den magnetiske dipol, som er ækvivalent med strømsløjfen. Under intense geomagnetiske forstyrrelser kan magnetopausen imidlertid, som nævnt før, krydse satellittens bane, således at den pludselig befinder sig i et magnetfelt af anden styrke og anden retning end det, der blev antaget ved planlægningen af korrektionen i dens retning. (I værste tilfælde kan magnetfeltets retning være den modsatte af det, der blev antaget.) Som konsekvens kan satellitten få en anden orientering end den tilsigtede, og for eksempel kan solpanelernes belysning derved blive uhensigtsmæssig og satellittens antenner rettet forkert. Dette specielle eksempel fremhæver igen betydningen af pålidelige og forudsigelige magnetfelt modeller.

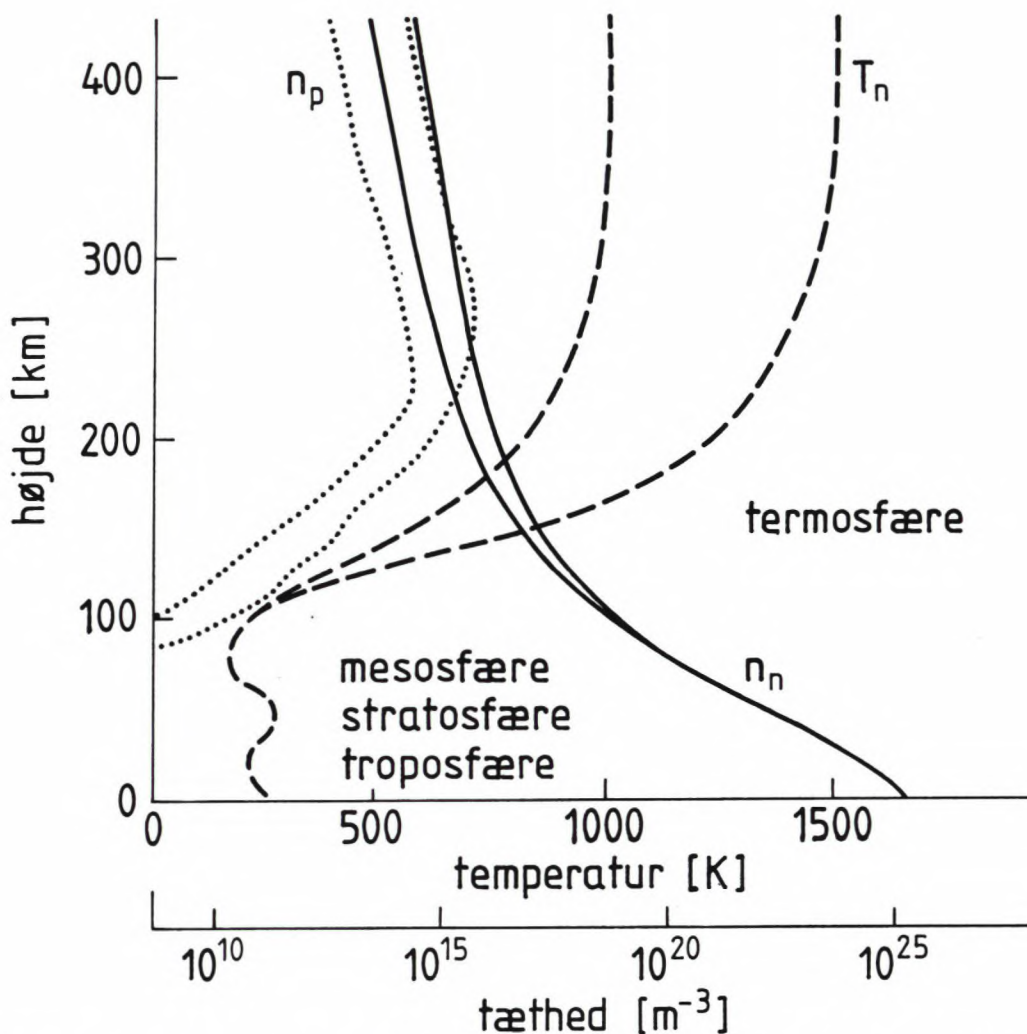
Forstyrrelser nærmere Jorden har en noget anden karakter end i den ydre magnetosfære. I afstande 600–800 km over Jorden, hvor de fleste jordobservations-satellitter befinder sig, er det friktionen med den tynde rest-atmosfære, der er afgørende for satellitlevetiden⁶. Der er her kun yderst sjældent tale om dramatiske påvirkninger. Konsekvensen af luftmodstanden er imidlertid yderst reel; rumteleskopet HUBBLE, som ideelt befinder sig i en afstand af ~ 600 km over jorden, daler for eksempel cirka 10 km/år på grund af denne friktion, og det har allerede én gang været nødvendigt at accelerere det op til en højere bane. Dette skete i forbindelse med den meget omtalte reparation af det optiske system. Tilsvarende forhold gør sig gældende for meteorologiske satellitter, som fx måler bølgehøjder på havene ved μ -bølgereflektion. For bølgehøjder op til 25 m er målenøjagtigheden $\sim 10\%$, hvilket opnås ved en analyse af det samlede refleksionsmønster, hvoraf hele bølgeformen aflæses. Kapillarbølgerne indeholder desuden information om vindretningen, som derfor også kan bestemmes. For disse målinger er et kendskab til satellittens absolutte position med nogle meters nøjagtighed tilstrækkelig. Imidlertid er en *absolut* bestemmelse af havniveauet af stor betydning for klimatiske modeller, fx for isafsmeltningen ved polerne, og i denne forbindelse er en nøjagtighed på ± 10 cm (sic!) i baneberegningen ønskelig. Lignede overvejelser gør sig gældende for bestemmelse af kontinentaldriften ved hjælp af satellitmålinger. En sådan præcision kræver ekstremt gode banemodeller, og dermed tilsvarende gode atmosfæremodeller, og opnås ved, at interpolere mellem satellitpositioner (fx for ESA's ERS satellitter) målt med

op til en uges mellemrum. En egentlig forudsigelse af en senere position ud fra en måling er noget mere usikker, og unøjagtigheden kan let blive omkring 1 m på en uges tid, men selv dette sætter ekstreme krav til atmosfæremodellernes nøjagtighed. Magnetosfæriske storme repræsenterer et usikkerhedsmoment for disse modeller, idet de ændrer den øvre ionosfæres tæthed og sammensætning på en ikke forudsigelig måde. I mange numeriske modeller har man indført fænomenologiske korrektionsfaktorer for disse ændringer, men i tilfælde, hvor disse ikke er tilstrækkelige, må den aktuelle, nye, satellitposition måles eller bestemmes på anden måde. Disse problemer er især af betydning for satellitter i polare baner, hvor forstyrrelser er hyppigst. Disse satellitbaner er netop nu blevet specielt vigtige, blandt andet i forbindelse med olieeftersøgningen i arktiske områder.

Positionsbestemmelse af objekter i kredsløb omkring Jorden er også vigtig i forbindelse med det katalog på over 20.000 satellitfragmenter og andre fremmedlegemer, som hidtil er registrerede i baner omkring Jorden. Alene deres store antal udgør en belastning på regnekapaciteten ved baneberegningerne. Positions og afstandsbedømmelse med den ønskede nøjagtighed ved laser- og μ -bølgemetoder er ikke i sig selv noget problem. Sådanne korrektioner er uundgåelige, og bliver først et problem, hvis de nødvendige målinger skal foretages ofte til løbende banekorrektioner. Jo bedre atmosfæremodeller man råder over des færre sådanne målinger er nødvendige.

Den øvre ionosfæres sammensætning og tæthed og den deraf følgende friktion, som satellitter udsættes for, er varierende på flere forskellige tidsskalaer. En vigtig variationsperiode er Solens 11 årige cyklus, som er tidsintervallet mellem to maxima af solmagnetfeltets intensitet (med ændret polaritet). En vigtig koblingsmekanisme fra Solen til atmosfærens sammensætning⁶ er forbindelse variationen i den ekstreme ultraviolette stråling (EUV), som giver variationer i energiafsættelsen i Jordens termosfære i højdeområdet omkring 150 km, se figur 5. Ændringer i termosfæren medfører så variationer i atmosfæreprametrene i andre højdeområder. Kendskabet til atmosfærens tæthed og sammensætning er yderst vigtig for baneberegninger, måske lige så vigtig som kendskabet til variationerne i det lokale tyngdefelt når satellitterne bevæger sig over varierende terræn, bjergkæder og havområder.

Den regelmæssige variation af atmosfæreprametrene er kendt og kan i princippet indbygges i modeller, i det mindste med en acceptabel nøjagtighed. Imidlertid giver magnetiske storme, som nævnt, anledning til pludselige, og kun vanskeligt forudsigelige ændringer i ionosfæretætheden. Dette forårsages antageligt af kraftig lokal opvarmning af polarområdernes ionosfære dels gennem precipitation af energirige partikler (overvejende elektroner) fra magnetosfæren, og dels gennem Joule'sk opvarmning ved dissipation af elektriske felter, der også har deres oprindelse i magnetosfæren⁶. Det kan være instruktivt at diskutere nogle af de detaljerede fysiske mekanismer bag nogle sådanne processer. Som illus-

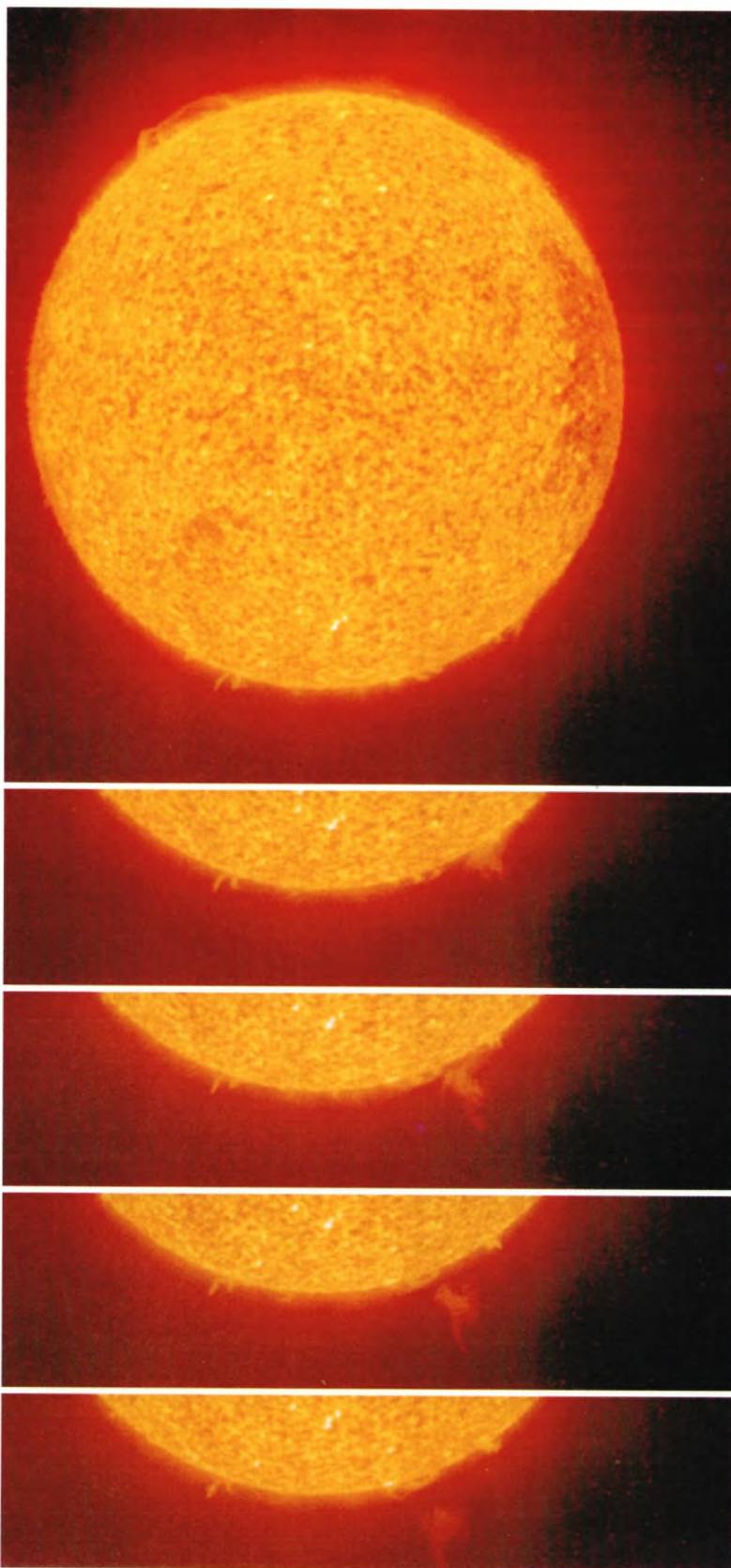


Figur 5. Højdevariation af neutraltætheden, n_n , vist fuldt optrukket, og plasmataetheden, n_p , vist med punkteret streg, begge i semilogaritmisk afbildning. Temperaturvariationen af den neutrale komponent, T_n , er vist stiplet på lineær skala. I alle tre tilfælde er variationsområdet af de pågældende parametre angivet ved to kurver. Endelig er visse standardbetegnelser for udvalgte højdeområder (troposfære etc.) også anført. Nordlys og sydllys observeres oftest i højdeområdet 100–200 km.

tration betragtes de såkaldte magnetiske substorme, som ofte optræder i forbindelse med de egentlige magnetiske storme, men har en noget kortere varighed, typisk ~ 1 time; flere substorme kan optræde inden for en magnetisk storm (selvom en substorm dog også kan optræde ved moderat geomagnetisk aktivitet). Disse substormes vekselvirkning med ionosfæren er lokaliseret primært til nordlyszonerne. Ved mekanismer, som endnu ikke er fuldt forståede, sker en pludselig ændring i den neutrale fladestrøm ("neutral sheet current"), se figur 2. Ofte kan strømbanen helt afbrydes. Det lokale magnetfelt nærmer sig da det simple Jordmagnetiske dipolfelt på Jordens natside. Som konsekvens ændres både magnetfeltets retning og intensitet. Det tidsvarierende magnetfelt inducerer et elektrisk felt som har en komponent langs det magnetiske felt. Derfor accelereres ladede partikler fra plasmaet i magnetosfærens natside i retning mod Jorden ionosfære. Da ledningsevnen i det tynde magnetosfæriske plasma er stor, ligesom i solvinden, er nedbremsningen af disse hurtige partikler

forsvindende, indtil de når områder med stigende neutraltæthed. Her giver de blandt andet anledning til nordlys ("sydllys" i Antarktis). De hurtige partikler afsætter deres energi i den øvre ionosfære, og den resulterende opvarmning giver anledning til en ekspansion af disse øvre lag af ionosfæren med en deraf følgende formindskning af partikkeltætheden. Lige så vigtigt for påvirkningen af satellitter er det antageligt, at tilstedeværelsen af et større antal frie ladningsbærere bidrager til en ændring af ionosfærens kemiske sammensætning med en deraf følgende ændring i viskositeten.

Korrekte forudsigelser af kraftige magnetosfæriske og atmosfæriske forstyrrelser er ikke i sig selv tilstrækkelige til, at uheldige følgevirkninger kan undgås. Forude ligger et stort udviklingsarbejde af blandt andet sikkerhedsudstyr for satellitter, som kan aktiveres fra Jorden for at begrænse eller helt undgå skader.



Figur 6. Observation af "coronal mass ejection" (CME) fra Solen observeret via satellit. CME observeres lettest når det sker på solranden, som her i nederste højre del. En karakteristisk længdeskala for den observerede CME er $30 \cdot 10^3 \text{ km} \approx 5 R_E$. Tidsintervallet mellem billederne er omtrent 20 minutter. Forekomsten af CME, og solaktiviteten generelt, har en 11 årig periode, den såkaldte solcyklus, som også observeres ved solpletaktiviteten. Ved maximum i Solens cyklus kan der opstå forstyrrelser af varierende intensitet næsten hver dag (men ikke nødvendigvis *alle* dage) i en måned, mens det ved solminimum stadig er usædvanligt, hvis en hel måned forløber uden forstyrrelser⁴.

Konklusion

Det er oplagt, at de store økonomiske udgifter og andre omkostninger der kan være konsekvensen af kraftige forstyrrelser af Jordens magnetsystem har medført en øget opmærksomhed omkring overvågning af solaktiviteten og forsøg på forudsigelser af magnetiske forstyrrelser. Erfaringsmæssigt viser det sig, at det ikke er tvungende nødvendigt at forstå et fænomen for at kunne forudsige det, og en vigtig aktivitet består i at opstille fænomenologiske modeller baseret på et omfattende observationsmateriale, hvorfra man kan forudsige magnetosfæriske forstyrrelser. Modellernes begyndelsesbetingelser tages fra observationer af solaktivitet, og modelligningerne løses numerisk, mens løsningerne opdateres og kalibreres løbende ved observationer. Selvom mange af disse modeller er helt eller delvis empiriske, har de vist sig effektive for forudsigelser om magnetisk aktivitet på Jorden på kort sigt. Modellerne indeholder ofte i tillæg en forudsigelse af schockfronters forløb, variationerne i solvindparametre m. v., for store områder i vort nære verdensrum. Det er imidlertid ikke altid umiddelbart indlysende, hvad man helt specifikt ønsker at forudsige. Et ideelt mål kunne være en forudsigelse af geomagnetiske index som A_p nævnt før, og der er gjort nogle fremskridt i så henseende⁴. Observationer i solvinden gør det i dag muligt at komme med nøjagtige varsler om forøget geomagnetisk aktivitet nogle timer, måske en dag, i forvejen. For flere dages forvarsler øges fejlraten.

Forsøget på at opnå en detaljeret forståelse af sammenhængen mellem solaktivitet og magnetiske forstyrrelser er af ældre dato og stammer tilbage til tiden, hvor solvinden blev opdaget. De første forestillinger om tilstedeværelsen af en solvind blev formulerede omkring århundredeskiftet, men blev først præciserede omkring

1950, blandt andet efter grundige studier af komethaler, hvis dannelse og acceleration netop skyldes solvinden. En lang række af instrumenterede satellitter har bidraget til den øgende forståelse af det komplicerede dynamiske system, som udgøres af Jordens ionosfære og magnetosfære. SOHO satellitten, opsendt sidst i 1995, har vist sig at være et særdeles værdifuldt værktøj ved indsamlingen af data for solaktiviteten, og det er for nylig (medio 1997) besluttet at forlænge projektet med yderligere 5 år. Det er imidlertid klart, at vejrforudsigelserne i Jordens nære verdensrum ikke på langt sigt kan baseres på forskningssatellitter som SOHO, som alle har en begrænset levetid, og desuden i sig selv repræsenterer en væsentlig investering. Målet med arbejdet er at opnå en så grundig forståelse af koblingen og vekselvirkningen mellem solvinden og jordmagnetosfæren, at forudsigelser og analyser kan baseres på observationer fra Jorden.

Ud over forvarsling af mulige forstyrrelser giver overvågningen af solvinden og Jordens magnetosfære også værdifulde oplysninger om ionosfæren og magnetosfæren ved magnetiserede planeter i en mere generel forstand. Solen og planeterne i vort solsystem udmærker sig ikke i nogen nævneværdig grad i astronomisk og astrofysisk sammenhæng, udover ved at være tilgængelige for målinger og i visse sammenhænge endog for aktive eksperimenter. Den opnåede information om vort eget solsystem kan anvendes også på magnetosfæreforhold i anden og mere generel sammenhæng, og kan bidrage til en dybere forståelse af andre sol- og planetsystemer, hvorfra detaljerede data ikke umiddelbart er tilgængelige.

Forfatteren takker Kåre Aksnes og Marit Øyeroset for værdifulde kommentarer. Liv Larssen ved Nordlysobservatoriet i Tromsø har ydet stor hjælp ved tegningen af de sort-hvide figurer. En tak også til V.O.Jensen for kommentarer til en tidligere version af manuskriptet.

Boks: Magnetohydrodynamik

Den simpleste beskrivelse af den dynamiske opførsel af et magnetiseret plasma er baseret på de magneto hydrodynamiske (MHD) ligninger. Den simpleste udledning er baseret på kontinuitetsligningen

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot (V\rho) = 0, \quad (4)$$

og Navier-Stokes ligningen

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t}V + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla P + J \times B, \quad (5)$$

hvor det sædvanlige kraftled, gradienten af trykket, er kompletteret med $J \times B$ -kraften og eventuelt også tyngdekraften $\rho g(r)$ som i (2). Et viskositetsled kan have betydning i nogle tilfælde, men det er udeladt her. Da et plasma er en god leder, kan man gå ud fra at variationer i ladningstætheden, og de dermed forbundne elektriske kræfter, hurtigt jævnes ud af store strømme, således

at et elektrisk kraftbidrag i (5) kan udelades. De elektriske felter, som har betydning for MHD-beskrivelsen, skyldes således ikke ladningsophobninger men induceres af tidsvarierende magnetiske felter, i.e.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t}B. \quad (6)$$

Da MHD-beskrivelsen kun er gyldig for langsomme variationer kan Maxwell's forskydningstrøm udelades i $\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \partial E / \partial t$, da den er lille sammenlignet med strøm bidraget. Magnetfeltets intensitet bestemmes altså ud fra strømtætheden ved Ampères lov

$$\nabla \times B = \mu_0 J. \quad (7)$$

Ohm's lov optræder på formen

$$J = \sigma(E + V \times B), \quad (8)$$

hvor andet led i parantesen repræsenterer det elektriske felt, som induceres ved plasmaets bevægelse.

Kombineres (6), (7) og (8) fås en modificeret diffusionsligning af formen

$$\frac{\partial}{\partial t} B = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 B + \nabla \times (V \times B). \quad (9)$$

Den relative betydning af de to led på venstre side måles ved det magnetiske Reynolds tal, R_m , introduceret i teksten. Ved små hastigheder, V , fås en ren diffusionsligning, og en diffusionshastighed kan defineres som $(1/\mu_0 \sigma) B'/B$, hvor B her kan fortolkes som den dominerende magnetfeltskomponent og $'$ antyder differentiation med hensyn til koordinaten i den retning i rummet, hvor dette felt varierer hurtigst.

Et vigtigt specialtilfælde er grænsetilfældet, hvor det magnetiske Reynold's tal, R_m , er meget stort. Her kan man antage, at $\sigma \approx \infty$. Ud fra simple fysiske krav forventes det, at strømstyrken er endelig for endelige elektriske felter, hvilket giver den simple relation

$$E + V \times B = 0. \quad (10)$$

Endelig kan ligningerne simplificeres ved, at antage at plasmabevægelsen er usammentrykkelig. Dette er forsvarligt for lave hastigheder V , dvs. små Mach tal.

Ligningssystemet sluttes med en tilstandsligning, det vil sige en relation mellem trykket P og tætheden ρ

$$P = f(\rho). \quad (11)$$

Den matematiske form for f afhænger af problemets art, fx er det rimeligt at antage isoterme forhold, $f = \text{const } \rho$,

når det er *statiske* løsninger, man ønsker at behandle. Alternativt, for *dynamiske* forhold antages som regel adiabatiske forløb, $f = \text{const } \rho^\gamma$, hvor $\gamma = c_p/c_v$ er forholdet mellem varmekapaciteterne for konstant tryk og konstant volumen. Det er vigtigt at fremhæve, at den før omtalte antagelse om usammentrykkelighed er ækvivalent med en tilstandsligning, idet den medfører en relation mellem ∇P og ρ , J og B gennem (5).

Selvom de bygger på en række simplificerende antagelser, har MHD-ligningerne været studeret grundigt i analysen af astrofysiske forhold. Her skal blot nævnes, at for forhold med konstant plasmataethed, $\rho = \rho_0 = \text{const}$, og homogent magnetfelt $B_0 = \text{const}$, fx i z -aksens retning, kan en simpel løsning findes som $B = B_0 + B_1$ med $B_1 = \tilde{B} \exp[i(\omega t - kz)] + \tilde{B}^* \exp[-i(\omega t - kz)]$, hvor $B_1 \perp B_0$ og $\tilde{V} = -\tilde{B}(k/\omega)B_0/(\mu_0 \rho_0)$, såfremt $(\omega/k)^2 = B_0^2/(\mu_0 \rho_0) \equiv V_A^2$. Her er V_A den såkaldte Alfvén hastighed. Disse specielle løsninger kaldes som regel cirkulært polariserede Alfvén bølger. Bemærk at det drejer sig om eksakte løsninger til ligningerne, idet de problematiske ikke-lineære led forsvinder for de antagede fysiske forhold.

De angivne løsninger gælder for specielle antagelser om magnetfelt og plasmataethed. De mere generelle forhold, som dem der er aktuelle for eksempel for Jordens magnetosfære, tillader ikke eksakte analytiske løsninger. Disse forhold kræver numeriske analyser af de magneto-hydrodynamiske ligninger, et studium der i praksis kan være overordentlig kompliceret og tidskrævende.

Referencer:

- 1) E. Ungstrup, *Jordens magnetosfære*, Naturens Verden, 121–136 (1983). Letlæselig oversigtsartikel.
- 2) A. J. Dessler, *Solar wind and interplanetary magnetic field*, Rev. of Geophys. **5**, 1–41 (1967). Klassisk oversigtsartikel, ikke så let læst.
- 3) G. K. Parks, *Physics of Space Plasmas* (Addison-Wesley, 1991). Ofte anvendt lærebog, der blandt andet indeholder diskussion af grundlæggende forhold omkring solvinden og dens vekselvirkning med Jordens magnetosfære.
- 4) J. A. Joselyn, *Geomagnetic activity forecasting; the state of the art*, Rev. of Geophys. **33**, 383–401 (1995). Oversigtsartikel rettet især mod forståelse af geomagnetiske indeks som A_p nævnt i teksten. Nogle forkundskaber om solfysik er en fordel, men ikke absolut nødvendige. Artiklen indeholder et stort reference materiale.
- 5) N. C. Maynard, *Space weather prediction*, Rev. of Geophys. Suppl. 547–557 (1995). En noget komprimeret oversigtsartikel.
- 6) R. L. Walterscheid, *Solar cycle effects on the upper atmosphere: implications for satellite drag*, J. Spacecraft **26**, 439–444 (1989). Teknisk præget oversigtsartikel rettet specielt mod satellitforhold.
- 7) V. O. Jensen, *Magnetfelter er spændingstilstande i rummet*, KVANT **6**, 1–10 (1995).



Hans Pécseli er professor ved Fysisk Institut, Universitetet i Oslo, samt adjungeret professor ved Universitetet i Tromsø. Se iøvrigt internetadressen: www.fys.uio.no/plasma/index.html

Vejledning for forfattere

Redaktionen af KVANT modtager meget gerne artikler fra læserne. Indholdet af artiklerne bør være forståelig for personer med interesse for fysik – således at en god gymnasieelev vil få noget ud af at læse artiklen. Illustrationer til artiklerne er meget velkomne.

Det er håbet, at der vil komme en række rubrikker – der er allerede en debatside, som er åben for indlæg om alt hvad der rører sig om fysik. Bladet vil også bringe meddelelser fra Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse, ligesom omtale af arrangementer, der kan have interesse for fysikinteresserede vil blive bragt. Da der kun kommer fire numre om året skal der gives meddelelse om et givet arrangement i god tid, hvis det skal kunne komme med i bladet. Redaktionen vil også stræbe efter at kunne bringe korte notitser med friske nyheder og anmeldelser af bøger af interesse for fysikere.

Vejledning i udformning af artikler til KVANT

For at lette produktionen modtages artikler helst på elektronisk facon. Det kan enten være som elektronisk post til e-mail adressen

kvant@nbi.dk

eller (hellere) på en DOS-formatteret diskette, der sendes til

KVANT
c/o Mads Hammerich
Gersonsvej 40
2900 Hellerup

eller afleveres til et redaktionsmedlem sammen med eventuelle figurer, og – *meget vigtigt* – et billede og en præsentation af forfatteren, i stil med de præsentationer,

der findes i slutningen af hver artikel i dette nummer.

Teksten kan være skrevet i $\text{\LaTeX}$, som ren ASCII fil, i WordPerfect eller Word. De første formater foretrækkes.

Formler og specielle symboler kan indsættes i teksten med $\text{\LaTeX}$ eller $\text{\TeX}$. De modtages dog under alle omstændigheder også gerne på papir.

Illustrationer og billeder til artiklerne afleveres separat – det er (endnu) en kvalitetsmæssig fordel at indsætte disse i artiklen på sædvanlig facon. Undlad venligst at afsætte plads til dem i teksten, men placer figurforklaringen til sidst eller for sig selv.

Tabeller og opstillinger ønskes som simple opstillinger med tabulatorer. Brug ikke for megen energi på at lave “snedige” opstillinger med linier og lignende, men vis gerne på papir hvordan du selv ville foretrække det.

- Forfatternavne skrives med kursiv.
- Afsnitoverskrifter skrives med fed skrift.
- Der er ingen tomme linier mellem afsnit, men de indledes med en indrykning (tabulering).
- Referencer anføres i teksten med et løftet ciffer, og anføres til sidst i artiklen med nummer, forfatter, artikel (eventuelt bind-nummer med fed skrift), sidetal og årstal i parentes.
- Husk et billede og en kort præsentation af forfatteren.
- Forfattere der skriver i $\text{\LaTeX}$ kan rekvirere en skabelon, at skrive i, hos redaktionen.

Abonnement på KVANT

koster 135 kr for en årgang og vil blive opkrævet pr. giro. Nye abonnenter vil modtage eventuelle tidligere numre af den løbende årgang. Medlemmer af Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse vil modtage bladet som et medlemsblad.

Hvis du mener at du har abonnement, men ikke får bladet – har du nok glemt at melde flytning af bladet hos dit lokale postkontor, eller måske har du ikke betalt. Bemærk at flytning af KVANT skal meddeles postvæsenet eksplicit!

Abonnement tegnes ved at skrive til

Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø, e-mail: koerner@math.ku.dk

Mindeord om Jens Linhard

Jens Ulrik Andersen og Ejvind Bonderup, Aarhus Universitet

Professor Jens Linhard døde pludseligt d. 15. oktober i en alder af 75 år. Med hans bortgang har vi og mange andre mistet en læremester af de usædvanlige. Jens Linhard blev i 1956 ansat som professor ved det nyoprettede Naturvidenskabelige Fakultet ved Aarhus Universitet, og gennem fyrré år satte han sit stærke præg på udviklingen af faget fysik. Jens Linhard blev internationalt især kendt for sine banebrydende teoretiske arbejder vedrørende atomare partiklers nedbremsning i stof. Senest blev hans indsats hædret ved en kongres i Beijing i sommeren 1997, og han blev udnævnt til æresdoktor ved Fudan Universitetet i Shanghai. Jens Linhards betydning for dansk fysik blev markeret ved flere lejligheder. Han modtog således i 1988 som den første Dansk Fysisk Selskabs Fysikpris og blev i 1996 udnævnt til æresdoktor ved Odense Universitet.

Et hovedværk fra den tidlige periode ved Universitetets Institut for Teoretisk Fysik i København omhandler elektromagnetiske felter i en gas af frie elektroner. Det udledte udtryk for den frekvens- og bølgetalsafhængige dielektricitetskonstant, "the Linhard function", har siden fået stor betydning, ikke alene som udgangspunkt for beregninger af stoffernes elektromagnetiske egenskaber, men også som grundlag for udvikling af almene metoder til analyse af mangelegemesystemer. Men hans hjertebarn var og blev udforskningen af atomare kollisioner, et forskningsfelt han allerede havde dyrket i samarbejde med Niels Bohr. Det blev et hovedindsatsområde ved Det fysiske Institut i Århus, hvor der opstod et frugtbart sarnspil med den eksperimentelle forskning, der var under opbygning. Jens Linhard var teoretiker, men tillagde den nære kontakt til eksperimenter stor betydning, og igennem en årrække var han primus motor ved ugentlige, fælles frokostmøder for teoretikere og eksperimentatorer. Her måtte det vise sig, hvilke af de nye ideer og forslag, der kunne stå distancen over for Jens' analyse. Han publicerede en række banebrydende teoretiske afhandlinger om nedbremsning og rækkevidde af ioner, og også internationalt blev han i en menneskealder den førende teoretiker inden for området.

Jens Linhard kunne arbejde hårdt og koncentreret,

men han arbejdede aldrig med tidsfrister. Offentliggørelse kunne først komme på tale, når et emne var fuldt belyst og forstået, og løsningerne på problemerne var opnået på adskillige måder. Han nedskrev ofte sine overvejelser og beregninger som "tanker", der senere kunne tages op til ny bearbejdning og eventuelt publikation. Der er mange, der har skrevet flere afhandlinger end Jens, men der er få, der er nået op på hans niveau. Et særkende var hans evne til gennem en original betragtningssmåde at indkredse det væsentlige i en problemstilling, og han evnede at sætte et observeret fænomen ind i en større og mere basal sammenhæng. Ofte udledte han sine resultater ud fra få, enkle forudsætninger, hvis konsekvenser blev analyseret med stor skarpsindighed og konsekvens.

Et godt eksempel er det skelsættende arbejde om "strengeffekten". Eksperimenter havde vist, at hurtige, atomare partikler kunne trænge overraskende langt ind i krystaller, hvor atomerne sidder i et regelmæssigt, geometrisk mønster. Med udgangspunkt i en kritisk analyse af observationerne udviklede Jens Linhard sin teori for strengeffekten. Han viste, at partiklerne kan blive reflekteret fra atomer, der sidder som perler på en snor eller streng, omtrent som en flad sten, der slår smut på en vandoverflade. Gennem sine beregninger forudsagde han en dramatisk konsekvens, en næsten total udslukning af kernereaktioner og lignende processer, der kun foregår, når en partikel støder hårdt ind i et atom. Denne forudsigelse blev hurtigt bekræftet af eksperimenter, og effekten har siden fået stor betydning, blandt andet som et redskab til undersøgelse af materialers egenskaber.

Jens Linhard havde en meget bred viden om fysik og var livet igennem optaget af de fundamentale problemer i fysikken. I 1974 blev han af Selskabet til Naturlærens Udbredelse tildelt ørstedmedaljen, og ved den lejlighed holdt han et foredrag, der var centreret omkring begreberne sandsynlighed og irreversibilitet. Det indeholder overvejelser, som stadig er lige aktuelle, og det illustrerer både Jens' originale tænkning og hans meget personlige stil. Vi mener derfor, at et genoptryk af dette foredrag vil sætte et smukt minde over fysikeren og mennesket Jens Linhard.