

KVANT Oktober 1999 3

Fysisk Tidsskrift

10. årgang



- STORT TEMANUMMER OM LAGERRINGEN ASTRID: ●
- ASTRID OG LILLESØSTER ELISA ● LASERKØLING ● KLYNGER ● MOLEKYLER ●
- ASTROFYSIK ● NEGATIVE IONER ● RØNTGENMIKROSKOPI ● OVERFLADER ●
- FYSIK I DEN POST-GENOME ÆRA ● SAMARBEJDE MED ASTRONOMISK SELSKAB ●

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

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

E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab

Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.)
DCESS, NBIfAFG, KU
Søren Pape Møller (medredaktør på dette
nummer), ISA, Aarhus Universitet
Michael Cramer Andersen (nyhedsred.)
Astronomisk Observatorium, KU
Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen
Roskilde Kathedralskole
Torsten Freltoft
NKT Research Centre
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år.

Annoncepriser

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

Priserne er excl. moms og for repro-
klart materiale. Henv. om annoncer til
Redaktøren, tlf. 35 32 05 73 / fax 35 32
05 76.

Oplag: 2500

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

Produktionsplan

Nr. 4-99 udkommer ca. 1. december
Nr. 1-00 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-00 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages mindst to måneder før.

Indhold:

Lagerringen ASTRID og hendes lillesøster ELISA <i>Niels Hertel og Søren Pape Møller</i>	3
Laserkøling af lagrede ionstråler <i>Niels Kjærgaard, Niels Madsen og Jørgen S. Nielsen</i>	12
Klyngefysik <i>Jens Ulrik Andersen og Preben Hvelplund</i>	17
Molekyler studeret i ASTRID og ELISA <i>Lars H. Andersen</i>	19
Atomfysik med synkrotronstråling: Laboratorie-astrofysik <i>Torkild Andersen, Finn Folkmann, Henrik Kjeldsen og Helge Knud- sen</i>	22
Negative ioner studeret ved ASTRID: En legeplads for grundlæggende atomfysik <i>Peter Balling</i>	24
NKT Forskerprisen 1999 <i>Kvanteoptik – og mere end kælderkolde atomer i Århus. Folder om årets fysikpris</i>	Midtersiderne
Errata <i>Robert Feidenhans'l, Leif Gerward og Janus Staun Olsen</i>	26
Nyt fra Dansk Fysisk Selskab	27
Et nyt Kvant – i samarbejde med Astronomisk Selskab <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	31
Kvant-nyheder <i>Michael Cramer Andersen</i>	32
Røntgenmikroskopi med en opløsning på 30 nm <i>Robin Medenwaldt</i>	35
Overfladestudier med fotoemissionsspektroskopi <i>Søren V. Hoffmann, Jakob Haahr Petersen og Jens Onsgaard</i>	38
Fysik i den post-genome æra <i>Ole G. Mouritsen</i>	43
Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse	47
Kupon til bestilling af Kvant	47

Forsiden:

Billedet på Kvants forside viser udsigten fra en dipolmagnet på lager-
ringen ASTRID. Som en vifte går synkrotronstrålingsbeamlines herfra
ud i eksperimentområdet.

Dette nummer af Kvant er et temanummer om forskningen ved
ASTRID. Læs artiklerne på side 3, 12, 17, 19, 22, 24, 35 og 38!

Lagerringen ASTRID og hendes lillesøster ELISA

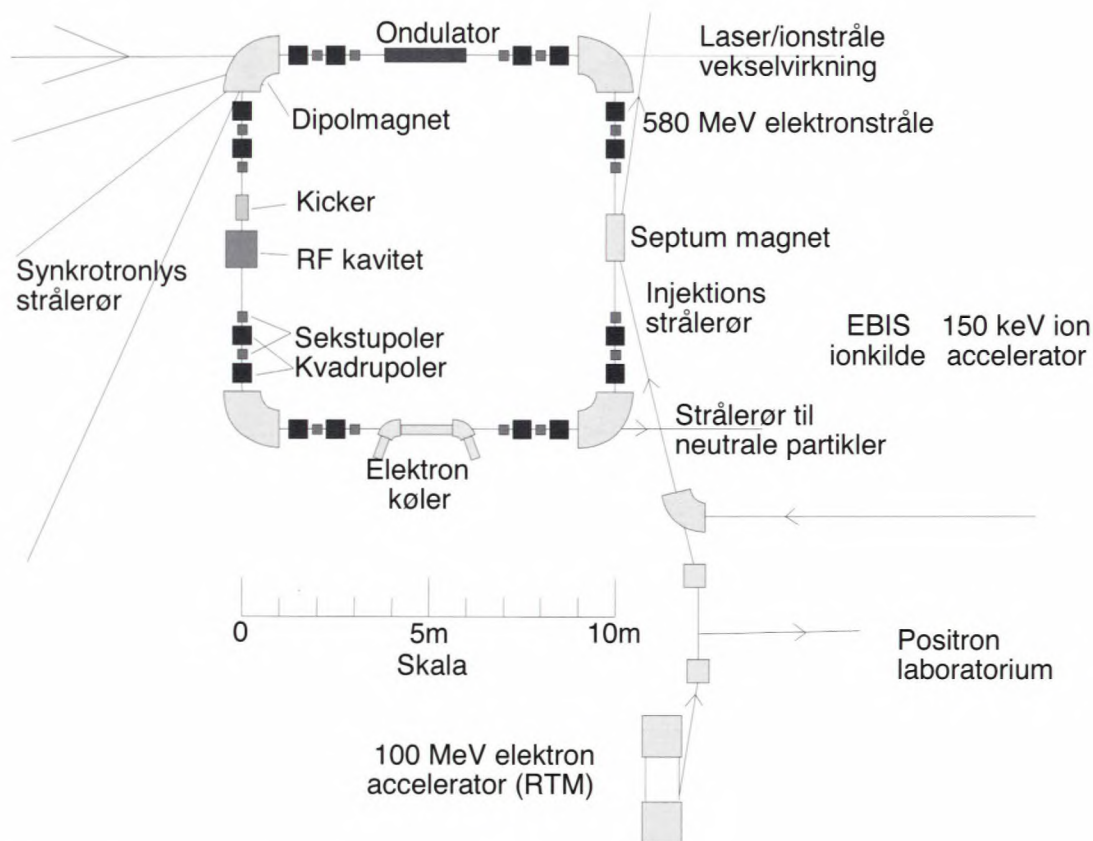
Niels Hertel og Søren Pape Møller, ISA, Aarhus Universitet.

Introduktion og historie

Udviklingen af accelerators har været nært knyttet til elementarpartikelfysikken, der i den forbindelse er synonym med højenergifysik. Ny erkendelse indenfor dette felt har fordret stadig større og større partikelenergi. Der har dog været undtagelser fra denne regel, hvor specialiserede accelerators er blevet udviklet til specifikke formål. Et eksempel er synkrotronstrålingslagerringene. I begyndelsen var synkrotronstråling et spildprodukt fra elektron-positron "colliderne", men i dag er synkrotronstrålingsfaciliteterne højt specialiserede accelerators med deres egne karakteristika. En anden undtagelse er de såkaldte køler-synkrotroner til akkumulering, acceleration, køling samt lagring af intense stråler af ioner. Disse accelerators er udsprunget af antiprotonringene, specielt LEAR (Low Energy Antiproton Ring) på CERN.

I begyndelsen af 80'erne begyndte LEAR med lagring af antiproton stråler med energier ned til 6 MeV. Elektronkøling og stokastisk køling var blevet udviklet med enorme forbedringer i antiprotonstrålernes

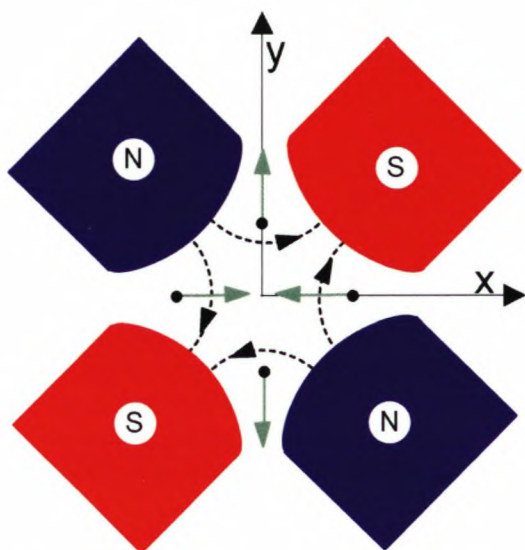
kvalitet. Efter fremkomsten af LEAR, deltog fysikere fra Århus i designet af ELENA (Extra Low ENergy Antiproton ring), der skulle kunne decelerere og lagre antiprotoner ved energier ned til 200 keV. Dette projekt blev aldrig realiseret, men sammen med LEAR var det forløberen til ASTRID. Samtidig med opbygningen af ASTRID udvikledes der også på andre laboratorier ion-lagerringe: CRYRING og CELSIUS i Sverige, TSR, COSY og ESR i Tyskland, TARN i Japan samt IUCF i USA. Det var under designet af ELENA blevet klart at opbygningen af en lagerring til ioner i Århus kunne øge mulighederne inden for atomfysik med stråler af hurtige ioner, specielt med den eksisterende ionkildeekspertise. Under designet af ASTRID blev det også indset at en lagerring principielt kan lagre både positive og negative ioner samt elektroner. Ved lagring af elektroner kunne forskningspotentialet af ASTRID øges væsentligt ved anvendelse af synkrotronstrålingen indenfor forskellige forskningsområder. Derfor blev ASTRID (Aarhus STorage Ring for Ions and electrons, Denmark) den første lagerring i verden der kunne lagre både ioner og



Figur 1. Principskitse af lagerringen ASTRID samt tilhørende faciliteter.

elektroner. En skitse af ASTRID acceleratorkomplekset er vist i figur 1.

Alternativt til lagerringe kan ioner også lagres i elektromagnetiske fælder, enten såkaldte “Penning Traps” eller “RFQ Traps”. I sådanne fælder findes der ingen feltfrie områder. Yderligere er ionernes middelhastighed overalt meget lille, hvilket gør detektering af sekundærpartikler, det være sig elektroner eller molekyfragmenter, besværlig. Dette i modsætning til lagerringe, som vi skal se herefter.



Figur 2. Kvadrupolmagnet. Feltforløbet er vist med stiplede linier, og kræfter på en negativ partikel med retning ind mod papiret er vist med grønne pile.

Vi skal i dette temanummer af Kvant beskrive lagringsfaciliteterne omkring ASTRID. I nærværende bidrag skal vi specielt se på nogle relevante acceleratorfysiske aspekter af synkrotroner og lagerringe, eksempelvis ved ASTRID. I de følgende artikler vil der blive givet eksempler på igangværende forskningsaktiviteter både fra ionlagrings- og synkrotronstrålingsprogrammet.

Elementer fra acceleratorfysikken

Der er i tidens løb udviklet mange forskellige typer af accelerators, men en af de mest universelle er den såkaldte synkrotron. Basis for denne acceleratortype er dels acceleration v.h.a. et RF (radiofrekvens) felt dels stærk transversal fokusering ved hjælp af kvadrupolmagneter.

Transversal bevægelse: Magnetisk set består en synkrotron af et system af dipol- og kvadrupolmagneter. Ofte konstrueres en synkrotron af et antal ens celler, der hver især består af et antal dipol-magneter og et vist antal kvadrupol-magneter.

I ASTRIDs tilfælde drejer det sig om en 90°'s dipol-magnet med en kvadrupol dublet på begge sider, se figur 1. Alle dipol-magneterne i en synkrotron har tilsammen en afbøjning på 360° således at ladede partikler vil cirkulere langs en lukket bane. En sådan synkrotron kaldes ved fast energi for en lagerring. Det er velkendt at der gælder en relation mellem magnetfelt B , krumningsradius R samt partiklernes impuls p . I praktiske enheder er denne relation

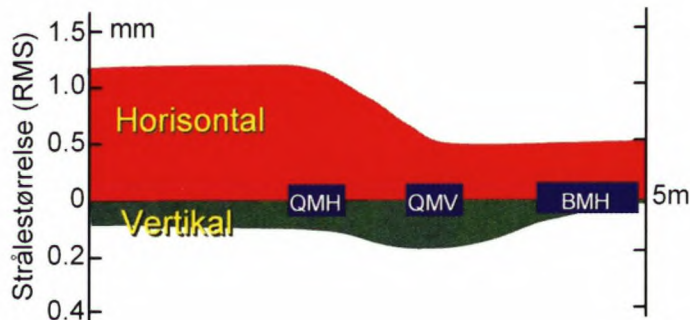
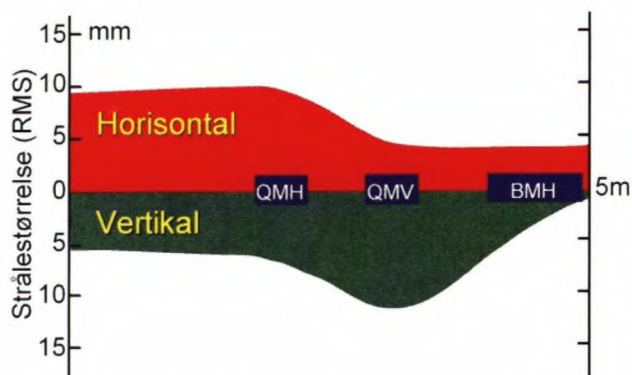
$$B[T]R[m] = 3.3356 p[GeV/c]. \quad (1)$$

Det maksimale magnetfelt i ASTRIDs dipolmagneter er 1.6 T og da afbøjningsradius er 1.2 m er den maksimale impuls 580 MeV/c svarende til 580 MeV elektroner.

Normalt er den transversale bevægelse, som er vinkelret på den optiske akse af de magnetiske elementer, afkoblet den longitudinale bevægelse. Yderligere er de to transversale komponenter, den horisontale og den vertikale, også uafhængige af hinanden.

Transversal fokusering foretages ved anvendelse af kvadrupolmagneter, se figur 2, hvor polprofilen er hyperbel-formet. Dette giver anledning til et magnetfelt proportionalt med afstanden til centret, $B_x = ky$ samt $B_y = kx$, hvilket sørger for en konstant defokuserende/fokuserende kraft $F_x = -ky$ samt $F_y = kx$.

Den transversale bevægelse kan nu udledes fra Newtons anden lov, og man får herved Hill's ligning



Figur 3. Horisontal og vertikal beamstørrelse i 1/8 af ringen af hhv. en ionstråle (til venstre) og en 580 MeV elektronstråle i ASTRID. Bemærk de forskellige y-akser. Elektronstrålens størrelse er ca. 50 mikrometer i midten af dipolmagneten.

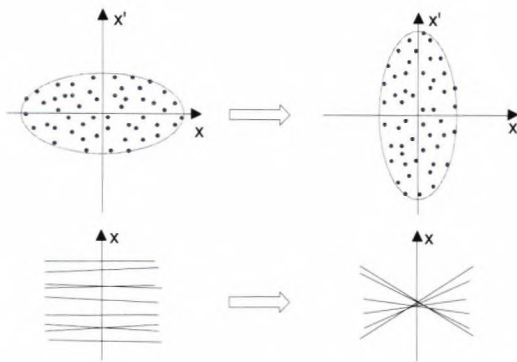
$$\frac{d^2z}{ds^2} + k(s)z = 0, \quad (2)$$

hvor $z = x, y$ er enten den horisontale eller vertikale transversale koordinat og s er koordinaten rundt langs den lukkede bane. Denne ligning er som ligningen for den harmoniske oscillator men med en fjederkraft der afhænger af s : $k(s) = \pm k$ i de fokuserende/defokuserende kvadrupoler samt 0 alle andre steder. Løsningen til denne ligning er en quasi-harmonisk bevægelse

$$z = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\psi(s) + \lambda), \quad (3)$$

hvor den såkaldte emittans ϵ er en konstant og hvor amplituden β er en funktion af s . Partiklerne foretager altså oscillationer omkring centralbanen, – såkaldte betatronoscillationer. Fasen er givet ved

$$\psi(s) = \int_0^s \frac{d\zeta}{\beta(\zeta)}. \quad (4)$$



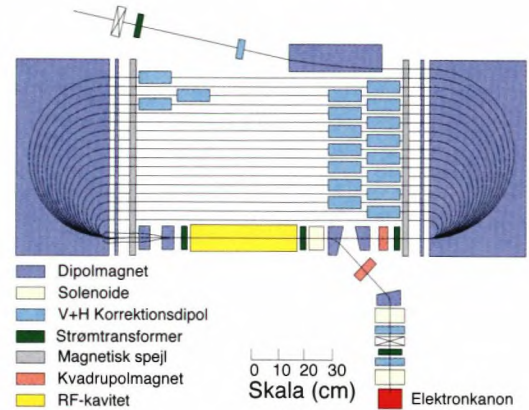
Figur 4. Eksempel på hvordan stort tværsnit og lille divergens (x, x') ændres til mindre tværsnit og større divergens ved fokusering. Øverst vist i faserummet, nederst i faktiske partikelbaner.

Antallet af betatronoscillationer per omgang, den såkaldte “tune” er givet ved $Q = (\psi(L) - \psi(0))/2\pi$, hvor L er omkredsen af ringen. Disse tunes er meget vigtige parametre for stabilitet af betatronbevægelsen. Hvis den horisontale tune Q_x og den vertikale tune Q_y opfylder ligningen $mQ_x + nQ_y = p$ for små hele tal m, n og p , ligger arbejds punktet (Q_x, Q_y) på en såkaldt resonans, og bevægelsen er ustabil. Det skyldes at bevægelsen efter et helt antal omgange vil gentage sig selv, hvilket betyder at påvirkningen fra de små, uundgåelige, magnetiske fejl vil addere kohærent.

I praksis findes løsningen til Hill's ligning ved matrix multiplikation, idet de optiske elementer: dipolmagneter, kvadrupol-magneter samt felt-frie stræk kan repræsenteres ved 2×2 matricer. Tværsnittet af en stråle er nu givet ved $\beta_x(s)$ og $\beta_y(s)$ samt strålens emittanser ϵ_x og ϵ_y :

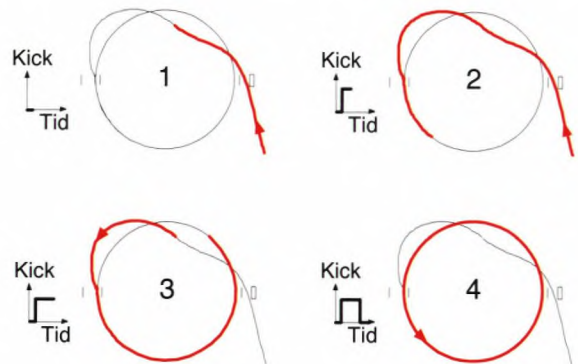
$$x = \sqrt{\beta_x \epsilon_x}, y = \sqrt{\beta_y \epsilon_y}. \quad (5)$$

Se figur 3 for størrelsen af en typisk ionstråle ved injektion samt af en accelereret 580 MeV elektronstråle.



Figur 5. Principskitse af 100 MeV mikrotronen ved ASTRID.

Ovenstående gælder for en monoenergetisk stråle af ladede partikler uden energispredning. I virkeligheden har en realistisk stråle af enten ioner eller elektroner en given energispredning, der dels leder til såkaldt kromaticitet dels til dispersion. Kromaticitet betyder at fokuseringen afhænger af energien, hvilket betyder at alle partikler ikke har samme tune; med andre ord leder det til en tunespredning. Den anden effekt er at partikler med forskellige energier vil have forskellig afbøjning i magneterne, og derfor have en anden bane i ringen, – såkaldt dispersion.



Figur 6. Enkelt-omgangs-injektion af ioner i ASTRID. En kort puls tilføres kickerpladerne, der er placeret modsat septummagneten.

Begrebet emittans: Et centralt begreb indenfor acceleratorfysikken er emittans. Bevægelsen af en partikel rundt i en accelerator kan beskrives ved en bane i faserummet. For eksempel kan den horisontale transversale bevægelse beskrives i det to-dimensionale faserum bestående af den horisontale position x samt den tilhørende impuls p_x . Til et givet tidspunkt vil partiklerne i en stråle fylde et givet område i faserummet.

På grund af Liouvilles teorem er arealet af dette område en bevaret størrelse. Indenfor accelerator-

fysikken anvendes ofte divergensen af en partikel $z' = dz/ds$ i stedet for den transversale impuls. Arealet af en partikelstråle i dette faserum kaldes strålens emittans; se figur 4. Ved konstant energi er denne emittans altså en bevaret størrelse, men under acceleration aftager emittansen proportionalt med impulsen. Af ovenstående fremgår også at man ikke ved hjælp af kvadropoler kan ændre en stråles emittans. Det er velkendt, at fokuserer man en stråle til et lille tværsnit sker dette på bekostning af en forøgelse af strålens divergens; se figur 5. Forudsætningerne for anvendelse af Liouvilles teorem er blandt andet at partiklerne kun påvirkes af konservative kræfter. Vi skal senere se på at man kan formindske en stråles emittans, "køle" strålen, ved anvendelse af ikke-konservative kræfter.

Longitudinal bevægelse: Den longitudinale bevægelse er bestemt af accelerations-aggregatet (RF-kaviteten) over hvilken der er en spændingsforskel $V = V_0 \sin(2\pi f_a t)$, hvor f_a er RF frekvensen, der ofte ligger i radiobølgeområdet; deraf navnet. Partiklerne cirkulerer rundt i ringen med en frekvens $f = v/L$. I den ideelle accelerator findes der en såkaldt "synkron" partikel, der altid ankommer til accelerations-sektionen med samme fase Φ_s efter nulgennemgangen af RF signalet. Hvis dette skal opfyldes må $f_a = hf$, hvor h er det såkaldte harmoniske tal. Det er denne synkronisme der har givet navn til synkrotronen. Der findes faktisk h synkrone faser, og de ladede partikler vil altså under acceleration være bundtet i h bundter. Den synkrone partikel vil under acceleration blive påvirket af en energi-tilvækst $\Delta E = qV = qV_0 \sin \Phi_s$ per omløb. Det er nu klart, at denne energitilvækst nøje skal følges af magneternes felter, således at afbøjningsradius og fokusering holdes konstant under accelerationen. Partikler, der har en anden fase end den synkrone partikel, vil oscillere omkring den synkrone fase og derfor også fastholdes i den longitudinale bevægelse. Sålænge partiklernes hastighed er meget mindre end lysets hastighed, skal RF frekvensen øges under acceleration, men efterhånden som partiklernes hastighed nærmer sig lysets, bliver frekvensen konstant. Specielt kan frekvensen holdes konstant i elektronsynkrotroner.

Liouvilles teorem gælder også longitudinalt. I acceleratorfysikken anvendes partiklernes impuls og fase som longitudinale faserumskoordinater. Under injektion fyldes ringen af en kontinuert stråle, der derefter bundtes v.h.a. RF feltet inden acceleration. En følge af Liouvilles teorem er derfor at energispredningen øges under denne proces.

Injektorerne til ASTRID

Elektroner injiceres i ASTRID fra en 100 MeV "væddeløbsbane" mikrotron; se figur 5. Denne accelerator er også en RF accelerator, hvor energitilvæksten i accelerationssektionen på 5.3 MeV udnyttes 19 gange til at opnå en total energi på 100 MeV. Den anvendte frekvens i mikrotronen er 3 GHz. Denne accelerator

er pulseret og kan levere en elektronstråle på 10 mA i 1 mikrosekund med en repetitionsfrekvens på op til 25 Hz.

Ioner injiceres i ASTRID fra en *isotopseparator*. Denne består af en 200 kV højspændingsterminal, hvor ionkilden er monteret. En separatomagnet udvælger ioner med det ønskede masse/ladningsforhold, som derefter transporteres gennem det såkaldte injektionsstrålerør ind i ASTRID; se figur 1. Denne type for-accelerator er særdeles fleksibel idet alle typer ioner kan accelereres, og idet principielt alle typer af ionkilder kan anvendes. Yderligere kan både positive og negative samt atomare såvel som molekylære ioner accelereres. På det seneste er der opbygget en EBIS (Electron Beam Ion Source) til produktion af multipelt ladede ioner.

Lagring af ioner

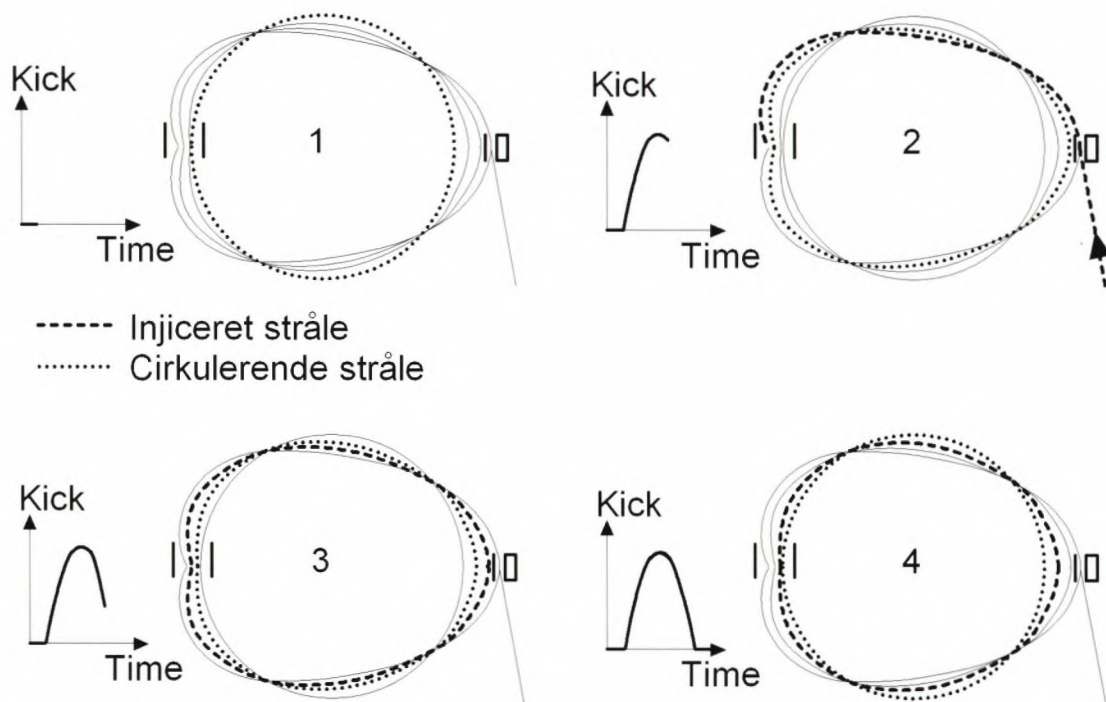
Ioner kan lagres i ASTRID ved en såkaldt enkelt-omgangs-injektion; se figur 6. Her fyldes ASTRIDs omkreds, 40 m, med ioner fra fra injektoren. Herefter kan ionerne accelereres fra injektionsenergien til den ønskede lagringsenergi, dog maksimalt til en impuls på 580 MeV/c, svarende til 180 MeV for protoner. RF frekvensen er 0.5–5 MHz svarende til harmonisk tal h mellem 1 for højenergetiske protoner og 30 for tunge ioner (typisk 40 amu).

Levetiden af en ionstråle i ringen er bestemt af vekselvirkning med restgassen i vacuumsystemet, der typisk har et tryk på $2 \cdot 10^{-11}$ mBar og hovedsagelig består af H_2 . Typiske levetider er fra få sekunder til 30 sekunder bestemt af elektronindfangning og elektrontab.

Lad os også her nævne, at der er flere andre vigtige delsystemer hørende til en synkrotron/lagring. Et meget væsentligt system er diagnostik, der skal muliggøre observation af strålen af lagrede partikler, helst ikke-destruktivt, således at strålen kan diagnosticeres under brug. Af andre væsentlige elementer skal her nævnes korrektions- og sekstupol-magneter.

Køling af ioner

Som nævnt ovenfor er de transversale emittanser og den longitudinale emittans normalt bevaret. Imidlertid kan man køle en ionstråle ved at "snyde" Liouvilles teorem. Dette kan gøres på flere måder. Ved *stokastisk køling*, som bl.a. har været en forudsætning for antiproton programmet på CERN, detekterer man positionen eller hastigheden af de enkelte ladede partikler (eller grupper af sådanne) og korrigerer derefter disse ved hjælp af en elektromagnetisk kraft. Ved *elektronkøling* overlejrer man ionstrålen med en kold elektronstråle. Efterhånden får ionstrålen så samme temperatur som den kolde elektronstråle. Her omgås Liouvilles teorem altså ved at anvende hastighedsafhængige kræfter, gnidningskræfter. En anden kølemetode, laserkøling, beskrives i artiklen side 12.



Figur 7. Fler-omgangs-injektion af elektroner i ASTRID. En cosinus-formet strømpuls tilføres kickerspolen modsat septummagnetneten.

Lagring af elektroner i ASTRID

Elektroner injiceres og akkumuleres i ASTRID ved 100 MeV ved en såkaldt fler-omgangs-injektion som vist på figur 7. Herved tilføjer man flere elektroner til de allerede cirkulerende elektroner. På grund af Liouvilles teorem kan man ikke injicere elektroner i områder af faserummet, hvor der allerede findes elektroner. Processen foretages derfor ved at injicere nye elektroner ved siden af de allerede cirkulerende elektroner. De "nye" elektroner vil nu efterhånden samles oveni de "gamle" på grund af synkrotronstrålingskøling; se nedenfor. Herefter kan nye elektroner igen injiceres, og på denne måde kan man akkumulere en meget stor elektronstrøm, meget større end elektronstrømmen fra injektoren. Typisk leder én injektion til et par mA cirkulerende elektroner. Efter cirka 5 sekunder kan en ny puls injiceres, og på den måde kan man akkumulere 150 mA elektroner ved 100 MeV i løbet af 15 minutter. Herefter accelereres disse elektroner uden nævneværdige tab til ASTRIDs maksimale energi på 580 MeV. RF frekvensen er valgt til 105 MHz, der svarer til 14 elektronbundter. Frekvensen er blandt andet valgt fordi den ligger i det såkaldte FM-bånd, hvilket betyder at RF-generatorer ved denne frekvens er billige.

Levetiden af den cirkulerende elektronstrøm er en væsentlig størrelse for anvendelsen af en synkrotronstrålingsfacilitet. Den er under de fleste omstændigheder bestemt af vekselvirkning af elektronerne med restgasatomerne samt med de andre elektroner i strålen. Tab af elektroner fra vekselvirkning med restgassen kan skyldes to effekter, dels inelastiske stød mellem elektronerne og restgasatomerne, hvorved der udsendes

et gammakvant af så stor energi, at energitabet ikke kan kompenseres af RF-systemet. Dels elastiske stød, hvor elektronen som en følge af spredningsvinklen vil ramme vacuumkammeret. Begge dele kan kontrolleres ved at have et tilstrækkeligt lavt tryk, og normalt vil levetiden på grund af disse effekter være negligibel hvis trykket er under 10^{-9} mBar. Det skal her nævnes at vacuumkammeret rammes af den af elektronerne udsendte synkrotronstråling, se næste afsnit, og denne stråling leder til en meget stærk photodesorption af restgas fra overfladen af vacuumkamrene. Når restgaslevetiden kan negligeres er levetiden bestemt af den såkaldte Touschek effekt, der er spredning af en elektron på en af de andre elektroner, hvorved den får en så stor energiændring at den ikke kan kompenseres af RF systemet. Effekten er derfor afhængig af strålens emittans, både transversalt og longitudinalt. I ASTRID er denne levetid under normale driftsbetingelser omkring 30 timer ved 150 mA, og tilsvarende større ved lavere strømme. En typisk synkrotronstrålingsdag for ASTRID er vist i figur 8, med to daglige injektioner.

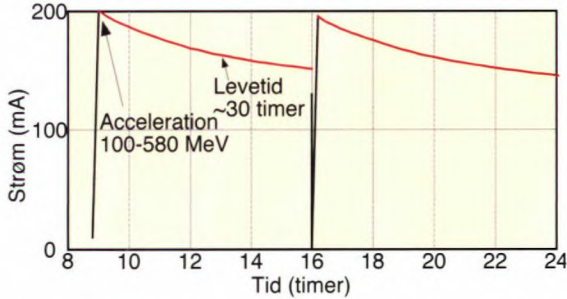
Synkrotronstråling

Når en ladet partikel accelereres, udsender den elektromagnetisk stråling. Specielt når en elektron afbøjes og dermed accelereres i en magnet kaldes den udsendte elektromagnetiske stråling for synkrotronstråling. Spektret af den udsendte synkrotronstråling er givet ved en universel kurve bestemt ene og alene af elektronenergien E og magnetfeltet B samt selvfølgelig den cirkulerende strøm af elektroner. Spektret er karakteriseret af den kritiske energi ϵ_c eller bølgelængde λ_c

givet ved

$$\epsilon_c[\text{keV}] = 0.665 B[T] E^2[\text{GeV}] \quad (6)$$

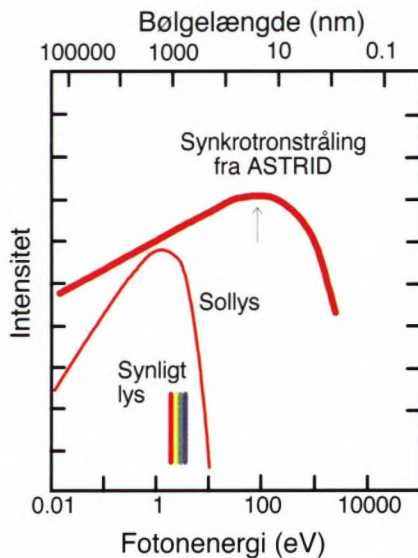
$$\lambda_c[\text{\AA}] = \frac{18.64}{B[T] E^2[\text{GeV}]} \quad (7)$$



Figur 8. Elektronstrøm i ASTRID i løbet af en dag. Accelereret stråle er vist med rødt.

Spektret for ASTRID er vist på figur 9 og er karakteriseret ved $\epsilon_c = 360 \text{ eV}$ svarende til $\lambda_c = 35 \text{ \AA}$. Det ses af spektret, at intensiteten kun er ganske svagt aftagende for energier mindre end ϵ_c , mens intensiteten aftager stærkt for energier større end ϵ_c . I praksis kan strålingen anvendes op til nogle gange den kritiske energi.

Fotonerne udsendes i den fremadgående retning indenfor en vinkel på $1/\gamma$ ved den karakteristiske energi. Ved 580 MeV er $\gamma = 580 \text{ MeV}/0.511 \text{ MeV} \approx 10^3$. Fotoner med højere/lavere energi udsendes indenfor mindre/større vinkler. Dette er en konsekvens af Dopplereffekten, idet strålingen i elektronernes hvilesystem er såkaldt dipolstråling, der udsendes i alle retninger vinkelret på accelerationsretningen.



Figur 9. Spektrum af synkrotronstrålingen fra ASTRID. Til sammenligning er vist solens spektrum.

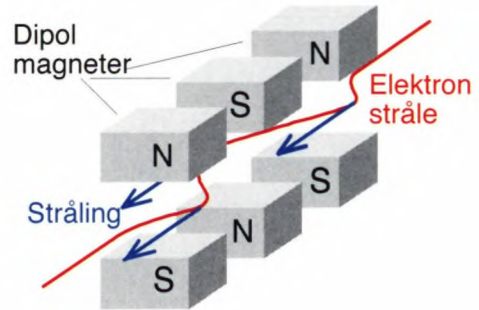
To andre vigtige størrelser for lagerringsens drift er elektronernes energitab per omløb U_0 , der skal kom-

penseres af RF systemet, samt den totale udsendte effekt P , der jo vil ramme vacuumkammeret og skal køles væk. Disse er givet ved

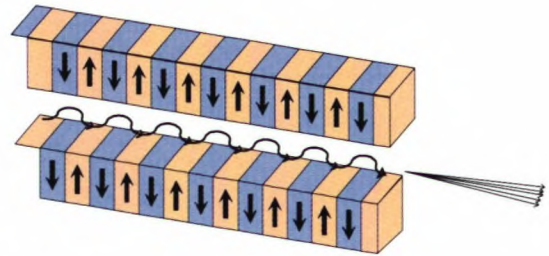
$$U_0[\text{keV}] = \frac{88.5 E^4[\text{GeV}]}{\rho[\text{m}]} \quad (8)$$

$$P[\text{kW}] = U_0[\text{keV}] I[\text{A}] \quad (9)$$

hvor I er elektronstrømmen og ρ krumningsradius i magneterne. I ASTRIDs tilfælde ved 580 MeV er $U_0 = 8.3 \text{ keV}$ samt $P = 1.7 \text{ kW}$ for $I = 200 \text{ mA}$.

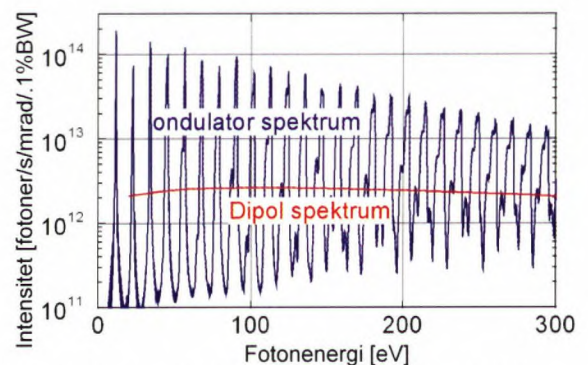


Figur 10. Principskitse af en wiggler.



Figur 11. Principskitse af en undulator.

I forrige afsnit blev nævnt at udsendelsen af synkrotronstrålingen også leder til køling, såkaldt *synkrotronstrålingsdæmpning*, af elektronstrålen. Dette kan let indses i den vertikale plan: De udsendte fotoner udsendes i middel i den fremadgående retning af elektronernes oscillerende bevægelse. Elektronen vil derfor rekyler i den modsatte retning, men da den tabte energi altid tilføres i den longitudinale retning af



Figur 12. Et typisk spektrum fra ASTRID undulatoren.

Photonics is transforming the world we live in.

It is our commitment to provide photonics tools
that bring your ideas to light.

the Practical Application of Light

Imaging
Medicine
Forensics
Photonics
Aerospace
Metrology
Electronics
Spectroscopy
Reprographics
Biotechnology
Semiconductor
Analytical Chemistry
Materials Processing
Telecommunications

Melles Griot has supplied products that enable the practical application of light for 30 years, becoming a worldwide manufacturer and distributor of optics, lasers, opto-mechanical hardware, and instruments.

Pioneering the field of catalog sales with our industry-leading Optics Guides, today the Photonics Components division is a major OEM supplier of standard and custom optical components and advanced thin-film coatings, as well as optical tables, opto-mechanical hardware, and flexure-based nanopositioning systems.

Melles Griot Optical Systems specializes in the design and manufacture of multi-element optical systems for demanding OEM applications including semiconductor, machine vision, and reprographics.

A leader in laser technology for commercial and research applications, Laser division has expanded from multi-colored helium neon lasers into helium cadmium, air-cooled ion, semiconductor, solid-state, and frequency-stabilized lasers. Subassemblies, turnkey, and fiber optic beam delivery systems enhance these capabilities.

Complementing these capabilities, our line of laser measurement instrumentation includes power and energy meters, photodetector amplifiers, and laser beam profilers.

Working with industry, supporting research and development, partnering in OEM production — Melles Griot continues to lead the photonics industry.

We furnish the products that enable the practical application of light.



MELLES GRIOT

www.mellesgriot.com

Denmark

Stenagervej 13
DK-4100 Ringsted, Denmark

Tel: 5761 5049 • FAX: 5761 6049
E-mail: dk_mellesgriot@csi.com

Sweden

(Serving Sweden, Norway, Finland, Iceland &
The Baltic States)
Box 7071, Måttbandsvägen 12
S-187 12 Täby, Sweden

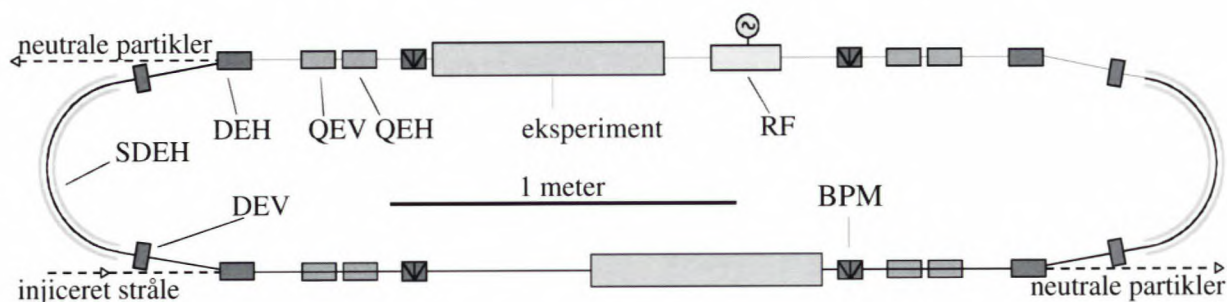
Tel: (08) 6308950 • FAX: (08) 6300745
E-mail: info.nordic@mellesgriot.com

Photonics

is emerging as an important
technology for the future.
Melles Griot supplies the elements
used to **create, transform, and**
detect light for applications
as diverse as biotechnology,
telecommunications, entertainment,
and reprographics.



A member of Barlow Scientific Group Ltd



Figur 13. Principskitse af ELISA: SDEH: 160° afbøjning, DEH: 10° afbøjning, DEV: Vertikal styring, QEV, QEH: Vertikal og horisontal kvadrupol, BPM: Pick-up til positionsmåling.

RF systemet, vil elektronerne efterhånden få deres hastighedsvektorer rettet op langs den longitudinale akse. I den horisontale retning kompliceres tingene lidt af, at elektronerne jo ændrer energi under udsendelse af fotonerne, og på grund af dispersionen vil de derfor også eksiteres i den horisontale retning. Derfor opnår en elektronstråle en horisontal ligevægtsemittans alene bestemt af magneterne samt elektronernes energi. Den horisontale emittans i ASTRID er 0.14 mm mrad (eller 140 nm, nanometer) ved 580 MeV, hvilket svarer til en strålestørrelse på omkring 0.4 mm og en divergens på 0.4 mrad. Den vertikale emittans er typisk nogle procent af den horisontale, grundet en lille kobling mellem de to transversale bevægelser. Longitudinalt vil elektronstrålen også køles til en lille ligevægtsenergispredning. Køletiderne af elektronerne er stort set givet ved den tid, det tager at stråle hele deres energi væk som synkrotronstråling, dvs E/U_0 omløb. Køletiderne er 5 sekunder ved 100 MeV samt 25 millisekunder ved 580 MeV for ASTRID.

Som nævnt ovenfor er intensiteten af synkrotronstrålingen bestemt af elektronenergien, magnetfeltet samt elektronstrømmen. I visse eksperimenter er det ikke intensiteten, der er bestemmende for antallet af fotoner, der rammer ens prøve, men snarere den såkaldte *brillians* defineret som intensiteten per areal og rumvinkelenhed, eller med andre ord fotonstrålens emittans. Denne er hovedsagelig bestemt af elektronstrålens emittans, og derfor er der de sidste år blevet udviklet elektronlagerringe med meget små horisontale emittanser på få nm, der leder til meget høje værdier af brilliansen. Strålingen fra en elektronstråle med lille emittans muliggør monokromatorer (se artiklen side 35 i dette nummer af Kvant) med meget høj opløsning og/eller fokusering af fotonstrålen til meget små dimensioner.

I det seneste tiår er der blevet udviklet såkaldte "*insertion devices*", d.v.s. arrangementer af magneter placeret i lagerringen, der har forøget intensiteten og energien af synkrotronstrålingen betragteligt. I en såkaldt "*wavelength shifter*" afbøjes elektronstrålen lokalt af en magnet med et meget stort magnetfelt, og herved

øges den karakteristiske energi proportionalt med magnetfeltet; se figur 10. F.eks. er der blevet opbygget sådanne "wigglere" af superledende magneter med felter op til 8 Tesla, hvorved energien øges med en faktor 5 i forhold til stråling fra en dipolmagnet. I en ondulator anbringes mange permanente magneter efter hinanden, se figur 12, hvorved elektronstrålen afbøjes mange gange, hvilket leder til en kraftig forøgelse af intensiteten.

Umiddelbart vil man forvente en forøgelse af intensiteten med en faktor svarende til antallet af magnetpoler N , men hvis afbøjningen af elektronstrålen er mindre end den karakteristiske vinkel hvorunder fotonerne udsendes, $1/\gamma$, vil intensiteten fra de forskellige magnetpoler addere kohærent, og intensiteten, eller snarere brilliansen, øges med N^2 . Det betyder også at fonspektret fra en ondulator ikke er et kontinuert spektrum men et liniespektrum med en karakteristisk frekvens. Denne frekvens kan vurderes på simpel vis: I laboratoriesystemet oscillerer elektronerne transversalt med en frekvens på c/λ_u , hvor λ_u er længden af en magnetperiode af ondulatoren. I elektronernes hvilesystem udsender de derfor dipolstråling med en frekvens på $\gamma c/\lambda_u$ grundet Lorentz tidsforlængelsen. Ved Doppler-transformation tilbage til laboratoriesystemet observeres nu stråling i den fremadgående retning med en bølgelængde på $\lambda_u/2\gamma^2$. Elektronernes strålingsmønster er kun approksimativt dipolstråling, og i praksis udsendes også højere harmoniske af den fundamentale frekvens. Generelt er bølgelængden af den første harmoniske fra en ondulator givet ved

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2/2 + \gamma^2\theta^2) \quad (10)$$

hvor afbøjningsparameteren $K = 0.934B[\text{T}]\lambda_u[\text{cm}]$ er forholdet mellem den maksimale afbøjningsvinkel af elektronerne og fotonernes udsendelsesretning $1/\gamma$, og hvor θ er udsendelsesretningen af fotonen. Et typisk spektrum fra ASTRID ondulatoren er vist i figur 12 for en elektronenergi på 580 MeV. Spektret viser et liniespektrum svarende til den fundamentale bølgelængde

samt højere harmoniske. Typisk kan antallet af fotoner på ens prøve øges med 1000 gange ved at anvende stråling fra en undulator i stedet for fra en afbøjningsmagnet.

ELISA

En del af ionprogrammet ved ASTRID laves med stråler der ikke er accelererede i ASTRID og hvor energien ikke er kritisk, og hvor eksperimenterne alene er afhængige af en lang levetid samt mulighed for detektion af neutraliserede ioner/fragmenter samt muligvis at påvirke ionerne med lasere etc. Disse tanker ledte til opbygningen af ASTRID's lillesøster, ELISA (ELECTROstatic Ion Storage ring, Aarhus). ELISA er enestående i verden, idet den er den første lagring i verden, der udelukkende benytter elektrostatiske elementer til styring og fokusering af strålen. En skitse af ELISA er vist i figur 13.

Elektrostatiske elementer har flere fordele i forhold til magnetiske: Elementerne og de tilhørende forsyninger er betydeligt billigere både i anskaffelse og drift. Yderligere er en elektrisk afbøjning kun afhængig af ionernes ladning og kinetiske energi, hvilket medfører at ioner med enhver masse kan lagres ved samme kinetiske energi. Den største begrænsning ved en elektrostatisk lagring er, at det ikke er muligt at lagre højenergetiske ioner på grund af de høje afbøjningsspændinger dette ville kræve. I ELISA er grænsen ca. 25 keV.

Injektion i ELISA er simpel: Netop hvor strålen fra injektoren træder ind i ELISA, sidder der en horisontal afbøjningsplade. Spændingen på denne holdes på nul indtil strålen er nået rundt i ringen, og sættes så på den værdi, der kræves for at kunne lagre strålen.

Der er opnået levetider af lagrede ionstråler i ELISA på op til 30 sekunder, bestemt af elektronindfangning i restgaskollisioner. De første eksperimenter er allerede lavet i ELISA, og de er naturligt foretaget som en fortsættelse af eksperimenter med tunge ioner i ASTRID. Her har fordelene ved en elektrostatisk lagring allerede vist sig. En helt ny mulighed har været afprøvet, idet hele ELISA været nedkølet til -40°C for at sænke det i forvejen meget lave tryk. På længere sigt vil eksperimenter med lagring af meget tunge molekyler af biologisk interesse blive foretaget.

Fremtidige planer og muligheder

Faciliteter som ASTRID og ELISA kræver naturligvis en vedvarende udbygning og forbedring for at kunne være med i frontforskningen. Hvad angår lagring af ioner, drejer dette sig for nærværende især om udvikling og anvendelse af ionkilder til eksotiske ioner. Hvad angår synkrotronstråling, vil det på sigt være nødvendigt med en ny moderne elektronlagring med en lille emittans og med flere undulatorer. Kun på denne

måde kan intensiteten, og specielt brilliansen, gøres konkurrencedygtig med udenlandske faciliteter.

Referencer:

- [1] N. Hertel og E. Uggerhøj: ASTRID – en ny strålingskilde – stærkere end solen!, *Naturens Verden* 1991, side 347.
- [2] S. P. Møller: The Aarhus Storage Ring for Ions and Electrons ASTRID, Proc. from the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington 1993.
- [3] S. P. Møller: ELISA, an electrostatic storage ring for atomic physics, *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research A* **394** (1997) 281.
- [4] H. Wiedemann: Particle Accelerator Physics, Springer-Verlag, 1993.
- [5] M. Conte and W. W. MacKay: Physics of Particle Accelerators, World Scientific, 1991.
- [6] P. J. Bryant and K. Johnsen: Circular Accelerators and Storage Rings, Cambridge University Press, 1993.
- [7] H. Winick: Synchrotron Radiation Sources, World Scientific, 1994.



Niels Hertel er lic.scient og afdelingsleder ved ISA, Aarhus Universitet.

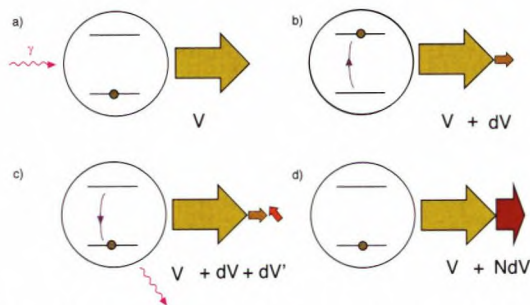


Søren Pape Møller er dr.scient., direktør for ISA, Aarhus Universitet, og medredaktør på dette nummer af Kvant.

Laserkøling af lagrede ionstråler

Niels Kjærgaard og Niels Madsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, og Jørgen S. Nielsen, ISA, Aarhus Universitet.

I ASTRID studeres dynamikken for kolde lagrede ionstråler. Med laserlys er det muligt at manipulere hastighedsfordelingen for lagrede ioner og opnå såkaldt *laserkøling*. Samtidig kan laser-ion vekselvirkningen bruges til at undersøge egenskaber ved ionstrålen. Tilsammen giver dette et stærkt værktøj til at observere effekter af rumladning i lagrede stråler. Information om opførselen af en ionstråle, når rumladningseffekter bliver af betydning, er af generel interesse inden for acceleratorfysik, hvor man typisk ønsker tætte stråler af ladede partikler. En gammel drøm er at køle en lagret ionstråle så meget, at den bliver krystallinsk, men dette er endnu ikke observeret eksperimentelt. I en krystallinsk stråle vil ionerne sidde låst fast i en rumlig ordenet struktur i et minimum for pseudopotentialet skabt af de ydre magnetiske kræfter fra lagringen og ionernes indbyrdes elektriske frastødning.

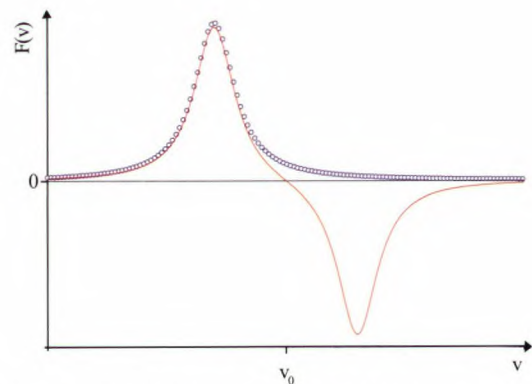


Figur 1. a) Indkommende foton og ion i grundtilstand. b) Ionen eksiteres ved fotonabsorption og får et impulsspark i laserens udbredelsesretning. c) Den eksiterede ion henfalder til grundtilstanden ved udsendelse af en foton. Rekylet herfra giver ionen et impulsspark i en tilfældig retning. d) Effekten af at gentage a)–c) mange gange er en netto hastighedsændring i laserens udbredelsesretning.

For stråledynamiske formål er det sådan set kun af betydning, at vi har med ladede partikler at gøre, og studierne af kolde stråler er derfor meget generelle. For at opnå en laser-ion vekselvirkning, der kan bruges som værktøj til at laserkøle og observere en ionstråle, er det imidlertid vigtigt, at energiniveauerne for ionernes elektronstruktur har en speciel natur. $^{24}\text{Mg}^+$ er et eksempel på en sådan ion, og denne har været studeret i ASTRID siden 1993.

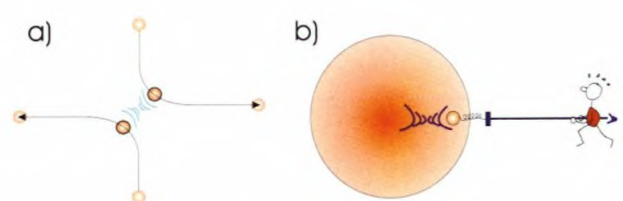
Dopplerkøling

Til laserkøling af $^{24}\text{Mg}^+$ i ASTRID benyttes ultraviolet lys ved 280 nm. Dette kan eksitere ionernes yderste elektron til en højere liggende energitilstand, som kun kan henfalde til grundtilstanden – en såkaldt *lukket*



Figur 2. Blå cirkler: Form af Dopplerkraften fra en laser. Rød linie: Samlet kraft fra to modpropagerende lasere.

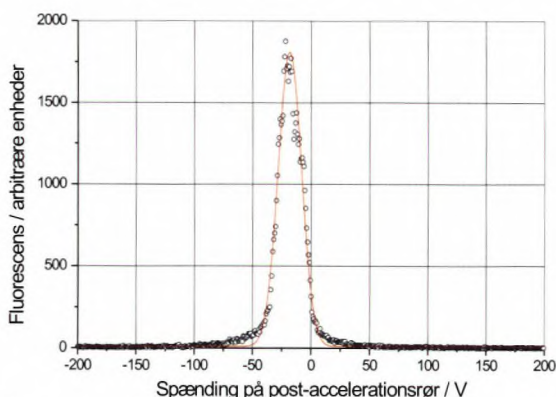
optisk overgang. Fra grundtilstanden kan ionen på ny eksiteres ved absorption af en foton fra laserfeltet. Da laserfotonerne bærer impuls, vil absorption give anledning til en lille impulsændring for ionen i laserens udbredelsesretning, mens rekylet fra den efterfølgende spontane emission vil ændre ionens hastighed i en *tilfældig* retning. Betragter vi effekten af at gentage denne proces mange gange, bliver nettoresultatet en hastighedsændring for ionen i laserens udbredelsesretning. De tilfældige impulsspark fra spontane emissioner vil have en *symmetrisk* fordeling og bidrager derfor ikke i middel. Figur 1 skitserer situationen.



Figur 3. a) Via kollisioner mellem de enkelte ioner kan impuls overføres fra ionstrålens transversale dimensioner til den longitudinale. b) Illustration af at en partikel dels er påvirket af de ydre kræfter fra de fokuserende elementer i ringen (symboliseret ved den lille mand), dels af frastødning af de øvrige (ens-ladede) partikler (vil virke defokuserende).

Resonant laserlys påvirker således ionen med en middelkraft i laserens retning. På grund af den optiske overgangs *naturlige liniebredde* kan ionerne absorbere fotoner med en frekvens forskellig fra den perfekte resonansfrekvens. Sandsynligheden for at absorbere sådanne quasi-resonante fotoner aftager jo længere frekvensen kommer fra resonans (fordelingen er en Lorentz). Lyskraften aftager dermed også

bort fra resonans og bliver *hastighedsafhængig* grundet det Dopplerskift af laserlysets frekvens, som en ion i bevægelse ser. Figur 2 viser formen af denne *Dopplerkraft* (blå signatur). Ved at introducere endnu en laser, der udbreder sig i modsat retning af den første (giver modsat rettet kraft), kan man opnå en samlet laserkraft som angivet med rød signatur på figur 2. Det ses, at for hastigheden v_0 , som bliver sat af valget af laserfrekvenser, er den samlede kraft 0. Ioner langsommere end denne ligevægtshastighed vil blive accelereret, mens ioner, der er hurtigere decelereres ($F(v)$ er negativ). I de her beskrevne eksperimenter er $v_0 = 8.93 \cdot 10^5$ m/s.



Figur 4. Eksempel på måling af den longitudinale temperatur for en ionstråle, ved at måle den laserinducerede fluorescens fra probelaseren som funktion af spændingen på post-accelerationsrøret.

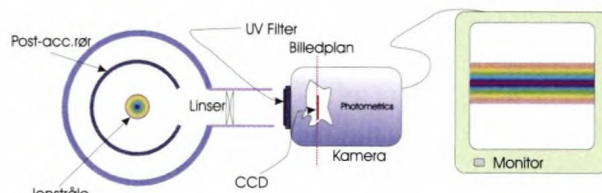
Den tilfældige proces med spontane emissioner giver anledning til *hastighedsdiffusion* og Dopplerkøling er derfor forbundet med en endelig spredning i hastigheder omkring v_0 . For $^{24}\text{Mg}^+$ svarer denne såkaldte Dopplerkølingsgrænse til en temperatur på 1 mK.

I ASTRID laserkølingseksperimentet overlappes en cirkulerende, *kontinueret* ionstråle med sådan to modpropagerende lasere over en af lagerringens lige sektioner. Man kan således manipulere ionernes longitudinale hastigheder til at ligge inden for en meget smal fordeling centreret omkring v_0 . Dopplerkølingsgrænsen giver en fundamental nedre grænse, for hvor smal fordelingen kan blive, men i praksis nås denne ikke grundet forskellige opvarmingsmekanismer hidrørende fra den hurtige ionstråles vekselvirkning med lagerringen.

Sympatetisk køling og rumladning

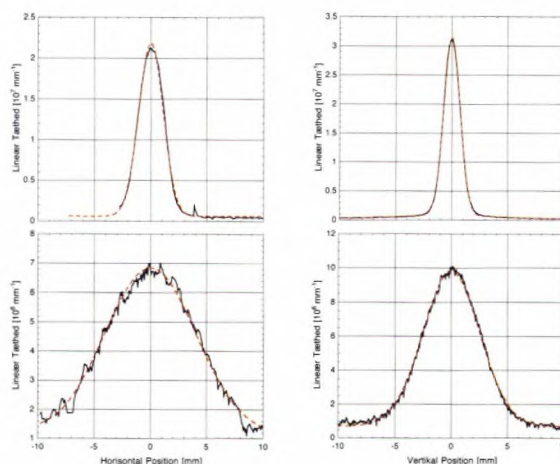
Dopplerkølingsmekanismen beskrevet ovenfor virker i ionstrålens longitudinale retning. På grund af Coulomb-frastødningen mellem ionerne er det imidlertid muligt via kollisioner mellem de enkelte partikler at få overført impuls fra de transversale dimensioner til den longitudinale (se figur 3a), hvor laserne så kan hente den ud. Dette giver anledning til såkaldt *sympatetisk køling* af

ionstrålens transversale dimensioner. Den sympatetiske køling vil dæmpe amplituden for ionernes *betatronoscillationer* og formindske strålens *emittans*.



Figur 5. Princip for måling af transversale størrelser for ionstrålen. Til venstre ses et snit gennem post-accelerationsrøret, hvor den oplyste ionstråle afbildes ind på en CCD-chip.

Når ionerne i strålen ved laserkøling mister kinetisk energi, kan de ydre magnetiske kræfter fra ringen begrænse dem til et lille volumen. Det er intuitivt klart at frastødningen mellem de ladede partikler vil søge at modvirke en samling på et sted (jvf. figur 3b). Coulomb-kraften fra strålen, set som et hele, på den enkelte ion begynder altså at blive af betydning for høje tætheder. Disse såkaldte *rumladningseffekter* er af stor interesse inden for acceleratorfysik, hvor man ofte ønsker ionstråler med høje tætheder (i for eksempel kollisionseksperimenter). Diagnostikken beskrevet nedenfor er et kraftfuldt værktøj til at studere rumladningseffekter med.



Figur 6. Eksempler på målte transversale profiler i de horisontale (til venstre) og vertikale (til højre) dimensioner for $5.8 \cdot 10^7$ cirkulerende ioner i ASTRID. Øverst er vist laserkølede stråler, mens de nederste profiler er for ukølede stråler.

Diagnostik af en laserkølet ionstråle

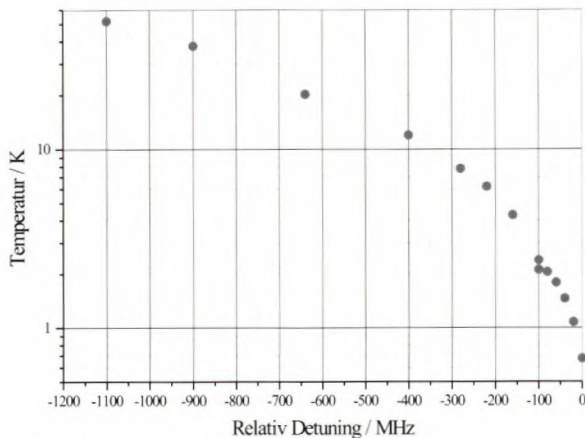
Effekten af laserkøling på en lagret ionstråle kan måles ved at benytte laserinduceret fluorescens fra en probelaser, resonant med den samme optiske overgang som bruges til køling. Man udnytter her de fotoner der udsendes ved spontan emission under processen a)–

c) på figur 1 til at "se" strålen med. Ved at probe strålen over en lille brøkdel af ringen med en svag laserintensitet undgås nævneværdig ændring af ionstrålens hastighedsfordeling. Probelaseren overlappes med ionstrålen over en lige sektion i ringen (forskellig fra kølesektionen). I midten af denne probesektion passerer ionerne igennem et såkaldt post-accelerationsrør, der blot er et rundt metalrør med en længde på 40 cm, som kan påtrykkes en elektrisk spænding. Sættes en spænding på røret vil ionerne her blive skiftet lokalt i hastighed, når de bevæger sig ind i røret (f.eks. accelereres ved negativ spænding), for dernæst at blive skiftet tilbage til deres oprindelige hastighed, når de forlader røret. Herved kan man vælge, hvilken hastighedsklasse probelaseren er resonant med i røret. Udenfor post-accelerationsrøret er probelaseren langt fra resonans for ioner, der befinder sig omkring centeret v_0 for hastighedsfordelingen, og Dopplerkraften i probe-sektionen er forsvindende sammenlignet med den kraft, ioner udsættes for i kølesektionen. Gennem vinduer i post-accelerationsrøret kan strålen observeres, og ved at måle raten af udsendte fotoner som funktion af spændingen på røret kan man bestemme strålens longitudinale hastighedsfordeling. Figur 4 viser et eksempel på en sådan hastighedsprofil, der er tilnærmet med en Gaussisk fordeling (rød). Spredningen i hastighed er 9.9 V svarende til 45 m/s.

Man kan definere en longitudinal temperatur ud fra:

$$T = \frac{m \langle (v - v_0)^2 \rangle}{k_B}, \quad (1)$$

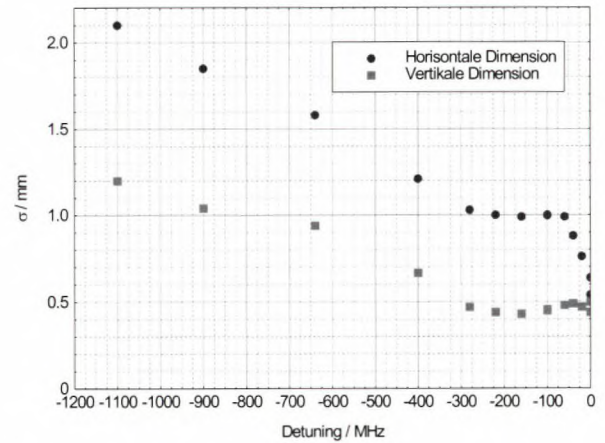
hvor m er ionmassen, $\langle (v - v_0)^2 \rangle$ er variansen i hastighed og k_B er Boltzman-konstanten. I eksemplet på figur 4 findes temperaturen 6 K.



Figur 7. Den longitudinale temperaturs afhængighed af kølelaserens detuning fra resonans.

Transversale størrelser for den af probelaseren oplyste stråle kan måles ved at afbilde den oplyste stråle ind på CCD-chip'en i et digitalt kamera. Princippet er skitseret på figur 5. Fra sådanne billeder udtrækkes de transversale ionstråleprofiler i de vertikale og horisontale dimensioner. Figur 6 viser eksempler på profiler for

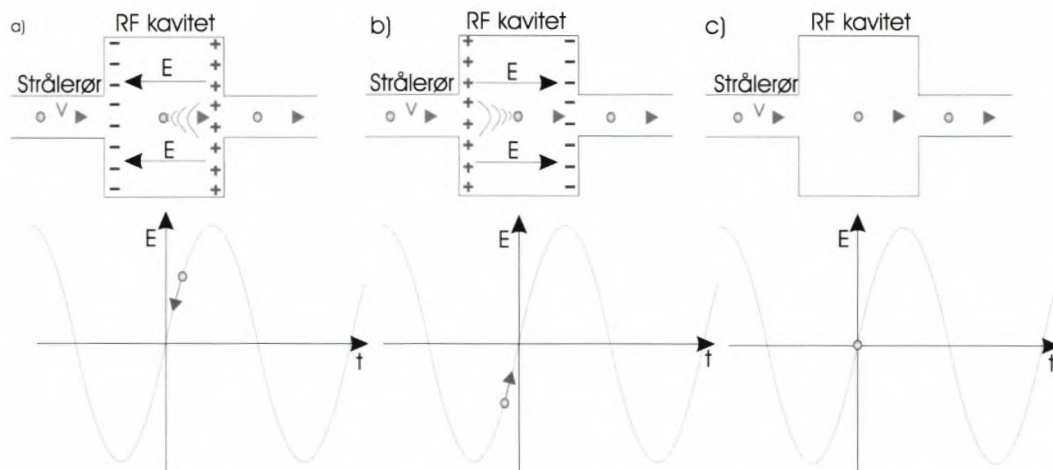
kølede og ukølede ionstråler, og de kølede stråler ses at være tydeligt smallere grundet den sympatetiske køling af de transversale dimensioner.



Figur 8. De transversale størrelses afhængighed af kølelaserens detuning fra resonans.

Begrænsninger i de opnåelige størrelser

Ionstrålens longitudinale temperatur bliver sat af, hvor langt (såkaldt detuning) kølelaserens frekvens ligger fra resonans for en ion med den ideale hastighed v_0 . Figur 7 viser udviklingen i longitudinal temperatur som funktion af kølelaserens detuning fra resonans. Der cirkulerer 400 nA ($\approx 10^8$ ioner) i lagerringen, og den longitudinale temperatur er fundet som beskrevet ovenfor. Figur 8 viser de tilsvarende transversale størrelser for ionstrålen. De transversale profiler beskrives godt med Gaussiske fordelinger $\propto \exp(-x^2/2\sigma^2)$, og spredningen σ bruges som mål for ionstrålens transversale størrelse. Det ses, at mens strålen bliver stadigt longitudinelt koldere, når der tunes mod resonans, opstår der plateauer i de transversale størrelser omkring -300 MHz, hvor det ikke er muligt at gøre strålen mindre med sympatetisk køling. Dette skyldes formodentlig at ionstrålen undergår et *rumladningstuneskift*, hvor arbejds punktet (Q_x, Q_y) (jvf. introduktionsartiklen på side 3) bevæger sig mod resonanser. Grundet rumladningsfrastødning vil den effektive, stedefælgende fjederkonstant $k(s)$ i Hill's ligning formindskes, og frekvensen for ionernes quasi-harmoniske, transversale oscillationer ændres mod lavere værdier. Plateauerne i de transversale størrelser kan således forstås som en ligevægt mellem den sympatetiske køling og opvarmning fra resonanser. For detuning tættere på resonans end -100 MHz kan kølelaserne ikke længere holde ionerne i én smal hastighedsfordeling, og størstedelen af ionerne befinder sig i varme haler til fordelingen. Figur 7 viser kun temperaturen for den lille del, der forbliver i en smal top. Det tilsyneladende fald i horisontal størrelse for disse små detuning skyldes derfor, at der er meget få kolde partikler, som kan ses med probelaseren.



Figur 9. Det varierende elektriske felt (E) virkning på positive partikler passerende en RF-kavitet i lagerringen. a) Partikel passerer lidt tidligere end det synkrone tidspunkt. E -feltet er modsatrettet partiklens bevægelse således at den bremses lidt. b) Partikel passerer lidt senere end det synkrone tidspunkt: E -feltet går i partiklens bevægelsesretning og virker accelererende. c) Partiklen passerer netop til det synkrone tidspunkt og ser ikke noget felt. Dens hastighed ændres ikke. (Bemærk at hastigheden godt kan være forskellig fra den ideale, således at partiklen efter næste omløb i lagerringen ikke nødvendigvis ankommer til det synkrone tidspunkt).

Laserkøling af bundtede stråler

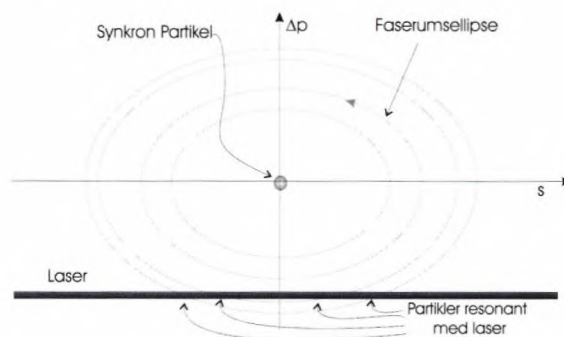
I det ovenstående har vi betragtet en kontinuert ionstråle. Som beskrevet i introduktionsartiklen om ASTRID er det muligt at bundte en lagret ionstråle ved at etablere et longitudinalt, harmonisk varierende elektrisk felt et sted i lagerringen. Figur 9 illustrerer princippet.

Partikler i et bundt vil udføre longitudinale *synkrotronoscillationer* omkring en *synkron partikel* (partikel, der altid ankommer til synkront tidspunkt i RF-kaviteten, jvf. figur 9). Afbildes impulsafvigelsen Δp , i forhold til en sådan synkron partikel mod longitudinal stedafvigelse s (et såkaldt faserumsdiagram), vil partiklerne bevæge sig på homotetiske (dvs. med samme facon) ellipser som vist på figur 10. Dette har en stærk analogi i bevægelsen for et svingende pendul, hvis man her bruger vinkelafvigelse og impuls som faserumskoordinater. Identiske penduler med forskellige udsvingsamplituder vil nemlig ligeledes bevæge sig på homotetiske ellipser i faserummet.

For bundtede partikler, der udfører synkrotronoscillationer, ses (figur 10), at en laser med negativ detuning i forhold til resonans for en synkron partikel, vil vekselvirke resonant med partikler, der bevæger sig på ellipser over en vis størrelse (sat af detuningen). Disse partikler korrigeres til at bevæge sig på stadigt mindre ellipser i faserummet, indtil lyskraften har skubbet dem så langt væk fra resonans, at de i det væsentlige ikke vekselvirker mere med laseren på et faserumsomløb. Da impulsen for partikler, der vekselvirker med laseren, ændres mod impulsen for en synkron partikel, er det således muligt at køle en bundtet stråle med en enkelt laser. Valget af laserdetuning sætter partiklernes maksi-

male hastighedsafvigelse fra en synkron partikel.

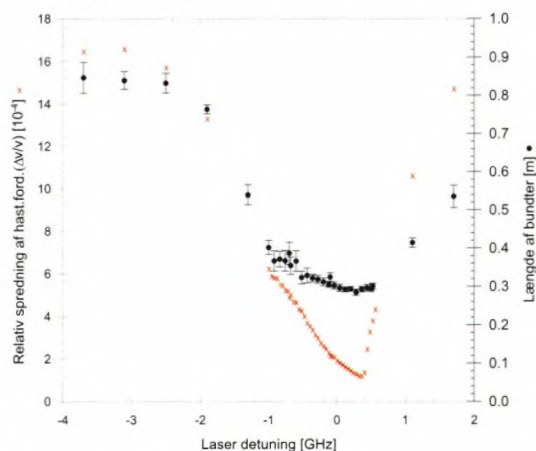
Når laseren formindsker arealet i faserummet som et bundt udfylder, er det imidlertid ikke muligt for alle partikler at have samme *position* i bundtet som en synkron partikel. Dette skyldes den tidligere omtalte rumladningsfrastødning, der opstår når man prøver at samle mange ens-ladede partikler på samme sted. Der vil således opstå begrænsninger i den opnåelige længde for et bundt under køling som følge af ligevægt mellem den frastødende



Figur 10. Synkrotronoscillationer i longitudinalt faserum. Partikler, der ikke er synkrone, vil vekselvirke med laseren og korrigeres til at bevæge sig på mindre faserumsellipser.

rumladningskraft og den fokuserende kraft fra RF-kaviteten. I det meget kolde tilfælde, hvor laseren er detunet tæt på resonans for en synkron partikel, vil det faserumsareal, som partiklerne bevæger sig indenfor, derfor blive smalt langs Δp -aksen, men udstrakt langs s -aksen på figur 10. Længden af bundter kan findes ved at måle den inducerede spænding på en ladningsfølsom pick-up i ringen som funktion af tid. Figur

11 viser, hvorledes bundtlængden udvikler et plateau, mens den longitudinale temperatur fortsat bliver lavere, når kølelaseren detunes mod resonans for en partikel med idealhastigheden.



Figur 11. Relativ spredning i longitudinal hastighedsfordeling og længden af bundter som funktion af kølelaserens detuning.

Udviklingen af en ionstråle i virkelig tid

Ved at anvende en såkaldt billed-forstærker (anbragt i billedplanet på figur 5), der kan forstærke lyssignalet fra ionstrålen, er det for nylig blevet muligt at følge den transversale udvikling af lagrede ionstråler som funktion af tiden. En billed-forstærker består i det væsentlige af en fotokatode, hvor indkommende fotoner ved fotoelektrisk effekt kan rive elektroner løs. Disse accelereres under højspænding gennem en kanalstruktur, hvor de vil forårsage en kaskade af sekundære elektroner. Sværmen af elektroner rammer til slut en fosforskærm, hvor de giver anledning til et kraftigt signal (kan ofte ses med det blotte øje). Billedet af denne skærm kan nu optages med et hurtigt, digitalt videokamera og gemmes på harddisk. Herefter kan man analysere sekvensen på en computer og udtrække informationer om stråleprofilen til et givet tidspunkt. Eksempler på sådanne videosekvenser kan ses i ref. [5], hvor uddybende information om laserkøling af ioner i ASTRID også er at finde.

ASTRID Laserkølingsgruppen ledes af lektor Jeffrey S. Hangst og består foruden forfatterne til denne artikel af Paul Bowe, Lars Erik Siegfried, Søren Aggerholm, Michael Drewsen og Liv Hornekær.

Referencer:

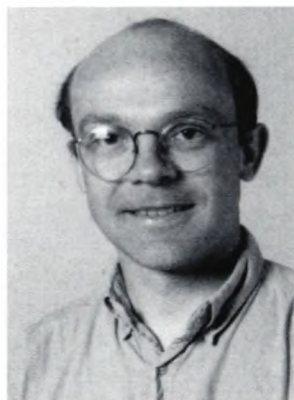
- [1] J. S. Hangst et al., Laser Cooling of a Bunched Beam in a Synchrotron Storage Ring, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4432.
- [2] N. Kjærgaard et al., Laser Cooling of a Stored Ion Beam, ISA Activity Report No. 2 (1998) 76. Kan downloades fra: www.ifa.au.dk/isa/isaact98.pdf
- [3] N. Madsen et al., Limits to Bunched Beam Laser

Cooling, EPAC'98, redigeret af S. Myers et al. (1998) 1043. Kan downloades fra: www.cern.ch/accelconf/e98/papers/thp21f.pdf

- [4] C. S. Adams og E. Riis, Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms, Progress in Quantum Electronics **21** (1997) 1.
- [5] Laserkøling af ioner i ASTRID, www.ifa.au.dk/lasercool
- [6] Laserkøling af ioner i lagerringen TSR, Heidelberg, pluto.mpi-hd.mpg.de/ato/lasercool/
- [7] Nobelprisen i Fysik 1997 "for metoder til at fange og køle atomer med laserlys" www.nobel.se/laureates/physics-1997.html og K. Mølmer, Kolde Atomer, Kvant **8** (1997) 3.



Niels Kjærgaard er cand.scient., Ph.D.-stipendiat ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.



Jørgen S. Nielsen er Ph.D., Acceleratorfysiker ved ISA, Aarhus Universitet.



Niels Madsen er Ph.D., Fellow ved CERN, Genève.

Klyngefysik

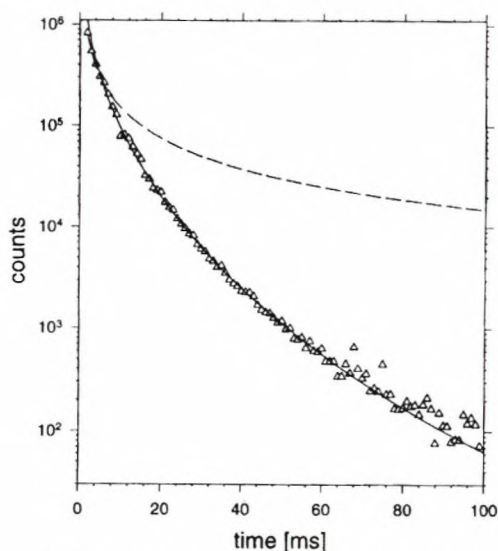
Jens Ulrik Andersen og Preben Hvelplund, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Lagerringene ASTRID og ELISA er blevet anvendt til at studere stabiliteten af varme klynge-molekyler, såvel metalklynger som de meget specielle, fodboldlignende kulmolekyler, fullerenerne (se figur 1). Klyngeionerne dannes i en ionkilde, f.eks. ved elektronbestråling af molekyler fra en ovn, og er typisk højt exciterede eller "varme". En del af de lagrede ioner vil derfor henfalde



Figur 1. Struktur af C_{60} , buckminsterfulleren-molekylet

spontant i ringen, for negative ioner typisk ved udsendelse af en elektron. De resulterende neutrale molekyler kan let detekteres i et hjørne af ringen, hvor de fortsætter ligeud uden magnetisk afbøjning i ASTRID eller elektrostatisk afbøjning i ELISA. Et eksempel er illustreret i figur 2, der viser tælletheden per sekund i detektoren som funktion af tiden efter indskydning af C_{60}^- ioner i ASTRID. Henfaldsraten falder stejlt, næsten eksponentielt over de første 100 ms.



Figur 2. Tællehastigheden i en neutral-partikeldetektor efter indskydning og lagring af C_{60}^- molekyler i ASTRID. Den stiplede linje viser en henfaldsrate proportional med t^{-1} , mens den fuldt optrukne kurve er fra en model der inkluderer køling af molekylerne ved varmestråling.

Termionisk emission

For at forstå denne opførsel og "dekod" den information som målingen indeholder, må man først gøre sig klart at fysikken er helt anderledes for store klynger end for atomer eller små molekyler. Der er et stort antal atomare indre frihedsgrader ($3 \cdot 60 - 6 = 174$ for C_{60}) og niveautætheden af exciterede vibrationstilstande er enorm, selv for beskedne excitationsenergier (≈ 15 eV for de lagrede C_{60}^- molekyler). Man kan derfor tænke på de atomare vibrationer som et makroskopisk varmebad, karakteriseret ved en temperatur T , og udsendelsen af en elektron er en statistisk proces, analog til termionisk emission fra en varm glødetråd. Emissionsraten er da givet ved formelen

$$\kappa(T) = \nu \exp(-E_a/kT), \quad (1)$$

hvor E_a er elektronens bindingsenergi (elektron-affiniteten for C_{60} er målt til $E_a = 2.67$ eV) og k er Boltzmanns konstant, $k = 8.62 \cdot 10^{-5}$ eV/K. Frekvensen ν kan beregnes ud fra tværsnittet for den omvendte proces, indfangning af en fri elektron på et neutralt C_{60} molekyle, og dens størrelse er $\nu \approx 10^{13} s^{-1}$. For henfald på en millisekund tidsskala finder vi

$$T \simeq E_a/k \ln(10^{10}) \simeq 1300 K. \quad (2)$$

De registrerede henfald stammer fra molekyler med en indre temperatur i et snævert interval omkring 1300 K. Fra ionkilden udsendes molekyler med et bredt spektrum i indre energi (temperatur), men for $T \gg 1300$ K henfalder de hurtigere end omløbstiden i ringen, mens de for $T \ll 1300$ K er stabile over hele lagringstiden. Vi skal nedenfor argumentere for at dette billede leder til en forudsigelse af en henfaldslov $-dN/dt \propto t^{-1}$, som er angivet ved den stiplede kurve i figur 2. Afvigelsen fra denne kurve skyldes afkøling af de lagrede molekyler gennem udsendelse af varmestråling. Hvis man slukker for strømmen til en glødetråd vil den også hurtigt køle af og ophøre med at udsende elektroner.

t^{-1} -loven

Vi skal nu udlede den approksimative henfaldslov $-dN/dt \propto t^{-1}$, hvor N er antallet af lagrede ioner og t er lagringstiden. Forudsætningen er at henfaldsraten varierer hurtigt med temperaturen, f.eks. som angivet i ligning (1), således at henfaldene i det tidsinterval som målingen omfatter (1–100 ms i figur 2) svarer til

molekyler i et temperaturinterval, der er lille sammenlignet med bredden af temperaturfordelingen af ionerne fra ionkilden. Situationen er skitseret i figur 3, hvor $G_0(T)$ angiver den oprindelige temperaturfordeling ($t = 0$), og $G(T, t)$ er fordelingen til tiden t ,

$$G(T, t) = G_0(T) \cdot \exp(-\kappa(T)t), \quad (3)$$

med $\kappa(T)$ givet ved ligning (1). Vi har her antaget at afkøling ved stråling kan negligeres. Afskæringen af $G(T, t)$ ved høje temperaturer kan karakteriseres ved en temperatur $T_0(t)$, hvor henfald har reduceret fordelingen med en faktor e^{-1} ,

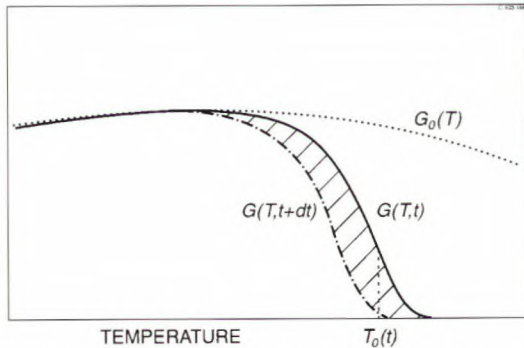
$$\kappa(T_0) \cdot t = 1. \quad (4)$$

I et lille tidsrum dt henfalder især molekyler med en temperatur nær T_0 , illustreret af det skraverede område i figur 3. Arealet af dette område giver ændringen $-dN$ i antallet af lagrede molekyler, og vi får for henfaldsraten

$$-\frac{dN}{dt} \simeq G_0(T_0) \left(-\frac{dT_0}{dt} \right). \quad (5)$$

Den sidste faktor kan vi omskrive ved at differentiere ligning (4) med hensyn til t og udnytte udtrykket for κ i ligning 3,

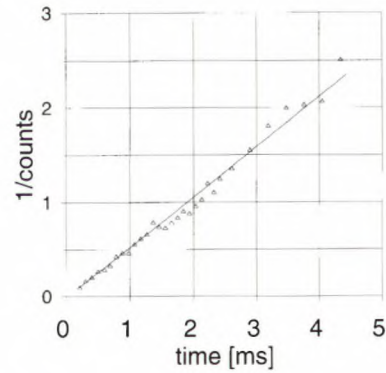
$$-\frac{dT_0}{dt} \simeq \frac{E_a}{k} \cdot \frac{G_0(T_0)}{[\ln(vt)]^2} \cdot \frac{1}{t}. \quad (6)$$



Figur 3. Fordelinger i temperatur (indre energi) af ioner til forskellige tidspunkter efter emission fra ionkilden.

Da logaritmen er stor, $\ln(vt) \sim 25$, varierer den meget langsomt. Det samme gælder $G(T_0(t))$ hvis fordelingen er bred, og dermed får vi omtrentligt $-(dN/dt) \propto t^{-1}$. I modsætning til den eksponentielle henfaldslov for molekyler i en bestemt anslået tilstand indeholder loven ingen karakteristisk tid, d.v.s. den er skalainvariant.

Derimod er loven ikke som den eksponentielle henfaldslov invariant over for en forskydning af nulpunktet for tidsskalaen. Den indeholder et bestemt begyndelsespunkt, $t=0$, som her er det tidspunkt hvor molekylerne forlader ionkilden.



Figur 4. Den reciproke tællerate (renormeret) af neutrale partikler efter indskydning og lagring af Ag-klynger i ELISA.

Klyngeeksperimenter ved ELISA har givet mange eksempler på denne lov som illustreret i figur 4. Vi har her for klynger med fem sølvatomer, Ag_5^- , plottet det reciprokke tælletal som funktion af t , og t^{-1} -loven svarer da til at punkterne skal ligge på en ret linie gennem begyndelsespunktet. Det ses at være godt opfyldt når der ses bort fra de eksperimentelle fluktuationer. Imidlertid er der, som vist i figur 2 for buckminsterfullerenanionen C_{60}^- , i mange tilfælde en betydelig afvigelse som skyldes varmeudstråling fra molekylerne.

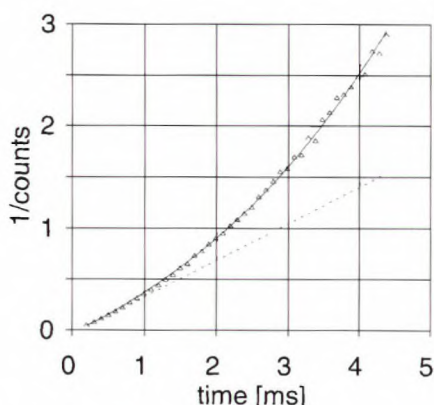
Køling ved varmeudstråling

Man kan i ovenstående regning inkludere afkølingen ved varmestråling, som forskyder fordelingen $G(T, t)$ mod lavere temperaturer. Man finder da en modificeret henfaldslov,

$$-\frac{dN}{dt} \propto (\exp(t/\tau) - 1)^{-1}, \quad (7)$$

hvor parameteren τ^{-1} karakteriserer hastigheden af molekylets afkøling. For $t \ll \tau$ genfinder man t^{-1} -loven ved rækkeudvikling af eksponentialfunktionen til første orden. På grund af den kortere omløbstid i den mindre ring ELISA er der her mulighed for måle henfaldet af C_{60}^- ioner for kortere tider som vist i figur 5. Vi har her igen plottet det reciprokke tælletal som funktion af tiden, og inden for det første millisekund følger punkterne pænt en ret linie som i figur 4. Over hele intervallet beskrives målingerne godt af funktionen i ligning (7) som angivet ved linien gennem punkterne.

Denne ligning med en konstant værdi af τ gælder imidlertid kun i et begrænset tidsinterval. Når målingen udstrækkes til tider $t \gg \tau$ må der tages hensyn til at varmestrålingens intensitet aftager hurtigt med faldende temperatur. Det leder til en krumning af henfaldskurven på et logaritmisk plot, som illustreret i figur 2, og fra den målte krumning kan varmestrålingens temperaturafhængighed bestemmes.



Figur 5. Den reciproke tællerate (renormeret) af neutrale partikler efter indskydning og lagring af C_{60}^- -ioner i ELISA. Den stiplede linie er et lineært fit til de første punkter mens kurven repræsenterer et fit med funktionen i ligning (7) med $\tau = 3.65$ ms.

Studierne af klyngeioner i lagerringene ASTRID og ELISA har således ledt til etablering af en ny, skalainvariant henfaldslov, $-(dN/dt) \propto t^{-1}$, for klynger og molekyler med en bred fordeling i indre energi. De har desuden givet oplysninger om hvor hurtigt klyngerne nedkøles gennem udsendelse af varmestråling. Denne nedkøling er et vigtigt element af varme klyngers dynamik, og nedkølingsraten er en parameter som er vanskelig at bestemme på anden måde.



Jens Ulrik Andersen er professor ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, og leder af ACAP (Aarhus Center for Atomfysik).



Preben Hvelplund er dr.scient. og docent ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Molekyler studeret i ASTRID og ELISA

Lars H. Andersen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Molekyler i ringe

Forsøg med kemiske reaktioner forbindes ofte med glaskolber og farvede væsker. Jeg skal her beskrive, hvordan man kan benytte lagerringe, der traditionelt har været benyttet til forskning med elementar-partikler, til at opnå kendskab om reaktioner, der involverer molekyler. Da lagerringe benytter elektriske og magnetiske felter til at styre og lagre partikler, kan man kun lagre ioner. Man får imidlertid information om neutrale molekyler ved i ringen at tilføje manglende elektroner til lagrede positive molekyllioner, eller ved at skyde overskydende elektroner af negative molekyllære ioner f. eks. med en laser.

Lad mig begynde med at nævne nogle oplagte fordele ved at benytte en lagerring til molekylfysiske studier:

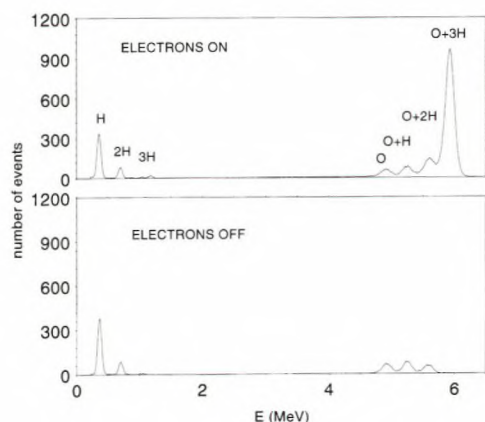
For det første er det essentielt at kende molekylets tilstand når det påbegynder en given reaktion, idet udfaldet kan være meget afhængig af denne begyndelsestilstand. I ringene kan man udnytte at molekyler kan

lagres i adskillige sekunder før man starter sin måling. I denne – på atomar og molekylær tidsskala – meget lange tid kan molekylerne relaxere vibrationelt og rotationelt under udsendelse af infrarød stråling (lang bølgelængde). De fleste molekyler henfalder hurtigt til den laveste vibrationstilstand og opnår rotationsmæssigt en energifordeling, der svarer til stuetemperatur. Der findes molekyler og molekyllioner, der er meget lang tid om at udsende overskydende energi, men i disse tilfælde kan man benytte sig af laserteknikker til at ødelægge netop de molekyllioner, der ikke er i laveste energi tilstand, altså de eksiterede molekyllioner. Som vi skal se senere, findes der molekyllioner, der på grund af overskydende indre energi spontant går i stykker selv efter mange sekunders lagring. Denne type meta-stabile molekyllioner har været studeret både i den magnetiske ring ASTRID og i den elektrostatisk ring ELISA (se også artiklen om klyngefysik i dette nummer af KVANT).

For det andet kan molekyllioner i ASTRID accel-

ereres op til temmelig stor energi ($\approx 10^6$ eV). Ved denne energi har de en hastighed, der er lig hastigheden af elektroner med en energi på ca. 100 eV. Med en elektronaccelerator (såkaldt elektronkøler) kan man derfor foretage kollisionseksperimenter, hvor ioner og frie elektroner har forsvindende *relativ* energi ved at lade en stråle af elektroner med netop ionernes hastighed overlappe med ionerne. I ASTRID gøres dette over en strækning på en meter. Man kan let ændre den relative energi ved at ændre elektronernes energi. Vi har med denne teknik studeret reaktioner mellem molekulære ioner og elektroner ved en relativ energi på bare 10^{-4} eV. Molekylers vekselvirkning med elektroner ved disse meget lave energier finder i naturen sted i kolde interstellare molekulære skyer.

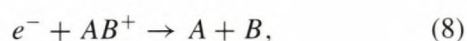
Som en sidste fordel skal her nævnes, at partikler, der er et resultat af en given reaktion i ASTRID meget effektivt kan måles med en detektor lavet af et halvleder materiale. På figur 1 vises pulshøjdefordelingen af de neutrale partikler, der dannes når protoneret vand (H_3O^+) indfanger en elektron fra elektronkøleren. Fragmenterne har ca. samme fart i laboratoriesystemet, og deres energi afspejler derfor deres masse ($E = \frac{1}{2}mv^2$). Som det fremgår af figuren, kan vi let skelne mellem masserne af fragmenterne og på den måde bestemme hvilke fragmenter der dannes, når H_3O^+ indfanger en fri elektron. Kun ved at udnytte den høje energi i ASTRID kan man studere denne type reaktioner idet halvlederdetektorerne fordrer en forholdsvis stor energi af de partikler, der skal måles (helst 100 keV eller mere).



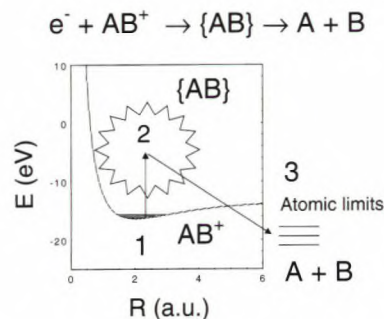
Figur 1. Neutrale fragmenter fra H_3O^+ ioner lagret i ASTRID. Øverste figur viser fragmenter, målt med elektronstrålen tændt, nederste figur er optaget uden elektroner. $O + 3H$ toppen skyldes rekombination.

Dissociativ rekombination

Vi vil nu give et eksempel på måling af dissociativ rekombination (DR), der for et di-atomart molekyle kan skrives som:



hvor en positiv molekulær ion AB^+ indfanger en elektron, og som resultat heraf går i stykker. Af interesse er tværsnittet (sandsynligheden) for DR processen ved forskellige elektron energier samt kendskab til tilstandene af atomerne A og B efter rekombinationen.



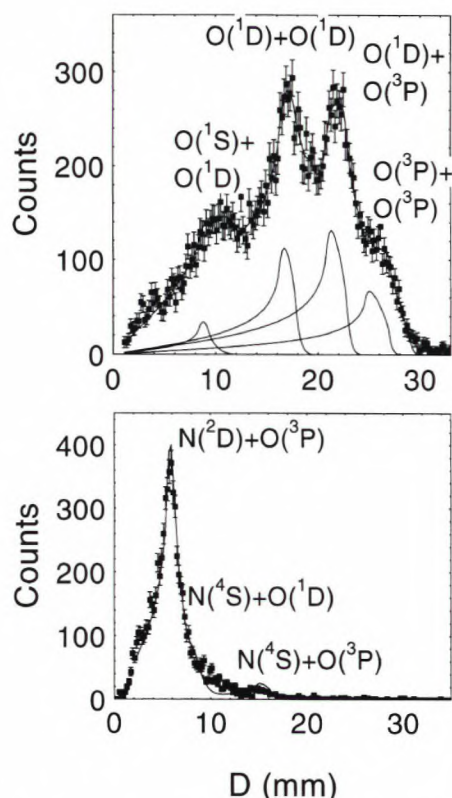
Figur 2. Processen dissociativ rekombination skitseret for et diatomart molekyle. Y-aksen er den indre energi af molekylet og x-aksen angiver atomernes afstand. I grænsen $R \rightarrow$ uendelig findes energien af atomerne.

Processen er skitseret på figur 2, hvor molekylets elektroniske energi er givet som funktion af afstanden mellem de to atomer i molekylet. Overgangen fra 1 til 2 svarer til indfangningen af en elektron og dannelsen af et ustabil molekyle $\{AB\}$. Den efterfølgende overgang fra 2 til 3 svarer til dissociation af det netop skabte neutrale molekyle. Det er specielt denne overgang, der er meget kompliceret at beskrive teoretisk, og målinger er nødvendige for at lede os til den rette forståelse af molekylernes indre dynamik.

Ved at måle den kinetiske energi af fragmenterne kan man bestemme sluttillstanden (den indre elektroniske energi) af de atomare fragmenter. Som det fremgår af figur 2 vil en lille energifrigivelse svare til dannelsen af atomer i eksiterede tilstande. Selve energifrigivelsen måles ved at bestemme afstanden mellem atompar ($A + B$) når de rammer en specielt udviklet detektor, der er placeret 10 m efter elektronkøleren. Atompar, der måles med stor separation, har haft stor energi ved frigørelsen og par med lille separation har efterladt maksimal energi i fragmenternes elektronsky. Det viser sig, at processen dissociativ rekombination meget effektivt danner eksiterede atomer, der senere henfalder med lysudsendelse.

På figur 3 vises resultatet af en måling med O_2^+ og NO^+ . Som det fremgår af figuren dannes O ofte i eksiterede tilstande (3P er grundtilstanden for O), og N -atomet dannes næsten udelukkende i den eksiterede 2D tilstand (4S er grundtilstanden for N). Oxygen atomer i 1S tilstanden udsender grønt lys, der er meget let genkendeligt fra de øverste lag af atmosfæren og dissociativ rekombination er i en højde på over 100 km ansvarlig for dette lys. Lys fra både O og N atomer kendes også fra nordlys. Vi har ved ASTRID påvist at der dannes mere end 10 gange mere $O(^1S)$ end tidligere antaget, og dette har været væsentligt for at forstå lyset fra ionosfæren.

Med flere atomer i molekylet er processen essentielt den samme, men der er mange flere mulige sluttillstande og teoretisk har man endnu ingen gode metoder til at beregne processen. Dissociativ recombination med polyatomare molekylioner er imidlertid uhyre interessant og processen er ansvarlig for dannelse af andre neutrale molekyler, som her illustreret med eksemplet $e^- + H_3O^+$. Da molekylet har mulighed for at gå i mange stykker kan vi ikke bestemme de indre energier med den metode, som anvendes for diatomare molekyler. Ved at analysere data af den type som er vist på figur 1, kan man imidlertid finde at vand ($H_2O + H$) dannes i 33% af DR processerne mens oxygen (O) slet ikke dannes. Produktion af OH tegner sig for resten af reaktionerne (67%). Disse tal benyttes nu i modeller for kemiske reaktioner i det interstellare rum. Vand anses for vigtig fordi det har en god evne til at køle en molekyllær sky ved hjælp af udsendelse af infrarødt lys.



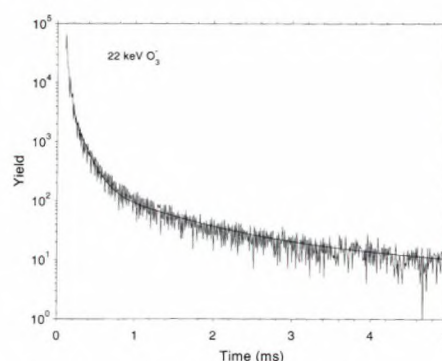
Figur 3. Den indbyrdes afstand (projektion på en detektor) målt efter dissociativ recombination med O_2^+ og NO^+ . De elektroniske tilstande er angivet for atomerne i sluttillstanden.

Negative molekyllære ioner

De fleste molekyler har meget let ved at binde en ekstra elektron og derved blive negativt ladede. Stabiliteten af disse molekyllære ioner er bestemt af deres temperatur (indre energi), samt de forskellige henfaldskanaler der er energetisk mulige for et givet molekyle. Ved at bombardere negative ioner, der er lagret i ASTRID, med

elektroner har vi endog kunnet studere dobbeltladede negative ioner. Disse dannes for nogle molekyler kortvarigt når den indkomne elektron binder sig til den negative ion. For små molekyler (2-3 atomer) er Coulomb frastødningen mellem de negative ladninger dog så stor, at molekylet hurtigt henfalder ved elektronudsendelse og/eller fragmentering. Dobbeltladede negative ioner som CO_3^{2-} og SO_4^{2-} spiller en stor rolle bl.a. i organiske opløsninger, men kun meget lidt er kendt om deres egenskaber som isolerede molekyllære systemer.

Som eksempel på anvendelsen af ELISA, skal her nævnes et forsøg med negative ladede ozon-ioner (O_3^-). Disse ioner kan let dannes i en ionkilde ved en elektrisk udladning i en O_2 gas. På figur 4 ses, at nogle af de dannede ozon ioner



Figur 4. Intensiteten som funktion af tiden af neutrale partikler dedekteret ved lagring af negative ozon ioner i ELISA.

er varme nok til at udsende en elektron, hvorved der sker neutralisation. De neutrale molekyler forlader lagringen, hvilket leder til det observerede tab i den lagrede strøm. De hurtigste henfald sker på en 10-100 μs tidsskala. Det ses også, at for at opnå kolde negative ioner kræves lagring på adskillige ms. Med ELISA planlægger vi at studere kollisioner mellem lagrede O_3^- ioner og frie elektroner for at undersøge eksistensen af O_3^{2-} . For at opnå ozon ioner i en veldefineret kold tilstand skal ionerne lagres i ELISA i mange millisekunder før målingen påbegyndes. Dette er dog intet problem, idet vi har opnået en levetid ($1/e$) på 5 s for O_3^- , og næsten 100 s for visse andre negative ioner.



Lars H. Andersen er dr.scient. og lektor ved Institut for Fysik og Astronomi Aarhus Universitet.

Atomfysik med synkrotronstråling: Laboratorie-astrofysik

Torkild Andersen, Finn Folkmann, Henrik Kjeldsen og Helge Knudsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Studiet af objekter som Solen, stjerner eller det interstellare rum nødvendiggør ofte et indgående kendskab til forskellige fysiske discipliner for at nå frem til en rimelig forståelse af de astronomiske observationer. For eksempel spiller partikelfysikken en væsentlig rolle for forståelsen af universets fødsel, kernefysikken for energiproduktionen i Solen og stjernerne, atomfysikken for bestemmelse af grundstof indholdet i de observerede objekter, hydro-dynamikken for forståelse af Solsvingninger osv. En række af de fysiske størrelser, der er behov for at kende, forefindes allerede som resultater fra udviklingen af de fysiske discipliner, men ofte vil man også kunne stå overfor problemer, hvis løsning kræver en videreudvikling af disse.

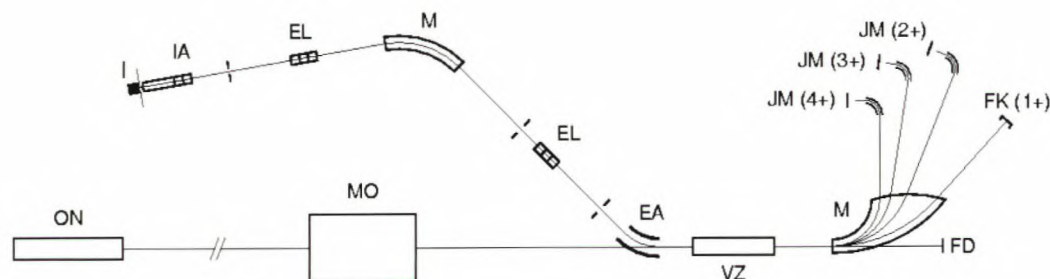
Flere steder i verden er der etableret institutter, der fokuserer på laboratorie-astrofysik, mest kendt er det amerikanske institut JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) i Boulder, Colorado, der blev grundlagt i 1950'erne og som siden da har været blandt de internationalt førende institutter indenfor atom- og molekylfysik. Forskningen på JILA er imidlertid ikke kun målrettet imod astrofysik, f.eks. var det på JILA, at Bose-Einstein kondensation af alkali metal damp for første gang blev realiseret i 1995.

Bestemmelsen af grundstofindholdet for astrofysiske objekter spiller en væsentlig rolle for mulighederne for at opstille modeller for disse og deres omgivelser. Som følge af de ekstreme temperaturer, der kan forekomme f.eks. på Solen, kan atomer forefindes i næsten alle mulige ionisationstilstande, fra negative ioner som H^- , til meget højt-ladende eller fuldt strippede

atomer. Grundstoffet jern (Fe), som spiller en væsentlig rolle i mange astrofysiske sammenhænge, findes som ioner med ladninger fra +1 til +16 i Solens ydre lag. Solatmosfærens temperatur varierer fra et minimum på ca. 4500 K lige uden for Solranden, stigende langsomt ud gennem kromosfæren for derpå at stige meget hurtigt indenfor et ca. 100 km tykt overgangslag til temperaturer på $2 \cdot 10^6$ K i koronaen, en temperatur der bibeholdes helt ud til flere Solradiers afstand.

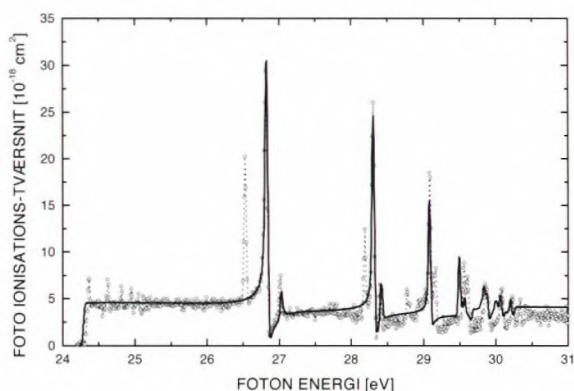
Fra observatorier på Jorden eller fra de rumbaserede observatorier kan man følge lysudsendelsen fra de astrofysiske objekter. Disse spektre indeholder information om hvilke grundstoffer, der findes i objektet, disses ioniseringsgrad og herigennem information om de fysiske omgivelser, samt i hvilken mængde grundstofferne findes. Spektralliniernes positioner angiver entydigt fra hvilket grundstof, som den observerede spektrallinie stammer, men som følge af det meget store antal spektrallinier, der findes indenfor visse grundstoffer (specielt Fe) kan der ofte forekomme to eller flere tætliggende spektrallinier, som man trods meget gode spektrografer ikke kan adskille. Det er derfor nødvendigt at kunne simulere de observerede spektre på grundlag af en viden om bølgelængder for spektrallinier, disses oscillatorstyrker (et mål for overgangssandsynlighed) samt den kontinuerte baggrunds oprindelse og intensitet.

Selvom kendskabet til spektralliniernes positioner er stort, findes der fortsat uidentificerede spektrallinier fra astrofysiske objekter. Kendskabet til oscillatorstyrker er mere begrænset, idet bestemmelsen af disse kræver



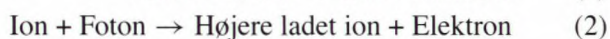
Figur 1. Layout for fotoionisationsforsøget visende ondulator (ON), monokromator (MO) vekselvirkningszone (VZ) ionaccelerator (IA), elektrostatiske linse (EL), analysemagnet (M), elektrostatisk afbøjning (EA) samt detektorer, Johnston multipliers (JM), Faraday-kop (FK) og fotondetektor (FD).

et detaljeret kendskab til levetider for anslåede tilstande i atomer og ioner samt om den relative intensitetsfordeling blandt mulige henfaldskanaler for hver anslået tilstand. Kendskabet til oscillatorstyrker er forbedret væsentligt gennem de sidste 30–40 år som følge af udviklingen af nye eksperimentelle metoder til levetidsbestemmelse, men det er fortsat en stor begrænsning, at oscillatorstyrker kun kendes for et ret så begrænset udvalg af overgange – og ofte kun for lavt ioniserede atomer. De nyere observationer fra Hubble teleskopet har aktualiseret dette problem.



Figur 2. Fotoionisationstværsnit for C^+ ionen fra tærskelværdien ved 24.4 eV til 31 eV. Den fuldt optrukne kurve er den nyeste teoretiske beregning, den stiplede kurve med punkterne illustrerer de eksperimentelle resultater.

Den baggrund, som spektrallinierne er overlejrede, skyldes fotoionisationsprocesser og benævnes opaciteten, som følgelig er en vigtig størrelse at kende for at kunne simulere de eksperimentelle spektre. Imidlertid er det vanskeligt at måle reaktionstværsnit (dvs. sandsynligheder) for fotoionisationsprocesser som:



idet der kræves et detaljeret kendskab til de indgående komponenters koncentration. For neutrale atomer (reaktion 1) er det ekstremt vanskeligt at bestemme tætheden af atomer, når der ses bort fra ædelgasserne, så kendskabet til absolutte fotoionisations tværsnit er meget begrænset for neutrale atomer. For positive ioner (reaktion 2) er der også begrænsninger, idet det er svært at fremstille intense stråler af disse, hvorimod det er let at bestemme tætheden. Da absolutte fotoionisations tværsnit for astrofysisk interessante ioner er i størrelsesordenen 10^{-18} til 10^{-19} cm^2 (eller 1 til 0.1 Mb) er disse vanskelige at måle på grund af den lave ionintensitet. Det er derfor nødvendigt at arbejde med intense fotonkilder, hvilket først er blevet muligt indenfor det sidste årti som følge af udviklingen af undulatorer til synkrotronstråling. Undulatorer har bevirket en forøgelse af fotonfluxen med to til tre størrelsesordener sammenlignet med, hvad man kan opnå fra afbøjningsmagneter. Lasere er endnu ikke

brugbare som alternative lyskilder, idet den krævede foton energi dækker et energiområdet fra ca. 10 eV til ca. 300 eV.

Ved lagringen ASTRID er der opbygget et apparatur bestående af en ion-accelerator og en vacuum ultraviolet fotonstråle, der dannes i undulatoren, se figur 1. Ionerne og fotonerne overlejres på en strækning af 50 cm, hvorefter der foretages en adskillelse af disse i et magnetfelt med efterfølgende bestemmelse af intensiteten af de forskellige typer ioner samt af fotonfluxen. Samtidigt sker der en nøje bestemmelse af den rumlige overlejring af ioner og fotoner indenfor overlappingsområdet. På grundlag heraf kan man bestemme de absolutte fotoionisationstværsnit, når de anvendte detektorers effektivitet er kendt.

Med dette udstyr er det for første gang blevet muligt at bestemme absolutte fotoionisationstværsnit for astrofysisk betydningsfulde ioner som f.eks. C^+ . Som følge af mangel på eksperimentelle data er hidtidige modeller for astrofysiske objekter blevet baseret på teoretiske forudsigelser for absolutte fotoionisations tværsnit. Disse beregninger er gennemført for samtlige grundstoffer til og med jern og for alle tænkelige ioner heraf. Det har imidlertid ikke hidtil været muligt at afprøve nøjagtigheden af disse beregninger, idet der ikke fandtes eksperimentelle resultater at sammenligne med. Af hensyn til de astrofysiske modellers egnethed ønskes de atomfysiske størrelser som oscillatorstyrker og fotoionisationstværsnit kendt med en nøjagtighed på 10% eller bedre. Det stiller store krav til såvel de teoretiske beregninger som de eksperimentelle målinger. De store teoretiske projekter som f.eks. OPACITETS-projektet blev netop startet i midten af 1980'erne for at opnå bedre data til modelberegningerne. De første resultater fra ASTRID for den vigtige C^+ ion blev opnået i dette forår. Figur 2 viser en sammenligning imellem de eksperimentelle resultater og de teoretisk forudsagte fotoionisations tværsnit i energi området 24–31 eV. Der er en fin overensstemmelse lige over ionisationstærsklen ved 24.4 eV, men med stigende foton energi opstår der afvigelser, der udgør ca. 15% ved 30 eV og 35% ved 50 eV. Samtidigt kan det bemærkes, at der er visse af de overlejrede resonanser, som ikke findes i de teoretiske beregninger (se f.eks. resonansen ved 26.5 eV). Årsagen hertil er, at beregningerne negligerer relativistiske effekter som spin-orbit effekten, der for lette atomer og ioner anses for neglignel, men som her manifesterer sig gennem spin-orbit inducerede autoionisations processer. Det igangværende forskningsprojekt udgør en del af forsknings-programmet ved Aarhus Center for Atomfysik (ACAP), der er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond. Projektet har til formål af afprøve en række af de teoretisk forudberegnete fotoionisations tværsnit for astrofysisk betydningsfulde ioner som C^+ , C^{++} , N^+ , O^+ , Mg^+ , Si^+ og Fe^+ , men tillige at studere fotonvekselvirkningen med ioner, atomare som molekulære, positive som negative generelt, for at opnå en bedre indsigt i ion-foton

vekselvirkning omfattende indre elektroner.

Fotoionisationsprojektet udføres som et dansk-engelsk samarbejde. Med udnyttelse af den intense fotonstråle fra ondulatoren er der tillige opbygget to andre forsøgopstillinger, hvoraf den ene også har sin baggrund i laboratorie-astrofysik, idet der studeres spredning af lavenergetiske elektroner på aromatiske

molekyler. Formålet er at bestemme tværsnit for dannelse af negative ioner af aromatiske kulbrinter, en processom man mener kan spille en betydningsfuld rolle i rummet. Synkrotronstrålingen anvendes her til frembringelse af de meget lavenergetiske elektroner ved fotoionisation af argon atomer. Dette projekt gennemføres af en engelsk-dansk-fransk gruppe.

Negative ioner studeret ved ASTRID: En legeplads for grundlæggende atomfysik

Peter Balling, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Negative ioner spiller en vigtig rolle i mange områder af astronomi, fysik og kemi. En negativ ion dannes ved, at et atom eller et molekyle binder en ekstra elektron. Dette er muligt til trods for, at det neutrale atom eller molekyle ikke påvirker den ekstra ladning med en langtrækkende tiltrækning. Bindingen skyldes et induceret dipolmoment samt den tiltrækning, atomernes positive kerne udfører på elektronen når den trænger ind i elektronskyen fra de resterende elektroner. Den resulterende binding er svag og tiltrækningen korttrækkende ($\sim 1/r^4$).

Det har længe været kendt, at negative ioner spiller en vigtig rolle i bindingen af faste stoffer (ionkrystaller som NaCl) og ved kemiske reaktioner i væsker. Denne artikel omhandler negative ioner i gasfasen. Disse systemer har været studeret eksperimentelt siden de nødvendige højvakuum teknikker blev tilgængelige i 1950'erne, idet negative ioner er forholdsvis skrøbelige atomare systemer på grund af den svage binding af den ekstra elektron. Negative ioner i gasfasen har betydning for opførslen af kolde plasmaer, som findes i områder, der spænder fra det teknologiske såsom design af gaslasere til det mere fundamentale som astronomi, hvor negative ioner influerer de optiske egenskaber (opaciteten) af de ydre dele af stjerneatmosfærer.

Set fra en atomfysisk synsvinkel er negative ioner interessante systemer på grund af deres svagtbundne natur. For de fleste negative ioner er den såkaldte elektronkorrelation af afgørende betydning for deres eksistens, hvilket vil blive beskrevet i større detalje i næste afsnit. Denne artikel beskriver, hvordan lagerringen ASTRID er et værktøj, som har muliggjort helt nye typer af eksperimenter, der bidrager til vores forståelse af negative ioner.

Atomar struktur – et resumé

For at belyse betydningen af elektronkorrelation skal her kort mindes om opbygningen af traditionel atomar

struktur. Et atom, bestående af en kerne med ladning Ze , som binder N elektroner med ladning e og masse m , beskrives ved en Hamilton operator

$$H = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Ze^2}{r_i} + \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m} \right) + \sum_{i < j}^N \frac{e^2}{r_{ij}},$$

hvor r_i og $\mathbf{p}_i$ angiver afstanden mellem elektron i og kernen samt dennes impuls, og hvor r_{ij} er afstanden mellem elektron i og j . Den tilhørende Schrödinger ligning kan kun løses eksakt for hydrogenatomet, mens man for flerelektron atomer må benytte tilnærmende metoder. Problemet hidrører fra elektron-elektron vekselvirkningen, der ikke er separabel i de enkelte elektroners koordinater. Den traditionelle metode er således at forsøge at beskrive effekten af de $N - 1$ elektroner på den sidste elektron ved et sfærisk symmetrisk middelpotential. Under denne antagelse kan man løse ligningen for den sidste elektron, og man kan så gentage proceduren og løse hele problemet selvkonsistent. De enkelte elektroner behandles som værende uafhængige og modellen kaldes således den uafhængige elektronmodel. Indenfor denne model kan hver elektron tilskrives et radiale og et angulært kvantetal, n og l , og de samlede $n_i l_i$ benævnes konfigurationen for en given energitilstand.

Lad os betragte den simpleste negative ion, H^- . Den består af en proton og to elektroner og er eksperimentelt påvist at have en bindingsenergi på 0.75 eV. Hvis man forsøger at beskrive dette system i den traditionelle uafhængige elektronmodel, finder man, at H^- ikke er bundet. Måske er det i virkeligheden klart nok, at man ikke bare kan smøre ladningen fra den ene elektron ud som et sfærisk symmetrisk potential, som den anden elektron så mærker. Det, der egentlig sker, er nærmere, at de to elektroner helst vil sidde på modsatte sider af protonen, så de oplever størst mulig tiltrækning fra kernen og mindst mulig indbyrdes frastødning. Et billede som dette kan aldrig inkluderes i den uafhængige elek-

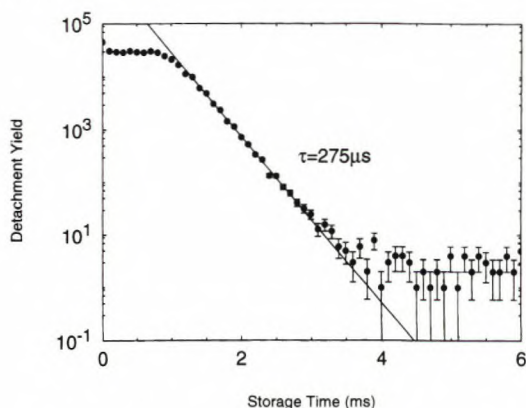
tronmodel, der således fejler i beskrivelsen af den negative hydrogenion.

Lad os slå fast, at elektronkorrelation, som beskrevet ovenfor, er en del af alle atomare og molekulære systemer. Den første eksperimentelle observation af den uafhængige elektronmodels utilstrækkelighed var således i højt anslåede tilstande i helium. Negative ioner er blot systemer, hvor signaturerne af elektronkorrelation er særligt tydelige på grund af den svage binding af den ekstra elektron.

Eksperimentelle studier af negative ioner er rettet imod bestemmelser af deres strukturelle og dynamiske egenskaber. Strukturen er bestemt ved bindingsenergien samt energien for eventuelle resonanser, som beskrevet i det næstfølgende afsnit. Dynamiske egenskaber bestemmes typisk som levetider af tilstandene.

Levetider af metastabile negative ioner

Nogle atomare systemer danner ikke bundne negative ioner. Eksempelvis kan helium i grundtilstanden ikke binde en ekstra elektron på grund af den meget lave polarisabilitet, som er karakteristisk for en ædelgas. Helium kan derimod binde en elektron til sin anslående $1s2s\ ^3S$ tilstand, men idet den negative ion, der herved dannes, ligger energetisk over et helium atom i grundtilstanden og en fri elektron, vil tilstanden ikke være stabil. Udsendelsen af den ekstra elektron er imidlertid forbudt til laveste orden, hvor spin, angulært moment og paritet skal være bevaret. Levetiden for den negative ion viser sig at afhænge af finstruktur tilstanden, og er på flere hundrede mikrosekunder for den mest langlivede ($J=5/2$).



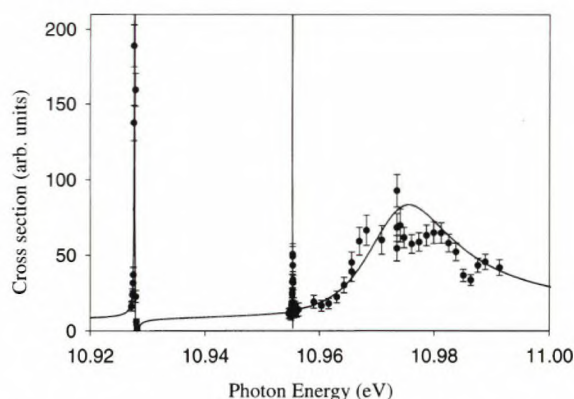
Figur 1. Typisk henfald for negative heliumioner.

Det er en stor eksperimentel udfordring at måle meget lange levetider (μs – ms området). Problemet er, at man skal observere systemet længe nok til at en betydelig del af ionerne henfalder, og samtidig skal man sikre sig, at systemet er upåvirket af systematiske effekter, som forstyrrer målingen. Lagringen ASTRID har demonstreret at kunne lagre stabile negative ioner med en lagringstid på nogle sekunder. Denne henfaldstid skyldes kollisioner med baggrundsgas på trods af det meget lave tryk i lagringen. Når nega-

tive ioner lever kortere end positive ioner skyldes det, at negative ioner har et større tværsnit for neutralisering i baggrundsgassen.

Ved at lagre en ~ 10 keV stråle af metastabile negative ioner i lagringen kan man måle henfaldet af ionerne over mange levetider. Ionernes henfald detekteres ved, at de neutrale atomer ikke afbøjes i lagringens hjørnemagneter og derfor kan ramme en detektor, der sidder efter en af disse. Tælleraten på denne detektor måles som funktion af tiden efter injektion og illustrerer ionstrålens henfald. Et typisk henfald for den negative heliumion er vist på figur 1. Det ses, at tælleraten kan beskrives som et eksponentielt henfald med en levetid på $275\ \mu s$. Bemærk, at de ioner, der henfalder efter én levetid, har fløjet 200 meter, hvilket illustrerer vanskeligheden ved at måle en så lang levetid med andre metoder. Den målte levetid afhænger af ionstrålens lagringsenergi, idet magnetfelterne i ringen blander de tre finstrukturkomponenter. Ved at ekstrapolere til intet felt fås en levetid på $350 \pm 15\ \mu s$. Dette resultat er korrigeret for et lille bidrag, der stammer fra fotoløsrivelse på grund af sort hulrumsstråling: Den negative heliumion er så løst bundet, at en del af den termiske stråling ved stuetemperatur kan løsrive elektronen. Da resultatet fra målingen på ASTRID fremkom, var der en stor spredning på de teoretiske beregninger af levetiden, og den præcise eksperimentelle måling har bidraget til at optimere beregningsmetoderne.

Den metode, der er beskrevet i dette afsnit, er siden blevet benyttet til at måle levetider af andre metastabile atomare negative ioner og nogle få negative molekyliøner.



Figur 2. Fotoløsrivelsestværsnittet for negative hydrogenioner.

Vakuumpultraviolet spektroskopi af den negative hydrogenion

Negative ioner har normalt kun en enkelt bunden tilstand, grundtilstanden. Spektroskopi af negative ioner knytter sig således til en bestemmelse af bindingsenergien for denne samt position og bredde af anslåede tilstande i kontinuet, som giver anledning til resonanser i elektronsprednings- eller fotoløsrivelses-

eksperimenter. På grund af opløsningsevnen kommer de mest præcise resultater idag fra laserspektroskopi af de negative ioner.

Den negative hydrogenion, som blev omtalt i det forrige afsnit, har et rigt spektrum af resonanser, som ligger nær ved tærsklerne for de anslåede tilstande i hydrogen. Spektroskopi af disse resonanser kræver således, at man kan benytte lys med en fotonenergi omkring 11 eV, det vil sige i det såkaldte vakuum-ultraviolette (VUV) område. Dannelse af lys med en god opløsning (lav båndbredde) i VUV området er vanskelig og dette har hindret præcise målinger på H^- .

ASTRID kan accelerere en ionstråle af negative hydrogenioner til flere MeV kinetisk energi. Ved denne energi sker der et betydeligt Doppler skift af lys fra laboratoriesystemet til ionernes hvilesystem. Dette muliggør spektroskopi med VUV lys med en *fast* bølgelængde, der lettere kan dannes med en lav båndbredde og derfor tillader en høj opløsning. Ved at ændre ionernes hastighed ændres Doppler skiftet og dermed den effektive fotonenergi, ionerne ser. Ionerne og VUV laserstrålen overlappes kollinear for at minimere bidrag til båndbredden fra vinkelspredning af de to stråler. Fotoløsrivelses tværsnittet måles ved at tælle antallet af neutrale hydrogenatomer, der dannes af laseren ved de forskellige effektive fotonenergier. Resultatet af en måling er vist på figur 2. Målingerne viser tre resonanser, hvoraf den ene (ved 10.928 eV) blev observeret med stærkt forbedret opløsning og den anden (ved 10.955 eV) blev set for første gang med den her beskrevne teknik.

Den gode opløsning, som anvendelsen af ASTRID har muliggjort, har tilladt en præcis bestemmelse af resonansernes positioner, og dette har bidraget til en kritisk test af de teoretiske beregninger. Observationen af den anden resonans, som ikke før har kunnet opløses, har fremkaldt en diskussion af antallet af resonanser, der kan forventes. Ved at studere både H^- og D^- har isotopeffekter kunnet undersøges. De fremtidige studier stiler mod en endnu højere opløsning, idet en sådan vil tillade at måle bredden af den lavestliggende resonans, som er endnu en kritisk parameter for teo-

retiske beregninger.

Konklusion

Vores eksperimentelle viden om fysiske og kemiske systemer følges i disse år tæt med de teknologiske landvindinger. For eksempel har spektroskopi af negative ioner været baseret på udvikling af højvakuum teknik, accelerator teknik og højtopløsende lasere. ASTRID er endnu et skud på stammen, der har bragt os i en position, hvor ny viden kan opnås. Tilstedeværelsen af et så unikt værktøj i Danmark har bidraget til at synliggøre Danmarks forskningsposition i international sammenhæng.

Referencer:

- [1] Metastable-ion lifetime studies utilizing a heavy-ion storage ring: Measurements on He^- , T. Andersen, L. H. Andersen, P. Balling, H. K. Haugen, P. Hvelplund, W. W. Smith and K. Taulbjerg, Phys. Rev. A **47** (1993) 890.
- [2] Positions and isotope shifts of the $H^- (^1P_o)$ dipole resonances below the $H(n=2)$ threshold, H. H. Andersen, P. Balling, P. Kristensen, U. V. Pedersen, S. A. Aseyev, V. V. Petrunin, and T. Andersen, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 4770.



Peter Balling er Ph.D. og forskningsadjunkt på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Errata

“Fri-elektron laseren – Næste generation af brillante synkrotronstrålingskilder”

af Robert Feidenhans'l, Leif Gerward og Janus Staun Olsen, KVANT **10** side 16–24 (1999).

Der har desværre indsneget sig et par fejl i ovennævnte artikel.

Indledningens 2. afsnit, sidste linje: Periodiciteten skal være 1 mikrosekund i stedet for 1 millisekund.

Side 18, første linje: De højere harmoniske bidrag skyldes at elektronen på grund af dens sinusformige bevægelse i undulatoren ikke udfører en perfekt harmonisk bevægelse i sit hvilesystem (det system, hvori middelværdien af elektronens transversale hastighed er nul).

Side 19, første linje: “superledende magneter” skal være “superledende kaviteter”.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.nbi.dk/dfs

Jens Olaf Pepke Pedersen (formand)
DCESS, NBIfAFG
Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø

E-mail: jopp@dcass.ku.dk
Tlf. 35 32 05 73 / Fax 35 32 05 76

Dorthe Posselt (næstformand)
E-mail: dorthe@mmf.ruc.dk

Nis Bjerre (kasserer)
E-mail: nis@ifa.au.dk

Preben Alstrøm
E-mail: alstrom@nbi.dk

Karsten W. Jacobsen
E-mail: Karsten.W.Jacobsen@fysik.dtu.dk

Ole Mouritsen
E-mail: ogm@fki.dtu.dk

Poul V. Thomsen
E-mail: pvt@ifa.au.dk

DFS årsmøde 1999

Dansk Fysisk Selskab afholdt sit årsmøde 1999 på hotel Nyborg Strand i begyndelsen af juni med ca. 225 deltagere, der ialt præsenterede 150 bidrag enten i form af foredrag eller poster.

Et af højepunkterne under årsmødet var uddelingen af NKT Forskerprisen, der anses for at være den mest prestigefyldte pris i Danmark indenfor grundlæggende fysik og kemi. DFS havde valgt at uddele prisen til lektor Klaus Mølmer og professor Eugene Polzik, begge fra Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet, for deres arbejde indenfor kvanteoptik. På midtersiderne af dette nummer af Kvant finder du en folder med en præsentation af de to fysikere og det arbejde, der førte til tildelingen af prisen. Eugene Polzik har for nylig gennemført verdens første teleportation, hvor en laserstråle i den ene ende af laboratoriet blev ødelagt og genskabt med sine oprindelige egenskaber i den anden ende af laboratoriet. I næste nummer af Kvant skriver han sammen med Jens Lykke Sørensen om "kvante teleportation".

NKT Forskerprisen er på 100.000 kr. og er stiftet af NKT i erkendelse af, at det er grundforskningens resultater, der er fundamentet for NKTs højteknologiske virksomheder. Derfor har NKT interesse i at stimulere det naturvidenskabelige miljø.

Et andet højdepunkt var kasserer Nis Bjerres fremlæggelse af foreningens regnskab for 1998, der balancerede med 150.000 kr. og udviste et lille overskud

på 7.000 kr. Regnskabet bliver traditionen tro gengivet i Kvant, denne gang på siderne 29 og 30.

Ved de sidste to årsmøder har der været en geofysisk session, arrangeret af Dansk Geofysisk Forening. I 1998 var det en solid succes, hvor flere måtte gå forgæves til det overfyldte foredragslokale, mens fremmødet i år var mere beskedent. Derfor har geofysisk forening besluttet ikke at deltage i årsmødet næste gang. Foreningen afholder imidlertid en række eftermiddags/aften foredrag, bl.a. den 9. november 1999 om oversvømmelsesvarsling i Kina, den 16. november om satellitten CRYOSAT og den 9. december 1999 holdes et foredrag med titlen "Diversity of Holocene life-forms in fossil glacier ice". Nærmere oplysninger om foredragene fås på dgf@gfy.ku.dk.



Formanden for fysikpriskomiteen, Lars Lading, motiverer valget af prismodtagerne mens daværende forskningsminister Jan Trøjborg og NKTs koncerndirektør Tom Knutzen (til højre) lytter på. Foto: Leif Sørensen.



Fra venstre Eugene Polzik og Klaus Mølmer med beviset på NKT Forskerprisen 1999 sammen med forskningsminister Jan Trøjborg. Foto: Leif Sørensen.

Til gengæld havde DFS's sektion for Uddannelse og Undervisning en meget velbesøgt session under hele årsmødet, og sektionen har derfor besluttet at deltage igen til næste år.

Forberedelserne til årsmødet år 2000 er nu igang,

og du bør allerede nu reservere datoerne torsdag den 8. juni og fredag den 9. juni. Årsmødeudvalget udgøres af DFS's bestyrelse, suppleret med Henrik Bruus fra Faststoffysiksektionen samt Johannes Andersen, Michael Linden-Vørnle og Lisbeth Fogh Olsen fra Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning. Selvom DFS de sidste to år har fået afslag fra SNF på en ansøgning om underskudsgaranti for de inviterede udenlandske foredragsholdere, har DFS igen ansøgt om en sådan garanti.

DFS i SNF

DFS har indstillet Preben Alstrøm som medlem af Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (SNF), og vi kan nu glæde os over, at Jan Trøjborg fulgte indstillingen og har beskikket Preben som medlem af SNF for en 4-årig periode fra 1. august i år.

Physica Scripta

Det faglige tidsskrift Physica Scripta udgives i fællesskab af de fysiske selskaber og de videnskabelige selskaber i de nordiske lande. Kontrakten herom udløber i år, og DFS har sagt ja til at forlænge aftalen for en ny seks-årig periode.

Nordisk-Baltisk møde i København

De fysiske selskaber i de nordiske og baltiske lande mødes en gang om året for at koordinere deres aktiviteter og udveksle erfaringer. I år er DFS vært for mødet, der afholdes i København den 6. november.

Melles Griot Danmark flytter til Sverige

Efter næsten 7 år indenfor Melles Griot har Lise Askjær besluttet sig til at stoppe sin aktive karriere og hellige sig familie, venner og fritidsinteresser. Derfor er det danske kontor, Melles Griot Danmark, nu lukket og kundeansvaret overgået til moderselskabet Melles Griot AB i Täby udenfor Stockholm. Melles Griot har i løbet af året etableret et europæisk lager- og distributionscenter i Holland, hvorfra alle leverancer til kunder i Europa foretages, hvilket således nu også gælder for kunder i Danmark. De hidtidige danske telefonnumre bliver viderestillet til Sverige, men du kan finde de nye telefonnumre i annoncen side 9.

I øvrigt er BFI OPTILAS, der opstod sidste år som en sammenlægning af BFI og Optilas, også flyttet, dog kun til Hedehusene, hvor selskabet har fået nye lokaler i det gamle mejeri "Hedelykke".

Brug DFS's hjemmeside

Du kan finde aktuel information om DFS på hjemmesiden www.nbi.dk/dfs. Her kan du også melde dig ind i DFS, tegne abonnement på Kvant samt finde mange nyttige links, f.eks. til udstillerne på DFS's årsmøde.

Årsmøde i Norsk Fysisk Selskab

Det norske fysiske selskab har holdt årsmøde i Geilo den 17.-19. juni 1999, hvor de norske fysikere bl.a. hørte Erik Lægsgaard fortælle om nanoteknologi. Årsmødet indeholdt også en præsentation af årets nyansatte fysikere i Norge, og tre af de nyansatte holdt foredrag på mødet.

To sessioner på mødet var afsat til en diskussion af de centrale temaer i norsk fysik og udgjorde en vigtig del af mødet. Den ene session handlede om fysikundervisningen og medførte en livlig debat om hvad der er godt og skidt i undervisningen. I en fagpolitisk diskussion sammenlignede man norsk fysik med de øvrige nordiske lande, hvor der er store forskelle, især indenfor faststoffysik. En interessant observation var, at Finland har forpligtet sig til at det offentlige forskningsbidrag skal udgøre en bestemt brøkdel af det totale forskningsbudget. Hvis Nokia derfor øger sin forskning, har den en positiv effekt for hele forskningsmiljøet.

Ialt blev der afholdt 30 foredrag på mødet, og ligesom ved dansk fysisk selskabs årsmøde blev der også afholdt årsmøde i "Nettverk for kvinder i fysikk."

Dansk Naturvidenskabsfestival 2000

Dansk Naturvidenskabsfestival er Danmarks store festival for naturvidenskab og teknik. Festivalens formål er at øge interessen for naturvidenskab og teknik blandt befolkningen i alle aldre.

Festivalen blev første gang afholdt i 1998 med over 2000 spændende aktiviteter i hele landet for både børn, voksne og familier. Næste festival løber fra fredag den 22. september til søndag den 1. oktober år 2000.

Dansk Naturvidenskabsfestival opfordrer alle, der har med naturvidenskab og teknik at gøre til at benytte chancen og deltage i festivalen med et arrangement. Når mange formidler samtidig, opnås en ekstra stor opmærksomhed, som kommer alle til gode.

Du er velkommen til at kontakte festivalens sekretariat hvis du har spørgsmål eller ønsker at komme på adresselisten på e-mail dnf@dnf2000.dk eller www.dnf2000.dk.

PR-medarbejder til DFS

DFS har besluttet at starte et pilotprojekt, som skal forbedre DFS's kommunikation såvel internt som eksternt. Vi ønsker derfor at ansætte en PR-medarbejder, der bl.a. skal etablere et elektronisk kommunikationssystem til medlemmerne (herunder indsamle e-mail adresserne), samt sælge annoncer til DFS's hjemmeside og Kvant, og firmaudstillinger til årsmødet. Hvis du er interesseret, så henvend dig til Jens Olaf Pepke Pedersen på jopp@dcass.ku.dk eller telefon 35 32 05 73 for at få nærmere oplysninger.

Dansk Fysisk Selskab, Årsregnskab 1998

INDTÆGTER

DFS og EPS kontingenter	137.620,00
Renter bankkonto	7.303,83
Renter girokonto	308,72
Fysisk Tidsskrift	4.922,40

INDTÆGTER IALT

150.154,95

UDGIFTER

DFS administration:		
Medhjælp regnskab	7.911,00	
Gebyrer, papir m.v.	3.562,75	
Repræsentation	<u>1.013,50</u>	12.487,25
DFS diverse rejseudgifter		9.308,99
KIF mødeudgifter + porto		4.809,40
EPS:		
EPS indv. medlemskab 1998	13.000,00	
EPS DFS-medlemskab 1998	27.936,45	
Europhysics News distribution	<u>12.000,00</u>	52.936,45
KVANT:		
KVANT 1998 (535 x 75)		40.131,00
DFS Årsmøde incl. KIF:		
Mødeindtægter	85.640,50	
Mødeudgifter	<u>115.706,83</u>	
Mødeunderskud	30.066,33	
Overskud overf. fra 1997	<u>23.629,91</u>	
Mødeunderskud		6.436,42
USS Middelfart konference m.v.:		
Mødeindtægter	36.365,00	
Mødeudgifter	<u>39.244,00</u>	
Mødeunderskud		2.879,00
Østeuropa:		
Lith. Phys. Soc. bidrag til EPS-fee	2.492,52	
Academia Europaea	<u>11.512,30</u>	14.004,82

UDGIFTER IALT

142.993,33

OVERSKUD

7.161,62

150.154,95

Dansk Fysisk Selskab, Status 31. december 1998

AKTIVER

Indestående bank	239.626,16
Indestående giro	54.736,59
Kassebeholdning	400,00
Tilgodehavende vedr. årsmøde	6.800,00
Tilgodehavende vedr. Middelfart konf.	300,00
AKTIVER IALT	301.862,75

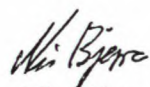
PASSIVER

Skyldig udlæg vedr. Middelfart konf.	1.480,00
Skyldig EPS indiv. medlemskab 1998	13.000,00
Skyldig distribution Europhysics News (1996-1998)	36.000,00
Physica Scripta rejsetilskud overført til 1999	12.289,00
PASSIVER IALT	62.769,00

KAPITALKONTO

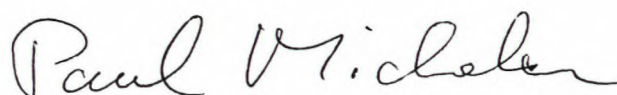
Saldo pr. 1. januar 1998	231.932,13
Overskud 1998	7.161,62
KAPITALKONTO IALT	239.093,75
SUM=AKTIVER	301.862,75

11. maj 1999



Nis Bjerre
Kasserer 1998

Bilag, kontoudtog og regnskab gennemgået.
Ingen kritiske bemærkninger
26. maj 1999



Poul Kerff Michelsen
Revisor for DFS

Et nyt Kvant - i samarbejde med Astronomisk Selskab

Jens Olaf Pepke Pedersen, redaktør af Kvant.

Kvant er nu godt igang med sin 10. årgang, og har dermed bevist sin levedygtighed. Artiklerne i bladet har gennem snart 10 år været en god kilde til den nyeste forskning og udvikling indenfor fysikken – og specielt har bladet opfyldt funktionen om at berette om udviklingen indenfor dansk fysik samtidig med at det har været medlemsblad for Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse.

Siden starten for snart ti år siden har bladet bevaret sit karakteristiske udseende, og redaktørerne siden da har på fornem vis værnet om bladets særpræg. Fra næste år vil der imidlertid ske en markant ændring af Kvant, idet bladet fra 1. januar 2000 også vil blive medlemsblad for Astronomisk Selskab.

Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab er en dansk landsdækkende forening for alle, der er interesserede i astronomi. Selskabet blev stiftet i 1916 og har idag over 800 medlemmer over hele landet. Medlemsskaren omfatter professionelle astronomer, aktive amatører og andre astronomi-interesserede, og selskabet har en række sektioner, hvor man har mulighed for, at samarbejde med andre om seriøs amatørastronomi. Der findes f.eks. sektioner for observation af meteoror, variable stjerner, måneokkultationer og Solen.

Astronomisk Selskab har hidtil sammen med de norske og svenske astronomiske selskaber udgivet "Astronomisk Tidsskrift". Imidlertid har Astronomisk Selskab fra årets udgang besluttet at trække sig ud af dette samarbejde og i stedet tilbyde Kvant til sine medlemmer.

Kvants nuværende læsere vil mærke dette ved at der fremover kommer flere artikler om astronomiske emner. Målsætningen er, at der i hvert nummer skal være en eller to astronomiartikler. Samtidig vil det øgede oplag af bladet imidlertid tilføre flere ressourcer til Kvant, som vil blive brugt på at øge sidetallet. Der vil derfor fortsat være plads til (og hovedvægt på) mange gode fysikartikler i bladet.

Vi vil imidlertid gerne prøve at kombinere nogle af de bedste ting fra de to blade. Astronomisk Tidsskrift indeholder f.eks. mange korte notitser om de nyeste forskningsresultater, og Kvants redaktion er derfor allerede fra dette nummer udvidet med en nyhedsredaktør. Det er blevet Michael Cramer Andersen fra Astronomisk Observatorium, som også er medlem af redaktionen for fysiktidsskriftet "Gamma". Du kan se Michaels første nyhedsspalte i Kvant på næste side. Endvidere bistår Astronomisk Tidsskrifts Danmarks-redaktør, Michael Linden-Vørnle, med råd og vejledning i startperioden.

Astronomisk Selskab udgiver endvidere et medlemsblad, "Knodepunktet", der udkommer fire gange om året og bringer nyt om livet i selskabet, bl.a. foredragsprogram, kommende arrangementer, læserbreve, nyt fra sektionerne og korte artikler på begynderniveau. Dette blad vil fortsat udkomme, og der vil derfor kun i mindre omfang være foreningsstof fra Astronomisk Selskab i Kvant. Fra næste nummer af Kvant vil Knodepunktets redaktør, Camilla Bacher, imidlertid indtræde i Kvants redaktion og hjælpe med at redigere astronomistoffet.

Prøvenummer i december

Det næste nummer af Kvant bliver et prøvenummer, hvor vi vil afprøve samarbejdet med Astronomisk Selskab, og jeg er naturligvis meget interesseret i at høre læsernes mening om den nye stil i bladet inden premieren i år 2000.

Jeg kan allerede nu afsløre, at Søren Larsen i næste nummer vil beskrive, hvordan "unge" kuglehobe dannes i andre galakser (for en astronom er 100 millioner år jo ingen alder), og Johannes Andersen vil fortælle om arbejdet som generalsekretær for den Internationale astronomiske Union. Desuden vil den nyudnævnte nyhedsredaktør fortælle om solformørkelsen tidligere i år samt om det astrofysiske grundlag for liv!

Blandt de øvrige forfattere er Aksel Wiin-Nielsen, der vil skrive om atmosfærens struktur, og Jens Lykke Sørensen skriver sammen med Eugene Polzik om kvante teleportation. Herudover kommer der artikler om årets nobelpriser i fysik og kemi.

Indenfor de senere år har vi set en tilnærmelse mellem fysik og astronomi, f.eks. er fysik og astronomi lagt sammen i fælles institutter på både Aarhus og Københavns Universiteter. Jeg ser det nye samarbejde om Kvant som et fælles fysik-astronomi tidsskrift som en naturlig del af denne udvikling, og jeg er sikker på, at det vil blive til glæde for både gamle og nye læsere.



Jens Olaf Pepke Pedersen har været redaktør af Kvant siden 1998. Han er ansat på Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb.

Kvant-nyheder

Redigeret af nyhedsredaktør Michael Cramer Andersen

Kvant-nyheder

Velkommen til en nyskabelse i Kvant, nemlig en nyhedssektion! Som fysiker og astronom er der mange veje nyheder fra forskningsfronten kan nå én. De fleste nyhedskilder er engelsksprogede men fremover vil Kvant være et "dansk alternativ". Det er planen, at der vil blive bragt smånyheder fra alle diciplinerne indenfor fysik og astronomi, bl.a. geofysik, biofysik, faststoffysik, atomfysik og højenergifysik, ligesom der specielt for de astronomi-interesserede vil blive en del omtale af nyheder indenfor astronomi/kosmologi (under ét kaldet astrofysik).

Bemærk, at kilder vil blive angivet med forkortelser som f.eks. NASA, ESO, AIP, Nature o.s.v. Disse er forklaret i slutningen af nyhedsspalten.

Der findes også en WWW-version af nyhederne hvor henvisninger til WWW er markeret. WWW-udgaven af Kvants nyhedsspalte findes på: www.nbi.dk/dfs.

Nobelpris i fysik for renormalisering af standard-modellen

Af Jakob L. Nielsen og Michael C. Andersen

Årets nobelpris i fysik er tildelt Gerardus 't Hooft og Martinus J. G. Veltman, begge hollændere, "for at kaste lys over kvantestrukturen af elektrosvage vekselvirkninger i fysik".

Deres arbejde kan ses i forlængelse af det arbejde, som Glashow, Salam og Weinberg udførte i slutningen af 1960'erne, hvor de opstillede det der indenfor partikelfysik nu kaldes "standard-modellen" for de elektrosvage vekselvirkninger. Dengang blev denne model dog ret køligt modtaget, idet den generelle opfattelse var, at den ikke var "renormaliserbar".

Beregning af tværsnit og andre målelige størrelser i kvantefeltteorier resulterer ofte i uendelige størrelser. Man kan i nogle kvantefeltteorier fjerne disse uendelige størrelser ved en teknik, der kaldes "renormalisering" og derved opnå en række forudsigelser, der kan tjekkes i eksperimenter. På den anden side vil en teori, der ikke er renormaliserbar ikke være i stand til at forudsige noget som helst, og den er derfor værdiløs som fysisk teori.

Det bedste eksempel på en succesfuld renormalisering er kvanteelektrodynamikken, som er en kvanteteori for de elektromagnetiske kræfter. Denne kan fuldt renormaliseres, og dens forudsigelser er i nogen eksperimenter blevet tjekket med 10 decimalers nøjagtighed!

De to nobelpristagere viste fra 1968-72, at standard-modellen, stik mod den generelle opfattelse blandt fysikere, faktisk kunne fuldt renormaliseres, og derfor var en fuldt ud gyldig fysisk teori. Siden da har teorien

gået sin sejrsgang i talrige eksperimenter udført over hele kloden, og er nu accepteret som netop standard-modellen. De to nobelpristageres arbejde var altså et meget vigtigt fremskridt for fysikken.

I næste nummer af Kvant bringer vi to artikler om årets nobelpriser i henholdsvis fysik og kemi.

Kilder: Nobelstiftelsen, www.nobel.se, og "The Glorious Days of Physics - Renormalization of Gauge theories".

Tyngdeaccelerationen målt på atomer i frit fald

Tre forskere fra Stanford Universitetet, Californien har anvendt en laser-kølet atomfælde til at måle tyngdeaccelerationen af Cæsium-atomer i frit fald. Den absolutte usikkerhed af målingerne er $\Delta g/g \approx 3 \cdot 10^{-9}$ og det er en million gange forbedret i.f.t. tidligere målinger af g udført med et atom-interferometer i 1992.

I centrum af forsøgsopstillingen er en magneto-optisk fælde (MOT) med $5 \cdot 10^8$ Cs-atomer som tilføres fra en tynd gas og køles ned til $1,5 \mu\text{K}$. Herefter slukkes magnetfeltet og Cs-skyen beskydes med mikrobølger så der opsendes en fontæne af ca. $3 \cdot 10^6$ atomer der når et par millimeter op og derefter falder frit i et magnetisk afskærmet område. Mikrobølgerne bringer atomerne i en superposition af to tilstande der efter det frie fald vil give et interferensmønster som kan måles og faldtiden bestemmes.

Ved målinger der strækker sig over tre dage er der observeret variationer som skyldes tidevandsændringer i tyngdefeltet. Der kan klart skelnes mellem en model for Jorden som et fast elastisk legeme og en model hvor oceanernes virkning er medtaget. Den sidste passer bedst. En af de betydelige usikkerhedsfaktorer er Corioliskraften som afhænger af atomernes vanderette hastigheder under faldet. Ved bl.a. at rotere hele eksperimentet mener forskerne, at de kan formindske usikkerheden til 10^{-10} .

Teoretikere der udvikler nye modeller for tyngdekraften på korte afstande (kvantegravitation) opererer ofte med 6 eller 11 dimensioner. Tyngdekraften er kun testet på afstande over 1 cm og derfor er eksperimenter som ovenstående af stor betydning for at afsløre eventuelle fluktuationer i rumtiden som skyldes højere dimensioner. Men det vil nok være en god idé, at finde et stabilt tyngdefelt.

Kilde: Nature 26. August 1999, side 849-852.

Solens varme korona

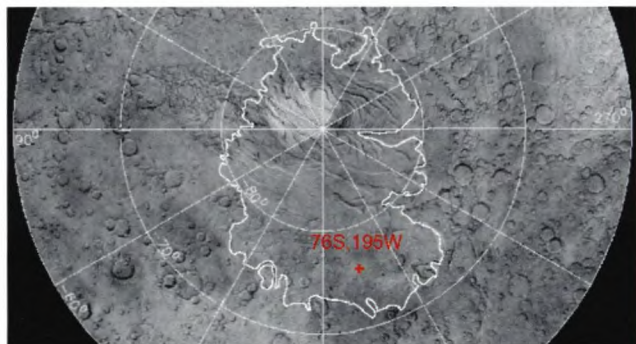
Solformørkelser er smukke at se på, check f.eks. SE-CIS webside nedenfor, hvor man kan læse, at forskere i 1973 kunne opleve totaliteten vare i 74 min. med

en prototype på Concorde-flyet! SECIS står for *Solar Eclipse Corona Imaging System*, et nyudviklet digitalt højopløsnings CCD-kamera til at optage billeder af Solens korona. Det er netop koronaen som mange rejser efter fordi den kun kan ses under den totale fase som maksimalt varer 7,5 min. Men forskerne forstår endnu ikke hvordan temperaturen af den tynde gas kan nå helt op på omkring 2 mio. grader, når overfladen (fotosfæren) "kun" er 5800 K. Koronaen udsender kraftig stråling i både ultraviolet og røntgen området.

En betydelig del af energien der går til opvarmningen stammer fra de ca. 50.000 kortvarige udbrud af UV og røntgen-stråling som SOHO-satellitten har registreret. Men en anden effekt kan også spille en væsentlig rolle. Magnetiske bølger der kommer fra Solens indre kan ende i koronaen hvor de producerer hurtige oscillationer i det synlige lys der kan observeres under en total solformørkelse. Varigheden af oscillationerne kan være helt ned til et sekund og det er grunden til, at de engelske forskere har konstrueret SECIS-instrumentet. Kilde: astro1.bnsc.rl.ac.uk/secis.

Mars Polar Lander i december

Efter 11 måneders rejse vil Mars Polar Lander nå frem til vores lille røde naboplanet og forhåbentlig stå sikkert på planetens overflade den 3. december 1999 kl. 21:00:26. Desværre er den relæstation, Mars Climate Surveyor, som skulle have målt i kredsløb og videresendt Polar Landerens data, gået tabt p.g.a. en teknisk fejl. Datamængden bliver muligvis forsinket/begrænset.



Figur 1. Landingsstedet markeret i udkanten af sydpolskalotten (den hvide konturlinie). Fra NASA: www.mars-polarlander.com/landingsite.

Sidste gang et dansk eksperiment var med ombord på en Mars-mission var landingsstedet en formodet udtørret flodbund. Vand skal nok findes i form af is idet den lille planet for længst er afkølet (stor overflade i forhold til rumfang).

Denne gang er der i øvrigt igen danske magneter med og landingsstedet er i udkanten af sydpolskalotten (figur 1).

NASA vil bl.a. grave en halv meter dyb grøft, en "isboring", der skal fortælle noget om udviklingen af Mars-klimaet. Efter at gravearmen har gjort sit arbejde vil der blive taget billeder og støv- og isprøver vil blive

analyseret kemisk og med de berømte magneter.

Mars-atmosfæren består af 95% kuldioxid (trykket er 1/100 atm), så når det sner på Mars er det CO₂-is eller "tørreis". Men den permanente is på iskalotten kan udmærket bestå af H₂O-is.

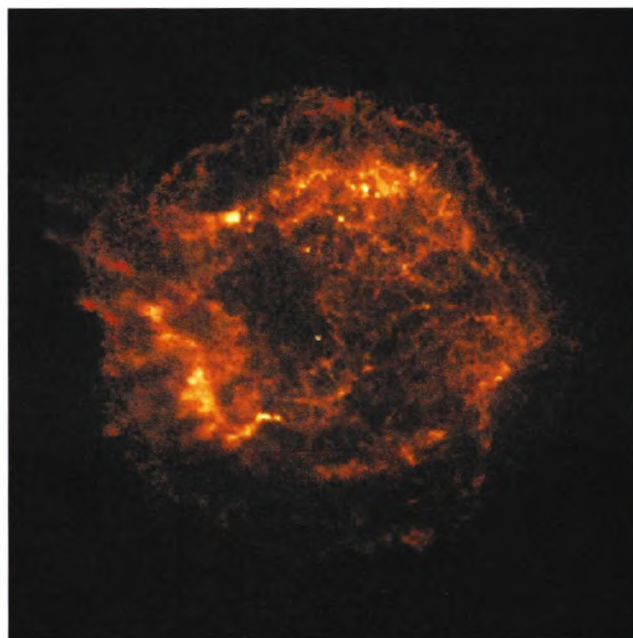
Hvilke typer af is finder man i de forskellige lag, og hvad fortæller det om nedbøren og klimaet på Mars?

Læs mere på: www.marspolarlander.com.

Et Røntgenteleskop kaldet CHANDRA

Astrofysikeren Subrahmanyan Chandrasekhar fandt bl.a. den teoretiske grænsemasse for en hvid dværg. En stjerne, som har en masse der er større end 1,4 solmasser vil eksplodere som en supernova mens kerneområdet kolliderer til en neutronstjerne eller et sort hul. Det er bl.a. i supernovarester at man observerer en intens røntgenstråling og det er til Chandrasekhars ære, at NASAs nye højopløsningsrøntgenteleskop er kommet til at hedde CHANDRA.

Man har nu fået opløst en tynd røntgenstråle der udgår fra "Krabbeimpulsaren". Men de første resultater viser en supernovarest i Cassiopeia der er 320 år gammel. Teleskopet har sågar kunnet opløse stjerneresten i centrum af tågen (se figur 2).



Figur 2. Supernovarest i Cassiopeia. Foto: NASA. (chandra.harvard.edu)

Tyngdeanomali under total solformørkelse?

Solformørkelser giver anledning til flere uforklarlige fænomener. Det er velkendt, at man kan se Jordens rotation ved at følge ændringen af svingningsplanet for et Foucault-pendul. Fænomenet blev første gang demonstreret af J. Foucault (Verdensudstillingen, Paris 1851).

I 1954 udførte Maurice Allais et marathon eksperiment hvor et Foucault-pendul blev holdt kørende i 30 dage og nætter. Under eksperimentet indtraf en solformørkelse, der varede 2.5 time. I dette tidsrum

skiftede orienteringen af pendulet med 13.5° . Efter formørkelsen opførte pendulet sig igen normalt. En målefejl, eller en tyngdeanomali p.g.a. at Solen, Månen og Jorden stod på linie? Det giver under alle omstændigheder et forøget tidevand (springflod).

Siden er eksperimentet blevet gentaget med og uden succes bl.a. I 1991 (Mexico City) hvor der blev målt en forskydning ved både starten og slutningen af formørkelsen. Det blev fortolket som en mulig tidevandsbølge der løb gennem jordskorpen og forstyrrede pendulsystemet. Det seneste var i 1995 (Indien) hvor effekten endelig blev målt med et gravimeter. Udslaget var på 10-12 mikroGal svarende til 10^{-10} m/s^2 .

En mængde eksperimenter var planlagt under solformørkelsen den 11. august. En række Foucault-penduler blev filmet af videokameraer og optagelserne er ved at blive analyseret. De første foreløbige resultater, fra G. Wuchterl og A. Wirrer, melder om en ændring af svingningsplanet på 3 grader. Andre lokaliteter (Huntsville, USA) viste intet.

Kilde: NASA Headline nr. 138. Decrypting the Eclipse (science.nasa.gov/newhome/headlines), og amok.astro.univie.ac.at/~wuchterl/Foucault.

Niels Bohr på teatret

Frem til 20. november kan man på Betty Nansen Teatret, Frederiksberg, se Michael Frayns drama 'København'. Stykket handler om et møde mellem Niels Bohr og Werner Heisenberg, der var Bohrs assistent fra 1924-27 hvor kvantemekanikken blev formuleret matematisk. Mødet mellem de gamle kolleger og venner fandt imidlertid sted i oktober 1941 – i det besatte Danmark. Bohrs kone, Margrethe Bohr, var også til stede noget af tiden. Det var dristigt af en tysk teoretisk fysiker, der i teorien kunne hjælpe Hitler med at bygge en atombombe, at besøge Bohr i Danmark. Mødet endte også med at Heisenberg blev smidt ud. Men hvad var det præcis han opsøgte sin gamle lærermester for at spørge til råds om? Heisenberg måtte besvare dette spørgsmål igen og igen i de 30 år der fulgte efter 2. verdenskrig.

Michael Frayn har efter grundig research opstillet utallige scenarier for hvordan samtalen kunne være forløbet. Det er på én gang underholdende og lærerigt. Skuespillerne Henning Moritzen (Bohr), Søren Pilmark (Heisenberg) og Lily Weiding (Margrethe) har udtalt, at det var det sværeste stykke de nogensinde havde lært! De har også fået god fod på begreber som komplementaritet og Heisenbergs ubestemthedsrelation – bl.a. med bistand fra Niels Bohr Arkivet. Det er positivt at se, at naturvidenskabelige/moralske spørgsmål kan behandles på en så vedkommende og underholdende måde.

Til stykket er udgivet et 48 siders hæfte.

Merkur passerer Solens kant i november

Det er ikke kun Månen der kan passere ind foran Solen, de indre planeter Merkur og Venus kan gøre det samme, det sker blot sjældnere. Sidste gang Merkur lavede en såkaldt soltransit var den 6. november 1993 (Se *Sky & Telescope* nov. 93 og feb. 94). Merkur-passagerne optræder i par med ca. 3 års mellemrum og der er 13-14 passager hvert århundrede.

Nu sker det altså igen den 15. november 1999. Desværre skal man befinde sig i Stillehavsområdet og Merkur vil kun lige akkurat røre ved solskiven. Måske er der bedre held næste gang i år 2003 eller når Venus passerer solskiven i 2004? En Merkur-soltransit skal ses gennem et lille teleskop med solfilter, mens Venus burde kunne ses gennem solformørkelsesbriller, så gem dem hellere for en sikkerheds skyld!

Kilde:

www.geocities.com/CapeCanaveral/7137/transit.htm.

Nyt blad for fysiklærere

Institut for Fysik og Astronomi (IFA) ved Aarhus Universitet har lanceret et nyt farvestrålende blad, *KONTAKT*, som sendes til fysiklærerne ved de danske gymnasier. Det første nummer (oktober 1999) er på 8 sider og indeholder bl.a. artikler om "Nanotråde og kvantemekanik", "Galakser i det unge univers" samt om IFAs mange tilbud til gymnasierne (læs nærmere på www.ifa.au.dk/tilbud/home.htm). Ansvarshavende redaktør for det nye blad er Nis Bjerre, der kan kontaktes på e-mail kontakt@ifa.au.dk.

Nyhedskilder

Det trykte medie har en begrænset spalteplads og udgivelsesfrekvens. Læs derfor videre på WWW enten i KVANTs elektroniske udgave der vil være tidligere tilgængelig eller ved nedenstående liste.

Tidsskriftet *Nature* er ofte først med de virkelige væsentlige resultater i alle grene af fysikken. Det udkommer ugentligt og findes på større biblioteker.

Det amerikanske *American Institute of Physics* har en glimrende nyhedstjeneste på WWW. Derudover kan man besøge ESO, NASA eller Forskningsministeriets initiativ rummet.dk i samarbejde med Dansk Rumforskningsinstitut.

Kvant: www.nbi.dk/dfs.

AIP: newton.ex.ac.uk/aip.

ESO: www.eso.org/outreach.

NASA: www.nasa.gov/today.

Rummet.dk: www.rummet.dk.

Upps (Uppsalaobservatoriets Nyhedstjeneste):

www.astro.uu.se/~astnews.

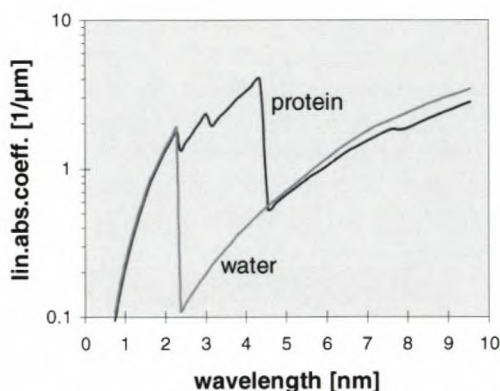
UNF (Ungdommens Naturvidenskabelige Forening): www.unf.dk (se "Nyheder og artikler").

Røntgenmikroskopi med en opløsning på 30 nm

Robin Medenwaldt, ISA, Aarhus Universitet.

Røntgenmikroskopi er en relativ ny metode, der gør sig mere og mere gældende indenfor studier af mikrobiologiske og kolloidale systemer. Det attraktive ved røntgenmikroskopet er muligheden for at undersøge systemer i deres vandige miljø kombineret med høj opløsning (30 nm) og stærk kontrast. I Århus benyttes røntgenmikroskopi til studier i biologi, medicin, materialeteknologi og geo-videnskab. En oversigt over, hvad der indenfor røntgenmikroskopi foregår på verdensplan, er givet i en artikel af Kirz et al. [1].

Sammenlignet med lysmikroskopi er det muligt i mikroskopi med røntgenstråling at opnå en højere opløsning, fordi den benyttede strålings bølgelængde er meget kortere. Eksempelvis er bølgelængden af lys omkring $0.5 \mu\text{m}$, mens den bløde røntgen, som benyttes i Århus, har en bølgelængde på omkring 2.5 nm, altså 200 gange mindre.



Figur 1. "Vandvinduet". Den lineære absorptionskoefficient μ_l for protein og vand omkring absorptionskanterne for ilt (2.4 nm) og kulstof (4.4 nm). Transmissionen T kan herudfra beregnes ved $T = \exp(-\mu_l \cdot t)$, hvor t er tykkelsen af materialet.

Valget af bølgelængden på 2.5 nm til røntgenmikroskopi er ikke tilfældigt. På figur 1 ser man absorptionen af strålingen i protein i forhold til absorptionen i vand som funktion af bølgelængden. Netop i bølgelængdeområdet 2.4 – 4.4 nm for blød røntgenstråling, er absorptionen i vand meget mindre end i protein. Det betyder i praksis ved undersøgelser af biologiske objekter, f.eks. celler, at vandet i og omkring objekterne er næsten gennemsigtigt (hvilket altså ikke er en selvfølge), mens strukturerne, f.eks. cellekomponenter, fremtræder med god kontrast. I Århus benyttes for det meste bølgelængden 2.4 nm, som ligger i vandvinduet og hvor transmissionen gennem vand er højest.

Teknisk beskrivelse

Transmissions-røntgenmikroskopet [2] ligner i princippet transmissions-lysmikroskopet. Et diagram, der viser strålegangen i Århus mikroskopet, er vist på figur 2. Med en kondensorlinse fokuseres strålingen (synkrotronstråling fra lagerringen ASTRID) på et objekt. Et objektiv bagved objektet (MZP=mikro-zoneplade, forklaret nedenfor) opfanger den transmitterede stråling og danner et billede på en detektor.

Foran kondensorlinsen bevirker en blænde ("Central stop" på figur 2), at strålingen danner en hul kegle. På den måde forhindres, at den direkte stråling rammer detektoren; herved undgås en høj strålingsbaggrund i det ønskede billede af objektet. Et skematisk billede af røntgenmikroskopet ses på figur 3.

I modsætning til lysmikroskopi kan man til blød røntgenstråling i praksis ikke benytte brydningslinser, fordi brydningsindekset i røntgenområdet for alle materialer er meget tæt på 1, ligesom det er for vakuum. Derfor benytter man sig af såkaldte zoneplader, se figur 4, som er cirkulære gitre, hvor liniebredden aftager med radius.

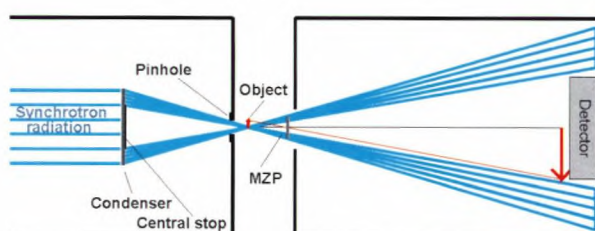
Zoneplader er akromatiske, d.v.s. fokallængden afhænger af bølgelængden. Sammenhængen mellem zonepladens radius r_n , bølgelængden λ , fokallængden f og bredden af den yderste zone dr_n er givet ved $dr_n = 0.5 \cdot \lambda f / r_n$. Heraf ses, at fokallængden afhænger omvendt proportionalt af bølgelængden. Det har som konsekvens, at man kun kan benytte en zoneplade som objektiv, hvis strålingen er monokromatisk, hvilket vil sige, at den har en veldefineret bølgelængde.

I røntgenmikroskopet opnås monokromatiseringen ved at placere et lille hul foran objektet (pinhole på figur 2 og 3), hvorigennem strålingen "filtreres". Kun stråling, der har en bølgelængde således, at den netop fokuseres i hullet, slipper igennem hullet. Stråling med en anden bølgelængde vil blive fokuseret foran eller bagved hullet og filtreres fra. Hvor veldefineret bølgelængden er, afhænger af hullets og kondensorens diameter. Ved røntgenmikroskopet i Århus, hvor disse to størrelser er hhv. $20 \mu\text{m}$ og 9 mm, er bølgelængden så veldefineret som $2.40 \pm 0.01 \text{ nm}$.

Opløsningen af en linse er generelt givet ved cirka det halve forhold mellem bølgelængden og den numeriske apertur af linsen. I lysmikroskopien er opløsningen derfor begrænset til $0.2 \mu\text{m}$. Sammenholder vi dette med formlen, hvor vi beskrev zonepladen, ser vi, idet den numeriske apertur $\approx r_n / f$, at bredden af den yderste zone netop er lig med opløsningen for zonepladen.

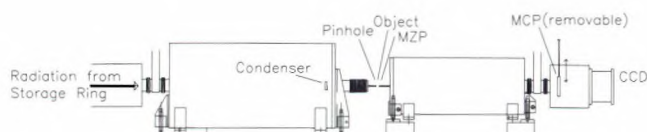
En nedre grænse for zonebredden er bestemt af de

fremstillingsmetoder, som man har i dag. Der benyttes forskellige fremstillingsteknikker i dag, hvor den mest almindelige er elektronstråle-litografi [3,4], hvor man "tegner" zonerne i en fotoresist med en styret elektronstråle fra et elektronmikroskop. En anden metode, der dog ikke benyttes så meget mere, er holografi [5], hvor man ved hjælp af laserteknik overlejrer to ultraviolette lysstråler til at danne et mønster, som udgør zonepladen. Det derved fremkomne mønster i fotoresisten overføres derefter til andre materialer, som f.eks. germanium eller nikkel, ved reaktiv ion ætsning. Opløsningen af zoneplader er i dag typisk 30 nm og i bedste fald 20 nm.



Figur 2. Strålegangen i røntgenmikroskopet.

Detektoren er et såkaldt CCD kamera, som adskiller sig fra almindelige video kameraer ved at være kølet og have en langsom udlæsningshastighed. Derved undgås støjsignal fra elektronikken. At tage et digitalt billede med røntgenmikroskopet tager almindeligvis 5-20 sekunder afhængig af objektets tykkelse, der kan være op til 10 μm .



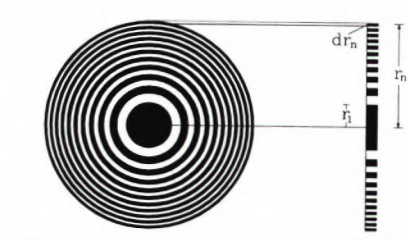
Figur 3. Skematisk tegning af røntgenmikroskopet i Aarhus. Længden af mikroskopet er omkring 2.5 m. MCP=micro channel plate er yderligere en detektor, som kan skydes ind i strålen og som bruges til justering af mikroskopet.

Når et objekt skal undersøges i røntgenmikroskopet, placeres det imellem to meget tynde ($0.1 \mu\text{m}$) siliciumfolier [6] i et specielt kammer, der er tætnet med kunststof ringe, så objektet ikke kan tørre ud. Et billede af objektet er vist på figur 5. Folierne er valgt så tynde, så de ikke absorberer røntgenstrålingen unødvendigt og dermed forlænger eksponeringen; den forsøges holdt så kort som mulig. For at minimere

absorptionen omkring objektet yderligere, omgives det med helium gas.

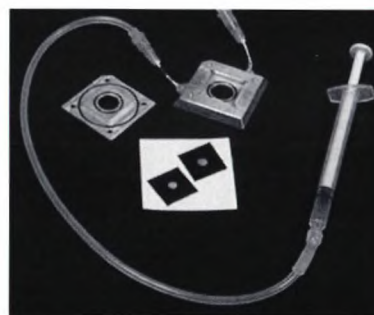
Projekter

Som nævnt i indledningen, benyttes røntgenmikroskopet i Århus i en række projekter, der spænder over vidt forskellige videnskabelige grene. Et udvalg af projekter skildres i det følgende for at give et indtryk af ISA's forskningsaktivitet i forbindelse med mikroskopet.



Figur 4. Skematisk billede af en zoneplade med radius r_n , og yderste zones bredde dr_n .

Biologisk jernudfældning: I Danmark er myremalm (myre=mose) et velkendt og hyppigt fundet fænomen. Jernforbindelser fra undergrunden er blevet udfældet i våde områder i en koncentration og mængde, der i århundreder har gjort det rentabelt at udvinde jern til videre forarbejdning. I samarbejde med Geomorfologisk Institut ved Aarhus Universitet undersøges de forskellige jernforbindelser i naturen med henblik på en klarlæggelse af bakteriernes rolle i udfældningen. På figur 6 er en bakterieskal fra en bakteriekoloni afbildet.

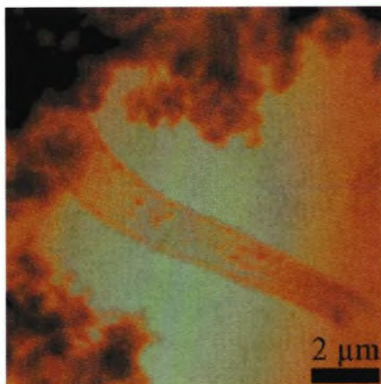


Figur 5. Fotografi af objektet i kammeret (bund og lågt) med to sprøjter, der benyttes til at pumpe væske ind og ud af kammeret. Midt i billedet ses to siliciumkrystaller, der er tynde i midten og imellem hvilke objektet anbringes i kammeret.

I praksis benyttes bakterier med den egenskab, at de kan udfælde jern, i vandværker. Specielt omkring Esbjerg findes store mængder af jernforbindelser i undergrunden der pumpes op med grundvandet. Den typisk rødlig brune farve fra okkeraflejringer i åer og søer er velkendt. Det har vist sig, at jernudfældningen ved drikkevandsrensning er meget hurtigere, hvis bakterier involveres i processen, end hvis udfældningen alene foregår ved iltning på ren fysisk/kemisk vis. For at få

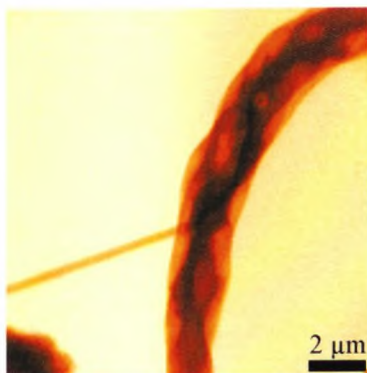
en bedre forståelse for, hvordan bakteriernes effektivitet kan optimeres, undersøgte, i samarbejde med Aalborg Universitets afdeling i Esbjerg, vandet og jernudfældning i forskellige vandværker omkring Esbjerg.

Pollen og deres tråde: Pollen transporteres mellem planter især af insekter, hvor klæbrige tråde på pollen sørger for, at kornet hænger fast på værten under transporten. Trådenes beskaffenhed er afhængig af plantens art og studeres af botanikere med stor interesse, hvilket førte til et samarbejde med Reading University i England [7]. På figur 7 ses et røntgenbillede af sådan en tråd fra planten *Clarkia tenella*.



Figur 6. Røntgenbillede af en bakterieskal omgivet af jernslam.

Human sperm: Sperm fra mennesker er et emne, der har været diskuteret en hel del indenfor de seneste år, idet sædkvaliteten synes at falde med det resultat, at mange par ikke kan få børn. Vi har i den forbindelse studeret spermatozoernes morfologi i en række projekter med Institutet for Medicinsk Mikrobiologi og Immunologi ved Aarhus Universitet og med Department of Obstetrics & Gynaecology, University of Manchester, UK. Figur 8 viser to røntgenbilleder af sperma-

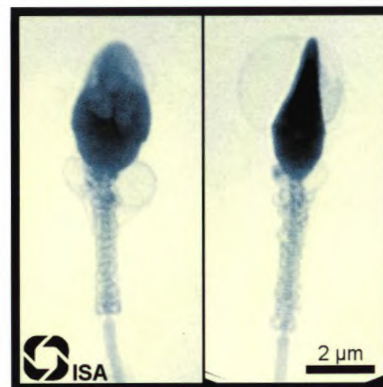


Figur 7. Røntgenbillede af pollentråd.

tozoer, en set ovenfra og en set fra siden. Specielt for disse sperm var, at deres mitokondrier (spiralen lige under hovedet) var meget løse, hvilket formentlig hænger sammen med den såkaldte kapacitering, som er sper-

matozoernes forandring efter ejakulationen for at blive i stand (få kapacitet) til at befrugte ægget. Observationen af de udvidede mitokondrier er ny og blev først opdaget med røntgenmikroskopet. På længere sigt vil disse studier være til hjælp i forbindelse med spørgsmål om fertilitet og kunstig befrugtning.

Som nævnt var de her nævnte eksempler kun et udvalg af de projekter, som foregår ved ISA, hvor røntgenmikroskopi er involveret. Et besøg af vores webside www.isa.au.dk/SR/XRM/xrm.html kan anbefales til dem, der vil følge med i røntgenmikroskopi i Århus.



Figur 8. Røntgenbillede af human sperm.

Referencer:

- [1] J. Kirz, C. Jacobsen, and M. Howells, Soft X-ray microscopes and their biological application. *Quarterly Reviews of Biophysics* **28** (1995) 33.
- [2] R. Medenwaldt and E. Uggerhøj: Description of an X-ray microscope with 30 nm resolution. *Rev. Scient. Instr.* **69** (1998) 2974.
- [3] C. David et al.: Electron Beam Generated Phase Zone Plates with 30nm Zonewidth for High Resolution X-Ray Microscopy. *J-Optics (Paris)* **23** (1992).
- [4] S. J. Spector, C. J. Jacobsen, D. M. Tennant, Process optimization for production of sub-20 nm soft x-ray zone plates. *J.Vac.Sci.Technol. B* **15** Nov/Dec 1997.
- [5] G. Schmahl and D. Rudolph (eds.) *X-ray Microscopy*, Springer Verlag, (1984) p. 63.
- [6] R. Medenwaldt and M. Hettwer: Production of Ultra Thin Silicon Foils. *Journal of X-Ray Science and Technology* **5** (1995) 202.
- [7] J. V. Abraham-Peskir et al.: A new technique of Examining Pollen-connecting threads. *Grana* **36** (1997) 343.

Overfladestudier med fotoemissionsspektroskopi

Søren Vrønning Hoffmann, ISA, Aarhus Universitet, Jakob Haahr Petersen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, og Jens Onsgaard, Fysisk Institut, Syddansk Universitet.

Allerede i 1905 beskrev Albert Einstein i sin berømte artikel [1] den fotoelektriske effekt, og netop dette fænomen ligger til grundlag for langt de fleste overfladefysikeksperimenter som foretages ved ASTRID, nemlig fotoemissionsspektroskopi (herefter FES). I FES belyses overfladen med monoenergetiske fotoner, og de elektroner som forlader overfladen bliver energianalyseret vha. en elektronenergi-analysator. Hvis en elektron i en krystal er bundet med bindingsenergien E_b , så vil dens kinetiske energi efter fotoemissionsprocessen være

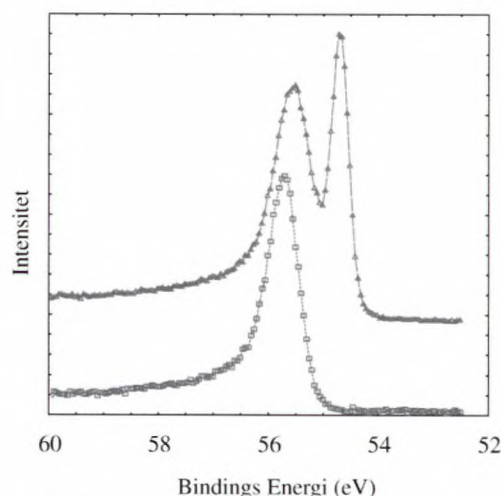
$$E_{kin} = h\nu - E_b - \phi \quad (1)$$

hvor $h\nu$ er fotonens energi, mens ϕ er løsrivelsesarbejdet for den undersøgte overflade af krystallen.

Inden vi fortsætter med at beskrive nogle af de mange facetter af FES, som benyttes til at karakterisere overflader, er det vigtigt at forstå, hvorfor FES i det hele taget er en brugbar teknik indenfor studiet af overflader. I et fast stof er der i størrelsesordenen 10^{23} atomer per cm^3 , mens antallet af atomer i overfladen er ca. 10^{15} atomer per cm^2 . Generelt ville man da derfor forvente at den del af et målt signal, som stammer fra overfladen af en krystal, vil drukne i signalet fra "bulken" af stoffet. En eksperimentel teknik, som skal benyttes i et overfladestudie, må derfor nødvendigvis være følsom over for højst nogle få atomare lag ind i krystallen. Når man så vælger at detektere elektroner, er det fordi, de ved lave energier har en meget lille gennemtrængning i krystaller. Faktisk har den længde, som en elektron i middel (den middelfrie vejlængde) kan bevæge sig igennem en krystal, et minimum omkring 50 eV, og ved disse energier er det kun fotoemitterede elektroner fra de første 2 til 3 lag, som udsendes fra krystallen uden forudgående tab af energi/impuls. Netop her er synkrotronstråling som kilde i FES af uvurderlig betydning: Energispekteret af synkrotronstrålingen er stort, og fotonenergien kan derfor frit vælges således, at den kinetiske energi af elektroner udsendt fra en given elektronskal ligger omkring minimet i den middelfrie vejlængde. Som et eksempel skal der vælges en fotonenergi på omkring 125 eV for optimalt at kunne studere elektroner fra aluminiums L-skala (2p niveauet), og det er værd at bemærke, at fotoner med denne energi ikke kan produceres med almindeligt tilgængelige kilder ud over synkrotronstråling.

Men hvad kan vi så lære om en overflade ud fra et FES spektrum? Et eksempel på et FES spektrum er vist i figur 1, nederste kurve. Spektret er målt på en aluminiumoverflade, hvorpå der er forsøgt adsorberet en tynd

film af litium. Først kan vi bemærke at der udsendes elektroner svarende til en bindingsenergi omkring 56 eV, hvilket svarer til elektronernes bindingsenergi i litiums K-skala (1s niveauet). Vi kan altså vha. FES konkludere at det er lykkedes os at pådampe Li på Al. Eksemplet illustrerer nok det mest simple eksperiment, som FES kan bruges til, nemlig grundstofanalyse. Vha. et FES spektrum kan vi bestemme hvilke grundstoffer, som befinder sig på overfladen, og yderligere kan vi i mange tilfælde ud fra intensiteterne bestemme hvor meget af et givent grundstof, der befinder sig på overfladen.



Figur 1. FES spektre fra 1s niveauet i Li målt for 0.5 ML Li (nederst) og 1ML Li (øverst) adsorberet på en Al(100) overflade.

Men anvendelsen af FES rækker langt videre end simpel grundstofanalyse. Dette vil vi belyse med et par eksempler taget fra forskning udført ved ASTRID. Men inden da er det på sin plads at give en kort beskrivelse af det udstyr som er nødvendigt for at udnytte synkrotronstrålingen i overfladefysik.

Monokromatorer og elektronenergianalysatorer

For alle de eksperimenter, som udføres med synkrotronstråling ved ASTRID, er det nødvendigt at udvælge en enkelt fotonenergi/bølgelængde af det brede spektrum af stråling, som kommer fra ASTRID. Denne udvælgelse foregår i en monokromator, som i sin mest basale form består af et gitter indgraveret i kvartsglas og belagt med et tynd lag metal (≈ 500 Å). Gittret diffrakterer den "hvide" synkrotronstråling fra ASTRID ud i en fane af stråling med forskellige bølgelængder på samme måde, som en CD overflade spreder det hvide lys ud i alle dets

farvekomponenter (figur 2). En spalte placeret efter gitteret kan derfor udvælge en ønsket bølgelængde. En monokromator indeholder ud over gittere og spalter også krumme spejle, som benyttes til at fokusere strålingen f.eks. ned på den prøve, som skal analyseres med FES. Dette er nødvendigt for at opnå tilstrækkelig intensitet i målingerne.

Elektronenergianalysatoren (figur 3) består af en elektrostatisk linse, som opsamler elektronerne og fokuserer dem ind på en indgangsspalte. Herefter passerer de ind mellem to koncentriske halvkugler med en påtrykt spændingsforskel. For en given spændingsforskel, V , vil kun elektroner, som har den rigtige energi kunne passere mellem halvkuglerne for derefter at blive opsamlet i en elektrondetektor. Så ved at måle signalet fra elektrondetektoren som funktion af V skannes et elektronenergisppektrum.

Elektronenergianalysatoren er monteret på et vakuumkammer (med et basistryk på ca. 10^{-8} Pa), som indeholder den prøve, som skal undersøges, samt mulighed for at pådampe forskellige metaller og at dosere gasser. Det er nødvendigt at placere prøven i et kammer med ultrahøjt vakuum for at holde prøven ren for restgasser i det tidsrum (i størrelsesordenen timer) som et forsøg kræver for at blive udført.

Dannelsen af Al-Li overfladelegeringer

Legeringer mellem aluminium og litium har i de senere år tiltrukket megen opmærksomhed fra bl.a. flyindustrien pga. disse legeringers styrke, samtidig med at legeringen har aluminiums lethed. I fremtiden kan mange af de flykomponenter, som i dag laves af det dyre og sjældne titanium, måske erstattes af Al-Li legeringer. På overfladen af Al-Li legeringerne katalyserer litium desværre iltningen af aluminium, hvormed legeringen svækkes. Overfladeegenskaberne af litium pådampet aluminium er derfor et studie værd.

Studiet af Li adsorption på Al [2] er udført på vores SGM1 strålerør (SGM – Sfærisk Gitter Monokromator), som udmærker sig ved at have en meget høj spektral opløsning. Systemet er derfor velegnet til at studere små skift i bindingsenergiene (E_b) af Li-1s og Al-2p elektronerne. Mens elektronernes bindingsenergi i frie atomer er meget veldefineret, så er E_b for et atom på/i et fast stof afhængig af hvilken koordination/geometri atomet har mht. sine naboatomer. Således må man f.eks. generelt forvente at E_b for et atom i det yderste lag af en krystal er forskellig fra E_b for et atom i det andet lag af en krystal: I det første tilfælde har atomet færre naboer end i det andet tilfælde. Disse skift er dog som oftest små (i størrelsesordenen 0.1 eV), og FES som benyttes til at undersøge disse små ændringer kaldes for High Resolution Core Level Spectroscopy-HRCLS (højt opløst inderskals niveau spektroskopi).

Vist i figur 1 er Li-1s spektre taget ved forskellige mængder pådampet Li på en Al(100) een-

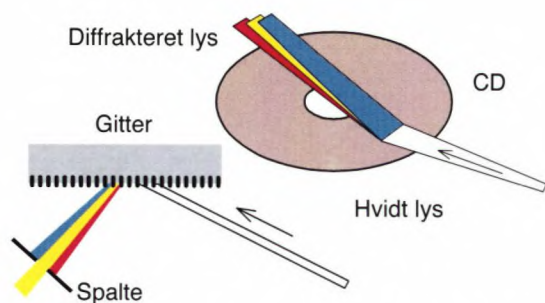
krystaloverflade. Den nederste kurve stammer fra en dækningsgrad af Li svarende til 50% af antallet af aluminium atomer i overfladelaget og benævnes 0.5 Monolag (ML). Som det ses, er der en top ved ca. 56 eV. Den detaljerede geometri af Li og Al atomerne for denne dækningsgrad er kendt fra Lav Energi Elektron Diffraction (LEED), og er vist i figur 4. Det ses at hvert Li atom substituerer et Al atom, og i det første lag er der dannet en todimensional Al-Li legering. En bindingsenergi på 56 eV af Li-1s elektronerne svarer derfor til Li placeret i en substitutionel position på overfladen.

Men øges mængden af Li til 1 ML, finder vi 2 toppe i vores spektrum. Vi kan altså umiddelbart konkludere, at der sidder Li på overfladen med to forskellige koordinationer til aluminium og/eller litium. Da den ene af toppene stadig ligger ved 56 eV, sidder halvdelen af litiumet stadig i et yderlag på krystallen. Men hvordan sidder den anden halvdel? Først skal det bemærkes at energiforskellen (skiftet) mellem de to toppe er meget stort, ca. 1 eV. Dette viser, at omgivelserne for de to positioner af Li er meget forskellige, og da bindingsenergien af den anden top, ca. 55 eV, ligger meget tæt (indenfor ≈ 0.05 eV) på bindingsenergien for Li-1s i en Li krystal, kan vi tilordne dette niveau til Li helt omgivet af Al og/eller Li, dvs. ikke i overfladelaget. Denne tilordning støttes af yderlig en observation i spektret: Toppen ved 56 eV er meget bred i sammenligning med toppen ved 55 eV. Forbreddningen skyldes store vibrationer af Li atomerne, og det er let at forstille sig at Li beliggende i det yderste lag af en krystal har en meget større vibrationsamplitude end Li, som er fuldt koordineret til Al og/eller Li.

En delkonklusion ud fra Li spektrene om den geometriske position af Li er altså, at der findes to lag af Li i krystallen; et indre og et ydre. Ud fra dette kan man så fremsætte to modeller for atomernes geometri på/i krystallen: Den første er, at efter pådampning af 1 ML Li sidder halvdelen af litiumet som vist i figur 4, mens den anden halvdel har lagt sig oven på denne overflade. De substitutionelt placerede Li atomer bliver således konverteret fra at være et overfladelag på krystallen, til at være "begravet" under et nyt ydre lag af Li. En anden model kunne være, at siden Li og Al danner ægte tre-dimensionale legeringer, så kunne den ene halvdel være diffunderet ind under krystallens Li/Al overflade, og have dannet et indre lag der, evt. et lag, som er blandet med aluminium.

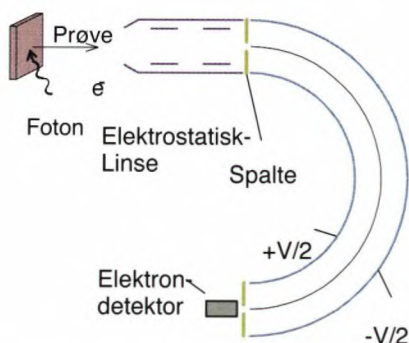
I disse to modeller sneget sig en antagelse ind, nemlig at vi i begge modeller har et lag hvor geometrien af Li og Al er som vist i det ydre lag af figur 4. Så inden vi fortsætter med at bevise hvilken af de to modeller, som er rigtig, skal dette underbygges, og det gøres ved at betragte Al-2p niveauet. Nederste spektrum i figur 5 viser et FES spektrum af Al-2p for en ren Al(100) overflade. Fortolkningen af Al-2p spektre er en smule mere komplicerede end Li-1s spektre, da der til hvert niveau hører en spin-orbit dublet. Der er altså to toppe for hver geometrisk position af Al. I spektret ses to dubletter; de

blå stammer fra bulken af aluminium, mens de grønne stammer fra overfladelaget. Skiftet mellem niveauet for overfladen og bulken er meget lille, ca. 95 meV. Spektret ved en dækningsgrad på 0.5 ML Li (figur 5) viser tre dubletter. Den ene dublet hidrører stadig fra bulken (den blå). Dubletten (den grønne) med det største skift (ca. 0.5 eV) fra bulk-dubletten, stammer fra de Al som sidder i de omgivelser, der er mest forskellige fra deres omgivelser i bulken, nemlig Al i overfladelaget omgivet af Li (se figur 4). Den sidste dublet (orange) hidrører så fra aluminium i andet lag af krystallen. Når Li mængden øges fra 0.5 ML til 1 ML, er den dublet med det største skift uændret både i position og i intensitet, mens bulk dubletten svækkes. Hvordan passer dette så med de to modeller for 1 ML Li? Hvis den første model var korrekt, ville man forvente at intensiteten af den mest skiftede dublet ville svækkes fordi elektronerne skulle bevæge sig igennem et ekstra lag af litium. Da dette ikke er tilfældet, må det nye lag af litium nødvendigvis sidde under overfladen.



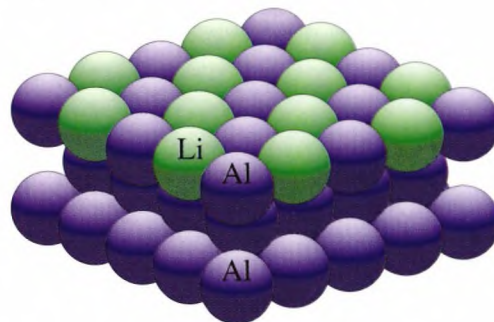
Figur 2. Illustration af hvordan en enkelt bølgelængde kan udvælgelse med et gitter og en spalte vha. diffraction. Fænomenet kendes fra det flotte farvespil som ses på en CD.

Dette er en stærk konklusion, der viser os vejen til dannelsen af ikke bare en todimensional overfladelegering, men starten på dannelsen af en bulk legering mellem Al og Li. Faktisk viser en nøjere undersøgelse af toppenes intensiteter for forskellige vinkler af elektronernes emissionsretning, at det nye lag af Li sidder i 3. lag af krystallen, og dermed sker dannelsen af legeringen med en struktur som Al_3Li fasen af Al-Li legeringer. I denne legering er strukturen af hvert andet lag den samme som det yderste lag i modellen i figur 4.



Figur 3. Princippet bag en elektronenergianalysator.

Temperaturen ved alle de omtalte forsøg var stueteperatur under pådampningen af Li, og ved denne temperatur mættes krystallen ved 1 ML, men hæves temperaturen til 150°C under pådampningen øges diffusionen af Li ind i krystallen, og det er muligt at danne en ren Al_3Li legering mindst så dybt ind i krystallen, som den middelfrie vejlængde af elektronerne tillader os at observere. Dette kan ses ud fra det øverste spektrum i figur 5, hvor Al bulk-dubletten er forsvundet, og de resterende to dubletter stammer fra hhv. det ydre Al/Li overflade lag og de dybereliggende lag i Al_3Li legeringen.



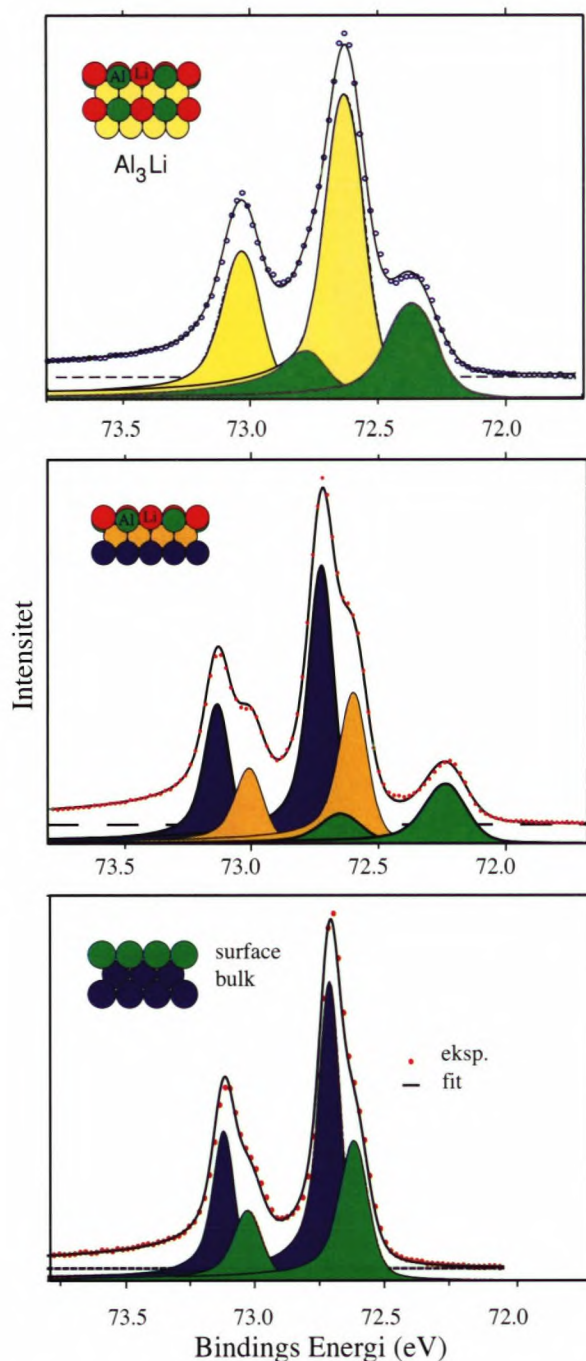
Figur 4. Strukturen af 0.5ML Li adsorberet på en Al(100) overflade.

Som en sidste kommentar til disse resultater, vil vi gerne fremhæve at konklusionerne om legeringens dannelse er fremkommet ud fra fortolkningen af nogle få FES spektre. Det er klart, at den detaljerede geometriske struktur, hvor de atomare afstande i legeringen er kendt indenfor nogle få hundrededele Ångstrøm, kræver andre (diffraktions baserede) teknikker. Men uden FES ville det have været stort set umuligt at studere selve dannelsen af legeringen.

Adsorption af kalium og lette molekyler på Cu

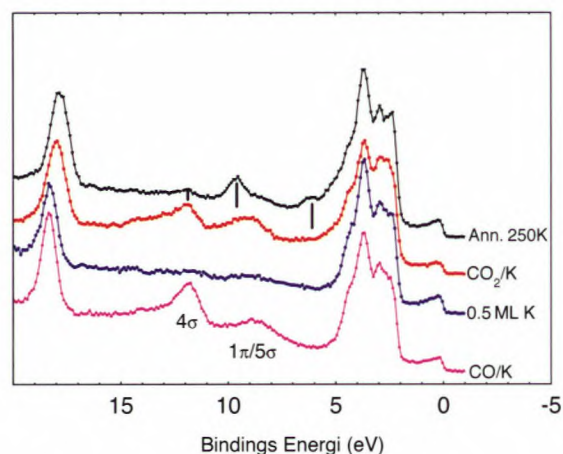
Studiet af kaliums indflydelse på adsorption af og reaktioner mellem små molekyler på kobberoverflader henter sin berettigelse indenfor katalyse. Katalyse er af meget stor industriel betydning, og f.eks. Vand-Gas-Skift reaktionen $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ er en vigtig kilde til dannelsen af brint, som igen bruges til produktionen af ammoniak. Vigtigheden af ammoniaksyntesen er selvsagt stor, pga. dets anvendelse som gødning i fødevareproduktionen. Vand-Gas-Skift reaktionen katalyseres af bl.a. Cu/ZnO, hvis katalyserende virkning kan øges op til en faktor 15 ved tilsætning af kalium.

De studier af co-adsorption mellem kalium og lette molekyler (CO , CO_2 og H_2), som er udført ved ASTRID [3-5], har benyttet sig af FES i valensbåndet, hvor de karakteristiske orbitaler for molekylerne findes. Vist i figur 6 er fire valensbåndsspektre, alle målt på en Cu(110) overflade efter adsorption ved 130 K af hhv. K, K+CO samt K+ CO_2 . I spektret, som er målt efter pådampning af 0.5 ML kalium, ses kobbers d-elektroner mellem 2 og 5 eV, og kaliums 3p-elektroner



Figur 5. Al-2p spektre for (nederst) en ren Al(100) overflade, (i midten) efter pådampning af 0.5ML Li og (øverst) efter dannelsen af en Al_3Li legering.

ved 18.5 eV. Når CO herefter adsorberes fremkommer de i litteraturen velkendte 4σ og $1\pi/5\sigma$ orbitaler fra CO i valensbåndet. CO molekylet beholder altså basalt set sin molekylære struktur efter adsorptionen. Interessant er det, at hvis vi sammenligner spektret målt efter $\text{CO}+\text{K}$ adsorption med spektret målt efter CO_2+K adsorption, så er de i det store hele identiske. Der må derfor ske en reaktion på overfladen, som omdanner CO_2 til CO. Yderligere information om denne reaktion findes i den øverste kurve, hvor $\text{CO}_2/\text{K}/\text{Cu}$ systemet er opvarmet til 250K. Ved denne temperatur desorberer

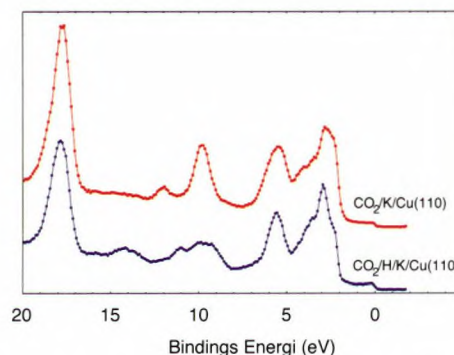


Figur 6. Co-adsorption af 0.5ML kalium med CO og CO_2 . Valensbåndsspektrene er målt med 40eV fotoner, og både K, CO samt CO_2 er adsorberet ved 130K. Øverste kurve er målt ved 130K efter opvarmning af $\text{CO}_2/\text{K}/\text{Cu}$ systemet til 250K.

CO fra overfladen, og vi ser at de intense CO orbitaler er forsvundet. Nu er tre mindre intense orbitaler (mærkede med linier) synlige i spektret. Disse tre orbitaler stammer fra karbonat ionen ($\text{CO}_3^{\delta-}$). Ud fra spektrene i figur 6 kan vi altså konkludere, at følgende reaktion sker på overfladen:



Denne reaktion ville ikke have fundet sted på kobberoverfladen uden kaliums tilstedeværelse, så kalium katalyserer dannelsen af CO og karbonat ud fra CO_2 . Videre studier af co-adsorption mellem CO_2 og K viser, at mængden af kalium også er afgørende for mængden af karbonat, som dannes. En sammenligning af karbonat orbitalernes intensitet i øverste spektrum i figur 6 og øverste spektrum i figur 7 viser, at mængden af karbonat, der dannes, øges kraftigt, når mængden af kalium øges fra 0.5 ML til 0.75 ML.



Figur 7. Valensbåndsspektre målt på Cu(110) modificeret med 0.75ML K, doseret (øverst) med CO_2 eller (nederst) atomart H efterfuldt af CO_2 . I begge tilfælde er prøven opvarmet efter doseringen for at desorbere CO.

Studier af brint co-adsorberet med CO_2 og kalium på kobber viser, at det er muligt at danne format på overfladen. Nederste spektrum i figur 7 viser en ny

orbital ved 14 eV, samt at der fremkommer et kompleks af orbitaler mellem 8 og 12 eV. Da vi (fra øverste spektrum) kender positionerne samt de relative intensitetsforhold mellem karbonats orbitaler, kan spektret dekomponeres, og vi finder at mængden af karbonat, der dannes ved dosering af CO₂ på en H/K/Cu overflade, er stærkt reduceret i forhold til tilfældet uden H. Orbitalerne fra formaten dominerer spektret. Reaktionen, som finder sted på overfladen, er derfor givet ved



Denne reaktion er et vigtigt resultat, da dannelsen af format er et intermediært led i produktionen af metanol. På industrielt plan dannes metanol netop ud fra en gasblanding af CO, CO₂ og H₂ over en Cu/ZnO katalysator.

Afslutning

De to givne eksempler på forskning indenfor overfladefysik ved ASTRID viser, hvordan brugen af FES kan give vigtige oplysninger om både atomare geometrier i komplicerede strukturer og afsløre hvilke kemiske reaktioner, der foregår når gasser ledes henover en overflade.

De beskrevne eksperimenter er dog langt fra dækkende for den store variation af eksperimenter, både mht. metoder og mht. undersøgte materialer/overflader, som er foretaget ved ASTRID. F.eks. kan studier af tynde metallag (f.eks. Ba) på halvledende metaloxider (f.eks. TiO₂) nævnes. I dette eksperiment udnyttes fotoelektronernes bølgeegenskaber til (fotoelektron)diffraction, hvorved den atomare geometri i det tynde metallag kan findes. Yderligere kan undersøgelser af oxidering af silicium overflader nævnes. Ved ASTRID er der lagt et stort arbejde i at finde frem til metoder til dannelse af tykke (≈ 100 Å), homogene og kompakte SiO₂ lag. Den interesserede læser, som gerne vil læse mere om disse og andre eksperimenter henvises til ISA's aktivitets rapporter [6-7], hvor langt de fleste af de udførte forsøg er beskrevet.

Referencer:

- [1] A. Einstein, Ann. Phys. **17** (1905) 132.
- [2] J. H. Pedersen, C. Søndergård, S. V. Hoffmann, A. Mikkelsen, D. L. Adams, Surf. Sci. **437** (1999) 317.
- [3] S. V. Christensen, J. Nerlov, P. J. Godowski, J. Onsgaard, J. Chem. Phys. **104** (1996) 9613.

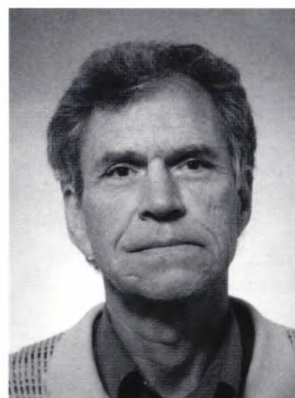
- [4] J. Onsgaard, S. V. Christensen, P. J. Godowski, J. Nerlov, S. Quist, Surf. Sci. Lett. **370** (1997) L137.
- [5] J. Onsgaard, P. J. Godowski, J. Nerlov, S. Quist, S. V. Hoffmann, Surf. Sci. **398** (1998) 318.
- [6] ISA activity report No. 1, November 1997.
- [7] ISA activity report No. 2, November 1998.



Søren Vrønning Hoffmann er Ph.D. og ansat ved ISA, Aarhus Universitet, med ansvar for opbygning og vedligeholdelse af synkrotronstrålings beamlines ved ASTRID.



Jakob Haahr Petersen er Ph.D. studerende ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Jakob har deltaget i opbygningen af den højtopløste fotoemissions (SGM1/Scienta) beamline ved ASTRID, og anvendt den til sine studier inden for bl.a. Li adsorption på aluminiumsoverflader.



Jens Onsgaard er dr.scient. og lektor ved Fysisk Institut, Syddansk Universitet. Jens er blandt pionerene inden for fotoemissions studier ved ASTRID, hvor han bl.a. har studeret forskellige co-adsorptionsstudier på kobberoverflader.

Fysik i den post-genome æra

Ole G. Mouritsen, Institut for Kemi, Danmarks Tekniske Universitet.

*Biomedicinsk og biologisk forskning i det 21. århundrede vil kræve en styrkelse af de grundlæggende naturvidenskabelige fag som fysik og kemi for at kunne udnytte resultaterne af genomforskningen. Er vi forberedte herpå?*¹

Genomforskningen og den post-genome æra

Det humane genom forventes endelig kortlagt år 2003. Genomet er en lang streng af DNA, ialt ca. 100.000 gener, som bl.a. indeholder den fuldstændige information om, hvilke proteiner mennesket består af. Proteinerne er blandt de vigtigste byggesten i cellerne. De udfører en lang række funktioner og virker desuden som enzymer ved fremstilling og bearbejdelse af andre af cellernes byggesten, f.eks. fedtstoffer og sukkerstoffer. Allerede nu kendes genomet for nogle simple organismer som svampe, bakterier og orme.

Det er fristende at antage, at den meget hurtige udvikling i fastlæggelsen af genomer har bragt os nærmere til at 'forstå' biologiske systemer og livsprocesser. Der er ingen tvivl om, at genomet er en vigtig forudsætning for en sådan forståelse. Men skal der mere til? Vi er nu med stormskridt på vej ind i, hvad man kalder den *post-genome æra*, og en række spørgsmål melder sig med hensyn til, hvad vi rent faktisk har forstået, og hvordan vi kommer videre. Og så er der spørgsmålet om, hvilken rolle fysikken kommer til at spille i denne udvikling.

Hvad fortæller genomet os?

At kende en organismes genom betyder, at man ved hvilke proteiner, organismens celler kan fremstille. Vi ved, hvordan information overføres fra genomet til proteinerne og derfor hvilken sammenhæng, der er mellem et eventuelt defekt protein og fejl eller ændringer i genomet. Sådanne fejl kan ofte lede til alvorlige sygdomme, f.eks. cystisk fibrose. Denne viden kan derfor udnyttes i genterapeutisk sygdomsbehandling og ved fremstilling af planter og dyr med særlige egenskaber, f.eks. planter med særlig modstandsdygtighed overfor vejr eller sygdomme. Denne viden kan også udnyttes teknologisk til at ændre arveanlæggene i mikroorganismer som bakterier, så de kan fremstille nyttige kemiske stoffer, f.eks. nye lægemiddelstoffer eller effektive enzymer til moderne energibesparende vaskepulver.

At kende en organismes genom betyder *ikke*, at man nødvendigvis ved, hvilken funktion et givet protein udfører. Man kan ikke læse i genomet, *hvorfor* og *hvordan* proteinerne udfører deres funktioner, heller

ikke i det tilfælde, hvor funktionen er kendt. Man kan heller ikke i genomet læse, hvorledes en celle og dens forskellige dele opbygges af de molekylære byggesten, hvorledes den biologiske aktivitet reguleres, eller hvordan celler organiseres indbyrdes for at danne flercellede organismer med specifik form og funktion. For eksempel kan man ikke i genomet læse, hvorfor vores fem fingre er næsten lige lange, eller hvordan leoparden får sine pletter og zebraen sine striber!

Den information, som genomet indeholder, er i den forstand ikke komplet, og der skal mere til for at beskrive og forstå den komplekse organisation af livets molekyler. Man kan sige, at genomet giver rammerne for det rum, hvori biologien kan udspille sig. Biologisk struktur, funktion og formdannelse er såkaldte *emergente* egenskaber, der opstår i dette rum. Det er her fysikken kommer ind som den disciplin, der søger at beskrive, hvorledes emergente egenskaber opstår som konsekvenser af samspillet mellem mange molekyler.

Alligevel hører man ofte påstanden, at den moderne genomforskning og den tilhørende bioinformatik har reduceret biologien til en informationsvidenskab. Måske skal man vurdere denne påstand på linie med uforsigtige udsagn fra tidligere i dette århundrede om, at al fysik er givet, blot man kender quarks og deres vekselvirkninger, eller at al kemi er givet, blot man kender grundstoffernes periodiske system. Hvis biologien lader sig reducere til en datadrevet informationsvidenskab, ophører den med at være en naturvidenskab. Naturvidenskabelige fag som fysik og kemi har deres universelle styrke ved at de er drevet af hypoteser og begreber. Her er det ikke et spørgsmål om bits og fænomenologiske relationer mellem bits men rigtige kræfter og fundamentale naturlove.

For at analysere overgangen til den post-genome æra og dens betydning for fremtidens biologiske og biomedicinske forskning, herunder specielt fysikkens rolle, er der en række udviklingstendenser i naturvidenskaben og forskningspolitikken her mod slutningen af det 20. århundrede, man skal være opmærksom på.

Væksten i de biologiske fag

Opklaringen af den genetiske kode er utvivlsomt det 20. århundredes mest betydningsfulde videnskabelige opdagelse. Den erkendelse, der ligger i, at molekylær *struktur* i gener og proteiner betinger biologisk *funktion*, er dyb. Landvindingerne inden for strukturel og molekylær biologi har haft stor betydning både videnskabeligt og teknologisk. Vores viden om biomolekylær

¹En kortere version af denne artikel blev bragt i *Weekendavisen* den 2. juli, 1999.

struktur er vokset eksponentielt, og vores evne til at udnytte denne viden har været fabelagtig, både på godt og ondt. Vi har beruset følt os ført frem mod fagre ny verden. Denne beruselse har ført til en meget voldsom vækst i den vestlige verdens forbrug af økonomiske ressourcer på biomedicinsk, molekylærbiologisk og bioteknologisk forskning og en stærk vækst i tilgangen til uddannelser inden for disse fagområder.

I den forbindelse har bekymrede røster af betydelig styrke rejst sig her på det seneste. Blandt disse er den britiske Nobelpristager Max Perutz, som i ugebladet *Nature* fremlægger en analyse af den voldsomme vækst i antallet af biomedicinske forskere [1]. Perutz påpeger, at forskningens vækst snart vil sprænge de økonomiske rammer, og at det er nødvendigt at omlægge strukturen af de kortsigtede bevillinger til mere langsigtede og desuden i højere grad satse på færre forskere af højere kvalitet.

En anden advarsel lyder fra det amerikanske biofysiske selskab, hvis afgående præsident, Ken Dill fra University of California i San Francisco, i en nylig artikel i *Nature* [2] gør opmærksom på den fare, der ligger i, at man for ensidigt har satset på den biomedicinske og molekylærbiologiske forskning uden samtidig at give tilstrækkelig støtte til de grundlæggende naturvidenskabelige discipliner som fysik, kemi, matematik og computervidenskab. Disse fag har skabt grundlaget for molekylærbiologiens fremskridt i det 20. århundrede, og deres udvikling er en forudsætning for både en dybere forståelse af biologiske systemers funktion samt for at udvikle de teknologier, som moderne biomedicin kommer til at benytte sig af. At overse dette forhold kan blive katastrofalt, når vi bevæger os ind i den post-genome æra. Derfor behøves en styrkelse af grænsefladerne mellem på den ene side de biologiske og biomedicinske fag og på den anden side de basale grundvidenskaber. Ken Dill fremhæver, at vores nuværende uvidenhed om, hvorledes vi skal behandle sygdomme, og vores begrænsede indsigt i biologiske fænomener, skyldes vores manglende forståelse af, hvorledes biologiske molekyler interagerer og organiserer sig. En sådan forståelse kræver grundvidenskabelig forskning inden for fysik og kemi. Samtidig vil en effektiv udnyttelse af de enorme informationsmængder, der ligger i genomet, bygge på moderne bioinformatisk teknologi, der igen vil kræve forskning i grundlæggende computervidenskab og matematik.

Den grundvidenskabelige basis

Her nærmer vi os så problemets kerne. Mange forskere og forskningspolitikere vælger at overse, at de grundvidenskabelige opdagelser, som ligger til grund for succesen inden for genomforskningen, ofte har været længe undervejs. Et eksempel er røntgenstråling, som er ét af de vigtigste værktøjer i udforskningen af biomolekylers struktur. Røntgenstråling blev opdaget for over hundrede år siden og blev først brugt til struk-

turundersøgelser af uorganisk stof i 1912 og senere til undersøgelser af hæmoglobin i 1937. Først i 1959 ledte det til bestemmelse af strukturen af et protein. Andre lignende eksempler omfatter kernemagnetisk resonansspektroskopi (NMR og MRI), kombinatorisk kemi, medicinske radioisotoper, synkrotronstråling og en række teoretiske beregningsteknikker – alle forskningsområder, hvis hovedresultater, da de kom frem, ikke havde nogen indlysende anvendelse inden for biologi og biomedicin. Det er tankevækkende, at den molekylære biologi, som vi kender den i dag, har sin rod i en forskning, der udførtes for et halvt århundrede siden af en håndfuld videnskabsfolk, som overvejende var fysikere. Her på kanten af det 21. århundrede arbejder fysikere og kemikere med teorier og eksperimenter på problemstillinger, hvor man kun kan fantasere om fremtidens anvendelser inden for biologi.

For at biomedicinen og bioteknologien skal blive succesfuld i den post-genome æra, er det nødvendigt stedse at sikre den grundvidenskabelige basis. Og det er nødvendigt at skabe betingelser for, at denne basis får mulighed for at udvikle sig i det tempo og over den tidshorisont, som svarer til de grundvidenskabelige fags natur. Det drejer sig her om det lange seje træk, hvor der sjældent er smutveje. Det er vigtigt for biomedicinens egen overlevelse, at den ikke lader sin egen succes fortrænge de grundvidenskaber, hvoraf den næres. Især er det vigtigt at gøre sig klart, at biomolekylær *struktur* kun er en lille del af det store billede af molekylers betydning for biologien; af betydning er også dynamik, termodynamik, kinetik, selv-organisering, mønsterdannelse samt subtile fysiske og kemiske egenskaber af de komplekse cellulære strukturer, hvori proteinerne udøver deres funktion, f.eks. i tilknytning til cellemembraner. Andre store og ubesvarede spørgsmål retter sig mod at forstå biologiske systemers helt unikke materialegenskaber, som er designet efter principper, der er optimeret af evolutionen over milliarder af år.

Det er paradoksalt, at det 20. århundredes struktur- og molekylærbiologi måske er blevet offer for sin egen succes. Forblandet af de store fremskridt har mange glemt, hvad denne succes bygger på. Den naturlige begrænsning i de samlede økonomiske ressourcer til forskning har både i Nordamerika og i Europa – og ikke mindst i Danmark – gjort, at den relative andel af forskningsmidlerne til de grundvidenskabelige discipliner er faldet. Samtidig har den hurtige vej fra videnskabeligt resultat til kommerciel udnyttelse, der kendetegner bioteknologi og visse dele af biomedicinen, været med til at sætte en tidsnorm for statslige forskningsprogrammer, som er meget kort og ofte dræbende for banebrydende grundvidenskabelig forskning inden for fysik og kemi.

Det er i denne sammenhæng værd at bemærke sig Max Perutz' udtalelse, at intet af den forskning, der benytter sig af røntgenstråling til studier af biomolekylær struktur, og som indtil nu har ført til

et dusin Nobelpriser, ville have kunne udføres under de betingelser, der i øjeblikket gives forskningen gennem kortsigtede forskningsprogrammer. Den danske Nobelpristager, Jens Chr. Skou, har sagt, at hans banebrydende arbejde med cellernes ionpumper ikke ville kunne have været udført under de betingelser, der gælder for forskningen i dag. Tendensen er nu at gå efter det hurtige og sikre; der er ikke tid til at overbevise sig om, at den grundlæggende fysik og kemi er i orden og fortsat udvikles, endsige tid til at undre sig over, hvorfor tingene virker som de gør.

Forskerrekruttering

Hertil kommer et andet forhold, som måske er endnu mere foruroligende. Unge i mange vestlige lande, inklusive USA og Danmark, fravælger i stigende grad en uddannelse inden for såkaldt 'hårde' naturvidenskabelige og tekniske discipliner som fysik og kemi, hvorimod tilgangen til de biologiske fag er stærkt stigende. Rekrutteringen af fremtidens grundforskere inden for fysik og kemi, der er grundlaget for fremtidig udvikling inden for biomedicin og bioteknologi, er derfor truet, udtalte fornylig præsidenten for National Academy of Sciences, Bruce Alberts. I USA er denne udvikling forstærket af, at de statslige forskningsbevillinger er stærkest stigende inden for de biologiske fag gennem National Institutes of Health.

Fornyelse af fysikken

I erkendelse af dette forhold og i erkendelse af, at fysikken må forny sig for at kunne overleve som naturvidenskabens centrale fagdisciplin, har mange af de største og mest prestigefyldte amerikanske universiteter på det seneste taget initiativer til at skabe tværvideenskabelige institutter og forskningscentre, der kan medvirke til at bygge bro mellem fysikken og biologien [3-5]. Dette gælder f.eks. Stanford, Princeton, Berkeley, University of Chicago og Caltech. Dette har allerede ført til en blodig kamp universiteterne imellem om at købe de bedste seniorforskere fra de mindre kendte institutioner, hvor fremsynede forskere, ofte mod vanskelige odds, har opbygget ekspertise inden for f.eks. biologisk fysik, uden hidtil at have haft den store forskningspolitiske bevågenhed.

Andre steder har de mest indsigtsfulde dekaner udtalt, at fysikerne må bevæge sig væk fra de klassiske og mere eller mindre udbrændte fagområder og ind i biologien for fortsat at kunne opnå støtte. Dette er ikke nogen nem balance. Et meget overbevisende argument har imidlertid været, at når fysikken ikke længere er i stand til at tiltrække de bedste af en generations studenter, er det et alvorligt faresignal. Fornyligt udtalte præsidenten for sammenslutningen af europæiske fysiske selskaber, Sir Arnold Wolfendale, at Europas fysikere må orientere sig mod biologiske problemstillinger for at sikre støtte til fremtidens fysikforskning [6]. Om dette er et godt råd, er for tidligt at afgøre. Det er imidlertid givet,

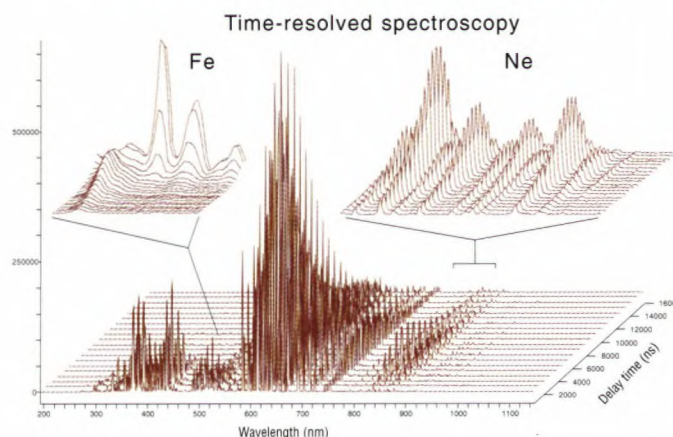
THE MECHELLE SPECTRAL SYSTEMS



Our spectrograph system, with optional fibre optic input, combined with the latest CCD/ICCD technology, offers a number of unmatched features.

- *Simultaneous spectral recording from 200 to 1100 nm. No scanning or moving parts.*
- *Multichannel time-resolved recordings from 3 ns.*
- *No overlapping wavelengths and true spectral continuity.*
- *High constant spectral resolution (CSR™) 0.04 nm at 300 nm.*
- *Compact, rugged and portable.*
- *Compatible with GRAMS/32™ and other laboratory software.*

For more information about the Mechelle™, please contact us or visit our Homepage



Tel: +46 8 605 70 90

Fax: +46 8 605 71 01

Homepage: www.multichannel.se

E-mail: mechelle@multichannel.se

at hvis den statslige støtte til et grundvidenskabeligt fag som fysik ikke gives på en måde, så den passer til fagets natur, bl.a. med hensyn til en rimelig tidshorisont, skal man ikke forvente de store gennembrud.

Dansk fysik og kemi

Hvordan står *dansk* grundforskning rustet til denne udvikling, og hvordan kan vi møde de meget store udfordringer, der ligger foran os i den post-genome æra? Har vi den fornødne bredde og styrke i den grundvidenskabelige basis for at sikre fremtidens biomedicinske og bioteknologiske forskning?

Dansk grundforskning har stået stærkt inden for mange områder af fysik og delvis også kemi. Selvom de samlede bevillinger til dansk forskning aldrig har været større, må man dog konstatere, at de senere års politiske styring af forskningen – især med hensyn til udmøntningen af alskens kortvarige forskningsprogrammer af svingende indhold og kvalitet og med korte åremål – utvivlsomt vil komme til at svække grundvidenskaben. Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd har i de senere år haft stærkt svindende midler til støtte af egentlig grundforskning. Samtidig har Danmarks Grundforskningsfond været fristet til strategisk at bruge store dele af bevillingerne til den sikre, etablerede og i nogen tilfælde forudsigelige forskning. Statens bioteknologiske forskningsprogrammer, som ligger tættest på den biomedicinske forskning, har hidtil ikke haft nogen stærk grundvidenskabelig komponent af fysik og kemi.

Det ser ud til, at man også i Danmark er faldet i den fælde, som Ken Dill omtaler [2]: i stedet for at sørge for, at grundforskningen koncentrerer sig om fremtidens videnskabelige begreber og værktøjer, har man styrket de konventionelle fagområder og satset på de eksperimentelle teknikker, som nu kører rutinemæssigt. Den succesfulde udnyttelse af fortidens videnskabelige landvindinger breder sig som ukrudt og tager livskraften fra de grundlæggende aktiviteter, hvoraf de selv er udsprunget og næret, siger Ken Dill.

Den vanskelige bevillingssituation, som har fulgt med det lavere studenteroptag, har på nogle danske universiteter fået ledelsen til at styrte rundt efter de 'hurtige penge' for at holde institutionerne i gang. Grundvidenskabens vilkår er ikke blevet forbedret ved, at en voksende del af universiternes økonomi sikres ved at oprette specielle forskningscentre, hvis temaer, der oftest er strategiske og anvendte, har politikernes bevågenhed i øjeblikket. Endnu værre er, at universiteterne hermed bliver mindre attraktive arbejdspladser for den bedste del af den fremtidige generation af unge forskere.

I en vis forstand står dansk kemi godt rustet til at møde den post-genome æras udfordringer. I kemien er der tradition for at udvise stor imødekommenhed over for nye discipliner, og kemien har aldrig følt sig for fin til at gå ind i mere komplekse problemstillinger, som man f.eks. møder dem inden for biologi. Dansk fysik

har stærke og stolte traditioner, som imidlertid kan være en tung byrde og lede til betydelig inertie. Det er da nok også karakteristisk, at udfaldet af en såkaldt evaluering af dansk fysik for nogle år siden ledte til anbefalinger om stort set at bevare status quo rent fagligt set. Dette har selvsagt vist sig ikke at være de mest fremsynede anbefalinger og da slet ikke den bedste forberedelse til bl.a. at møde den post-genome æras udfordringer. Der er imidlertid gode tegn på, at de nye studerende og de yngste forskere har evner til og visioner om at forny deres fag, bl.a. ved at tage biologiens udfordringer til fysik og kemi alvorligt.

Dele og helhed

Hvor godt eller skidt vi end er forberedt til at møde den post-genome æras videnskabelige udfordringer, så er vi på vej. Hvor naturvidenskabsfolk tidligere i høj grad har studeret systemer og fænomener i naturen ved at rive dem fra hinanden og studere de enkelte dele, er der i dag ingen vej uden om at se på helheden og undersøge, hvorledes de forskellige biologiske molekyler vekselvirker indbyrdes gennem fysikkens love, og hvorledes kompleks, biologisk opførsel hermed opstår.

Referencer:

- [1] Will biomedicine outgrow support? (M.F. Perutz) *Nature* 399, 299 (1999).
- [2] Strengthening biomedicine's roots (K. Dill) *Nature* 400, 309-310 (1999).
- [3] US universities create bridges between physics and biology (L. Garwin) *Nature* 39, 3 (1999).
- [4] Can physics deliver another biological evolution? (Editorial) *Nature* 397, 89 (1999).
- [5] Exploring the systems of life (L. Shapiro) *Science* 284, 80 (1999).
- [6] Forskningsfinansiering – en bemærkelsesværdig erfaring fra UK (A. Wolfendale) *KVANT* Årg. 10, No. 2, 28 (1999).



Ole G. Mouritsen er professor, dr.scient, leder af MEMPHYS (Membran og Statistisk Fysik) gruppen på DTU og medlem af bestyrelsen for Dansk Fysisk Selskab.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Direktionen for SNU udgøres af:

Professor Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø
E-mail: bente.egaa@uni-c.dk
Tlf. 35 87 88 04

Lektor Finn Berg Rasmussen

Lektor Erik Schou Jensen

Professor Erik W. Thulstrup

Lektor Malte Olsen

Direktør Ole Mørk Lauridsen

Lektor Jørn Johs. Christiansen (sekretær)
Aakjærs Alle 24 B
2860 Søborg
Tlf. 39 69 58 18

Foredrag om Charles Babbage

Professor Ole Immanuel Franksen fra Institut for Elektroteknik, Danmarks Tekniske Universitet, holder foredrag om Charles Babbage. Foredraget holdes mandag den 6. december 1999 på Geologisk Musæum.

Besøg på Telefonmuseet

SNU arrangerer et virksomhedsbesøg på Telefonmuseet, mandag den 8. november 1999.

Nærmere oplysninger om begge arrangementer fås hos Bente Egaa på telefon 35 87 88 04.

Medlemsskab af SNU/DFS

Indmeldelse i foreningerne SNU eller DFS kan ske ved at udfylde og indsende kuponen nedenfor. Medlemskabet får virkning så snart kuponen er modtaget, men opkrævning af abonnement eller medlemskontingent sker først i foråret 2000. Det koster 325 kr. om året at være medlem af DFS (dog 75 kr. for pensionister) og 150 kr. om året at være medlem af SNU. Unge under uddannelse slipper dog med 75 kr. både hos DFS og SNU. Det er også muligt alene at tegne abonnement på Kvant for 135 kr. om året. Hvis du ikke vil klippe i bladet, må du gerne fotokopiere kuponen.

Mangler du Kvant?

Hvis du mener, at du allerede har abonnement, men ikke får bladet (og derfor læser dette hos en kollega), har du måske glemt at melde flytning (det skal meddeles postvæsenet eksplicit!) eller glemt at betale for abonnementet/kontingentet. Du opfordres derfor til at kontakte Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (korn@math.ku.dk) for at få opklaret sagen.

Navn: _____
Stilling: _____
Adresse: _____
Postnr. og by: _____
Telefon: _____
E-mail: _____

Jeg er ☐ under uddannelse ☐ pensionist

Jeg ønsker

- ☐ abonnement på Kvant
☐ medlemsskab af SNU
☐ medlemsskab af DFS

Ved DFS-medlemsskab: Angiv evt. ønske om tilknytning til sektionerne for:

- ☐ atomfysik
☐ faststoffysik
☐ uddannelse og undervisning
☐ netværk for kvinder i fysik (KIF)



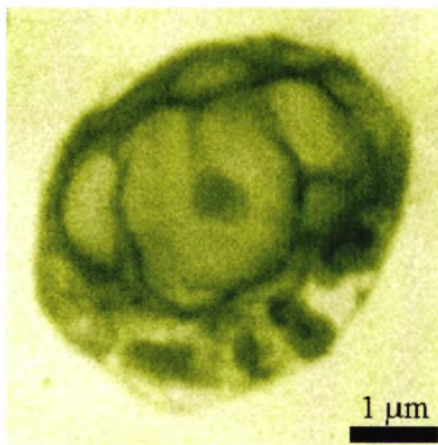
POST

Sendes ufrankeret
Modtageren
betaler portoen

KVANT
Ørsted Laboratoriet
Universitetsparken 5
+++ 1385 +++
2100 København Ø

Læs om lagerringen ASTRID og fysikken i – og omkring – den

I dette nummer af Kvant går vi i dybden med lagerringen ASTRID i Århus. Inde i bladet kan du læse, hvordan en lagerring virker, samt om de mange forskellige eksperimenter, der udføres ved ringen.



Røntgenbillede af blågrøn alge, optaget ved ASTRID.

En af de mange anvendelser er at synkrotronstrålingen fra lagerringen kan bruges til at tage røntgenbilleder med utrolig høj opløsning. Billedet ovenfor er optaget ved ASTRID og viser den blågrønne alge *Chlorella*. Algen spiller en vigtig rolle i næringsstoffernes kredsløb, og fluktuationer i algernes antal kan som bekendt have alvorlige konsekvenser for økosystemet med f.eks. fiskedød til følge. Studierne af algen er udført af forskere fra Århus i samarbejde med School of Biological Sciences ved Universitetet i Manchester.

Samarbejde med Astronomisk Selskab

Du kan også læse om et kommende samarbejde med Astronomisk Selskab om udgivelsen af Kvant fra næste år. Årets sidste nummer, der udkommer omkring 1. de-

cember, bliver et prøvenummer på dette samarbejde, og der kommer en række astronomiartikler, bl.a. om unge kuglekobe i andre galakser, om solformørkelsen i august og om det astrofysiske grundlag for liv.

Derudover bringer Kvant i næste nummer spændende artikler om årets nobelpriser i fysik og kemi, om kvante teleportation og om atmosfærens struktur.

Vi bringer også anmeldelser af nogle nye fysikbøger, bl.a. "Bogen om Grundstofferne (af Henning Henriksen og Erik Pawlik) og "Den harmoniske begejstring" (af Ove Nathan og Henrik Smith), ligesom vi har premiere på endnu en nyskabelse, nemlig en fast rubrik med fysikopgaver til læserne.

Ingeniører læser også Kvant

I ugebladet *Ingeniøren*, der beskriver sig selv som "Teknikkens Nyhedsmagasin", omtaler civilingeniør Kay Akselbo i nr. 40 (8. oktober 1999) en artikel i Kvant nr. 1 / 1998 og skriver bl.a.: "*Faktisk synes jeg, at Ingeniøren plejer sine læsere for dårligt ved aldrig at referere til dette udmærkede magasin!*"

Kvants redaktør kan erklære sig helt enig i dette udsagn, og har derfor straks foræret Ingeniørens redaktion et gratisabonnement på Kvant, således at de fremover kan pleje deres læsere lidt bedre.

Til gengæld kan vi glæde os over, at "Morgenavisen Jyllands-Posten er mere opmærksom på sine fysikinteresserede læsere, idet avisen bragte et udførligt referat af Kvants artikel om "Tjernobyl-eksplosionen" fra nr. 2 / 1998.

Kvant med år 2000 garanti

Kvants trykkeri – P. J. Schmidt A/S – i Vojens oplyser, at trykkeriet nu er år 2000 sikret, og vi kan derfor love læserne, at bladet også udkommer efter 1. januar, ligesom vi kan garantere, at de hidtidige numre af Kvant også kan læses efter år 2000.



NKT'S FORSKERPRIS

1999

Kvanteoptik og mere end kælderkolde atomer i

NKT Forskerpris 1999 tildeles lektor Klaus Mølmer og professor Eugene Polzik fra Aarhus Universitets Institut for Fysik og Astronomi, hvor de virker som henholdsvis teoretiker og eksperimentator inden for fagområdet kvanteoptik. De to har ikke alene placeret Århus og Danmark på verdenskortet, men også skabt et unikt forsknings- og studiemiljø, hvor de viser vejen for unge studerende ind i nye, perspektivrige områder af fysikken.

Kvanteoptik er et område af atom- og optikfysikken, som igennem 1980-90'erne ikke alene har haft en række dedikerede forskergruppers bevågenhed rundt omkring i verden. I kraft af nogle meget spændende forskningsresultater har området også fået stor opmærksomhed fra andre fysikere, og omverdenen i det hele taget. Tildelingen af Nobelprisen i 1997 til en gruppe forskere, der har medvirket til at generere udviklingen på området, nemlig Steven Chu og William D. Phillips fra USA og Claude Cohen-Tannoudji fra Frankrig, var således ikke kulminationen på den stærke fokusering på kvanteoptik, men derimod et bidrag til en yderligere fokusering på området.

Prismodtagerne har placeret sig markant i det globale forskningsmiljø

Lektor Klaus Mølmer og professor Eugene Polzik fra Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet har skabt unikke resultater inden for kvanteoptik – og har dermed placeret sig markant i det internationale forskningsmiljø. Samtidig har de skabt et enestående studiemiljø for de studerende på deres institut. For deres forsknings- og uddannelsesmæssige indsats har Dansk-Fysisk Selskab besluttet at tildele dem NKT Forskerprisen 1999 i fællesskab. Der er dog ikke ubetinget tale om en fælles indsats af de to prismodtagere, idet Klaus Mølmer er teoretiker, mens Eugene Polzik er eksperimentator, men deres indsats kompletterer hinanden i en grad, der berettiger den fælles pristildeling.

Denne generator i det kvanteoptiske laboratorium genererer „entangled“ eller sammenslynget ikke-klassisk lys.



En fælde af laserlys holder atomer fast i næsten ubevægelighed

Udviklingen af processen laserkøling har genereret udviklingen inden for kvanteoptik, og det var netop afgørende bidrag til denne procesudvikling, som blev belønnet med Nobelprisen i 1997. Klaus Mølmer har i øvrigt i en periode virket i den franske Nobelprismodtager Claude Cohen-Tannoudji's forskergruppe i Paris, som han og Aarhus Universitet stadig har et tæt samarbejde med. Laserkøling er en metode til at køle atomare gasser, som får atomerne til at ligge næsten helt stille, hvilket har nogle meget interessante perspektiver – både for grundforskningen og for udviklingen af nye teknologier. Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet har siden slutningen af 1980'erne medvirket i udviklingen af laserkøleprocessen, der foregår i en vacuum-beholder ved en temperatur, der er lavere end noget andet sted i hele universet – nemlig kun en brøkdel af en grad over det absolutte nulpunkt (-273 grader Celcius). Kølingen sker ved hjælp af laserstråler i hvis centrum atomerne fanges og fastholdes i en fælde, hvor de næsten ikke kan bevæge sig.

„I vores kvanteoptiske laboratorium her i Århus har vi bygget den første fælde for kolde atomer i Skandinavien“, fortæller Eugene Polzik.

Laserkøling beviser en af Einstein's teorier fra 1920'erne

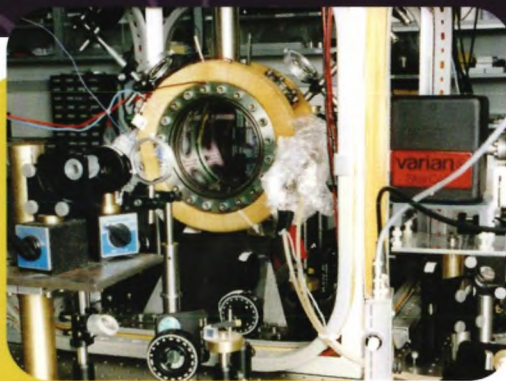
Udviklingen af laserkøleprocessen har gjort det muligt at bevise en teori, som Albert Einstein og den bengalske fysiker Satyendra Bose udviklede allerede i 1920'erne. Teorien går ud på, at meget kolde atomer tilsammen kan opføre sig som et enkelt atom – et såkaldt Bose-Einstein kondensat. Det interessante ved et sådant kondensat er, at alle atomerne er i den samme tilstand og har det samme sæt egenskaber. De mister deres identitet og opfører sig som et enkelt superatom. Fremstillingen af Bose-Einstein kondensater gør det muligt at studere denne „new state of matter“.

Klaus Mølmer har bidraget markant til videreudviklingen af Bose-Einstein teorien. Endvidere har han, gennem udviklingen af den såkaldte Monte Carlo bølge-funktionsmetode til computerbaseret løsning af et bredt udsnit af kvantemekaniske problemstillinger, bidraget afgørende til teoriudviklingen omkring laserkøling. Monte Carlo metoden er så banebrydende, at den har sit eget kapitel i de nyeste bøger om kvanteoptik.

Århus åbner døren ind til en fager, ny verden – hvor



Denne blå sky af sammenslyngede kolde atomer er fotograferet i en vacuum-beholder i det kvanteoptiske laboratorium i Århus, der er opbygget af Eugene Polzik og hans kolleger og studerende.



I det kvanteoptiske laboratorium ved Aarhus Universitet arbejder man med en laserkøleproces, der kan køle atomer helt ned til en brøkdels af en grad over det absolutte nulpunkt (-273 grader Celsius). Dermed hører vacuum-beholderen i laboratoriet i Århus til blandt de absolut koldeste steder i hele universet.

Ikke-klassisk laserlys i interaktion med kolde atomer

Eugene Polzik arbejder som sagt med den eksperimentelle side af de kvanteoptiske udfordringer, og sammen med en gruppe af kolleger og studerende har han siden sin ansættelse i Århus i 1993 opbygget et unikt kvanteoptisk laboratorium i kælderen under Institut for Fysik og Astronomi. Her er man i stand til at generere såkaldt ikke-klassisk lys eller „entangled“ lys (bestående af sammenslyngede fotoner) og herved studere lysets interaktion med kolde atomer. Dermed kan man foretage atomare målinger af en følsomhed, som overskrider de såkaldte standard kvantebegrænsninger. Ved at sende ikke-klassisk lys gennem atomfælden kan selv den mindste forandring af atomgassens karakteristika detekteres.

Atomur rammer højst 1 sekund forkert på 100 millioner år

Kvanteoptik har spillet en afgørende rolle omkring videudviklingen af atomure. Indtil 1967 blev et sekund defineret som en brøkdels af et år og var dermed baseret på planeternes bevægelse omkring solen. I 1967 tog man konsekvensen af, at solsystemet ikke er stabilt nok til vores behov for præcision, og i stedet blev et sekund defineret ud fra den frekvens af mikrobølgestråling, som anslår et cæsium-133 atom. Ved hjælp af kvanteoptik har man i dag atomure, som højst rammer et sekund ved siden af på 100 millioner år. Ved at forfine teknikken regner man med at kunne definere et sekund med en præcision på et sekunds fejl på 10 milliarder år – dobbelt så længe som Jorden har eksisteret. Denne udvikling vil bl.a. være til gavn for telekommunikation og satellitnavigation. Præcisionen i atomure har i dag nået standard kvantebegrænsningerne. Klaus Mølmer og Eugene Polzik forsker i en måde at overskride disse begrænsninger på, nemlig gennem anvendelsen af sammenslyngede atomer.

Kvanteoptiske opdagelser

vil føre til ny teknologiudvikling

„Vores eksperimenter har vist, at ikke-klassisk lys kan absorberes af kolde atomer, der kan lagre den lysbårne information. Dermed vil kolde atomer kunne anvendes som hukommelse i fremtidige kvantecomputere, der vil være vores dages computere totalt overlegne - helt uden sammenligning. Vi forsker dog ikke for at skabe nye teknologier eller produkter, men for at gøre erkendelsesmæssige fremskridt inden for fysikkens verden“, siger Eugene Polzik.

„Det er dog utænkeligt, at der ikke vil følge nye teknologiske muligheder i kolvandet på forskningen, og det er også utænkeligt, at disse ikke vil blive anvendt til praktiske applikationer“, tilføjer Klaus Mølmer.

Sikker kryptering af datatransmission

„Det er for eksempel i dag teoretisk, og for så vidt også praktisk muligt, ved hjælp af kvanteoptiske metoder at kryptere transmission af elektroniske filer på en i princippet 100% sikker måde, og dermed opnå et absolut optimalt sikkerhedsniveau, idet det efter denne metode altid vil kunne opdages, hvis en transmission er blevet aflyttet“, oplyser Eugene Polzik.

Teleportation af laserlysstråle

Sidste år opnåede Eugene Polzik sammen med sin gruppe i Århus og internationale forskerkolleger stor international anerkendelse for at have formået at teleportere en laserlysstråle fra den ene ende af laboratoriet til den anden.

„Vi ødelagde i princippet laserlysstrålen og rekonstruerede den igen på den anden side af arbejdsbordet med præcis dens oprindelige egenskaber ved hjælp af „entanglement“. Man kan sige, at vi skabte en kopi af den originale laserlysstråle“, fortæller Eugene Polzik. Efter denne bedrift satte en kollega en seddel på Polzik's labo-

grænserne for det mulige udvides løbende ...

ratoriedør, hvorpå der stod: „Kaptajn Kirk – Star Trek“. Som bekendt kan den gode kaptajn kopieres i identiske udgaver efter behov, så sammenligningen er god nok. Teleportation kan bl.a. anvendes i forbindelse med udviklingen af kvantecomputere.

Et frugtbart møde

Eugene Polzik er født, opvokset og senere uddannet som fysiker i Sankt Petersborg i Rusland. Siden emigrerede han til USA og virkede bl.a. som research scientist ved Caltech, California Institute of Technology. I 1993 tiltrådte han en stilling som lektor ved Aarhus Universitet, som ønskede at opbygge et stærkt teoretisk-eksperimentelt miljø omkring kvanteoptik. I januar i år blev Eugene Polzik udnævnt til professor.

Klaus Mølmer er på sin side uddannet ved Institut for Fysik og Astronomi i Århus, hvor han siden 1991 har haft sit professionelle virke og i dag er lektor – sideløbende med internationale forsknings- og undervisningsaktiviteter. Mødet mellem Mølmer og Polzik blev meget frugtbart, og har haft stor betydning for både forskningsresultater og udviklingen af studiemiljøet i Århus.

Kvantemekanikkens anden bølge ruller nu

„Selv om vi er fysikere, og derfor som udgangspunkt søger at klarlægge fysikkens lovmæssigheder, så er vores indgangsvinkel også i høj grad „konstruktiv“, idet vi ligesom opfindere forsøger at „få fysiske systemer til at gøre det, vi gerne vil“ – nogle gange ved at gå til kanten af de kendte lovmæssigheder“, påpeger Klaus Mølmer.

„Historisk kan man sige, at hvor kvantemekanikkens første bølge tidligere i dette århundrede bragte atom- og faststoffysikken, halvlederteknikker, kemiindustrien, lasere og meget mere med sig, så oplever vi i dag kvantemekanikkens anden bølge, der bl.a. har bragt kvanteoptikken og dens nye muligheder med sig“, siger Eugene Polzik, der sammen med Mølmer må siges at have bidraget væsentligt til denne anden bølge igennem deres studier af „entangled“ fotoner og atomer.

Nyt center for Kvantee Informatik i Århus

I 1998 blev der oprettet et nyt center på Aarhus Universitet, nemlig Thomas B. Thirge's Center for Kvantee Informatik, som er etableret på tværs af fysik- og datalogiinstitutionerne. Dette tværfaglige center danner i dag rammen om en væsentlig del af de to prismodtageres forsknings- og uddannelsesmæssige aktiviteter.

Kort om prismodtagerne 1999



Klaus Mølmer:

- Født i Vejle, Danmark, 1963.
- Cand.scient. fra Aarhus Universitet, 1987.
- Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'École Normale Supérieure, Paris (med prof. C. Cohen-Tannoudji), feb.-juli 1989.
- PhD-grad i fysik fra Aarhus Universitet, 1990.
- Lektor i fysik ved Aarhus Universitet, siden 1991.
- Gæsteforsker ved Max-Planck Institut für Quantenoptik, Garching (med prof. H. Walther), 1992-93.
- Gæsteprof. ved Institut d'Optique, Université Paris Sud, Orsay (med prof. A. Aspect), sept. 1996.
- Gæsteprof. ved Institut für Theoretische Physik, Innsbruck (med prof. P. Zoller), jan. 1997.
- Årspris fra Dansk Optisk Selskab, DOPS-prisen, 1998.
- Thomas B. Thirge Center for kvanteinformatik, Århus Universitet, siden 1998.

(Listen rummer af pladmæssige grunde kun et udvalg af aktiviteter, priser m.v.).



Eugene S. Polzik:

- Født i Rusland, amerikansk statsborger, bosat i Danmark.
 - M.S. i fysik, Skt. Petersborg Universitet, Rusland, 1976.
 - Ph.D i fysik, kvanteelektronik, Skt. Petersborg Universitet, 1980.
 - Lektor i fysik, Skt. Petersborg Universitet, 1980-89.
 - Forsker ved California Institute of Technology (Caltech), USA, 1990-93 fuld tid, 1993-95 deltid.
 - Lektor i fysik ved Aarhus Universitet, 1993-99.
 - Gæsteprof. ved Caltech, juli-aug. 1997.
 - Gæsteprof. ved Institute of Experimental Physics, Innsbruck Universitet, jan.-feb. 1998.
 - Kvantee-teleportation eksperiment placeret på AAAS og Science's top 10-liste over årets videnskabelige fremskridt, 1998.
 - Inviteret foredragsholder ved ca. 20 internationale konferencer, 1992-98.
 - Thomas B. Thirge Center for kvanteinformatik, Aarhus Universitet, siden 1998.
 - Professor i fysik, leder af det kvanteoptiske laboratorium, Aarhus Universitet, siden 1999.
- (Listen rummer af pladmæssige grunde kun et udvalg af aktiviteter, priser m.v.).

Indstillingen af prismodtagerne 1999

Citation

NKT's Forskerpris 1999 gives til professor Eugene Polzik og lektor Klaus Mølmer for deres originale arbejde med kvanteoptik. Tilsammen står de for banebrydende eksperimentelle og teoretiske aktiviteter. Sammen har de etableret et meget stærkt miljø for kvanteoptik ved Aarhus Universitet.



Motivation

Kvanteoptik er en gren af fysikken der har tiltrukket betydelig interesse i de seneste 10-20 år. Moderne optik har udviklet sig til et område hvor grundlæggende fænomener i kvantefysikken kan afprøves. Det er også et område, hvor afstanden fra nye fundamentale opdagelser til praktiske anvendelser er meget kort.

Eugene Polzik og Klaus Mølmer leverer væsentlige bidrag til kvanteoptik. De har etableret et enestående forsknings- og undervisningsmiljø på Aarhus Universitet med den ubetinget stærkeste indsats inden for kvanteoptik i Danmark. Polzik er banebrydende ved eksperimentelt arbejde, og Mølmer udvikler teoretiske metoder og modeller af væsentlig betydning for feltet. Tilsammen har de bidraget til at gøre kvanteoptik til et område, der i væsentligt omfang bidrager til forståelsen af generelle kvantefænomener i fysikken. De udgør centret for kvanteoptik i Danmark og har etableret internationale samarbejder, som er afgørende for fysikkens udvikling.

Deres forskning er koncentreret omkring kvantesystemer af atomer og fotoner, og inkluderer ikke-klassisk lys samt superkolde og „entangled“ atomer.

Deres fælles arbejde er et eksempel på et meget frugtbart samarbejde mellem en teoretisk orienteret eksperimentator og en eksperimentelt orienteret teoretiker. De har udviklet nye metoder til overførsel af kvantemekaniske egenskaber mellem lys og stof, og disse metoder er demonstreret eksperimentelt. Resultaterne giver nye perspektiver for informationslagring på kvanteniveau og for tids- og frekvensstandarder under den traditionelle kvantegrænse.

Eugene Polziks arbejde har, på Aarhus Universitet såvel som på Caltec i USA, bidraget til nye områder i atom- og optisk fysik i relation til vekselvirkning mellem ikke-klassisk lys og atomer. Væsentlige milepæle inkluderer det første eksperiment vedrørende sub-shot-noise absorption og polarisationsspektroskopi samt det første eksperiment med ikke-lineær atomspektroskopi baseret på „squeezed“ lys. For nylig har Polzik deltaget i den første påvisning af „unconditional quantum teleportation“.

Klaus Mølmer har bidraget til teorien for laserkøling, stof-bølgeinterferometri samt Bose-Einstein kondensering. Sammen med kolleger har han introduceret og udviklet Monte Carlo bølgefunktionsmetoden, som nu indgår med særlige kapitler i de nyeste bøger om kvanteoptik. Han har bidraget med originale bidrag til laser- og mange-legemefysik i relation til klassisk- versus kvantelokalisering. For nylig har han leveret nye forslag til kvanteberegning og -kommunikation.

Ud over arbejdet med en bedre forståelse af fundamentale kvantefænomener, bidrager Eugene Polziks og Klaus Mølmers forskning til anvendelser inden for det nye hurtigt voksende område for kvanteinformation og kvantebegrænsede systemer og komponenter.

Modtagere af NKT's Forskerpris

- 1988** Jens Lindhard, professor, Aarhus Universitet.
Teoretisk fysik. Lindhard funktionen, forudsigelse af streng-effekten.
- 1989** Otto Kofoed-Hansen, professor og Hans Pecseli, professor, Forskningscenter Risø.
Plasmafysik. Turbulensfænomener i atmosfæren og i ioniserede gasser (plasmaer).
- 1990** Jens Nørskov, forskningsprofessor, Danmarks Tekniske Universitet, DTU.
Overfladefysik. Modeludvikling for atomare interaktioner på overflader. Effektiv medium teorien.
- 1991** Carl Gaarde, docent, Københavns Universitet.
Kernefysik. Spin-isospin respons i atomkernerne.
- 1992** Carsten Christoffersen, docent, Københavns Universitet.
Molekylær marin kemi, adaptiv variation i stofskiftet.
- 1993** Predrag Cvitanovic, forskningsprofessor, Københavns Universitet.
Teoretisk fysik. Teori for overgang til kaos, samt studier af periodiske baner.
- 1994** Jens Peder Dahl, professor, Danmarks Tekniske Universitet, DTU.
Kemisk fysik. Faserumsformulering af kvantemekanikken anvendt til beregning af molekylestrukturer og molekylers vekselvirkning med lys.
- 1995** Flemming Besenbacher, lektor, Erik Lægsgaard, ingeniør og Ivan Stensgaard, lektor, Aarhus Universitet.
Overfladefysik og materialevidenskab. Scanning Tunneling Mikroskopi, STM.
- 1996** Morten Meldal, adj. professor, lic. techn., Carlsberg Laboratorium.
Organisk kemi. Automatiseret peptid- og glukopeptidsyntese på biokompatibel fastfase.
- 1997** Klaus Bechgaard, professor, afdelingschef, Forskningscenter Risø.
Faststoffysik. Opdagelse af organiske superledere, Bechgaard saltene.
- 1998** Ole G. Mouritsen, professor, Danmarks Tekniske Universitet, DTU.
Tværvideenskabelig indsats inden for „Soft Condensed Matter“ og biologisk fysik.
- 1999** Eugene Polzik, professor og Klaus Mølmer, lektor, Aarhus Universitet.
Kvanteeptik. Teoretiske og eksperimentelle bidrag til forståelsen af generelle kvantefænomener.

Om NKT's Forskerpris

NKT's Forskerpris blev uddelt første gang i 1988. Det er i år dermed 12. gang, at NKT på denne vis påskønner en dansk forskningsindsats af betydelig international vægt.

Prisen anerkender en særligt fremragende indsats af nye dato inden for grundlæggende eller anvendt fysik og kemi. På ulige årstal uddeles prisen inden for fysik – og på lige årstal inden for kemi. NKT Forskerprisen er på 100.000 kr.

Det er NKT's ønske med prisen at stimulere naturvidenskabelig grundforskning, der på så mange måder er afgørende for udviklingen af det danske samfund. Dansk grundforskning har stor betydning for en virksomhed som NKT, hvis virke og eksistens er baseret på teknologisk viden og kunnen. Gennem NKT Research Center, der opererer i grænseområdet mellem grundforskning og avanceret produktudvikling, har NKT nære relationer til danske og udenlandske forskningsmiljøer.

NKT's Forskerpris uddeles af Dansk Fysisk Selskab og Kemisk Forening

NKT har indgået aftale med henholdsvis Dansk Fysisk Selskab og Kemisk Forening om uddeling af NKT's Forskerpris. Det er således de to selskaber, som på skift udpeger prismodtageren. Prisen kan ikke søges, men tildeles en forsker eller en gruppe af forskere, der har ydet en afgørende forskningsindsats inden for fysik eller kemi.

De to selskabers medlemmer er berettigede til at foreslå prismodtagere. Forslag skal motiveres og underskrives af mindst tre medlemmer. De indkomne forslag bedømmes af en komité på fire medlemmer, der nedsættes af bestyrelsen for det selskab, som i det pågældende år står for prisuddelingen.

NKT

NKT Research Center A/S
Priorparken 878
DK-2605 Brøndby
Telefon 43 48 35 00
Fax 43 63 00 99
E-post: nrc@nkt-rc.dk
Web side: <http://www.nkt-rc.dk>