

KVANT

December 2005 4

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 16. årgang

- KORT GAMMA-GLIMT AFSLØRET
- FUSIONSFORSKNING
- VILD MED LYS
- FED FYSIK OG ELEKTROSTATIK
- SYMMETRIER I ATOMAR STRUKTUR
- KVINDER I FYSIK
- KVANT-NYHEDER
- OPGAVE-HJØRNET
- AKTUELLE BØGER

LØSSALGSPRIS: 40 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærens Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.)
Ordrup Gymnasium
Camilla Bacher (AS)
Mærsk Olie & Gas
Jørgen Friis Bak, Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen (SNU)
Henrik Flyvbjerg, RISØ
Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen,
Matematisk Institut, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør)
Jens Olaf Pepke Pedersen,
Danmarks Rumcenter
Finn Berg Rasmussen, Ørsted Lab, KU
Svend E. Rugh

Abonnementspris : 160 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber. Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

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 reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2500. Tryk: P.J. Schmidt A/S,
Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan

Nr. 1-06 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-06 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

“Korte” gammaglimt afsløret efter lang tids søgen

Kristian Pedersen, Jens Hjorth, Johan P.U. Fynbo og Jesper Soller-
man 3

Foreningsnyt – foredrag i foråret 5

Hvor står fusionsforskningen i dag?

Vagn O. Jensen 6

Vild med lys

Poul M. Hansen, Tabita W. Madsen og Lene Oddershede . . . 14

Fed fysik og elektrostatik

Amy C. Rowat 18

Planetkalender for København 2006

Martin Götz 22

KVANTE-stigen – Meddelelser om stort og småt

Michael Cramer Andersen 23

Nordisk Netværk for Kvinder i Fysik (fortsat fra bagsiden)

Anja C. Andersen og Cathrine Fox Maule 24

KVANT-nyheder

John Rosendal Nielsen og Sven Munk 25

Geometriske og kvantemekaniske symmetrier i atomar struktur

Marianne D. Poulsen og Lars B. Madsen 27

Opgave-hjørnet – Træk i togvogne

Jens Højgaard Jensen 31

Aktuelle bøger 33

Nordisk netværk for Kvinder i Fysik

Anja C. Andersen og Cathrine Fox Maule Bagsiden

Forsiden viser: et stjernedannende område i Den Lille Magellanske Sky – en satellitgalakse, der befinder sig ca. 210.000 lysår fra Mælkevejen. På billedet, der er optaget med Hubble Rumteleskopet, ses stjerneboblen NGC 346 (nær centrum) og en dramatisk 'skulptur' af gas og støv udenom, formet af strålingen fra de unge massive og lysstærke blåhvide kæmpestjerner i NGC 346. Der findes flere mindre, kompakte, stjernebobler i dette område og der er observeret et antal meget unge stjerner, som endnu ikke er færdige med at trække sig sammen til det punkt, hvor de er varme nok indeni til at omdanne brint til helium ved fusion. Billede: NASA, ESA og A. Nota (ESA/STScI).



Bestilling af ekstra eksemplarer af dette nummer (40 kr. per stk. inklusiv forsendelse) kan ske på kvant@kvant.dk så længe lager haves.

“Korte” gammaglimt afsløret efter lang tids søgen

Kristian Pedersen, Jens Hjorth, Johan P.U. Fynbo og Jesper Sollerman, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

For første gang siden kosmiske gammaglimt blev opdaget for over 35 år siden er det lykkedes at observere synligt lys fra “eftergløden” af et kort gammaglimt. Selve gammastrålingen fra de korte gammaglimt varer under 2 sekunder og kan kun observeres fra gammadetektorer i rummet. Med opdagelsen af synligt lys fra de korte gammaglimt, kan disse nu også studeres med kikkert på jorden. Jagten på korte gammaglimts oprindelse er derfor nu gået ind i en helt ny fase blandt astrofysikere verden over. Opdagelsen er gjort af et internationalt team af forskere primært fra vores gammaglimt team på Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Med observationer fra den danske 1,5 meter kikkert på det Europæiske Syd Observatorium, La Silla, Chile, har teamet bragt os nærmere på mekanismen bag disse ekstreme, men flygtige, kosmiske eksplosioner. Resultatet blev publiceret i en artikel i tidsskriftet Nature d. 6. oktober 2005.

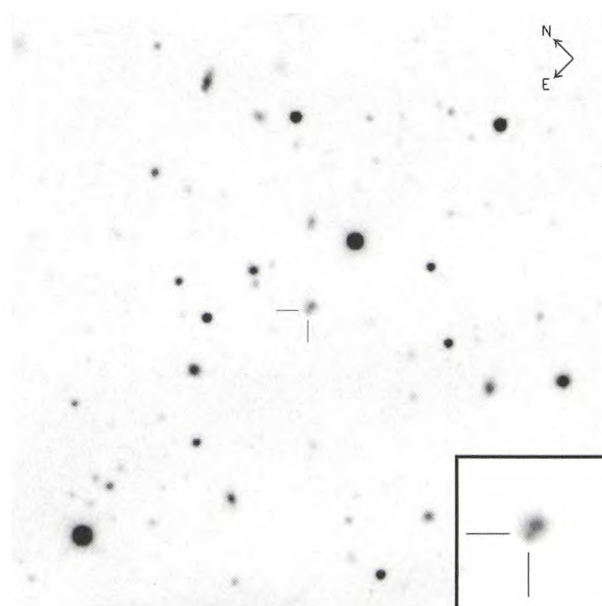
Gammaglimt er de kraftigste eksplosioner i Universet og deres oprindelse har været et mysterium i over 35 år. Der er to forskellige typer gammaglimt, “korte” og “lange”: Gammastrålingen fra de korte observeres i mindre end 2 sekunder, hvorimod de lange varer fra mere end 2 sekunder til flere minutter.

Gennembruddet i forståelsen af de lange gammaglimt skyldes opdagelsen af “eftergløden” af røntgenstråling og synligt lys, som følger udbruddet af gammastråling. Observationer af eftergløden gjorde det muligt at finde de galakser, gammaglimtene kom fra, og dermed bestemme afstanden og den udsendte energimængde. Det blev hurtigt klart, at de lange gammaglimt skyldes ekstreme eksplosioner i galakser milliarder af lysår borte. I de sidste par år, er det blevet klart, at de lange gammaglimt er intimt forbundet med eksplosioner af meget tunge stjerner, *hypernovaer*, som kolliderer til et sort hul (se artiklerne om opdagelsen af en supernova associeret med et gammaglimt [2,5]).

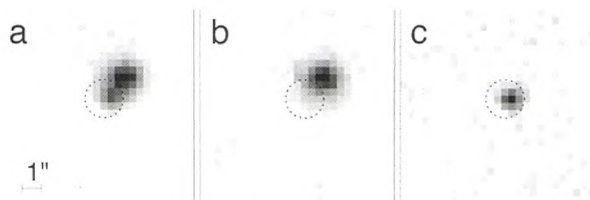
For de korte gammaglimt er der indtil for nylig kun været målt gammastrålingen, og deres afstande og energiudsendelse har været ukendt. Kilden til de korte gammaglimt har derfor været et mysterium. Men hen over sommeren 2005 ændrede dette sig radikalt.

Om natten den 9. juli 2005, opdagede HETE-2 satellitten et gammaglimt, der kun varede 70 millisekunder, og røntgenkameraet om bord bestemte en præcis position af røntgeneftergløden fra dette korte gammaglimt. 33 timer efter gammaglimtet observerede vores team dette område af himlen med den danske 1,5 meter

kikkert på La Silla. I udkanten af en galakse sås en hidtil ukendt kilde, som blev gradvist svagere. Dermed var det for første gang lykkedes at “fange” eftergløden af synligt lys fra et kort gammaglimt.



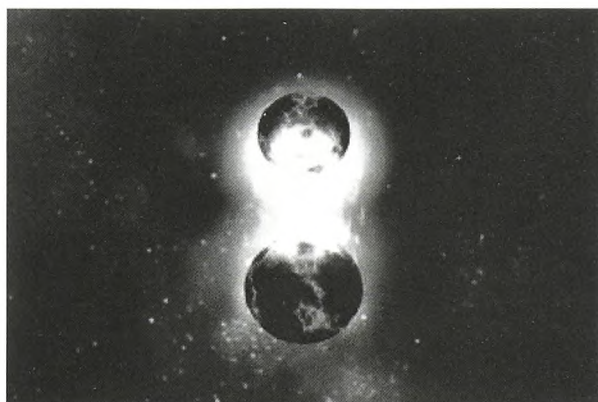
Figur 1. Første billede af efterglød i synligt lys fra et kort gammaglimt taget med den danske 1,5 meter kikkert, ESO, Chile.



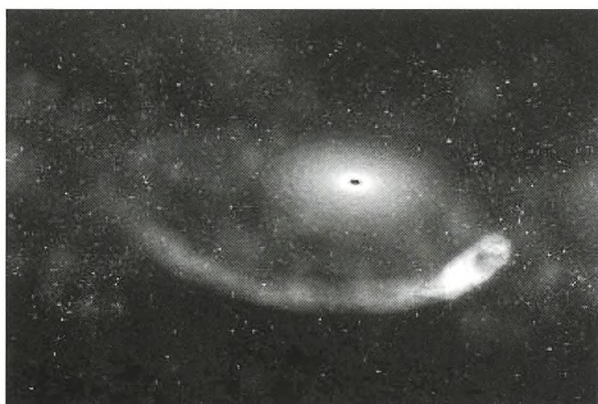
Figur 2. Den optiske efterglød blev svagere med tiden. (a) Billede fra d. 11. juli 2005. I cirklen ses den optiske efterglød i udkanten af en galakse. (b) Billede fra d. 18. juli 2005. Den optiske efterglød er ikke mere synlig. (c) De to foregående billeder trukket fra hinanden. Galaksen som lyser konstant er ikke med på det resulterende billede; kun den optiske efterglød der var synlig på det første billede (ESO).

Det viste sig, at gammaglimtet befandt sig 11,000 lysår fra centret i en dværggalakse, i en afstand af 1,9 milliarder lysår fra Jorden. Stjernerne i galaksen er forholdsvis unge, omkring 400 millioner år, og galaksen danner mange stjerner. Af observationerne i de følgende tre uger med den danske 1,5 meter kikkert kunne det udelukkes, at gammaglimtet blev ledsaget af en hypernova som de lange gammaglimt. Dette støtter

den fremherskende teori om korte gammaglimt som resultatet af sammensmeltningen af to meget kompakte objekter: To neutronstjerner, to sorte huller eller en neutronstjerne og et sort hul.



Figur 3. En kunstners opfattelse af hvordan det ser ud når to neutronstjerner smelter sammen. Illustration fra animation af Dana Berry/NASA.



Figur 4. En kunstners opfattelse af hvordan det ser ud når et sort hul "æder" en neutronstjerne. Først bliver neutronstjernen strukket ud, hvorefter den bliver opslugt. Til sidst spytter det sorte hul materiale fra neutronstjernen ud i to stråler (jets). Illustration fra animation af Dana Berry/NASA.

Samme konklusion kom fra observationer af et andet kort gammaglimt d. 9. maj 2005, som varede 40 millisekunder. Dette gammaglimt blev opdaget af Swift satellitten, som fra røntgeneftergløden bestemte positionen præcist. Der blev dog ikke set nogen efterglød i synligt lys fra dette korte gammaglimt. Vores observationer med Very Large Telescope, ESO, Chile, viste at dette gammaglimt befandt sig meget tæt på en stor elliptisk galakse i en galaksehob, 2,6 milliarder lysår fra Jorden. I modsætning til dværggalakser der husede gammaglimtet fra 9. juli, danner denne galakse pt. ingen stjerner. De meget forskellige værtsgalakser for disse to korte gammaglimt er i tråd med idéen om sammensmeltning af kompakte objekter. F.eks. vil to neutronstjerner have en alder fra nogle millioner år op

til flere milliarder af år, før de smelter sammen. Derfor findes de i meget forskellige omgivelser.

Der er dog stadig et stykke vej til en endelig afklaring af oprindelsen af de korte gammaglimt. Men opdagelsen af deres efterglød har nu banet vejen for detaljerede studier af deres omgivelser, afstand og energiudsendelse.

Litteratur

- [1] DARKs web-side, www.astro.ku.dk/dark
- [2] Jens Hjorth et al. (2005), Gamma-glimt – eksplosioner fra Universets ungdom, *Naturens Verden*, bind 11/12, s. 55.
- [3] Jesper Sollerman et al. (2005), Supernovaer kaster lys over mørk energi, *Naturens Verden*, bind 7/8, 2.
- [4] Kristian Pedersen et al. (2005), Det mørke univers, *Naturens Verden*, bind 5, 34.
- [5] Jens Hjorth, Chryssa Kouveliotou og Stan Woosley (2004), Hunting cosmic explosions, *Physics World*, Oct. 2004. Findes på nettet (via DARKs web-sider) physicsweb.org/articles/world/17/10/7.



Forfatterne arbejder ved det nyligt oprettede *Dark Cosmology Centre* ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universet. Centret finansieres i 5 år af Danmarks Grundforskningsfond og målet er at afdække naturen af Universets ukendte hovedbestanddele, "mørkt stof" og "mørk energi" for at opnå en fysisk forståelse af Universets struktur og udvikling. Tilgangen er studier af "kosmiske fyrtårne" som gammaglimt, supernovaer, fjerne galakser og galaksehobe – se artiklerne [3,4]. Forfatterne er: Kristian Pedersen og Jens Hjorth (øverst) og Johan P.U. Fynbo og Jesper Sollerman (nederst).

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2006

Astronomisk Selskab

Forårets foredragsserie har temaet: **Solen – en stjerne i baghaven.**

Solen er den nærmeste stjerne og derfor et unikt studieobjekt, når vi forsøger at forstå stjerners opbygning og virkemåde. Danske forskere er med helt fremme i forreste linie når det gælder om at studere Solens egenskaber, både med hensyn til observationer og mere teoretiske analyser.

Solens helt centrale betydning for livet her på Jorden gør den til genstand for en naturlig opmærksomhed fra alle folkeslag. Det kommer bl.a. til udtryk ved at mange rejser til Nordafrika og Tyrkiet for at se den totale solformørkelse d. 29. marts 2006. I disse foredrag vil vi præsentere aktuelle resultater fra udforskningen af den nærmeste stjerne.

Foredragene, som er angivet i foredragskalenderen nedenfor – markeret med 'AS' – afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Michael Linden-Vørnle, Kristian Pedersen, Michael Quaade og Bjarne Thomsen. Hjemmeside: www.as-dk.org.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Forårets mødeprogram har temaet "Biotek, nanotek og infotek". Foredragene – markeret med 'SNU' nedenfor – er beskrevet på www.naturvidenskab.net.

Dansk Geofysisk Forening

Foredrag i foråret 2006 vil blive annonceret på hjemmesiden, www.gfy.ku.dk/~dgf. Foreningen kan kontaktes via e-mail på dgf@gfy.ku.dk eller kontaktadresserne på hjemmesiden.

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan.				
30/1	19.30	Plantefabrikker	<i>Birger Lindberg Møller</i>	SNU
Feb.				
6/2	19.15	Solens overflade	<i>Bertil Dorch</i>	AS (Kbh)
13/2	19.15	Solens overflade	<i>Bertil Dorch</i>	AS (Årh)
20/2	19.30	Byg en sund tilværelse	<i>John Nielsen</i>	SNU
27/2	19.15	Når dragen sluger Solen – optakt til solformørkelsen d. 29. marts 2006	<i>Bjørn Franck Jørgensen</i>	AS (Kbh)
Mar.				
6/3	19.15	Når dragen sluger Solen – optakt til solformørkelsen d. 29. marts 2006	<i>Bjørn Franck Jørgensen</i>	AS (Årh)
13/3	19.30	Modeller af liv	<i>Kim Sneppen</i>	SNU
20/3	19.15	Observationer af Solen: Seismologi og aktivitet	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Kbh)
Apr.				
3/4	19.15	Observationer af Solen: Seismologi og aktivitet	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Årh)
3/4	19.30	Satellitbaseret navigation	<i>Kai Borre</i>	SNU
24/4	19.15	Solens indre opbygning	<i>Jørgen Christensen-Dalsgaard</i>	AS (Kbh)
Maj				
8/5	19.15	Solens indre opbygning	<i>Jørgen Christensen-Dalsgaard</i>	AS (Årh)
8/5	19.30	Solvarme	<i>Simon Furbo</i>	SNU
15/5	19.15	Solen i udbrud	<i>Susanne Vennerstrøm</i>	AS (Kbh)
24/5	19.15	Solen i udbrud	<i>Susanne Vennerstrøm</i>	AS (Årh)

AS (KBH) = Auditoriet, Juliane Maries Vej 30, 2100 Kbh. Ø; **AS (Årh)** = Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygn. 530, Aud. D4, 8000 Århus C; **SNU** = Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K.

Man kan finde flere foredrag på følgende hjemmesider:

- *Ungdommens Naturvidenskabelige Forening*, København, Odense, Århus, Ålborg og Jels, www.unf.dk
- *Videnskabshistorisk Selskab*, H.C. Ørsted Instituttet, København, www.math.ku.dk/videnskabshistorie
- *Niels Bohr Arkivet*, Niels Bohr Institutet, København, www.nbi.dk/nba, under "Seminars"
- *Niels Bohr Institutet*, København, www.nbi.ku.dk, under "Kommende begivenheder"
- *Institut for Fysik og Astronomi*, Århus, www.phys.au.dk, under "Foredrag"
- *Fysisk Institut*, Syddansk Universitet, Odense, www.fysik.sdu.dk

Hvor står fusionsforskningen i dag?

Vagn O. Jensen, seniorkonsulent i Afdelingen for Optik og Plasmaforskning, Forskningscenter Risø

Fusionsforskningen har udviklet sig til et af menneskehedens største forskningsprojekter. Store resultater er opnået, men det må erkendes, at det vil tage op mod 40 år, før fusionsenergien kan bidrage væsentligt til dækning af det globale forbrug. I de kommende 10-15 år vil fusionsreaktoren ITER blive bygget i Frankrig og bane vejen for udnyttelsen af fusionsenergien.

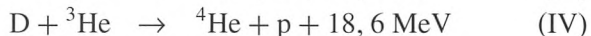
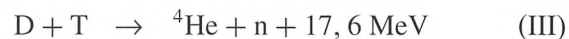
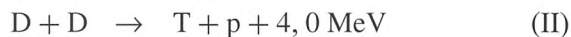
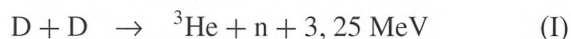
Når de fossile energikilder er opbrugte, eller når miljøhensyn forbyder fortsat stort brug af dem, så vil der blive stort behov for enten vedvarende kilder (se KVANT nr. 1, 2004), atomkraft eller kontrolleret fusion. Denne artikel er en statusrapport fra fusionsforskningen.

Først for ca. 75 år siden blev fysikere klar over, at de store energimængder, Solen udsender, stammer fra fusionsprocesser. I sin artikel *Modern Alchemy* i Scientific American, juni 1932 nævner W.D. Harkins muligheden for, at fusion vil kunne erstatte kul som energikilde, men han konkluderer, "*there is no indication at present that it will ever give a source of energy for industrial purpose under the conditions existent on earth.*"

Det var først i 1950'erne, at man begyndte at tro, at fusionsenergien kunne udvikles til en betydningsfuld energikilde. Mange lande gik i gang med fusionsforskning, og et omfattende internationalt samarbejde blev etableret. Optimismen var så stor, at den amerikanske fysiker M.N. Rosenbluth kunne afslutte sin tale ved den første konference om *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* i 1961 med ordene "*If I may make a statement from the heart, I believe that chances are very good that in twenty years or so mankind will have solved the problem of controlled fusion if only he has not lost in the meantime the far more difficult struggle against uncontrolled fusion.*"

Termonuklear fusion

Alle atomkerner med massetal op til ca. 50 kan udvikle energi ved fusion. De letteste afgiver op til omkring 5 MeV pr. nukleon, de tungere væsentligt mindre. I unge stjerner er det mest lette kerner, der fusionerer, medens det i ældre stjerner er tungere kerner, der står for energiproduktionen. De fusionsprocesser, der har mest interesse for fusionsforskningen, er:



D står for den tunge brintisotop, deuterium, med en proton og en neutron i kernen. T er den supertunge brintisotop, tritium, med én proton og to neutroner i kernen. p og n er hhv. en proton og en neutron. ${}^3\text{He}$

og ${}^4\text{He}$ er de to stabile heliumkerner med to protoner og hhv. én og to neutroner i kernen. ${}^4\text{He}$ kaldes også en α -partikel. Den dannede energi optræder som kinetisk energi på de to nye partikler, hver får en del, der er proportional med den anden partikels masse. F.eks. har neutronen i (III) 14,1 MeV, og α -partiklen 3,5 MeV.

Boks 1: Den globale fusionsforskning

Lige siden sin start i midten af 1950'erne har den internationale fusionsforskning været præget af stor åbenhed. Den lange tidshorisont og de mange komplicerede problemer, der skulle løses, gjorde det klart, at et tæt samarbejde ville være til alles fordel. Derfor er nye resultater blevet fremlagt og diskuteret åbent ved konferencer, og forskere fra forskellige lande har besøgt og hjulpet hinanden. Fra en beskedent start er det globale årsbudget for fusionsforskningen nu over 10 milliarder danske kroner. Hovedindsatsen har ligget i de fire områder: Europa (EU-landene og Schweiz), Japan, Rusland og USA. Gennem de senere år har også Kina og Sydkorea startet væsentlige programmer, bl.a. er de nu partnere i ITER-projektet. Det er interessant at sammenligne fusionsforskningens årsbudget på ca. 10 milliarder kr. med det beløb på ca. 20.000 milliarder kr. om året, som den samlede menneskehed bruger til energi. Det er altså ca. 0,05 % af de samlede energiudgifter, der går til forskning i denne potentielle nye energikilde.

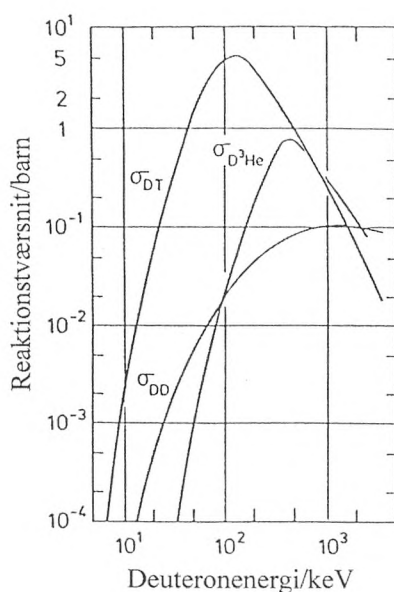
Den europæiske fusionsforskning er administreret og delvis betalt af EU, og den har i øjeblikket et årsbudget på noget over 3,5 milliarder kr. Hovedparten af arbejdet foregår på nationale laboratorier, som har associeringskontrakter med EU, som karakteristisk betaler 1/3 af omkostningerne. Ved siden af de nationale laboratorier udfører EU også fusionsforskning på egne laboratorier. JET er et fællesprojekt mellem EU og de lande, der er partnere i EU-programmet.

Fordelen ved den europæiske ordning er, dels at EU-bidraget støtter de nationale laboratoriers interesse for at forske i fusion, og dels at EU via sit bidrag har så megen indflydelse på de nationale programmer, at disse nu udgør et sammenhængende europæisk program, der dækker alle fusionsforskningens påtrængende problemer uden unødvendig overlappning. Ordningen har medført, at det europæiske program anses for at være effektivt og på mange områder førende i forhold til de andre landes programmer.

Risø's fusionsprogram er den danske partner i det europæiske program.

Der er tre grunde til, at de fire processer (I)-(IV) er mest interessante: 1) deres energiudbytte er relativt stort, 2) de forløber lettere end andre processer, og 3) brændstoffet til disse processer findes i store mængder.

For at fusionere må kernerne bringes meget tæt sammen ($\sim 2 \cdot 10^{-14}$ m). Da de har positiv elektrisk ladning, frastøder de hinanden med Coulomb-kræfter, så det er svært at få dem tæt sammen. Tværsnittene på figur 1 for processerne (I)-(IV) er målt ved at accelerere deuteroner til energier mellem 0,5 og 500 keV og skyde dem mod hvilende D-, T-, og ^3He -kerner. Da $\text{D} + \text{T}$ -processen har de største tværsnit, forløber den lettest og er derfor den mest interessante.



Figur 1. Tværsnit for udvalgte fusionsprocesser. (1 barn = 10^{-28} m²). σ_{DD} -kurven repræsenterer summen af de to lige store tværsnit for processerne (I) og (II).

Den mest nærliggende – men desværre urealistiske – måde at udvinde fusionsenergi på, ville være at accelerere deuteroner til ca. 100 keV og skyde dem mod et fast tritiumtarget. Men de fleste deuteroner vil tabe deres energi ved Coulomb-kollisioner med targetkernerne, så denne metode fører ikke til energigevinst.

Fusionsreaktorer vil komme til at arbejde efter det såkaldte termonukleare princip. I en termonuklear reaktor opvarmes en blanding af deuterium og tritium så meget, at partiklernes termiske hastigheder er store nok til at forårsage fusionsprocesser. Derfor skal en passende del af partiklerne have termiske energier omkring 100 keV, hvilket kræver temperaturer omkring 100 MK. I en så varm fusionsgas vil der også ske mange Coulomb-kollisioner med energiuudveksling mellem partiklerne. Men da kollisioner ikke fjerner energi fra gassen, sænker de ikke temperaturen og hindrer derfor ikke processerne. Ved disse høje temperaturer befinder brændstoffblandingen sig i plasmatilstanden

– hvor atomerne er slået i stykker i negativt ladede elektroner og positive kerner, der bevæger sig frit rundt.

Af tekniske grunde må reaktorkammeret i et fusionskraftværk forventes at producere en effekttæthed i samme størrelse som i ovnen i et almindeligt kraftværk, altså omkring 1 MW/m³. Effekttæthed i et fusionsplasma kan beregnes som funktion af temperatur og plasmatæthed ud fra tværsnittene på figur 1. Man finder, at tætheden i et plasma med en kinetisk temperatur¹, T_{kin} , på 10 keV, svarende til godt 100 MK, der producerer 1 MW/m³, skal være ca. 10^{20} ioner/m³. Det svarer til tætheden i et middelgodt vakuum. På grund af den høje temperatur er trykket alligevel relativt stort, omkring 3 atm.

Antænding og opretholdelse af fusionsforbrænding

Forløbet af processerne i en fusionsreaktor kommer til at minde om en almindelig forbrænding, hvor kulstof og ilt forbindes til CO₂. Forbrændingen i et kulstofkraftværk kræver også, at partiklerne kolliderer med en vis energi, omkring 1 eV, som jo er meget mindre end de ca. 100 keV, der kræves for fusion. Kollisionerne forårsages også af termiske bevægelser, men den nødvendige temperatur er kun få hundrede grader. Ved hver proces dannes der energi. Hvis tilstrækkeligt meget af denne energi afsættes i brændstoffet, kan den nødvendige temperatur opretholdes, og forbrændingen fortsætter af sig selv. Forbrændingen er antændt. Hvis der ikke afsættes tilstrækkelig energi i brændstoffet, eller hvis varmetabene er for store som f.eks., hvis brændstoffet er vådt, så vil forbrændingen gløde en vis tid og derefter gå ud. Forbrændingen kan så kun opretholdes, hvis der tilføres supplerende energi udefra, f.eks. fra en blæselampe. I et fusionsplasma er forholdene analoge, blot skal plasmaet holdes indesluttet i et magnetfelt (se senere). Da det kun er de i fusionsprocessen dannede α -partikler, der holdes indesluttet, er det kun de 20 % af fusionseffekten, som de bærer, der afsættes som varme i plasmaet. Neutronernes 80 % afsættes i afskærmningen omkring plasmaet.

For at vurdere, om antænding i et fusionsplasma kan opnås, eller hvor meget supplerende energi der skal tilføres plasmaet for at opretholde forbrændingen, må energitabene kendes. Et fusionsplasma taber energi på forskellige måder. Når en elektron, der farer rundt i sin termiske bevægelse, kommer nær en ion, udsættes den for en kraftig acceleration og udstråler derfor elektromagnetisk stråling i form af bremsestråling. Bremsestrålingstabene er uundgåelige; hvis de er de eneste tab fra et D+T-fusionsplasma, så kan vi opnå antænding i temperaturområdet mellem 50 MK og ca. 10 GK.

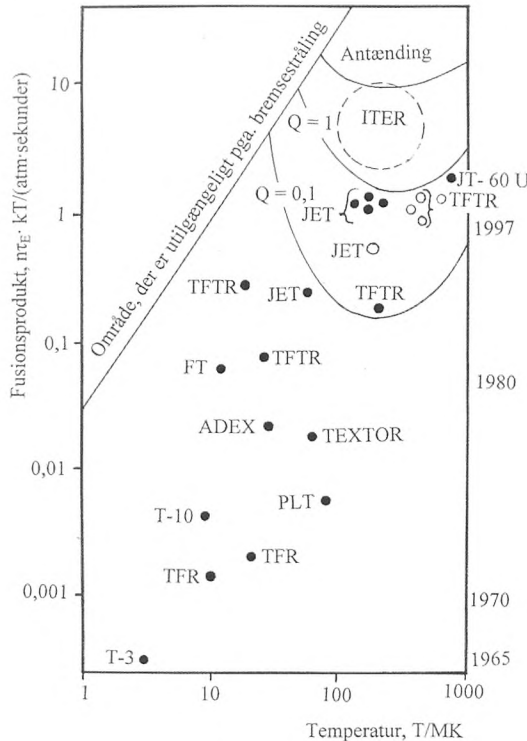
Et fusionsplasma i et magnetfelt vil imidlertid tabe energi på andre måder end ved bremsestråling. F.eks. kan ladede partikler diffundere gennem magnetfeltet og afgive deres energi til den omliggende beholder. Også konvektion og turbulens kan føre energi ud til væggene.

¹ Inden for fusionsforskningen måles temperaturer ofte i energienheder, idet $T_{\text{kin}} = kT$, hvor k er Boltzmanns konstant. $T_{\text{kin}} = 10$ keV svarer til $T = 116$ MK.

Energiforstærkningsfaktoren Q defineres som forholdet mellem den dannede fusionseffekttæthed, P_{fus} , og den effekttæthed, P_{eks} , der eksternt må tilføres plasmaet for at opretholde forbrændingen, altså

$$Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{eks}}. \quad (1)$$

For et antændt plasma er $Q = \infty$, idet $P_{\text{eks}} \rightarrow 0$ når der ikke er behov for tilførsel af eksternt energi. Situationen $Q = 1$ kaldes "break-even", da hele fusionseffekten skal føres tilbage i plasmaet for at holde det brændende.



Figur 2. Udviklingen i opnåede resultater for temperaturer og fusionsprodukter i fusionseksperimenter gennem de sidste 40 år. Ved de enkelte punkter er angivet, i hvilket eksperiment resultatet er opnået. De lukkede punkter, hvoraf de fleste ligger nederst til venstre, er opnået i deuteriumplasmaer og har derfor ikke givet nævneværdige fusionsreaktioner. De åbne cirkler øverst til højre er opnået i D+T-plasmaer, og det er dem, der har givet de op til 16 MW fusionseffekt. Årstallene til højre antyder, hvornår de forskellige resultater er opnået. Cirklen over ITER viser, hvor ITER er designet til at arbejde.

I figur 2 er indtegnet forskellige Q -værdier i et diagram over tidligere fusionseksperimenter med det såkaldte fusionsprodukt, $n_T \cdot kT$ – her målt i atm · sekunder – som funktion af temperaturen.

Hvis vi kun medregner bremsestrålingstabene for et 10 keV fusionsplasma med $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, så er energiindeslutningstiden $\tau_E \approx 10 \text{ sek}$, som altså er den absolut længste tid, der kan opnås. Hittidige forsøg har vist, at det er svært at opnå blot ét sekund.

For at opnå et antændt fusionsplasma skal man kunne opvarme det til over 100 MK og holde det så effektivt indesluttet, at fusionsproduktet ligger tæt ved 10 atm · sekunder. Man skal opnå eksperimentelle

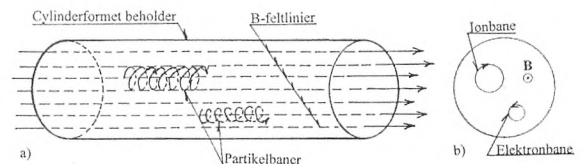
værdier, der ligger over kurven mærket "Antænding". For at opnå en forstærkning af den energi, man udefra tilfører plasmaet, skal man ligge mellem de to kurver, "Antænding" og " $Q = 1$ ". Jo nærmere man ligger på Antænding, jo større er forstærkningsfaktoren Q . De uundgåelige bremsestrålingstab gør det umuligt at opnå værdier over "Område, der er utilgængeligt pga. bremsestråling". De to betingelser om henholdsvis høj temperatur og højt fusionsprodukt, der skal tilfredsstilles for at få en brugbar energigevinst fra et fusionsplasma, kaldes Lawson-kriteriet.

Magnetisk indeslutning

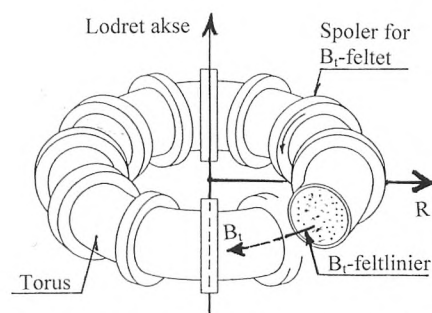
Muligheden for at holde et fusionsplasma indesluttet i et magnetfelt beror på, at det består af elektrisk ladede partikler. En ladet partikel, der bevæger sig i et homogent magnetisk $\mathbf{B}$ -felt, følger en skrueformet bane, hvis akse er parallel med de rette magnetfeltlinier. I sin bevægelse vinkelret på feltlinierne følger en partikel med massen m , ladningen q og hastigheden $v_{\perp}$ en cirkelformet bane med radius

$$\rho = mv_{\perp}/qB. \quad (2)$$

På figur 3 er vist en cylinderformet beholder med akse parallel med feltlinierne, som så skærer endevæggene. Det ses, at partiklerne midt i beholderen holdes borte fra sidevæggen, medens de i deres bevægelse langs feltlinierne rammer endevæggene. Da væggene i en beholder i et homogent magnetfelt nødvendigvis må skæres af feltlinierne, er et homogent felt ikke løsningen for magnetisk indeslutning af et fusionsplasma.



Figur 3. a) I et homogent magnetfelt bevæger ladede partikler sig i skrueformede baner langs feltlinierne. b) Set mod feltlinierne roterer ionerne med uret og elektronerne mod uret.



Figur 4. Magnetfeltet i en simpel torus. Feltlinierne er vandretliggende cirkler med deres centre liggende på den lodrette akse.

En nærliggende løsning er at bøje cylinderen sammen til en lukket ring, en torus, som på figur 4. Magnetfeltlinierne løber som lukkede cirkler rundt i den

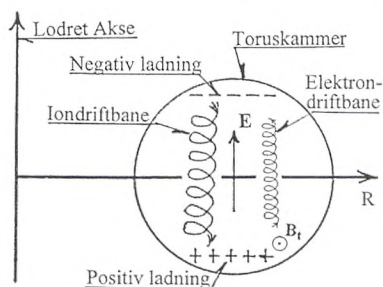
toroidale retning, og feltet kaldes derfor et B_t -felt. Da feltlinierne ikke skærer væggene, vil vi forvente, at et ringformet plasma i torus vil kunne holdes indesluttet i dette felt. Forsøg allerede i slutningen af 1950'erne viste, at det ikke er tilfældet. Plasmaringen, som har en iboende tendens til at udvide sig, finder en måde at bevæge sig gennem B_t -feltet ud mod væggen. Simple fysiske argumenter skal nu vise, at denne bevægelse må ventes, og hvilke ændringer i feltet, der må forventes at afhjælpe problemet.

Den væsentligste grund til, at ringen kan udvide sig, er, at B_t -feltet er inhomogent og aftager med afstanden R fra midteraksen. Det er dannet af strømmen i de toroidale spoler og givet ved

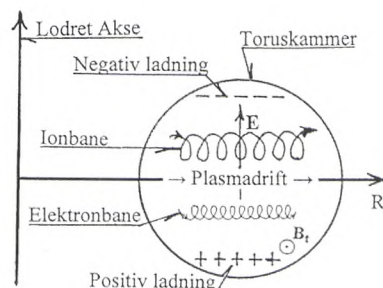
$$B_t = \mu_o I / 2\pi R. \quad (3)$$

I er summen af strømmene i spolerne, μ_o er vakuumpermeabiliteten, og R er afstanden fra den lodrette akse til et punkt i torus. $R = R_o$ midt i plasmaringen.

Betrager vi en ladet partikel i et plan, som indeholder den lodrette midterakse, og som følger partiklen rundt i den toroidale retning, forløber dens bane som vist på figur 5. Banen for en positiv ion, der roterer med uret, vil ifølge (2) have en større krumningsradius, når den er langt fra den lodrette midterakse, og en mindre krumningsradius, når den er nær denne akse. Derfor driver alle ioner nedad, hvorved der dannes positiv rumladning nederst i plasmaringen. Elektronerne, der roterer mod uret, har også større krumningsradier, når de er fjernest fra den lodrette akse, og de driver derfor opad, hvorved der dannes negativ rumladning øverst i plasmaringen. Resultatet er, at der opstår et opadrettet elektrisk E-felt fra den positive til den negative rumladning.



Figur 5. Driftbevægelser i et lodret snit gennem et simpelt toroidalt felt med feltlinierne pegende ud fra papirets plan.



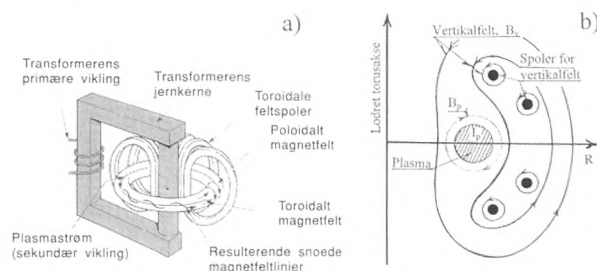
Figur 6. Driftbevægelser, der skyldes det opbyggede elektriske felt, i et lodret snit gennem et simpelt toroidalt felt.

Figur 6 viser dette E-felts virkning på partiklerne. Feltet påvirker de positive partikler opad, så de bevæger sig hurtigere øverst i deres baner og langsommere nederst. Ifølge (2) har de derfor større krumningsradius øverst i banerne end nederst, og de driver udad. Elektronerne påvirkes nedad af det elektriske felt, og de vil derfor have deres største hastigheder og dermed de største krumningsradier, når de er nederst i banen. Det betyder, at også de vil drive udad i R -retningen. Plasmaet er ikke i ligevægt. Det driver samlet ud i det svage magnetfelt og rammer torusvæggen.

Tokamakken

Ovenfor så vi, hvordan et plasma i et inhomogent magnetfelt finder en måde at bevæge sig vinkelret på feltlinierne ud i det svagere felt. Generelt vil et plasma kun kunne holdes indesluttet og være i ligevægt i et magnetfelt, hvis feltstyrken vokser i alle retninger bort fra plasmaet, dvs. hvis plasmaet befinder sig i en såkaldt "magnetisk dal". Sådanne felter kan opnås på forskellige måder i toroidale konfigurationer. Tokamakken er en russisk idé fra 1960'erne med denne egenskab.

I en tokamak opnås den ønskede feltkonfiguration ved at addere yderligere to felter til det rent toroidale felt, som det fremgår af principtegningen på figur 7. På a) ses en række toroidalfeltspoler, der er lagt om en torusformet beholder, som for overskuelighedens skyld ikke er vist. Disse spoler genererer B_t -feltet med sine cirkelformede feltlinier. Plasmaet ligger som en lukket ring i torus og udgør sekundærviklingen på en transformer, hvis jernkerne er stukket ned gennem torus. En strøm gennem primærviklingen genererer en plasmastrøm, I_p , som løber i den toroidale retning. I_p genererer et polært magnetfelt, B_p , hvis feltlinier løber rundt om plasmaringen i lukkede kurver. Summen af B_t - og B_p -felterne er et felt, hvis feltlinier snor sig som skruelinier rundt i plasmaet. Feltstyrken i denne konfiguration har stadig den egenskab, at feltet svækkes i R -retningen, og den kan derfor heller ikke holde plasmaet indesluttet.



Figur 7. Tokamakprincippet. a) Hovedprincippet: Plasmaringen udgør sekundærviklingen i en transformer. Spolerne for det vertikale felt er ikke vist her. b) Magnetfeltforløbet i et lodret snit. Her vises fire vertikalfeltspoler.

For at opnå, at den magnetiske feltstyrke også vokser fra plasmaringens midterlinie ved $R = R_o$ ud mod større R -værdier, er der indlagt nogle vertikalfeltspoler, som ikke er vist på a). b) viser et lodret snit gennem torusaksen. Plasmaringens tværsnit har centrum ved

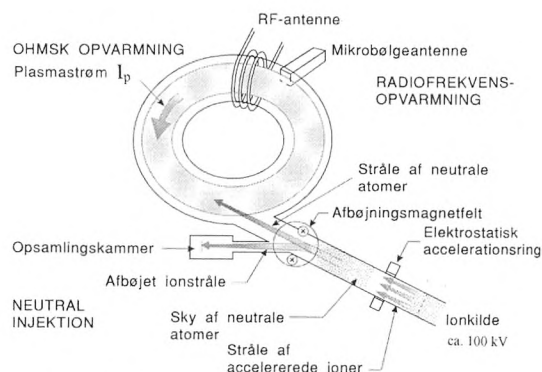
$R = R_0$, og plasmastrømmen løber ind i papirets plan. De poloidale feltlinier løber rundt om plasmaringen, opad på indersiden og nedad på ydersiden. På b) vises også fire vertikalfeltspoler, der ligger som vandrette ringe symmetrisk om den lodrette akse. Disse spoler fører strømme i modsat retning af I_p , altså ud fra papirets plan, og de genererer et vertikalt magnetfelt, B_v , med nyreformede feltlinier, der løber ned gennem plasmaet. På indersiden af plasmaringen for $R < R_0$ er B_p og B_v modsatrettede, så deres resulterende felt bliver svagere her. På ydersiden for $R > R_0$, hvor begge felter er nedadrettet, bliver det resulterende felt stærkt. Enten vi bevæger os udad eller indad fra R_0 , vil det resulterende felt vokse. Plasmaet ligger i en magnetisk dal og kan holdes indesluttet.

At et plasma befinder sig i en magnetisk dal, er imidlertid kun en nødvendig men ikke tilstrækkelig betingelse for, at det holdes indesluttet. I plasmaer i magnetfelter er der stærke tendenser til, at der opstår instabiliteter, som ødelægger eller nedsætter indeslutningen. Instabiliteter kan have form af bølger på overfladen, som vokser sig så store, at plasmaet rammer væggen. Der kan også opstå mikroinstabiliteter, hvor meget kortbølgede og hurtige svingninger vokser sig store og ryster plasmaet, så dets partikler og dermed energi hurtigt diffunderer ud til væggene. Hovedindsatsen gennem de sidste 50 års fusionsforskning har ligget på at konstruere de bedst mulige magnetfelter, både hvad angår ligevægt i magnetiske dale og undertrykkelse af de forskellige instabiliteter. De første tokamakeksperimenter omkring 1970 viste, at ligevægt kunne opnås, men at instabiliteter forhindrede tilstrækkelig indeslutning til blot at nærme sig Lawson-kriteriets krav. Større og mere komplicerede eksperimenter gennem de sidste 30 år har opnået bedre og bedre resultater i retning af at kunne opfylde dette krav.

De tangenter, man har at spille på, er først og fremmest plasmavolumenet. Energiindholdet i plasmaet er E_{kin} ganget med volumenet, altså proportionalt med den lineære målestok i tredje potens, medens de samlede tab er proportionale med overfladearealet, altså med målestokken i anden potens. Vi forventer derfor at opnå højere τ_E -værdier blot ved at forøge plasmavolumenet, hvilket også er eksperimentelt påvist. Andre parametre, der har indflydelse på energiindeslutningen, er plasmatværsnittets form, plasmastrømmens størrelse og fordeling over tværsnittet, det relative forhold mellem magnetfeltets tre komponenter o.m.a. De resultater, der er opnået, repræsenterer et langt og intenst samarbejde mellem teoretikere og eksperimentalfysikere fra mange lande.

Opvarmning af fusionsplasma

Som nævnt skal et fusionsplasma opvarmes til 100 MK, før processerne går rigtigt i gang, og det kan være nødvendigt med supplerende opvarmning for at opretholde forbrændingen. De tre mest benyttede metoder til opvarmning af tokamakplasmaer ses på figur 8.



Figur 8. De tre mest anvendte metoder til opvarmning af et plasma i tokamakker er *Ohmsk Opvarmning*, *Højfrekvensopvarmning* og *Neutral Injektion*.

Boks 2: Tre metoder til opvarmning af plasma

Ohmsk Opvarmning. Denne metode udnytter, at plasmastrømmen I_p afsætter en varmeeffekt i plasmaet, som er givet ved produktet af plasmaets specifikke modstand og I_p^2 . Da den specifikke modstand falder med temperaturen, afsættes der mindre og mindre effekt, efterhånden som temperaturen stiger. Dette kan ikke kompenseres ved at forøge I_p , da det vil medføre instabiliteter, der ødelægger indeslutningen. I praksis kan man kun opnå ca. 10 MK ved Ohmsk opvarmning. Der er derfor brug for mindst én af de andre metoder til supplerende opvarmning.

Højfrekvensopvarmning. Denne metode udnytter, at de ladede plasmapartikler roterer omkring magnetfeltlinierne med frekvenser, der afhænger af feltstyrken og af partiklernes masse. Elektronerne roterer hurtigt, ioner langsommere. Hvis plasmaet bestråles med elektromagnetiske bølger, hvis frekvens er i resonans med partiklernes rotationsfrekvens, absorberer det energi fra bølgen og opvarmes. I karakteristiske eksperimenter er radiobølger i frekvensområdet 10-100 MHz i resonans med ionerne. Mikrobølger i området 20-200 GHz er i resonans med elektronerne. Højfrekvensopvarmning er en meget benyttet metode, f.eks. er JET udstyret med højfrekvensudstyr, der kan levere ca. 25 MW til plasmaet. JET, som er verdens største tokamak, er et fællesprojekt under det europæiske fusionsprogram, som ligger nær Oxford i England.

Neutral Injektion. Her opvarmes plasmaet ved, at det bombarderes udefra med meget hurtige, energirige neutrale partikler. Partiklerne skal være elektrisk neutrale for at trænge gennem magnetfeltet og ind i plasmaet. I plasmaet ioniseres de ved stød mod plasmaets partikler og indfanges dermed i magnetfeltet. I efterfølgende stød afgiver de deres energi til plasmaet, som opvarmes. Strålen af hurtige neutrale partikler opnås som vist på figur 8. Ionkilden er fyldt med en gas af de partikler, f.eks. deuteroner, der ønskes i strålen. I ionkilden dannes positive ioner af den slags, f.eks. deuteroner, som ønskes i strålen. De trænger ud i et rør, hvor de accelereres elektrostatisk til ca. 100 keV. De fleste ioner indfanger en elektron i en sky af neutrale atomer og kan så fortsætte ind i plasmaet. Et afbøjningsmagnetfelt bøjer de resterende ioner ud i et opsamlingskammer. Neutral Injektion er meget effektiv. JET er forsynet med opvarmningsenheder, der kan afsætte op mod 25 MW varmeeffekt i plasmaet.

Boks 3: Risøs fusionsforskning

Allerede ved sin start i 1958 oprettede Risø en lille gruppe, der skulle holde sig orienteret om og selv yde bidrag til den internationale fusionsforskning. De første arbejder var beregninger af reaktionshastigheder og energibalancer i fusionsplasmaer. Omkring 1960 blev interessen rettet mod bølgefænomener i plasmaer, og der blev bygget et eksperiment til studier af kolliderende chokbølger, som senere blev suppleret med et roterende plasmaeksperiment. Hen mod midten af 1960'erne forlod to førende medlemmer af gruppen Risø, og hele gruppens fortsatte eksistens blev taget op til vurdering. Det blev besluttet at forstærke indsatsen, og der blev ansat en udenlandsk seniorplasmafysiker, som bragte nyt liv i gruppen bl.a. ved at initiere opbygningen af Risøs Q -maskine. En Q -maskine er et eksperiment med en rolig (Q står for quiescent) plasmasøjle, der holdes indesluttet i et magnetfelt, og som er særdeles velegnet til studier af bølgefænomener og instabiliteter i plasmaer.

Med Danmarks indtræden i EF i 1973 blev Risøs fusionsforskning tilsluttet det fælleseuropæiske fusionsprogram gennem en associeringskontrakt mellem Risø og EFs fusionsprogram, og arbejdet blev indpasset i dette store program.

Gruppen blev opfordret til at udvikle systemer, der kunne accelerere frosne brændstoffer af deuterium til så høje hastigheder, at de kunne trænge ind i et fusionsplasma. Dette arbejde førte i løbet af 1980'erne til konstruktion af injektorer, der kunne accelerere piller til hastigheder op mod 2 km/s. Risøs pilleinjektorer bruges stadig i flere eksperimenter inden for det europæiske program.

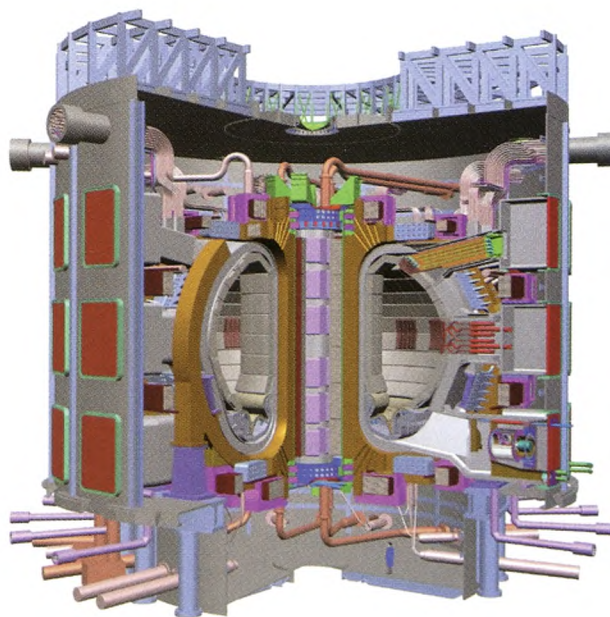
I slutningen af 1970'erne indgik Risøgruppen en kontrakt med JET om, at den skulle opbygge et måleudstyr baseret på Thomsonspreddning til måling af temperaturen i JET-plasmaet. Udstyret blev leveret, og den Risø-medarbejder, der havde stået for opbygningen, flyttede til JET for at benytte udstyret.

Omkring 1990 gennemførte Risø en større omstrukturering, som medførte en beslutning om at nedtrappe fusionsforskningen. Arbejdet med Q -maskinen og med udvikling af pilleinjektorer blev opgivet. Kun en mindre indsats inden for teoretiske studier af plasmaindeslutning blev opretholdt. Samtidigt blev en del af Risøs arbejde med neutronstrålingsbeskadigelse af materialer, der skal indgå i strukturen omkring et fusionsplasma, lagt under associeringen. Gennem de sidste ca. 5 år har Risøs interesse for fusionsforskning igen været stigende, og gruppen har haft muligheder for visse udvidelser, således at den nu består af ca. 15 forskere med et årsbudget på godt 20 millioner kr. Programmet har tre hovedelementer:

1. En fortsættelse af de teoretiske studier af instabiliteter i magnetisk indesluttede plasmaer, som nedsætter indeslutningseffektiviteten. Dette arbejde udføres i tæt samarbejde med andre europæiske laboratorier, bl.a. med JET.
2. Udvikling af et CTS-udstyr (Collective Thomson Scattering) til måling af ioners, bl.a. α -partiklers, hastighedsfordeling i fusionsplasmaer. Sådanne målinger kan få stor betydning for studiet af magnetisk indeslutning af brændende plasmaer som f.eks. i ITER. Gruppen udfører allerede målinger på store eksperimenter i andre europæiske laboratorier, og den er leder af planlægningen af et CTS-udstyr for ITER.
3. Arbejdet med neutronbestråling af materialer til reaktorstrukturer er under nedtrapping.

Forskningens status og planer, ITER

Figur 2, der viser betingelserne for at opfylde Lawson-kriteriet, viser også udviklingen i opnåede resultater. Omkring 1980 var der kun opnået temperaturer på ca. 10 MK og fusionsprodukter, der var tre størrelsesordener under kravet for antænding. Ved brug af de nye opvarmningsmetoder, først og fremmest neutral injektion, nåede man midt i 1980'erne de 100 MK. Udviklingen i de opnåede fusionsprodukter har været jævn, og med de nyeste resultater, fra bl.a. JET, ligger vi nu tæt ved break-even. Denne markante udvikling svarer til en fordobling af indeslutningseffektiviteten hvert 1,5 år siden 1970. I slutningen af 1980'erne havde fusionsforskerne samlet viden nok til, at de kunne designe og derefter bygge en tokamak med en opretholdt forbrænding med en Q -værdi på mindst 10. På initiativ af USAs præsident Reagan og USSR's Gorbatsjov i 1985 blev der i 1992 nedsat en forskergruppe med medlemmer fra EU, Japan, USA og USSR, som skulle designe en sådan tokamak, som fik navnet ITER. ITER er akronym for International Thermonuclear Eksperimental Reactor; men det betyder 'vej' på latin, så ITER er vejen til fusionsenergien.



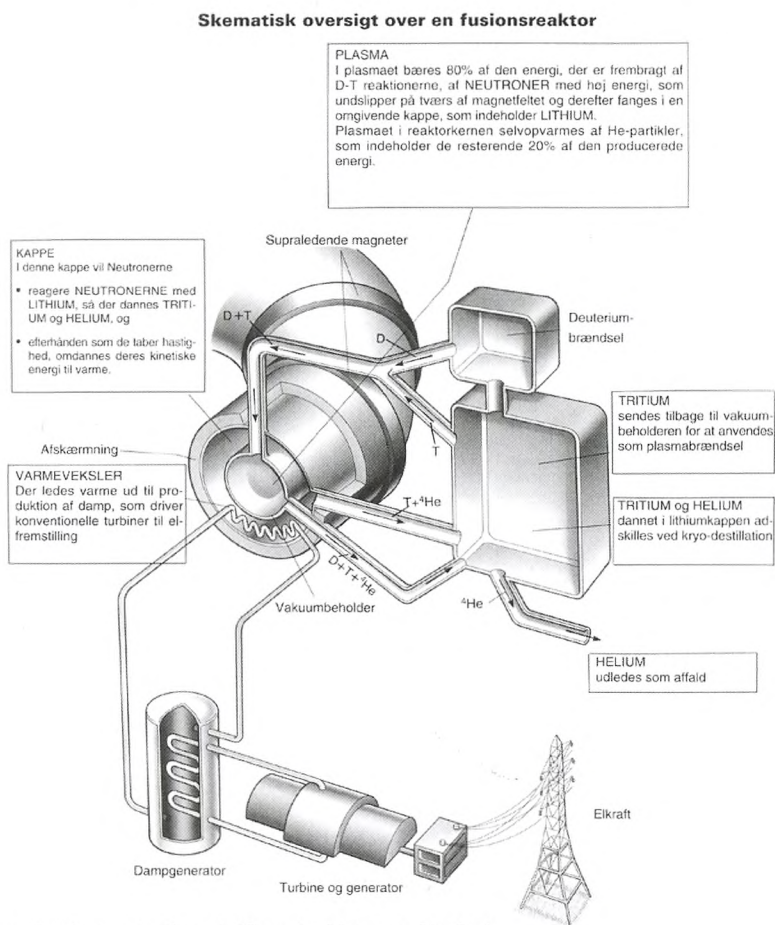
Figur 9. Cut-away tegning af ITER – bemærk størrelsen af den blå mand nederst i billedet (www.iter.org).

Resultatet forelå i 2001 i form af et design, der er beregnet til at kunne bygges for ca. 35 milliarder danske kroner i løbet af ca. 10 år. ITER vil producere en fusionseffekt på ca. 500 MW i 400 sekunder lange pulser. Plasmaet antændes ikke, men forbrændingen opretholdes ved, at ca. 10 % af den producerede energi føres tilbage i plasmaet. ITER vil få en 20 år lang udnyttelsesperiode. De første 10 år går til hovedformålet: at studere og forbedre magnetisk indeslutning af plasmaer, hvori der produceres en betragtelig fusionseffekt. De sidste 10 år tænkes brugt til at studere og udvikle materialer, der skal indgå i fusionsreaktorer, hvor de udsættes for kraftig neutron- og varmebestråling. Totaludgifterne i udnyttelsesperioden anslås til godt 40 milliarder danske kr.

En kritisk vurdering i medlemslandene, som nu var suppleret med Kina og Sydkorea, konkluderede i december 2003, at ITER var et sundt og velgennemtænkt design, som man ville bygge. Man kunne imidlertid

ikke opnå enighed om placeringen af ITER. Japan og EU foreslog hver sit lokale byggested. Først i slutningen af juni 2005 enedes man om, at ITER skulle bygges i Cadarache i Frankrig. Samtidig vedtog man en fordelingsnøgle for udgifterne og den overordnede administrative ledelse af projektet, samt at andre interesserede lande skulle inviteres til at deltage.

Da ITER er en forsøgsopstilling, vil dens fusions-effekt ikke blive udnyttet. Under forudsætning af, at ITER bygges efter planerne, regner man med, at der vil kunne bygges et demonstrationsværk, DEMO, i perioden 2025-35, hvis fusionseffekt vil blive udnyttet, og som skal demonstrere, at der er fundet løsninger på alle fysiske og tekniske problemer. Planen er så, at de første kommercielle kraftværker står klar omkring år 2050. Hvis de politiske beslutningstagere, industrien og de store energiforsyningsselskaber virkelig vil satse på en hurtig udvikling, kan de første kraftværker måske fremmes med ca. 10 år i forhold til nævnte plan.



Figur 10. Principtegning af et fusionskraftværk (figur fra Naturens Verden).

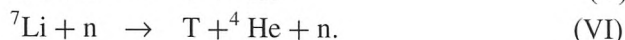
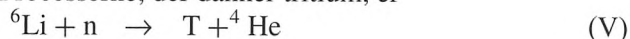
Fusionskraftværket

Figur 10 viser princippet i et fusionskraftværk baseret på tokamakkonceptet. Det minder om et konventionelt kraftværk, hvor blot ovnen er erstattet af fusionsreaktoren. Det brændende plasma ligger som en lukket ring i den toroidale reaktorbeholder, som er omgivet af superledende magnetfeltspoler, der holder plasmaet in-

desluttet. Plasmaet tilføres frisk brændstof ved injektion af deuterium og tritium.

Deuterium udvindes af vand, som indeholder så store mængder, at der i havene er deuterium nok til at dække det globale energiforbrug i milliarder af år. Tritium findes ikke i naturen, men det vil blive

dannet i selve reaktoren ved at lade neutronerne fra fusionsprocessen blive indfanget i grundstoffet litium, som indgår i afskærmningen omkring plasmaet. Processerne, der danner tritium, er



Af litiumforekomsterne i naturen vil der kunne dannes tritium nok til at dække energiforbruget i millioner af år. Det tritium og helium, der dannes i afskærmningen, pumpes ud i en beholder, hvor tritiummet separeres, hvorefter det kan sendes ind i plasmaet som brændstof. Den dannede fusionsenergi afsættes i afskærmningen omkring plasmaet og føres via et kølesystem til en varmeveksler, hvori der dannes damp, der via en konventionel turbine trækker en el-generator.

Man regner med, at økonomiske fusionskraftværker kun vil kunne bygges i ret store enheder på over 1 GW_{el}. 10-15 fusionsværker vil altså kunne dække Danmarks samlede energiforbrug.

Fusionskraftværker forventes at kunne producere energi til priser, der kun er lidt højere end for el fra fossile energikilder. Priserne vil være på niveau med energi fra mange vedvarende kilder.

Al energiproduktion påvirker miljøet; og det vil fusionsenergien også. Fusionsprocesserne medfører dannelse af radioaktivitet, hvoraf hovedparten skyldes neutronerne, som gør materialet i afskærmningen radioaktivt. Reaktorbygningen vil blive så radioaktiv, at ingen kan opholde sig i den. Vedligeholdelse og komponentudskiftning skal derfor udføres ved hjælp af robotter.

Under almindelig drift er der intet radioaktivt eller andet forurenende udslip fra et fusionsværk. Der er ingen risiko for ødelæggende eksplosioner i værket. Skulle noget gå skævt, afkøles plasmaet automatisk, så processerne går i stå. Fusionsprocesserne kan ikke løbe løbsk.

Skulle et fusionskraftværk blive udsat for ødelæggende påvirkning i form af jordskælv, flystyrt eller sabotage, kan radioaktivt materiale blive spredt. Beregninger viser imidlertid, at sådanne hændelser ikke vil nødvendiggøre evakuering af befolkningen uden for kraftværkets område.

Deponering af radioaktivt materiale fra brugte reaktorkomponenter bliver heller ikke et stort problem. I sammenligning med fissionsværker danner fusionsværket væsentligt mindre radioaktivitet, og den henfalder så hurtigt, at den efter 50 år er nede på samme niveau som radioaktiviteten i asken fra kulfyrede værker.

Et fremtidigt samfund med fusion som hovedenergikilde vil få et forbrugsmønster, der er meget forskelligt fra det nuværende. Da fusionsenergien optræder som varme i afskærmningen omkring plasmaet, er der visse begrænsninger på, hvordan den kan udnyttes. Den er mest egnet til el-produktion i store kraftværker, men man kan dog også tænke sig at udnytte spildvarmen til opvarmning af huse som i kraftvarmeværker. Ligesom for mange af de vedvarende energikilders vedkommende vil et samfund, hvis hovedenergikilde er fusion,

i stor udstrækning bruge el som sekundær energikilde. Opvarmning og afkøling af huse vil være baseret på el. Produktion i industri og landbrug samt transport vil også i størst muligt omfang benytte el. Inden for visse dele af transportsektoren, især i biler, fly og skibe, er det ikke muligt at benytte el som sekundær energikilde. Her er der behov for at medbringe drivmidler, der kan bevæge fartøjet over lange afstande. I øjeblikket benyttes de fossile energikilder til disse formål, men man kan let forestille sig, at der fremstilles syntetiske drivmidler, som f.eks. brint, vha. energi fra fusionskraftværker.

Konklusioner

Der er en meget stor sandsynlighed for, at resultaterne fra ITER, der er vedtaget medio 2005, vil sætte forskerne i stand til at bygge de første fusionskraftværker i løbet af en menneskealder. Hvis det lykkes, har menneskeheden en ny energikilde med store potentialer og fordele:

- Brændstofferne deuterium og litium findes i store mængder fordelt over hele kloden.
- Under almindelig drift udsender et fusionskraftværk ingen miljøskadelige stoffer.
- Fusionskraftværker er sikre i den forstand, at selv de værst tænkelige uheld ikke medfører behov for evakuering uden for kraftværksområdet.
- Den radioaktivitet, der dannes, er relativt lille, og den har så korte henfaldstider, at deponeringen bliver et begrænset problem.
- Prisen for fusionsenergi vil ligge på samme niveau som prisen for energi fra de fleste vedvarende kilder og kun lidt over de nuværende priser.

På RISØs websider om fusion [1], kan man læse videre om Fusionsenergi, Det Europæiske fusionsprogram, ITER og Fusionsforskning på RISØ. Her findes også links til andre websider og til en 65-siders lærebog skrevet på gymnasieniveau [2].

Litteratur

- [1] RISØs websider om fusion, www.risoe.dk/fusion
- [2] Vagn O. Jensen (2001), FUSIONSENERGI – Fremtidens dominerende energikilde? (kan downloades via www.risoe.dk/fusion/dk/info).



Vagn O. Jensen, dr. phil., har arbejdet i Risøs fusionssektion siden 1958, nu som senior-konsulent. Han har i mere end 25 år, som ekstern lektor, undervist i fusionsplasmafysik på DTU.

Vild med lys

Poul M. Hansen, Tabita W. Madsen og Lene B. Oddershede, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Mennesket har til alle tider været fascineret af lys, og med god grund, idet lyset (eller Solens stråling) er en nødvendighed for livet på Jorden. Vi er gradvist blevet bedre til at forstå, udnytte og sågar skabe lys hvilket laseren er et strålende eksempel på. I alle aspekter af dagligdagen, og også i forskningen indgår lys, og talrige videnskabsfolk har viet deres liv til at forske i lysets hemmeligheder. I denne artikel beskrives hvordan man i dag kan bruge lysets kraft til at manipulere objekter på mikroskopisk skala, samt hvilke fantastiske anvendelser af lysmanipulation man kan forestille sig på større skala i en ikke så fjern fremtid.



Figur 1. Én af de første, der opdagede, at lys havde mekaniske egenskaber var Johannes Kepler, som studerede himlen og formulerede begrebet 'strålingstryk' idet han foreslog, at lys kunne skubbe legemer, se boks 1. Kepler opdagede, at kometer altid peger væk fra Solen pga. strålingstrykket fra sollyset (venstre). En anvendelse af denne effekt er solsejl (højre), der fastspændt på en satellit kan bruges til at skabe fremdrift.

Også i den moderne biologiske fysik, hvor fokus er på en kvantitativ forståelse af biologiske systemer, anvendes lys. Et klassisk eksempel er mikroskopet, hvor mærkning med fluorescente molekyler sågar har muliggjort visualisering af enkelte molekyler. Optiske pincetter er en anden teknik, der udnytter lys, idet en kraftigt fokuseret laserstråle bruges til at fastholde og manipulere objekter, som har et brydningsindeks, der er anderledes end omgivelsernes. Den kraft, F , en optisk pincet udøver på sine omgivelser er harmonisk:

$$F = -\kappa(x - x_0). \quad (1)$$

Her er x afstanden til ligevægtspositionen x_0 , og κ er en fjederkonstant, som karakteriserer den optiske pincets stivhed. Flere detaljer om optiske pincetter kan findes i et tidligere nummer af KVANT [1]. Ved at anvende passende detektionssystemer kan man endvidere bruge laserlyset til at foretage målinger af sammenhængende værdier af kræfter og afstande med sub-pico-Newton og nanometers præcision.

Lys som intracellulær kraftmåler

En af de fantastiske anvendelser af optiske pincetter har været i studiet af naturens mindste maskiner, de

molekylære motorer, som er ansvarlige for livsvigtige processer indeni levende celler, se boks 2. Det utrolige er, at optiske pincetter er i stand til at følge de molekulære maskiner mens de arbejder, og desuden at påvirke dem med kræfter for at iagttage deres respons og finde ud af f.eks. hvor stærke maskinerne er.

Det er en udfordring at studere enkelte biologiske molekyler i deres naturlige omgivelser, f.eks. indeni en levende celle. De fleste studier hidtil af enkeltmolekyl-motorer har været gjort *in vitro* (i et reagensglas). '*In vitro*' studier kritiseres ofte fra biologers side, idet de beskyldes for at være for langt fra systemets opførsel *in vivo* (i naturlige omgivelser). I fysik forsøger vi konstant at simplificere problemer og have så få parametre som muligt, og da den levende celle er uhyre kompleks, er det ikke trivielt at studere enkelt molekyler deri. I optisk pincet-gruppen på Niels Bohr Institutet søger vi at gå *in vivo* vejen og studerer levende celler på enkeltmolekyle- og enkeltcelle-niveau med optiske pincetter [1, 2]. For at få et 'håndtag' på biomolekylerne, microinjiceres nanoskopiske guldkugler, som hæftes fast på udvalgte biomolekyler inde i cellen. Den optiske pincet kan så fange disse guldkugler [3], der bruges som en intracellulære kraftmålere.

Boks 1: Strålingstryk

At lys direkte kan bruges til at udføre mekanisk arbejde blev opdaget i 1600-tallet af Johannes Kepler, som bemærkede, at komethalerne altid pegede væk fra Solen (se venstre del af figur 1) og derfor konkluderede, at der måtte findes en slags solvind. I dag ved vi, at denne solvind skyldes fotoner, som kan overføre deres impuls og dermed udføre mekanisk arbejde. Dette princip kan anvendes til solsejl, som er en kæmpe reflekterende overflade fastspændt på satellitter, se højre del af figur 1. Når sollysets fotoner rammer sejlet reflekteres de og overfører dermed deres impuls til solsejl og satellit, som dermed bevæger sig væk fra Solen. Størrelsen af impulsen af en enkelt foton er givet ved

$$|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

hvor $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js er Plancks konstant og λ er lysets bølgelængde. Den samlede effekt $\mathcal{P}$ af lyset er energien af en enkelt foton, $E = \frac{hc}{\lambda}$ (c er lysets hastighed), gange antallet af fotoner pr. tid, n :

$$\mathcal{P} = \frac{nhc}{\lambda} \quad (3)$$

Ved at sammenholde ligning 2 og 3 fås $|\vec{p}| = \frac{\mathcal{P}}{cn}$. Den kraft, som lyset udfører, F_{lys} , er defineret ved $\vec{F}_{lys} = \frac{d\vec{P}_{tot}}{dt}$, hvor $\vec{P}_{tot}$ er den totale impuls. Bemærk, at $|\vec{P}_{tot}| = n|\vec{p}|dt$, hvor dt er det lille tidsinterval, som betragtes. Lad os tage et eksempel, hvor en laser stråler med effekt $\mathcal{P}$ vinkelret på et spejl, og reflekteres direkte tilbage. Ændringen i fotonflux er da $2\mathcal{P}$ og den kraft, som lyset udøver på spejlet, bliver

$$F_{lys} = \frac{2\mathcal{P}}{c}. \quad (4)$$

I 2002 meddelte NASA, at de ville undersøge mulighederne for at benytte solenergi som kraftkilde til fremtidige rummissioner. Også Planetary Society har forsøgt at opsende et solsejl. Solsejl er endnu ikke anvendt rummet, men i sommeren 2005 testedes et 20 meter stort solsejl i verdens største rumtestlaboratorium i Plum Brook, Ohio. Solsejlet havde en størrelse på ca. 400 m². Effekten fra Solen kan approksimativt sættes lig med solkonstanten ($K_w = 1,37$ kW/m²), som er den intensitet, Solen belyser Jorden med. Den samlede effekt som vil belyse solsejlet er $\mathcal{P} = 0,55 \cdot 10^6$ W. Ligning 4 giver $F_{lys} = 4$ mN. Hvis satellitten vejer 100 kg giver det en acceleration på $a = 3,6 \cdot 10^{-5}$ m/s². Satellitten møder ingen modstand i det lufttomme rum og vil i løbet af et år have en hastighed på lidt over 1 km/s.

Kunstig insemination

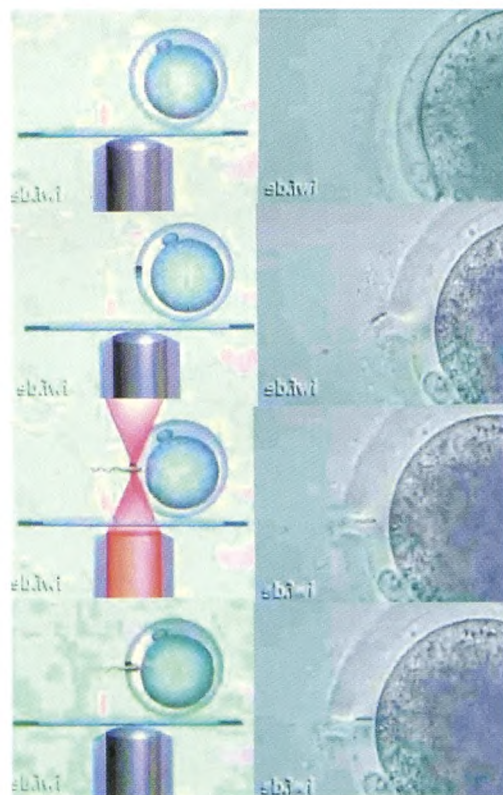
Lys kan også bruges i processen hvorved et liv skabes, nemlig som et redskab til kunstig befrugtning. Normalt benyttes mikropipetter af glas til kunstigt at befrugte et æg med en sædcelle, men efterhånden bliver optisk baserede teknikker mere anvendte. Årsagen er, at en optisk håndtering af cellerne er blidere end en mekanisk, at den optiske håndtering kan automatiseres, og at der er færre genstande, som skal steriliseres. Optisk insemination kan foregå som vist på figur 2 [4]. Til venstre vises skematisk hvad der sker og til højre ses billeder fra en befrugtning.

Kunstig insemination bruges også til at redde truede dyrearter, hvor sædcellerne sorteres efter kvalitet inden de nedfryses eller bruges til befrugtning. Sædceller kan sorteres optisk efter svømmeegenskaber og/eller brydningsindeks ved at lade dem gå gennem et optisk sorteringsgitter (se [5]), og måske kan man sågar i fremtiden sortere efter køn på den måde.

Den kraft, $F_{svøm}$, som en svømmende sædcelle kan udøve kan estimeres ved hjælp af Stokes lov:

$$F_{svøm} = 6\pi\mu rv \quad (5)$$

hvor μ er væskens viskositet ($=10^{-3}$ kg/ms for vand), v er en typisk svømmehastighed (~ 100 μ m/s), og r er en typisk radius. Antager vi, at sædcellens hoved er sfærisk med en radius på $r=2$ μ m, bliver $F_{svøm}=3,8$ pN.



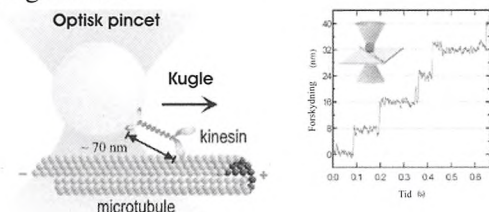
Figur 2. Serie af billeder som viser kunstig befrugtning hjulpet på vej med laserlys. Til venstre skematiske tegninger, til højre billeder. Først vises det intakte æg, dernæst hvordan en UV laser bruges til at brænde et hul i æggets væg, og i 3. og 4. række vises hvordan en sædcelle fanges med en optisk pincet og føres ind gennem hullet i ægget [4].

Boks 2: Naturens mindste maskiner

Indeni vores celler findes der små molekyler, som omsætter kemisk energi til mekanisk arbejde. Molekylerne omsætter kemisk energi ved at et ATP-molekyle (adenosine triphosphate) omdannes (hydrolyseres) til ADP (adenosine diphosphate), hvorved der frigives energi, som motormolekylet effektivt omsætter til mekanisk energi. Motormolekylerne har en imponerende effektivitet, ofte over 80 %. Der findes et utal af molekulære motorer i vores krop med vidt forskellige funktioner. F.eks. er der motorer involveret når vi bøjer armen, bevæger øjet, under celledeling, samt til at sørge for sædcellers og bakteriers fremdrift.

Typisk kan molekulære motorer frembringe kræfter af størrelsesordenen pico-Newton (10^{-12} N), hvilket er indenfor operationsområdet af en typisk optisk pincet. Derfor har man med succes brugt optiske pincetter til at måle fysiske egenskaber af motorerne såsom effektivitet, maksimum kraft, hastighed og skridtlængde. Bemærk, at hvis den optiske pincet er kalibreret, dvs. man kender κ , så kan kraften F ved en vilkårlig position x findes ud fra ligning 1.

En af de første motorer, der blev målt på med en optisk pincet, var kinesin som skitseret i figur 3. Kinesin er et to-hovedet motor-molekyle, som transporterer materiale indeni celler. Kinesin bevæger sig langs en mikrotubuli (rørformet proteinstruktur, 25 nm i diameter), der er en af de stærkeste bestanddele af cellens skelet. Som håndtag for den optiske pincet er en mikrometer størrelse kugle sat fast på kinesinmolekylet. Med den optiske pincet følges kuglens bevægelse langs mikrotubulus, og hver gang kinesin molekylet tager et skridt måles det ved en forskydning af kuglens position. Skridtlængden Δx blev således målt til 8 nm (se grafen til højre i figur 3). Ved at skrue op for laserintensiteten til motoren ikke længere kunne trække kuglen ud af fælden, blev den maksimale kraft som kinesinmolekylet kan frembringe målt til omtrent 10 pN. Det er endnu uvist, hvordan bevægelsen udføres, svinger kinesin det ene ben over det andet, eller 'ormer' det sig afsted?



Figur 3. Bevægelsen af et enkelt kinesinmolekyle afdækkes af en optisk pincet. Venstre: skitse af forsøget, hvor en mikrometerkugle er sat fast på kinesinmolekylet. Ved at måle forskydningen af kuglen i den optiske fælde kan man måle skridtlængden (se grafen til højre) til at være 8 nm [6].

En optisk pincet kan udøve hundredvis af pN, så at fange, guide og sortere sædceller optisk er klart en mulighed. I fremtiden kunne man forestille sig en optisk pincet implementeret på enden af en flytbar optisk fiber anvendt til insemination inde i kroppen og dermed undgå kirurgiske indgreb. De eksisterer ikke i dag, men der eksisterer mikroskopiske pincetter monteret på fastsiddende fibre, f.eks. i 'lab-on-a-chip'-opstillinger.

Pincetter til kræftdiagnose

Som en anden fremtidig anvendelse kunne man forestille sig laserlys og specielt optiske pincetter anvendt ved kræftdiagnoser. Kræftceller er defineret ved to egenskaber: De deler sig uden de normale restriktioner for celledeling og invaderer områder, som normalt er forbeholdt andre celler. Celler, som deler sig ukontrolleret, men som forbliver i en samlet klump, er normalt uskadelige og en sådan (godartet) tumor kan fjernes. Det bliver først rigtigt farligt når kræftcellerne har evnen til at frigøre sig fra den resterende (ondartede) klump af celler og sprede sig f.eks. via blodbanen eller lymfesystemet. Med en optisk pincet ville man kunne måle cellernes bindingsegenskaber og dermed vurdere om en tumor er godartet eller ondartet. Jo tidligere i forløbet en sådan diagnose kan stilles, desto større chance er der for helbredelse. Det er naturligvis oplagt at benytte denne type diagnose til hudkræft, hvor det er nemt at komme til med en laser, men hvis en optisk pincet er integreret på spidsen af en optisk fiber, kunne man også forestille sig at bruge teknikken til diagnose af kræft i tarmene, urinvejene og lungerne.

Star Wars

Verdens kraftigste laser findes i Lawrence Livermore National Laboratory i California og kan udsende meget kortvarige pulser på 10^{14} watt i hver puls. De kraftigste lasere med konstant intensitet yder 10^6 watt. En spændende anvendelse af lasere kunne være en *langdistance optisk pincet* lidt à la science fiction begrebet *tractor beam* som kendes fra Star Wars og Star Trek filmene. I Star Trek er *tractor beam* godt nok en stråle af gravitoner, der trækker de belyste objekter hen imod et gravitationsmidtpunkt. Denne idé ligger til grund for et seriøst forslag af forskere fra NASA, om at skyde en meget tung masse op til asteroiden, og så lade massen følges med asteroiden i 20 år(!) og dermed afbøje asteroidens bane [7].

Vores *langdistance optiske pincet* skulle være foton-baseret. En anvendelse kunne f.eks. være at beskytte kloden mod asteroidekollisioner. En asteroide med en diameter på omtrent 1 km ville kunne slette et land som Danmark. I værste fald ville den først kunne observeres omtrent 10 mio. km borte. Er der nogen mulighed for, at vi f.eks. med en laser, monteret på en rumstation, ville kunne påvirke asteroiden optisk og ændre dens bane nok til at undgå en kollision? Scenariet er vist på fig. 4. Boks 3 viser et regneeksempel med en fiktiv 'langdistance optisk pincet'.

Der er virkelig mange forbehold, som ikke er nævnt i boks 3, og et sådant værn er ikke realiserbart med nutidens teknik. En løsning, som NASA arbejder med, er ved hjælp af lasere at brænde den yderste skorpe på en indtrængende asteroide og derved forsøge at dele den op i mindre stykker, som brændes op i atmosfæren. Også ESA arbejder med asteroider [8].

Boks 3: Optisk manipulation af asteroider?

Vi antager, at asteroiden er lavet af et glaslignende materiale som f.eks. kvarts eller sand med et brydningsindeks på omtrent 1,5 og massefylde $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$, samt at asteroidens hastighed er undvigheshastigheden, den hastighed et legeme skal have for at undvige Jordens tyngdefelt

$$v_{undvig} = \sqrt{\frac{2Gm_E}{r_E}}, \quad (6)$$

hvor $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ er gravitationskonstanten, $m_E = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ er Jordens masse og $r_E = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ er Jordens radius. Heraf fås $v_{undvig} = 11,2 \text{ km/s}$.

Da asteroiden er 10 mio. km væk når den først observeres, har vi $8,9 \cdot 10^5$ sekunder, eller 10,3 døgn, til at reagere hvis ikke DK skal udslettes. For at være på den sikre side, vil vi gerne have asteroiden til at passere minimum 10.000 km fra Jordens overflade, så hvis asteroiden havde retning direkte mod jordkloden, skal dens bane ændres ca. 20.000 km i retningen vinkelret på asteroidens hastighedsvektor. Dette vil kræve en acceleration på $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

Asteroiden vejer omtrent $m = 1,2 \cdot 10^{12} \text{ kg}$, og dermed er den nødvendige kraft $F = ma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ N}$. For at få en konstant belysning af asteroiden og undgå evt. absorption af laserlyset i atmosfæren, placeres laseren på en rumstation. Vi formoder, at laseren har en god Gaussisk stråleprofil med en divergens på max 1 mrad. Således vil radius af strålen være omtrent 10^7 m bred 10 mio. km borte. Fjederkonstanten, κ_{gigant} , for langdistancepincetten antages at være proportional med laserens effekt (en rimelig antagelse for laboratorieforsøg). Hvis en mikroskopisk glaskugle optisk fanges i laboratoriet med en effekt på $\mathcal{P} = 0,1 \text{ watt}$, fås $\kappa = 10^{-3} \text{ N/m}$. Den kraftigste laser, som før omtalt, kan give pulser med $\mathcal{P} = 10^{14} \text{ watt}$. Lad os antage, at det lykkes at have flere sådanne lasere opstillet ved siden af hinanden så effekten er konstant, og at teknologien endvidere er udviklet så meget, at de kan levere 3 størrelsesordener mere (kræver betydelig køling), således fås $\mathcal{P} = 10^{17} \text{ W}$ og $\kappa_{gigant} = 10^{15} \text{ N/m}$ umiddelbart ved laserens udgang. Endvidere antages, at laserens radius ved åbningen er 1 m.

Da potentialet er harmonisk, vil fjederkonstanten, κ , være omvendt proportional med kvadratet på strålens bredde, $\sigma: \kappa \propto \frac{1}{\sigma^2}$. Dermed bliver $\kappa_{gigant} \simeq 10 \text{ N/m}$ ved asteroiden. For at producere den nødvendige kraft på asteroiden, $F = 5,8 \cdot 10^7 \text{ N}$, skal centrum af laserstrålen være ca. 6000 km fra asteroiden. De fotoner, som udsendes af laseren, vil medføre en væsentlig rekyleffekt på rumstationen. For at holde positionen af laseren konstant i forhold til Jorden, er det nødvendigt at påmontere raketmotorer på rumstationen.

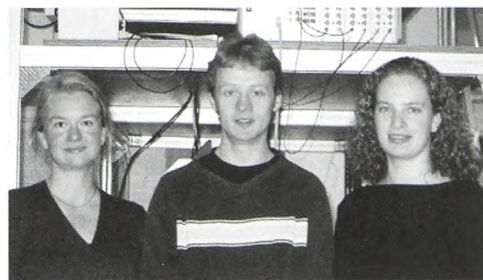


Figur 4. Skitse af hvordan en *langdistance optisk pincet* monteret på en rumstation forestilles at kunne ændre en asteroides bane fra kollisionskurs med jordkloden.

Da optiske pincetter er i stand til at fange metalliske strukturer trods deres lysspredende egenskaber [3], inkluderer andre fremtidsdrømme at guide satellitter rundt med jordbaserede optiske pincetter, eller, endnu vildere, at anvende optiske pincetter til at standse biler med, som kører over for rødt lys. Kun fantasien og fotonerne sætter grænsen...

Litteratur

- [1] L. Oddershede (2002). "Optisk pincet målinger af enkelt protein bevægelser i bakteriemembranen". *KVANT*, bind 1, s. 3-8.
- [2] I.M. Tolic-Nørrelykke, E.L. Munteanu, G. Thon, L. Oddershede og Kirstine Berg-Sørensen (2004). "Anomalous diffusion in living yeast cells". *Physical Review Letters*, bind 93, s. 078102-(1-4).
- [3] P.M. Hansen, V.K. Bhatia, N. Harrit, and L. Oddershede (2005). "Expanding the optical trapping range of gold nanoparticles". *Nano Letters*, september (2005).
- [4] Billeder taget fra en film lavet af IWF, Göttingen Universität (27.09.2005), som kan hentes fra mkat.iwf.de/index.asp?Signatur=C%201921.
- [5] M. P. MacDonald, G. C. Spalding og K. Dholakia (2003). "Microfluidic sorting in an optical lattice". *Nature*, bind 246, s. 421-424.
- [6] K. Visscher, K.J. Schnitzer, og S.M. Block (1999). "Single kinesin molecules studied with a molecular force clamp". *Nature*, bind 400, s. 184-189.
- [7] E.T. Lu og S.G. Love (2005), "Gravitational tractor for towing asteroids", *Nature*, bind 438, s. 177-178.
- [8] NEO Space Mission Prepar., www.esa.int/gsp/NEO/



Fra venstre Lene Oddershede (lektor), Poul Martin Hansen (ph.d.-studerende), Tabita Winther Madsen (ph.d.-studerende), alle fra optisk pincet-gruppen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Fed fysik og elektrostatik

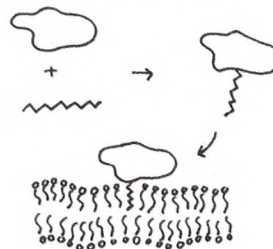
Amy C. Rowat, MEMPHYS – Center for Biomembran Fysik, Syddansk Universitet.

Protein-membran vekselvirkninger er vigtige både for biologisk struktur og funktion. Proteiner kan lokaliseres til membranen bl.a. ved hjælp af bindinger til andre membranproteiner, elektrostatiske vekselvirkninger, og/eller ved at påhæfte en lipidkæde til proteinet.

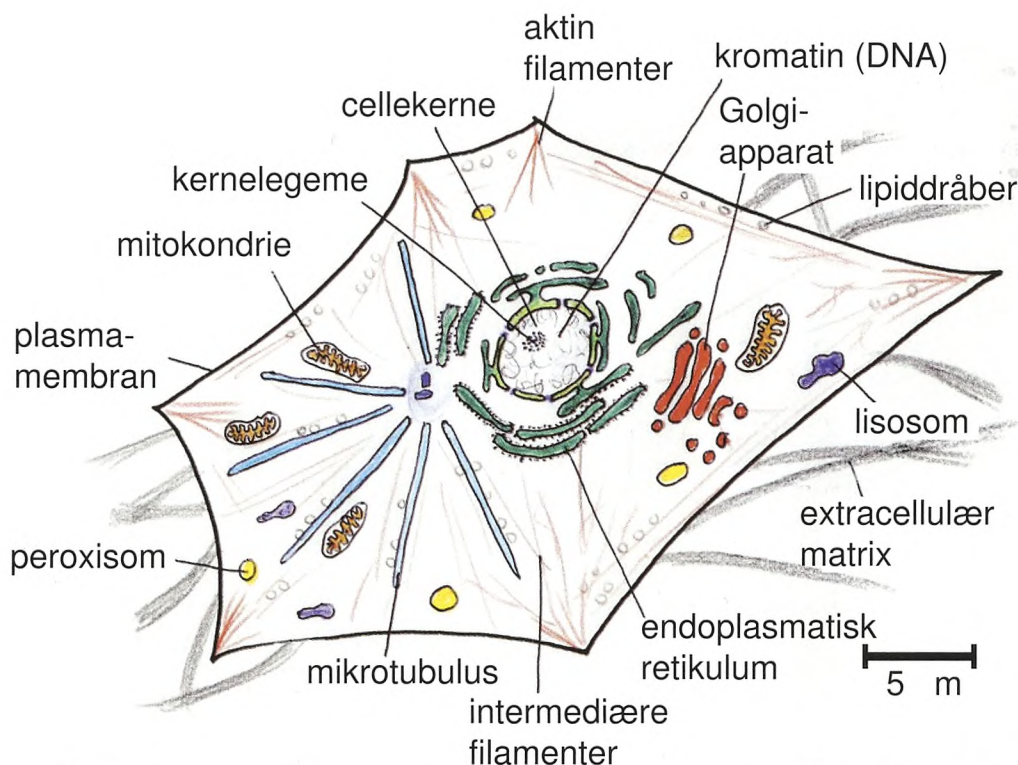
Forestil dig at du er inde i en celle (figur 1). Her oplagres energi som ATP, signalkaskader trigges, og den genetiske kode aflæses med henblik på syntese af proteiner. Mange af disse biologiske funktioner i cellen er afhængig af vekselvirkninger imellem specifikke molekulære komponenter. Men hvordan finder de hinanden?

En meget almindelig måde at bringe proteiner i nærheden af hinanden på er at lokalisere dem ved en membran, f.eks. plasmamembranen eller en organelmembran¹. Protein-membran vekselvirkninger er vigtige både for biologisk struktur og funktion. Proteiner, der er associerede med membranen, inkluderer bl.a.: strukturdannende proteiner – f.eks. laminproteiner i cellekernen – og signalproteiner knyttet til cellens biologiske funktion – f.eks. RAS, et protein som styrer cellevæksten. Proteiner kan lokaliseres til

membranen bl.a. ved hjælp af bindinger til andre membranproteiner, elektrostatiske vekselvirkninger, og/eller ved at påhæfte en lipidkæde til proteinet. Ved kovalentbinding af en lipidkæde til aminosyresekvensen efter syntesen i *ribosomerne* (translation), øges proteinets affinitet² for membranen, idet kædens olieagtige (hydrofobe) natur gør at den opløses i membranens indre (figur 2) [1].



Figur 2. Det lipiderede protein indsat i membranen (et lipiddobbeltlag).

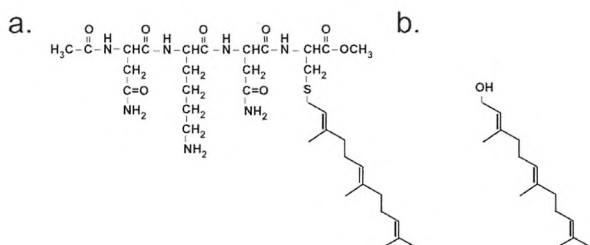


Figur 1. Opbygningen af en eukaryot celle (celle med cellekerne). Indeni cellen, der er afgrænset til omgivelserne med en plasmamembran, findes der organeller¹, proteinnetværk samt små lysosomer og vesikler, altså i et viskøst cytoplasma.

¹organel = celledel med en særskilt funktion og membranafgrænsning, f.eks. endoplasmatisk retikulum, Golgi-apparat og mitokondrie.

²affinitet = to stoffers tilbøjelighed til at reagere med hinanden og danne en kemisk forbindelse.

For at forstå hvorledes disse lipiderede proteiner vekselvirker med membraner må man arbejde med simple modelsystemer, som f.eks. et syntetisk lipid-dobbeltlag og et lipideret peptid (et lille protein som består af få aminosyrer, syntetiseret af J. Brask og K.J. Jensen, KVL). Peptidets sekvens er: Ac-Asn-Lys-Asn-Cys-(farnesyl)-OMe hvor farnesyl er lipidkæden (figur 3.a). Jeg har undersøgt effekterne af adsorption³ af disse peptider og af selve lipidkæden, farnesol (figur 3.b), til en modelmembran med én komponent (DMPC⁴).



Figur 3. Kemisk struktur af (a) det farnesylerede peptid og (b) farnesol.

Undersøgelserne har gjort brug af en lang række biofysiske teknikker, bl.a. differentiell-skanning kalorimetri (DSC), deuterium kerne-magnetisk resonans (²H-NMR), og VesikelFluktuations Analyse (VFA) [2]. I denne artikel vil jeg kort beskrive nogle eksperimentelle resultater og nogle teoretiske overvejelser om peptiders og farnesols adsorption til en DMPC membran med fokus på membranens termiske og fysiske egenskaber.

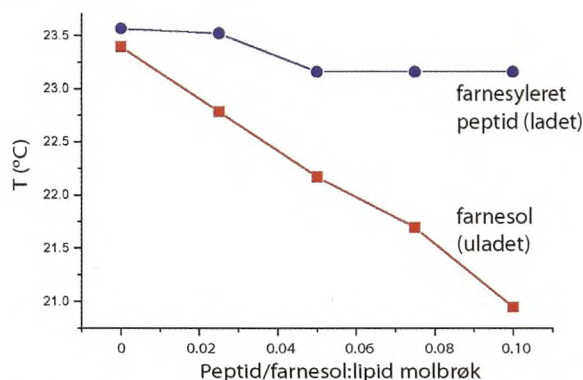
Peptid-membran adsorption – eksperimentelt set

Første skridt i den eksperimentelle karakterisering af farnesylerede peptiders vekselvirkning med membranen består i at undersøge hvorledes lipidkæden farnesol påvirker membranens fysiske egenskaber. Dette kan man bl.a. få et indtryk af ved at betragte hvorledes iblanding af farnesol i en DMPC lipidmembran ændrer membranens gel-fluid faseovergang (smeltning fra gel til fluid-fase). Dette sker ved faseovergangstemperaturen, T_m (24° C for DMPC), og manifesterer sig i DSC-termogrammet ved en markant endoterm top, når fasen ændres fra gel til fluid. Ved tilstedeværelsen af farnesol sænkes og forbreddes faseovergangen jo højere koncentration af farnesol, der er i membranen (figur 4).

Lad os nu se på farnesolkæden forbundet med en lille 'peptid'-hovedgruppe. Peptidets sekvens er inspireret af et farnesyleret protein som findes naturligt i cellekernen. Man skal lægge mærke til at en af aminosyrerne (lysin) er ladet under de betingelser, som vi arbejder med (rent vand, ingen tilsat salt).

Ved kalorimetrisk undersøgelse viser det sig, at T_m reduceres, men langt mindre end det er tilfældet for DMPC-farnesol blandingen (figur 4). Yderligere

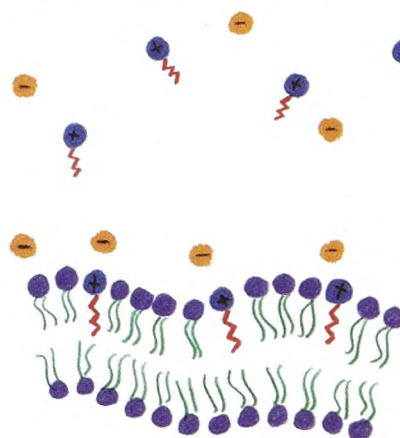
mættes membranens peptidoptagelse ved ~ 5 mol % peptid. Alt dette er tegn på, at ikke alt peptid adsorberes på membranen, men fordeles imellem membranen og vandfasen. For bedre at forstå dette fænomen, er der udviklet en teori for at beskrive elektrostatiske effekters rolle [3, 4].



Figur 4. Faseovergangstemperatur (T_m) bestemt af DSC af DMPC membraner med forskellige koncentrationer af farnesol (nederst, bokse) og ladet farnesyleret peptid (øverst, cirkler).

Peptid-membran adsorption – teoretisk set

Vi ved altså, at farnesol har en meget høj fordelingskoefficient - dvs. den hydrofobe effekt driver farnesol ind i membranen. Når farnesol forbindes kovalent med peptidet fungerer den som et anker, så de lipiderede peptider har stor affinitet til membranen. Men ved adsorption af de ladede peptider til membranen opbygges der en overfladeladning og et elektrostatiske potentiale. De ladede peptider er ledsaget af modioner, som er fuldt dissocierede fra peptidet. Modionerne fordeler sig ikke ind i membranen, men er selvfølgelig tiltrukket af den opbyggede overfladeladningen. Samtidig forsøger de at maksimere deres translations-entropi i bulkfasen (vand). I en konkurrence imellem de elektrostatiske kræfter og entropien organiserer modioner og bulk-peptiderne sig i et elektrisk dobbeltlag (figur 5).



Figur 5. Det elektriske dobbeltlag: Modionerne samler sig ved den ladede overflade.

³adsorbere = evnen til at fastholde eller koncentrere en væske eller luftart på en overflade.

⁴DMPC = Dimyristoylphosphatidylcholin – en hyppigt anvendt kunstig lipid, der skifter fra fluid-fase til gel-fase ved ca. 24° C.

For at beskrive peptid-membran bindingen i dette system er det nødvendigt at modellere peptiderne både i bulk og på membranen. De to populationer er karakteriserede ved en middel arealfraction af peptider på overfladen (membranen) (ϕ_o^+) og en middel volumenfraktion af peptider i bulk langt fra overfladen (ϕ_b^+). Middelfeltteori⁵ for ligevægtsfordelingen af peptider og modioner kaldes Poisson-Boltzmann (PB) teori; ifølge PB teori kan det elektriske dobbeltlagspotentiale (ψ) beregnes ved hjælp af følgende differentiaalligning:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{-4\pi e}{\epsilon} \left(\frac{\phi_b^+ e^{(-e\psi/k_B T)}}{(a^+)^3} - \frac{\phi_b^- e^{(e\psi/k_B T)}}{(a^-)^3} \right) \quad (1)$$

Her er ϵ den relative dielektricitetskonstant i vand ($\epsilon \sim 80$), e er elementarladningen, a^+ er peptidets diameter, og a^- er modionens diameter. [Elektrostatikken er her formuleret i c.g.s. enheder.] Ved de udvalgte randbetingelser, benytter vi PB ligningen (1) til at udregne den fri energi, både for overflade og bulk subsystemer.

Den fri energi for de ladede peptider (og modioner) indeholder både entropiske og elektrostatiske bidrag; udfra det kan de kemiske potentialer udledes. Det kemiske potentiale i bulk og ved overfladen er ens i termisk ligevægt, så vi kan udtrykke adsorptionsisotermen, som beskriver relationen mellem hvor meget peptid, der sidder på overfladen og bulkpeptid koncentrationen:

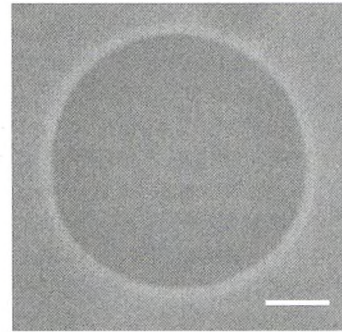
$$\phi_o^+ = \frac{\phi_b^+}{e^{-(\alpha + \beta \phi_o^+ - e\psi_o)/k_B T} + \phi_b^+} \quad (2)$$

Denne ligning kaldes Davies' adsorptionsisoterm [5]. Peptid-membran bindingsenergien er beskrevet af parameteren α , som afspejler lipidkædens (farnesols) affinitet for membranen⁶. β parameteren repræsenterer den laterale vekselvirkning imellem peptider som er adsorberede til overfladen og i det lave koncentrationsregime er dette led meget lille. Det elektrostatiske bidrag kan ses i $e\psi_o$, hvor ψ_o er overfladepotentialet (bestemt af ϕ_o^+) som kan beregnes ved hjælp af Poisson-Boltzmanns ligning. Hvor der ingen ladninger er ($\psi = 0$), består den fri energi udelukkende af entropiske bidrag og adsorptionsisotermen (ligning 2) reduceres da til Frumkins adsorptionsisoterm. Vi kan bruge dsorptionsisotermen til at estimere mængden af adsorberet peptid/farnesol og farnesylerede peptider (med og uden ladninger). Det næste skridt består i at bestemme hvorledes de adsorberede farnesol og farnesylerede peptider påvirker membranens form og fleksibilitet.

⁵I middelfeltteori antages det, at de lokale omgivelser sætter et effektivt elektrostatiske felt op bestemt af tætheden af ioner i en elektrolyt opløsning. Ved høje ladningstætheder bryder denne antagelse sammen idet termiske korrelationseffekter spiller en stor rolle. Idet vi arbejder med små koncentrationer, giver middelfeltteori en god beskrivelse.

⁶Udfra eksperimenter, estimeres $\alpha \sim 10 k_B T$ for farnesol [6].

⁷Prøv og se på spontan krumning med et stykke papir. For et fladt stykke papir som ligger på bordet er $H_o = 0$. Hvis vi kommer lidt vand på den ene side af papiret, vil det naturligt krumme. Idet der nu er en forskel i sammensætning imellem de to sider af papiret, opstår der spontan krumning.



Figur 6. En stor unilamellar vesikel. Fluktuationer i konturen af denne vesikel kan analyseres og ved brug af fluktuations-dissipations teoremet, kan membranens bøjningsstivhed, k_c , udtrækkes.

Membranens elasticitet

Membranens form kan beskrives ved hjælp af Helfrichs frie energi [7]:

$$\mathcal{F} = \sigma A + \frac{k_c}{2} \int_A dA \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - 2H_o \right)^2 \quad (3)$$

Her er A membranens areal og σ den laterale spænding. De principale radier, r_1 og r_2 , beskriver membranens form. H_o kaldes den spontane krumning, som afspejler membranens naturlige tendens til at krumme, f.eks på grund af forskellig sammensætning af de to monolag i dobbeltlaget⁷. Bøjningsstivheden, k_c , har dimension af energi og afspejler hvor meget energi det koster at bøje eller krumme membranen – jo lavere k_c , jo nemmere kan membranen deformeres. For lipidmembraner kan k_c variere fra få til få dusin $k_B T$. Det betyder at en vesikel udfører små termiske formfluktuationer (Brownske bevægelser), som kan observeres i et mikroskop (figur 6) og analyseres ved teknikken Vesikelfluktuationsanalyse, VFA.

Lad os nu kigge på bøjningsstivheden for DMPC-membranen og effekterne af iblandning af farnesol. Ved tilsætning af 5 mol % farnesol, sænkes k_c til $31,3 \pm 0,9 k_B T$. Disse værdier er ikke så forskellige, når vi tager hensyn til forsøgsfejl. Og dog, ved en lille mængde af ladet peptid (≤ 1 mol %), bliver k_c meget større: $40,2 \pm 0,7 k_B T$. På trods af at koncentrationen af peptid på overfladen er meget lille.

Boks 1: Vigtige elektrostatiske parametre

Afstanden, hvor elektrostatiske effekter dør ud på grund af afskærmning af modioner/bulkpeptider, kaldes

Debye-længden: $\kappa^{-1} = 1 / \sqrt{8\pi e^2 \phi_b^+ / \epsilon k_B T (a^+)^3}$.

Peptider og modioner som ligger udenfor afstanden $\frac{1}{\kappa}$ kan ikke mærke overfladeladningen.

Afstanden, hvor den elektrostatiske energi imellem to ladninger er lig med den termiske energi, kaldes

Bjerrum længden: $l_B = \frac{e^2}{\epsilon k_B T}$. Bjerrum-længden i vand ved 20° C er $l_B = 7\text{\AA}$.

Disse længdeskalaer er bundet sammen via bulk-tætheden af peptider, der kan bestemmes selv-konsistent af ligningssystemet (2) og (5).

Hvorfor bliver membranen stivere på grund af de ladede peptider? Der er igennem de sidste 20 år blevet udviklet teorier om, hvordan elektrostatiske effekter øger bøjningsstivheden [8]. Disse teorier bekræfter den form, som man når frem til ved hjælp af simple dimensionsbetragtninger,

$$k_c = k_o + k_{el} \quad (4)$$

hvor

$$\frac{k_{el}}{k_B T} \simeq \frac{\phi_o^{+2} l_B}{\epsilon (a^+)^2 \kappa^3} \quad (5)$$

Beskrevet i ord, er k_o bøjningsstivheden uden elektrostatiske effekter ($k_c = k_o$) og k_{el} afspejler bidraget fra det elektrostatiske dobbeltlag, som ca. har tykkelsen en Debye længde, $\frac{1}{\kappa}$ (se boks 1). Kompressionen af modionerne i det elektriske dobbeltlag hæmmer de termiske formfluktuationer og øger k_c med k_{el} – dvs. det koster mere energi at bøje membranen. For mindre end 1 mol % peptid på overfladen findes let et betragteligt bidrag, $k_{el} \sim 3-4 k_B T$, hvilket er i god overensstemmelse med de eksperimentelle resultater (VFA).

Hvad betyder det for livet?

Vi kan ikke med dette supersimple to-komponentsystem forklare hvordan cellen er organiseret. Men det kan hjælpe os til at forstå noget om protein-membran vekselvirkninger:

1. En farnesolkæde har en høj affinitet for membranen. Derfor har farnesylerede proteiner en større tendens til at befinde sig på membranen *uden* at ændre membranens mekaniske egenskaber i fluidfasen (når ladninger ikke spiller nogen rolle).
2. Adsorption af ladede, lipiderede peptider er følsom over for overfladeladning (se adsorptions-isotermen). Derfor kan elektrostatiske være en simpel mekanisme til at regulere mængden af adsorberede peptider/proteiner.
3. Adsorption af ladede, lipiderede peptider til membranen kan påvirke hvor meget energi som

skal til for at bøje membranen. Membranens formstabilitet er vigtig ved budding, vesikulering og formdannelse af organeller og celler.

4. I kroppen er solventet ikke bare vand – der er en masse forskellige salte. Da salt afskærmer elektrostatiske ladninger, kan Coulombkræfterne imellem ladningerne ikke så let mærkes og ψ spiller en mindre rolle. Derfor kan vi forvente, at elektrostatiske spiller en mindre rolle ved tilsætning af salt. Det betyder at biologiske processer kan moduleres ved at ændre saltkoncentrationen eller pH. På denne måde kan både mængden af adsorberede peptider samt mekaniske effekter reguleres.

Så man må konkludere at vores peptid-membran modelsystem kan lære os lidt mere om de fundamentale vekselvirkninger, som spiller en rolle ved organisering af cellen på det molekylære niveau.

Tak til John H. Ipsen og Per L. Hansen for læsning og kommentar ved artikelskrivieriet. Økonomisk støtte kommer fra Natural Scientific and Engineering Research Council (NSERC) of Canada (ACR) og Danmarks Grundforskningsfond (MEMPHYS – Center for Biomembrane Physics).

Litteratur

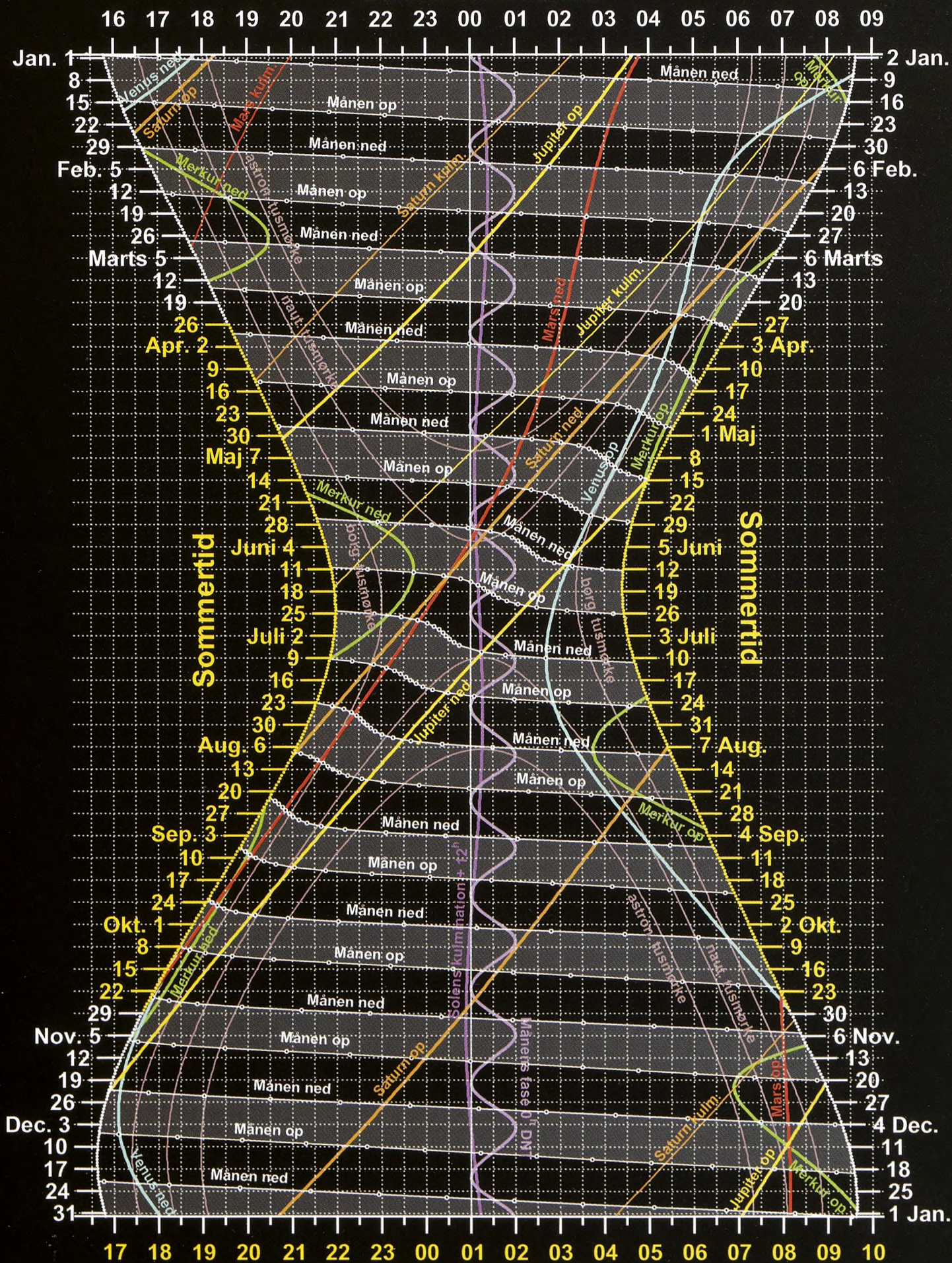
- [1] J.R. Silvius (2002), *Current Topics in Membranes*, **13**: 371.
- [2] A.C. Rowat, J. Brask, T. Sparrman, K.J. Jensen, G. Lindblom og J.H. Ipsen (2004), *Eur. Biophys. J.*, **33**: 167; A.C. Rowat, J.H. Davis (2004), *Biochim. Biophys. Acta*, 1661:178; A.C. Rowat, D. Keller, J.H. Ipsen (2005), *Biochim. Biophys. Acta*, 1713:29.
- [3] A.C. Rowat, P.L. Hansen og J.H. Ipsen (2004), *Europhys. Lett.*, **67**: 74.
- [4] H. Diamant og D. Andelman (1996), *J. Phys. Chem.*, **100**: 13732.
- [5] J. T. Davies (1958), *Proc. R. Soc. A*, **245**: 417.
- [6] JR Silvius, F l'Heureux (1994), *Biochemistry*, **33**: 3014.
- [7] W. Helfrich (1973), *Z. Naturforsch.*, **28**: 693.
- [8] D. Andelman (1995), in *Handbook of Biological Physics*, eds. R. Lipowsky & E. Sackmann. Elsevier Science B.V.: Amsterdam.



Amy C. Rowat var tidligere ph.d.-studerende hos MEMPHYS – Center for Biomembran Fysik, Fysisk Institut, Syddansk Universitet.

Planetkalender for København 2006

Dansk Normaltid



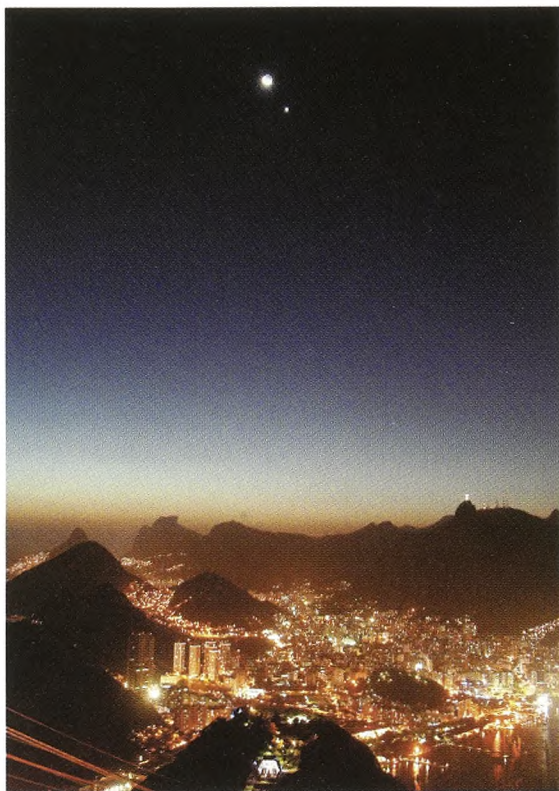
KVANTE-stigen – meddelelser om stort og småt

Redigeret af Michael Cramer Andersen, KVANT.

'Kvantestigen' bruges her som overskrift på en spalte der kan rumme stort og småt f.eks. læserbreve eller redaktionelle kommentarer. I fysikken benyttes ordet til at anskueliggøre en lagdeling af kvantefænomener i naturen, hvor de enkelte lag eller trin placeres efter deres karakteristiske energi.

Julehilsen fra Sydamerika

Fra vores udsendte medarbejder i Rio de Janeiro, Camilla Bacher, har vi modtaget et foto af Venus og Månen, da de stod tæt på hinanden den 4. december:



Figur 1. Månen og Venus tæt sammen på himlen over Rio de Janeiro fotograferet fra "sukkertoppen", en klippe som er én af områdets store turistattraktioner hvortil man kun kan komme med en kabelbane. I baggrunden kan man se statuen af Kristus på Corcovadobjerget. Billedet er taget med et Canon EOS 350D digitalt kamera på trefod (uden blitz).

Fotografen bemærker i øvrigt, 'at Månesejlet vender forkert når det er nymåne (venstre side lyser) og Månen kører den forkerte vej. Det gør Solen i øvrigt også. Måske forklarer det hvorfor jeg konstant får vendt kortet på hovedet, når jeg går rundt hernede. Man skal virkelig tænke sig om'. Vi håber på redaktionen, at Camilla finder hjem til de nordlige himmelstrøg selv om sol og måne ikke opfører sig som vanligt.

Planetkalender for 2006

På modstående side trykker vi en meget detaljeret "Planetkalender for København 2006" fremstillet af Martin Götz. Planetkalenderen er udregnet¹ for København og giver et hurtigt overblik over en række astronomiske forhold, f.eks. hvornår de enkelte planeter er synlige og om Månen eventuelt forstyrrer, samt:

- Opgangs- og nedgangstider for Solen, Månen og planeterne, der er synlige med det blotte øje (Månen er oppe i de grå områder og dens opgangs- og nedgangstider er yderligere markeret med små cirkler),
- Kulminationstidspunkter for planeterne,
- Slutningen og begyndelsen for det borgerlige, nautiske og astronomiske tusmørke, når Solen henholdsvis er 6°, 12° og 18° under horisonten,
- Solens kulmination + 12 timer (f.eks. aflæses kl. 0:15 i natten mellem d. 4.1. til d. 5.1. – så kulminerer Solen kl. 12:15 d. 4.1.),
- Månens fase (kl. 0:00 DNT står for nymåne, kl. 1:00 DNT for fuldmåne og kl. 0:30 DNT for halvmånefaserne).

På datoskalaen markerer prikkerne på kalenderens venstre og højre begrænsning nedgangs- og opgangstiderne for Solen. Datoerne er vist for hver syvende nat (angivet mellem søndag og mandag). Solens nedgangs- og opgangstider er markeret med gule eller blå prikker. I tiden 26. marts - 28. oktober gælder dansk sommertid (DST), hvor tiderne på den nederste tidsskala skal anvendes. Resten af året gælder dansk normaltid (DNT), hvor den øverste tidsskala bruges. Kalenderen kan hentes elektronisk – helt gratis – med uddybende forklaring på web-adressen:

<http://adm.frsund-gym.dk/~ma/planetkalender/>

Hvor gammel er Jorden?

Spørgsmålet om hvor gammel Jorden er, har optaget mennesket siden – ja, siden mennesket blev bevidst. Hvornår dét skete er så et andet spørgsmål. Ved et bogudsalg faldt redaktøren over en gammel og gulnet Almanak – 'for det Aar efter Christi Fødsel 1884, som er et Skudaar; beregnet til Kjøbenhavns Observatorium af H.C.F.C Schjellerup'.

Prisen for den lille tryksag på 48 sider var oprindeligt 16 øre, for et heftet eksemplar, som – udover at rumme en astronomisk kalender – bl.a. bragte en artikel om 'Forbedring af enge' og en fortegnelse over

¹Diagrammet er tegnet på basis af efemeride-beregninger foretaget med Linux-programmet XEphem, www.clearskyinstitute.com/xephem/

markedsdatoer i hele landet. Det bemærkelsesværdige var dog, den chokerende oplysning øverst på side 2:

Nærværende Aar regnes efter Christi Fødsel 1884.	
Efter Verdens Skabelse	5851.
Siden Reformationen	367.
Siden den Oldenborgske Stammes Regjerings Begyndelse i dette Rige	436.
Siden vor allernaadigste Konge, Kong Christian den Niendes Fødsel	66.
Fra Kong Christian den Femtes danske Lov	201.
Fra Danmarks Grundlov	35.

Figur 2. I almanakken for 1884 fremgik det, at 'Verdens Skabelse' fandt sted for knap 6.000 år siden.

Læseren kan nu udregne det år, hvor verden (Jorden) blev til. I en tid hvor både 'kreationisme' og 'intelligent design' bliver ivrigt diskuteret kunne det være lidt interessant, at opklare hvor langt op i tiden denne oplysning blev formidlet i en officiel udgivelse som almanakken fra Københavns Universitet?

Spørgsmålet blev besvaret med hjælp fra astronom Ole Einicke, der tidligere beregnede almanakkens astronomiske oplysninger. Efter gennemsyn af de gamle almanakker fandt Ole Einicke, 'at den lidt spøjse oplysning om Verdenens skabelse har fortsat helt frem til 1911, hvor den optræder for sidste gang. Der skal i øvrigt have været lidt af en diskussion med den daværende professor (Elis Strömberg) som ikke mente man kunne forsvare den påstand'.

En international gruppe af forskere har i sommeren 2005 offentliggjort en artikel i *Nature* (bind 436, s. 1127), hvor Jordens alder bestemmes med meget stor præcision: 4.566,2 mio. år. I næste nummer af KVANT, bringer vi en artikel om dette emne.

Hvordan virker tyngdekraften?

I KVANT nr. 3, november, 2004 opregner Torkild Glaven en række ret så dybtgående spørgsmål vedrørende gravitationens natur – herunder bl.a. dens forhold til mikrofysikkens vekselvirkninger. Herpå svarer redaktøren ret så relevant og omfattende og opfordrer til slut læserne til eventuelt at indsende yderligere svar.

Jeg tillader mig da at henlede opmærksomheden på mine artikler i KVANT, nr. 2, oktober, 1996 og KVANT, nr. 1, juni, 1998, nemlig henholdsvis: "Kan naturlove begrundes" og "Den kosmologiske standard-models problemer".

Som et gennemgående træk i disse artikler viser jeg, at gravitationen er det anisotropifelt, som ved lokal anisotropi opretholder Universets globale isotropi, og at den derfor holder sig helt udenfor mikrofysikkens vekselvirkningssystem (GUT-symmetrien – "Grand Unified Theories"). I tilgift løses det klassiske problem om identiteten af tung og træg masse.

Kay Akselbo

Nordisk Netværk for Kvinder i Fysik

...fortsat fra bagsiden

NorWiP er en nystiftet paraplyorganisation for de nationale netværk for kvinder i fysik i de nordiske lande² – Netværk for Kvinder i Fysik i Danmark, Women in Physics in Sweden, Nettverk for Kvinner i Fysikk i Norge og det Finske Netværk for Kvinder i Fysik som pt. er under dannelse. Idéen med NorWiP er at fungere som et supplement til de nationale netværk. Målet med NorWiP er at øge andelen af kvinder i fysik i de nordiske lande, ved at sætte fokus på fordelingen af køn i den akademiske verden, samt ved at lobbie for initiativer der kan øge og fastholde kvinder i et akademisk karriereforløb.

NorWiP har en hjemmeside – www.norwip.org – der indeholder en database over kvindelige fysikere. Den håber vi vil blive brugt når der skal findes egnede medlemmer til råd, nævn, udvalg samt bedømmelser.



Anja C. Andersen er lektor ved Dark Cosmology Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.



Cathrine Fox Maule har lige afleveret sin ph.d.afhandling ved Teoretisk Geofysik og Planetfysik, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og er formand for Kvinder i Fysik i Danmark.

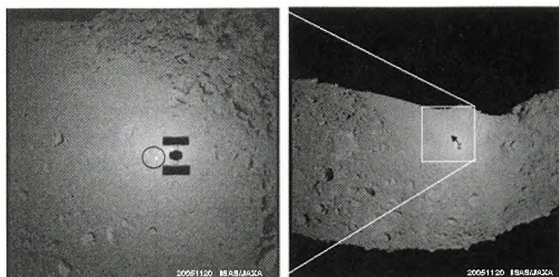
²Danmark, www.kif.nbi.dk; Sverige, www.wips.uu.se og Norge, www.norskfysikk.no/hfs/NFKIF

KVANT-nyheder

Af John Rosendal Nielsen og Sven Munk, KVANT.

Hayabusa kryber tæt på komet

Kometen Iketawa har gennem nogen tid været genstand for rumsonden Hayabusas tilnærmelser. Den japanske rumorganisation JAXA har opsendt sonden, som nu skal tage prøver af Iketawa. For ikke så længe siden opstod der situationer, som skabte usikkerhed om det videre forløb. Imidlertid synes disse komplikationer nu at være overvundet – se billederne!



Figur 1. Den japanske rumsonde Hayabusa fotograferer sin egen skygge på asteroiden Itokawa. På billedet til venstre ses en lysprík – i en lille ring – som er en lille kapsel med 880.000 navne indgraveret (JAXA).

Kilde: JAXA den 24. nov., www.isas.jaxa.jp/e/news/

Hvornår er en planet en planet?

Man kan ikke beskyldte astronomer for at være særligt klare i mælet om, hvad en planet er. Et ekspertpanel, der er oprettet af den Internationale Astronomiske Union (IAU), skal forsøge at råde bod på dette og finde en mere klar definition af en planet. Problemet er blevet aktuelt efter observationen af et planetlignende objekt, kendt under det poetiske navn 2003 UB313. Det har sat en ny diskussion i gang, om hvilke himmelobjekter der er planeter. Skal f.eks. Pluto bevare sin planetstatus, når UB313 har vist sig at være større end Pluto?

Forslaget fra det 19 mand stærke ekspertpanel er temmelig radikalt, da de foreslår at opgive begrebet planet som et enkeltstående begreb. I stedet skal begrebet planet i fremtiden være tilføjet et tillægsord (eller adjektiv om man vil), der angiver, *hvor de findes i Sol-systemet*. I tilfældet med Pluto og UB313 skulle de kaldes for transneptunske planeter ("længere ude end Neptun"), hvilket de så skulle dele med andre større fjerne objekter i Kuiperbæltet. Andre medlemmer af Solsystemet skulle ligeledes inddeles i kategorier, men panelet vil overlade det til IAU at definere disse kategorier. Forslaget har allerede fået én af panelets egne medlemmer til at protestere, Alan Stern fra Southwest Institute in Boulder, Colorado. Han mener, at man snarere bare skulle kalde Pluto og UB313 for Isdværge efter deres fysiske egenskaber. Stern påpeger, at stjernerne også bliver kategoriseret efter deres fysiske egen-

skaber og ikke efter deres placering. Så vent lidt endnu med at rette skolebøgerne – den debat er ikke overstået endnu.

Kilde: Nature Vol. 437, s. 456-457.

Nobelprisen til kvanteoptik

I år går Nobelprisen i fysik til Roy J. Glauber (Harvard University) for "hans bidrag til kvanteteorien for optisk kohærens" og til John L. Hall (JILA, University of Colorado og National Institute of Standards and Technology) og Theodor W. Hänsch (Max-Planck Institut für Quantenoptik i München) for "deres bidrag til udviklingen af laserbaseret præcisionsspektroskopi inklusiv den optiske frekvens-kam-teknik". Prisen, der er på i alt 10 millioner svenske kroner (ca. 8 mio. danske kr), deles i to dele, hvor Hall og Hänsch deler den ene halvdel.

I følge kvantefysikken har lys både egenskaber som bølger og partikler, hvilket Roy Glauber fik omfattet i feltet af optik – altså grundlaget for kvanteoptikken. Han kunne herved beskrive de fundamentale forskelle mellem varmekilder med forskellige frekvenser og faser – såsom en elektrisk lyspære – og en laser med specifik frekvens og fase. Det vigtige bidrag fra John Hall og Theodor Hänsch er, at de udviklede teknikker til måling af lysets frekvens – der har nået en nøjagtighed på $1 : 10^{15}$ i dag. Denne præcision har gjort det muligt, at forbedre definitionen af fundamentale fysiske enheder såsom meteren, der er defineret som den strækning lyset tilbagelægger på $1/299.792.458$ sekund. Desuden har teknikken givet utroligt præcise ure og forbedret GPS-teknologien, og i fremtiden kan den måske afklare spørgsmålet om finstrukturkonstanten ændres over tid.

Kilde: nobelprize.org, www.nobel.se

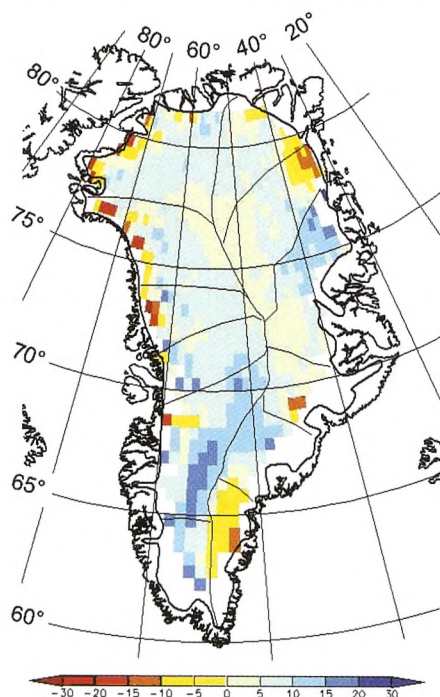
Kan man svømme hurtigst i sirup eller i vand?

Naturvidenskab er gennembrydende forskning, der til tider bliver belønnet med en Nobelpris, men det er også forskning, der mest af alt kan bringe smilet frem. Denne forskning bliver belønnet med Ig-Nobelprisen, der uddeles årligt ved Harvard Universitet – i år for 15. gang. I år blev der uddelt en fysikpris for verdens længst varende eksperiment, der blev startet i 1927 og endnu ikke er afsluttet. Eksperimentet undersøger, hvordan stivnet sort tjære drypper meget, MEGET langsomt (én gang hvert 9. år) igennem en tragt. Kemiprisen gik til to forskere fra Universiteterne i Minnesota og Wisconsin, der havde undersøgt en af de største videnskabelige gåder: Kan mennesket svømme hurtigere i sirup end i vand? Man kan finde flere af disse temmelig underholdende forskningsarbejder på Ig-Nobels hjemmeside.

Kilde: www.ignobel.com

Grønlands indlandsis bliver tykkere

Et internationalt hold af forskere under norsk ledelse har vist, at de indre egne af indlandsisen på Grønland bliver tykkere. Resultatet bygger på observationer fra ESA-miljøsatlitterne ERS-1, ERS-2 og Envisat, der blev opsendt i henholdsvis juli 1991, april 1995 og marts 2002. Mens de grønlandske gletsjere og randen af isen smelter, viser deres analyser af data fra miljøsatlitterne, at i de centrale egne af Grønland – hvor isen er mere end 1500 meter tyk – forøges isens tykkelse med 5,4 centimeter årligt i perioden 1992-2003. Længere ude mod randen bliver isen modsat tyndere med et gennemsnitligt fald i tykkelsen på 2 cm/år.



Figur 2. Kort over Grønland, der viser de samlede højdeændringer over 11 år. På ESAs hjemmeside (se nedenfor) findes en animation af højdekort i perioden 1992-2003.

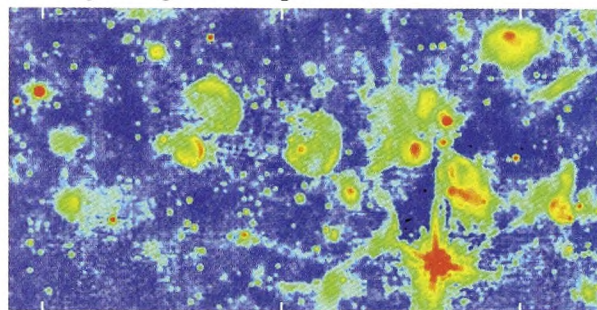
Årsagen til den stigende tykkelse af indlandsisen er et øget snefald, der igen skyldes ændringer i den regionale luftcirkulation – kaldt NAO (North Atlantic Oscillation). Det betyder ikke at den globale opvarmning er aflyst. Tværtimod! Klimamodellerne forudsiger forøget snefald over Grønland, når klimaet bliver varmere. Samtidig vil afsmeltningen i randområderne øges i takt med det varmere klima, der efterhånden vil overhale forøgelse af tykkelsen i de centrale områder, så der vil blive en netto afsmeltning.

Det har desværre ikke været teknisk muligt for de tre satellitter at bestemme tykkelse af isen ved iskanten. Den nye satellit CryoSat skulle have rådet bod på dette, men den gik tabt under opsendelsen den 8. oktober. For øjeblikket overvejer ESA om der skal sendes en Cryosat-2 op som erstatning. Den beslutning ventes taget i slutningen af i år.

Kilde: ESA pressemeddelelse den 4. november 2005, www.esa.int/esaCP/SEMILF638FE_Protecting_0.html

Mælkevejen set med radioøjne

Med radioteleskoper, hvis øjne kan opfange 21 cm stråling (neutral brint) er der lavet et kort over Mælkevejen. Kortet er publiceret af Radioastronomische Institut på Bonns Universitet. Arbejdet er udført sammen med et hollandsk og et argentinsk radioobservatorium. Ud over at bestemme koncentrationen af brint mellem stjernerne kan der også uddrages data om stofkoncentration og hastigheden af partiklerne.

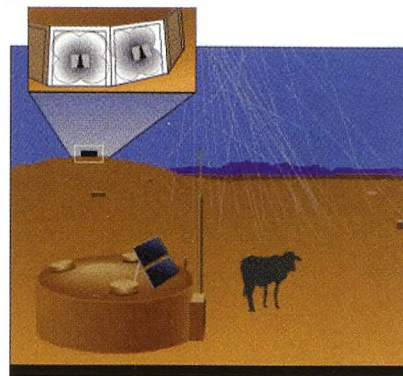


Figur 3. Radioteleskop-billedet viser resterne af 6 supernovaeksplosioner, herunder den Tycho Brahe observerede i 1572.

Kilde: www.mpifr-bonn.mpg.de

Observatorium for kosmisk stråling

I den kosmiske stråling som rammer jorden findes der protoner med en energi på 10^{20} eV. Disse forekommer ganske vist sjældent, men for astrofysikere er det fortsat et mysterium, hvor disse protoner kommer fra og hvordan de får den store energi. På et areal med målene 1 km × 1 km ankommer en sådan højenergiproton en gang for hvert 100. år. Ved registreringen udnytter man den omstændighed, at sådanne protoner ved kontakten med Jordens atmosfære udløser en byge af elektroner og myoner.



Figur 4. Tegning af Pierre-Auger-Observatoriet, der skal detektere meget energirige protoner i den kosmiske stråling.

Med 1000 vandfyldte tanke (hver rummer 12.000 liter) vil man så detektere de udløste partikler. Det interessante ved det nye Pierre-Auger-Observatorium er netop, at "detektoren" dækker flere tusind kvadratkilometer. Efter at været under bygning i 5 år er observatoriet på Pampa Amarilla (Argentina) taget i brug for kort tid siden.

Kilder: www.auger.org/rays/detector.html og www.auger.de

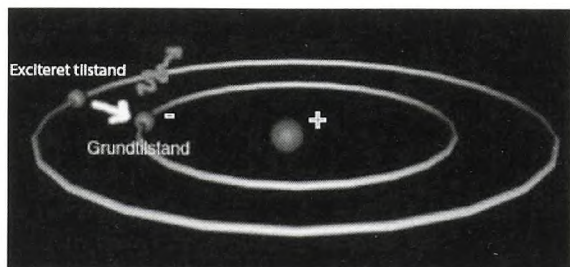
Geometriske og kvantemekaniske symmetrier i atomar struktur

Marianne Dahlerup Poulsen og Lars Bojer Madsen, Institut for Fysik og Astronomi, Århus Universitet

Denne artikel forsøger at give en forståelse af atomar struktur vha. simple geometriske billeder af, hvordan elektroner orienterer sig i forhold til hinanden.

Forståelse af atomar struktur: En-elektron systemer

Bohrs atommodel beskriver strukturen af brint vha. to postulater. For det første kan elektronen kun kredse omkring kernen i baner med en bestemt energi, hvor energien vokser, jo større banen er. For det andet kan elektronen springe fra en bane til en anden ved enten at absorbere eller udsende en foton med en energi svarende til energiforskellen mellem de to baner. Når elektronen ikke er i den inderste bane, siges atomet at være exciteret.



Figur 1. Bohrs atommodel for brint. Under udsendelse af en foton henfalder atomet fra den exciterede tilstand til grundtilstanden. Figuren bearbejdet fra [1].

Schrödingerligningen, kvantetal og konfigurationer

- I kvanteteorien er vores viden om en-elektron systemer, f.eks. brint, beskrevet vha. såkaldte *bølgefunktioner*, Ψ , der er løsninger til den berømte *Schrödingerligning*: $\hat{H}\Psi = E\Psi$. Her er Hamiltonoperatoren, $\hat{H}$, bestemt af operatører hørende til systemets kinetiske og potentielle energi. Værdien E angiver den samlede energi af systemet (Bohrs energiniveauer).

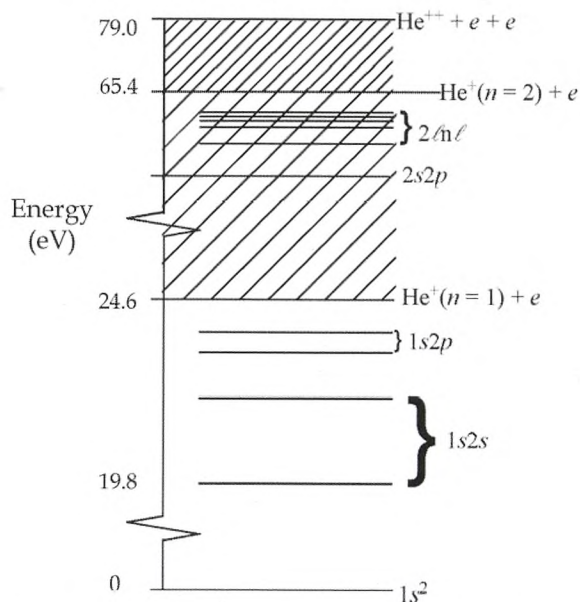
- Bølgefunktionen, Ψ , er karakteriseret ved såkaldte *kvantetal*, der bestemmer funktionens egenskaber, f.eks. energiniveauer. For brint og lignende systemer er kvantetallene n, l og m , hvor n er hovedkvantetallet, som angiver elektronens bane, l er elektronens impulsmoment, og endelig er m projektionen af l på en given z -akse.

- Et sæt af en-elektron kvantetal, $|nlm\rangle$, kaldes en *konfiguration*. Bølgefunktionen for et system med flere elektroner er ofte dårligt beskrevet ved konfigurationer for de enkelte elektroner. Derimod findes der gode overordnede kvantetal, $^{2S+1}L^{\pi}$, som bestemmes af Hamiltonoperatoren. Her er L atomets totale impulsmoment, S det totale spin og π pariteten, dvs. kvantetallet, der angiver symmetrien under inversion af alle koordinater, $\mathbf{r}_i \rightarrow -\mathbf{r}_i$.

For atomer med mere end en elektron (He, Li, Be, ...) er Bohrs billede af baner og enkelt-elektron konfigurationer (se boks) stadigvæk nyttigt for grundtilstanden og enkelt exciterede tilstande, idet Hartree-Fock teori, hvor hver elektron følger tiltrækningen fra kernen samt et middelfelt fra de andre elektroner, er en præcis beskrivelse. Bølgefunktionen, Ψ , der repræsenterer vores viden om elektronernes sandsynlighedsfordeling i rummet, kan derfor udtrykkes ved hjælp af enkelt-elektron konfigurationer, $|nlm\rangle$.

Multipelt exciterede tilstande

Multipelt exciterede tilstande er karakteriseret ved, at flere af elektronerne findes ved afstande fra kernen, der er større end den typiske kerne-elektron afstand i grundtilstanden. Det betyder, at styrken af vekselvirkningen mellem kernen og elektronerne aftager i forhold til den indbyrdes vekselvirkning mellem elektronerne.

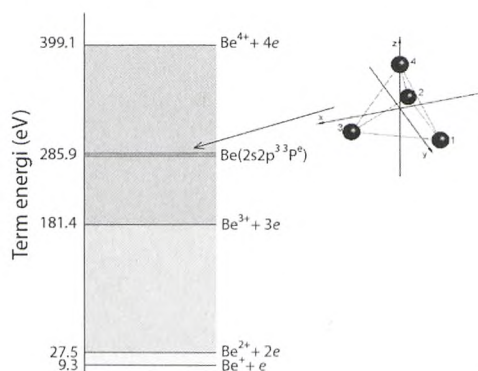


Figur 2. Energidiagram for helium [2] (verificeret både eksperimentelt og teoretisk). Tilstanden mærket $2s2p$ betegner en dobbelt exciteret tilstand ca. 58 eV over grundtilstanden. Kvantetallene $2s2p$ betegner blot de mest dominerende en-elektron tilstande (se tekst).

Det første eksperimentelle studium af multipelt exciterede tilstande blev lavet med helium. På figur 2

ses energidiagrammet for helium. Den første exciterede tilstand ligger 19,8 eV over grundtilstanden, og der skal 24,6 eV til for at løsrive en elektron helt fra kernen. I 1963 påviste man diskrete dobbelt exciterede tilstande med energier, der er større end systemet bestående af en He^+ -ion og en fri elektron [3]. Da de dobbelt exciterede tilstande er i kontinuummet vil de være ustabile og efter typisk 20 – 100 fs henfalde til en tilstand i He^+ -ionen under udsendelse af en energirig elektron. Selv om levetiden af disse dobbelt exciterede tilstande synes kort, er den på en atomar tidsskala lang nok til, at tilstandene har kraftig indflydelse på den atomare dynamik.

Forsøget med helium fastslog, at man definitivt måtte forlade en-elektron billedet for at forklare strukturen af energispektret for de multipelt exciterede tilstande. Således betegner $2s2p$ på figur 2 blot de dominerende konfigurationer for den dobbelt exciterede tilstand. Da middelfeltsbeskrivelser kun kan bruges til beskrivelse af enkelt exciterede tilstande er de utilstrækkelige, og andre teoretiske metoder er nødvendige. Tilstandene skal beskrives med de overordnede kvantetal, $^{2S+1}L^{\pi}$, som bestemmes af symmetrien af systemets Hamiltonoperator. Her er L atomets totale impulsmoment, S det totale spin og π pariteten, dvs. kvantetallet, der angiver symmetrien under inversion af alle koordinater, $\mathbf{r}_i \rightarrow -\mathbf{r}_i$. En måde at studere systemet på er ved direkte numeriske beregninger, der f.eks. kan give energiniveauerne i figur 2. Sådanne beregninger giver imidlertid ikke megen fysisk indsigt. Geometriske modeller kan derimod give en forståelse af den atomare struktur. Eksempelvis vil elektronerne i dobbelt exciteret helium fortrinsvis placere sig diametralt modsat i forhold til kernen for at minimere Coulombfrastødningen mellem elektronerne. Denne geometriske konfiguration svarer til, at kernen og de to elektroner er placeret på en linie. For tre elektroner vil energien være mindst, når elektronerne placeres i hjørnerne af en ligesidet trekant med kernen i midten (se reference [4] for en oversigtsartikel om tre-elektron systemer). I denne artikel vil vi studere fire-elektron tilstande i beryllium og berylliumlignende ioner. Derfor er det nødvendigt at generalisere til tredimensionelle konfigurationer.



Figur 3. Skitse af energidiagrammet for beryllium [2], [5] (numeriske beregninger). Indsættet til højre i figuren viser de fire elektroner i et berylliumlignende system placeret i hjørnerne af et regulært tetraeder. Denne geometriske konfiguration minimerer Coulombfrastødningen mellem elektronerne.

Figur 3 viser en skitse af energidiagrammet for beryllium bestemt ved numeriske beregninger. Det ses, at man skal bruge fotoner med en energi på flere hundrede eV for at excitere alle fire elektroner i beryllium. Der findes endnu ingen eksperimentelle studier af sådanne tilstande. Det teoretiske studium motiveres imidlertid af den seneste udvikling af lyskilder, der netop kan levere intenst, kohærent lys i det relevante spektrale område.

Den fysiske model

Fire elektroner, der bevæger sig i feltet fra en punktførmig kerne med ladning Z , er beskrevet af følgende Hamiltonoperator

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^4 \left(\frac{-\hbar^2}{2\mu} \nabla_j^2 - \frac{Ze^2}{r_j} \right) + V_{ee},$$

$$V_{ee} = \sum_{i < j} \frac{e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, \quad (1)$$

som er karakteriseret ved elektronerne kinetiske energi ($\mu = m_e m_p / (m_e + m_p)$ er elektronens reducerede masse), vekselvirkningen mellem kernen og hver af elektronerne og endelig elektron-elektron vekselvirkningen (V_{ee}), som komplicerer problemet betydeligt. For at tage højde for elektron-elektron vekselvirkningerne i vores model, antager vi, at den totale fire-elektron bølgefunktion er et produkt af fire nøje udvalgte enkelt-elektron bølgefunktioner.

For at bestemme disse enkelt-elektron bølgefunktioner bemærker vi, at Coulomb-frastødningen mellem de fire elektroner er mindst, når elektronerne er placeret i hjørnerne af et regulært tetraeder, som vist til højre på figur 3, hvor kernen tænkes at være placeret i origo. Det betyder, at vekselvirkningen mellem enhver af elektronerne og de andre tre elektroner kan repræsenteres af et frastødende elektrisk felt i retningen af den elektron, der betragtes. Resultatet bliver, at Hamiltonoperatoren for det berylliumlignende system kan erstattes af en sum af brintlignende Hamiltonoperatorer perturberet af elektriske felter

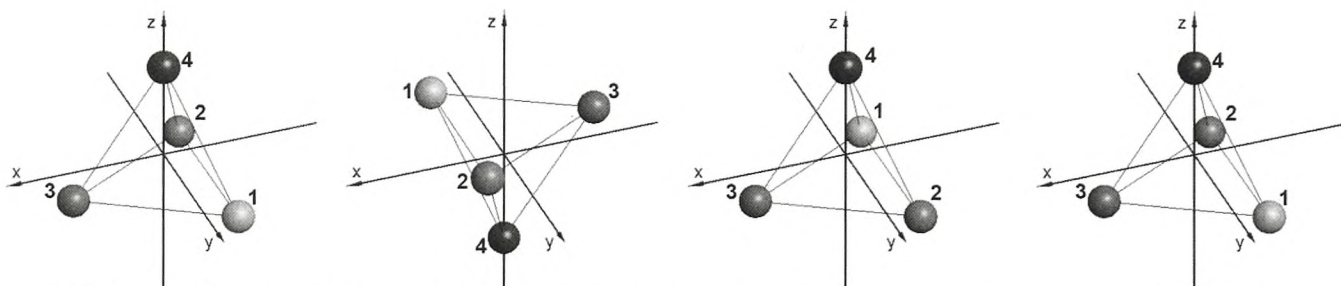
$$\hat{H} = \sum_{j=1}^4 \left(\frac{-\hbar^2}{2\mu} \nabla_j^2 - \frac{Ze^2}{r_j} + e \vec{E}_{\xi_j} \cdot \vec{r}_j \right), \quad (2)$$

hvor E er det elektriske felt, som hver elektron følger. Elektronen på z -aksen i koordinatsystemet vist på figur 3 følger eksempelvis et frastødende elektrisk felt langs z -aksen.

Schrödingerligningen (se boks) kan nu løses eksakt med de såkaldte Stark tilstande [6], som er enkelt-elektron bølgefunktioner. Vekselvirkningen mellem elektronerne får dem altså til at stabilisere sig i individuelle Stark tilstande, og modellen for fire-elektron bølgefunktionen, Ψ , bliver derfor et produkt af fire Stark tilstande

$$|\Psi\rangle = |\text{Stark}\rangle_{\xi_1} |\text{Stark}\rangle_{\xi_2} |\text{Stark}\rangle_{\xi_3} |\text{Stark}\rangle_{\xi_4}, \quad (3)$$

hvor ξ_i angiver retningerne af hjørnerne i det regulære tetraeder.



Figur 4. Placeringen af fire elektroner i hjørnerne af et regulært tetraeder ændres ikke, når systemet først spejles i origo derefter roteres 180° om y-aksen, og elektron 1 og 2 til sidst ombyttes.

Bølgefunktionen er imidlertid konstrueret, så den sfæriske symmetri brydes, idet elektronerne jo er placeret, så frastødningen mellem dem minimeres. Det betyder, at $|\Psi\rangle$ ikke er egentilstand for impulsmomentoperatorerne. Der kan imidlertid tages højde for de kvantemekaniske symmetrier ved at lave en såkaldt rotationel midling over bølgefunktionen (se evt. [7]). Derudover skal spin inkluderes i modellen, og endelig kræver Paulis udelukkelsesprincip, at bølgefunktionen skal skifte fortegn, når to vilkårlige elektroner bytter plads. Resultatet er et analytisk udtryk for bølgefunktionen, $|\Psi^{L\pi S}\rangle$, for de firedobbelt exciterede tilstande i berylliumlignende systemer [7].

Modellen kan bruges til at beregne atomare egenskaber, som f.eks. energiniveauer og relativt forhold mellem forskellige konfigurationer (se boks). Forudsigelserne viser sig at være i god overensstemmelse med præcise numeriske beregninger [7, 8]. Derfor er det rimeligt at hævde, at den fysiske model rent faktisk tager højde for elektron-elektron vekselvirkningerne i firedobbelt exciterede tilstande.

Klassifikation vha. symmetri

Vi har set, at både geometrisk symmetri (figur 3) og kvantemekanisk symmetri (spin, paritet osv.) har betydning for den atomare struktur, og man skal tage højde for begge dele for at kunne lave kvalitative og kvantitative forudsigelser. Strukturens afhængighed af de to typer symmetri gør det muligt at klassificere atomare tilstande udelukkende vha. symmetri, dvs. uafhængig af den model, der beskriver dynamikken i systemet.

Transformationsegenskaberne for en bølgefunktion under symmetrioperationer er bestemt af kvantetal. Symmetrioperationer kan være rotation, spejling eller ombytning af partikler. Vi har allerede set, at den mest fordelagtige geometriske struktur set udfra et energetisk synspunkt er, når elektronerne er placeret i hjørnerne af et regulært tetraeder. Den rumlige udstrækning af bølgefunktionen begrænses imidlertid af de kvantemekaniske symmetrier, idet der kan være steder i rummet, hvor bølgefunktionen er tvunget til at være nul for at opfylde disse symmetrier. Sandsynligheden for at finde elektronerne placeret de steder i rummet er altså nul, selv om konfigurationen måske er den geometrisk mest fordelagtige.

Konfigurationen bestående af fire elektroner placeret i hjørnerne af et regulært tetraeder (RT) er in-

variant overfor forskellige symmetrioperationer. Figur 4 viser et af de sæt operationer, som ikke ændrer placeringen af elektronerne. Først spejles alle koordinater i origo, f.eks. flyttes elektron 4 fra den positive z-akse til den negative z-akse. Dernæst roteres hele systemet 180° om y-aksen, hvorved elektron 3 og 4 kommer tilbage til deres udgangspunkt, og til sidst ombyttes elektron 1 og 2. Da placeringen af elektronerne ikke ændres ved sådanne symmetrioperationer, skal bølgefunktionen også være invariant overfor operationerne de steder i rummet, hvor elektronerne er placeret i geometrien af et tetraeder. Dette bånd på bølgefunktionen resulterer i et sæt lineære ligninger, der kun afhænger af kvantetallene L , S og π . Kun hvis ligningerne har en ikke-triviel løsning for et givent sæt af L , S og π , forventes termen, $^{2S+1}L^{\pi}$, at tilhøre den lavest liggende del af energispektret. I dette tilfælde kaldes tilstanden RT-tilladt. Tabel 1 viser klassifikationen for tilstande med $L \leq 4$ (se evt. reference [8]). Klassifikationen gælder specielt for multipelt exciterede tilstande, hvor elektronernes afstande til kernen er stor, og elektron-elektron vekselvirkningen derfor er af relativ stor betydning.

	RT-tilladte tilstande	RT-forbudte tilstande
$L = 0$	$^5S^o$	$^1S^o, ^1S^e, ^3S^o, ^3S^e, ^5S^e$
$L = 1$	$^3P^e$	$^1P^o, ^1P^e, ^3P^o, ^5P^o, ^5P^e$
$L = 2$	$^1D^o, ^1D^e, ^3D^o$	$^3D^e, ^5D^o, ^5D^e$
$L = 3$	$^3F^o, ^3F^e, ^5F^e$	$^1F^o, ^1F^e, ^5F^o$
$L = 4$	$^1G^o, ^1G^e, ^3G^o, ^3G^e, ^5G^o$	$^5G^e$

Tabel 1. Tilstande som er tilladte i den regulære tetraediske konfiguration (RT-tilladte) forventes at have lavere energi end tilstande, der er forbudte i denne konfiguration (RT-forbudte).

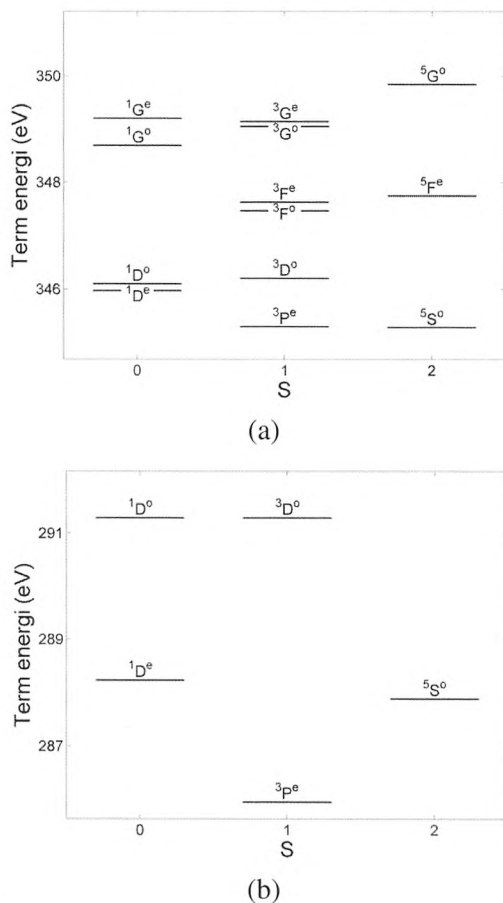
Energispektrum

Energien af de RT-tilladte tilstande kan beregnes ved at bruge det analytiske udtryk for bølgefunktionen fra modellen, $|\Psi^{L\pi S}\rangle$. Energien af en given tilstand er forventningsværdien af Hamiltonoperatoren

$$E_n = \langle \Psi^{L\pi S} | \hat{H} | \Psi^{L\pi S} \rangle. \quad (4)$$

Figur 5 viser energidiagrammet for RT-tilladte tilstande med $n = 2$ og $n = 3$, dvs., figuren viser den lavest liggende del af energispektret for firedobbelt exciterede tilstande i beryllium med hovedkvantetal $n = 2$ og $n = 3$. Det bemærkes, at spektret er i overensstemmelse med figur 3. Termene er klassificeret

efter spin, og det ses, at der er en tendens til, at energien er større for større totalt spin S , når L fastholdes. Det er en modsætning til grundtilstandskonfigurationer, hvor termen med højest spin har lavest energi.



Figur 5. Energispektrum for firedobbelt exciterede tilstande i Be for (a) $n = 3$ tilstande med $L \leq 4$ og (b) $n = 2$.

Den geometriske struktur, som elektronerne sætter sig i omkring origo (se figur 4) er den samme som f.eks. H atomerne omkring C i det sfæriske top molekyle CH_4 . Energispektret adskiller sig imidlertid fra det rotationelle spektrum for et sfærisk top molekyle, der er beskrevet ved formen

$$E = \frac{1}{2I} L(L + 1), \quad (5)$$

hvor I er molekylets inertimoment og L det totale impulsmoment. Dette spektrum afhænger hverken af spin eller paritet imodsatning til spektret for de atomare tilstande. Derudover er afhængigheden af L forskellig i de to spektra. Der er dog lidt rotationel struktur i det atomare spektrum, idet tilstande med højere L har større energi, hvilket også er en modsætning til grundtilstandskonfigurationer. Opførslen af energierne betyder, at man skal være forsigtig med fortolkningen af det geometriske billede af atomet. Selv om modellen giver præcise forudsigelser om de atomare egenskaber ved sammenligning med eksakte numeriske beregninger,

opfører atomet sig ikke som et stift legeme, idet elektronerne ikke er vellokaliserede i rummet, på samme måde som atomerne i et molekyle er det.

Resumé og konklusion

Både geometrisk og kvantemekanisk symmetri har stor betydning for atomar struktur. Det er således muligt at klassificere atomare tilstande udelukkende vha. symmetri. De relative energier er på den ene side bestemt af geometrisk symmetri og på den anden side af kvantemekanisk symmetri. Så vidt det er muligt, vil elektronerne lokalisere sig i den geometriske konfiguration, der minimerer Coulombfrastødningen, men kvantemekaniske symmetrier kan umuliggøre denne fordelagtige konfiguration.

For at forstå elektronerne's vekselvirkning er det udbytterigt at studere multipelt exciterede tilstande, hvor elektron-elektron vekselvirkningen er vigtigere end i grundtilstanden og enkelt exciterede tilstande. I denne artikel har vi præsenteret en analytisk model for firedobbelt exciterede tilstande. Modellen giver et simpelt billede af den atomare struktur og giver samtidig forudsigelser af egenskaber for de exciterede tilstande, der er i god overensstemmelse med præcise numeriske beregninger.

Litteratur

- [1] http://www.emu.dk/elever7-10/fag/fys/temaer/kemisk_binding/2_atommodeller/bohr.html.
- [2] Nist database, http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/levels_form.
- [3] R.P. Madden and K. Codling (1963), Phys. Rev. Lett. bind **10**, s. 516.
- [4] L. B. Madsen (2003), J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., bind **36**, s. R223.
- [5] Y. Komninos and C. A. Nicolaides (1994), Phys. Rev. A, bind **50**, s. 3782.
- [6] J. F. Baugh, D. A. Edmonds, P. T. Nellesen, C. E. Burkhardt, and J. J. Leventhal (1997), Am. J. Phys., bind **65**, s. 1097.
- [7] M. D. Poulsen and L. B. Madsen (2005), Phys. Rev. A, bind **71**, s. 62502.
- [8] M. D. Poulsen and L. B. Madsen (2005), Phys. Rev. A, bind **72**, s. 42501.



Marianne Dahlerup Poulsen er nyuddannet fysiker fra Aarhus Universitet. Lars Bojer Madsen er lektor ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Geometriske og kvantemekaniske symmetrier i atomar struktur

Opgave-hjørnet – Træk i togvogne

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter

Her bringes løsning og kommentarer til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave fra RUC (nr. 22 i rækken i KVANT):

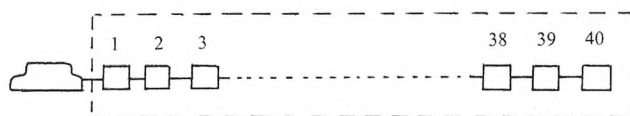
22. Træk i togvogne

Et godstog har 40 ens vogne og et lokomotiv, der vejer 5 gange så meget som en enkelt af vognene. Hvor stor er kraften, hvormed vognene nr. 30 og nr. 31 trækker i hinanden, i forhold til kraften, hvormed lokomotivet trækker i resten af toget? Begrund svaret.

Løsning

Lad os til en start tænke på den situation, at toget har holdt stille og er ved at komme op i fart.

For at finde kraften F_{lok} , hvormed lokomotivet trækker i den første vogn, må vi anvende Newtons 2. lov for et system af partikler. Og vi må vælge systemet af partikler på en måde, der gør F_{lok} til en ydre kraft. Som det er illustreret på figur 1.

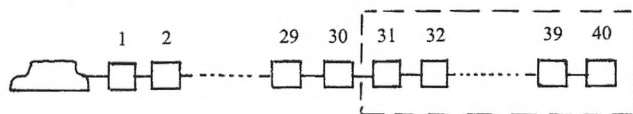


Figur 1. Systemafgrænsning til bestemmelse af lokomotivets træk i toget.

Hvis togets acceleration er a og massen af hver togvogn er m , har vi da ifølge Newtons 2. lov anvendt på systemet bestående af de 40 togvogne:

$$F_{lok} = 40m \cdot a \quad (1)$$

For at finde kraften F_{30} , hvormed vogn nr. 30 trækker i den resterende del af toget, må vi tilsvarende anvende Newtons 2. lov på et system, der er valgt på en måde, så F_{30} er en ydre kraft på systemet. Et sådant system er illustreret på figur 2.



Figur 2. Systemafgrænsning til bestemmelse af vogn nr. 30's træk i vogn nr. 31.

Da accelerationen af togets 10 bagerste vogne naturligvis er den samme som accelerationen af toget som helhed, har vi ifølge Newtons 2. lov anvendt på systemet bestående af de 10 bagerste vogne:

$$F_{30} = 10m \cdot a \quad (2)$$

Svaret på opgaven er altså:

$$F_{30}/F_{lok} = 1/4 \quad (3)$$

hvis der er tale om et først og fremmest accelererende tog.

Hvis toget kører med konstant fart op ad bakke, skal vi for at svare på opgaven benytte de samme to systemafgrænsninger igen. For hver af de to systemer gælder da, at summen af ydre kræfter på dem må være 0, hvorfor F_{30} må være lig med tyngdekraftkomponenten langs skinnerne af 10 vogne og F_{lok} må være tyngdekraftkomponenten langs skinnerne af 40 vogne. Hvorfor forholdet imellem de to træk også i denne situation er 1/4.

Hvis toget er ligeudkørende med konstant fart under overvindelse af gnidnings- og luftmodstand vil svaret på opgaven tilsvarende være 1/4, hvis gnidnings- og luftmodstanden antages ligeligt fordelt på togvognene.

Kommentarer

1. Gennem årene har jeg ved forskellige lejligheder prøvet at stille opgaven til ikke – fysikere, f.eks. tværfagligt sammensatte forsamlinger af gymnasielærere. Der har da sjældent været vanskeligheder med at få kommunikeret opgavens problem. Og det har heller ikke været svært at få de to typiske spontane bud på svarmuligheder:

- 1) Trækket fra lokomotivet i resten af toget og trækket fra vogn nr. 30 i vogn nr. 31 er lige store;
- 2) Trækket fra lokomotivet er 4 gange så stort som vogn 30's træk i vogn 31.

Men usikkerheden på, hvilken af de to svarmuligheder, der er den rigtige, har vist, at opgaven er vanskeligere end den fysikuddannede måske umiddelbart vurderer den til at være.

Men hvori ligger da det vanskelige i opgaven? I forståelsen af Newtons 2. lov? Faktisk ikke. Det er ikke de kendte tegnelsesvanskeligheder ved at forstå det kontraintuitive begrebsindhold i Newtons bevægelsesligning til forskel fra Aristoteles opfattelse af kraft som forudsætning for opretholdelse af bevægelse, der her er tale om. Tværtimod lader opgaven sig besvare korrekt og nemt ved brug af Aristoteles bevægelsesskema: **kraft = masse × hastighed**, idet hastigheden af den bagerste del af toget jo er den samme som hastigheden af toget i sin helhed, hvorfor forholdet imellem de to kræfter må være som forholdet imellem de to masser, dvs. 1/4.

Vanskeligheden i opgaven ligger tilsyneladende i selv at skulle tænke i de nødvendige systemafgrænsninger. At opdele og afgrænse systemer for at kunne analysere dem er ikke en selvindlysende kunsten. Træning heri indgår derfor også som et vigtigt element i mange ingeniøruddannelser. Og besvarelsen af opgaven her består i andet og mere end at anvende Newtons 2. lov. Eller rettere sagt: Anvendelse af Newtons 2. lov kræver mere end at kunne loven.

2. I den traditionelle lærebogsudledning af tyngdepunktsætningen ud fra Newtons 2. lov for en enkelt partikel, altså udledningen af Newtons 2. lov for et system af partikler, foretages der selvsagt en systemafgrænsning. Ved udledningen:

$$\begin{aligned}
m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_j F_{ij, j \neq i} + F_{iy} \quad \text{for alle } i \Rightarrow \\
\left(\sum_i m_i \right) \frac{d^2 x_{cm}}{dt^2} &= \sum_i m_i \left(\frac{d^2 x_{cm}}{dt^2} \right) \\
&= \sum_i \sum_j F_{ij, j \neq i} + \sum_i F_{iy} \\
&= \sum_i F_{iy} \quad (4)
\end{aligned}$$

ligger systemafgrænsningen i, hvad der summeres over i summationerne, og hvilke kræfter, der tilsvarende regnes for henholdsvis systeminterne (F_{ij}) og systemeksterne (F_{iy}). Imidlertid er det langt fra sikkert, at fysikstuderende indforståede med rigtigheden af udledningen (4) er bevidste om, at den tilgrundliggende systemafgrænsning ikke er der fra naturens hånd. Og det er langt fra sikkert, at de kan besvare togopgaven her, fordi de finder udledningen (4) rigtig.

Derimod er det min erfaring, at arbejde med togopgaven (og tilsvarende opgaver) kan få de studerende til at interessere sig for og forstå (4) mere dybtgående end før. I det hele taget er læring jo for de fleste en udpræget induktiv proces, hvor abstrakte og generelle afklaringer fremkommer som ordninger af mængder af konkrete og mere håndfaste erfaringer. Hvorimod fysiklærebøgerne oftest deduktive fremstillinger er måden stoffet er present på for den, der har lært det. Derfor er – modsat fysikundervisningstraditionen på universiteterne – opgaverne i breddekurset på RUC forsøgt skudt foran lærebogen i profileringen af kurset.

3. Max Hansen, Sønderborg, har i et brev til KVANT leveret sin besvarelse af opgave 22. Udover at give det simple svar på opgaven, at trækkes mellem vogn 30 og 31 er en fjerdedel af trækkes mellem lokomotivet og første vogn, overvejer MH en længere række eventuelt komplicerende forhold. MH skriver blandt andet:

“Luftmodstanden vil ikke være ens for alle vogne. De første vogne vil have større luftmodstand end de sidste vogne på grund af, at luften rives med af toget, således at hastigheden og mængden af den medfølgende luft vil forøges langs toget. De sidste vogne vil være i læ af de første. Den sidste vogn vil derudover have et større tryk på bagsiden, da den medfølgende luft nu bremses op, og trykket ifølge Bernoulli forøges. Det sidste er en ikke ringe effekt, under gunstige forhold kan denne effekt være så stor at den sidste vogn ville følge med toget, selvom den ikke var fastgjort. Er der lang tid mellem, at der kommer tog, vil skinnerne være forurenet af rust og lignende. Det vil betyde, at de første vogne vil have større modstand end de sidste, da snarset vil blive mast væk af de første og efterlade helt blanke skinner til de sidste. Hjulenes rullemodstand og hastighed afgiver en effekt til skinnerne der opvarmer skinnerne efterhånden som toget passerer. Temperaturændringen ændrer skinnernes komplekse E-modul og tabene vil være forskellige foran og bagerst i toget. Det samme vil i nogen grad være tilfældet for hjulene, hvor de forreste kører på koldere skinner end de bagerste og dermed bliver koldere end de bageste. Da togvognene for en stor del er lavet af magnetisk materiale og der er tale om en lang kæde af magnetisk materiale, vil jordens magnetfelt koncentreres i vognene på en sådan måde at vognene vil tiltrække hinanden. Herved bliver trækkes i trækkroen mellem de midterste vogne mindre end det ellers ville have været. Denne virkning vil være størst, når toget kører retning nord syd.”

For en jernbaneingeniør må det være afgørende på samme måde som MH så omfattende som muligt at kunne komme i tanke om eventuelt komplicerende forhold. Men vel også at kunne skelne små og store effekter fra hinanden. Umiddelbart vil jeg på linie med MH tro, at virkningerne af de aerodynamiske forskelle ned langs toget, faktisk kan være betydelige. Hvorimod jeg har svært ved at tro, at magnetiseringerne af togvognene skulle have nogen virkning af betydning i opgavesammenhængen. Men jeg vil i øvrigt ikke kommentere indlægget i detaljen. Derimod giver MHs opgavebesvarelse mig anledning til en almen bemærkning om breddeopgavegenren.

Når breddeopgaverne som led i en fysikuddannelse ofte vedrører virkelige, ikke tænkte, problemstillinger hentet uden for fysikken, skyldes det ikke en opfattelse af, at man kan tackle alle mulige problemer alene ved hjælp af fysik, og at ingeniørvidenskab kan reduceres til anvendt fysik. Valget af de ofte tilsyneladende ingeniørordrede problemer skyldes dels et motiveringshensyn til de studerende, dels at det ønskes illustreret, at fysikkens karakter af teoretisk, forklarende videnskab netop gør den brugbar til at overskue dele af virkeligheden med, og at fysikken ikke er det skolastiske, selvbestemmende system, som den ofte på grund af sit stærkt teoretiske præg ofte forveksles med. Men forståelsen i bund af opgavernes problemstillinger er ikke målet med undervisningen. Opgaverne er et middel til at lære at tænke som fysiker.

23. Darcys lov.

Inden næste nummer af KVANT udkommer kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne breddeopgave (fra sygeeksamen september 1987, nr. 23 i rækken her i KVANT):

I hydrologien beskrives vands strømning i undergrunden ved den såkaldte Darcys lov. Den udsiger, at strømningshastigheden et givet sted er proportional med trykfaldet pr. længdeenhed det pågældende sted. Proportionalitetskonstanten afhænger af, om det f.eks. er ler, sand eller grus, der gennemstrømmes, og den kaldes det pågældende materiales permeabilitet for vand. Permeabiliteten må antages at afhænge af både størrelse, form og sammenpakning af de korn, materialet består af. Hvordan afhænger permeabiliteten af kornstørrelserne i materialer, hvis kornformer og sammenpakningsmåder antages ens? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

Fysikbasen.dk – over 100 fysikforsøg.

FYSIKBASEN.DK er en database med pædagogiske fysikforsøg til lærere på alle trin i undervisningssektoren. Database er delvist baseret på forsøg, der er udviklet og afprøvet af Fysikshowet ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet.

I databasen findes over 110 demonstrationsforsøg. Man kan søge efter forsøg ved hjælp af faglige nøgleord og se forslag til korte undervisningsoplæg, der kæder forsøgene sammen. Til forsøgene findes referencer, figurer, billeder, lister over nødvendigt udstyr samt spørgsmål-og-svar sektioner. Flere forsøg vil løbende blive lagt i databasen.

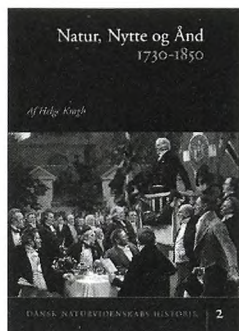
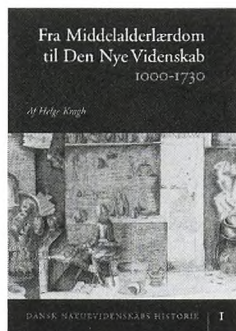
Find f.eks. forsøg med balloner, bowlingkugler, magneter, mikrobølgeovne og meget mere.

Aktuelle bøger

1000 års dansk naturvidenskab

Dansk Videnskabs Historie bind 1-2

Forfatter: *Helge Kragh*, Aarhus Universitetsforlag 2005 (www.unipress.dk). 480 sider, ill., 500 kr. pr. bind.



Frem til i dag har vi haft beskrivelser af den danske kulturs historie, den dansk litteraturs historie, dansk billedkunsts historie osv., men der har ikke eksisteret en samlet beskrivelse af dansk naturvidenskabs historie. Nu foreligger der imidlertid de første to bind af et stort og gennemillustreret firebindsværk "Dansk Naturvidenskabs Historie" (DNH), som er resultatet af et videnskabshistorisk forskningsprojekt, som 30 danske og udenlandske (videnskabs-)historikere har arbejdet på de sidste fem år. De to sidste bind i serien udkommer til april 2006.

Værket starter – efter nogle overvejelser om vikingetidens tekniske kunnen og dens mytologi – i praksis med tiden omkring 1200, og det første bind, der har titlen "Fra Middelalderlærdom til Den Nye Videnskab" dækker tiden indtil ca. 1730. Bind 2, der har titlen "Natur, Nytte og Ånd", dækker perioden 1730-1850, mens det er planlagt at bind 3 ("Lys over Landet") dækker tiden fra 1850 til 1920 og det sidste bind ("Viden uden grænser") perioden 1920-1970. De to første bind er redigeret af Helge Kragh, der er professor i videnskabshistorie ved Steno Institutet på Aarhus Universitet, mens bind 3 redigeres af Peter C. Kjærgaard og bind 4 af Henry Nielsen og Kristian Hvidtfelt Nielsen.

Vore kendte verdensberømtheder som Tycho Brahe, Ole Rømer og H.C. Ørsted har fået deres berettigede plads gennem en grundig behandling af deres opdagelser, men de hundredevis af naturvidenskabelige forskere, der med mere beskedne bidrag har præget det naturvidenskabelige miljø gennem de seneste 1000 år, har nu også fået deres plads i historien.

Et af spændende aspekter ved værket er, at der er lagt stor vægt på at se forskningen (og de ofte kontroversielle resultater) i deres tætte samspil med de politiske magthavere og religiøse autoriteter. F.eks. redegøres der for, hvorledes indførelsen af enevælden i 1660 ændrer magtforholdene og rangsystemet, således at der nu lægges vægt på militære og administrative embeder. Det fjerner samtidig accepten af forskningen for forskningens egen skyld og får forskerne til at satse på administration og gøre karriere som praktiske altnulmænd. Efter en videnskabelig guldalder i 1645-1665 begynder der derfor en markant nedgangsperiode, hvor Rømer næsten var det eneste lyspunkt. Ole Rømer blev efter sin hjemkomst fra Paris også brugt (og misbrugt) til en lang række praktiske og administrative opgaver, og når han al-

ligevel var i stand til at arbejde videre med sine astronomiske studier skyldes det udelukkende hans legendariske flid.

Et andet spændende aspekt er at iagttage, at der ikke altid er så meget nyt under solen, som vi måske har tendens til at mene i dag. Et eksempel er Anders Sunesen der allerede omkring år 1200 afviste astrologien, ganske vist af teologiske årsager: "Nej, ikke det så sig forholder at efter stjernernes stilling sig alt må i lydighed føje. Mennesket er jo velsignet af Gud med en tænknings gave, skulle det da være træl for en livløs og sanseløs stjerne? Ej har på himlen han stjernerne sat, for at dem vi skal lyster". Tankegangen bag indførelsen af undervisning i fysik og anatomi på Københavns Universitet er også interessant. Ved at påpege de skabte tings skønhed og nytte ville man bevise Guds forsyn og almagt, og studiet af menneskekroppen, skabt i Guds billede, var et glimrende middel til at indprente de studerende beundring og frygt for den almægtige skaber. Teorien om intelligent design ser således heller ikke ud til at være af nyere dato.

Et enkelt irritationsmoment er, at en række fagudtryk og begreber, som næppe kan siges at være almene, bruges i flæng og ofte først forklares senere i teksten. Ganske vist kan man få hjælp af registeret og slå udtrykkene op andetsteds i bogen, men det burde have været muligt at læse værket som en lang tekst, når nu forfatterne lægger vægt på, at DNH netop ikke er et leksikon. Bortset fra dette er teksten velskrevet og der er gode illustrationer, så det er svært at lægge værket fra sig igen, når først man er gået i gang, og bøgerne kan bestemt anbefales til alle naturvidenskabeligt interesserede.

Prisen er desværre ikke helt billig, idet hvert bind koster 500 kr., men man kan købe hele værket for 1500 kr. Hvert bind er på ca. 480 sider, indbundet. DNH er udgivet af Aarhus Universitetsforlag.

JOPP

PFEIFFER VACUUM

NYHED

Markedes nyeste
Tørtløbende Vacuumpumpe

RevoDry™

Kapacitet:
50-490 m³/h

Sluttryk:
<0,05 - < 1 mbar

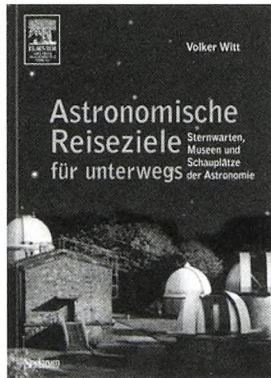
Ring for yderligere information

Tel. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk

Astroturisme på tysk

Astronomische Reiseziele für unterwegs – Sternwarten, Museen und Schauplätze der Astronomie

Forfatter: Volker Witt. Forlaget Elsevier, Tyskland, 2004, 334 sider, ill., ca. 30 euro. Kan bl.a. bestilles på www.science-shop.de.



Denne bog er tænkt som en turistguide til astronomiske seværdigheder. Den består af en stor samling faktuelle oplysninger om observatorier og astronomihistoriske seværdigheder.

De første 8 kapitler af bogen (184 sider) gennemgår observatorier i Europa, Nordamerika og Chile. For hvert observatorium fortælles om dets historie, hvilke kendte astronomer, der har virket ved det, og hvilke instrumenter, det har været og nu er udstyret med. Endvidere angives observatoriets adresse, hvordan man kommer frem til det, åbningstider mv.

Så følger et kapitel på 25 sider om historiske observatorier, heraf 2 danske: Rundetårn og Ole Rømers landobservatorium. Næste kapitel på 53 sider handler om astronomihistoriske museer og seværdigheder, herunder museerne for Kepler, Herschel, Tycho Brahe og Copernicus. Også her er alle detaljer kommet med: Adresser, adgangsveje, åbningstider og billetpriser. Det er måske ikke nogen god idé at medtage sådanne oplysninger i en bog – de bliver hurtigt forældede.

Næste kapitel handler om megalitiske observatorier samt meridianer. Det drejer sig ikke kun om Stonehenge, men også om mindre kendte megalitiske anlæg, f.eks. Externsteine i Teutoburger Wald. Det ligger ca. midtvejs mellem Hannover og Dortmund og består af 5 klippesøjler, 30 meter høje. Bogen afsluttes med et kapitel om meteorkraterer og om museer med større samlinger af meteoritter, hvor Geologisk Museum i København er medtaget.

Forfatteren, Volker Witt, har tilsyneladende indsamlet materiale til sin bog på forskellig måde. Så vidt det kan ses, er lidt under halvdelen af bogens afsnit baseret på selvsyn, hvor Witt har besøgt og fotograferet den seværdighed, han skriver om. Et tilsvarende antal afsnit synes at være baseret på indhentet informationsmateriale fra det pågældende museum mv. og studier i litteraturen. Endelig er der 16 afsnit, som Witt har fået andre til at skrive.

Det er et imponerende stort materiale, der her er samlet, selv om en bog af denne karakter ikke kan have "alt" med. Således er seværdigheder med tilknytning til store astronomer som Newton og Hevelius ikke med i bogen, og Regiomontanus er kun lige nævnt.

Det er en fornøjelse at læse i bogen, man støder hele tiden på interessante detaljer. Den er måske ikke så velegnet til

at læse i ét stræk, men den kan opfattes og bruges som et opslagsværk. Der er nogle steder, hvor systematikken kan diskuteres. Således er der i kapitlet om observatorier i Italien et afsnit om astronomi i Firenze, og det fortæller om andet end observatorier, f.eks. om Galileis sidste bolig og hans grav. Tilsvarende er der i kapitlet om historiske observatorier et afsnit om astronomi i Prag, og det handler om meget andet end observatorier. I dette kapitel kan man også læse om Lord Rosses observatorium i Birr, hvorimod Herschels husobservatorium i Bath og Tycho Brahes observatorier på Ven er placeret i kapitlet om astronomihistoriske museer og seværdigheder.

Ret mange afsnit rummer mere, end hvad der fremgår af overskriften, f.eks. er Copernicus-museet i Toruń sat ind sidst i et afsnit med overskriften Copernicus-museet i Frombork. Og de afsnit, der efter overskrifterne skulle handle om Herschels hus i Bath og Tycho-museet på Ven indeholder en beskrivelse af hele deres livsforløb, også før og efter Bath henholdsvis Ven.

Disse systematiske spørgsmål betyder dog ikke så meget, når man skal anvende bogen i praksis, for man kan altid via registre finde frem til en bestemt lokalitet.

Bogen kan meget anbefales til tematurister, som kan bruge bogen til at planlægge en ferierejse, hvor man gerne vil opsøge nogle spændende astronomiske og astronomihistoriske seværdigheder.

Peter Gadman

Bohrs samlede værker

Niels Bohr Collected Works – vol. 11

The Political Arena (1934–1962)

Redigeret af: Finn Aaserud. Amsterdam: Elsevier 2005 (www.elsevier.com¹). 780 sider, 165 euro.

Udgivelsen af Niels Bohrs samlede værker, som startede i 1972, er ved at nå sin afslutning. De samlede værker indeholder samtlige af Bohrs publikationer, i facsimile og i engelsk oversættelse. Der bringes også upublicerede manuskripter og breve til belysning af publikationerne, samt historiske indledninger af redaktørerne. Det materiale, der skulle rummes i ét sidste bind, har vist sig så omfattende, at der nu udgives to bind. Bind 11 udkommer december 2005 og bind 12 i løbet af 2006. "Niels Bohr Collected Works" består i sin helhed af følgende bind¹:

1. Early Work (1905–1911)
2. Work on Atomic Physics (1912–1917)
3. The Correspondence Principle (1918–1923)
4. The Periodic System (1920–1923)
5. The Emergence of Quantum Mechanics (mainly 1924–1926)
6. Foundations of Quantum Physics I (1926–1932)
7. Foundations of Quantum Physics II (1933–1958)
8. The Penetration of Charged Particles Through Matter (1912–1954)
9. Nuclear Physics (1929–1952)
10. Complementarity Beyond Physics (1928–1962)
11. The Political Arena (1934–1961)
12. Popularization and People (1911–1962).

¹ Hele serien er omtalt på www.elsevier.com/wps/find/bookdescription.cws_home/BS_NB/description

Som det fremgår, omhandler bind 1-9 Bohrs arbejder indenfor fysik. Bind 10 rummer et udvalg af Bohrs filosofiske skrifter, mens bind 11 handler om Bohrs politiske engagement og bind 12 om hans populære arbejder samt nekrologer og andre lejlighedsskrifter for kolleger, venner og familie.



Til venstre: Frontispice i bind 11. Aage og Niels Bohr arbejdede tæt sammen under deres eksil i England og USA under 2. Verdenskrig. Til højre: Portrættet af Niels Bohr, som præger forsiden af bøgerne.

Bind 11 og 12 er redigeret af videnskabshistoriker Finn Aaserud, der også er leder af Niels Bohr Arkivet² og serien udgives af forlaget Elsevier.

Første del af bind 11 dokumenterer Bohrs omfattende mission for at skabe en "åben verden" mellem nationerne. Dette arbejde var motiveret af Bohrs bekymring for anvendelsen af kernevåben – en teknologi der bygger på fission, som Niels Bohr gav den teoretiske forklaring på i 1939. Da Bohr efter sin flugt til England i 1943 indså, at bomben var ved at blive en realitet, lagde han et stort arbejde i at skabe større forståelse mellem nationerne for at forhindre eventuel misbrug af teknologien. Under krigen bestod kampagnen nødvendigvis af private samtaler med politikere, inklusive premierminister Churchill og præsident Roosevelt, som efter krigen blev suppleret med radiotaler og publicerede artikler. Bohr fortsatte sin indsats frem til sin død i november 1962 hvor den kolde krig, med oprustning af kernevåben, for længst var blevet en realitet. Bohrs indsats dokumenteres til dels med hidtil utilgængeligt arkivmateriale, både fra Niels Bohr Arkivet og andre arkiver. Anden del dokumenterer Bohrs øvrige politiske og sociale engagement, bl.a. hans taler som præsident (1939–1962) for Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab og hans indsats som den første formand for Atomenergikommissionen (1955–1962).

Bøgerne i serien koster mellem 165 og 438 euro (fra 920 til 2.400 kr), mens hele værket kan erhverves for 1295 euro (ca. 9.800 kr).

MCA

Lær at læse nattehimmels stjerner

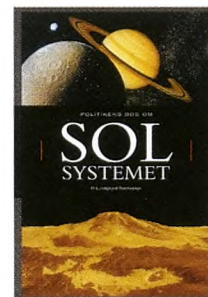
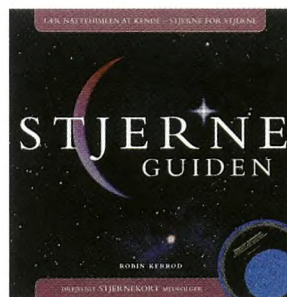
Stjerne Guiden

Forfatter: *Robin Kerrod*, oversat af Jan Teuber. Forlaget Aktium 2005 (www.aktium.dk). 160 sider, 199 kr.

Denne bog lægger op til observationer af stjernehimlen med egne øjne eller en håndholdt kikkert. Bogen har i tidligere udgaver igennem et årti været et internationalt populært redskab for amatørastrofysikere og det er en opdateret og ajourført udgave, som nu er oversat til dansk. Der er vedlagt et drejeligt stjerne kort i bogen som er en meget god hjælp til egne observationer. Bogen er opbygget med 2-siders opslag om hvert emne med stigende detaljeringsgrad og krydshenvisninger, så man nemt kan gå i dybden. Bogen er hele vejen igennem rigt illustreret med bl.a. billeder fra Hubble Rumteleskopet. Stikordsregistret udmærker sig ved, at have næsten

alle Messier-objekter med. Det er en bog for begyndere – fra ca. 12 år – men så får man også en god oversigt og måske lyst til at observere og lære mere om Universet...

MCA



Solsystemet i udvikling

Politikens bog om Solsystemet

Forfatter: *Ib Lundgaard Rasmussen*. Politikens Forlag 2005 (www.politikensforlag.dk). 248 sider, illustreret, 269 kr.

"Den tekniske udvikling og udforskningen af universet har revolutioneret vores opfattelse af universet. Det er både blevet større, dynamisk og måske fuld af liv."

Sådan skriver astrofysiker Ib Lundgaard Rasmussen i sin bog om Solsystemet. Bogen følger ikke den traditionelle opbygning med en systematisk gennemgang fra Merkur til Pluto men tager udgangspunkt i den senest indhøstede viden og koncentrerer sig om de problemstillinger der har forandret vores opfattelse af verden. Et centralt spørgsmål er: Menneskehedens muligheder og udfordringer i et Solsystem, der har langt større indflydelse på vores forhold end tidligere erkendt. Her kan nævnes Solens aktivitet, der præger Jordens klima eller forandringen af Solsystemets måner fra lysprikker på himlen til kloder med egen historie eller opdagelsen af det ydre Solsystem og andre solsystemer. Hvad betyder det for vores virkelighedsopfattelse?

En af de spændende historier er hvordan opdagelsen af nedslagskratere på andre planeter har forandret forståelsen af Jordens tidlige historie. Tidligere troede man, at alle kratere på Jorden var vulkanske kratere – bl.a. fordi man troede atmosfæren ville beskytte mod store sten fra rummet. Desuden var kratere typisk runde og det var utænkeligt, at alle sten var faldet lodret ned. Det var derfor først omkring 1910, at det første nedslagskrater på Jorden blev forklaret med et legeme fra rummet, da man fandt rester af jern som kom fra rummet. Efter studier af bombekratere under 2. verdenskrig lærte man, at nedslagskratere alle var runde fordi de var resultatet af en eksplosion forårsaget af den enorme energi der omsættes ved sammenstødet. Kratere på andre himmellegemer afslører med andre ord, at de er opbygget gennem kollisioner. Rumsonder har siden afsløret, at mange andre himmellegemer er fyldt med kratere.

Bogen fortæller bl.a. også om "Solsystemets dannelse", "Andre solsystemer", "Ringe og hyrdemåner", "Månesystemer", "Stenplaneterne", "Gasgiganterne", "Vand og liv" og "Liv andre steder". Bogen er velskrevet og spændende og rummer mange nyere resultater – f.eks. billeder fra Mars Exploration Rovers og fra Titan. På omslaget findes tabeller med de fleste relevante data om planeterne. Der er en fyldig ordliste og forslag til litteratur til hvert kapitel. Kort sagt, en frisk oversigt over Solsystemet der varmt kan anbefales.

MCA

²www.nba.nbi.dk

Afsender:
KVANT
c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
2100 København Ø

Returneres ved varig adresseændring
Magasinpost B



Nordisk Netværk for Kvinder i Fysik

Anja C. Andersen, Dark Cosmology Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og Cathrine Fox Maule, Teoretisk Geofysik & Planetaryfysik, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Der er sket meget i fysik siden Einstein i følge legenden sad på et patentkontor og udledte den specielle relativitetsteori. I løbet af de 100 år er kvinder blevet tilladt adgang til de højere uddannelser i samtlige af de nordiske lande. Kvinders adgang til universiteterne har været en utrolig succeshistorie og idag er andelen af kvinder der starter et universitetsstudie af samme størrelsesorden som andelen af mænd. Udviklingen af andelen af kvinder i faste videnskabelige stillinger i fysik har dog ikke den samme klang af succes over sig – se tabellen, der viser antallet af fastansatte kvinder i fysik ved et udvalg af danske universiteter i 1975 og 2005. Tallene for 2005 er opgjort i september.

Universitet	1975	2005
Aarhus Universitet	0	0
Københavns Universitet	4	4
Roskilde Universitets Center	1	2
Syddansk Universitet	0	1
I alt	5	7

Der er ingen af de nordiske universiteter hvor man behøver mere end én hånd for at kunne tælle andelen af kvindelige fastansatte forskere. Formålet med at øge antallet af kvindelige forskere er at forbedre udnyttelsen af Danmarks forskerpotentiale. Et af de få initiativer der har været i Danmark for aktivt at gøde vækstlaget af kvinder i forskerverdenen samt fastholde kvinder i forskning var FREJA projektet der blev søsat i 1998. Hvordan det gik med de projekter kan læses i rapporten *Det betaler sig at støtte kvinders forskning* (findes på www.kif.nbi.dk/Freja2.pdf).

Nordisk Netværk for Kvinder i Fysik (NorWiP) blev etableret i Bergen i August 2005, i forbindelse med afholdelsen af det første nordiske møde for kvinder i fysik i anledning af Verdens Fysikåret. Der var hundrede kvindelige fysikere fra samtlige af de fem nordiske lande og mødet forløb over to en halv dag. Programmet (se www.ift.uib.no/nwip2005) var en blanding af faglige foredrag inden for de forskellige fysikdiscipliner samt foredrag omhandlende køn i akademien.

Læs videre på side 24.



Figur 1. Gruppebillede af deltagerne til NorWiP mødet i Bergen.