

KVANT

April
2011

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 22. årgang

- NOBELPRISEN 2010 – TODIMENSIONALT KULSTOF
- EUROPÆISK SYNKROTRONSTRÅLINGSFACILITET I LUND
- JAPANSK VIFTESTRØMNING OG HVIRVELDANNELSE I SÆBEFILM
- FESTLIGT FYSIKFORSØG – GLASSET DRIKKER, LYSET HÆVES
- OPDAGELSEN AF ATOMKERNEN – ET 100 ÅRSJUBILÆUM
- EN GLACIOLOGISK BEGIVENHED
- KVANT-NYHEDER

Løssalgspris: 45 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.),
Christianshavns Gymnasium
Torsten Freltoft,
Sophion Bioscience A/S
Anja Skaar Jacobsen,
Niels Bohr Arkivet
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør),
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Ørsted Lab, Københavns Universitet
Svend Erik Rugh

Korrektur

Natalia Golubeva,
Aarhus Universitet
Torben Westerberg

Foreningsrepræsentanter

Lone Djernis Olsen (KIF)
Torben Lund Skovhus (SNU),
Teknologisk Institut

Abonnementspris : 180 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: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2200. Tryk: HCB Tryk ApS, Brønderslev. ISSN 0905-8893

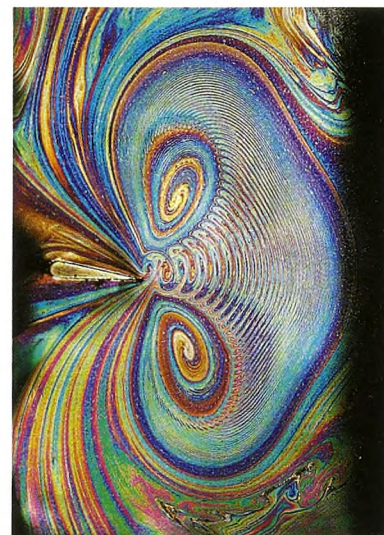
Produktionsplan

Nr. 2-11 udkommer ca. 1. juni
Nr. 3-11 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Opdagelsen af atomkernen: Et 100-årsjubilæum <i>Helge Kragh</i>	3
En glaciologisk begivenhed <i>Preben Gudmandsen</i>	7
“Japansk” viftestrømning og hvirveldannelse i en sæbefilm <i>Anders Andersen, Tomas Bohr, Teis Schnipper og Laust Tophøj</i>	10
Nobelprisen 2010: Todimensionalt kulstof <i>Jesper Nygård og Finn Berg Rasmussen</i>	13
Dansk Fysisk Selskab – Årsmøde den 21.-22. juni	17
KVANT-nyheder <i>Sven Munk og John Rosendal Nielsen</i>	19
Netværk for Kvinder i Fysik – Årsmøde den 3. maj	20
Festligt fysikforsøg – Glasset drikker, lyset hæves <i>Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugh</i>	21
ESS: En forskningsfacilitet i verdensklasse under opbygning i Lund <i>Kim Lefmann, Lise Arleth, Niels Bech Christensen, Søren Pape Møller, Stig Skelboe, og Peter Kjær Willendrup</i>	25
Rulning – breddeopgave 41 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	33
Foreningsnyt – foredrag i foråret	35
Ring af sorte huller <i>John Rosendal Nielsen</i>	Bagsiden

Når forskere køber sæbeboblevand i BR Legetøj og laver forsøg med viftestrømninger i sæbefilm kan der komme forbavsende og smukke mønstre ud af det, ligesom det smukke billede på forsiden. På billedet ses en viftestrøm frembragt af en finne i en vandret sæbefilm. I løbet af lidt over et halvt sekund, svarende til 70 oscillationsperioder, er der dannet 70 gange to hvirvler, som af viftestrømmen skubbes ned, strækkes ud og vikles rundt i to spiralstrukturer, én på hver side af finnen. Læs mere i artiklen om “Japansk viftestrømning” inde i bladet. Fotoet er først publiceret i forfatterens artikel “Japanese fan flow”, *Physics of Fluids* **22**, 091102 (2010). Foto: Teis Schnipper.



KVANT udsendes gratis til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra fysikinstitutterne på Danmarks Tekniske Universitet samt Københavns, Syddansk, Aalborg og Aarhus Universiteter.

Opdagelsen af atomkernen: Et 100-årsjubilæum

Af Helge Kragh, Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet

Det engelske fysiktidsskrift *Philosophical Magazine* indeholdt i maj 1911 en artikel om spredning af alfa- og beta-partikler, hvori Rutherford argumenterede for en ny opfattelse af atomets struktur. Hans påvisning af atomkernen for 100 år siden er en milepæl i fysikkens historie, også selv om den ikke straks vakte interesse. Dette skyldtes især at elektronsystemet var uden for teoriens rækkevidde, hvorfor dens forklaringskraft var meget begrænset. Men i løbet af et par år blev der rådet bod herpå, nemlig da Rutherfords kerneatom blev til Bohr-Rutherford-atommodellen.

En revolutionær periode

Det teoretiske fundament for den moderne fysik går tilbage til starten af det 20. århundrede, især til Plancks formulering af kvantehypotesen i 1900 og Einsteins specielle relativitetsteori fra 1905. Hundredåret for disse to begivenheder blev da også behørigt fejret af fysikersamfundet. Man kan med rimelighed betegne årene 1911-1913 som en "anden revolution" i den nye fysik, idet nye opdagelser og teorier fra denne periode resulterede i et helt nyt billede af stoffets struktur. Den vigtigste begivenhed var nok opdagelsen af atomkernen i 1911, der også var året for Heike Kamerlingh Onnes' overraskende opdagelse af superledningen i kviksølv. Året efter opdagede Max Laue og München-fysikerne Walter Friedrich og Paul Knipping røntgenstrålers diffraktion i krystalgitre, der ikke blot afklarede disse strålers natur, men også blev grundlaget for en helt ny type krystallografiske studier med meget store konsekvenser inden for fysik, kemi, mineralogi og molekylærbiologi. Og endelig, i 1913, fulgte så atomnummeret, isotoper og en ny atomteori. Den hollandske amatørphysiker Antonius van den Broek foreslog, som den første, at det periodiske system var ordnet efter et "atomnummer" i stedet for grundstoffernes atomvægte. Samtidig indførtes ideen om isotoper, der bl.a. skyldtes den engelske radiokemiker Frederic Soddy. Den "anden revolution" kulminerede med Niels Bohrs atomteori, der ikke blot knyttede Rutherfords model om atomkernen sammen med kvanteteorien, men også indeholdt begreberne om atomnummer og isotopi.

Det er i denne forbindelse værd at nævne, at selv om kvanteteorien stammer fra 1900, var dens status og mening i lang tid usikker. Ti år senere var den endnu ikke en flyvefærdig teori. Det var netop for at afklare spørgsmålet om kvanteteoriens betydning, at en udvalgt skare af ledende fysikere i november 1911 samledes til den første Solvaykongres i fysik i Bruxelles. Man blev enige om, at selv om kvanteverdenen var mærkelig, så var den formentlig sand og i det mindste værd at udforske nøjere. "Begyndelsen er gjort," konkluderede Planck, "og hypotesen om kvanter vil aldrig forsvinde fra verden" [1]. Solvaykongressen fra 1911 symboliserede kvanteteoriens egentlige gennembrud i fysikken. Blandt deltagerne i Bruxelles var ikke blot Planck, Ein-

stein, Lorentz og Sommerfeld, der alle havde bidraget til den nye kvanteteori, men også Ernest Rutherford fra England. Rutherford var ikke interesseret i kvanter, men han havde til gengæld, et halvt år tidligere, foreslået et helt nyt billede af atomets struktur. I 1911 var der dog ingen, heller ikke Rutherford selv, der forestillede sig nogen sammenhæng mellem kvanteteorien og dette billede af atomet.

Atommodeller før Rutherford

Omkring 1910 var det almindelig anerkendt, at atomer er komplekse størrelser, der indeholder elektroner i en eller anden form for dynamisk ligevægt. Da atomer er elektrisk neutrale, må elektronernes negative ladning modsvares af en positiv ladning, men der var ingen enighed om dennes natur eller fordeling i atomet. Nogle fysikere foreslog, at atomet også indeholdt positive elektroner, mens andre forestillede sig en positiv ladning af atomare dimensioner, hvortil de negative elektroner var bundet, og hvori de bevægede sig. Der var såmænd også ideer om en slags positive kerner, hvorom elektronerne bevægede sig i cirkulære baner, omtrent som planeter bevæger sig omkring Solen. Vi kan i en lærebog fra 1908, skrevet af den danske kemiker Sophus M. Jørgensen, således læse, at atomet består af "en kerne af positiv elektricitet, hvorom negative elektroner roterer med store hastigheder i bestemte baner, som planeterne i solsystemet" [2]. Jørgensen henviste, med denne beskrivelse, formentlig til en atommodel foreslået af den japanske fysiker Hantaro Nagaoka i 1904.

Den mest anerkendte hypotese om atomets struktur, i perioden ca. 1903-1910, var dog J. J. Thomsons model, der antog eksistensen af et stort antal elektroner bevægende sig i cirkulære baner i en friktionsløs positiv "væske" af samme størrelse som atomet. Modellen, som Thomson udarbejdede i matematiske detaljer, var på mange måder tilfredsstillende, idet den kvalitativt kunne redegøre for mange fysiske og kemiske fænomener, fx Zeemaneffekten, det periodiske system og radioaktivitet. Allerede omkring 1908 var modellen dog i vanskeligheder. Ikke blot kunne den ikke forklare linjespektre, den syntes også at være i

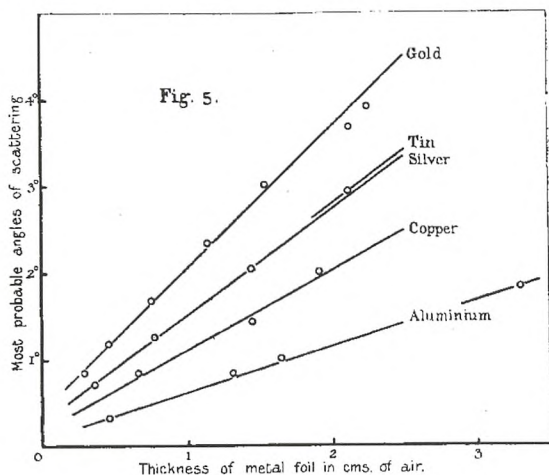
modstrid med atomernes fundamentale stabilitet. Det viste sig, at antallet af elektroner ikke var meget stort – fx 1000 i et brintatom – men blot omtrent det samme som atomvægten, hvilket førte til problemer med den strålingsmæssige stabilitet. På trods af disse og andre problemer levede Thomson-modellen dog videre, ikke fordi den var særlig god, men snarere fordi der ikke var noget bedre alternativ.

Spredning af alfapartikler

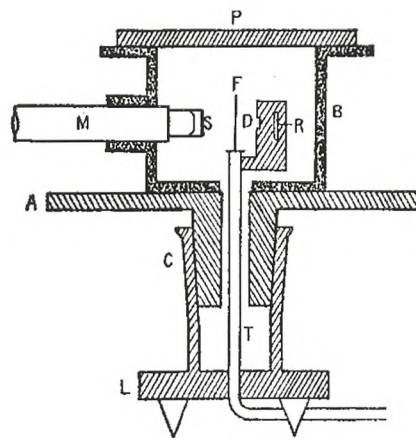
Rutherford var en autoritet på radioaktivitetens område, og hans vigtige bidrag hertil blev i 1908 belønnet med en Nobelpris – omend i kemi og ikke i fysik. Derimod var han på denne tid endnu ikke interesseret i atomets struktur, hvilket emne han først tog op i 1910. Blandt inspirationskilderne til kernemodellen var hans opfattelse af alfapartiklen, som han havde vist, var en dobbeltladet heliumion (He^{2+}). Mens Thomson mente, at alfapartiklen havde samme størrelse som et atom og indeholdt 6-10 elektroner, var den ifølge Rutherford en punktpartikel af samme slags som elektronen. Han opererede således implicit med en kernemodell for heliumatomet.



Figur 1. Ernest Rutherford (1871-1937).



Figur 2. Data fra et af Geigers eksperimenter fra 1910, der viser hvordan spredningsvinklen afhænger af metalfoliets tykkelse og atomvægt (eller atomnummer).



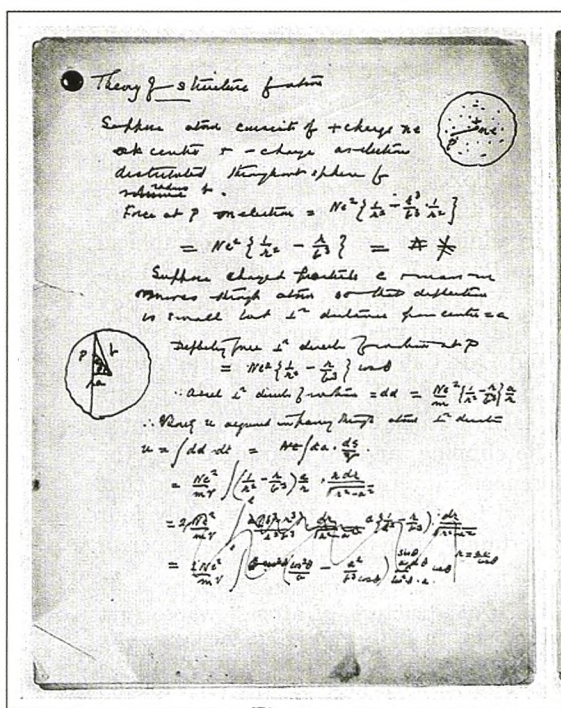
Figur 3. Geiger og Marsdens apparat til påvisning af vinkelfordelingen af spredte alfapartikler. I kassen B er en alfakilde (R) og et metalfolie (F). Mikroskopet M er forsynet med en skærm af zinksulfid, der virker som detektor. B og M kan drejes om en akse, mens R og F forbliver i deres position. Som alfakilde blev benyttet radon, eller hvad dengang blev betegnet "radium emanation".

En anden vigtig inspirationskilde var de eksperimenter, hans tyske assistent, Hans Geiger foretog, i laboratoriet i Manchester, med spredning af alfapartikler på tynde metalfolier. Geiger startede sine eksperimenter i 1908 og fortsatte dem to år senere med sin 21-årige medarbejder Ernest Marsden. I disse eksperimenter fandt de to unge fysikere, at når alfastråler blev spredt på et guldfolie af tykkelse $4 \cdot 10^{-5}$ cm, ville omkring 1 ud af hver 2.000 partikler blive reflekteret, dvs. afbøjet med en spredningsvinkel større end 90° . Et sådant resultat var svært at forene med Thomsons atommodel og den dertil hørende spredningsteori, ifølge hvilken den iagttagne spredning var resultatet af multiple spredninger på de atomare elektroner. Sandsynligheden for refleksion af alfapartikler, ville efter Thomsons teori, være forsvindende lille. Rutherford fortalte senere om sin reaktion på Geigers og Marsdens resultater [3]:

Det var afgjort den mest utrolige hændelse, jeg nogen sinde har været udsat for. Det var næsten så utroligt, som hvis du skød en 15-tommer granat mod et stykke silkepapir, og den kom tilbage og ramte dig. Efter at have overvejet det, indså jeg, at denne baglæns spredning måtte være resultatet af en enkelt kollision. Mine beregninger viste mig, at det var umuligt at opnå noget af denne størrelsesorden, med mindre man antog et system, hvori det meste af atomets masse var koncentreret i en lillebitte kerne. Da var det, jeg fik ideen om et atom med en ganske lille central del, der var massiv og elektrisk ladet.

Det bør dog bemærkes, at denne dramatiske beskrivelse stammer fra 1936 og i høj grad er en rekonstruktion. Den gengiver ikke hvordan Rutherford faktisk tænkte i 1910. Under alle omstændigheder, senest i

december 1910, var Rutherford på sporet af en ny model for den positive ladning i atomet. "Jeg tror jeg kan udtænke et atom, der er langt bedre end J.J.'s, når det gælder forklaringen af α - og β -partikler og opbremsningen af disse," skrev han i et brev. "Samtidig tror jeg det vil passe usædvanligt godt med de eksperimentelle data" [4]. Den atommodel Rutherford præsenterede i sin epokegørende artikel i *Philosophical Magazine* fra maj 1911, og som han indsendte til tidsskriftet måneden før, var først og fremmest en spredningsteori baseret på Geigers og Marsdens eksperimenter med spredning af alfapartikler på tunge grundstoffer [5].



Figur 4. Side fra Rutherfords notesbog ("Theory of the structure of the atom") med tidlige beregninger af alfapartiklers spredning [9]. Bemærk atommodellen øverst til højre, hvor elektronerne er afbildet som en sky omkring den positive kerne. Den første del af teksten er: "Suppose atom consists of +ve charge ne at centre & -ve charge as electrons distributed throughout sphere of radius b ."

Teorien om kerneatomet

Rutherfords klassiske analyse af alfaspredning ("Rutherford scattering") er stadig en fast bestanddel af lærebøger i fysik, hvorfor jeg kun kort skal fremhæve nogle af de væsentlige træk i artiklen fra 1911. Artiklen findes i øvrigt i en kommenteret dansk oversættelse fra 1973, hvor jeg i min ungdommelige naivitet mente, at den nok kunne bruges i gymnasieundervisningen i fysik [6].

Rutherford sluttede, at de iagttagne store afbøjninger af alfapartikler måtte skyldes en spredning på en koncentreret masse med høj ladning omgivet af en langt større sky af modsat ladning. Han beskrev sin antagelse således: "Betragt et atom, som indeholder en ladning $\pm Ne$ ved dets centrum, omgivet af en elektrisk kugle indeholdende en ladning på $\mp Ne$, som antages

at være fordelt jævnt gennem kuglen med radius R Vi vil antage, at for afstande mindre end 10^{-12} cm kan vi tillade os, at betragte den centrale ladning som værende koncentreret i et punkt." Som det fremgår, var Rutherfords spredningsteori uafhængig af fortegnet på kerneladningen, men i sine videre betragtninger indskrænkede han sig dog til at antage en positiv kerne (uden at ordet *nucleus* dog optræder i artiklen). Baseret på sin spredningsteori viste Rutherford nu, at den nævnte model var i stand til at redegøre for alle de resultater Geiger og Marsden havde opnået med spredning af alfapartikler. Han udelukkede dog ikke muligheden af, at "en lille del af den positive ladning bæres af satellitter i nogen afstand fra centret."

Efter at have diskuteret, hvorvidt kernen bestod af enkelte partikler, eller var usammensat og næsten punktformig, fandt han det "lettest at antage, at atomet indeholder en central ladning som en helhed og ikke dens bestanddele." Denne antagelse om en usammensat kerne, og også antagelsen om at Coulombs lov er gyldig for alle afstande, var dog kun midlertidig og begrundet i dens simpelhed. Allerede året efter kom Rutherford på andre tanker. I sin bog *Radioactive Substances and their Radiations*, der var færdiggjort i efteråret 1912, argumenterede han, at den ganske lille kerne med en radius på mindre end 10^{-12} cm var et sammensat legeme: "Atomets positivt ladede centrum er utvivlsomt et kompliceret system i bevægelse, og det består hovedsageligt af ladede helium- og brintatomer. Det synes som om, at stoffets positive atomer [partikler] tiltrækker hinanden ved yderst små afstande, for ellers er det svært at se, hvordan bestanddelene ved centret kan holde sammen." Vi har her, i det mindste retrospektivt, den første erkendelse af kernekræfter, eller hvad der senere skulle blive til de stærke vekselvirkninger.

For Rutherford og hans samtidige var det vigtigt at vide, hvor mange elektroner der fandtes i neutrale atomer, eller hvilken relation der var mellem et grundstofs atomvægt A og atomets positive ladning N , uanset om denne var samlet i en kerne, eller var spredt ud over atomet. Det var på den tid almindeligt antaget, at N var af samme størrelsesorden som A , men nærmere kunne man ikke komme det. Rutherfords analyse af alfaspredningen på tunge metaller gav for guld (med $A = 197$) $N \cong 100$, og generelt antog han, at relationen mellem de to størrelser kunne skærpes til $A/2 < N < A$. En mere præcis bestemmelse fremkom først med Bohrs atomteori fra 1913.

En model for kerneatomet, ikke en atommodel

Der er tradition for at tale om Rutherfords kerneatom som en *atommodel*, men strengt taget er dette uberettiget, da han ikke, i 1911, foreslog en egentlig model for atomets struktur. Der var tale om en velbegrundet hypotese om, at atomets positive ladning er samlet i en massiv atomkerne, og ikke andet. Med hensyn til elektronernes fordeling i atomet havde han, i modsætning til Thomson, intet bud, hvilket han var helt klar over. På en eller anden måde var elektronerne fordelt i atomet,

men hvordan kunne han intet sige om. "Spørgsmålet om det foreslåede atoms stabilitet behøver vi ikke betragte på nuværende trin," skrev han i artiklen fra 1911, "for det vil tydeligvis afhænge af atomets mere detaljerede struktur og af de ladede bestanddeles bevægelser." Det fulgte af denne ubestemthed, at Rutherfords atom var impotent, når det gjaldt så vigtige områder som spektralfysik og dispersion, og at det var lige så impotent på kemiske områder som valens og grundstoffernes periodicitet. Ej heller var der nogen forbindelse til fotoelektrisk effekt, varmefylde eller andre kvantefænomener.

I sammenligning med Thomsons gamle model var Rutherfords atom faktisk ikke imponerende, og slet ikke når det gjaldt bredden af forklaringskraft. Denne situation ændrede sig ikke væsentligt, før Bohr omformede Rutherfords kerneatom til en fuldblods atommodel. I et brev fra 1914 beskrev Rutherford, noget nedladende, Thomsons model som "kun egnet til et museum for videnskabelige kuriositeter" [7], men det var vel at mærke, efter Bohrs teori havde ændret på situationen. I 1911 betragtede de færreste fysikere Rutherfords atom som mindre kuriøs end Thomsons atom.



Figur 5. Deltagerne i det første Solvaymøde i november 1911. Einstein er nummer to fra højre, og til venstre for ham står Kamerlingh Onnes og Rutherford. Foran tavlen, hvorpå er skrevet strålingsformlen for sorte legemer, står Planck.

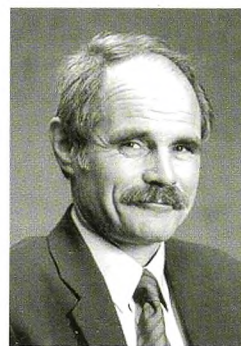
Givet den begrænsede forklaringskraft af Rutherfords kerneatom er det måske forståeligt, at teorien ikke umiddelbart vakte stor interesse. Den blev nærmest mødt med ligegyldighed og kun sjældent nævnt i fysiklitteraturen fra 1911-1912. Solvaykongressen fra 1911, hvori Rutherford som nævnt deltog, kunne være en lejlighed til at promovere kerneatomet, men faktisk blev det slet ikke nævnt. Ikke engang Rutherford selv

henviste til sin opdagelse [8], der også kun optræder sporadisk i hans korrespondance fra perioden. De få henvisninger, der trods alt var til teorien, var alle fra fysikere med tilknytning til laboratoriet i Manchester. En af dem var Charles G. Darwin (en sønnesøn af den "rigtige" Darwin), der i 1912 udbyggede Rutherfords spredningsteori og som den første eksplicit hævdede, at atomkernen var positivt ladet.

Den her givne fremstilling er blot en fødselsdagshilsen til atomkernen. Ønsker man nærmere oplysninger om Rutherfords vej til kernemodellen for atomet, må der henvises til den videnskabshistoriske litteratur herom [9, 10].

Litteratur

- [1] H. Kragh (1999). *Quantum Generations*, Princeton, s. 72.
- [2] S. M. Jørgensen (1908). *The Fundamental Conceptions of Chemistry*, London, s. 26.
- [3] J. Needham W. Pagel (1938). *Background to Modern Science*, Cambridge, s. 68.
- [4] L. Badash (1969). *Rutherford and Boltwood*, New Haven, s. 235.
- [5] E. Rutherford (1911). The scattering of α and β particles and the structure of the atom, *Philosophical Magazine* bind 21, 669-688.
- [6] H. Kragh (1973). Atomteoriens historie belyst ved kildeskrifter, København.
- [7] L. Badash (1969). *Rutherford and Boltwood*, New Haven, s. 272.
- [8] J. Mehra (1973). *The Solvay Conferences on Physics*, Dordrecht.
- [9] J. Heilbron (1968). The scattering of α and β particles and Rutherford's atom, *Archive for History of Exact Sciences* bind 4, 247-307.
- [10] D. Wilson (1983). *Rutherford: Simple Genius*, Cambridge, Mass.



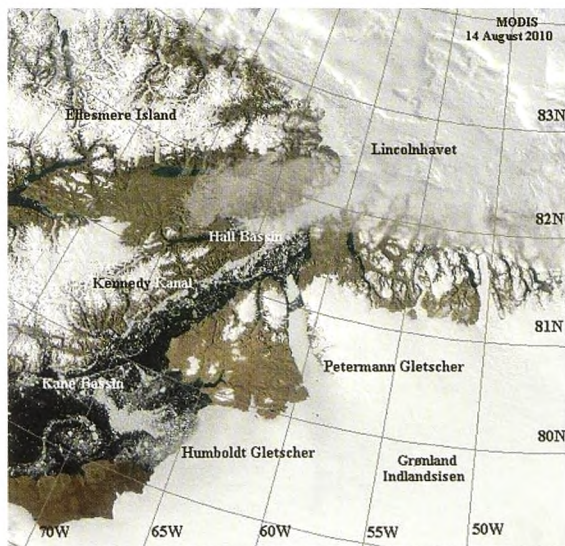
Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Institut for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie. Han har ledet udgivelsen af firebindsværket "Dansk Naturvidenskabs Historie".

En glaciologisk begivenhed

Af Preben Gudmandsen, DTU Space

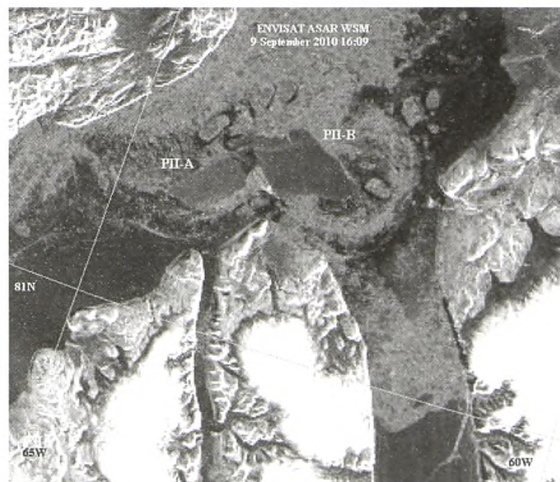
En lille notits i danske aviser i begyndelsen af august måned 2010 omtalte, at Petermann Gletscher i nordvest Grønland kalvede med en $\emptyset$ af is på størrelse med øen Møen. Vi skal i denne artikel se på hvilken betydning denne glaciologiske begivenhed har.

Nyheden om den store $\emptyset$ af is vakte ikke større interesse i Danmark, men det gjorde den i USA, hvor New York Times i mange dage derefter havde et utal af indlæg om sagen og konsekvenserne for klimaet. Selv det amerikanske senat indkaldte en oceanograf fra University of Delaware til en høring. Den hele ståhej kom imidlertid af, at ingen åbenbart fortalte, at isøen ikke er ret tyk, og at mængden af is derfor er lille i sammenligning med de mængder af is, der kommer ud af andre grønlandske bræer med Jakobshavnbræen som nummer et. Betydningen i en klimasammenhæng er derfor lille. Men da disse isøer driver helt ned til Newfoundland har de stor betydning for sikkerheden af de mange off-shore boreplatforme, der er i funktion der. Selv om de brækker i mindre stykker under driften sydover er isøerne vanskelige at detektere på grund af deres relativt lave højde over havets overflade og meget vanskelige at bugsere bort på grund af deres store volumen.

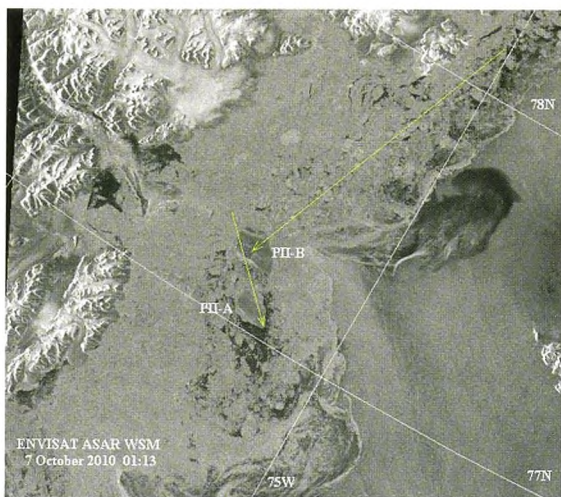


Figur 1. Billede optaget 14. august 2010 fra den amerikanske sensor MODIS af den nordlige del af Naresstrædet med delområderne Hallbassin, Kennedykanal og Kanebassin, der fortsætter i Smith Sund og Nordvandet mod sydvest. Fra billedets højre hjørne er der 660 km til Nordpolen. Billedet viser endvidere den 70 km lange gletschertunge, Petermann Gletscher, hvor kalving fandt sted 4.-5. august. Den frigjorte isø har siden da bevæget sig 9 km. Det bemærkes, at den vestlige del af isøen synes at mangle, hvilket skyldes en mindre kalving i juli 2008. Det ses, at gletscheren får små bidrag fra gletschere på den østlige side (Porsild Gletscher og Sigurd Berg Gletscher), hvis is flyder parallelt med den øvrige is. Den flossede kant på den østlige side af isøen hidrører fra denne is, som bryder lettere af, da isen er tyndere end i hovedstrømmen.

Ikke desto mindre er det en glaciologisk begivenhed, der er værd at interessere sig for, idet sådanne store kalvinger fra Petermann Gletscher kun finder sted med mange års mellemrum – de seneste i august 1991 og 2000. En kreds af forskere i Canada, Danmark, England og USA har da også fulgt begivenheden nøje indtil i dag, hvor størstedelen af den kalvede is er spredt over den vestlige del af Baffinbugten – kaldet Nordvandet (North Water). Figur 1 viser et satellitbillede af Petermann Gletscher fra 14. august som en ialt 70 kilometer lang gletschertunge, der udspringer fra Indlandsisen og med en gennemsnitshastighed på 1 km per år flyder på den dybe Petermann Fjord mod Hallbassin. Fra radioekko-måling vides, at isen er 600 meter tyk, der hvor isen begynder at flyde på vandet, og at den udspringer fra en dyb dal, der strækker sig ind under Indlandsisen, således at 500 meter af isen på det sted er under havets overflade. Under den cirka 70 års vandring mod Hallbassin mod nord udsættes isen for smeltning dels på overfladen men først og fremmest på gletschertungens underside ved kontakten med det relativt varme vand (ca. -2°C). Resultatet er, at isens tykkelse ved fronten er mindre end 100 meter. Mængden af is ved den indtrufne kalving er således mindre end 30 km^3 i en enkeltstående begivenhed, hvor Jakobshavnbræen leverer cirka 30 km^3 om året.



Figur 2. Radarbillede optaget 9. september 2010 af Envisat, der viser Petermann Fjord og Hallbassin med de to isøer fra kalvingen 4.-5. august 2006. Den øverste del er brækket af og er begyndt driften sydpå gennem Kennedykanalen. Den nederste del hviler stadig på Joe Ø afventende en ydre påvirkning for at begynde sin drift, hvilket fandt sted 18. september. Øerne er omgivet af havis, hvor man bemærker den cykloniske hvirvel, der er karakteristisk for Hallbassin.



Figur 3. Radarbillede af de to isøer, hvor de mødes i Nordvandet ud for Smith Bay ved kysten af Ellesmere Island. Det er optaget 7. oktober 2006 af Envisat. En sammenligning med Figur 2 viser, at PII-B har 'tabt' en del is undervejs. De to vektorer viser driften i en 72-timers periode (4.-7. Oktober) på henholdsvis 109 km og 40 km (42 cm/s og 15.4 cm/s) Billedet viser i højre side Haluyt Ø samt nordspidsen af Northumberland Ø.

Hvor et radarbillede fra 3. august ikke viser tegn på, at en kalving ville finde sted, viste billedet fra 5. august, at en meget stor del af gletschertungen var brudt af og begyndte drift mod nord, se figur 1. Per 9. september, se figur 2, lå hele isøen opad Joe Ø, hvor den yderste del brød af og begyndte sin drift mod syd gennem Kennedykanalen, Kanebassinet og Smithsundet med en gennemsnitshastighed på 30-50 km per dag. I Nordvandet blev den fanget i en stor strømhvirvel i mange dage. Den har fået betegnelsen PII-A (Petermann Ice Island). Den anden og større del, PII-B, begyndte sydlig drift 18. september, hvor den ved et af naturens luner møder PII-A i Nordvandet 7. oktober, hvor afstanden mellem dem kun er 8,5 km, se figur 3. Efter at være grundstødt i mange dage ved kysten i det sydøstlige hjørne af Ellesmere Island har

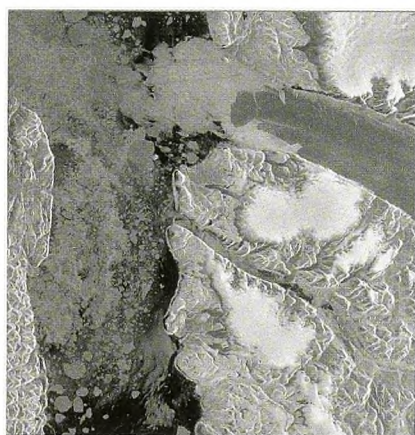
PII-A nu passeret midten af Davisstrædet (66.5° N, 59.5° W).

Allerede i 2008 var der tegn på den forestående 'begivenhed' derved, at en stor del af den vestlige side af gletschertungen i slutningen af juli brød af og begyndte sin drift gennem Naresstrædet. Det gav anledning til en Greenpeace ekspedition i juni 2009, hvor man håbede på at overvære den næste større kalving. Som så ofte før, snød naturen den interesserede forsker og instrumenter installeret på gletschertungen er formentlig gået tabt. Figur 4 viser en del af 2008-isøen, der på tidspunktet for fotograferingen befandt sig i Nordvandet i den sydlige del af Naresstrædet.



Figur 4. Den 20 kvadratkilometer store isø, der brød af på vestsiden af Petermann Gletscher i juli 2008, fotograferet fra den helikopter der placerede en beacon på øen 15. september 2008 på positionen 76.4 N, 77.0 W. Største højde over vandoverfladen er i cirka 20 m. Den canadiske forskningsisbryder CCGS Amundsen ses i forgrunden. Foto: Martin Fortier/ArcticNet.

Fra dansk side er hændelsen interessant derved, at den tidligere store kalving i 1991 ved et tilfælde blev observeret med data fra ERS-1, som blev sat i omløb af det europæiske rumagentur, ESA, i juli samme år. Tilfældet er flerdobbelt, idet satellitten i sin seks måneders kommissionsfase, hvor dens instrumenter blev afprøvet, blev sat i en tre dages 'repeat-orbit', som netop dækker Petermann Gletscher med sine 100 km brede satellitbaner, og at radaroptagelser blev foretaget med 24 dages mellemrum, således at Petermann Gletscher blev observeret – før og efter kalvingen, se figur 5.



ERS-1
19. august 1991



ERS-1
12. september 1991

Figur 5. To radarbilleder optaget af ERS-1 19. august og 12. september 1991, før og efter kalvingen. Ved kalvingen opstod tre isøer, som blev opdaget i Kennedykanalen med karakteristiske former, der som en mosaik kunne sammensættes til gletscherfronten af 19. august. Radarrefleksionen fra det åbne hav foran gletscherfronten skyldes en kraftig vind, der blæser ud gennem fjorddalen (katabatisk vind). Vinden kan være en medvirkende årsag til kalvingen.



Figur 6. Foto af den yderste del af Petermann Gletscher set ud i fjorden med Joe Ø i baggrunden. Fotoet blev taget i juni 2009 under en ekspedition til Petermann Gletscher med Greenpeace's skib "Arctic Sunrise" med det formål at observere en forventet stor kalving, som dog først fandt sted et år senere. På det tidspunkt af året er størstedelen af gletschertungen dækket af smeltevandssøer. (Foto: Nick Cobbing, Greenpeace).

Tre isøer, som adskilte sig fra den øvrige is i Kennedykanalen, fandt derved sin forklaring. Et yderligere held er, at denne artikels forfatter modtog disse data som led i vurderingen af kvaliteten af de optagne radar data. Analysen blev præsenteret ved et lille symposium i Tyskland i 2000 og publiceret i dettes Proceedings, men blev først 'gravet frem' i anledning af den seneste kalving, der er cirka tre gange større end 1991-hændelsen. Hændelsen i 2000 er så vidt vides ikke observeret på anden måde, end at man året efter observerede mange isøer ved kysten af Newfoundland, og at gletschertungen havde 'tabt' en stor del af fronten.

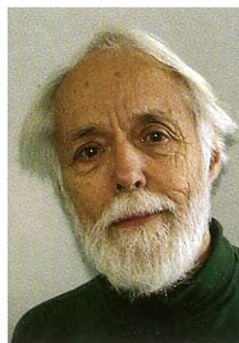
Interessen for denne og tidligere kalvinger hænger sammen med planer for en fremtidig (august 2012) udforskning af Petermann Gletschers flydende tunge, der er under udarbejdelse af tidligere nævnte forskerkreds. Et væsentligt emne er udforskningen af undervands-smeltningen af en sådan gletscher. En oceanografisk måling foran gletscherfronten i 2007 viste, at der er tegn på, at atlantehavsvand er tilstede (efter at have vandret hele vejen rundt langs kontinentalsoklerne i Polhavet). På grund af dets højere temperatur kan det forcere smeltningen. En 'feature article' i det amerikanske tidsskrift EOS, som udkommer april 2011, beskriver en

del af baggrunden for den planlagte forskning.

Radarbillederne i denne artikel hidrører fra satellitter, der er realiseret under programmer ved den europæiske rumagentur ESA: Envisat og ERS-1. Sidstnævnte billeder har dimensionen 100 km gange 100 km og en rumlig opløsning på 30 m, hvor de øvrige radarbilleder har en opløsning på 150 m og præsenteres som udsnit af scener, der er 400 km brede.

Litteratur

- [1] PII-A's bevægelser, <http://www.sailwx.info/shiptrack/-shipposition.phtml?call=47557>.



Preben Gudmandsen
Civilingeniør med speciale i mikrobølgeteknik, 1950. Professor i samme 1972, Professor emeritus fra 1994 med samarbejdsaftale med DTU Space fra 2004. Dansk repræsentant i European Space Agency gennem mange år.

“Japansk” viftestrømning og hvirveldannelse i en sæbefilm

Af Anders Andersen, Tomas Bohr, Teis Schnipper og Laust Tophøj, Institut for Fysik og Center for Fluid Dynamik, Danmarks Tekniske Universitet

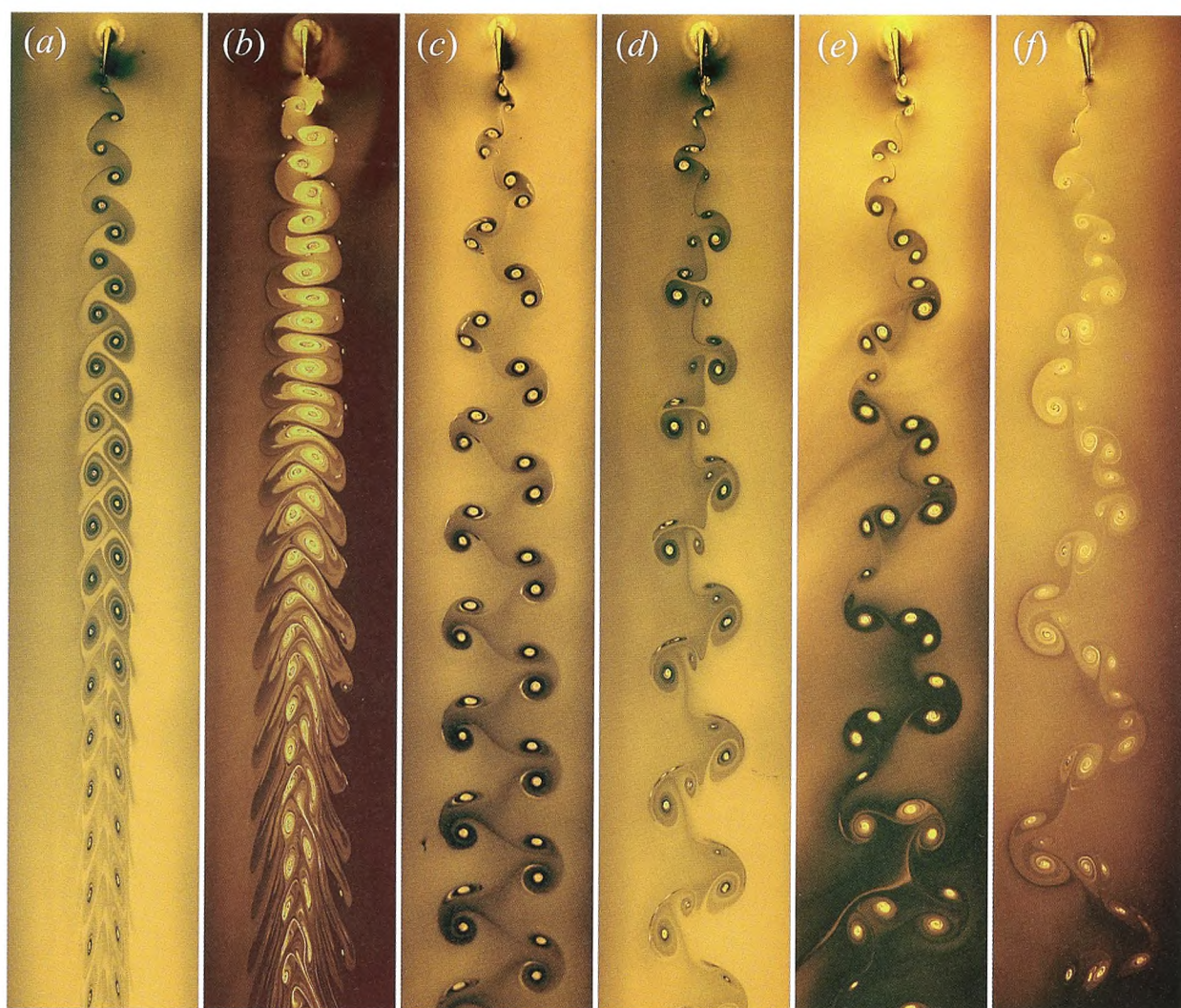
Vi ved alle, at en papirvifte, der viftes fra side til side, fremkalder en luftstrøm. Men hvordan dannes egentligt denne strømning? Hvordan ser den ud? Går strømningen altid “udad” eller kan der opstå et sug? Det var spørgsmål som disse, der motiverede et eksperiment i vores laboratorium, hvor en af os (TS) lavede sit ph.d.-projekt om hvirveldannelse [1].

Sæbefilmens to-dimensionale verden

For at gøre det så simpelt som muligt, valgte vi at studere viftefænomenet i to dimensioner. Hvordan kan man det? Det kan man ved at lade strømningerne foregå i en sæbefilm, en metode som specielt Yves Couder [2] og Mory Gharib [3] har demonstreret værdien af. Umiddelbart er en sæbefilm et ret indviklet system, hvor et mikrometertyndt vandlag er fanget mellem to lag af amphifile molekyler – lange molekyler, hvis hoveder er

hydrofile, men hvis haler er hydrofobe.

Strømningen i vandlaget er naturligvis meget tæt på at være to-dimensional, men til gengæld følges den af udsving i tykkelsen af sæbefilmen. Faktisk er det disse tykkelsesvariationer, som man typisk bruger til at visualisere strømningen. For ligesom tykkelsesvariationerne i en tynd oliefilm på en vandpyt leder sæbefilmens tykkelsesvariationer med det rette lys til farverige interferensmønstre, der nemt kan fotograferes.



Figur 1. Hvirvelmønstre bag finnen i den strømmende sæbefilm [5].

En sæbefilm har udover de hydrodynamiske frihedsgrader også mulighed for elastisk opførsel. Forstyrrelser i filmen vil fremkalde hurtige elastiske bølger, som opstår, fordi tætheden af de amphifile molekyler på overfladerne ændres og sætter overfladen i longitudinale svingninger. Disse såkaldte Marangoni-bølger er dog meget hurtige (cirka $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), og ved hastigheder langt under denne størrelse opfører sæbefilmen sig i forbavsende høj grad som en usammentrykkelig og to-dimensional væske, og samtidig bliver tykkelsesvariationerne passivt ført med strømmen og viser derved hvirvler og andre strukturer.

Komplekse hvirvelkølvand og hvordan de dannes

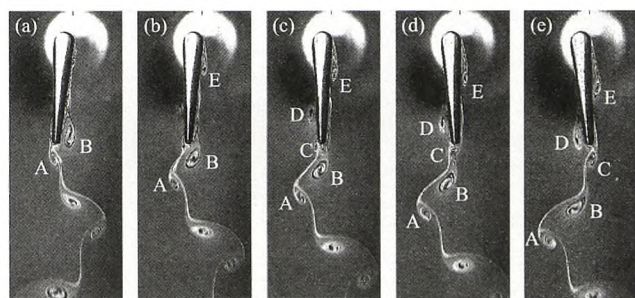
Vi anvendte sæbefilmsmetoden til at se på hvirvelafløsningen fra en simpel efterligning af en svømmende fisk. Mere præcist anbragte vi en lille mekanisk finne i en plan sæbefilm, der – udspændt mellem to fiskeliner – strømmede lodret nedefter som vist på figur 1 [5]. Her får man kølvand, som minder om den berømte von Kármán hvirvelallé, men ved at variere amplitude og frekvens for finnens viftebevægelse kan man derudover opnå en palet af andre mønstre som vist på figur 1. Finnen, der ses øverst i hvert billede, er 6 mm lang, 1 mm bred og roteres fra side til side omkring centeret af den cirkulære forkant.

Til højre for den lodrette centerlinje roterer hvirvlerne i den sædvanlige von Kármán hvirvelallé med uret, og til venstre roterer de mod uret. Mønsteret på figur 1 (b) afviger fra von Kármán hvirvelalléen (a) ved at hvirvlerne, som roterer med uret hhv. mod uret, har byttet plads henover centerlinjen. Dette er typisk når

“fisken” leverer baglæns impuls til strømmingen og selv svømmer fremad [6].

Hvirvlerne dannes ved vekselvirkning mellem finnen og sæbevandet. Når en væske strømmer forbi et fast legeme bliver den bremset ned og kan let “snuble” – dvs. danne hvirvler. Dette er faktisk en universel mekanisme for dannelse af komplekse strømninger i naturen og således også turbulens. Her fører det til forbavsende velordnede hvirvelmønstre med komplicerede periodiske kombinationer af enkelte hvirvler og hvirvelpar.

På figur 2 ses i detaljer, hvordan hvirvelafløsningen foregår. I det konkrete tilfælde leder dannelsesprocessen til et hvirvelmønster af samme type som i figur 1 (c). Man ser, at kølvandet dannes af hvirvler, som kommer dels fra forkanten af finnen, hvor væsken rammer den, dels fra den transversale bevægelse af finnens skarpe bagkant. Man kan endda se det tynde grænselag langs finnen, som gennem hvirvelafløsningen forgrener sig ud i væsken.



Figur 2. Hvirveldannelse ved finnens bevægelse fra venstre mod højre [5].



Figur 3. Viftestrøm frembragt af finnen i den vandrette sæbefilm [7]. Se også billedet på forsiden.

Viftebilledet der slog benene væk under os

Ud fra vores eksperimenter med finnen i den strømmende sæbefilm var det naturligt, at vi spurgte os selv, hvad der mon ville ske, hvis vi ikke lod sæbefilmen strømme, men blot lod finnen vifte i en ellers stillestående sæbefilm – altså den strømning en japansk geisha danner med sin vifte. Så vi placerede vores finne i en stationær sæbefilm udspændt på en stor metaltrådsramme og satte finnen til at vibrere med en frekvens på 100 Hz.

Resultatet ses i figur 3, og skønheden og detaljerigdommen i billedet kom helt bag på os [7]. Lige omkring og over finnen ses, hvordan væsken suges ned og tilsvarende skubbes nedad under finnen – så viften virker, som den skal. I løbet af hver oscillationsperiode dannes der to hvirvler, som af viftestrømmen skubbes ned, strækkes ud og vikles rundt i to spiralstrukturer, en på hver side af finnen. Billedet er taget efter lidt over et halvt sekund og viser resultatet af 70 vibrationer af finnen. Som man kan se, er alle 70 bølgeslag synlige gennem de tynde tråde, der er trukket ud af grænselagene omkring finnen. Det er forbavsende, at hele denne detaljerigdom er bevaret og ikke er flydt sammen. Men der er også kun gået omkring et halvt sekund.

Den væske, vi bruger til forsøget, er ret kompleks – det er en blanding baseret på “bubbles” fra legetøjsbutikken BR, som laver særligt stabile sæbefilm. Til gengæld er væsken også viskoelastisk [8] og tilfører altså ekstra elastiske egenskaber. Vi ved ikke, hvor stor en rolle det spiller, da enhver sæbefilm i forvejen har viskoelastiske egenskaber. Vi har siden gennemført lignende eksperimenter med mere newtonske blandinger og fundet kvalitativt tilsvarende foldningsmønstre under samme forhold.

Ved højere frekvenser eller større amplituder ser vi en helt anden type strømning, hvor hvirvlerne afstødes med så stor fart, at der dannes en koncentreret strømning omkring en regelmæssig serie af hvirvelpar, som sendes ud i en bestemt retning. Vores foreløbige eksperimenter indikerer, at der er en veldefineret overgang mellem de to strømningsmønstre [9]. Ved lave amplituder kan man ind imellem observere tilfælde, hvor viften faktisk suger. Men det er usædvanligt og ikke reproducerbart. Så vi mener nok, at geishaerne generelt kan stole på det kølige pust fra deres smukke vifter.

Litteratur

- [1] <http://www.dtu.dk/centre/FLUID/English.aspx>
- [2] Y. Couder og C. Basdevant (1986), Experimental and numerical study of vortex couples in two-dimensional flows, *Journal of Fluid Mechanics* **173**, 225-251.
- [3] M. Gharib og P. Derango (1989), A liquid film (soap film) tunnel to study two-dimensional laminar and turbulent shear flows, *Physica D* **37**, 406-416.
- [4] J.-M. Chomaz og B. Cathalau (1990), Soap films as two-dimensional classical fluids, *Physical Review A* **41**, 2243-2245.
- [5] T. Schnipper, A. Andersen og T. Bohr (2009), Vortex wakes of a flapping foil, *Journal of Fluid Mechanics* **633**, 411-423.

- [6] S. Vogel (2003), *Comparative Biomechanics*, Princeton University Press.
- [7] T. Schnipper, L. Tophøj, A. Andersen og T. Bohr (2010), Japanese fan flow, *Physics of Fluids* **22**, 091102.
- [8] Vi takker Ole Hassager og Rasmus Hansen fra Institut for Kemiteknik på DTU for reologiske målinger.
- [9] Mattias Lau Nøhr Palsgaard og Michael Sejer Wismer (2010), Strømningen omkring en vifte, Fagprojekt, Institut for Fysik, DTU.



Anders Andersen er lektor ved DTU Fysik. Han arbejder med hydrodynamik, herunder hvirveldannelse, strukturer og instabiliteter i strømninger med frie overflader og plankton hydrodynamik.



Tomas Bohr er professor i teoretisk fysik ved DTU Fysik og leder af Center for Fluid Dynamik ved DTU. Han arbejder med hydrodynamik og komplekse systemers fysik, herunder hvirveldannelse og saftstrømning i træer.



Teis Schnipper er postdoc ved DTU Mekanik. Han undersøger strømninger i skibsmotorer med optiske målemetoder, og i sit ph.d.-studium ved DTU Fysik arbejdede han med hvirveldannelse omkring og hydrodynamiske kræfter på baskende finner.



Laust Tophøj er ph.d.-studerende ved DTU Fysik. Han arbejder med teori for strømninger med frie overflader, hvirvler, topologi og kaos i hydrodynamiske systemer.

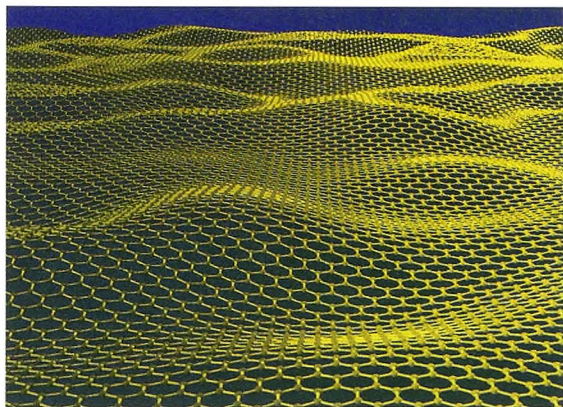
Nobelprisen 2010: Todimensionalt kulstof

Af Jesper Nygård og Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Nobelprisen i fysik blev i 2010 tildelt Andre Geim og Konstantin Novoselov "for banebrydende eksperimenter med det todimensionale materiale grafén" [1]. Med fremstillingen af grafén er det for første gang og mod al forventning bevist, at todimensionale krystaller kan eksistere. Graféns egenskaber er i overensstemmelse med teoretiske forudsigelser. Opdagelsen har ført til syntetisering af andre todimensionale krystaller og til drømme om et hav af anvendelser.

Grafén

Geim og Novoselov er begge født i Rusland, henholdsvis i 1958 og 1974. Deres grafén-eksperimenter blev gennemført ved universitetet i Manchester, England, hvor de stadig er ansat. De første resultater blev publiceret i tidsskriftet *Science* 2004 [2].



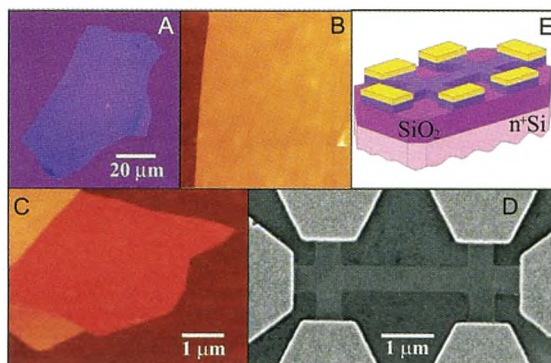
Figur 1. En grafén-film kan minde om et hønsenet. En frithængende film kan have 1 nanometer høje bølger med ca. 25 nanometers bølgelængde [1].

Grafén er en todimensional krystal af kulstof (carbon, C). Kulstofatomerne er arrangeret i et gitter, som minder om et hønsenet. Figur 1 viser en kunstners forestilling om strukturen. Grafitt er opbygget af sådanne lag, som kun er svagt bundet indbyrdes. Når man skriver med grafitten i en blyant, rives lagene fra hinanden, og på papiret afsættes der små flager bestående af flere eller færre atomlag. Alle, der har brugt papir og blyant, har utvivlsomt produceret små stumper grafén, dog uden at vide, at her lå en Nobelpris gemt. Problemet er at få øje på stumperne.

Geim og Novoselov brugte ganske almindelig tape til at trække tynde lag af et stykke grafit. Umiddelbart er de tyndeste lag ikke til at se, men hvis de bliver lagt på overfladen af en siliciumkrystal, modificerer de overfladens refleksionsevne så meget, at de er synlige i et mikroskop. Geim regner selv dette for et afgørende punkt, fordi han og Novoselov således kunne overskue et stort antal stumper og udsøge sig de få rigtigt tynde; ellers var det som at finde en nål i en høstak, siger han. Faktisk prøvede flere andre grupper at isolere enkeltlag af grafén, men de forsøgte sig med

mere tidskrævende teknikker, mens Geim og Novoselov altså havde held med deres simple optiske mikroskop. De andre forskningsgrupper publicerede resultater med grafén umiddelbart efter de to Nobelprismodtagere, men det er almindeligt anerkendt, at disse var først med opdagelsen.

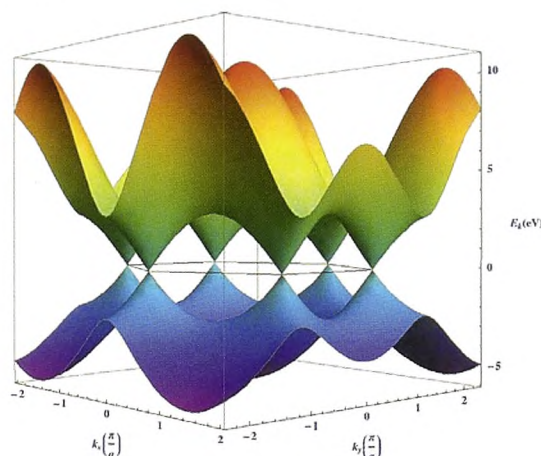
Når først de helt tynde flager er fundet, kan de undersøges med andre metoder, og figur 2 viser billeder optaget med henholdsvis hvidt lys, AFM (Atomic Force Microscope), og SEM (Scanning Electron Microscope). Sidstnævnte metoder har begge et meget lille synsfelt, så det ville være helt uoverkommeligt at bruge dem til at afsøge større arealer. I figur 2C ses en smal flig af tykkelse 4 Å, altså et monolag.



Figur 2. Forskellige afbildninger af flager af få lag grafén: A. en ret stor mangelags flage, tykkelse ca. 3 nm, ovenpå oxideret silicium (hvidt lys). B. AFM-billede af et udsnit af A på $2\text{ }\mu\text{m} \times 2\text{ }\mu\text{m}$ nær flagens kant. Det lyse område er ca. 3 nm højere end Si-overfladen. C. Endnu et AFM-billede: det mørkebrune er Si-overfladen. Højder over denne: brun-rødt 0,8 nm, gul-orange 2,5 nm, gul-brunt 1,2 nm. Sidstnævnte flage (nederst til venstre), som ligger oven på den brun-røde, er én atomdiameter tyk. D. SEM-billede af et stykke grafén formet og monteret til måling af modstand og Hall-effekt. E. skematisk billede af D. De gule klodser symboliserer kontaktområderne [2].

Før Geim og Novoselovs bedrift var det de færreste, der troede, at todimensionale krystaller overhovedet kunne eksistere. De fleste regnede med, at en todimensional krystal af hvilket som helst stof ville være ustabil og gå i opløsning eller krølle sig sammen til nanorør eller fullerenlignende molekyler, hvis man prøvede at realisere den (fulleren: Se figur 4). I tidens løb blev der alligevel gjort en del forsøg, men Geim og Novoselov var altså de første, for hvem det lykkedes. Siden 2004

er der fremstillet todimensionale krystaller, monolagskrystaller, af andre stoffer, fx NbSe_2 , $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ og MoS_2 .



Figur 3. Elektronernes energi som funktion af deres impuls (k_x, k_y) i grafén-filmens plan [1].

Impuls og bølgetalsvektor

En fri partikel med masse m og hastighed v beskrives kvantemekanisk som en plan bølge med de Broglie-bølgelængden $\lambda = h/p$, hvor $p = mv$ er partiklens impuls. Hvis vi definerer bølgetallet som $k = 2\pi/\lambda$, fås $p = \hbar k$, idet $\hbar$ betyder Plancks konstant h divideret med 2π .

I to eller tre dimensioner må vi bruge vektorer: $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$. De næsten frie elektroner i et metal eller en halvleder har bølgefunktioner, der ligner plane bølger, men som i større eller mindre grad er modificeret af potentialet omkring krystallens atomer. De kan også tildeles en bølgetalsvektor $\mathbf{k}$, og man taler om en "krystalimpuls" $\hbar \mathbf{k}$. Det har den dybere mening, at elektronernes bevægelse kan beskrives ved en ligning, der minder om Newtons 2. lov:

$$\hbar \dot{\mathbf{k}} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

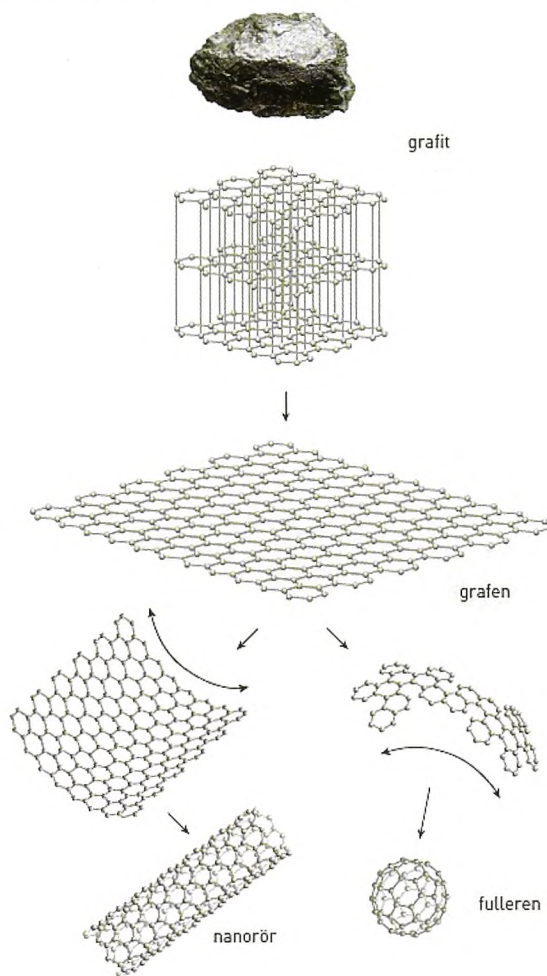
hvor $\mathbf{F}$ er kraften fra ydre felter, fx elektriske eller magnetiske felter, og prikken over $\mathbf{k}$ betyder differentiation mht tiden.

Ladningsbærernes energi E afhænger af $\mathbf{k}$. Denne funktion, $E(\mathbf{k})$, kaldes for materialets båndstruktur og den er helt afgørende for materialets egenskaber. Et eksempel ses i figur 3.

Det hypotetiske grafén

I mere end et halvt århundrede var grafén kun en model i teoretikernes fantasi. Den første beregning af elektronernes energibåndstruktur stammer fra 1947, da P.R. Wallace [4] viste, at en enkelt plan i grafit teoretisk set var en halvleder med et energigab mellem valens- og ledningsbånd på 0. Senere mere omfattende beregninger har givet samme resultat. Figur 3 viser hvordan det

kan lade sig gøre: Ledningsbåndets og valensbåndets "spidser" mødes i nogle få punkter i k_x, k_y -planen. Når disse punkter varierer elektronernes energi lineært med impulsen $\hbar \mathbf{k}$, ligesom for fotoner, og deres opførsel skal beskrives ved Dirac-ligningen. Punkterne kaldes derfor Dirac-punkterne. Betydningen af vektoren $\mathbf{k}$ forklares i boks 1. Typisk nok drømte Wallace ikke om, at et enkelt monolag kunne isoleres, men gik straks videre til at betragte det tredimensionale grafit, som iøvrigt også ville have et forsvindende båndgab.

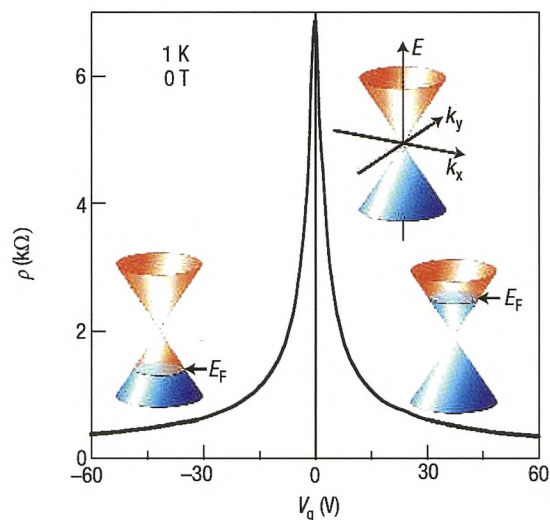


Figur 4. Grafit, grafén, nanorør, C_{60} (fulleren) [1].

Interessen for det teoretiske grafén fik et voldsomt pust i 1991, da Sumio Iijima påviste eksistensen af kulstofnanorør og beskrev deres struktur som et sammenrullet rør af et stykke grafén [5]. Figur 4 illustrerer idéen. Som man måske kan gætte, er der mange muligheder for i fantasien at "skære" en strimmel ud af grafén med henblik på at rulle den sammen til et rør. Strimlens bredde vil bestemme rørets omkreds og dermed diameteren, medens orienteringen i forhold til krystalretningerne afgør hvordan atomkæderne snor sig rundt om røret. I de følgende 20 år har teorier for disse nanorørs elektroniske egenskaber taget grafén som udgangspunkt og har blandt andet kunnet redegøre for, at ca. en trediedel af et tilfældigt udvalg af rør har elektrisk ledningsevne som et metal.

Graféns elektriske egenskaber

Geim og Novoselovs artikel fra 2004 handlede ikke kun om påvisningen af graféns eksistens, men rapporterede omfattende målinger af de elektriske egenskaber. Det var lykkedes at udskære strimler både af grafén og af tykkere flager og at forsyne dem med elektriske kontakter som på figur 2. Strimlerne ligger ovenpå det isolerende oxidlag på en silicium-krystal, så strukturen udgør en felleffekt-transistor med silicium-krystallen som gate (styreelektrode).

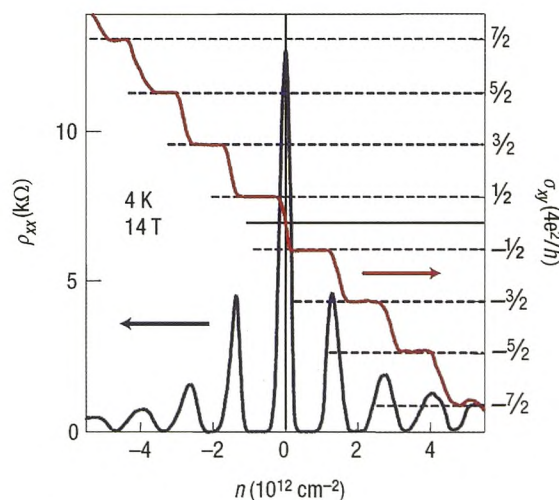


Figur 5. En grafén-transistor. Den elektriske resistivitet ρ af en strimmel grafén som funktion af spændingen V_g på en nærliggende gate-elektrode. Et positivt V_g sænker elektrontilstandenes energi, så flere tilstande i ledningsbåndet vil være besat. Ved $V_g = 0$ er ledningsbåndet lige netop tomt og valensbåndet fyldt, så modstanden er maksimal [3].

I ren, uforstyrret grafén (fx i fravær af elektriske felter) vil valensbåndet lige akkurat være fyldt og ledningsbåndet tomt. Ved lav temperatur vil der således ikke være nogen frie ladningsbærere, selv om energigabet er nul; hverken et fuldt bånd eller et tomt bånd kan bære en elektrisk strøm. En positiv spænding på gate vil sænke elektronenergiene i grafénet, så nogle af tilstandene i ledningsbåndet vil blive besat, og de kan dermed bidrage til en strøm. En negativ spænding vil producere huller i valensbåndet med en tilsvarende virkning. Dette forklarer modstandskurven i figur 5, hvor man ser et skarpt maksimum i den elektriske modstand ved gatespænding nul. Ladningsbærernes fortegn, altså minus for elektroner eller plus for huller, blev kontrolleret ved brug af Hall-effekten. Den fremkommer, når man sætter et magnetfelt vinkelret på grafénets plan. Magnetfeltet vil søge at skubbe strømmen ud i den ene side, som derved bliver negativt ladet, hvis strømmen bæres af elektroner, eller positivt ladet, hvis strømmen domineres af huller. Der opstår herved en spændingsforskel, Hall-spændingen, mellem prøvestykkets to kanter. Hall-spændingen er proportional med strømmen, og effekten kunne passende udtrykkes i volt per ampere, altså som en modstand. Under normale forhold er Hall-spændingen også proportional med magnetfeltet, men det gælder ikke ved lave temperaturer og høje

magnetfelter. Her må ladningstransporten beskrives ved hjælp af kohærente elektronbølger, hvilket fører til en kvantiseret Hall-effekt (se nedenfor), hvis systemet er todimensionalt.

I elektrisk ledende grafén har vi netop at gøre med en todimensional gas af enten elektroner eller huller. Det er ikke i sig selv noget nyt, for todimensionale elektrongasser har været studeret i mange år. De kan opstå eller frembringes i kontaktfladen mellem to halvledere med forskellige båndgab eller mellem et metal og en halvleder, og elektronkoncentrationen i dem kan kontrolleres med elektriske felter. Det var i et sådant system, at Klaus von Klitzing i 1980 opdagede den kvantiserede Hall-effekt (Nobelpris 1985). I et kraftigt magnetfelt kan elektronerne tvinges ind i en cirkelbevægelse (her benytter vi en halvklassisk beskrivelse) med omløbsfrekvensen $\omega_c = eB/m$, hvor e er elektronladningen, B magnetfeltet og m elektronens masse. Det medfører en kvantisering, hvor det j 'te niveau har energien $E_j = (j + \frac{1}{2})\hbar\omega_c$. Koncentrationen n af elektroner afgør i forening med feltet B , hvor mange energiniveauer der er fyldt. Ved at variere B eller n kan man tømme/fylde et eller flere niveauer, og ved hver tømning/fyldning sker der et spring i Hall-spændingen, og samtidig ses et maksimum i modstanden.



Figur 6. Kvant-Hall-effekt i den perfekte 2-dimensionale leder, en grafén-film. n – elektronkoncentrationen. Blå kurve – resistivitet parallelt med strømmen (venstre skala). Rød kurve – Hall-signalet udtrykt som en konduktans på tværs af strømmen (højre skala) [3].

Geim og Novoselov kunne vise, at det udpræget todimensionale grafén havde en særdeles klar kvantiseret Hall-effekt. Ved målingen vist i figur 6 er det koncentrationen n , der er blevet varieret, ved at kontrollere gate-spændingen V_g . Hall-signalet – den røde kurve og højre akse – er omregnet til en ledningsevne (konduktans) og divideret med $4e^2/h$. Størrelsen e^2/h er et kvant for ledningsevne (konduktans), som er en naturlig enhed at bruge for enhver størrelse analog med ledningsevne i systemer, hvor elektrontransporten udviser kvantefænomener [6]. Modstanden – den blå kurve – er nul, når Hall-signalet er konstant, men går gennem et skarpt maksimum, når Hall-signalet skifter

fra et trin til det næste. Det mest bemærkelsesværdige ved effekten er de brede trin, hvor signalet er meget stabilt. Den egenskab kan udnyttes til at etablere en modstandsnorm, idet h/e^2 har enheden ohm. Den kvantiserede Hall-effekt i grafén udviser nogle særlige træk, der kun kan forklares ved, at elektronerne opfører sig som masseløse Dirac-partikler, fx detaljer vedrørende trinenes forekomst og højder. Med grafén har det også for første gang været muligt at observere kvante-Hall-effekten ved stuetemperatur.

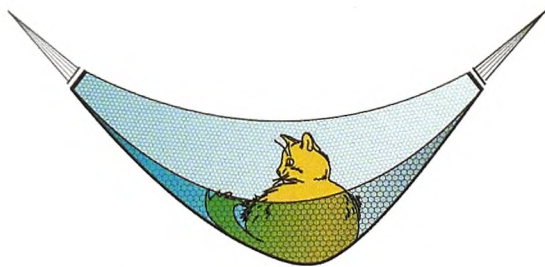
Andre egenskaber

Graféns tykkelse er en tusindedel af bølgelængden for synligt lys, men der er en optisk absorption på $\pi\alpha$, hvor α er finstrukturkonstanten ($\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$), altså 2,3 %. Grafén er således farveløst og nærmest usynligt. Først i samspil med et andet materiale, fx SiO₂ som anvendt af Geim og Novoselov, kunne det observeres i almindeligt lys.

Elektronerne i grafén har en meget stor mobilitet og en lang fri middelvejlængde. Det fører ikke alene til en høj elektrisk ledningsevne, men varmeledningsevnen bliver også stor, 10 gange bedre end kobber.

Geim og Novoselovs små grafénstumper er nu en saga blot. Der er udviklet metoder til at syntetisere grafén på flere forskellige substrater og til at løsne dem fra disse. Filmene kan fremstilles i store bredder, os bekendt i hvert fald op til 70 cm.

Grafén kan modificeres kemisk, fx med ilt eller brint, og som i enhver anden halvleder kan de elektriske egenskaber ændres på kontrolleret måde ved tilsætning af fremmedatomer, "urenheder". Man kan med andre ord fremstille transistorer og andre komponenter i grafén. Deres ringe størrelse og elektronerne høje mobilitet giver en forventning om ultrahurtige integrerede kredse og sensorer på denne basis. Grafénfilmens fleksibilitet må åbne ganske særlige muligheder, især da dens brudstyrke er over 100 gange brudstyrken for stål (figur 7).



Figur 7. En hængekøje af 1 m² grafén kan bære ca. 4 kg, men vil selv veje 0,77 mg [1].

Geim og København

Andre Geim var i 1991 postdoc hos Poul Erik Lindelof, Københavns Universitet (KU), hvor han arbejdede med elektriske målinger på halvleder-komponenter ved lave temperaturer [7]. Som det har været nævnt i pressen søgte han senere et lektorat ved Niels Bohr Institutet,

men havnede i stedet ved universitetet i Nijmegen, Holland. Her udnyttede han de store magneter ved højmagnetfelt-laboratoriet til eksperimenter med svævende frøer og andre tilsyneladende umagnetiske genstande, for hvilket han i 2000 blev tildelt den såkaldte IgNobel pris. Som det fremgår af figur 8, havde Geim gjort visse erfaringer med KU's dengang kraftigste magnet (det er dog næppe herfra han fik inspiration til svæve-forsøgene).

doc 15109 UdFSDH



*Magnet was quenched by AKG
08.11.91.
at 108 Amps at 4.2K
that corresponds less than 12.5T
Helium level was about 25-30%
(at least higher than highest alarm
level (red top one) and less than
35%). Should not do that
since 4.2K only up to 104Amps
No helium at all.*

Figur 8. Uddrag fra logbog, der beretter om Geims (AKG) eksperimenter med 13 tesla magneten på H.C. Ørsted Institutet, KU i 1991. Lavtemperatur-specialister vil forstå at der skete et mindre uheld den dag i laboratoriet.

Geims samarbejde med gruppen fra København fortsatte flere år frem, primært omkring transport i endimensionale kvantetråde og ultrafølsomme magnetometre baseret på to-dimensionale halvlederstrukturer dyrket vha molekylstråle-epitaksi (III-V Nanolab, en fælles facilitet for Danmarks Tekniske Universitet (DTU) og KU) [8]. For eksempel udnyttede de halvlederkomponenternes Hall-effekt til studier af individuelle nanopartiklers magnetiske egenskaber.

Andre Geim gæstede senest Danmark i 2008, da han holdt foredrag ved Dansk Fysisk Selskabs årsmøde. I december 2010 passede Konstantin Novoselov gennem København på vej hjem fra prisuddelingen i Stockholm og gentog her sin Nobel-forelæsning.

Kulstof elektronik i Danmark

Graféns forløber, kulstof-nanorør, har været studeret intenst i Danmark siden 1998, hvor postdoc David Cobden "smuglede" en ampul med enkeltvægs-nanorør fra USA til Niels Bohr Institutet. Materialet var af usædvanlig høj kvalitet, dyrket ved laser-ablation hos Richard E. Smalley (Nobelpris i kemi 1996), og kom fra netop det "batch" som igangsatte hele den eksplosive vækst i forskning indenfor kulstof-baseret elektronik. Dansk deltagelse i grafén-målinger skete kort efter opdagelsen, da Thomas Sand Jespersen (nu Niels Bohr Institutet) arbejdede ved Harvard University i 2006. I dag har grafén gjort sit indtog ved flere danske Universiteter, hvor der for eksempel arbejdes med syntese, molekylær elektronik og transportteori (KU), nanostruktureret grafén og elektron-mikroskopi (DTU), samt båndstruktur og overflade-modificering af grafén (Aarhus Universitet). Interessen for graféns materialegenskaber er voksende og et apparat til dyrkning

af grafén-film på store arealer er netop installeret ved renrumsfaciliteten DANCHIP på DTU.

I november 2010 arrangerede DTU og KU en konference om kulstofelektronik, "Carbonhagen 2010", med lidt over 100 deltagere fra 5 lande, deriblandt samarbejdspartnere og studenter fra Kina. På to dage blev der holdt 19 foredrag, hvoraf 13 handlede om grafén. I det hele taget har Geim og Novoselovs opdagelse fremkaldt en hektisk aktivitet Jorden rundt, hvad der fx klart illustreres af, at deres første artikel nu (12. februar 2011) er blevet citeret 3759 gange.

Litteratur

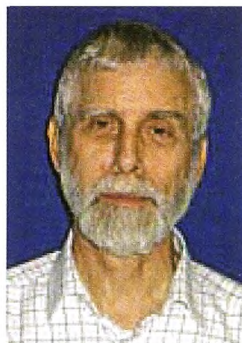
- [1] Nobelpriskomiteens hjemmeside indeholder både en populær og en mere videnskabelig beskrivelse foruden biografiske oplysninger om prismodtagerne: <http://nobelprize.org>
- [2] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov (2004), Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science* **306**, 666-669 (2004).
- [3] A. K. Geim and K. S. Novoselov (2007), The rise of graphene, *Nature Materials* **6**, 183-191 (2007).
- [4] P. R. Wallace (1947), *Physical Review* **71**, 476 (1947).
- [5] Sumio Iijima (1991), Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature* **354**, 56 (1991).
- [6] Henrik Bruus, Mesoskopisk fysik, *Naturens Verden* **9**, 31-40 (2000). En god introduktion til kvantiseret ledningsevne. Naturens Verden findes ikke online før 2004, men brug dette link til artiklen: http://www2.mic.dtu.dk/research/miftpublications/popular/Bruus_Naturens_Verden_9_p31_2000.pdf
- [7] A.K.Geim, R.Taboryski, A.Kristensen, S.V.Dubonos, P.E.Lindelof (1992), High-Field Magnetoresistance in

a Periodically Modulated Two-Dimensional Electron Gas, *Phys.Rev.B-Rapid Commun.* **46**, 4324-4327 (1992).

- [8] A. K. Geim, S. V. Dubonos, J. G. S. Lok, I. V. Grigorieva, J. C. Maan, L. Theil Hansen, and P. E. Lindelof (1997), Ballistic Hall micromagnetometry, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2379 (1997).



Jesper Nygård er lektor i nanofysik ved Niels Bohr Institutet og Nano-Science Center, Københavns Universitet. Han leder den eksperimentelle forskning indenfor kvante-fænomener i nanostrukturer og har siden 1998 beskæftiget sig med kulstof-baseret elektronik. Hans gruppe arbejder desuden med nye biosensorer, nanofabrikation og lavtemperatur-teknik.



Finn Berg Rasmussen har gennem sin tid som lektor ved Niels Bohr Institutet studeret faste og flydende stoffer ved lave temperaturer (termiske, elektriske og magnetiske egenskaber). Er nu pensioneret. Medlem af KVANT's redaktion.

Dansk Fysisk Selskab – Årsmøde den 21.-22. juni

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.dfs.nbi.dk

Ian Bearden (formand)

Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Blegdamsvej 17, 2100 København Ø

E-mail: ianbearden@mac.com

Tlf. 35325323

Johannes Andersen (næstformand) (ja@astro.ku.dk)

Helge Knudsen (kasserer) (hk@phys.au.dk)

Ulrik Uggerhøj (ulrik@phys.au.dk)

Kim Lefmann (lefmann@fys.ku.dk)

Mette Grage (mmlg@dmi.dk)

Peter Uhd Jepsen (puje@fotonik.dtu.dk)

Jørgen Schou (josc@fotonik.dtu.dk)

Jørgen Beck Hansen (beck@nbi.dk)

Betal venligst dit kontingent til DFS til tiden enten via PBS eller det udsendte girokort. Selskabet har hvert år et stort arbejde med at sende rykkerskrivelser ud.

DFS årsmøde 2011

Dansk Fysisk Selskab afholder sit årsmøde 2011 på Hotel Nyborg Strand. Mødet starter tirsdag den 21. juni kl. 11 og slutter onsdag den 22. juni kl. 16. På andendagen afholder DFS sin årlige generalforsamling.

DFS-årsmødet vil indeholde følgende plenarforedrag:

- Debra A. Fischer, Dept. of Astronomy, Yale University, USA: *From Hot Jupiters to Habitable Worlds.*
- Thomas Klinger, Max-Planck-Institut für Plasma Physik, Greifswald, Germany: *On the path to steady-state fusion – the stellarator project Wendelstein 7-X.*
- En foredragsholder (Se navn på internetsiden) fra CERN med sidste nyt fra LHC experimentet.
- Som after-dinner foredragsholder vil der være en fremtrædende formidlingsekspert for universiteterne.

Derudover vil der være to foredrag i faststof- og nanobio science. Endvidere vil der være parallelsessioner i astrofysik, atomfysik, faststoffysik, nanofysik, kerne- og partikelfysik, biofysik samt muligvis uddannelse og undervisning. Sideløbende hermed vil forskningsresultater blive præsenteret som posters. DFS lægger herunder særlig vægt på at give yngre forskere mulighed for at præsentere deres resultater for en bredere kreds. Endelig vil der være en firma udstilling med nyt forskningsapparat for DFS' medlemmer.

Alle landets fysikere opfordres til at deltage i Dansk Fysisk Selskabs årsmøde med indlæg og posters og ikke mindst til at bidrage til en livlig diskussion af spændende forskningsresultater.

Program

Årsmødeprogrammet findes på DFS's hjemmeside (www.dfs.nbi.dk). Det vil løbende blive opdateret i takt med modtagelsen af indsendte abstracts. Det endelige program forventes at være klart starten af juni.

DFS posterprisen 2011

DFS ønsker at opretholde det øgede fokus indledt sidste år på årsmødets postersession. Kriterierne, som komiteen efter bedste evne vil benytte under udvælgelsen af årsmødets bedste poster er følgende: Originalt videnskabeligt indhold, rimelig informationsmængde, æstetik, overskuelighed, struktur, 'special effects', og endelig er en engageret præsentation også et plus. Derfor skal posterforfatterne være til stede ved posteren i den ene af de to poster sessioner. De tre bedste poster vil udover den obligate vin- og chokoladepræmie også blive hædret med diplomer. Vinderne kåres umiddelbart efter DFS' generalforsamling før afslutningsforedraget.

Pris for bedste foredrag af ph.d. studerende

I lighed med sidste år vil DFS også uddele en pris med den traditionelle vinpræmie for det bedste mundtlige foredrag givet af en ph.d.-studerende. Ligesom ved posterprisen lægges der vægt på originalt videnskabeligt indhold, rimelig informationsmængde og en engageret fremlæggelse af foredraget.

Frist for tilmelding og indsendelse af abstracts

Fristen for tilmelding til årsmødet og for indsendelse af abstracts er mandag den 16. maj 2011. Tilmeldinger modtages dog også efter denne dato, så længe der er plads på hotellet, men studerende kan ikke søge om friplads (se nedenfor) efter tilmeldingsfristens udløb. Også abstracts kan indsendes efter fristens udløb, men dels kommer disse ikke nødvendigvis med i abstractlisten og dels får indsenderen kun mulighed for en posterpræsentation.

Tilmelding, indkvartering, priser m.v.

Tilmelding til DFS foretages direkte til Hotel Nyborg Strand. Benyt venligst internet-linket til hotellet på DFS's hjemmeside (www.dfs.nbi.dk). Møderne samt

indkvartering foregår på Hotel Nyborg Strand, Østerøvej 2, DK 5800 Nyborg. (tlf. +45 6531 3131, fax +45 6531 3701). Pris for mødedeltagelse, incl. eventuel overnatning og diverse måltider, fremgår af hjemmesiden. Prisen for fuldt ophold med enkeltværelse vil være uændret fra sidste år: 2600 kr. for medlemmer. Betalingsmåder vil fremgå af hotellets bekræftelse, som fremsendes i slutningen af maj måned. Bemærk, at man frem til den 16. maj frit kan afbestille sin tilmelding, men efter denne dato er tilmeldinger almindeligvis bindende.

Fripladser for studerende: Søg senest den 16. maj!

For studerende, der ikke er indskrevet på ph.d.-studiet, vil der være et antal fripladser. Ansøgning om en af fripladserne sker automatisk ved at afkrydse den relevante rubrik på hjemmeside-tilmeldingsskemaet. Studerende kan få friplads af DFS, og her er det en forudsætning, at man er medlem. Fripladserne vil blive fordelt kort tid efter tilmeldingsfristens udløb, og man vil modtage særskilt besked herom den 25. maj. Hvis pladserne er brugt op, har man fortsat mulighed for at deltage mod betaling som anført på tilmeldingsskemaet.

Abstracts

Fristen for indsendelse af abstracts er mandag den 16. maj 2011. Abstracts indsendes via DFS' hjemmeside (www.dfs.nbi.dk). DFS' sektioner sammensætter programmet på grundlag af bl.a. de indsendte abstracts, og deltagerne vil få meddelelse herom, hvis deres bidrag er udvalgt til et foredrag. De øvrige bidrag (samt hvis man ikke ønsker foredrag) vil blive præsenteret i en posterudstilling. Posterboards er 1,15 m brede og 1,45 m høje, og de er hævet ca. 30-40 cm over gulvet. Se endvidere omtalen af DFS posterprisen 2011 ovenfor. De indsendte abstracts vil løbende være tilgængelige på internettet. Overhold venligst tidsfristen for rettidig indsendelse (se afsnittet om tidsfrister ovenfor).

Sprog

Årsmødets sprog er engelsk. Enkelte sessioner, f.eks. indenfor uddannelse og undervisning, kan foregå på dansk. Deltagerne bedes indrette deres præsentationer efter, at hovedparten af tilhørerne er ikke-specialister i det behandlede emne.

Transport

Transport til/fra Nyborg sørger deltagerne selv for. Der vil ikke blive arrangeret bustransport mellem Nyborg Station og Hotel Nyborg Strand. Det tager kun 10-15 minutter at spadserer mellem station og hotel.

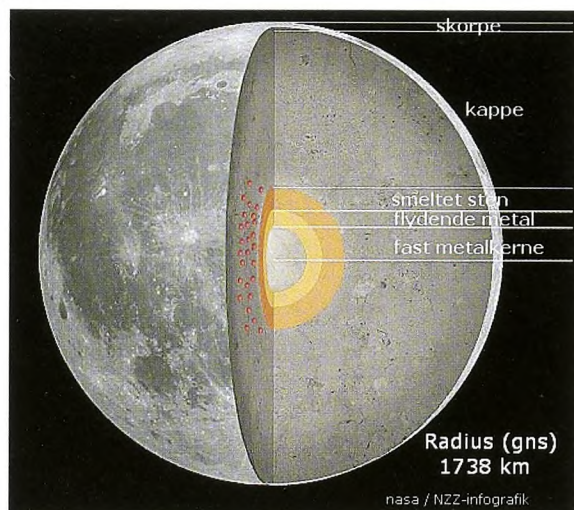
Yderligere information

Spørgsmål vedrørende årsmødet besvares ved at sende en e-mail til Ian Bearden (ianbearden@mac.com). Benyt venligst kun denne adresse til henvendelser vedr. årsmødet.

Af Sven Munk og John Rosendal Nielsen, KVANT

Månens flydende indre

PLANETFYSIK. Under månelandingerne 1969-1972 opstillede astronauterne fire følsomme seismometre, som skulle registrere måneskælv. Med målinger, der pågik indtil 1977, kunne man få et indblik i Månens indre opbygning. I dette tidsrum registreredes over 13.000 måneskælv. Nu har forskere brugt moderne software, som er udviklet til at analysere jordskælv, til at analysere de gamle data fra Apollo-missionen. Herved er der fremkommet et ret detaljeret billede af Månens indre.



I Månens centrum findes en fast kerne, med en stor andel jern og med en diameter på 400 km. Uden om denne findes et flydende lag med en tykkelse på omkring 90 km. I overgangen til kappen findes et, delvist smeltet, lag sten på 150 km. Selve kappen anslås at være 1200 km og skorpen 70 km tyk.

Det nye i disse resultater er, at Månen ikke, som længe antaget, er geologisk død. Dette understøttes af gasudbrud på månen, som kunne have fundet sted for en million år siden. Årsagen kunne være udgasningen fra magmarester i Månens indre.

Kilder: "Seismic Detection of the Lunar Core", Renee C. Weber et al., *Science*, doi: 10.1126/science.1199375; NASA Marshall Space Flight Center (<http://www.msfc.nasa.gov>); School of Earth and Space Exploration, Arizona State University.

Data, data – vi kan nu lagre 295 exabyte data

COMPUTERFYSIK. Hvis du også har fornemmelsen af, at menneskeheden må have lagret enorme mængder af informationer, så er du ikke forkert på den. Forskere har nu forsøgt at beregne vores kapacitet til at lagre data, og den er 295 exabytes data (1 exabyte er 10^{18} bytes eller 1 milliard gigabytes). En kosmisk analogi illustrerer denne enorme mængde information: Hvis hver stjerne er én bit information, så har alle mennesker på Jorden en hel galakse til rådighed – hver!

Det er ikke en nem opgave at beregne kapaciteten af informationer. Der skal medregnes alt fra de trykte medier som aviser og tidsskrifter i hele verden til den lille data-chip, der er i dit kreditkort. Beregningerne er også hurtigt forældede, idet kapaciteten vokser i et rasende tempo. Den

digitale kapacitet alene fordobles omtrent hvert tredje år og fire måneder, hvilket – ifølge en af bagmændene til disse beregninger, Martin Hilbert fra South Carolinas Annenberg School of Communication and Journalism – er fire gange hurtigere end den globale økonomiske vækst.

Man skelner mellem digital og ikke-digital – også kaldt for analog – information. Analog information er information, der ikke er digitaliseret, som papirarkiv, bøger og mikrofilm. Kort efter årtusindskiftet overskred mængden af digital information, for første gang, mængden af analog information. I 2007 var 94 procent af al lagret information gemt digitalt.



Den lagrede information er dog intet i forhold til den mængde information, som vi ustandselig sender i form af forskellige udsendelsesteknologier som radio, tv eller gps. Den anslås til at være 1,9 zettabytes (1 zettabyte er 1000 exabytes eller 10^{21} bytes). Det svarer til, at alle mennesker i verden dagligt kommunikerer hele indholdet fra seks aviser.

Det skal påpeges, at selvom lagringskapaciteten og kommunikationen forekommer som voldsomme tal, så er det intet i forhold til hvad naturen kan lagre og formidle. Oplysningerne i alverdens analoge og digitale lagre er kun en meget lille procentdel af, hvad der er lagret i dit DNA. Og antallet af udregninger som alle klodens computere samlet kan udføre i løbet af et sekund, svarer kun til den mængde af nerveimpulser, din hjerne kan udføre på samme tid. Vores teknologiske formåen har altså endnu meget at lære af naturens verden.

Kilder: <http://videnskab.dk/teknologi/vi-gemmer-og-gemmer-menneskeheden-kan-nu-lagre-295-exabyte-data>

Protonen på slankekur?

PARTIKELFYSIK. For de fysikere, som har brug for at kende størrelsen på en proton, er der en nyhed, som sikkert vækker blandede følelser. De seneste målinger kommer til det resultat, at protonen kun måler 96 % af det, man hidtil har anset for helt korrekt. Den størrelse, der her omtales, er protonens ladningsradius. Hvor man før skulle skrive 0,8768 femtometer, må man vænne sig til det nye: 0,8418 femtometer. Det er en afvigelse, som er mere end 5 gange større end den hidtidigt antagne fejlgrænse.

Et par steder, hvor denne korrektion umiddelbart vil være mærkbar, er beregninger, hvor Rydbergkonstanten indgår og mere alment i kvantelektrodynamik.

For at få det bedste/sikreste måleresultat bør man vælge at måle på et simpelt system. Et sådant er et brintatom, som

består af 1 proton og 1 elektron. At protonen har en udstrækning, giver sig til kende i den såkaldte Lamb-forskydning af elektronens energi-niveauer. For at få en mere præcis måling udskiftede forskerne elektronen i brintatomet med en myon. Denne har samme elektriske ladning, men en masse som er 200 gange større. Virkningen af denne masseforøgelse er, at den negative ladning kommer til at bevæge sig tættere på protonens overflade, og Lamb-forskydningen bliver større. At forskerne så, for at nå deres mål, måtte skaffe sig en ny myonkilde, er en anden historie.

Kilde: "The size of the proton", R. Pohl et al., *Nature* 09250, 2010.

Juno til Jupiter

PLANETFYSIK. Hvis alt går efter planen vil rumsonden "Juno" begynde sin rejse mod Jupiter i august 2011 og vil så 5 år senere være fremme ved målet. Juno var, i den romerske mytologi, en gudinde, himlens dronning, der var gift med Jupiter.

Juno er forsynet med 9 instrumenter, som bl.a. skal undersøge om Jupiter har en fast kerne, kortlægge det kraftige magnetfelt i og omkring Jupiter, måle koncentrationen af vand og ammoniak og iagttage planetens auroraer (nordlys).



Måling af Jupiters magnetfelt, som er 20.000 gange så kraftigt som jordens, sker ved hjælp af vektor-magnetometre af flux-gate-typen. Ved at måle magnetfeltet kan man få viden om det, der foregår langt inde i Jupiter. Set på afstand har Jupiter en magnetisk nordpol og en sydpol, ligesom Jorden. Tættere på og under planetens overflade forventer man at finde magnetiske feltlinjer, som ligner en ret spaghetti. For øjeblikket har man kun forenkede idéer om de fysiske processer, som danner disse felter. En af disse er, at det enorme tryk inde i Jupiter omdanner brint til en elektrisk ledende væske. Bevæger denne brint-væske sig, induceres der spændinger, som giver elektriske strømme og dermed magnetfelter.

Det, der betegnes som Jupiters magnetosfære, har en enorm udstrækning. Mod solen rækker den 3 millioner km ud og i den modsatte retning helt ud Saturns bane.

De kraftige magnetfelter har også en virkning, som kendes fra Jorden, nemlig aurora. På Jupiter finder man de mest lysstærke auroraer i hele solsystemet. Desuden er den store magnetiske feltstyrke i stand til at indfange elektrisk ladede partikler, i langt større udstrækning end det kendes fra Jorden. Partikelstrålingen nær Jupiters poler er så kraftig, at det har været nødvendigt at forsyne Juno med en beskyttelseskappe. En af Junos måleopgaver bliver at indfange ladede

partikler nær polerne, samtidig med at magnetfelt og UV-aurora-stråling måles.

Hvert af de to vektor-magnetometre er forsynet med et par stjerne-kameraer, som skal bestemme sondens position i rummet. Disse kameraer er bygget af et team på DTU ledet af John Jørgensen.

Kilder: <http://www.nasa.gov/juno>; <http://junomag.gsfc.nasa.gov/instruments.html>

Invitation til: Netværk for Kvinder i Fysiks Årsmøde

Tirsdag den 3. maj 2011 på:

Experimentarium

Tuborg Havnevej 7

2900 Hellerup

Netværk for Kvinder i Fysiks årsmøde er åbent for alle interesserede. Mødet, inklusive entré og kaffe/te, kage og frugt, er gratis, mens fælles frokost og middag er selvbetalt. Tilmelding sker ved at sende en mail til Mette Grage, mmlg@dmu.dk, med titlen "KIFs årsmøde på Experimentarium", indeholdende navn, eventuelt tilhørsforhold og adresse, samt abstract, hvis man ønsker at præsentere en poster. Tilmeldingsfrist: tirsdag den 26. april klokken 12. Afbud skal ske senest mandag den 2. maj klokken 12, ellers vil der blive opkrævet et beløb på 100 kr.

Program:

- 9:30 Registrering
- 10:10 Velkomst
- 10:15 Sheena Laursen, Experimentarium: "TWIST – Towards Women In Science and Technology: Experimentarium sætter fokus på kvinder i forskning og forsøger at udfordre folk i forhold til deres 'måske' stereotype holdninger."
- 11:00 Pause
- 11:30 Professor Anne l'Hullier, Lunds Universitet: "Attosecond Pulses and Attosecond Physics"
- 12:30 Frokost, postersession
- 14:00 Årets KIF-prisvinder
- 14:45 Henriette Holmegaard, Københavns Universitet: "Hvis kvinderne strømmer ind på naturvidenskab, hvad er så problemet? En præsentation af de udfordringer der identificeres i den internationale køns- og uddannelsesforskning".
- 15:30 Pause
- 15:45 Netværk for Kvinder I Fysiks generalforsamling (kun for medlemmer)
- 16:30 Fri leg
- 18:30 Middag og fri leg (slut kl. 21:00)

Festligt fysikforsøg – Glasset drikker, lyset hæves

Af Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugh, KVANT

Der findes mange festlige fysikforsøg, der kan udføres med simple hjælpemidler, og som kan inspirere til en diskussion om fysik. Vi modtager – meget gerne – eksempler på små festlige fysikforsøg, enten som løse idéer/beskrivelser (som vi skal redigere), helst med illustrationer, eller som forslag til færdige artikler (så vi ikke behøver at redigere).

Indledning

Vi vil i KVANT meget gerne vise og diskutere nogle flere små *eksperimentelle forsøg*, der er lidt sjove og festlige. Derfor prøver vi, blandt andet, at starte denne lille spalte, hvor vi gerne vil inspirere vores læsere til at lege og eksperimentere med fysikken og diskutere fysiske effekter.

Vi vil (som nævnt i vort abstrakt) – meget stærkt – opfordre vores læsere til at indsende idéer til diverse små forsøg og bidrag til diskussion af løsninger (e-mail: kvant@kvant.dk). Det kan være egentlige *fysiske eksperimenter* men det kunne også være sjove *tankeeksperimenter* og paradokser (jf. fx spalten “Paradokser og opgaver” i det udmærkede tidsskrift GAMMA, udgivet af studerende på Niels Bohr Institutet gennem knap 40 år). Oplagte inspirationskilder kunne være bøger som fx Jearl Walker “The Flying Circus of Physics – With Answers” (John Wiley and Sons, 1975) [www.flyingcircusofphysics.com] eller Lewis Carroll Epstein and Paul G. Lewitt “Thinking Physics” (i mange udgaver) [se også fx www.conceptualphysics.com]. Inspirationskilder til de små eksperimentelle fysikforsøg kunne være bøger med titler som “Tricks og sjove forsøg”, “Sjov med væsker” eller fx “Sjove Fysikforsøg” af Francois Cherrier (Lademann, 1980). Nogle af os har haft glæde af en “Fysikkuffert” med diverse “*stand-up fysik*” (fra verdensfysikåret 2005, se fx www.testoteket.dk). Klaus Seiersen har på fysikbasen.dk mere end hundrede forskellige forsøg. Vi hører gerne om (nogle af) dem! Weekendavisen beskriver i det udmærkede tillæg “Faktisk” små sjove forsøg på en måde, der er til at forstå.

På Niels Bohr Institutet og H.C. Ørsted Institutet er der ligefrem en “Fysiklegestue”, som vi håber kunne have lyst til at skrive til Kvant, og berette om deres festlige små eksperimenter fra krypten (www.legestuen.nbi.dk). Tilsvarende aktiviteter findes på andre universiteter.

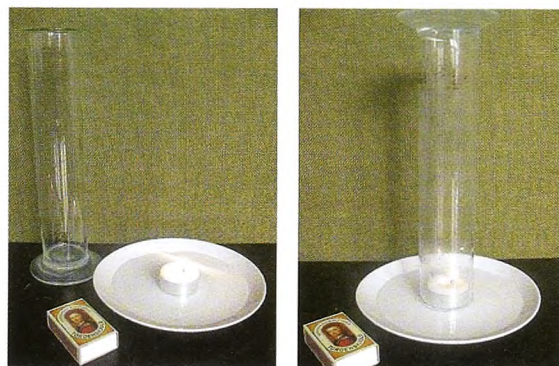
Vi håber således, at der gradvist vil kunne opbygges et slags eksempel-katalog med gode små eksperimenter og referencer til bøger og tidsskrifter, som kan være nyttige for læserne. “Politisk *ukorrekte* forsøg”, som fx en pølse, der sprænges i stykker, når den udsættes for høj spænding (220 eller 380 volt) (Se fx “Lysende saltgurk i elektrisk stol” i KVANT nr. 4 (december 2008)) – og den slags fysik “*i aktion*” – skal suppleres med nogle beskrivelser af relevante sikkerhedsforanstaltninger.

Forsøgene skal (helst) være simple at udføre, så også fummelfingrede teoretiske fysikere kan få dem til at virke. Men også gerne være lidt spektakulære, så fx eleverne motiveres. Altså den slags “hands on fysik”, “fysiklegestueforsøg” eller “køkkenbordsfysik”, som både kan overraske og lægge op til fysiske fænomener som man gerne selv – og sammen med nysgerrige venner og elever – vil prøve at forstå og måske får lyst til at regne lidt på.

Glasset drikker – lyset hæves: Kan vi få et lys til at hæve sig uden at røre det?

“Dagens forsøg” er beskrevet i et tidligere nummer af KVANT (nr. 3, 2010) og det har også været beskrevet som et af flere “Bar-tricks” på Videnskab.dk, der desuden er citeret i et nummer af Weekendavisens tillæg “Faktisk” (22. okt. 2010).

Det er et lille forsøg, der er nemt at udføre, men – som vi skal se – ikke er helt så nemt at forklare. Der er adskillige forhold der bidrager til den fysiske effekt.



Figur 1. Til venstre: Tallerken med lidt vand og et tændt fyrfadslys samt et højt og slankt glas eller en glaskolbe. Til højre: Glasset placeres over lyset. Efter få øjeblikke slukker lyset og noget af vandet suges ind i glasset. Lyset kan hæves flere centimeter op fra tallerkenen. Med en buttet 2 liter glaskolbe er det nemt at få lyset til at hæve sig knap 10 centimeter (se senere).

Sådan udføres forsøget: Sæt fyrfadslyset på en tallerken. Hæld vand i tallerkenen så det når cirka en tredjedel op ad fyrfadslysets kant. Tænd lyset. Sæt det store glas ned over lyset. Lyset vil da – efter måske ca. 10 sekunder – først løftes, mens det brænder, og løftes yderligere, nok engang, efter at lyset slukkes (og luften afkøles).

Forslag til løsning

Vi har i KVANT, til vor glæde, modtaget en del forskellige forslag, fra én nuværende og tre pensionerede lektorer på forskellige universiteter.

1) *Erik Both* (EB) er pensioneret lektor i fysik fra DTU, og vil være mange læsere bekendt som medforfatter til de udmærkede bøger *Spektrum I* og *II*. Han har med Henning Henriksen (som også er medforfatter til den sjove og meget interessante bog “Bogen om Grundstofferne”, der har et par siders opslag om hvert eneste grundstof) behandlet forsøget i et eksperiment for 8. klasse i bogserien KOSMOS [1]. Forfatterne fortæller, at forsøget stammer helt tilbage fra den engelske kemiker og læge John Mayow (1641-1679) som mente, at den mængde vand, der steg op i glasset, svarede til den mængde af luft, der nærede forbrændingen. Det var før den svensk/tyske kemiker Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) påviste luftarten oxygen.

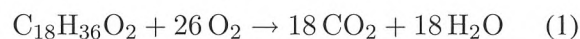
Som forklaring på forsøget skriver Henning Henriksen og Erik Both bl.a. (redigeret efter aftale med EB): Ved forbrændingen dannes CO_2 , der erstatter en del af det oxygen, som bruges ved forbrændingen (jf. reaktionsligning (1)). Derfor vil rumfanget kun formindskes med ca. 6 %, og ikke ca. 21 % (alm. atmosfærisk luft indeholder ca. 21 % O_2). Med et lille glas vil det nok blive mere end 6 % pga. den luft, der bobler ud i starten. Udføres forsøget i et stort glas, vil denne effekt formindskes. Lyset vil gå ud, inden det sidste oxygen er brugt op. Forsøget kan bruges til at erkende, at oxygen forsvinder ved forbrændingen og for at få en mere nøjagtig bestemmelse af luftens oxygenindhold, kan man lave et demonstrationsforsøg, hvor væsken er fortyndet natriumhydroxid. Carbondioxid er letopløselig i base, og man vil derfor se, at vandet stiger en del mere end de ca. 6 %.

EB henviser desuden til det første af en række “Bar-tricks” beskrevet på Videnskab.dk [2]. Han vurderer, at trykket hovedsagligt falder, fordi antallet af luftmolekyler bliver mindre, især fordi vanddampen, der dannes som restprodukt ved forbrændingen (se reaktionsligning (1) senere), kondenseres på indersiden af glasset.

2) *Jens Højgaard Jensen* (JHJ), lektor i fysik ved RUC – og bl.a. kendt fra KVANTs breddeopgaver, kommer i samme artikel [2] med forklaringen: “Lufttrykket inde i glasset falder, mens luften uden for presser ned på vandet. Dermed bliver vandet skubbet ind i glasset, hvor trykket er mindre end i atmosfæren”. Han sammenligner vandsøjlen i glasset med et barometer. Han mener dog, at sagen er mere kompliceret, da lufttrykket i glasset afhænger af både temperaturen og luftfugtigheden i glasset. Luftfugtigheden har betydning for, om vanddampen kondenserer, og dermed sænker lufttrykket i glasset. Temperaturen i glasset har betydning for, hvor meget luften flyder.

3) *Lars Drud Nielsen* (LDN) er pensioneret lektor fra DTU, og har sendt en detaljeret støkiometrisk¹ beregning af forskellen mellem start- og sluttstanden og negligerer i første omgang det dynamiske forløb imellem disse tilstande:

Vandet suges ind i glasset, fordi det indespærrede luftvolumen reduceres under forbrændingsprocessen. Stearinsyre² har formelen $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$, dvs. bruttoformlen $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$. Forbrændingsprocessen bliver:



Den oprindelige atmosfære antages (i runde tal) at bestå af ca. 20 % O_2 og ca. 80 % N_2 . Fyrfadsløset antages at slukke, når der ikke er mere O_2 . Luften inde i glasset består derefter af N_2 i uændret mængde og CO_2 fra forbrændingen af stearin eller paraffin. Forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen bliver da:

$$\frac{V_{\text{slut}}}{V_{\text{start}}} \cong \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}}{V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}} \quad (2)$$

Vanddamp (H_2O) antages uden indflydelse. Partialtrykket af mættet vanddamp omkring stuetemperatur er kun 2-3 % – og vil i øvrigt påvirke både tæller og nævner. Med de 26 O_2 følger ca. $4 \cdot 26 = 104 \text{ N}_2$. Forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen bliver da³:

$$\frac{V_{\text{slut}}}{V_{\text{start}}} = \frac{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2}}{n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{18 + 104}{26 + 104} = 94 \% \quad (3)$$

I et cylindrisk glas (hvor rumfang og højde er proportionale) stiger vandet altså ca. 6 % op. Hvis fyrfadsløset er lavet af paraffin (som ikke indeholder O og har bruttoformel mellem $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ og $\text{C}_{60}\text{H}_{122}$), bliver forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen nærmere 93 %, så vandet kan stige næsten 7 % op i glasset.

Til beregningerne knytter der sig flere antagelser, hvoriblandt den væsentligste er antagelsen om, at lyset først går ud, når det allersidste iltmolekyle i glasset er brugt op. Der er yderligere antaget samme temperatur og tryk inden for og uden for glasset. Trykforskelle kan negligeres, så længe vandsøjlen er af størrelsesordenen cm og ikke meter. Temperaturforskelle udlignes efter kort tid og har kun indflydelse på overgangsforløbet.

LDN beskriver processen således: Det brændende lys vil, gennem varmetilførslen, bidrage til en udvidelse af den til enhver tid eksisterende gasblanding. Den termiske udvidelse og den gradvise støkiometriske reduktion af gasmængden ser under de praktiske omstændigheder ud til at holde hinanden nogenlunde i skak. Jeg har aldrig observeret, at den termiske udvidelse tager overhånd og medfører udslip af varm luft. Når lyset slukker, indstiller der sig ret hurtigt termisk ligevægt mellem luften i glasset og luften uden for. Derefter er der kun de støkiometriske konsekvenser tilbage – nemlig en volumenreduktion på ca. 6 %.

¹En støkiometrisk beregning er en beregning af kvantitative sammenhænge mellem reaktanter og produkter i kemiske reaktioner.

²Stearinlys er typisk en blanding af stearinsyre med noget palmitinsyre eller også ren stearinsyre.

³For en ideal gas er rumfanget, V , proportional med stofmængden, n , ved fastholdt temperatur, T , og tryk, p .

LDN har opstillet en dynamisk model for overgangsforløbet, der består af et sæt koblede differentiaalligninger med fire parametre, som han har løst numerisk med passende valg af værdier. Med denne model kan han efterligne den opførsel, som iagttages i forsøget. Han opsummerer sine erfaringer med forsøg og model:

Den kemiske proces giver en gradvis og vedvarende volumenreduktion. Hvis man kun er interesseret i slutresultatet (ca. 6 % ved fuldstændig forbrænding), er der ikke mere at bekymre sig om. Opvarmningen giver en forbigående volumenforøgelse. De to bidrag skal adderes, og varmekapacitet og varmeafledning er afgørende for "transient"-forløbet (indsvingningsforløbet). Hvis der skulle opstå en netto volumenudvidelse i begyndelsen, kan der undslippe en mindre luftmængde, der resulterer i en større endelig volumenreduktion.

4) *Carl-Erik Sølberg* (CES) er tidligere lektor fra Aalborg Universitet og har sendt os en detaljeret beregning af trykændringen, hvor han antager at lysets opvarmning af luften er ansvarlig for hele effekten. Vi bemærker, at denne fysik er væsensforskellig fra den ovenfor nævnte. Argumentationen er følgende:

Når glasrøret er sat over flammen, stiger trykket pga. opvarmningen og luften bobler ud undervejs, så trykket hele tiden er i balance med atmosfæretrykket $p_0 = \rho g L$, hvor $L = 10,3$ m er barometerstanden, ρ er vands massefylde og g er tyngdefeltets intensitet. Når forbrændingen nærmer sig sin afslutning er temperaturen højest, T_H . Voluminet er $V_0 = A \cdot l$, hvor A er rørets tværsnitsareal, og l er dets længde. Efter lyset er slukket, køles luften til stuetemperaturen T_0 , vandstanden i røret stiger nu til h , og trykket i luften er $p = p_0 - \rho g h$. Voluminet er nu $V = V_0 - Ah$.

Luften betragtes som en ideal gas i begyndelsestilstanden:

$$p_0 V_0 = n R T_H \quad (4)$$

og ligeledes i sluttetilstanden:

$$(p_0 - \rho g h)(V_0 - Ah) = n R T_0 \quad (5)$$

Ved trivielle omformninger (hvor definitionerne for p_0 og V_0 indsættes i ligning (4) og (5) og n , R , ρ , g og A elimineres) fås andengradsligningen:

$$\left(\frac{h}{l}\right)^2 - \left(\frac{L}{l} + 1\right) \left(\frac{h}{l}\right) + \frac{L}{l} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) = 0 \quad (6)$$

Vi tilnærmer: Med $l = 0,5$ m bliver $\frac{L}{l} \approx 20 \gg 1$, og ligningen får de to løsninger: $\frac{h}{l} \approx \frac{L}{l}$ og $\frac{h}{l} \approx 1 - \frac{T_0}{T_H}$, hvoraf kun den anden er brugbar.

CES 'gætter' på, at flammen opvarmer gassen til $T_H = 800$ K og finder: $\frac{h}{l} = \frac{5}{8} = 0,625$. I forbrændingsprocessen er kvælstoffet passivt. Kun de 21 % ilt deltager og derfor multiplicerer vi med andelen af ilt i atmosfæren og får: $\frac{h}{l} = \frac{5}{8} \cdot 0,21 = 0,13$.

Begrundelsen for gassens højeste temperatur er følgende. Lysets massetab pr. tid kan sættes⁴ til ca. 0,05 g/min. Benyttes en brændværdi for stearin på 46 kJ/g fås lysets effekt til: $P = 38$ W. Med en brændetid på ca. 25 s fås en forbrændingsvarme $Q_F = 950$ J, som afsættes til gas, glasvæg, paraffin og skål.

Hvis lyset har været tændt i lang tid inden forsøget starter vil der desuden være et par gram smeltet stearin, som optager en energimængde (størkningsvarmen): $Q_S = 200$ J/g · 2 g = 400 J.

Med et slankt glas med $l = 0,5$ m sætter vi (i runde tal) luftmængden i glasset til $n = 1/25$ mol. Gassen (som antages at bestå af 2-atomige molekyler) har varmekapaciteten: $C = n \frac{7}{2} R = \frac{1}{25} \text{ mol} \cdot \frac{7}{2} \cdot 8,31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} = 1,2 \text{ J/K}$. Hvis al varmen går til gassen bliver temperaturændringen $\Delta T = \frac{950 + 400 \text{ J}}{1,2 \text{ J/K}} = 1125 \text{ K}$.

Gassens temperatur stiger således fra ca. 300 K til ca. 1425 K. CES gætter på en fællestemperatur på ca. 800 K. Denne temperatur skal ses som et gennemsnit for hele gassen i glasset⁵.

Ved et konkret forsøg har CES målt rørets bruttolængde til 428 mm. Derfra skal trækkes vandstanden i røret i udgangstilstanden, 5 mm. Lyset fylder også noget. Dets korrigerede højde er: $l_{\text{lys}}^{\text{kor}} = l_{\text{lys}} (d_{\text{lys}}/d_{\text{rør}})^2 = 5,1$ mm. Røret nettolængde er $l = (428 - 5 - 5) \text{ mm} = 418$ mm, og beregningen viser, at vandet skulle stige 54 mm op i røret. Den målte værdi er $(55 \pm 1) \text{ mm}$. Temperaturgættet var 'heldigt'. CES konkluderer: Min beregning og ikke mindst målingen viser, at vandet stiger ca. 13 % op.

Diskussion

De to væsentligste effekter er:

1. EB+LDN observerer, at vandet stiger ca. 6 % op, pga. en ændret sammensætning af gasserne.
2. CES observerer, at vandet stiger ca. 13 % op, pga. at luften opvarmes og udvider sig og derefter afkøles og trækker sig sammen.

Der er højst sandsynligt tale om en kombination af begge effekter.

Derudover kan der være mindre bidrag af varierende størrelse: 1) Tilbageværende oxygenindhold ved afslutningen 2) Kondensation af vanddamp 3) Strømningsforholdene i det lukkede rum 4) Mængden af smeltet stearin der størkner (og optager varme fra gassen).

Vi har begge observeret bobler, der kommer ud *lige før lyset går ud* og sammenholdt med, at stigningen af vand tager til *efter* at lyset er slukket, så er trykændringerne af betydning og, efter al sandsynlighed, en konsekvens af temperaturændringer.

Konklusionen er, foreløbig, at vandet (lyset) kan hæves 6-13 % af rumfanget afhængig af omstændighederne. En nærmere analyse skulle fx involvere en eksperimentel bestemmelse af lysets effekt og massetab, luftfugtigheden, iltindholdet ved afslutningen, geometrien

⁴Denne størrelse kan bestemmes groft ved at dividere massen af et fyrfadsllys (20 g) med brændtiden (6 timer), eller med en præcisionsvægt.

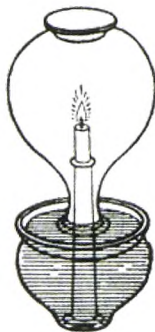
⁵Luftens temperatur er højest meget tæt på flammen og aftager meget kraftigt med afstanden fra lyset til ca. stuetemperatur ved glasvæggen.

af opstillingen og strømningsforholdene i det lukkede rum. Denne udfordring kunne måske være emnet for et studieretningsprojekt i 3.g, eller et studenterprojekt på universitetet? Vi håber med denne artikel at have aflivet nogle myter om at der er en meget enkel forklaring.

En historisk note

Luft er et af de fire oldgræske elementer. Men også i andre gamle kulturer blev luft, hvor man bemærkede dens eksistens, betragtet som ét element. Leonardo da Vinci (1452-1519) citeres for at være den første europæer, som gav udtryk for tvivl på, at atmosfærisk luft er ét element. Han bemærkede, at luft forsvinder – men ikke fuldstændigt – hvor dyr ånder, eller forbrændinger foregår, og han beskrev sammenhængden: “Hvor en flamme ikke kan leve, kan intet dyr, der ånder, leve” [4].

Vi har sporet en variant af forsøget helt tilbage til den antikke ingeniør Philon fra Byzans (280-220 evt.), der beskrev et forsøg som vist på figuren nedenfor. Eksperimentet skulle illustrere, at der ikke findes “kontinuert vakuum”⁶.



Figur 2. Eksperiment med et lys der brænder i et glas beskrevet af den antikke ingeniør Philon fra Byzans (280-220 evt.). Forsøget er refereret af Heron fra Alexandria (10-70 evt.) i hans værk “Pneumatikken” (fx, engelsk udgave, 1899), hvor tegningen er taget fra.

Hvor højt vil lyset – maksimalt – kunne hæves?

Med en 2 liters buttet glaskolbe (med en slank hals hvor lyset kan løftes indeni) er det nemt at få lyset hævet op til knap 10 centimeters højde. Men hvor højt vil lyset egentlig kunne hæves – her tænkt som et tankeeksperiment eller et fysisk eksperiment udført i praksis?

Hvis man kunne få trykket ned på nul, inden i glaskolben, ville en vandsøjle, som bekendt, kunne blive ca. 10 meter (1000 cm) høj. Hvis trykket kun kan nå ned på 0,94 atm, er en øvre grænse måske ca. 60 cm? Vi kunne tænke os et slags Storm P. agtigt forsøg med et mindst 60 cm højt glasrør, som ikke er meget tykkere end stearinlyset, der leder op til en stor buttet glaskolbe med luft (måske flere kubikmeter luft), altsammen holdt oppe (i vor stadige kamp mod tyngdekraften) af diverse Storm P. agtige anordninger. I en sådan opstilling spekulerer vi på om vandet, og stearinlyset, inde i det tynde

rør måske kan stige ca. 60 cm op? Hvis en eller flere læsere sender velkvalificerede, og velformulerede, bud på dette spørgsmål – bringer vi det gerne i denne spalte.



Figur 3. Vandet løfter stearinlyset ca. 8 centimeter op i en buttet (konisk) 2 liter glaskolbe (som jo forefindes i ethvert kemilokale)

En pointe ved et forsøg som dette er, at det kan forberedes på fem minutter; det overrasker de fleste når de ser det første gang, og det giver anledning til gode diskussioner om tryk, temperatur, forbrænding, luftens sammensætning og mange andre emner. I forbindelse med undervisning i fysik og kemi i gymnasiet kan det virke motiverende ved gennemgang af fx idealgasligningen. Der skal nogle beregninger til for at kvalificere diskussionen af hvad der sker. På denne måde kan man lege sig lidt til noget grundlæggende fysik. Man kunne fx lade eleverne udføre forsøget parvis og bede dem diskutere hvad der sker (eventuelt ud fra nogle arbejdsspørgsmål).

Vi takker for ovennævnte bidrag til diskussioner af “dagens forsøg”, og vi vil også gerne takke Jannik Lundgaard Rasmussen for mange diskussioner om dette og andre fysikeksperimenter. Tak til Karin Tybjerg for uddybning af Philons eksperiment. Til sidst en tak til Johanne de Leon, der for en del år tilbage viste os dette lille forsøg. Ved en superfestlig lejlighed.

Litteratur

- [1] Erik Both, Henning Henriksen: KOSMOS, Læreresource B, side 217. Gyldendal 2009.
- [2] Jonas Salomonsen, Få glasset til at drikke, Videnskab.dk den 5. februar 2010, <http://www.videnskab.dk/content/dk/temaer/bar-tricks>
- [3] Fysikbasen, forsøg nr. 69, Tændstik 'opsuger' vand, <http://www.fysikbasen.dk/index.php?id=69page=Vis>
- [4] E. Rancke-Madsen (1984), Grundstoffernes opdagelseshistorie, Gads Forlag, s. 46.
- [5] Der findes flere film der demonstrerer forsøget, fx: http://www.metacafe.com/watch/1698720/-water_sucked_into_a_bottle_how/

⁶Videnskabshistoriker Karin Tybjerg fortæller: “Flere af de antikke tænkere mente at man kunne have små mini-vakua mellem partikler eller atomer. Spørgsmålet er så om partiklerne kan trækkes fra hinanden så der dannes et kontinuert vakuum. Diskussionerne er meget komplicerede: Er et vakuum tomt rum eller er der heller ikke rum?”

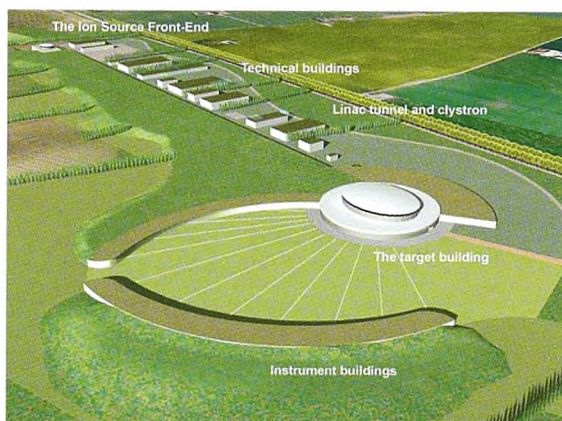
ESS: En forskningsfacilitet i verdensklasse under opbygning i Lund

Af Kim Lefmann, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og European Spallation Source, Lund, Sverige, Lise Arleth, Institut for Grundvidenskab og Miljø, Fakultet for Biovidenskab, Københavns Universitet, Niels Bech Christensen, Afdeling for Materialeforskning, Risø-DTU, Søren Pape Møller, ISA, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, Stig Skelboe, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og European Spallation Source, Lund, Sverige og Peter Kjær Willendrup, Afdeling for Materialeforskning, Risø-DTU

European Spallation Source (ESS) bliver en fælles-Europæisk forskningsfacilitet til undersøgelse af materialer ved hjælp af spredning af langsomme neutroner. Den vil blive meget (10-100 gange) mere effektiv end tilsvarende anlæg i Europa, Japan (J-PARC) og USA (SNS). Den vil derfor blive verdens førende neutronfacilitet, som kan ventes brugt af 2000-4000 forskere hvert år inden for mange discipliner af teknik og naturvidenskab. En tegning af ESS faciliteten er vist på Figur 1.

1. ESS og MAX-IV

Neutronspreddning har, sammen med røntgenspreddning, igennem et halvt århundrede været en af de væsentligste teknikker til undersøgelse af atomar struktur og andre egenskaber af hårde, bløde, og biologiske materialer. Traditionelt har man brugt neutroner produceret i reaktorer optimeret til forskningsformål. Den førende facilitet af denne type, Institut Laue-Langevin (ILL) i Grenoble (F) [1], blev taget i brug i 1970.



Figur 1. Skitse af ESS. Længden af acceleratoren er ca. 400 m, og de længste neutronguides (hvide streger) er ca. 300 m.

Forslaget om et nyt fælles-europæisk ESS projekt er flere gange blevet lagt frem uden at blive vedtaget, men i maj 2009 lykkedes det endelig. På et sent aftenmøde mellem Europæiske forskningsministre stod valget mellem tre "finalister": Debrechen (H), Bilbao (E), og Lund (S). Efter en nervepirrende ventetid faldt valget på Lund; til stor begejstring for mange forskere, der fulgte live opdateringer på Sydsvenskan's hjemmeside. "Sejren" i konkurrencen blev muliggjort af et stort lobbyarbejde fra de skandinaviske forskningsmiljøer, kraftig opbakning fra landenes ministerier, og ikke mindst et utroligt dedikeret projektteam i Lund [2].

Finansieringen af byggeriet af ESS (ca. 1.5 mia. euro) dækkes med 50 % fra de skandinaviske lande

(12,5 % fra Danmark). Spanien har forpligtet sig til yderligere 10 % finansiering, og de resterende 40 % skal fordeles mellem de øvrige 12 medlemslande, især Tyskland og Frankrig, mens Storbritannien ikke forventes at blive medlem fra starten. Driftsudgifterne (knap 100 mio. euro/år) ventes fordelt nogenlunde efter BNP, omend Sverige som værtsland vil skulle betale en højere andel. Også Danmark kommer til at betale en smule mere – som medvært. Datacentret, der skal behandle de mange data fra ESS og forvandle dem til videnskab, kommer nemlig til at ligge i København.

Projektets videnskabelige aktualitet er på det seneste blevet forøget væsentligt, idet man i november 2010 påbegyndte bygningen af synkrotron-røntgenkilden, MAX-IV, på Brunnshög 4 km NØ for Lunds centrum, lige ved siden af grunden hvor ESS skal stå. MAX-IV vil blive af en kvalitet, der kan måle sig med de allerbedste røntgenkilder i verden [3]. Synergien mellem forskningsmiljøerne ved MAX-IV og ESS forventes at blive stor, da mange forskergrupper med fordel vil kunne anvende begge faciliteter.

Indtil starten af 2013 er ESS projektet i "design update" fasen, hvor projektet bliver færdiggjort i stor detalje. Herefter vil medlemslandenes regeringer beslutte at starte byggefasen. Forskningen ved ESS forventes at starte i 2019, mens hele faciliteten først forventes at være fuldt udbygget i 2025.

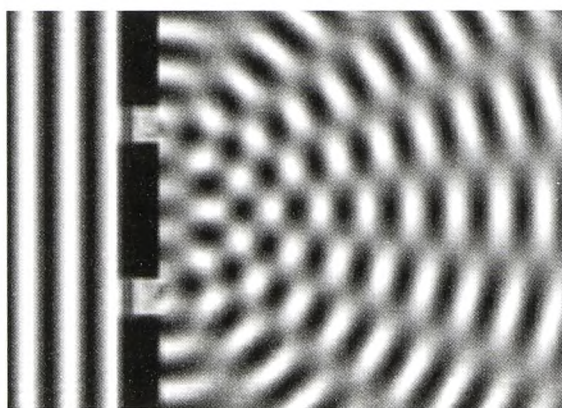
I denne artikel vil vi beskrive, hvilken forskning, man kan udføre med neutroner og med ESS, og især om det arbejde i design update fasen, som vi og andre danske forskere i øjeblikket er stærkt engageret i.

2. Fysikforskning med neutroner

Vi vil her først præsentere neutronspreddning generelt, og derefter komme med aktuelle eksempler fra forskning i faststoffysik og biofysik fra danske forskningsgrupper. For yderligere uddybning og eksempler skrevet på dansk vil vi henvise til et nyligt særnummer af KVANT om forskning med neutroner [4], samt [5]. Flere detaljer kan fås i lærebogsmateriale, f.eks. [6,7].

Neutronspreddning

Neutronen er en kernepartikel, der har omtrent samme masse som protonen, men som er uden elektrisk ladning. Som andre partikler af atomar størrelse har den fremherskende bølge- såvel som partikelegenskaber. Neutroner, der bevæger sig med en vis hastighed, v , opfører sig således, ifølge DeBroglies relation, præcis som en bølge med bølgelængden $\lambda = h/mv$, hvor h er Planck's konstant og m er neutronens hvilemasse. Neutroner, der anvendes til spredning, vil typisk have en hastighed, der svarer til bølgelængder i intervallet fra 1 Å til 40 Å. Disse bølgelængder er sammenlignelige med typiske afstande mellem atomer, hvilket gør det muligt at benytte neutronerne til at undersøge, hvordan et bestemt stof ser ud på atomar skala; se figur 2. Grundet deres manglende ladning er neutroner meget gennemtrængende. Dette betyder at de, ligesom røntgen-stråling, er gode til at "se ind i" stof. Modsat fotonerne i røntgen-stråling, har neutronerne et magnetisk moment. Det betyder, at de både er følsomme overfor rumlig molekylær struktur og rumlig magnetisk struktur, hvilket gør dem særdeles anvendelige til at studere fænomener, der involverer magnetisme.



Figur 2. Billede af en bølge, der passerer igennem to huller, og derefter udviser interferenseffekter. En "neutronbølge", der rammer to atomer vil spredes på samme måde.

Neutroner har den specielle egenskab, at de vekselvirker stort set lige kraftigt med de fleste isotoper af grundstofferne. Dog vil hydrogen, ^1H , skille sig markant ud ved at vekselvirke meget stærkt med neutronerne. Det betyder, at neutroner vil se en stærk kontrast mellem hydrogen-rige og hydrogen-fattige områder af en prøve. Herimod vil røntgenstråling vekselvirke med elektronerne i en prøve, og derved se kontrast mellem de elektron-rige og elektron-fattige dele af en prøve. Dette vil stort set svare til de dele med henholdsvis høj og lav massefylde. De to kontrast-situationer betyder, at neutroner og røntgen komplementerer hinanden på smukkeste vis. Nogle dele af prøven træder tydeligt frem i neutroneksperimentet mens andre dele træder mere tydeligt frem i røntgeneksperimentet. Tilsammen kan man få dannet et meget præcist billede af prøvens struktur.

Den kinetiske energi af neutronen kan beregnes ud fra $E = \frac{1}{2}mv^2$. Det viser sig, at de nævnte neutroner

med bølgelængder fra 1 Å til 40 Å har en energi (80 meV til 0,05 meV), der svarer meget godt til den energi, der skal til for at sætte et krystal-gitter i svingninger. Som det bliver beskrevet i næste kapitel udnyttes dette sammenfald til at måle, hvordan atomerne i et stof bevæger sig.

I forbindelse med strukturundersøgelser betragtes både neutroner og røntgen normalt som prober, der i udgangspunktet ikke ødelægger prøvens struktur. Man "gennemlyser" blot prøven med enten neutron- eller røntgen-strålingen og kan derefter, i princippet, tage den uskadte prøve ud af beamet.

Dansk neutronspreddning i 2011

Danmark har en stolt tradition for neutronspreddning, ikke mindst på grund af faciliteten på DR3 reaktoren på Risø, som blev lukket i 2000 [4]. De fleste af Risø's tidligere neutroneksperter er nu flyttet til andre steder i landet og har opbygget store og små grupper. I alt er der i dag lidt over 100 forskere i Danmark, der aktivt benytter neutronspreddning til forskning. Disse forskere er organiseret i brugergruppen DANSSK [8].

To af instrumenterne fra DR3 blev flyttet til Schweiz; til Paul Scherrer Institutet (PSI) [4,9], med hvilket vi har opbygget et tæt samarbejde. Vi har således i lange perioder haft to post docs udstationeret, og vi har samfinansieret adskillige danske ph.d.-studenter, der har udført en del af deres projekt på PSI. Igennem dette samarbejde har Danmark fast adgang til nogle af PSI instrumenterne, hvor adgang ellers vil ske gennem et ansøgningssystem, hvor kun udvalgte forslag bliver tildelt måletid.

Dansk forskning med neutroner og synkrotron-røntgenstråling er naturligvis hæmmet af, at der ikke er nationale faciliteter; dog har vi i Århus synkrotron-faciliteten ASTRID og snart ASTRID2, som genererer ultraviolet stråling og blød røntgenstråling [10]. Derfor har man oprettet det nationale instrumentcenter DANSCATT [11], som dækker rejseudgifter til eksperimenter til alle danske brugere af neutron- og hård røntgenstråling.

For få år siden blev Danmark prøvemedlem af ILL, på linie med de fleste andre europæiske lande. Dette har givet danske forskere en utrolig god mulighed for at være med i front og benytte de absolut bedste instrumenter. Adskillige danske grupper har allerede benyttet sig af muligheden og har fået særdeles spændende resultater. Vi håber derfor, at der findes finansiering til at sikre dansk medlemskab af ILL i perioden indtil ESS står klar.

Eksempler fra faststoffysik

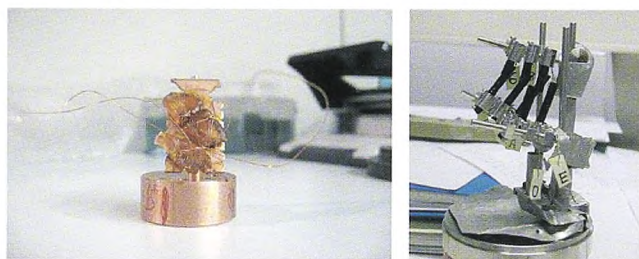
Neutronspreddning har længe været en vigtig teknik i fundamentale studier af faste stoffers fysik, og bidrog bl.a. med de første direkte målinger af antiferromagnetisk struktur, magnetisk dynamik (spinbølger), samt gittervibrationer. I det følgende vil vi give to eksempler på brug af neutronspreddning i moderne faststof- og

materieffysik. Eksemplerne har det til fælles, at de omhandler materialer af interesse for energi-sektoren.

En neutron kan sætte en krystal i svingninger ved at afgive energi til prøven. Alternativt kan den optage energi fra en krystal, som allerede svinger. Tilsvarende kan neutroner via deres magnetiske vekselvirkning med elektroner skabe eller optage svingninger i de magnetiske momenter i en prøve. Nogle neutroninstrumenter er specialiseret i at måle forskellen i neutronens energi før og efter den rammer prøven. Flere danske grupper udnytter allerede i dag denne type instrumenter.

Som eksempel har en dansk gruppe under ledelse af forskere fra Kemisk Institut ved Århus Universitet foretaget et detaljeret studium af gittervibrationer i den termoelektriske halvleder $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$. Som beskrevet tidligere i KVANT [4] er det essentielle element af materialets krystalstruktur nano-hulrum i en Ga-Ge "værts-matrix", hvori der kan inkorporeres "gæsteatomer" af Barium. Ved elegante eksperimenter lykkedes det forskerne at eftervise en teoretisk forudsigelse af, at de akustiske svingningers dispersion $\omega_{ak}(q)$ (dvs svingningernes frekvens som funktion af bølgetallet) ikke krydser gæsteatomernes dispersion $\omega_{gst}(q)$. Dette resultat har forbedret forståelsen af mekanismen bag den termoelektriske effekt i denne type materialer.

Et andet eksempel er studier af de *magnetoelektriske* Li-orthofosfater LiMPO_4 , hvor M er et metalatom: Mn, Fe, Co, Ni. LiFePO_4 anvendes i dag som katode-materiale i batteri-industrien, men dets magnetiske egenskaber er væsentlig mindre komplekse end LiNiPO_4 . En Risø-DTU baseret gruppe har ført an i studier af magnetiske strukturer og spinbølger i LiNiPO_4 under høje magnetfelter. Derudover er der udviklet en model, som beskriver hvordan magnetfeltet ved lave temperaturer drejer de atomare magnetiske momenter, hvilket tillader LiNiPO_4 at vinde magnetisk vekselvirkningsenergi via en forskydning af ionerne. Derved opnås samtidig en makroskopisk elektrisk polarisation, som kan give anledning til et elektrisk signal.



Figur 3. Typiske prøver (krystaller) til uelastiske neutroneksperimenter i dag. Venstre: To ravfarvede krystaller af en lav-dimensionel kobber-kloridbaseret antiferromagnet, som undersøges for at få nærmere indblik i detaljerne i mange-partikel kvantemekanik; den cylindriske fod er 25 mm i diameter. Højre: 8 sorte krystaller af $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$, som undersøges for at forstå sammenhængen mellem magnetisme og høj-temperatur superledning; hver krystal er ca. 20 mm lang.

Fælles for de ovenfor beskrevne forskningsprojekter er, at de har krævet ugevis af beamtid på det danske byggede tre-akse spektrometer RITA-II på PSI. I tilfældet $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ var dette nødvendigt til trods for, at

krystallen var så stor som 13 gram. Figur 3 viser nogle typiske neutronprøver. På ESS vil uelastiske forsøg kunne udføres betragteligt hurtigere – på få timer – eller med væsentligt mindre prøver. Det sidste er en tungvejende grund til at bygge ESS. Det er nemlig undtagelsen snarere end reglen, at det er muligt at gro store en-krystaller af materialer af teknologisk og grundvidenskabelig interesse. Ved at udvide denne flaskehals forkorter ESS vejen til banebrydende nye indsigter og teknologi; for eksempel det lange søgte gennembrud i forståelsen af de gådefulde høj-temperatur superledere.

Eksempler fra Biofysik

Biologiske systemer indeholder typisk meget hydrogen. Den markante forskel i neutronens vekselvirkning med ^1H og ^2H gjorde allerede i 1970'erne neutronspreddning til en vigtig metode til at undersøge biologisk inspirerede systemer samt til at undersøge syntetiske materialer som polymerer (plastik). I et klassisk forsøg har man blandet en lille smule polymer-kæde hvor alle ^1H 'er var udskiftet med ^2H 'er ind i en polymer-smelte bestående af almindeligt ^1H -polymer. Dermed "farvede" man reelt enkelte polymerer i smelten, hvilket åbnede op for en langt bedre forståelse af en stor gruppe af materialer, der har central betydning i det moderne liv.

Kontrastforskellen mellem ^1H og ^2H kan også benyttes til at se på komplekse biologiske systemer, som fx cellemembraner, der typisk består af en blanding af et lipid-dobbeltag og en lang række associerede membranproteiner. Disse er enten blot hæftet til membranen eller danner kanaler, der kan transportere specifikke stoffer gennem membranen. Membranproteiner spiller en central rolle både indenfor biologisk og farmaceutisk forskning, således virker mere end halvdelen af alle medicinske stoffer i kraft af deres vekselvirkning med en lille gruppe af membranproteiner.

Membranproteiner har vist sig at være notorisk svære at krystallisere. Det betyder at røntgenbaseret protein-krystallografi, som ellers har givet banebrydende strukturel information om mange tusinder af de vandopløselige proteiner, ikke har kunnet bidrage i det ønskede omfang til undersøgelser af membranproteinerne.

Her kommer neutronspreddning og muligheden for at "lege" med kontrastsituationen ind i billedet. Hvis man undersøger et membranprotein, der sidder i en cellemembran, er det muligt systematisk at skrue op og ned for de forskellige dele af signalet, sådan at informationen om proteinstrukturen træder særligt tydeligt frem. Dette gøres i praksis ved at justere $^1\text{H}/^2\text{H}$ balancen i lipid dobbeltlaget, så laget får samme kontrast som den vandige buffer, som cellemembran + membranprotein svømmer rundt i. For at komplettere billedet kan man derefter justere $^1\text{H}/^2\text{H}$ -balancen i den vandige buffer, så bufferen får samme kontrast som membranproteinet. Dette gør det muligt at observere lipidmembranens struktur, mens der sidder membranproteiner i, men uden at blive forstyrret af selve membranproteinerne. Ved at stykke de forskellige bidder af information sammen, kan man ende med at få et ret detaljeret billede af celle-

membransystemet. Desværre ikke helt så detaljeret som det billede man får frem med protein-krystallografi, men til gengæld skal man heller ikke kæmpe med at krystallisere prøven.

I Øresundsregionen har vi allerede en meget stærk tradition indenfor Bioteknologi og Life Sciences med stærke og veletablerede samarbejder mellem universiteter og farmaceutiske virksomheder. Dette er et stærkt aktiv i forhold til ESS og i forhold til at sikre at ESS kommer til at gøre mest mulig gavn indenfor hele bio- og medico-området. Neutronbaserede undersøgelser betragtes dog stadig som temmelig eksotisk blandt de fleste biologer, farmaceuter og medicinere. Derfor skal der foregå en faglig modning af hele det forskningsfelt, der ligger i grænseområdet mellem fysik og biologi, hvis ESS skal kunne indfri sit store potentiale indenfor biovidenskaberne.

3. Dansk deltagelse i planlægningen af ESS

ESS bliver en spallationskilde, hvor neutronerne dannes ved at beskyde et "target" af et tungt grundstof med højenergetiske protoner fra en kraftfuld 400 m lang accelerator. Neutronerne modereres af flydende vand (300 K) eller brint (25 K), og opnår derved de ønskede hastigheder. Herfra sendes neutronerne gennem neutronreflekterende spejlkanaler ("guides") hen til de instrumenter, hvor neutronerne spredes på materialeprøven, og derefter registreres af de opstillede detektorer. Til sidst analyseres eksperimentets meget store datamængder (op til mange terabytes dagligt) af kraftige computere. Danske forskere er stærkt involverede i designet af ESS indenfor accelerator, instrumenter, og selvfølgelig dataanalyse og management. Den danske deltagelse i dette designarbejde bliver finansieret af Forsknings og Innovationsstyrelsen og indgår i det samlede danske bidrag til ESS. Nedenfor kommer vi nærmere ind på designarbejdet, og kommer herved på en lille rundtur under motorhjelm på ESS.

Accelerator

Spallationskilder har været brugt i mange år, men middelintensiteten har ikke kunnet konkurrere med reaktorer. Dette har man kompenseret for ved at bruge pulserede ionstråler, så man ved hjælp af flyvetidsteknikker har kunnet udnytte neutronerne langt bedre end dem fra en reaktor. En yderligere fordel ved at bruge spallationskilder, sammenlignet med reaktorer, er den meget reducerede mængde radioaktivt materiale, der

bliver produceret.

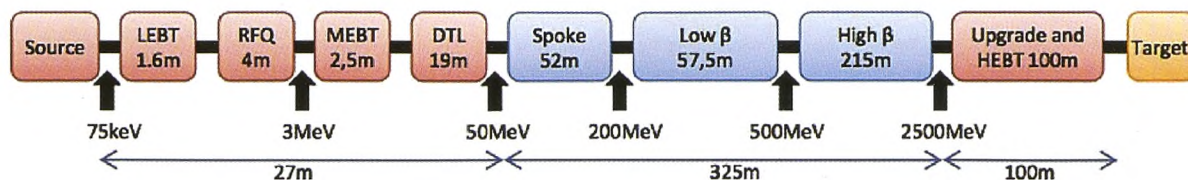
Den førende pulserede neutronkilde har i mange år været ISIS i UK, hvor korte pulser af 800 MeV protoner har produceret neutroner fra et W-target [12]. Antallet af neutroner er stort set proportionalt med effekten af protonstrålen, som for ISIS er 160 kW. Denne kilde kan til mange formål konkurrere med 58 MW reaktoren på ILL [1].

For få år siden blev SNS (Spallation Neutron Source) i USA taget i drift. Denne kilde producerer korte neutronpulser, 10-100 μ s, og med en rekord middel-effekt på 1,4 MW [13]. PSI er verdens mest intense kontinuerlige spallations-neutronkilde med en effekt på 1 MW [9]. Det er besluttet at bygge ESS som en facilitet til lange neutronpulser, hvor 1-2 ms lange pulser produceres 10-20 gange i sekundet af en protonstråle med en middeleffekt på 5 MW.

Designopgaven består nu i at bygge en accelerator med ovenstående specifikationer billigst muligt med minimalt effektforbrug, høj pålidelighed og adskillige andre krav. Flere af disse parametre hører også sammen med design af target. Det er nu besluttet at anvende en protonstråle med en energi på 2,5 GeV. Dette giver for den ønskede puls-struktur en protonstrøm på 50 mA. Et andet væsentligt krav til acceleratoren er at minimere tabet af protoner i acceleratoren, således at acceleratoren kan serviceres og repareres med et lavt strålingsniveau (minimal induceret radioaktivitet). Dette medfører, at tabet af strålen må være under 1 W/m, svarende til relativt tab på under 10^{-7} /m. Dette er en stor design udfordring.

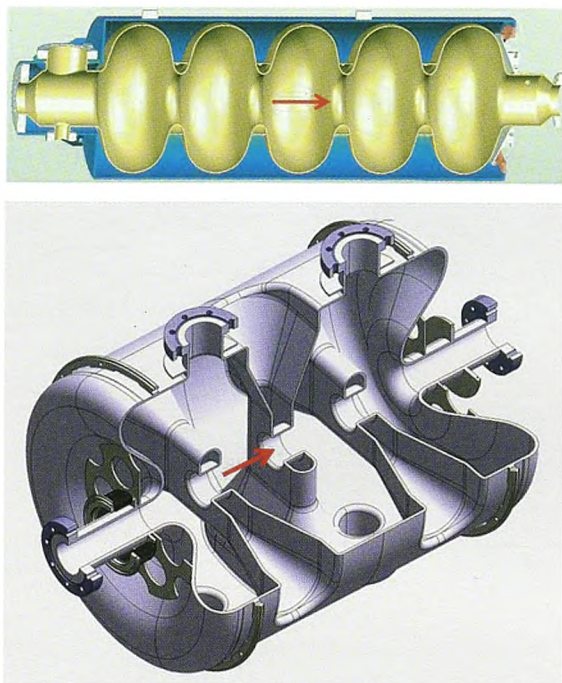
Valget af accelerator er faldet på en serie af lineære radiofrekvens (rf) accelerators. De accelererende felter genereres ved at sende radiobølger ved enten 352 eller 704 MHz ind i såkaldte kaviteter (hulrumsresonatorer). Valget af disse frekvenser betyder også, at selve protonstrålen vil være bundtet, altså have en mikrotidsstruktur.

Skematisk er acceleratoren vist i Figur 4. En ionkilde producerer en 50 mA protonstråle, der transporteres gennem et kort strålerør (LEBT) ind i en radiofrekvens-quadrupolaccelerator (RFQ), der både accelererer strålen til 3 MeV og holder strålen fokuseret uden brug af magneter. Via yderligere en kort stråletransport (MEBT) sendes strålen ind i en Drift-Tube-Linac, hvor den accelereres til 50 MeV. Disse accelerationer foretages med kaviteter ved stuetemperatur, medens de efterfølgende accelerationer, hvor langt den største energi tilføres, bruger superledende teknologi.



Figur 4. Principskitse af de enkelte komponenter i ESS acceleratoren. For nærmere beskrivelse, se tekst.

Der anvendes såkaldte “spoke” og elliptiske kaviteter, som er illustreret i figur 5. Kaviteterne er bygget af metallet niobium, der er superledende ved temperaturer under 9 K. Herved kan meget høje accelerationsfelter genereres uden væsentligt tab. Selvom den nødvendige teknologi er meget dyr og teknologisk krævende er dette den eneste måde, hvorpå den lineære accelerator kan bygges uden at blive alt for lang. Til slut transporteres strålen gennem en højenergi stråletransport (HEBT) de cirka 100 meter til target. HEBT skal udover selve stråletransporten indeholde plads til mulige fremtidige opgraderinger. Yderligere skal selve strålen kollimeres og der skal opbygges en “beamdump”, der benyttes til daglig indkøring af acceleratoren.



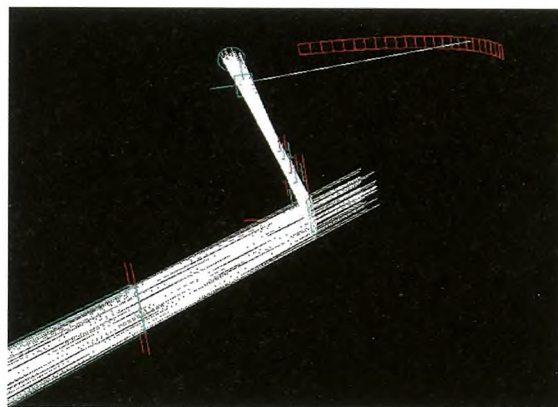
Figur 5. To typer af superledende kaviteter til ESS. Protonerne accelereres i et accelerationsgab. De røde pile angiver det accelererende elektriske felt i en af cellerne i begge typer kaviteter.

De ansvarlige partnere for arbejdsplanerne i design update af acceleratoren er ESS i Lund samt TEKNIKER i Bilbao, CEA og CNRS i Paris, INFN i Catania, Uppsala Universitet og Aarhus Universitet. Ved udgangen af 2012 vil konceptuelle planer for al hardware være færdige. Desuden skal prototyper af kritiske komponenter udformes og bygges. I løbet af 2011-2012 oprettes en såkaldt Plan-to-Build gruppe, der sammen med ESS i Lund vil videreføre design og opbygning af faciliteten. Den væsentligste investering i opbygningen af ESS acceleratoren vil være de mange kryostater med superledende accelerationskaviteter og de dertil hørende højeffekts rf generatorer (“modulatorer” og “klystroner”).

Det danske bidrag til design af ESS acceleratoren er HEBT. Udover at designe og optimere denne del af maskinen til de stillede krav skal vi designe alle komponenter konceptuelt, specielt de mange magneter med tilhørende strømforsyninger.

Simulering af instrumenter

Eksisterende pulserede neutronkilder opererer med korte pulser, 10-100 μ s. Dette giver automatisk en præcis bestemmelse af neutronernes bølgelængde, men ikke noget imponerende antal producerede neutroner. For at producere langt flere neutroner end på de eksisterende anlæg bliver ESS en lang-pulset kilde, med pulser på 1-2 ms varighed. Dette betyder store udfordringer for designet af instrumenterne ved ESS, for at usikkerheden på bestemmelsen af bølgelængden stadig bliver acceptabel. Man kan sige, at i forhold til instrumentdesign betræder vi med ESS ukendt territorium.



Figur 6. Illustration af typisk simulering af neutronspreddning med McStas. Hvide streger repræsenterer simulerede neutroner, men røde og blå figurer illustrerer optiske komponenter i instrumentet. Neutronerne kommer ind i bunden af billedet til venstre, reflekterer fra en krystal, og rammer prøven lidt over midten af billedet. Kun en enkelt neutron bliver faktisk spredt fra prøven og havner i den bananformede detektor.

Ved design af instrumenter har Danmark et særligt forspring, da vi udvikler McStas, en softwarepakke for simulering af neutroninstrumenter [14]. Her simuleres neutroner i hovedsagen som partikler med kendt hastighed, sted og tid med en metode kaldet ray-tracing, der også er kendt fra computergrafik, og som er illustreret i Figur 6. I en række af de aktive optiske elementer i instrumenterne, f.eks. spejle, krystaller og de virtuelle materialeprøver, bliver neutronerne derimod behandlet som bølger. Danske grupper har udviklet McStas siden 1996. Pakken har de seneste 6-8 år været verdens de facto standard og er bl.a. brugt til simulering af instrumenterne ved de nye spallations-neutronkilder J-PARC [15] og SNS [13]. På grund af dette, og på grund af placeringen af ESS Data Management og Software Center i Danmark, er vi blevet udvalgt til at lede opgaven med computersimulering af instrumenter til ESS.

Det er en stor opgave bare at danne sig et overblik over instrumentparken ved ESS. Instrumenter til krystallografi kræver langt bedre opløsning end den, man bruger til studier af magnetisme, og målinger af diffusion kræver bedre energiopløsning end instrumenter til studier af gittervibrationer. Dette medfører forskellige valg af neutronernes bølgelængde, instrumentets længde, og flere andre designparametre. Omkring 30 forskellige instrumenter har været på tale, hvoraf vi

p.t. har lavet indledende simuleringer og optimeringer af de 16. Generelt kan man sige, at på grund af de lange pulser bliver ESS instrumenterne meget længere, end dem vi kender fra de eksisterende spallationskilder, for at mindske den relative usikkerhed på flyvetiden. Mange instrumenter vil være 100-180 m lange, og enkelte op til 300 m. Dette stiller store krav til de neutronguides, der i analogi med lyslederkabler vil føre neutronerne frem gennem instrumentet. Mange af vores simuleringer har været fokuseret på netop neutronguides, og vores optimerede løsninger ser ud til at kunne virke stort set uden tab.

Den forholdsvis lange tid imellem pulserne på ESS, sammenlignet med eksisterende spallationskilder, giver også udfordringer. For at udnytte neutronerne bedst muligt har det været foreslået at bruge flere forskellige bølgelængdeområder fra samme puls. Dette vil give et større antal neutroner på prøven, men vil også komplicere eksperimentet. En del af vore fremtidige simuleringer vil dreje sig om at afprøve disse muligheder, og især i samarbejde med Data Management og Software Centret at se, om det er muligt at analysere sådanne kombinerede data på en fornuftig måde.

De foreløbige resultater af simuleringerne er meget opløftende. For de fleste spektrometre vil vi få forøgelse i den brugbare neutronintensitet på 100-300 gange i forhold til de bedste eksisterende instrumenter. Denne store gevinst kan ses som en kombination af en kraftigere kilde og forbedret instrumentdesign. ESS vil også være optimalt til studiet af spredning og refleksioner ved små vinkler, altså til studiet af biologiske prøver, med gevinstfaktorer på 30-100. Derimod bevirker de lange pulser, at ESS ikke vil være helt optimal til studier af atomar struktur med høj opløsning. Her er vores nuværende instrumentdesigns "kun" på niveau med de bedste instrumenter i verden. Vi vil derfor give denne type instrumenter ekstra opmærksomhed i den kommende tid, og nye utraditionelle designs vil blive afprøvet.

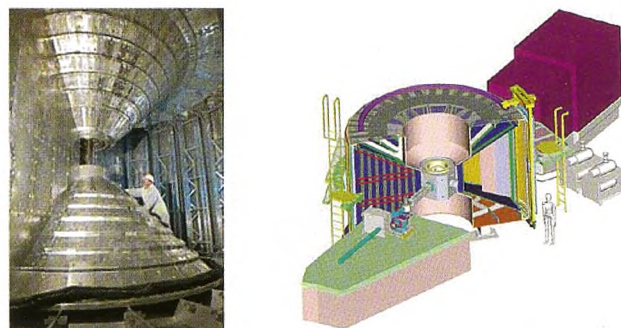
Instrumentsimuleringer benyttes også som input til design af accelerator og target/moderator. Den seneste tid har vi brugt på at simulere neutroninstrumenterne for 20 forskellige kombinationer af pulslængde og pulsfrekvens. I kombination med viden om acceleratordesign vil vores data kunne fortælle, på hvilken måde acceleratoren bedst kan anvendes. Ligeledes kan vi fortælle, hvor meget vi vil vinde, hvis neutronerne kan udsendes fra et centralt område på moderatoren i stedet for jævnt fordelt over hele overfladen. Dette har ført til et studie af nye moderatorgeometrier, som muligvis vil kunne give 100 % ekstra performance af ESS.

Konstruktion af instrumenter

Efter planen vil ESS ved opstarten i 2019 have omkring 7 instrumenter, som dem der er vist på figur 7. Herefter vil der løbende blive bygget flere. Den oprindelige tanke var at det endelige ESS i 2025 ville have 22 instrumenter, men det er i løbet af design update fasen blevet klart, at det vil være muligt bygge op imod 30-40 instrumenter, og dermed opnå et højere videnskabeligt

udbytte.

Der foreligger endnu ingen beslutninger om hvilke instrumenter, der vil blive bygget, eller hvilke, der skal bygges først. Simuleringerne giver et klart billede af hver enkelt instrumenttypes performance sammenlignet med de bedste eksisterende og planlagte instrumenter på andre neutronfaciliteter, såsom ILL, SNS og J-PARC. I beslutningsprocessen vil disse tal blive afvejet imod behovet i de akademiske og industrielle bruger-samfund. Det er derfor sandsynligt, at ESS i 2025 vil kunne tilbyde en instrumentpark, der er komplet i den forstand at den indeholder samtlige "klassiske" instrumenter til studier af atomare og molekulære (f.eks. biologiske) strukturer, til studier af dynamik i stoffer samt til gennemlysning ("imaging"). Derudover er der lagt op til, at der vil være plads til nye instrumenttyper, udviklet specielt til ESS.



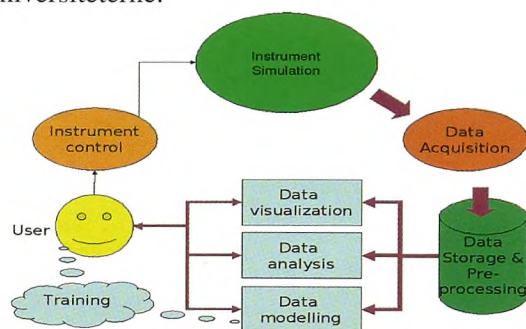
Figur 7. Eksempler på neutronspektrometre ved spallationskilden ISIS. (venstre) foto fra detektorkammeret på spektrometret LET. (højre) Principskitse af spektrometret MERLIN – den blå streg er neutronguiden, den overskærede cylinder er detektoren, og den lille kasse er et "beam stop", som opfanger neutroner, der ikke blev spredt.

De danske neutronspreedere har besluttet at indgå i samarbejde med vore kolleger på PSI om deltagelse i konstruktion af et eller flere – endnu uspecificerede – instrumenter til ESS. I forbindelse med dette samarbejde, er dansk tilstedeværelse på PSI af stor vigtighed, idet vi herved får direkte adgang til test af nye ideer på denne neutronkilde. I skrivende stund er ESS i fuld gang med at ansætte erfarne neutronspreedere, som vil få overordnet ansvar for opbygningen af instrumenterne, dog i første omgang for tilknytning af rådgivende ekspertgrupper. Et hovedmål for det dansk-schweiziske samarbejde vil være at blive repræsenteret i disse grupper og at få tildelt opgaven med detail-design af et eller flere instrumenter i den sidste del af design-update fasen.

Data Management og Software Center

Opsamling, lagring og analyse af data fra ESS vil foregå på Data Management og Software Centret (DMSC), som vil være en del af selve ESS organisationen og kommer til at ligge ved den kommende Niels Bohr Science Park i København. Fuldt udbygget er det planen, at DMSC skal have ca. 60 medarbejdere. Med dette antal skulle det blive muligt at indfri de ret høje ambitioner, der er med hensyn til omfang og kvalitet af den service, som DMSC kan tilbyde.

DMSC skal kunne tilbyde de bedste forhold for ekspertbrugere samtidig med at ikke-eksperter tilbydes halvautomatisk analyseprogrammer samt hjælp og vejledning fra DMSC. På denne måde skulle det blive muligt for ikke-eksperter og virksomheder at udnytte en væsentlig del af instrumenterne og analysemulighederne på ESS næsten eller helt uden hjælp fra specialister på universiteterne.



Figur 8. Oversigt over de væsentligste funktioner på ESS-Data Management og Software Center, illustreret i forbindelse med test af systemet ved simuleringer.

På figur 8 ses en oversigt over de væsentligste funktioner på DMSC. Under udførelsen af et eksperiment vil funktionen "Instrument Simulation" være erstattet af "Instrument". Det betyder, at datalagring og analyseprogrammer på DMSC kan benyttes på næsten samme måde uafhængigt af, om der opsamles data fra instrumenterne eller data genereres af et simuleringssprogram. Simuleringsfaciliteterne benyttes både til test af instrumenter og programmer, til undervisningsbrug og til planlægning af målinger. Formålet med det sidste er at sikre, at måletiden på ESS bliver udnyttet optimalt.

Funktionen "Data Acquisition" består i opsamling af måledata fra et instrument. I praksis vil dette være registrering af hver enkelt neutron i detektoren: dens placering og tidspunktet for registreringen. Denne såkaldte event-mode registrering vinder stigende udbredelse og vil blive brugt i de fleste instrumenter. Den stiller store krav til opsamlingshastighed og lagringskapacitet, men muliggør til gengæld mere fleksibel dataanalyse end den traditionelle histogrammetode.

Data opsamles i Lund, hvor de lagres, inden de sendes til København. Denne første lagring giver dels en sikkerhed mod at miste data og giver dels en udjævning af trafikken over netforbindelsen til København. For nogle instrumenters vedkommende vil det være muligt at lave en løbende analyse af data, så det er muligt at overvåge, om eksperimentet forløber tilfredsstillende.

Datalagringen ved DMSC skal tilgodese mange krav. Lagringen skal være sikker, både hvad angår sikkerhed mod tab og sikkerhed mod tilgang fra uvedkommende. Det sidste er især vigtigt for brugere fra erhvervslivet. Desuden skal der tilbydes fleksibel adgang over nettet, så brugere kan arbejde med deres data, hvor det er mest hensigtsmæssigt. Dette gælder både data og analyseprogrammer.

Til brug for dataanalysen skal der bruges et antal forskellige programmer, dels generelle programmer til forbehandling af data og dels specielle programmer til

analyse af data fra hver hovedgruppe af instrumenter. Der bliver sikkert også behov for analyseprogrammer, der er specifikke for de enkelte instrumenter.

Som nævnt ovenfor findes der allerede et antal spaltationsfaciliteter. Disse faciliteter har software centre i lighed med DMSC, og dermed også programmer af den type, som skal bruges til ESS. En stor del af dette findes i public domain og vil umiddelbart kunne udnyttes. Der vil være behov for at udvikle programmer specielt til ESS, som dog delvist vil være af interesse for andre neutronfaciliteter. Planen er derfor at etablere samarbejde mellem neutronfaciliteter med henblik på at udnytte og udvikle programmer. Der er etableret en indledende kontakt med ISIS, der sammen med SNS har udviklingsprojektet Mantid af programmer til dataanalyse. Vi forventer, at vort første bidrag til Mantid vil være integration af funktionalitet fra McStas simuleringsspakken, i samarbejde med McStas gruppen på DTU-Risø og KU.

4. Forberedelser til fremtiden

Efter 20 års diskussion er det endelig lykkedes af tage beslutning om at bygge ESS. Endda lige på den anden side af Øresund med Danmark som medvært. Det er noget af en appelsin at få i sin turban, men det forpligter også. Vi må som forskere yde vores absolut bedste for at være med til at sikre projektets fremdrift. 2025 lyder som meget langt ude i fremtiden, men som man kan læse i artiklen, er det seriøse arbejde allerede godt i gang, og der er vigtige tidsfrister at overholde.

Hvis ESS og MAX-IV lever op til de høje forventninger, vil Øresundsregionen indenfor de næste 10-15 år have mulighed for at blive verdens førende indenfor forskning i mange typer materialer, inklusive biologiske systemer. Dette vil give meget store muligheder for forskningen; både for de eksisterende miljøer og for muligheden for at kunne starte helt nye aktiviteter. Nye forskere søger nemlig allerede nu fra hele verden mod Skåne og Danmark for at arbejde for og med ESS og MAX-IV. Dette vil også på længere sigt give forbedrede muligheder for den del af erhvervslivet, der baserer sig på den nyeste viden indenfor disse forskningsområder; f.eks. medicinalindustrien.

Et nyt dansk-svensk samarbejde, kaldet "Øresund Material Innovation Community", er netop opbygget med det formål at sprede viden blandt forskere og studerende, samt udvikle samarbejde om, hvad ESS og MAX-IV kan anvendes til [16].

ESS har slået sig op som en bæredygtig forskningsfacilitet, og der vil blive stillet store krav til minimering af energiforbrug, genanvendelse af energi til f.eks. opvarmning, samt kompensation for det betydelige elektricitetsforbrug ved medfinansiering af havvindmøller. Det forventes at en sådan udvikling vil give et forspring indenfor energivenlige teknologier ved fremtidige projekter, noget som mange underleverandører vil kunne nyde godt af. I øvrigt vil der også med ESS være enestående muligheder for dansk og svensk industri til at udvikle og levere de mange højteknologi-

ske komponenter, der skal bruges til opbygningen af en acceleratorbaseret neutronkilde.

Men til en start vil vi glæde os over, at projektet nu er sat i gang, og vi ser frem til selv at kunne tage del i forberedelserne. Og så vil vi glæde os til de fantastiske forskningsmuligheder, der faktisk starter allerede i indeværende årti.

Litteratur

- [1] <http://www.ill.eu>
- [2] <http://www.ess-scandinavia.eu>
- [3] <http://www.maxlab.lu.se/maxlab/max4/index.html>
- [4] KVANT 18 (2) (Maj 2007); særnummer om neutronspreddning
- [5] K. Lefmann, L. Arleth, K. Mortensen, B. Lebech, Naturens Verden 1/2003
- [6] G.C. Squires: Thermal Neutron Scattering, Cambridge University Press 1978
- [7] K. Lefmann: Neutron Scattering, Theory, Instrumentation, and Simulation, kursusnoter (189 sider), Niels Bohr Institutet 2010
- [8] <http://www.danssk.dk>
- [9] <http://www.psi.ch>
- [10] <http://www.isa.au.dk>
- [11] <http://www.dansscatt.dk>
- [12] <http://www.isis.stfc.ac.uk>
- [13] <http://neutrons.ornl.gov>
- [14] <http://www.mcstas.org>
- [15] <http://j-parc.jp/MatLife/en/index.html>
- [16] <http://www.oresund.org/materials/projects/oeresund-materials-innovation-community>



Kim Lefmann er lektor i neutronspreddning på Nanoscience Centret, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Han har tidligere arbejdet på DR3 på Risø og på et af de danske instrumenter på PSI, og har stået fadder til simuleringspakken McStas. Han har deltaget i arbejdet for ESS siden lobby-organisationen ESS-Scandinavia blev stiftet i efteråret 2000.



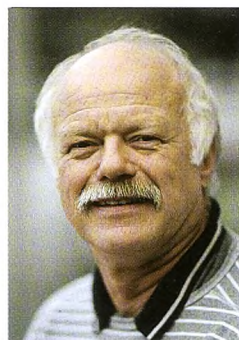
Lise Arleth er lektor i biofysik ved Institut for Grundvidenskab, Life Science Fakultet på Københavns Universitet. Hun forsker i struktur og vekselvirkninger af biomolekyler i opløsning. De primære måleteknikker er småvinkel neutronspreddning (SANS) og småvinkel Røntgenspreddning (SAXS) samt lysspreddning (DLS og SLS).



Niels Bech Christensen er seniorforsker ved Afdelingen for Materialeforskning på Risø DTU og interesserer sig for høj-temperatur superledning og lav-dimensionel kvantemagnetisme. Han har tidligere arbejdet som instrumentansvarlig på RITA-II spektrometeret på PSI i Schweiz, og koordinerer nu den danske instrument-konstruktionsindsats i forhold til ESS.



Søren Pape Møller er ph.d. og dr. scient fra Aarhus Universitet, hvor han leder acceleratorcentret ISA med synkrotronstrålingskilden ASTRID. Han har deltaget i opbygningen af mange accelerators og er Work Package Leader i ESS Accelerator Design Update.



Stig Skelboe er professor ved Niels Bohr Institutet, hvor han forsker og underviser i metoder til videnskabelige beregninger. Siden september 2010 har han været projektleder for Data Management and Software Centret for ESS.



Peter K. Willendrup er cand. scient. i fysik fra Københavns Universitet. Han er siden 2002 teknisk projektansvarlig for McStas og ansat som udviklingsingeniør ved Afdelingen for Materialeforskning på Risø DTU.

PFEIFFER VACUUM

**Turbopumpe
HiPace™**



Ring for yderligere information

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

Rulning – breddeopgave 41 med didaktisk kommentar

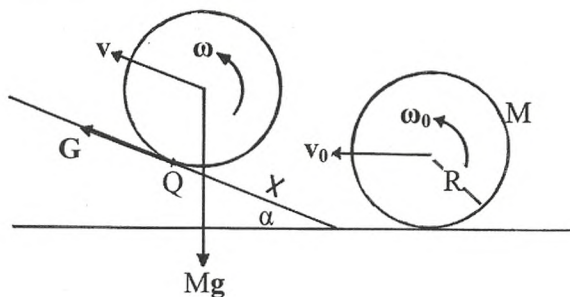
Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave fra RUC (nr. 41 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 41. Rulning

En hul og en massiv cylinder med ens masser og ens radier ruller med samme fart hen imod et skråplan. Hvad er forholdet imellem, hvor langt de ruller op ad skråplanet? Begrund svaret.



Figur 1. Tværsnit af cylinder, der ruller op ad et skråplan.

Løsning

Opgaven kan løses på tre kvalitativt forskellige måder:

1. Den mest direkte måde er ved brug af *mekanisk energibevarelse*. Da den kinetiske energi af cylinderen før den ruller op ad skråplanet er lig med dens potentielle energitilvækst i topstillingen, fås med betegnelserne på figur 1, idet I_{CM} (inertimomentet om cylinderaksen) skrives som kMR^2 og $v_0 = R\omega_0$ ved ren rulning:

$$\frac{1}{2}Mv_0^2 + \frac{1}{2}I_{CM}\omega_0^2 = \frac{1}{2}(1+k)Mv_0^2 = Mgx_{\text{top}} \sin \alpha, \quad (1)$$

hvoraf

$$x_{\text{top}} = \frac{(1+k)v_0^2}{2g \sin \alpha} \quad (2)$$

Da $k = 1$ for den hule cylinder og $k = \frac{1}{2}$ for den massive cylinder, er svaret på opgaven derfor:

$$\frac{x_{\text{top,hul}}}{x_{\text{top,masiv}}} = \frac{1+1}{1+\frac{1}{2}} = \frac{4}{3} \quad (3)$$

2. Opgaven kan også besvares ved brug af *tyngdepunktssætningen og momentsætningen om tyngdepunktet*. Med betegnelserne på figur 1 fås:

$$M \frac{dv}{dt} = -Mg \sin \alpha + G \quad \text{og} \quad I_{CM} \frac{d\omega}{dt} = -RG \quad (4)$$

Indsættes G isoleret fra den anden ligning i den første samtidig med, at I_{CM} sættes lig med kMR^2 og $v = R\omega$, fås heraf, at cylindrenes bevægelse er bestemt ved:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g \sin \alpha}{1+k} \quad (5)$$

Integrationen af (5) en og to gange giver så:

$$v(t) = -\frac{g \sin \alpha}{1+k}t + v_0 \quad (6)$$

og

$$x(t) = -\frac{1}{2} \frac{g \sin \alpha}{1+k}t^2 + v_0t \quad (7)$$

Og indsættes t for $v(t) = 0$ fra den første ligning i den anden, fås x_{top} som i ligning (2) og derved svaret på opgaven som i ligning (3). Denne måde at besvare opgaven på er besværligere end ved brug af energibevarelse. Til gengæld muliggør den som vist, at tidsforløbene kan undersøges. Og at størrelsen af den statiske gnidningskraft G kan findes ved indsættelse af (5) i momentsætningen under brug af $Rd\omega/dt = dv/dt$.

3. Den tredje måde at besvare opgaven på er ved at bruge *momentsætningen om røringsspunktet* mellem cylinder og skråplan:

$$I_Q \frac{d\omega}{dt} = -MgR \sin \alpha \quad (8)$$

Idet $I_Q = MR^2 + I_{CM} = (1+k)MR^2$ og $Rd\omega/dt = dv/dt$ kommer vi herved direkte frem til ligning (5) uden at have G som ubekendt variabel i første omgang. Hvorefter løsningen er som ved metode 2.

Kommentar

Opgaven eller tæt beslægtede opgaver er almindeligt forekommende i lærebøgerne i mekanik på universitetsniveau. Som tidligere nævnt i artikelserien om breddeopgaver må lærebøger ikke medtages til eksamen. Derfor er det også muligt at stille lærebogsklassikere som denne som opgaver til eksamen.

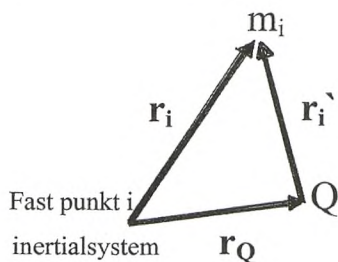
Min gennemgåede 3-foldige løsning af opgaven er også en lærebogsklassiker. Jeg husker den fra min egen universitetsundervisning. Og jeg har f.eks. genfundet den i Berkeley Physics Course, Volume 1, Second Edition, 1973, p. 249-252, og i Ohanian: Physics, Second Edition, 1989, p. 339-343. Ikke desto mindre bygger den tredje af løsningsmetoderne på et forkert udgangspunkt, hvilket er min grund til at skrive artiklen her om opgaven.

Retfærdiggørelsen af at bruge momentsætningen om røringpunktet, som gjort ved den tredje måde at løse opgaven på, er ifølge Berkeley Physics Course:

“The acceleration in the motion of the rolling object is calculated by recognizing that *instantaneously* the motion is simply a rotation about a point on the periphery of the object. Thus we shall require the moment of force about P to equal the rate of change of angular momentum about P.” (P er røringpunktet), og ifølge Ohanian:

“The existence of an instantaneous fixed axis in rolling motion (without slipping) enables us to deal with this motion by methods developed in the preceding sections. The rotation about the instantaneous fixed axis obeys our old equation $I d\omega/dt = \tau_z$. From this, we can calculate the motion of a rolling body on which external forces and torques act.” (z refererer til en stillestående z-akse).

Men denne retfærdiggørelse er en slags tanketorsk. Det er rigtigt, at en rent rullende genstands bevægelse momentant kan beskrives som en rotation om det faste underlagspunkt, der rører den rullende genstand. Men røringpunktet er noget andet end dette faste punkt. Røringpunktet er et geometrisk bestemt punkt, der flytter sig. Hvorfor man ikke umiddelbart kan tillade sig at anvende momentsætningen om røringpunktet som gjort.



Figur 2. Stedvektorer i tilknytning til et vilkårligt bevæget punkt Q.

Den størrelse, der opereres med ved den tredje udregning, impulsmomentet om punktet Q, er alment defineret som følgende vektor:

$$L_Q = \sum_i \mathbf{r}_i' \times m_i \mathbf{v}_i = \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_Q) \times m_i \mathbf{v}_i, \quad (9)$$

med figur 2's betegnelser og med Q som et vilkårligt bevæget punkt. Differentieres det sidste udtryk for L_Q , fås:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} L_Q &= \sum_i \mathbf{v}_i \times m_i \mathbf{v}_i - \sum_i \mathbf{v}_Q \times m_i \mathbf{v}_i \\ &\quad + \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_Q) \times m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

Her er første led 0. Andet led er lig med $M \mathbf{v}_{CM} \times \mathbf{v}_Q$, hvor M er den samlede masse og $\mathbf{v}_{CM}$ er tyngdepunktets hastighed. Medens tredje led er lig med τ_Q , kraftmomentet omkring Q fra alle de systemeksterne kræfter, idet $m_i d\mathbf{v}_i/dt$ ifølge Newtons anden lov er lig med summen af eksterne og interne kræfter virkende på systempartikel i , og fordi kraftmomentbidragene fra de systeminterne kræfter ophæver hinanden ved summationen som følge af loven om aktion og reaktion (idet kræfterne mellem to systempartikler forudsættes at være rettet langs deres forbindelseslinje). Ændringen af impulsmomentet om et vilkårligt bevæget punkt, og hermed om røringpunktet ved rulning, er således ikke alment lig med det samlede kraftmoment om punktet, men derimod givet ved:

$$\frac{d}{dt} L_Q = \tau_Q + M \mathbf{v}_{CM} \times \mathbf{v}_Q. \quad (11)$$

Momentsætningen brugt omkring røringpunktet som gjort i Berkeley Physics Course, af Ohanian og i min ovenstående løsning, burde altså retfærdiggøres ved ligning (11) sammenholdt med begrundelsen for at $M \mathbf{v}_{CM} \times \mathbf{v}_Q$ er nul i det specialtilfælde, der er under behandling. Nemlig at $M \mathbf{v}_{CM}$ og $\mathbf{v}_Q$ er parallelle. Og ikke ved en misforstået henvisning til, at røringpunktet er et momentant fast punkt.

Når misforståelsen har kunnet finde udbredelse er det naturligvis, fordi den har ført til det rigtige resultat i de situationer, der er regnet på. Altså situationer, hvor det ekstra led er nul. Det ekstra led vil være ulig nul, hvis det der ruller f.eks. er et æg på højkant, dvs. noget ikke omdrejningssymmetrisk, eller hvis der f.eks. ruller ned gennem Rundetårn, dvs. på en skruet plan. Da jeg ikke kan forestille mig, at der ikke har været regnet på sådanne fænomener, kan jeg heller ikke forestille mig, at der ikke findes speciallitteratur, hvor ligning (11) er alment erkendt. I fysiklærebogslitteraturen har jeg imidlertid kun været i stand til at finde ligningen følgende to steder: Jacob Nielsen: Rationel Mekanik II, 3. udgave, 1952. p. 148, og J.M.Knudsen og P.G.Hjorth: Elements of Newtonian Mechanics, 3. Edition, 2000, p. 257. Altså pudsigt nok en rent dansk sag.

I Jens Martin Knudsens eksempelsamling fra 1968 til Fysik 1 på Københavns Universitet, som jeg har stående som duplikerede noter på reolen, fordi jeg var studenterinstruktør på kurset, ser jeg under skrivningen af artiklen her på side 274-275, at den fejlagtige tredje metode er anført og derefter overstreget før trykningen.

De fleste lærebøger, der omhandler momentsætningen og anvender den på rulning, nøjes med at udlede momentsætningen i specialtilfældet, hvor Q er et fast punkt og $\mathbf{v}_Q$ altså nul, og specialtilfældet, hvor Q er CM og $M \mathbf{v}_{CM} \times \mathbf{v}_Q$ derfor også altid er nul, og nøjes i forlængelse heraf med de to første besvarelser af rulleopgaven. De fleste lærebøger holder sig altså borte fra den forkert begrundede tredje måde at løse opgaven på.

I flere af de mere avancerede mekaniklærebøger findes en anden generel ligning end ligning (11) udledt.

Til forskel fra ligning (9) er L_Q her defineret ved:

$$\begin{aligned} L_Q &= \sum_i \mathbf{r}'_i \times m_i \mathbf{v}'_i \\ &= \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_Q) \times m_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_Q), \end{aligned} \quad (12)$$

altså impulsmomentet om Q i et system, der følger med Q. Mens der i ligning (9) er tale om impulsmomentet i laboratoriesystemet, men taget om et punkt der flytter sig.

Ved differentiation af (12) fås med denne betydning af L_Q :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} L_Q &= \sum_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_Q) \times m_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_Q) \\ &\quad + \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_Q) \times m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} \\ &\quad - \sum_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_Q) \times m_i \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Her er første led nul og andet led lig med τ_Q som ovenfor. Da $\sum_i \mathbf{r}_i \times m_i \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt} = \mathbf{r}_{CM} \times M \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt}$ og $\sum_i \mathbf{r}_Q \times m_i \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt} = \mathbf{r}_Q \times M \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt}$, fås så modsvarende ligning (11):

$$\frac{d}{dt} L_Q = \tau_Q + (\mathbf{r}_{CM} - \mathbf{r}_Q) \times (-M \frac{d\mathbf{v}_Q}{dt}). \quad (14)$$

Det ekstra led her i forhold til den simple moment-sætning ses at være kraftmomentet omkring Q fra det homogene systemkraftfelt, der gør sig gældende i et koordinatsystem, der accelererer sammen med Q. Ligesom det ekstra led i ligning (11) forsvinder leddet – som det skal – altid i de to velkendte specialtilfælde, hvor Q er et fast punkt i et inertialsystem, og hvor Q er CM. Men ellers er det jo ikke det samme, der er tilføjet i ligning (11) og ligning (14).

I forhold til vores rulleproblem kunne ligning (11) bruges til at retfærdiggøre den tredje måde at løse

opgaven på, idet det ekstra led indses her at være nul. Ligning (14) tilbyder en fjerde løsningsmetode. Men her kan det ekstra led ikke smides væk. De tre led i ligning (14) anvendt på rulleproblemet får tværtimod ligningen til at have udseendet:

$$kMR^2 \frac{d\omega}{dt} = -RMg \sin \alpha - MR \frac{dv}{dt}. \quad (15)$$

Idet $R \frac{d\omega}{dt} = \frac{dv}{dt}$, ses ligningen som ved løsningsmetode 2 og 3 igen at føre til ligning (5).

Rulleopgaven kan altså løses på hele fire kvalitativt forskellige måder. Og heraf forudsætter altså de to af løsningsmetoderne mere end den enkle udgave af momentsætningen, at ændringen af impulsmomentet per tidsenhed er lig med kraftmomentet fra ikke-systemkræfter.

Jeg har uddybet emnet her yderligere i en artikel i European Journal of Physics med titlen “Rules for rolling as a rotation about the instantaneous point of contact” (*Eur. J. Phys.* **32** (2011) 389-397).

Breddeopgave 42 og 43. Vindmøller og helikoptere

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningerne til disse to opgaver fra breddekurset på RUC (fra den indledende samling træningsopgaver fra starten af kurset i 1976, nr. 42 i rækken her i KVANT, og fra sommereksamen 2010, nr. 43 i rækken her i KVANT):

Giv en øvre grænse for effekten af en vindmølle. Begrund svaret.

Hvilken effekt skal motoren i en helikopter yde for at holde helikopteren svævende? Begrund svaret.

Løsninger og kommentarer bringes i et kommende nummer.

Foreningsnyt – foredrag i foråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Apr.				
11/4	19.00	Astronomi i rumalderen	Niels Lund	AS (Årh)
12/4	17.15	Kold Krig og slaget om komplementariteten: Rosenfeld og Bohr	Anja S. Jacobsen	VHS
Maj				
2/5	19.15	Exoplaneter og liv i Universet	Anja C. Andersen	AS (Kbh)
9/5	19.00	Exoplaneter og liv i Universet	Anja C. Andersen	AS (Årh)
9/5	19.30	Modeller af liv	Kim Sneppen	SNU

AS (Kbh): Astron. Selskab (København), Aud. 4, H.C. Ørsted Inst., Universitetsparken 5, 2100 Kbh. Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Årh): Astron. Selskab (Århus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygn. 1530, Aud. D2, 8000 Århus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net).

VHS: Videnskabshist. Selskab, H.C. Ørsted Inst., aud. 10, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.math.ku.dk/videnskabshistorie).

Ring af sorte huller

Observationer af Universet bringer os nogle af de mest usædvanlige oplevelser, hvilket gør astronomien til utrolig spændende forskningsfelt. Denne nyhed er ingen undtagelse. Astronomer har afsløret en ring af sorte huller i galaksesystemet Arp 147 ved at kombinere observationer fra NASAs Hubble Rumteleskop i det synlige spektrum med røntgenobservationer fra NASAs Chandra-satellit.

Arp 147 er egentligt to galakser, der er stødt sammen. De ligger omkring 430 lysår fra Jorden i stjernebilledet havfisken (Cetus) på den nordlige himmel. Den ene galakse i Arp 147 er en spiralgalakse – der nu ses som en blålig ring (til højre på billedet), hvor den blå farve kommer fra unge, varme stjerner. Den anden galakse er ellipseformet galakse – der ses som en hvidlig ring med en

lysende klump i midten (til venstre på billedet).

Observationer fra Chandra har afsløret omkring ni kraftige røntgenstrålekilder, der ifølge forskerne er sorte huller hver med en masse på mellem 10-20 gange Solens masse. De sorte huller såvel som de blå unge, varme stjerner er en konsekvens af sammenstødet mellem de to galakser, hvor gasser i galaksen blev forstyrret og dannede nye stjerner. De tungeste af de nyfødte stjerner har en meget kort levetid og ender efter få millioner år i gigantiske supernovaeksplosioner. Derved slynges de ydre dele af stjernen ud i rummet, mens de indre dele falder sammen til et sort hul.

Kilder: www.tycho.dk/article/view/6283;
<http://chandra.harvard.edu/photo/2011/arp147>.



Billedet er en kombination af optagelser fra Hubble rumteleskopet og fra Chandra-satellitten, hvor Chandras røntgenobservationer er vist som lyserøde pletter i billedet (NASA).