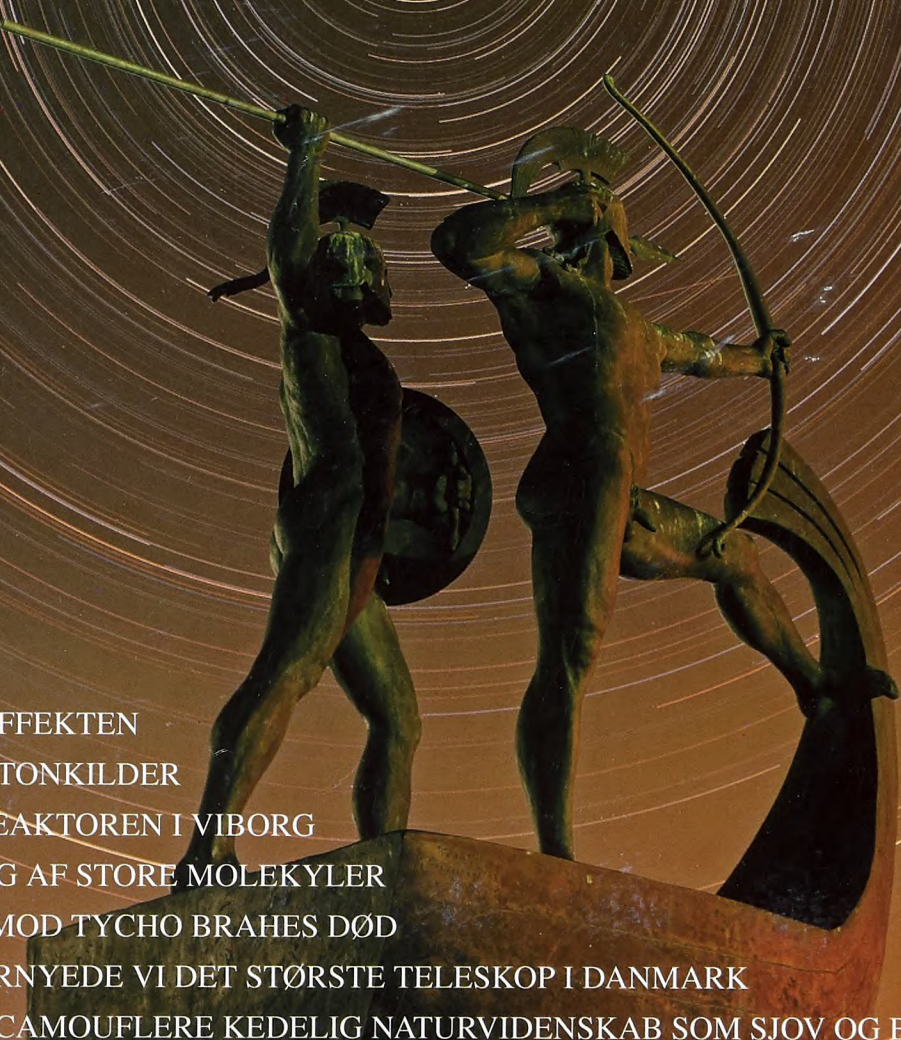


KVANT

Oktober
2017

3

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 28. årgang

- 
- DRIVHUSEFFEKTEN
 - ENKELTFOTONKILDER
 - FUSIONSREAKTOREN I VIBORG
 - IONISERING AF STORE MOLEKYLER
 - TIDEN OP MOD TYCHO BRAHES DØD
 - SÅDAN FORNYEDE VI DET STØRSTE TELESKOP I DANMARK
 - KAN MAN CAMOUFLERE KEDELIG NATURVIDENSKAB SOM SJOV OG BALLADE?

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
Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson,
DTU Elektro
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie Søgaard (AS)
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Gunnarsson: christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2300 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2200.

Produktionsplan

Nr. 4-17 udkommer ca. 15. december
Nr. 1-18 udkommer ca. 15. marts
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Tiden op mod Tycho Brahes død <i>Kaare Lund Rasmussen</i>	3
Enkeltfotonkilder <i>Niels Gregersen</i>	7
Snyd med opgaver: Kan man camouflere kedelig naturvidenskab som sjov og ballade? <i>Martin Frøhling Jensen</i>	11
Sådan fornyede vi det største teleskop i Danmark <i>Michael L. Nielsen</i>	14
Ionisering af store molekyler <i>Klavs Hansen og Vitali Zhaunerchyk</i>	17
Rutsjende dug: breddeopgave 73 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	20
Fusionsreaktoren i Viborg <i>Bernhard Lind Schistad</i>	22
KVANT-nyheder <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	27
Aktuelle bøger <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	29
Nekrolog over Thor A. Bak <i>Dorte Olesen</i>	30
Drivhuseffekten <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	31
Foreningsnyt	35
En positiv nyhed fra Mellemøsten <i>Finn Berg Rasmussen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden er taget af Anthony Ayiomamitis fra Athen, der har indfanget stjernernes bevægelser omkring himlens nordpol. Billedet er i løbet af seks timer taget natten mellem den 22. og 23. juli. Rotationen er centreret omkring Nordstjernen (Alfa Ursae Minoris), der ligger i stjernebilledet Lille Bjørn, og er mindre end 1 grad fra nordpolen. Nordstjernen har derfor været god at navigere efter.

Bronzeskulpturen i forgrunden er udført af Achilles Vasileiou og blev rejst i 2006 til minde om Slaget ved Salamis. Slaget blev udkæmpet i 480 f.Kr. mellem en alliance af græske bystater og Persien i farvandet mellem fastlandet og øen Salamis, som ligger nær Athen. Det var det andet store slag mellem grækerne og perserne, ti år efter kampen ved oldtidens Marathon (490 f.Kr.) nordøst for Athen.

De græske skibe var stærkt i undertal, men det lykkedes at lokke den persiske flåde ind i det smalle stræde ved Salamis, hvor de græske skibe havde lettere ved at manøvrere, hvilket sikrede dem den afgørende sejr. Slaget blev et vendepunkt i krigen, og efter yderligere nederlag året efter opgav Persien erobringen af Grækenland, som herefter blomstrede op kulturelt og videnskabeligt.

KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).



Tiden op mod Tycho Brahes død

Af Kaare Lund Rasmussen, CHART, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet

Prøver af hår og knogler fra Tycho Brahes jordiske rester er blevet analyseret med avancerede kemiske målemetoder. To hår, hver 2 cm lange, er blevet skåret over i fire stykker og analyseret hver for sig. Kviksølvkoncentrationen var inden for normalområdet. Det kan således afvises, at Tycho Brahe blev forgiftet med kviksølv hverken, kort før sin død eller tidligere i livet. Koncentrationerne af sølv og guld overskred imidlertid normalværdierne for den nulevende befolkning. De kemiske data tyder på, at Tycho Brahes liv af en eller anden grund ændrede sig radikalt omtrent to måneder før sin død.

Det var en efterårsaften i Prag den 13. oktober 1601. Den danske astronom Tycho Brahe var til et middags-selskab for samfundets spidser hos greve Peter Vok von Rosenberg. Dette var begyndelsen på enden af livet for den berømte danske astronom. Legenden siger, at Tycho Brahe døde som følge af en sprængt blære, fordi han ville følge etiketten; han ville ikke rejse sig og gå for at lade sit vand sig under middagen. Denne forklaring finder imidlertid ikke megen klangbund i den moderne lægeverden. Faktum er i hvert fald, at Tycho blev syg, tog hjem, gik til sengs og døde 11 dage senere – den 24. oktober 1601.



Figur 1: Tycho Brahe (1546-1601)

Således fortalt strækker Tychos sygehistorie 11 dage; med alle de konsekvenser dette har for de mulige diagnoser. Som det kan ses i figur 3, er der for nyligt publiceret nye målinger på Tycho Brahes jordiske rester, som på afgørende vis ændrer på dette billede.



Figur 2: Tycho Brahes jordiske rester som de så ud ved udgravningen i 1901.

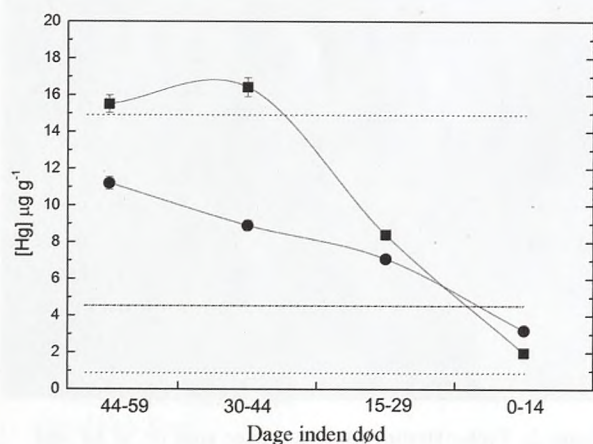
Tychos død har vedvarende været omgærdet af rygter om forgiftning. Mange så William Shakespeares skuespil Hamlet fra 1603 som en kommentar til Tycho Brahes mulige forgiftning, selvom der er flere andre mulige inspirationskilder til det berømte skuespil. Rygterne fortsatte gennem århundrederne og kulminerede i Gilder og Gilders bog fra 2004, hvori forfatterne kom med den groteske påstand, at det skulle være Johannes Kepler, der myrdede Tycho med kviksølv.

Dette var et af flere incitament til, at arkæolog Jens Velle fra Århus Universitet i 2010 samlede et forskerhold med både danske og tjekkiske forskere og fik lov til at genåbne Tycho Brahes grav.

Der var tale om en genåbning, for Tycho Brahes grav havde nemlig været åbnet en gang før. I 1901 drev nysgerrighed den tyske læge, Heinrich Matiega, til at søge om tilladelse til at åbne Tycho Brahes grav i Tyn Kirken i Prag. Tycho Brahes grav var forblevet lukket, siden hans kone Kirsten Barbara Jørgensdatter blev gravlagt ved hans side tre år efter sin mands død. Matiega havde tilsyneladende ikke noget videnskabeligt mål med sin

undersøgelse – han ville simpelthen bare gerne se, om den navnkundige Tycho Brahe virkelig lå i sin grav. Det viste sig, at det gjorde han. Tychos jordiske rester blev taget op og vendt og drejet. Blandt andet blev det flotte røde silkeklæde, der blev fundet i graven, skåret i mange små firkanter, som blev delt ud som memento for dagen – man må vel sige: en slags souvenirs. Der blev sikret en prøve af Tychos skæg, som har henligget på Prags Bymuseum indtil vore dage. Efter en rum tid blev Tycho Brahes jordiske rester genbegravet i Tyn Kirken; nu svejset ind i en ca. én meter lang tinkiste. Ansigtsgnolen blev anbragt i en glasbeholder, som også var anbragt inde i tinkisten. Kirsten Jørgensdatters lig blev ikke rørt.

Den første undersøgelse af de nye prøver fra 2010 gik ud på at måle kviksølv i hår og knogler, med det formål at be- eller afkræfte om Tycho var blevet myrdet med kviksølv. Kviksølv blev målt med to forskellige analysemetoder. Den ene var radiokemisk neutronaktiveringsanalyse (RNAA) udført på reaktoren i Rez udenfor Prag. Den anden metode var kolddampsatomabsorptionsspektroskopi (CV-AAS), der blev udført på Syddansk Universitet i Odense.



Figur 3: Kviksølvkoncentrationen i Tycho Brahes hår som funktion af tiden før døden målt ved hjælp af radiokemisk neutronaktiveringsanalyse.

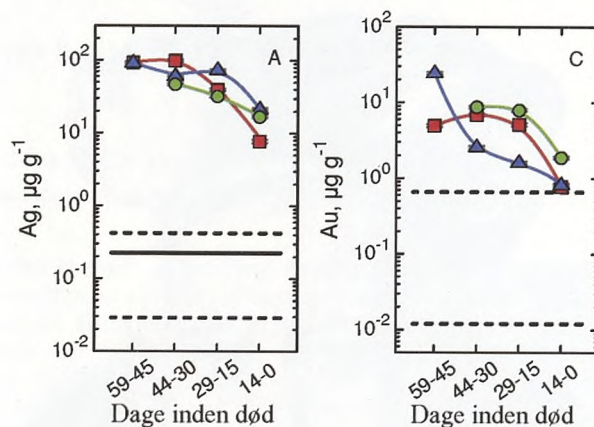
Nu har vi så kviksølv koncentrationerne målt med stor sikkerhed og på dekontaminerede prøver, men hvordan vurderer man disse tal? Hvad er normalt og hvad er forhøjet? Det er der lavet store undersøgelser over på nulevende mennesker med mange hundrede analyser. Samlet set viser disse undersøgelser, at normalniveauet ligger mellem 1 og 15 µg/g [1]. Som det ses af figur 1, lå det ene hår helt indenfor normalområdet (fra 2 til 12 µg/g), mens det andet for to punkters vedkommende lå lige over, men ganske tæt ved normalområdet (omkring 16 µg/g).

Hvordan vil det se ud, hvis en person var kviksølvsforgiftet? Det er også set i nyere tid, hvor mennesker af forskellige grunde har været udsat for eksponering med kviksølv. Ved en moderat kviksølvsforgiftning, hvor ofrene overlevede forgiftningen, lå koncentrationerne i håret på 200 – 800 µg/g [2]. Fatal kviksølvsforgiftning, hvor ofrene altså ikke overlevede, har man heldigvis kun få af, og her har man kun kviksølvmålinger på blod-

prøver, men ekstrapolerer man den normalt accepterede sammenhæng mellem kviksølvs-koncentrationerne i blod og hår [3], så ligger de anslåede kviksølvs-koncentrationer i håret på over 10.000 µg/g [4].

Resultatet af kviksølvmålingerne var meget klare [5]. Tycho Brahe var ikke blevet forgiftet med kviksølv. Han havde heller ikke tidligere i sit liv været udsat for kviksølv, hvad der for eksempel var tilfældet for Sir Isaac Newton [6]. Så der blev med disse målinger sat en effektiv stopper for rygterne omkring Johannes Keplers mordforsøg.

Den næste undersøgelse gik ud på at analysere Tycho Brahes hår og knogler for andre grundstoffer end kviksølv. Man kan aflæse mange aspekter af det levede liv ved at se på sporstofkoncentrationerne i knogler fra arkæologiske udgravninger. For eksempel kan strontium og barium afsløre, hvor man har opholdt sig; bly kan afsløre ens sociale klasse; og kviksølv hvorvidt man har været under medicinsk behandling i middelalderen (se detaljer i fx Rasmussen *m.fl.* [7, 8]). Målingerne blev udført med instrumentel neutronaktiveringsanalyse (INAA) i Prag og induktivt koblet plasmamassespektrometri (ICP-MS) udført i Odense. De fleste grundstoffer viste koncentrationer, som var forventelige, hvis man sammenligner med almindelige nulevende mennesker, men to af grundstofferne fandtes i bemærkelsesværdigt høje koncentrationer, nemlig guld og sølv. Det er klart ud fra målingerne, at Tycho Brahe må have været voldsomt eksponeret for både guld og sølv.



Figur 4: Grundstofferne sølv (Ag) og guld (Au) som funktion af tiden op mod Tycho Brahes død

Har nogen da forsøgt at slå Tycho ihjel med guld eller sølv? Næppe. Og det ville nok heller ikke være så let, da de fleste salte af disse grundstoffer ikke er specielt toksiske. Vi tror, der er en helt anden grund.

Tycho Brahe var umådelig rig. Dels havde han arvet mange penge, dels fik han store mængder penge af sin velynder, den danske konge Frederik II. Derfor er det helt tænkeligt og endda rimeligt at antage, at han spiste af guldallerkener, eller brugte knive og gaffer af guld og sølv, eller drak vin af guldbægere. Måske drak han vin med bladguld i. Vi ved det ikke, men for lige netop ham, er et unormalt højt niveau af guld og sølv i knoglerne ikke så mærkeligt.

Det mest bemærkelsesværdige ved målingerne er derfor ikke selve koncentrationsniveauerne for guld og

sølv. Faktisk er der heller ikke noget bemærkelsesværdigt ved koncentrationerne af nogen af de andre grundstoffer. Det spændende ligger i *variationerne* af koncentrationerne med tiden.



Figur 5: Observatoriet Uraniborg er et af Tycho Brahes observatorier på øen Hven i Øresund, opført omkring 1580.

Som man kan se af graferne, der viser sølv og guld som funktion af tiden, så sker der et konstant fald i koncentration helt fra to måneder før døden (så langt tilbage i tiden, som det 2 cm lange hår rakte). Samme tendens ses også i koncentrationerne af kviksølv. Det interessante her er, at den ændring, der sker i Tycho Brahes kost eller medicinering, ikke indtræder 11 dage før døden, men omtrent to måneder før døden (eller tidligere). Dette faktum betyder meget for udvalget af mulige diagnoser for, hvad Tycho Brahe kunne være død af. Der indtraf ubestrideligt en akut situation eller forværring den 13. oktober, men der var forudgående sket en ændring i hans liv cirka 2 måneder før, som havde betydet, at hans kost eller medicinering må have ændret sig drastisk. Præcis, hvad det var, der indtraf 2 måneder før døden, ved vi ikke, men sikkert er det, at vi nu har bevæget os væk fra det 400 år gamle scenarie med en akut indtrådt sygdom 11 dage før døden.

Hvad så fremadrettet? Der er stadig rigtigt meget at undersøge ved de prøver, som blev udtaget i 2010. Først og fremmest venter undersøgelserne af Kirsten Jørgensdatter, der levede tæt og trofast sammen med Tycho gennem godt og ondt. De to har utvivlsomt spist den samme mad, rejst de samme steder hen gennem næsten 30 år. De forskelle, der måtte være i grundstofsammensætningen af de to mennesker, kan måske skyldes Tychos astronomiske eller kemiske arbejde. Måske vil det være muligt at afsløre nogle hidtil ukendte aspekter af Tycho Brahes videnskabelige arbejder, for eksempel om han eksperimenterede med alkymi – ligesom sin søster.



Figur 6: Knogleprøve med spongøst væv af Tycho Brahe og CV-AAS apparatur.

Radiokemisk neutronaktiveringsanalyse (RNAA)

Ved radiokemisk neutronaktiveringsanalyse anbringes prøven i en lille beholder, der sænkes ned i en atomreaktor sammen med andre prøver der indeholder kendte koncentrationer af de grundstoffer, som man ønsker at analysere for. Prøven udsættes for et bombardement af neutroner, der omdanner isotoperne i prøven til mere neutronrige udgaver. Nogle af disse er radioaktive. I denne undersøgelse omdannedes $^{202}\text{Hg} + n$ til ^{203}Hg , der er radioaktiv med en halveringstid på 46 dage. Prøven hejses op, beholderen knuses og prøven opløses i stærk syre. Opløsningen, der nu er stærkt radioaktiv, anbringes i en tæller bestående af en hul natriumiodidkrystal. Ved at sammenligne med tællertallene for de kendte prøver kan man nu beregne koncentrationen af kviksølv i prøven. Fordelen ved metoden er, at man opnår en meget lav detektionsgrænse, hvilket man i denne undersøgelse udnytter til at kunne måle prøver med en meget lille masse – et hår på kun 5 mm.

Instrumentel neutronaktiveringsanalyse (INAA)

Ved instrumentel neutronaktiveringsanalyse anbringes prøven i en lille beholder, der sænkes ned i en atomreaktor sammen med andre prøver der indeholder kendte koncentrationer af de grundstoffer, som man ønsker at analysere for. Prøven udsættes for et bombardement af neutroner, der omdanner isotoperne i prøven til mere neutronrige udgaver, hvoraf mange er radioaktive. Efter endt bestråling trækkes prøven op og anbringes på en meget følsom energidispersiv røntgenspektrometer tæller, der både kan tælle antallet af henfald og hvilken energi de har. Ved at sammenligne med tællertallene for de kendte prøver kan man nu beregne koncentrationen af flere grundstoffer i prøven – hvert grundstof har en karakteristisk energi i deres gammastråling.

Kolddamps-atomabsorptionsspektrometri analyse for kviksølv (CV-AAS)

Ved kolddampsatomabsorptionsspektrometrisk analyse bestemmer man kun et grundstof. Prøven opløses i stærk syre blandet med koncentreret hydrogenperoxid. Kviksølvet i prøven holdes på ionisk form ved at tilsætte kaliumpermanganat. Lige før målingen foretages blandes den med natriumborhydrid, hvorved kviksølv reduceres og bringes på dampform. En strøm af argon bobles igennem prøver og tvinger kviksølvdampen med sig. Gassen føres igennem en 30 cm lang cuvette med fine optiske vinduer i enderne. Lys fra en kviksølvlampe sendes ind ad det ene vindue, gennem gassen og opfanges af et spektrometer i den anden ende. Her måles absorbansen fra kviksølvatomerne og ved hjælp af Lambert-Beers lov og en standardkurve fremstillet ved prøver af kendte koncentrationer beregnes kviksølvs-koncentrationen. Denne teknik er bedre end ICP-MS netop for kviksølv, når man måler på knoglemateriale, fordi bare en prøve med meget højt kviksølvindhold vil forurene de tynde slanger i ICP-MS'en i flere dage og dermed give en forhøjet baggrund. Ved CV-AAS er eventuelle store mængder kviksølv relativt hurtigt ude af systemet igen.

Induktivt koblet plasma masse spektrometri (ICP-MS)

Induktivt koblet plasma masse spektrometri fungerer på den måde at prøven bringes i opløsning i stærk syre og fortyndes passende. Dernæst forstøves væsken som små dråber, der blandes med en strøm af argon. Argongassen ioniseres og opvarmes til en temperatur på mellem 6000 og 10.000 grader C. Herved ioniseres også alle atomerne i prøvematerialet. Temperaturen er indstillet således at de fleste atomer kun ioniseres en gang (mister en elektron). Ionstrålen renses og konditioneres på forskellig vis og sendes til slut ind i et massespektrometer, i vores maskine en kvadropol. Sluttelig måles antal ioner per sekund i en tæller. Ud over prøven forbereder man en serie opløsninger af kendte koncentrationer af alle de grundstoffer man ønsker at måle, hvorved man kan fremstille kalibreringskurver for de ønskede grundstoffer. Maskinen har et lineært respons over et exceptionelt stort område, $1 : 10^9$ hvor f.eks. atomabsorptionsmaskiner normalt har her lineært responsområde på en faktor 100. Man bestemmer det enkelte grundstofs koncentration på nogle få millisekunder, men gentager bestemmelsen mange gange, så målingen af en suite af grundstoffer er afsluttet på få minutter.

Referencer

1. R. C. Baselt, *Disposition of toxic drugs and chemicals in man* (Biomedical Publications, Seal Beach, CA, 2011).
2. H. B. Gerstner, J. E. Huff, Clinical toxicology of mercury. *Journal of Toxicology and Environment Health* **2**, 491–526 (1977).
3. S. C. Foo., A. H. N. Y. Khoo, L. H. Chua, S. E. Chia, C. N. Ong, C. H. Ngim, J. Jeyaratnam, Metals in hair as biological indices for exposure. *International Archives of Occupational and Environmental Health* **65**, 583–6 (1993).
4. P. Triunfante, M. E. Soares, S. Santos, S. Tavares, H. Carmo, M. D. L. Bastos, Mercury fatal intoxication: two case reports. *Forensic Science International* **184**, e1–e6 (2009).
5. K. Rasmussen, J. Kučera, L. Skytte, J. Kameník, V. Havránek, J. Smolík, P. Velemínský, N. Lynnerup, J. Bruzek, J. Velle, Was he murdered or was he not? – Part I: Analyses of mercury in the remains of Tycho Brahe. *Archaeometry*, 1187–1195 (2013).
6. M. Keynes, The personality of Isaac Newton. *Notes and Records of the Royal Society of London* **49**, 1–56 (1995).
7. K. Rasmussen, J. Boldsen, H. Kristensen, L. Skytte, K. Hansen, L. Mølholm, P. Grootes, M.-J. Nadeau, K. Eriksen, Mercury levels in Danish Medieval human bones. *Journal of Archaeological Science* **35**, 2295–2306 (2008).
8. K. Rasmussen, L. Skytte, A. Jensen, J. Boldsen, Comparison of mercury and lead levels in the bones of rural and urban populations in Southern Denmark and Northern Germany during the Middle Ages. *Journal of Archaeological Science: Reports* **3**, 358–370 (2015).

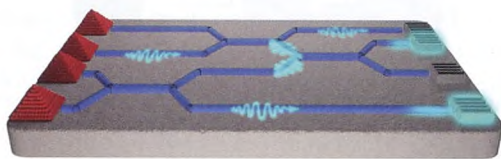


Kaare Lund Rasmussen er dr.scient. og lektor ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci ved Syddansk Universitet. Han leder forskningsgruppen CHART, der beskæftiger sig med kemiske analyser af kulturarvsmaterialer.

Enkeltfotonkilder

Af Niels Gregersen, DTU Fotonik

Enkeltfotonkilden er en lyskilde, der udsender kvantiseret lys i form af enkelte fotoner ind i en veldefineret optisk kanal. Den er en central komponent inden for optisk kvanteinformationsteknologi, hvor udnyttelsen af fotonens kvantemekaniske egenskaber muliggør eksempelvis ubrydelig kryptering og konstruktionen af en optisk kvantecomputer. I denne artikel gennemgår vi enkeltfotonkildens fundamentale egenskaber og dens anvendelser inden for kvanteinformation.



Figur 1: Optisk kvanteinformation på en chip. Enkelte fotoner (lyseblå) udsendes af enkeltfotonkilder (røde pyramider til venstre) og interfererer med hinanden i bølgelederne (mørkeblå). Fotonerne måles af enkeltfotondetektorer (mørkegrå til højre).

Selvom elektronikindustrien i dag er baseret på halvlederteknologi, er funktionaliteten af vores laptops og smartphones grundlæggende klassisk. Inden for kvanteinformationsteknologi ønsker man direkte at udnytte kvantemekaniske egenskaber såsom superposition og sammenfiltring til at opbygge nye funktionaliteter. Den hellige gral er kvantecomputeren, hvor massiv parallelisering gennem superpositionsprincippet giver kvantecomputeren mulighed for at udføre visse beregningsopgaver, hvor tidsforbruget stiger polynomialt med opgavens omfang i stedet for eksponentielt, som på en klassisk computer. I 2001 blev det vist af Knill *m.fl.* [1], at en optisk kvantecomputer kan opbygges alene ved hjælp af enkeltfotonkilder, detektorer og almindelige optiske komponenter såsom spejle og bølgeledere. Arkitekturen er skitseret i figur 1, der illustrerer en flad chip, hvor alle komponenterne er implementerede på selve chippen. At anvende en optisk platform til kvantecomputeren, hvor kvantebits kodes på enkelte fotoner, giver en række fordele: Fotonen er en "flyvende" kvantebit og derfor velegnet til kommunikation mellem separate enheder på chippen, den vekselvirker svagt med omgivelserne og er derfor robust overfor dekohærens, og den kan nemt manipuleres vha. almindelige "off-the-shelf" optiske komponenter.



Figur 2: Scenariet inden for sikker kommunikation. Alice og Bob ønsker at kommunikere uden at blive aflyttet af Eve.

En anden kvanteinformationsteknologi, der allerede findes på markedet, er sikker kommunikation baseret

på kvantekryptografi. Her ønsker to parter, Alice og Bob, at kommunikere med hinanden over en optisk kanal, (figur 2) uden at de kan aflyttes af en tredje part Eve. Dette kan gøres ved at kode bitstrømmen på eksempelvis polarisationen af enkelte fotoner. Det såkaldte "no-cloning"-teorem [2] dikterer, at perfekt kopiering af fotonens kvantetilstand er umulig, og Eve kan derfor ikke aflytte datastrømmen uden at påvirke denne. Denne påvirkning kan detekteres af Alice og Bob, der nu ved, at de bliver aflyttede.

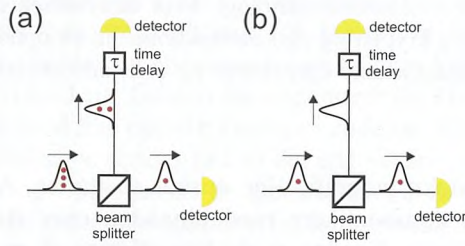
For både den optiske kvantecomputer og inden for kvantekryptografi er enkeltfotonkilden altså en central byggesten.

Enkeltfotonkildens egenskaber

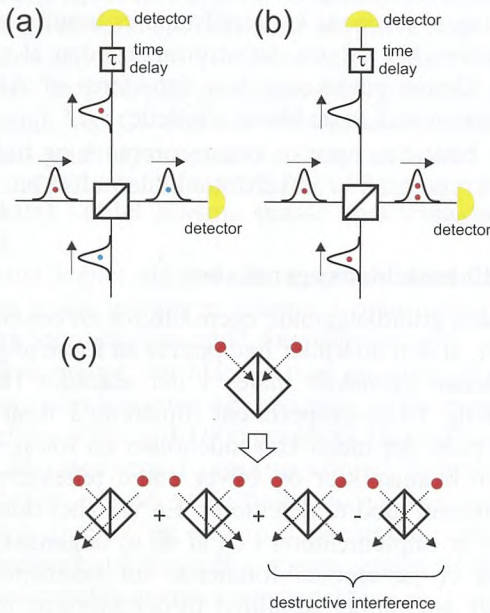
Den mest grundlæggende egenskab for en enkeltfotonkilde er, at den udsender lige præcis én foton af gangen [3]. Denne egenskab måles i det såkaldte Hanbury Brown og Twiss-eksperiment illustreret i figur 3. En optisk puls, der ideelt kun indeholder én foton, sendes mod en beamsplitter og bliver enten reflekteret eller transmitteret mod to detektorer. En variabel tidsforsinkel τ er implementeret i en af de to udgangskanaler, og den er justeret så fotonerne fra beamsplitterens udgange ankommer samtidigt til detektorerne for $\tau = 0$. Antallet af fotoner i pulsen kan nu karakteriseres ved at måle autokorrelationsfunktionen $g^{(2)}(\tau = 0)$: Eksperimentet foregår ved at lade enkeltfotonkilden sende lyspulser mod beamsplitteren og ved at måle antallet af samtidige detektioner i de to detektorer som funktion af τ . Hvis input-pulsen indeholder flere fotoner som vist i figur 3(a), vil nogle fotoner blive reflekterede, hvor andre bliver transmitterede, hvilket fører til koincidensmålinger i de to detektorer for $\tau = 0$. Men hvis pulsen kun indeholder en enkelt foton som illustreret i figur 3(b), så vil denne foton enten blive transmitteret eller reflekteret, og ingen samtidige detektioner finder sted.

Det næste krav til enkeltfotonkilden er, at de udsendte fotoner skal være kvantemekanisk uskelnelige [3], således at fotonerne har samme bølglængde, fasevariation over pulsen, polarisation, optisk "mode" o.s.v. Med optisk "mode" menes her en specifik elektromagnetisk feltprofil, der er løsning til Maxwell's ligninger. Fotonernes uskelnelighed karakteriseres i Hong-Ou-Mandel-eksperimentet vist i figur 4. I dette eksperiment indsendes to enkeltfotonpulser mod en beamsplitter, og pulserne transmitteres eller reflekteres ind i udgangska-

nalerne. En variabel tidsforsinkelse τ implementeres igen, så fotonerne ankommer samtidigt til detektorerne for $\tau = 0$. Eksperimentet foregår nu ved at indsende fotoner langs indgangskanalerne og ved igen at måle korrelationsfunktionen $g^{(2)}(\tau = 0)$, der beskriver antallet af simultane detektionsbegivenheder som funktion af tidsforsinkelsen.



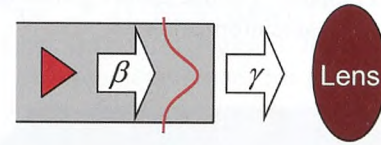
Figur 3: Hanbury Brown og Twiss-eksperimentet illustreret når input-pulsen indeholder (a) multiple fotoner og (b) kun en enkelt foton.



Figur 4: Resultat af Hong-Ou-Mandel-eksperimentet for (a) sknelige og (b) uskelnelige fotoner. (c) Mulige outputtilstande.

De indsendte fotoner kan forlade beamsplitteren enten langs separate udgangskanaler (figur 4(a)) eller i samme udgangskanal (figur 4(b)). Hvis de to fotoner er kvantemekanisk sknelige, kan de forlade beamsplitteren langs forskellige udgangskanaler, så $g^{(2)}(\tau = 0) \neq 0$. Men hvis fotonerne er uskelnelige i alle frihedsgrader og rammer beamsplitteren samtidigt, vil de altid forlade beamsplitteren i samme udgangskanal som illustreret i figur 4(b), hvilket fører til $g^{(2)}(\tau = 0) = 0$. Dette fænomen kaldes Hong-Ou-Mandel-effekten og kan forklares ud fra en kvanteoptisk betragtning af sandsynlighederne af de fire mulige udgangstilstande som skitseret i figur 4(c). Sandsynlighedsamplituden for, at fotonerne forlader beamsplitteren via separate udgange, består i to bidrag, svarende til, at fotonerne enten begge reflekteres eller transmitteres. For uskelnelige fotoner interfererer disse bidrag destruktivt med hinanden [4], og kun de to øvrige konfigurationer, hvor fotonerne forlader beamsplitteren sammen, er mulige.

Enkeltfotonkildens tredje vigtige karakteristika [3] er dens lysintensitet eller effektivitet [5]. Den ideelle enkeltfotonkilde bør være deterministisk og udsende enkelte fotoner “on demand”. Den skal virke som en “enkeltfotonkanon”, således at hvert tryk på aftrækkeren udsender præcist én foton i den opsamlende optik, som typisk er en mikroskoplins. Effektiviteten ϵ defineres så som antallet af fotoner detekteret i linsen per aftrækning.



Figur 5: Model for effektiviteten i et kvante-elektrodynamik-design. Den røde trekant repræsenterer lyskilden.

Inden for designstrategier baseret på kvante-elektrodynamik bliver effektiviteten karakteriseret vha. to parametre som illustreret i figur 5. Den første parameter er den spontane emissions-faktor β , der beskriver den brøkdelen af lyset, der kobles fra kilden til den optiske “mode” af interesse. β -faktoren kan skrives som

$$\beta = \frac{\Gamma_M}{\Gamma_M + \Gamma_{BG}}, \quad (1)$$

hvor Γ_M er den spontane emissionsrate ind i den optiske “mode”, og Γ_{BG} er emissionsraten ind i baggrunds-“modes”. Den anden parameter er udkoblingseffektiviteten γ , der beskriver brøkdelen af lys transmitteret fra den optiske mode til den første objektivlinse. I dette billede er effektiviteten ϵ givet ved produktet $\beta\gamma$. I et multifoton-eksperiment med j fotoner skalerer den totale succes-sandsynlighed som ϵ^j . Inden for skalerbar optisk kvanteinformation med et stort antal fotoner skal effektiviteten af fotonudsendelsen derfor være så tæt på 1 som muligt.

Metoder

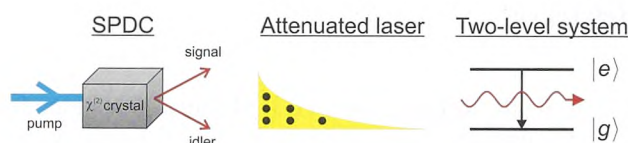
Den dominerende metode til at producere enkelte fotoner har i lang tid været spontan parametriske nedkonvertering (SPDC). Lad os huske på, at i et isotropisk materiale er polarisationen $\mathbf{P}$ relateret til det elektriske felt $\mathbf{E}$ som

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E}^2 + \chi^{(3)} \mathbf{E}^3 + \dots \right) \quad (2)$$

hvor $\chi^{(n)}$ er n -ordens susceptibiliteter. I SPDC-metoden anvendes en ikke-lineær krystal med $\chi^{(2)} \neq 0$ som for eksempel lithiumniobat, der, som vist i figur 6, belyses med en kraftig pumpelaser med en energi $\hbar\omega_p$. Såfremt visse fasematchningsbetingelser er opfyldt, muliggør ulineariteten konvertering af en pumpefoton til to enkelte fotoner, en “signal”- og en “lediggænger”-foton med respektive energier $\hbar\omega_s$ og $\hbar\omega_i$, således at $\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$. Ved at filtrere “lediggænger”-fotonen fra, kan SPDC-processen således producere enkelte fotoner. Fordelene ved metoden er dens enkle implementering i laboratoriet og “signal”- og “lediggænger”-fotonernes høje grad af uskelnelighed. Den primære

ulempe er, at nedkonverteringsprocessen i sagens natur er probabilistisk, hvilket fører til typisk effektivitet under 0.01. Effektiviteten kan forbedres ved at hæve pumpe-effekten, men prisen, der betales, er en signifikant stigning i antallet af multifotonpulser. Den probabilistiske natur begrænser derfor SPDC-metoden til eksperimenter, der kun involverer en håndfuld fotoner.

Fra et kommercielt synspunkt er en anden vigtig kilde den dæmpede laser. En puls udsendt af en konventionel diodelaser propagerer igennem et absorberende materiale og dæmpes til enkeltfoton-niveau. Fordelen ved den dæmpede laser er igen dens enkelthed, og den primære ulempe er, at dæmpningen igen er en probabilistisk proces, som resulterer i enten lav effektivitet eller væsentlig sandsynlighed for multifoton-begivenheder. Derudover er de udsendte fotoner ikke uskelnelige, hvilket forhindrer deres brug i de fleste kvanteoptiske eksperimenter. På trods af dette er den dæmpede laser en vigtig komponent i kommercielle produkter til kvantekryptografi, hvor der ikke er behov for ren enkeltfotonproduktion og for høj grad af uskelnelighed.

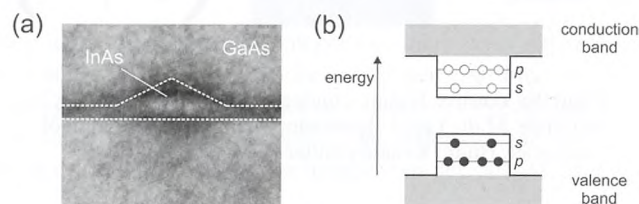


Figur 6: De vigtigste metoder til at producere enkelte fotoner.

En løsning på SPDC og den dæmpede lasers probabilistiske begrænsninger er i stedet at anvende et to-niveau-system som vist i figur 6, hvor en elektron kan besætte enten en grundtilstand $|g\rangle$ eller en eksiteret tilstand $|e\rangle$ med tilhørende respektive energier E_g og E_e . Systemet befinder sig først i grundtilstanden og er dernæst eksiteret ved hjælp af en optisk eller elektrisk puls, hvorefter elektronen vender tilbage til grundtilstanden ved at udsende en enkelt foton $\hbar\omega_0 = E_e - E_g$ via spontan emission. Den primære fordel ved to-niveau-systemet, ofte refereret til som en kvante-emitter, er, at det øvre niveau kun kan indeholde én elektron ad gangen, hvilket sikrer, at kun én foton bliver udsendt per eksitationspuls. Derudover er den spontane emission en deterministisk proces. Endeligt er det muligt at strukturere kvante-emitterens omgivelser, således at lysudsendelsen dirigeres mod den ønskede udgangskanal og høj effektivitet nær 1 kan opnås.

Et arbitrært faststofsystem med diskretiserede energiniveauer kan i princippet anvendes som et to-niveau-system. En særdeles moden platform til en deterministisk enkeltfotonkilde er InAs-kvantepunktet dyrket i et GaAs værtsmateriale vist i figur 7(a). Kvantepunktet består af en pyramideformet ø af InAs-atomer omgivet af GaAs. På grund af InAs' mindre båndgab vil den elektroniske bølgefunktion være fuldt begrænset i alle tre dimensioner. Dette fører til diskretiserede energiniveauer i lednings- og valens-båndene som illustreret i figur 7(b), og kvantepunktet kan derfor betragtes som et "kunstigt atom". En ulempe ved InAs kvantepunkter

er, at de aldrig er helt ens og dermed har forskellige energiniveauer. Emissionsspektret fra en InAs kvantepunktsprøve er derfor karakteriseret ved en stærk inhomogen forbreddning med typiske emissionsbølgelængder mellem 900 og 950 nm. Den laveste s energitilstand i ledningsbåndet anvendes typisk som den eksiterede tilstand.



Figur 7: Skannende-elektron-mikrograf (a) og energiniveau-diagram (b) for et InAs kvantepunkt.

Den optiske antenne

Hvor InAs kvantepunkter generelt besidder en intern kvante-effektivitet nær 1, dvs. den eksiterede tilstand henfalder via spontan emission og ikke gennem ikke-radiativ rekombination, består en væsentlig udfordring i ingeniørarbejdet i at sikre effektiv ekstraktion af den udsendte foton [5]. Figur 8 opsummerer de vigtigste mulige strategier til at sikre effektiv lysekstraktion. Den enkleste metode er at gro kvantepunkter i et uniformt ustruktureret "bulk"-materiale. Her er kompliceret mikrofabrikation unødvendig, og manglen på omgivende strukturering betyder, at potential-landskabet nær kvantepunktet er forholdsvis stabilt over tid, hvilket favoriserer udsendelsen af uskelnelige fotoner med samme energi. Ulempen er en meget lav opsamlingseffektivitet. Som illustreret i figur 8 bliver lys af symmetriårsager udsendt i alle retninger, hvilket begrænser effektiviteten til omkring 0.01.

For at hæve effektiviteten er det derfor nødvendigt at strukturere det omkringliggende fotoniske landskab, og designopgaven består grundlæggende i at konstruere en optisk antenne. Nu er en stor del af læserne sikkert gamle nok til at kunne huske de "Yagi-Uda"-type tagantennener af metal vist i figur 8, som før fibernetværkets tid leverede TV og radiosignaler til huset. Antennedesign i radiobølgeområdet er veletableret, og en umiddelbar naturlig strategi er at genanvende disse principper i designet af enkeltfotonkilden. Her spiller tre faktorer dog ind: 1) Den grundlæggende antagelse i antenne-design i radiobølgeområdet er, at metaller fungerer som perfekte elektriske ledere, og intet lys penetrerer ind i dem. 2) For at beskytte kvantebittens tilstand fra omgivelserne, skal energiforskellen $E_e - E_g$ være betydeligt større end den termiske energi $k_B T \approx 6$ THz ved stuetemperatur. Derfor er man i kvanteoptik tvunget til at arbejde med optiske eller nær-infrarøde frekvenser. 3) Hvor metaller kan antages at være perfekte ledere i radiobølgeområdet, holder denne antagelse ikke ved optiske frekvenser. Her trænger lys betydeligt ind i antennestrukturen, hvilket fører til ohmsk tab i metallet. Kombinationen af disse tre faktorer har betydet, at et

direkte genbrug af metal-baserede designs indtil videre ikke har ført til de bedste enkeltfotonkilder.

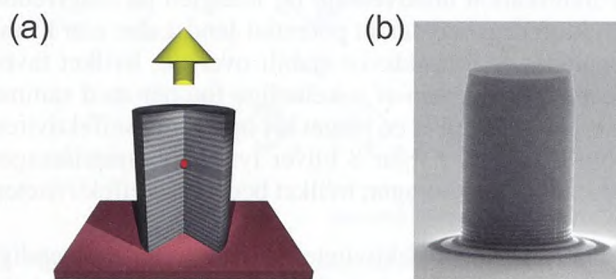


Figur 8: Venstre: Kvante-emitter i et ustruktureret “bulk”-materiale. Midt: Yagi-Uda-antenne opererende ved radiobølglængder. Højre: Kvante-emitter i en optisk kavitet.

Den hidtil mest succesfulde strategi til at konstruere en effektiv enkeltfotonkilde er baseret på kvanteelektrodynamik. Her placeres kvante-emitteren i en optisk kavitet som illustreret i figur 8. Lys vil stadig udsendes i alle retninger, men lysudsendelsen ind i den optiske kavitsmode bliver her forstærket af den såkaldte Purcell-effekt: Emissionsraten ind i kavitsmoden er givet ved den såkaldte Purcell-faktor F_P

$$F_P = \frac{\Gamma_M}{\Gamma_B} = \frac{3}{4\pi^2} \frac{Q}{V_n}, \quad (3)$$

hvor Γ_B er emissionsraten i et uniformt “bulk”-medium, Q er kavitetens kvalitetsfaktor, og V_n er kavitetens normaliserede modevolumen. Fra ligningerne (1)-(3) ser vi, at effektiviteten kan maksimeres ved at vælge en høj Q -faktor og et lille modevolumen.



Figur 9: (a) Skitse af mikrosøjlegeometrien. Den røde sfære illustrerer kvantepunktet. (b) Skannende-elektron-mikrograf af en fabrikeret mikrosøjle.

Den hidtil mest succesfulde enkeltfotonkilde er mikrosøjlen vist i figur 9. Den består af en vertikal GaAs søjle med en typisk diameter på $\approx 2 \mu\text{m}$ placeret på et substrat. Kvantepunktet befinder sig i en vertikal kavitet omgivet af Bragg-spejle bestående af vekslende lag af GaAs og AlAs. Bundspejlet er tykkest og har dermed en højere reflektivitet end topspejlet, og lyset bliver derfor primært udsendt opad med en Gaussisk fjernfelsesprofil velegnet til indkobling i en optisk fiber. I 2013 førte en optimal kombination af Q og V_n til demonstrationen af effektivitet op til 0.79 [6] fra en mikrosøjle. I 2016 blev næsten perfekt uskelnelighed af de udsendte fotoner og ren enkeltfoton-udsendelse med en sandsynlighed for multifotonudsendelse $g^{(2)}(\tau = 0) < 0.01$ demonstreret [7], dog med en noget lavere opsamlingseffektivitet på 0.33.

Perspektiver

I 2018 lancerer den Europæiske Union et nyt forskningsflådeskib inden for kvanteinformationsteknologi med et budget på 1 mia. €, og det forventes, at optiske teknologier kommer til at udgøre en væsentlig del af programmet.

Konstruktionen af en enkeltfotonkilde, der kombinerer ren enkeltfotonudsendelse, effektivitet over 0.99 og perfekt uskelnelighed er stadig en udfordring. Når den en dag kommer, vil den blive en af nøglekomponenterne i eksperimenter, der potentielt involverer snesevis af fotoner på vejen mod at etablere skalerbar kvanteinformationsteknologi. Udfordringen i dens konstruktion følges ikke bare i den akademiske verden, men også i industrien: Efterspørgslen på enkeltfotonkilder er så stor at de første firmaer dedikerede til produktionen af kilder er søsat. I Frankrig sælger firmaet Quandela kilder baseret på mikrosøjlegeometrien, og i Danmark er vi også godt med: Fra opstartsfirmat Sparrow Quantum fra Niels Bohr Institutet kan man i dag købe færdige enkeltfotonkilder baseret på en planar chip-teknologi.

Referencer

1. E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn, A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature* **409**, 46–52 (2001).
2. W. K. Wootters, W. H. Zurek, A single quantum cannot be cloned. *Nature* **299**, 802–803 (1982).
3. J. Piprek, *Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation* (CRC Press, 2017), bd. 2, kap. 46, s. 585–608.
4. C. C. Gerry, P. L. Knight, *Introductory Quantum Optics* (Cambridge University Press, 2008).
5. N. Gregersen, P. Kaer, J. Mørk, Modeling and Design of High-Efficiency Single-Photon Sources. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **19**, 9000516 (2013).
6. O. Gazzano, S. M. de Vasconcellos, C. Arnold, A. Nowak, E. Galopin, I. Sagnes, L. Lanco, A. Lemaître, P. Senellart, Bright solid-state sources of indistinguishable single photons. *Nature Communications* **4**, 1425 (2013).
7. X. Ding, Y. He, Z.-C. Duan, N. Gregersen, M.-C. Chen, S. Unsleber, S. Maier, C. Schneider *m.fl.*, On-Demand Single Photons with High Extraction Efficiency and Near-Unity Indistinguishability from a Resonantly Driven Quantum Dot in a Micropillar. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 020401 (2016).



Niels Gregersen er lektor på instituttet for Fotonik på Danmarks Tekniske Universitet og arbejder med design af kilder af kvantiseret lys. Han underviser i kurserne “Kvanteoptik” og “Nanooptik”.

Snyd med opgaver: Kan man camouflere kedelig naturvidenskab som sjov og ballade?

Af Martin Frøhling Jensen, Næstved Gymnasium & HF

Bag den lettere kryptiske overskrift gemmer sig egentlig bare idéen om, at ting går meget nemmere, hvis det er sjovt, mens man laver dem. Kan man "snyde" eleverne til at arbejde fagligt ved at ændre konteksten? Artiklen vil give nogle eksempler på, hvordan jeg i min daglige undervisning prøver at finde de skæve vinkler, det mærkelige eksempel eller måske ligefrem det direkte borderline crazy scenarier på opgaver og forsøg. Det drejer sig ikke om at spille pauseklovn, men hvis man kan lave en sjov opgave og en kedelig opgave, der handler om det samme, så vil de fleste foretrække den sjove.

Naturvidenskab er kedeligt – man hører det igen og igen. Det er en åbenlys usandhed – det ved alle KVANT's læsere, men man kan sagtens forestille sig en situation, hvor formidlingen af naturvidenskab kan blive kedeligt. Jeg kan mindes flere gange, hvor jeg har siddet på universitetet [1] og kæmpet med at holde mig vågen i auditoriet – også selvom det var guldgrube såsom Cauchys integralformel eller vektorpotentialrets retardation, der var på programmet.

Hvis man bare er lidt opdateret inden for skrivelser i dagspressen om uddannelse generelt, vil man vide, at det står umanerligt skidt til med ungdommen. De unge er stressede-, ufokuserede og 100% afhængige af konstante digitale stimuli. Men sådan har det jo været siden de gamle grækeres tid, på nær, det sidste udsagn, så intet nyt under solen.

Jeg tror *personligt* ikke, at ungdommen i 2017 er spor anderledes end for 20 eller 40 år siden, og denne betragtning er helt uden videnskabelig forankring og kan sikkert anfægtes på en række punkter, men der er ingen tvivl om, at der er flere "interessenter", som kæmper om de studerendes opmærksomhed i undervisningen i dag end tidligere. Det stiller nok også lidt større krav til underviseren om at konkurrere med de øvrige kilder til underholdning: sociale medier, online spil og meget andet godt fra cyberspace. Med andre ord: hvis undervisningen er for kedelig, så kan de studerende i dag meget nemmere tjekke ud og foretage sig noget mere spændende, så man har fået noget konkurrence som underviser. Men konkurrence skulle jo være så sundt for samfundet, så det slipper vi nok ikke for.

Den funky opgave

Jeg mindes specifikt en opgave, jeg regnede i mekanik på universitetet [1]. Den handlede om en mand, som hoppede ned fra 2 meters højde og landede med strakte ben – man skulle finde ud af, hvad der ville ske med mandens ben. Løsningen var, at mandens ben ikke havde det så godt efterfølgende. Kraftpåvirkningen oversteg knoglernes yield-styrke. Man kunne have stillet denne opgave på 100 andre måder, men dét at en mand hopper ned fra en stige og lander på strakte ben, er så himmelråbende dumt, at jeg sad og smågrinede, mens jeg løste den. Lad mig lige stille opgaven igen: "En stålwire har en diameter på 7 millimeter, stål har

en yield strength på XX GPa. Bestem den maksimale kraft, wiren kan påvirkes af..." Gab! Samme opgave, samme matematik, kun konteksten er forskellig – men det mentale billede af et fald, som brækker sine ben, fordi han opfører sig umanerligt dumt, mangler i den sidste.

Dette er noget, som jeg meget bevidst arbejder med i undervisningen. Lad mig med det samme slå fast, at jeg ikke er en slags magisk lærer, som har flere klokketimer pr. døgn end andre, så nej, jeg laver ikke alle mine opgaver selv, og er afhængig af opgaver i lærebøger ligesom alle andre. Men jeg spæder til med *funky* opgaver så meget, som det kan lade sig gøre.

Definition. Ved en *funky* opgave forstås en opgave, som er beregnet på, at læseren af opgaven tænker: "hvad sker der lige for opgavestilleren – det er mystisk/bizart/dumt, det her"

Et eksempel på en *funky* opgave kunne være:

Farmer Jørgen har flamingoer og pandaer. Han slagter 15 dyr i alt, og kan stolt overrække lensgreven 46 dyrefødder. Hvor mange slagtede han af hver?

Hvorfor dølen skulle man slagte pandaer for at tage deres fødder? Jeg ved det ikke, men det kræver i hvert fald, at man løser to ligninger med to ubekendte.

En anden *funky* opgavetype, som mine elever ofte stifter bekendtskab med, er af typen "orker og smølfer". Typisk er smølfebyen under angreb af orker, som vil spise dem. Opgavetypen virker godt, når det drejer sig om vækst af den ene eller den anden art og vækstrater (differentialregning). Smølferne kan også bruges til lidt statistisk test:

Når smølfer formerer sig, er chancen for, at det bliver en pigesmølfe kun 1%. I en smølfeby med 1000 indbyggere er der 20 pigesmølfer. Undersøg på 5% signifikansniveau, om nogle af pigesmølferne må antages at være transseksuelle drengesmølfer.

Fysikopgaver og størrelsesordner

I fysikundervisningen overraskes man til stadighed af nogle elevers totale mangel på talforståelse. Jeg stillede engang en opgave, som omhandlede opvarmningen af en sø. Den var halvkugleformet og havde en diameter på nogle kilometer, så den var til at regne på (der findes faktisk en sådan sø – man skal bare gå uendeligt langt

ligeud for at komme til den). Man skulle først beregne vandets volumen, og jeg fik svar, der gik fra et par liter til mange hundrede kubikkilometer. Mange elever kan ikke give deres resultat et reality-tjek for at se, om de er i den rigtige *ballpark*, men stoler blindt på computerens udregning. For at imødegå dette, udsættes mine elever jævnligt for opgaver, hvor de undervejs skal gøre sig mange antagelser for at løse opgaven. Her er fysikken ikke nødvendigvis central, men størrelsesordnerne er.

Jeg har fanget mig en myg

*“Jeg har fanget mig en myg, smeltet fedtet af den
Tønden den er stor og tyk, fyldt med fedtet fra den”*

Sådan lyder en gammelt børnesang. Opgaven går ud på at vurdere:

- a) Hvor mange myg skal der bruges for at fylde en tønde med myggefedt, og
- b) Hvor meget energi skal der bruges for at smelte dette fedt af myggene

Svaret på opgave a) er i omegnen af 200 mio myg. Når eleverne første gang møder denne opgavetype, er de meget usikre – de har aldrig prøvet denne disciplin før. At skulle lave en masse antagelser, som er velbegrundede, og regne uden et rigtigt facit til sidst. Det er som at være helt uden sikkerhedsnet, og de første gange er det frygteligt frustrerende for eleverne. Men det er også en overraskelse for dem, når alle svarene rammer de ca. 200 mio. myg indenfor en faktor 10, hvis ellers antagelserne er rimelige. Mange af denne type opgaver handler om superskurke, som vil bygge dommedagsvåben. Når eleverne har vænnet sig til opgaverne og måden at tænke på, så sker det jævnligt, at man oplever spill-overs til de mere almindelige opgaver: til en terminsprøve havde en elev lavet en fejl, så svaret blev alt for lille. Eleven kunne ikke finde fejlen, men kommenterede sit svar med, at det var forkert størrelsesorden, så der var en fejl i opgaven, som vedkommende ikke kunne finde. Det er god fysik!

Eksempler med elever

“En doven elev ...” er en vending, som oftest starter opgaverne. Det er en glimrende måde at fange interessen på, hvis eksemplet eller opgaven handler om eleverne selv. Ikke navngivne, naturligvis, men blot en elev. Justér selv, så det er *“en træls 3.g’er”* eller *“en lille 1.g’er”* til henholdsvis 1. og 3.g’ere – konceptet er, at konteksten bliver relevant for eleven. Også selvom fortsættelsen bliver bizar i stil med *“... står på taget af gymnasiet. Han skammer sig over den elendige fysikaflevering, han fik lavet, og vil kaste sig selv i døden. Taget er 13 meter højt – hvor hurtigt rammer den dovne elev jorden? Vurdér hvad accelerationen bliver i kollisionen med jorden”*. Opgaven er straks mere fængende, end hvis *“et legeme”* falder frit. Man kan naturligvis også bruge mere jordnære eksempler som f.eks. en elev, der vil spare op til den sygeste øse, og er nødt til at bruge renteformlen for at finde ud af antal terminer.

Er der ikke problemer med saglighed og anstændighed?

Når man laver opgaver og eksempler, som involverer mærkelige tankeeksperimenter og elever, som kommer til skade, kan man godt overveje, om man overskrider nogle grænser i processen. Jeg oplever normalt ikke problemer desangående. Eleverne er jo næsten voksne, og de har ikke problemer med at skelne mellem, hvad der er sjov, og hvad der er alvor. Men det er klart, at der er nogle ting, man ikke skal joke med – det er jo ikke anderledes end i almindelig kommunikation mellem mennesker.

Mht. om fagligheden bliver udvandet, så er kernen jo hele tiden den samme fysik eller matematik. Som eksemplet fra min egen mekanikundervisning, er det kun konteksten der er skiftet. Men det er selvfølgelig vigtigt at man også regner “normale” opgaver, så det hele ikke bliver sjov – der skal stadig være styr på elektrons bane i magnetfelter. Så selvom massespektrometre måske ikke er så sjove at regne på som railguns og deflektorskjolde, så er de traditionelle eksempler stadig vigtige – ikke mindst fordi skriftlige eksamensopgaver aldrig er funky.

Forsøg med anderledes vinkler

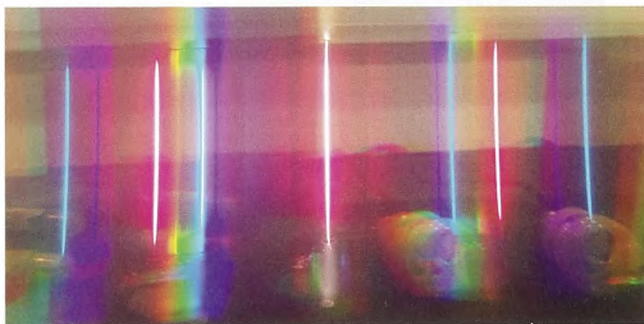
Tankegangen kan også bruges i forbindelse med fysikforsøg. Der findes uendeligt mange standardforsøg, som vi fysiklærere udsætter vores stakkels elever for. Nogle af dem er vanskelige at gøre noget ved, men mange af dem kan vinkles, så de bliver sjovere. Det er MEGET kedeligt at varme vand, når man skal have varmelære; men hvis man brænder ting af for at varme vandet er det sjovere – ild er altid sjovt.

Et standardforsøg, man laver, er måling af terminalhastigheden med muffinforme. Forsøget bruges til at undersøge, om luftmodstanden afhænger kvadratisk af farten. Dette forsøg er jo fint nok, men hvis man udbygger det med den præmis, at man skal bruge muffinforme-forsøget til at designe en faldskærm, som gør, at en Barbiedukke lander sikkert efter et fald, så er der straks lidt mere på spil. Forsøget afsluttes naturligvis med, at grupperne kaster Barbiedukker+ faldskærme ud. Dem, der har regnet rigtigt, kan glæde sig over, at Barbie overlever, mens de grupper, som har misset en pointe undervejs, enten får designet en faldskærm, som er meget overdimensioneret (én gruppe kom frem til et areal på 5 kvadratmeter, hvilket er en del for meget og ret upraktisk at klippe ud af plastfolie), eller også lider Barbie en lidet ærefuld død mod aulaens hårde linoleum, når skærmen er for lille. Elevernes mobiltelfoner bliver brugt flittigt til at dokumentere Barbies dødsforagtende stunts! Se figur 1.



Figur 1: Forsøg med Barbie i faldskærm.

Legomænd er en anden rekvisit, som er populær i forsøg – det giver noget, at en lille person er involveret i fysikken. Legomænd, kollisioner og et højhastighedskamera er en glimrende kombination. Sådanne forsøg passer naturligvis bedst i mekanik. Det er sværere at lave forsøg med brints linjespektrum og Barbie. Jeg har i hvert fald ikke umiddelbart en idé til den vinkel – men man kan umiddelbart tage billeder af et udladningsrør med mobilen, idet man holder et gitter op foran telefonens kamera – se figur 2. Man kan kombinere det med en tavlelineal i samme afstand som udladningsrøret, så kan man direkte regne sig frem til bølgelængden af linjerne.



Figur 2: Billede af et brintudladningsrør taget gennem et gitter med en telefon. Man kan tydeligt se de tre synlige linjer i 1. orden. En kvantitativ undersøgelse kunne laves, hvis man havde en lineal med i billedet.

Didaktik, pædagogik og andre svære ord

Som gymnasielærer skal man igennem det, der kaldes pædagogikum. Det er en kort efteruddannelse, hvor man introduceres til pædagogiske teoretikere og følges med erfarne undervisere for at lære nogle forretningsfif.

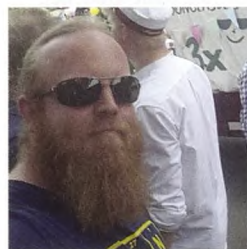
Som naturvidenskabelig var det teoretiske pædagogikum noget af en mundfuld og sagt i al fortrolighed, synes jeg ikke, at det var ret nyttigt for mit vedkommende. Det var derimod tankegangen om at en lærer bør være en "reflekterende praktiker". Det er faktisk det, man er uddannet til som naturvidenskabelig kandidat: Gør noget, se om det virker – ellers gør noget andet.

Det betyder også, at min måde at arbejde på ikke er funderet i nogen speciel pædagogisk teori eller fremgangsmåde. Den er meget betinget af, hvem jeg er som person, og hvad der opleves at klikke med eleverne. Derfor vil jeg heller ikke på nogen måde hævde, at min måde at undervise på er særlig unik, eller at den er et eksempel til efterfølgelse. Der er med sikkerhed masser af andre undervisere derude, på alle niveauer, som fanger elevernes interesse med alle mulige tricks, som de har opdaget, virker. Jeg tror dog (og det er nok i pædagogisk kontekst – synsninger er helt fine hér), at det med at skifte konteksten er en glimrende måde at skabe noget interesse omkring et givent emne. Tilsæt dernæst en portion humor – og det gør ikke noget, at den er sort eller Python'sk. Men frem for alt tror jeg, at hemmeligheden er den faglige begejstring. Jeg lykkes (til tider) som formidler af fysik, og endda nogle gange som formidler af matematik, fordi jeg synes, fysik er fedt. Jeg morer mig, når jeg finder på et skævt eksempel, og når et bungeejump med en Barbiedukke går godt (eller galt). Kombinationen af faglig begejstring og skæve ting og sager lader til at være populært blandt målgruppen.

Men hvad så med de elever, der er ligeglade? Jeg tror bestemt at alle undervisere kender den hårde kerne, som køber præmissen med, at naturvidenskab er kedeligt og sidder med krydsede arme og gør netop det: keder sig. De er ikke nemme at nå, uanset hvor mange orker og smølfer, der spiser hinanden. Det korte svar er: "Jeg ved det ikke" – hvis en læser har løsningen, må de meget gerne offentliggøre den i næste nummer af KVANT. Men bare fordi nogle få vælger at være bænkevarmere, så skal det jo ikke stoppe resten i at have en fest.

Referencer

1. D. Kleppner, R. Kolenkow, *An introduction to mechanics* (McGraw-Hill, 1978), s. 132–133.



Martin Frøhling Jensen er cand.scient i fysik fra Århus Universitet, og ph.d. (teknisk fysik) fra DTU. Efter en årrække med industriel F&U indenfor kortpulset laserbearbejdning, er han nu lektor i matematik og fysik på Næstved Gymnasium & HF. Han modtog i november 2016 H.C. Ørstedes medaljen af bronze for naturvidenskabsformidling i gymnasiet.

Sådan fornyede vi det største teleskop i Danmark

Af Michael L. Nielsen, Brorfelde Observatorium

Denne artikel vil fortælle, hvordan det største professionelle teleskop i Danmark, Schmidt-teleskopet ved Brorfelde Observatorium, er blevet fornyet. Teleskopet er dermed klar til at spille en markant rolle i den fremtidige formidling af astronomi til gæster og skoler. I processen har teleskopet blandt andet fået et nyt kamera, køle- og styresystem, takket være donationer fra Lundbeckfonden, Fonden Dr. N.P. Wieth-Knudsens Observatorium og LAG.

Brorfelde Observatorium ligger på en bakketop 10 km syd for Holbæk. Observatoriet spillede en væsentlig rolle i dansk og international astronomi frem til 1996, hvor observatoriet flyttede til København. I 2016 – 20 år efter – genåbnede Holbæk Kommune observatoriet som opdagelsescenter for den brede befolkning med fokus på astronomi, geologi, teknik og natur.

Brorfelde Observatoriums stolthed, Schmidt-teleskopet fra 1965, led af mange års manglede vedligehold og blev yderligere i 2012 ramt af et lynnedslag, som bragte det ud af funktion. Ved hjælp af donationer af offentlige og private midler har Danmarks største teleskop fået et nyt kamera, køle- og styresystem. Schmidt-teleskopet er derfor igen fuldt funktionsdygtigt og vil spille en markant rolle i observatoriets fremtidige formidling af astronomi til skoler og gæster.

Denne artikel vil give et indblik i processen bag den omfattende fornyelse af Schmidt-teleskopet.



Figur 1: Leder af Brorfelde Observatorium, Julie Bouchet, ved Schmidt-teleskopet.

Trin 1: Nyt styresystem

Frem til 2016 kunne teleskop og kuppel ikke længere bevæges. En EU-bevilling kunne lige klare økonomien, men det krævedes, at resultatets kvalitet kunne garanteres indenfor en knap tidsfrist. Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet havde imidlertid meget gode erfaringer med det professionelle tjekkiske firma ProjectSoft, som tidligere har moderniseret en lang række teleskoper, bl.a. det danske 1,5-m teleskop ved

ESO i Chile. Kvaliteten er i top, tingene leveres til den aftalte tid, og prisen er yderst konkurrencedygtig – lige, hvad vi kunne ønske os. ProjectSoft fik derfor tildelt opgaven og leverede i april 2016 et helt nyt styresystem, inkl. autoguider med tilhørende CCD-kamera og automatisk kontrol af kuplens position. Løsningen er baseret på gennemprøvede standard-komponenter i industri-kvalitet og har derfor forventeligt en lang levetid. Teleskopet stod således klar til næste kapitel i processen, fornyelsen af CCD-kameraet med en moderne model med stort felt. Men først skulle spejlet have ny belægning.



Figur 2: Knud Seifert til venstre og Karl Augustesen til højre. Foto: FOTO-GEN - Steen Larsen.

Trin 2: Spejlet tages ud

Processen blev indledt med udtagning af det 77 cm store hovedspejl i slutningen af september 2016. Til dette arbejde var vi så heldige at kunne trække på et par af observatoriets gamle medarbejdere: Finmekaniker Knud Seifert byggede selv det meste af det oprindelige teleskop, og teknisk assistent Karl Augustesen anvendte og passede det gennem mange år. Under hele processen fik vi samtidig teknisk assistance fra astronom og tidligere institutleder for Brorfelde Observatorium, Johannes Andersen.

Udtagning af spejlet kræver nøje dokumentation af processen og hver en kontravægt, skrue og bolt. Det var samtidig også helt afgørende, at vi havde det oprindelige udstyr til rådighed for udtagning af spejlet. Herunder ses et billede af teleskopets fatning, der hviler på en særlig transportvogn.

Processen er omstændelig og tager omkring en arbejdsdag, idet hele teleskopet skal tøjres forsvarligt og næsten skilles helt ad. Fatningen og dens utallige smådele og spejlet vejer tilsammen 640 kg, og den vægt

bliver i billedet fordelt på et oppumpet bildæk med påmonteret aluminiumsplade. Ved at sænke dækkets tryk kunne fatning og spejl således føres ud under teleskopets tubus – den cylinder-formede del af teleskopet, der blev stillet i zenit.

Trin 3: Spejlet får ny belægning i Hamborg

Efter de mange år var det nødvendigt at forny laget af aluminium på spejlets overflade. Det nærmeste sted, der kunne foretage denne operation var ved Hamborg Observatorium i Tyskland.

Først fjernes den gamle belægning via en speciel base, og rengøres forsigtigt i et renrums miljø. Dernæst indsættes spejlet i et vakuumkammer. Luften pumpes ud af kammeret til der opnås et tryk på omkring 7×10^{-8} bar. En række aluminiumsspiraler opvarmes elektrisk til 2500° Celsius indeni kammeret, og et nyt lag aluminium dampes på overfladen. Det endelige lag aluminium er blot 50-100 nanometer tykt – omkring en tusindedel tykkelsen af et menneskehår.

Hele processen tog omkring 14 dage. I mellemtiden blev selve kuplen total-rengjort af et specialfirma, der har erfaring med rengøring af laboratorier. Det skete for at undgå for mange støvpartikler når spejlet kom tilbage. Herunder ses det tilbageleverede spejl. Knud Seifert har en særlig dragt, handsker og maske på for at undgå partikler og fedt på spejlet.



Figur 3: Knud Seifert indsætter centerfatningen efter, at spejlet er blevet re-aluminiseret. Foto: Michael Lindholm Nielsen

Trin 4: Fra fotografiske plader til CCD-kamera

Det særlige ved denne type teleskop er, at hovedspejl og fokus er sfæriske med fælles krumningscentrum, og fokus sidder midt i teleskopet. Derfor sidder der en asfærisk korrektionslinse i toppen af teleskopet. Selve teleskopets brændvidde er på blot 150 cm, og optikken bevirker, at fokalfladen er konkav. Hvis man ikke korrigere for dette, vil en stor del af feltet være ude af fokus. I det gamle fotografiske kamera kunne man krumme glaspladen i en særlig pladeholder, men det kan man ikke med et moderne CCD (Charged Coupled Device)-kamera, der kræver et plant fokus.

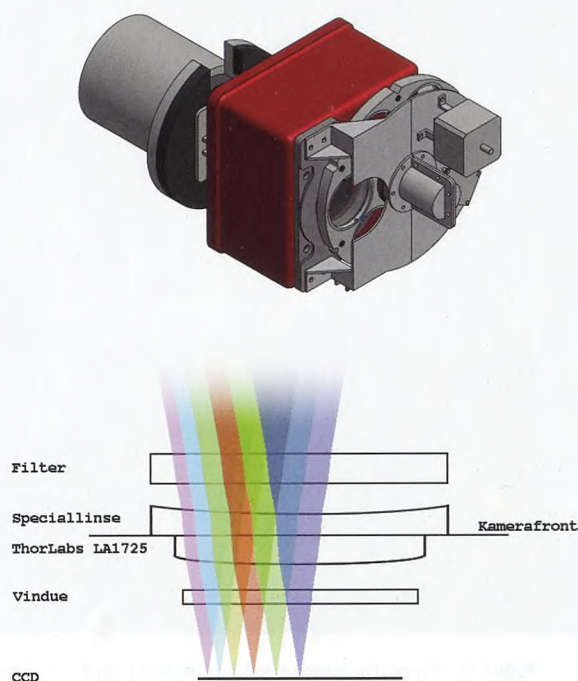
Under processen fik vi derfor assistance fra astronom Michael I. Andersen, der til dagligt designer optik til satellitmissioner for ESA og NASA. Til dette projekt behøvedes derimod en såkaldt field-flattener linse, der

sørger for, at lyset kommer i fokus på hele CCD'en.

Det oprindelige felt var på omkring 5 grader, så man kunne observere en stor del af himlen. Det udnyttede man blandt andet til at søge efter asteroider i 1980'erne. Formålet med det fornyede teleskop er imidlertid, at det skal bruges i vores formidlings- og skoletjeneste. Derfor valgte vi et 16-Megapixel SBIG STXL-16200 kamera, så vi kan tage højopløselige billeder af eksempelvis galakser. Samtidig opnås et felt på omkring 1 grad af himlen – hvilket omtrent svarer til spidsen af din pegefingers bredde i strakt arm.

Hjertet i kameraet er CCD'en, der er følsom overfor både visuelt og nær-infrarødt lys. Selve CCD'en består af et halvledermateriale, der i sig selv afgiver varme, når kameraet er tændt, og kan dermed bidrage til støj i de resulterende billeder. Derfor sørger et nyt kølesystem for at køle CCD'en ned til -30° Celsius, hvilket afhjælper problemet med termisk støj.

Herunder ses en teknisk tegning over det nye kamera, samt et strålediagram, der viser lysets passage igennem den dobbelte field-flattener linsen.



Figur 4: Øverst en 3D tegning af kamera (rød boks). Foran kameraet ses linse, og filterhjul designet af ingeniørvirksomheden ProjectSoft. Nederst et strålediagram af Michael I. Andersen. I diagrammet kommer lyset ind fra højre side, passerer igennem et filter, samt to linser, der tilsammen udgør field-flattener linsen, lyset forsætter igennem et vindue og fokuseres på CCD'en.

Hvordan får vi så farver på billedet?

Det nye kamera er monokromt, hvilket vil sige, at det som udgangspunkt ikke registrerer lysets farve. Valget er bevidst, idet vi også ønsker at kunne bruge kameraet til at foretage egentlige eksperimentelle målinger, i forbindelse med skolebesøg. For at kunne gøre det, så kræver det nøje kendskab til antallet af fotoner (lyspartikler), samt lysets bølgelængde.



Figur 5: Øverst fra venstre mod højre M81 og M82 taget i B (blå), V (grøn) og h-alfa (rød). Nederst ses det resulterende billede. Farven rød afslører en stor mængde af brint i begge galakser.

Denne information kan man få med et monokromt kamera, sammen med et påmonteret filterhjul og filtre, der sorterer fotonerne, efter deres bølgelængde. I det nye system har vi følgende fire bredbåndsfiltre installeret – B, V, R, I, der dækker hele det visuelle og nærinfrarøde område. Derudover får vi også et enkelt smalbåndsfiltre, der dækker 3 nanometer omkring h-alfa linjen.

For at kunne rekonstruere billedet i rigtige eller kunstige farver, er det derfor nødvendigt at tage en række billeder vha. flere forskellige filtre, og via billedbehandlingssoftware, kombinere de enkelte billeder til ét farvebillede. Man skal derfor påregne en del tid til efterbehandling af det færdige billede. Et eksempel herpå er vist i nedenstående figur. Herunder ser man et

af de første billeder taget med det fornyede Schmidt-teleskop.



Michael L. Nielsen er astrofysiker ved Brorfelde Observatorium. Han er uddannet cand. scient. i astronomi ved Aarhus Universitet med speciale i karakterisering af exoplaneter. Han har efterfølgende arbejdet med formidling, blandt andet for Den Europæiske Rumfartsorganisation – ESA.

Detaljer om det oprindelige Schmidt-teleskops opbygning findes i P. Bechmann: "Brorfelde Observatoriets Schmidt teleskop", Nordisk Astronomisk Tidsskrift, 1967, side 85-95.

Ionisering af store molekyler

Af Klavs Hansen, Göteborgs Universitet og Tianjin University, og Vitali Zhaunerchyk, Göteborgs Universitet

Ionisering er en fundamental proces i naturen. Overraskende nok dukker der stadig nye versioner af processen op. Denne artikel beskriver den sidste nye, som blev præsenteret for verden i begyndelsen af 2017.

Fotoionisation kan foregå via en antal mekanismer, nogle mere kendte end andre. Enhver fysikstudent har hørt om den fotoelektriske effekt som gav Einstein Nobelprisen [1]. Den fotoelektriske effekt gav, foruden det revolutionerende postulat om lysets kvantisering, også fremtidige forskere et spektroskopisk redskab af ekstrem vigtighed. Ud over at etablere en tærskelov for elektronudsendelse ved bestråling, giver postulatet om fotonen nemlig også mulighed for at studere de elektroner der udsendes med højere tærskler ved at benytte ligningen for elektronens kinetiske energi

$$E_k = h\nu - E_b, \quad (1)$$

hvor man – lidt overraskende – simpelt hen kan fortolke E_b som energien af den enkeltpartikeltilstand, elektronen kommer fra. Ved at optage spektra af kinetiske energier får man et meget hurtigt billede af atomets, molekylets eller nanopartiklens energiniveauer.

En anden type ionisering kan observeres, hvis man eksiterer molekyler og partikler, uden at det giver anledning til direkte ionisering. Så bliver energien deponeret i systemet som varme, dvs. en samling kaotiske eksitationer, mestendels vibrationelle. Hvis energien er tilstrækkelig høj, kan atomer eller små molekyler koge af, og hvis aktiveringsenergien for den type henfald er tilstrækkelig høj, kan alternative processer konkurrere, både varmestråling og termisk emission af elektroner. Elektronemissionen er småpartikelanalogen til det makroskopiske fænomen termionisk emission.

Imellem disse to ekstreme typer ionisering, direkte processer og termisk emission, fandt man så i begyndelsen af årtusindet endnu en ionisationsproces. Startskuddet var en simpel kalibreringsøvelse. Fullerenene, de berømte fodboldformede kulmolekyler, var allerede på det tidspunkt så velkendte og så lette at håndtere, at de i udstrakt grad blev anvendt som test- og kalibreringsmolekyler for nye metoder og apparater. Det var hvad Hotop og hans kolleger gjorde i Kaiserslautern med et apparat, der skulle anvendes til at studere Penningionisation af molekyler. Som targetmolekyler valgte de C_{60} og C_{70} og som projektiler en række ædelgasatomer eksiterede til den metastabile tilstand med lang levetid, der findes i disse molekyler. Energiene af disse tilstande er fra 8 til 20 eV, og de har levetider, der måles i sekunder. Denne kombination af levetid og energi er meget usædvanlig for atomer og bevirker, at disse metastabilt eksiterede atomer fungerer som bærere af en meget veldefineret og meget høj energi, som de kan overføre til andre atomer eller molekyler i kollisioner, og bevirke, at det ramte molekyle ioniseres.

Det viste sig at ioniseringssandsynligheden steg med energien af den metastabile tilstand, nærmest eksponentielt, og endte med omkring 20% for helium [2]. Desuden fandt man meget overraskende ingen fragmenter i processen. Der er tilstrækkelig energi i de 20 eV til både at ionisere og fjerne i det mindste et enkelt C_2 molekyle fra fullerenen. Men kun ionisationen fandt altså sted. Der var lidt for meget systematik i de data til at man kunne, eller skulle, finde på en forklaring for hver enkelt ædelgasmoketyle. Ser man samme effekt med fem forskellige atomer, er en enkelt forklaring bedre end fem.

Forklaringen blev givet med en termisk proces af en speciel type, hvor kun var elektronerne var varme og kogte af. Ædelgasatomerne bærer elektroniske eksitationer hen til fullerenen og overfører energien til denne. Der er ikke noget niveau i ædelgasatomerne mellem den metastabile tilstand og grundtilstanden, så al energien bliver afleveret. Og den må vel meget naturligt afleveres til elektronerne i fullerenmolekylet. Som andre bundne elektroner har de en fart på typisk et par promille af lyshastigheden, hvilket gør, at de bevæger sig frem og tilbage i molekylet på en lille brøkdel af et femtosekund ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Det skal sammenlignes med de molekylære vibrationer, som har perioder på dusinvis eller sågar hundredevis af femtosekunder. Der er derfor tid nok til at elektronerne kan nå at leve deres eget liv før atomkernerne bliver sat i sving. Der er også tid nok til at kolliderer indbyrdes og skabe en gas af elektroner der bedst kan karakteriseres som varm. Meget varm faktisk. Med den forsimplede antagelse, at C_{60} er en beholder for en elektrongas kan man vurdere, at den effektive temperatur efter absorption af 20 eV er af størrelsesordenen 1 eV, eller 10^4 K . Til sammenligning vil 20 eV varme C_{60} op med mindre end 1400 K, hvis energien bliver fordelt jævnt.

Disse tal forklarer både ioniseringseffektiviteten og fraværet af fragmenter i Penningioniseringen. Med støtte i beregninger af den kvantemekaniske niveaustuktur for molekylet kan man finde en elektronudsendelseskonstant som funktion af dets eksitationsenergi. Med det eksperimentelt observerede, energiahængige ioniseringsudbytte kan man så bestemme denne koblingstid. Et fit af data gav 240 fs, d.v.s. af samme størrelsesordenen som vibrationsperioderne i molekylet.

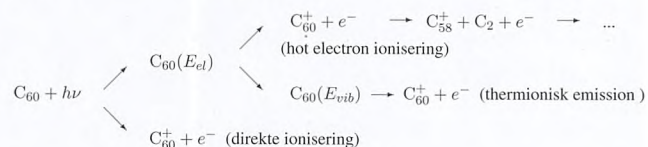
De foreløbige resultater var overbevisende nok til at overtale kolleger med kortpuls-lasere på Max Born Institutet i Berlin til at gennemføre et eksperiment hvor vi beskød C_{60} med korte pulser (35-2000 fs) af fotoner med energier på 1.6 eV. Den fotonenergi er meget mindre end ioniseringsenergien for molekylet på 7.6 eV

og forventes at være perfekte til at generere de varme elektroner. Forventningerne blev opfyldte, og der var oven i købet en bonus i form af et smukt og uventet ATI (Above Threshold Ionization) spektrum hvor fotonenergiene manifesterede sig som ækvidistante toppe i elektronspektret [3]. Hovedsagen var dog de kinetiske energispektre, som ved ikke alt for korte laserpulser gang på gang viste en eksponentiel opførsel med karakteristiske energier omkring 1 eV, d.v.s. ganske som forventet for emission af elektroner fra et system med temperatur af størrelsesordenen 10^4 K [4].

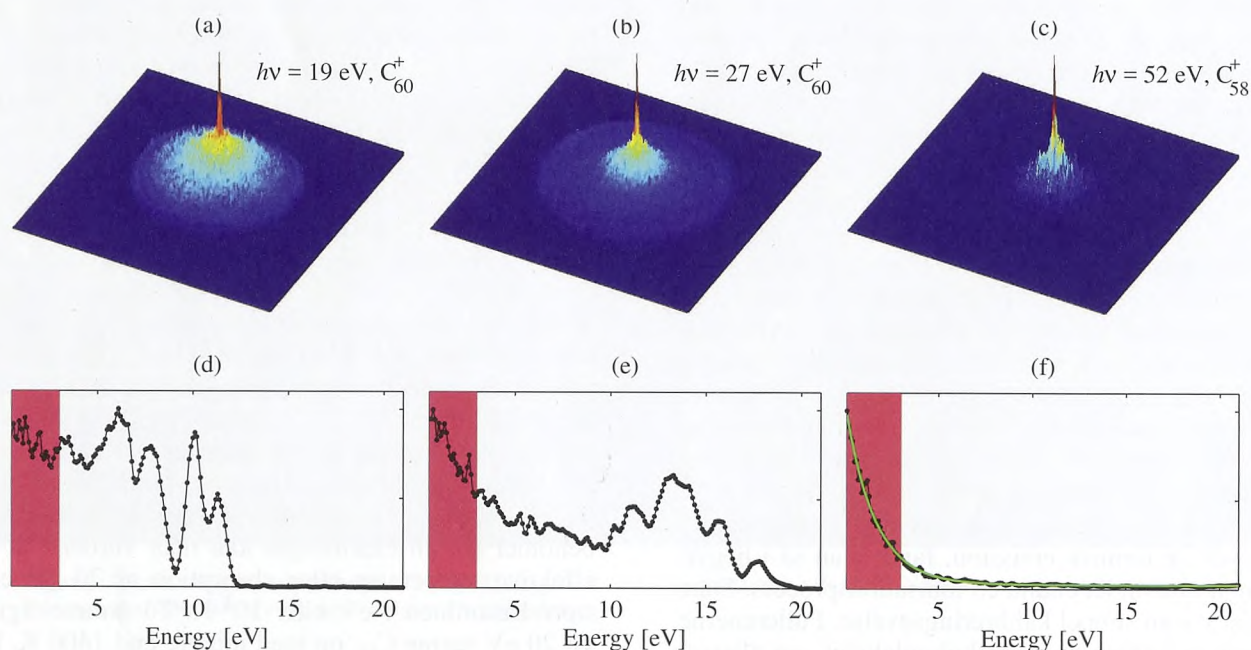
Hvorom processen utvivlsomt er til stede og velforstået, kan man med rette indvende, at hele situationen er lidt kunstig. Den kræver, at en større håndfuld nær-infrarøde fotoner inden for en brøkdel af et picosekund bliver absorberet af et molekyle. Et nærliggende spørgsmål er, om man kan se samme proces uden en halv million kroners optik bag en endnu dyrere laser, ved absorption af blot en enkelt foton med tilstrækkelig energi.

Og ja, det kan man, hvis man tyr til et apparatur, der er tre størrelsesordener dyrere end laseren, nemlig en synkrotronring, der leverer fotonerne, og en kilde

med C_{60} . Hvad man leder efter, er elektroner, der *ikke* opfører sig ifølge ligning 1. Nogle vil uværgeligt gøre det, så reaktionsskemaet bliver ikke helt simpelt:



hvor E_{el} og E_{vib} angiver, at eksitationsenergien fortrinsvis er elektronisk og vibrationel. Der er tre processer der producerer elektroner i dette skema. Processen, vi betragter, er reaktionen langs den øverste kant af skemaet. De tre ioniseringsprocesser identificeres ved hjælp af elektronernes kinetiske energier. Den direkte ionisering giver toppe, der flytter sig opad med fotonenergien, termionisk ionisering giver termiske spektre, ligesom 'hot electron' ioniseringen, men med meget lavere temperaturer, typisk blot mellem 3000 og 3500 K for fullerenenerne. 'Hot electron' ionisering giver som nævnt spektre med temperaturer på 1 eller 2 eV. Det er i øvrigt grunden til den decideret udanske betegnelse 'hot electron'. 'Varme elektroner' virker ikke helt dækkende for femcifrede elektrontemperaturer.



Figur 1: De tre øverste tredimensionale figurer viser rådata med impulsfordelingerne fra ionisering af C_{60} med de angivne fotonenergier. Den højeste impuls, der kan detekteres med disse indstillinger på detektoren, svarer til knap 30 eV. De to første figurer er optaget i koincidens med C_{60} ioner detekteret med det tilsluttede massespektrometer. Den sidste figur viser impulsfordelingen i koincidens med fragmentproduktet C_{58}^+ . De tre nedste rammer viser energispektrene, der ekstraheres fra rådata. Tendensen til at de lavenergetiske elektroner bliver udsendt i stadig højere grad med en Boltzmannfordeling for stigende fotonenergi ses tydeligt. (Figureerne er baserede på data publiceret i Hansen *m.fl.* [5]).

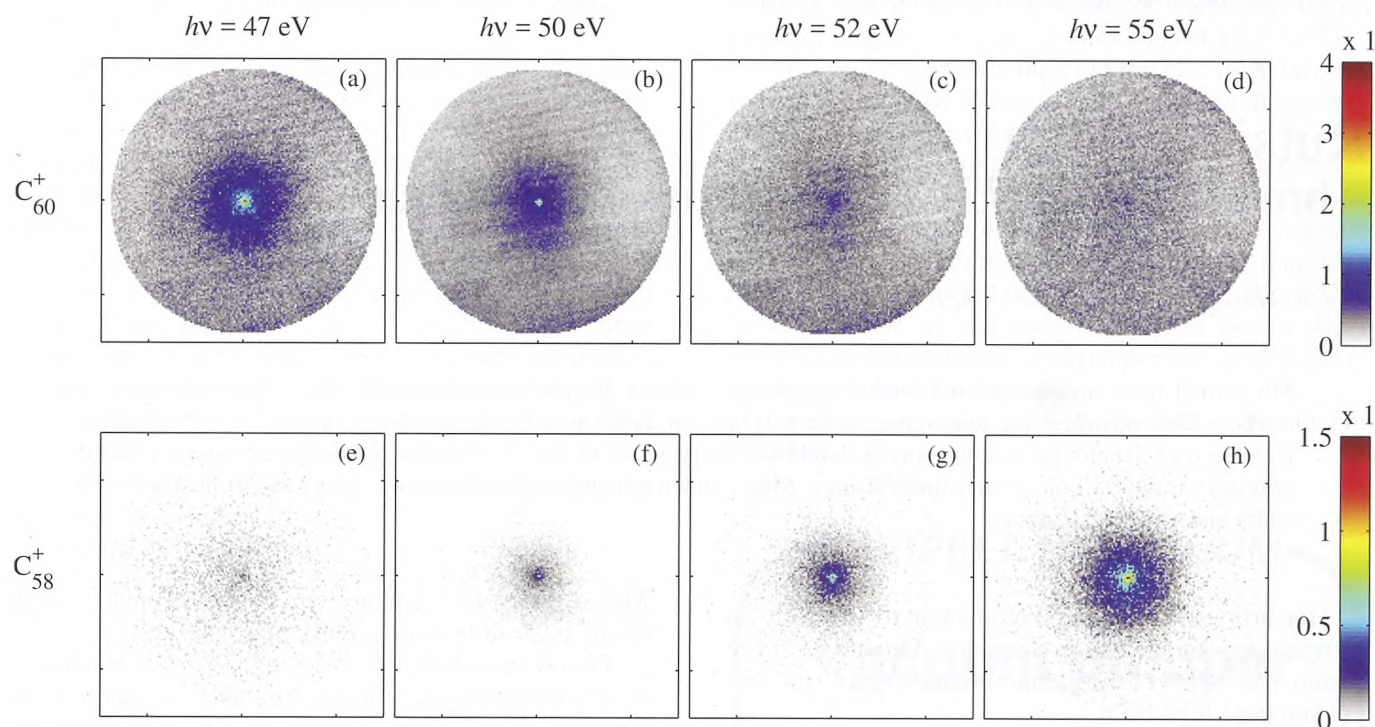
Data fra dette eksperiment ved ringen Elettra ved Trieste er vist i figur 1 og 2 [5]. De er optaget med Velocity Map Imaging (VMI) teknikken, der optager elektronernes impulskomponent parallelt med en positionsfølsom detektor. Billederne man optager er todimensionale, men med polariseret lys tillader symmetrien omkring polarisationsaksen, at man kan rekonstruere hele impulsfordelingen.

VMI-spektrometeret er monteret med ryggen til et flyvetidmassespektrometer, som måler massen af den producerede ion. Alle begivenheder optages individuelt, og elektrontællinger accepteres kun, hvis de kommer i koincidens med en ion af en relevant masse. Denne koindensteknik tillader, at kun de begivenheder, vi er interesserede i, bliver inkluderet i spektrene.

Allerede i de rå data kan man se, at direkte ionise-

ring nok ikke er hele historien, først og fremmest på grund af det store signal ved små energier i centrum af billederne, et signal der bliver relativt stærkere med øget fotonenergi. En robust konklusion kræver dog at spektrene bliver inverterede, så energispektrene ses direkte. Dette er gjort i spektrene under de tre rådataplots. Tendensen til, at elektronspektrene bliver mere og mere lig Boltzmannfordelinger, ses klart. En andet interessant signatur er spektrenes symmetri for laveenergielektronerne, hvor man ser, at intensiteten ikke

afhænger af vinklen omkring spektrometerets akse. Det svarer til kuglesymmetriske impulsfordelinger og er en ikke-triviell observation. Direkte processer kan også give den opførsel, men normalt kun for bestemte fotonenergier og i afgrænsede elektronenergiintervaller. Det afgørende signal for hot electron ioniseringen er den permanente tilstedeværelse af de lavenergetiske elektroner i spektrene med den kuglesymmetriske impulsfordeling, uanset hvilken fotonenergi, vi beskyder med, over tærsklen på ca. 25 eV.



Figur 2: Rådata for elektroner optaget i koincidens med $C_{60,58}^+$, for høje fotonenergier. Data er af samme type som vist i de øverste tre rammer i figur 1. Opkomsten af C_{58}^+ fragmentproduktet samtidigt med at C_{60}^+ forsvinder ses klart. (Figureerne er baserede på data publiceret i Hansen *m.fl.* [5]).

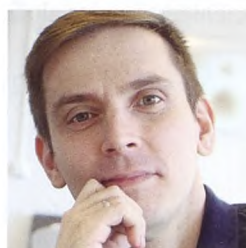
Fotonenergier over ca. 50 eV giver et specielt rent signal for hot electrons. Udsendelse af en elektron med en energi på et par eV giver sammen med ioniseringsenergien af C_{60} på 7.6 eV en restenergi i ionen på mere end 40 eV. Denne energi dissiperes altså i vibrationerne på mindre end et picosekund. Tiden, det tager at accelerere ionen i flyvetidsmassespektrometret, er meget længere og tilstrækkelig til, at ionerne kan reagere videre, denne gang i en mere sædvanlig reaktion af den type kemikerne kalder unimolekylær, d.v.s. fordampning af et fragment. Fragmentet er altid et neutralt C_2 for fullerener af denne størrelse og ladnings-tilstand, og ved at analysere koincidensen med ioner af typen C_{58}^+ og C_{56}^+ ser man et elektronenergispektrum som er næsten frit for baggrundstællinger, hvilket letter analysen betragteligt. Overkrydsningen fra koincidens med C_{60}^+ til C_{58}^+ er vist i figur 2.

Disse resultater er alle opnået med C_{60} . Der er ikke megen tvivl om, at fænomenet også er til stede i andre molekyler og i klynger. Specielt er metalklynger med deres delokaliserede valenselektroner et godt bud på

andre små systemer, der kan ionisere på den beskrevne måde. Men det er en historie der må fortælles en anden gang.



Klavs Hansen er uddannet ved Niels Bohr Institutet med en PhD grad fra 1991. Han er nu professor ved universitetet i Tianjin, Kina, og forsker i termiske og kvantemekaniske effekter i partikler af endelige størrelser.



Vitali Zhaunerchyk er født i Hviderusland, hvor han studerede fysik. Han fik sin PhD fra Stockholms Universitet i 2008 og er nu ansat ved Institutionen för Fysik, Göteborgs universitet hvor han arbejder eksperimentelt med dynamik og strukturer af store molekyler.

Referencer

1. A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* **322**, 891–921 (1905).
2. J. Weber, K. Hansen, M.-W. Ruf, H. Hotop, Penning ionization of C_{60} and C_{70} . *Chemical Physics* **239**, 271–286 (1998).
3. E. Campbell, K. Hansen, K. Hoffmann, G. Korn, M. Tchapyguine, M. Wittmann, I. Hertel, From above threshold ionization to statistical electron emission: the laser pulse-duration dependence of C 60 photoelectron spectra. *Physical Review Letters* **84**, 2128–2131 (2000).
4. K. Hansen, K. Hoffmann, E. Campbell, Thermal electron emission from the hot electronic subsystem of vibrationally cold C 60. *The Journal of Chemical Physics* **119**, 2513–2522 (2003).
5. K. Hansen, R. Richter, M. Alagia, S. Stranges, L. Schio, P. Salén, V. Yatsyna, R. Feifel, V. Zhaunerchyk, The title of the work. *Physical Review Letters* **118**, 103001–103005 (2017).

Rutsjende dug - breddeopgave 73 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, 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 to nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 73 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 73: Rutsjende dug

Hvornår rutsjer en dug, et tov eller lignende ned af bordet, som dugen m.m. ligger på tværs af med ulige lange nedhæng til to modstående sider? Begrund svaret.

Løsning

Hvis dugen hænger stykket x mere ned til den ene side end til den anden side, er der et ekstra træk i dugen til denne side i forhold til trækket fra den anden side på ρxg , hvor ρ er massen af dugen per længde dug, og g er tyngdefeltstyrken. Så længe dugen ikke rutsjer, modvirkes dette ekstra træk af den statiske gnidningskraft G imellem bordet og dugen, $G \leq \mu N$, hvor μ er den statiske gnidningskoefficient imellem dug og bord, og N er normalreaktionen imellem bord og dug. Da dugen ikke bevæger sig i lodret retning må N være lig med ρbg , hvor b er bredden af bordet. Når ρxg bliver større end $\mu N = \mu \rho bg$, kan gnidningskraften ikke længere holde dugen på plads. Dugen rutsjer altså, når

$$x > \mu b. \quad (2)$$

Kommentar

Opgaven var tænkt brugt som eksamensopgave, idet vi forestillede os opgaven løst mere eller mindre sådan.

Men opgaven blev opgivet som eksamensopgave, fordi denne måde at besvare opgaven på er forkert.

Den afgørende fejl er, at det underforstået er antaget, at strækspændingen i dugen forplantes uændret rundt om kanterne på bordet, svarende til den måde snorkraften for et tov rundt om en trisse forplantes. Men sådan er situationen ikke ved runding med statisk gnidning. Lad os regne på, hvordan snorkraften i et belastet tov varierer, når det er viklet omkring en pæl, i grænsen hvor tovet netop ikke skrider om pælen.

Der regnes differentielt: Snorkraftens størrelse ved vinklen φ kaldes $S(\varphi)$, og størrelsen ved vinklen $\varphi + d\varphi$ tilsvarende $S(\varphi + d\varphi)$. De to snorkræfter, som trækker i tovestykket mellem φ og $\varphi + d\varphi$, er ikke modsatrettede. Langs midtnormalen til tovestykket har de tilsammen en komponent rettet imod pælens midterakse af omtrentlig størrelse $S(\varphi)d\varphi/2 + S(\varphi + d\varphi)d\varphi/2 \approx S(\varphi)d\varphi$, som i ligevægt må være lig med normalreaktionen fra pælen på tovestykket. Vi sætter φ lig 0, hvor snorkraften er størst, og regner φ positiv i den retning, hvor $S(\varphi)$ aftager. Den tangentielle ligevægtsbetingelse i grænsen for maksimalt opnåelig statisk gnidning er da $S(\varphi + d\varphi) - S(\varphi) \approx -\mu S(\varphi)d\varphi$ eller $dS(\varphi)/d\varphi = -\mu S(\varphi)$ med løsningen

$$S(\varphi) = S(0) \exp(-\mu\varphi). \quad (3)$$

(På side 19 i Eivind Hiis Hauge og Jon Andreas Støvneng: Grundlæggende fysik, Tapir Akademisk Forlag, Trondheim 2010, findes en mere udførlig udledning.)

Ligning (3) forklarer, hvorfor en matros ved hjælp af en fortøjningspæl kan holde et krydstogtskib på plads.

Tovet behøver ikke blive viklet særlig mange gange rundt om fortøjningsspælen, før matrosens træk i tovet, $S(\varphi)$, er radikalt mindre end tovet's træk i skibet, $S(0)$. For den rutsjende dug betyder ligning (3), at der ikke kan ses bort fra gnidningen imod bordkanterne, som vi umiddelbart gjorde.

For at løse opgaven må vi analysere fem dele af dugen hver for sig. Vi kalder dugens længde l , bordets bredde b , nedhængt modsat rutsjesiden y , og nedhængt i rutsjesiden $y + x$ og har så:

1. For den del, der hænger ned i rutsjesiden, gælder: tyngden af delen medfører, at "dugkraften" ved bordkanten er $S_1 = \rho g(y + x)$.

2. For delen omkring bordkanten i rutsjesiden gælder ifølge ligning (3): $S_1^* = S_1 \exp(-\mu\pi/2)$, hvor S_1^* er den vandrette "dugkraft", der fra rutsjesiden trækker i den del af dugen, der er på bordet.

3. For den del, der hænger ned modsat rutsjesiden gælder: $S_2 = \rho g y$ for dugkraften ved bordkanten som følge af tyngden af nedhængt.

4. For delen omkring bordkanten modsat rutsjesiden gælder ifølge ligning (3): $S_2^* = S_2 \exp(\mu\pi/2)$, hvor S_2^* er den vandrette dugkraft, der fra ikke-rutsjesiden trækker i den del af dugen, der er på bordet. S_2^* er større end S_2 , fordi de statiske gnidningskræfter er rettet modsat den potentielle rutsjeretning.

5. For delen af dugen på bordet gælder i grænsen for maksimal statisk gnidning: $S_1^* - S_2^* = \mu \rho g b$.

Ved indsætning heri fås: $\rho g(x + y) \exp(-\mu\pi/2) - \rho g y \exp(\mu\pi/2) = \mu \rho g b$. Da $l = y + b + (y + x)$, og derfor $y = (l - b - x)/2$ og $y + x = (l - b + x)/2$, kan x af denne ligning findes til at være:

$$x = \frac{2\mu b + (l - b)(\exp(\mu\pi/2) - \exp(-\mu\pi/2))}{\exp(\mu\pi/2) + \exp(-\mu\pi/2)}, \quad (4)$$

og det er jo et ganske andet svar på opgaven end det givet ved ligning (2). I grænsen $\mu\pi/2 \ll 1$ har vi $x = \mu(b + (l - b)\pi/2)$. Hvis vi samtidig også er i grænsen $l - b \ll b$, når vi frem til ligning (2).

Ved besvarelsen er det benyttet, at grænsen for maksimal statisk gnidning nås samtidigt for delene 2, 4 og 5. Hvis den statiske gnidningskraft lokalt har nået grænsen for sin ydeevne vil, dugen stadig ligge fast, hvis det ikke er tilfældet på andre lokaliteter. Først når der ikke er nogen steder, hvor gnidningskraften ikke har nået maksimal ydeevne, rutsjer dugen.

Alt i alt er opgaven - i modsætning til, hvad vi tænkte i udgangspunktet - for vanskelig til at kunne bruges som breddeopgave til eksamen. I almindelighed kan det være svært at ramme niveauet ved fabrikation af eksamensopgaver. De kan både være for lette og for svære i forhold til den aktuelle eksamen. Med de åbent formulerede breddeopgaver er der en særlig risiko for at ramme et forkert niveau, eller måske direkte ramme forbi med et forkert stillet problem, fordi problemerne

netop ikke, via formalisering, er placeret i et velkendt løsningsterræn. Breddeopgavegenren stiller derfor krav til opgavestillernes faglige overblik. Og krav til deres villighed til at risikere at begå faglige fejl, selvom fejl selvfølgelig forsøges undgået.

Breddeopgave 74 og 75. Usikkerhedsrelationen og Bohr radius

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til disse to opgaver fra breddekurset på RUC (fra den indledende opgavesamling i 1976, nr. 74 i rækken her i KVANT, og fra eksamen august 1983, nr. 75 i rækken her i KVANT):

74. Synes det ræsonnabelt at forestille sig neutronen som opbygget af en elektron og en proton holdt sammen af elektrostatiske kræfter? Begrund svaret.

75. Efter Rutherford's opdagelse af, at atomer ikke er kompakte, men består af tomt rum med en positiv ladet kerne af meget ringe udstrækning og derom kredsende elektroner med endnu mindre udstrækning (må man forestille sig), fremstår det som en gåde, at stof ikke kolliderer ved, at elektronerne trækkes ind til deres kerner, således at atomerne skrumper ind. Hvorfor sker det ikke? Begrund svaret.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

PFEIFFER  **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
 Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
 www.pfeiffer-vacuum.com

Fusionsreaktoren i Viborg

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

Ved htx i Viborg har vi bygget en fusionsreaktor, som et projekt for Science Talent-eleverne. Reaktoren, som er baseret på fusor-princippet, kan fusionere deuterium til helium og tritium. Den skaber et deuterium plasma med meget høj temperatur, ved elektrostatiske acceleration af ionerne. Vi har kunnet måle spektret af røntgenstråling fra plasmaet og neutronstråling fra fusionsprocessen. Reaktoren anvendes nu til fysik undervisning og demonstration af fusionsprocessen.

Indledning

Ved Viborg Tekniske Gymnasium har vi bygget en fusionsreaktor. Den kan skabe et deuterium plasma med en temperatur højere end solens centrums temperatur og demonstrere fusionsprocesser som dem, der foregår i stjerner eller (boostede- og termioniske-)kernefusionsreaktoren. Reaktoren er bygget af komponenter, som for en stor del er fremstillet ved skolens værksteder eller købt på eBay. Dette har gjort det muligt at gennemføre projektet i løbet af et år med en 'Science talent-klasse' og et budget på 70.000 kr.

Reaktoren bruges nu til undervisning i kernefysik og plasmafysik samt demonstrationer for elever fra andre skoler, som her kan opleve en fusionsreaktor i praksis.

Farnsworths Fusor

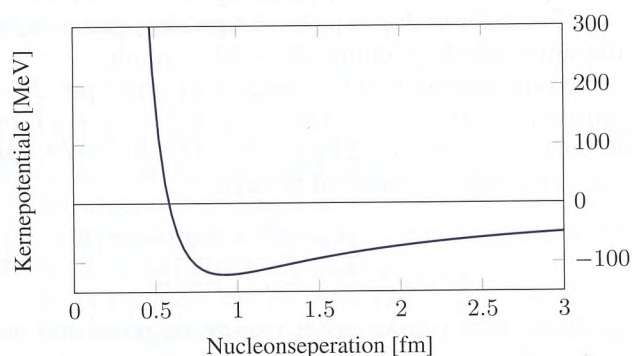
Reaktoren i Viborg er baseret på en videreudvikling af Philo Farnsworths Fusor fra 1959 [1]. Farnsworth, som er kendt som opfinderen af billedrørs-TV'et, konstruerede, mens han var ansat hos ITT, et apparat, som kunne skabe kontrolleret fusion ved elektrostatiske acceleration af deuterium-ioner. I Farnsworths Fusor bruges det elektrostatiske felt også til at indgrænse det varme plasma, så det ikke kommer i kontakt med væggene i vakuumkammeret [2].



Figur 1: Philo Farnsworth med sin Fusor.

Fusionsprocessen

For at forstå, hvorfor der kan frigives energi ved fusion af lette atomkerner, skal vi se lidt på bindingsenergien i en kerne. Protonerne og neutronerne (nukleonerne) i kernen oplever en stærk tiltrækning fra sine naboer på grund af den stærke kernekraft, men denne kraft har en meget kort rækkevidde, typisk nogle få protondiametre. Mens alle nukleoner oplever den stærke kernekraft, oplever protonerne en elektrisk frastødning fra alle andre protoner. Denne frastødning følger Coulombs lov og aftager med kvadratet af afstanden. Det resulterende totale potentiale følt af nukleonerne er vist i figur 2.



Figur 2: Typisk inter-nukleare potentiale.

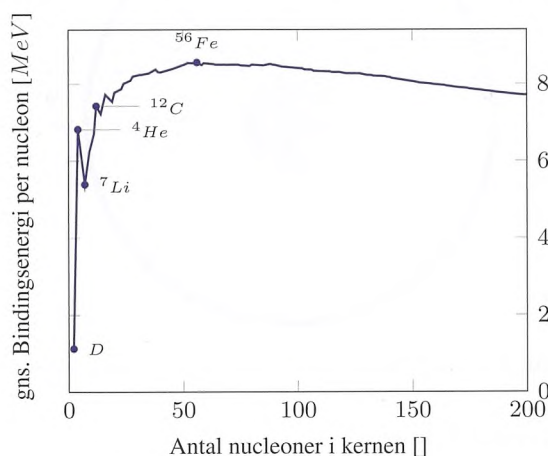
Neutronernes masse er kun en promille større end protonernes masse. En fri neutron kan frigøre energi ved betahenfald, hvor den forvandler sig til en proton plus en elektron og en antineutrino. Tilsvarende kan en proton i en bundet tilstand i en kerne forvandle sig til en neutron ved at "stjæle" en del af bindingsenergien og udsende en antielektron (positron) og en neutrino. Da både protoner og neutroner er fermioner, kan der kun være én i hver tilstand. Dette medfører, at nukleonerne i kernen er stærkest bundet, hvis der er lige mange protoner og neutroner, indtil frastødningen mellem protonerne vinder ved høje atomnumre. Der er derfor flere neutroner end protoner i stabile tunge kerner.

Bindingsenergien per nukleon får derfor bidrag fra tre forskellige mekanismer:

1. Tiltrækning mellem naboer. Her har nukleoner i kernens overflade færre naboer end dem inde i kernen
2. Frastødning mellem protonerne, som øger bindingsenergien, hvis der er langt mellem protonerne

3. Forbuddet mod at have mere end én identisk partikel i hver tilstand, som favoriserer kerner med lige mange protoner og neutroner

Når vi kombinerer disse tre bidrag, får vi kurven for bindingsenergi per nukleon [3], som er vist i figur 3

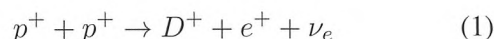


Figur 3: Bindingsenergi per nukleon som funktion af atomnummer.

Jern-56 har den laveste gennemsnitlige masse per nukleon, mens nikkel-62 har den højeste bindingsenergi per nukleon. Mens alle kerner kan splittes, kaldt fission, og kombineres med andre kerner, kaldt fusion, så bliver sådanne reaktioner kun af praktisk relevans når den samlede bindingsenergi af slutttilstanden er lavere end starttilstanden. Disse reaktioner plejer derfor at være fusionering af lette kerner eller fissioneringen af tunge kerner.

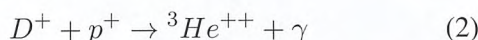
Fusion i solen

Den simplest mulige fusionsproces er fusion af to protoner. På grund af den stærke elektrostatiske frastødning kan der ikke skabes en bundet tilstand af to protoner, men da massedifferencen mellem protoner og neutroner er så lille, vil den ene proton undergå "omvendt" betahenfald og blive til en neutron. Der dannes derfor et deuteron, som er en tung brintkerne. Samtidig udsendes en antielektron (positron) og en elektronneutrino. Reaktionen er:



Dette er første trin i brændstofcyklussen i solen og andre stjerner [4].

Det næste trin i solens cyklus er fusion af deuteronkernen med en proton. Herved dannes en kerne med to protoner og en neutron, som er det lette heliumisotop, helium-3. For at komme af med den overskydende energi fra partiklerne i begyndelsestilstanden, udsendes også en foton:



Efterfølgende kan to helium-3-kerner fusionere til helium-4-kerner og udsender to protoner.



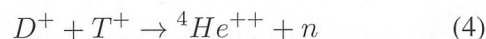
Årsagen til, at der dannes helium-4 og ikke beryllium-6, er, at vi ikke kan bevare både energi og impuls med kun én partikel i slutttilstanden. De to protoner sørger for at "bortskaffe" den overflødige kinetiske energi.

Efterhånden, som der er dannet heliumkerner nok, begynder der at starte kæder af fusion af tungere kerner, for eksempel CNO-cyklussen.

Fusion i brintbomben

På jorden kan vi kun reproducere solens fusionsprocesser i en accelerator, men ikke udnytte den til energiproduktion. Dette skyldes, at for at få gang i første trin, fusion af protoner til deuteroner, kræves ikke bare ekstremt høje temperaturer, men også et ekstremt højt tryk. I solens kerne er temperaturen 25 mill. K og trykket er 26,5 PPa (PetaPascal).

Den fusionsproces, som er mest tilgængelig for menneskeskabt reaktion, er fusion af en deuteron og en tritron (hydrogenisotop med to neutroner). Dette er den proces, der udnyttes i brintbomben:



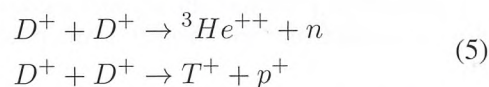
Denne proces kræver også en meget høj temperatur, men sandsynligheden for, at en kollision mellem to kerner giver en fusion, er meget større, da den stærke tiltrækning mellem neutronerne ved korte afstande kan overvinde den elektrostatiske frastødning mellem protonerne.

I termonuklearekerne våben bruges en konventionel atombombe (plutonium implosionsbombe med tritium boosting) til at skabe en intens røntgenstråling, som ved hjælp af hvad Edward Teller kalder "Hydrodynamiske linser", komprimerer brændstoffet til et tryk på flere tusind TPa (TeraPascal). Samtidig sørger neutronstrålingen fra atombomben for at omdanne litium til tritium.

Deuteriumfusion

Da tritium er dyrt (produceres kun i atomreaktorer/partikelacceleratorer og naturligt i troposfæren og stratosfæren når, kosmisk stråling interagerer med f.eks. nitrogen i atmosfæren) og radioaktivt med en halveringstid på 12,5 år, er deuteriumfusion den tilgængelige mulighed for en fusionsreaktor. Deuterium findes i ubegrænsede mængder i havvand, da 0,00126% af brinten i vandet er deuterium.

Når to deuteriumkerner fusionerer, kan de ikke danne helium-4, men for at bevare energi og impuls må kernen udsende enten en proton eller en neutron. Vi får derfor to fusionsprocesser:



Vi får altså enten helium-3 eller tritium i slutttilstanden. Der er ca. 50% sandsynlighed for hver af processerne.

Fusionsreaktoren

Når to deuteriumkerner fusionerer, frigives der i gennemsnit en energi på $3,5\text{ MeV}$ svarende til $5,6 \times 10^{-13}\text{ J}$.

Det vil sige, at hvis vi kan fusionere alle kerner i 1g deuterium, ville vi frigive en energi på 175 GJ (eller 48 MWh). Det ville være rigtig interessant, hvis vi kunne bygge en reaktor og udnytte noget af denne energi.

Hvis vi skal bygge en fusionsreaktor, skal vi løse nogle meget store tekniske udfordringer:

- Vi skal skabe et plasma af deuterium
- Vi skal varme plasmaet op til mere end 50 mill.K
- Plasmaet skal være omgivet af vakuum, da vi ønsker at forhindre energitab ved kollision med omgivelserne
- Vi skal sørge for at plasmaet indgrænses, så det ikke rammer væggene i vakuumkammeret
- Den frigivne energi skal opsamles

Det mest kendte design til at løse disse udfordringer er tokamak-reaktoren, som bruger et kraftigt torodiale magnetfelt til at fastholde plasmaet i et vakuumkammer [5].

Til at opvarme plasmaet bruger tokamak-reaktoren en kombination af intern og ekstern opvarmning:

- Den interne opvarmning sker ved, at den magnetiske feltstyrke øges, hvormed der efter Lenz, lov vil opstå et elektrisk felt, som peger langs partikelbanen for ionerne, som derved accelereres
- Den eksterne opvarmning sker dels ved, at ionerne bombarderes med mikrobølgestråling og dels ved, at man injicerer en ekstern partikel stråle til at "skubbe" til deuteriumionerne.

Der er bygget et antal tokamak-reaktorer, men de er plaget af, at plasmaet bliver ustabil og kolliderer efter få millisekunder.

På grund af problemerne med plasmaustabilitet i tokamak-reaktoren er der eksperimenteret med en række alternative designs:

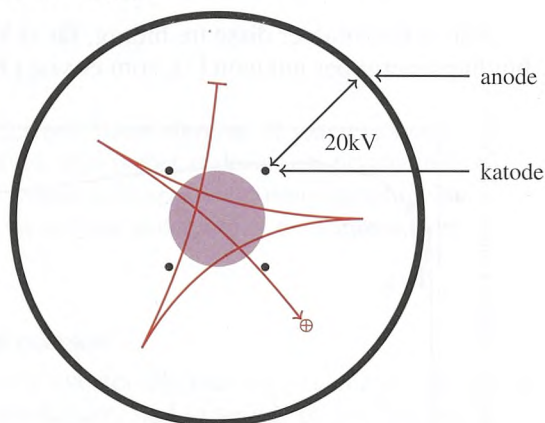
- I stellatoren (Wendelstein 7-X) roterer man plasmastrømmen 180° i løbet af en omdrejning
- Lockheed-Martin arbejder med en variant af en "Penning-fælde" hvor magnetiske spejle skaber en magnetisk flaske til at fastholde plasmaet
- Ved laserbaseret fusion bruges en række kraftige lasere til at opvarme en lille "pille" af brændstof (deuterium-tritium) til det eksploderer som en miniature brintbombe

Fusoren

Det er muligt at bygge en meget simpel fusionsreaktor ved at bruge et elektrisk felt til både at skabe, opvarme og indgrænse plasmaet. Princippet kaldes IEC (Inertial Electrostatic Confinement) [2]. Princippet er vist i figur 4.

Inde i et vakuumkammer er der en sfærisk anode, som fastholdes på jordpotentiale og en sfærisk gitterformet katode, som tilføres en negativ højspænding. Når der injiceres deuterium i vakuumkammeret, vil det stærke elektriske felt ionisere gassen, så der dannes et plasma, og de positive deuteriumioner vil accelerere hen i mod katoden. Dette vil få ionerne til at pendle

frem og tilbage omkring centrum af katoden, hvor ionerne vil kolliderer med tilstrækkelig kinetisk energi til at skabe fusion [6].



Figur 4: Partikelbane gennem fusor anode-ækvatorialplan.

Reaktoren i Viborg

I den fusor, vi har bygget, er vakuumkammeret udført i 3 mm rustfrit stål. Vi valgte stål for at afskærme den farlige røntgenstråling, som opstår ved de ekstremt høje temperaturer, som kræves til fusion. Vakuumkammeret har en indre diameter på 27 cm. Anoden er lavet af et gitter af 1 mm rustfrit stål, mens katoden, der har en diameter på ca. 3 cm, er lavet af 1 mm wolfram.

Vakuumsystemet består af en dobbelt olieforseglet rotationspumpe som hovedpumpe. Denne pumpe kan generere et tryk på ca. 2 Pa i tanken. For at sænke trykket yderligere bruges en luftkølet olie-diffusionspumpe. Den kan sænke trykket til ca. 10^{-4} Pa. Til at overvåge trykket bruges en termoelement-sensor.

Som højspændingskilde bruges en negativ 40 kV 400W-strømforsyning. Spænding og strøm kan reguleres fra en kontrolenhed, som eleverne har designet. Da et plasma kan udgøre en meget ustabil belastning, anvendes en effektmodstand på $100\text{ k}\Omega$ i serie med forsyningen. Strømforsyningen kobler ud ved overslag, og belastningsmodstanden sørger for at forhindre udfald.

Deuteriumforsyningen består af en lille trykflaske med deuterium under 10 atm. tryk. For reducere deuteriumtrykket og begrænse gennemstrømningen anvendes tre reduktionsventiler og et kapillarrør med en diameter på 10μ i serie med deuteriumbeholderen. Den komplette fusionsreaktor er vist i figur 5.

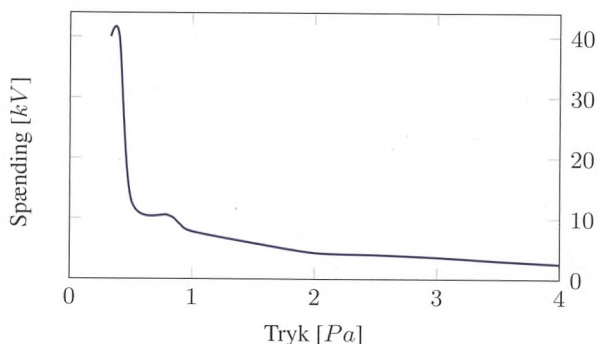


Figur 5: Fusionsreaktorsystemet.

Reaktoren i praksis

For at forklare hvad, der foregår i reaktoren, vil jeg gennemgå en typisk kørsel. Først tænder vi for vakuumsystemet. Når trykket er faldet til under 20 Pa, åbner vi for deuteriumtilførslen. Når trykket igen er faldet, kan vi tænde for olie-diffusionspumpen og højspændingen. Efter seks minutter falder trykket hurtigt, og hvis vi ikke tilfører deuterium, vil trykket falde til 10^{-4} Pa.

Når trykket falder, ændrer plasmaets elektriske ledningsevne sig. Da vores strømforsyning er strømbe-grænset til 9 mA, medfører dette, at spændingsforskellen mellem anode og katode stiger, når trykket falder, som vist i figur 6.



Figur 6: Katodespænding som funktion af tryk.

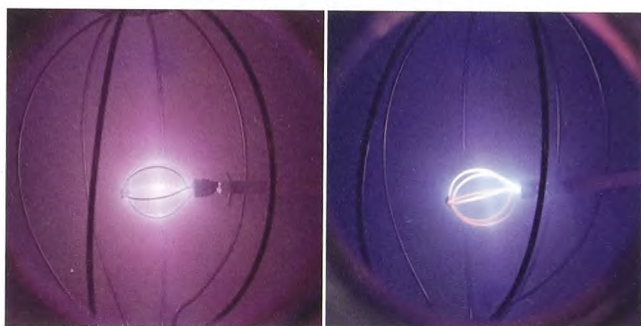
Den stejle stigning, når trykket falder under 0,5 Pa, skyldes at plasmaet “dør”, da densiteten af ioner bliver for lille.

Ved et tryk på 2 Pa har vi et flot deuteriumplasma med en spænding på ca. 4 kV, som vist i figur 7a.

Her er temperaturen i centrum af plasmaet ca. 30 MK. Selv om denne temperatur er det dobbelte af temperaturen i centrum af solen, er det ikke nok til at give målbar fusion. Dette skyldes den elektrostatiske frastødning mellem de positive deuteriumioner.

Vi har derfor startet olie-diffusionspumpen for at sænke trykket. Når trykket falder, øges middel-fri-vejlængde for ionerne, spændingen stiger, og temperaturen øges.

Når vi passerer 20 kV, er vores plasmatemperatur 150 Mk, og vi har en stabil fusionsproces. På grund af det lave tryk udsender vi væsentlig mindre synligt lys, men nu er vores wolfram-katode rødgldende, som vi kan se i figur 7b.



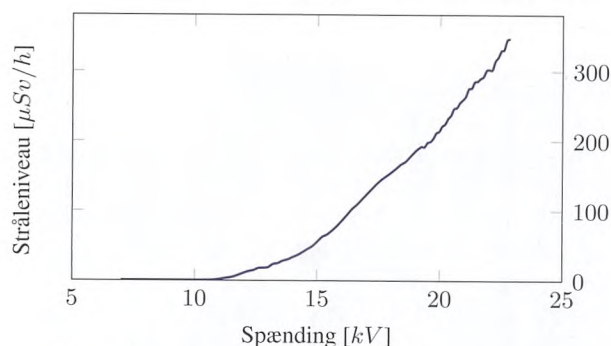
(a) 4 kV (b) 20 kV

Figur 7: Deuteriumplasma

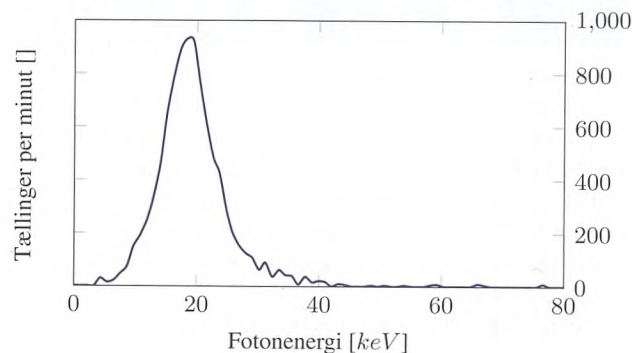
Målinger på reaktoren

For at verificere at reaktoren virker efter hensigten og vise, at den virkelig laver fusion, har vi udført nogle målinger.

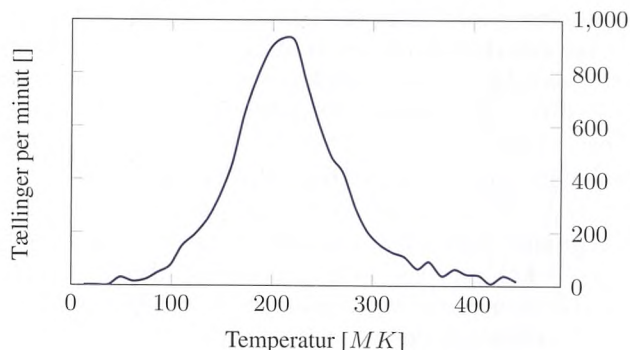
Selve fusionsprocessen afgiver neutroner og protoner. Protonerne standses af væggen i vakuumkammeret, mens neutronerne slipper igennem. Neutroner kan ikke måles med en normal geigertæller, men plasmaet afgiver også intens røntgenstråling, som nemt kan måles. Ved spændinger under 10 kV standses røntgenstrålingen af borosilikat-glasset i vores inspektionsvindue, men når spændingen overstiger 10 kV, kan der med en geigertæller måles en intens røntgenstråling, som kommer fra centrum af katoden. Sammenhængen mellem strålingsniveau og katodespænding er vist i figur 8.



Figur 8: Stråleniveau som funktion af katodespænding.



Figur 9: Gammaspektrum ved 20 keV.



Figur 10: Plasmatemperatur ved 20 kV.

Til at måle plasmaets temperatur kan vi ikke bruge en geigertæller, men da vi har en meget følsom scintillationsdetektor, kobled vi denne op som et gamma spektrometer [7]. Det viste sig, at over 15 kV kan gammastrålingen registreres i detektoren, og med et PC-lydkort med tilhørende software som spektrumanalysator kunne vi optage et meget fint gammaspektrum fra

reaktoren. Vi har kalibreret spektrometeret med en Cs-137 kilde. Spektret ved 20 kV katodespænding er vist i figur 9. Baggrundsstrålingen er trukket fra målingerne.

Vi kan også konvertere fotonenergien til temperatur ved at dividere med Boltzmanns konstant. Det giver grafen i figur 10.

Her har vi anvendt standard konvertering mellem eV og Kelvin, hvor 1 eV svarer til 11600 K.

Vi kan konkludere, at det er lykkedes at skabe et deuteriumplasma med en temperatur på 5 - 10 gange temperaturen i solens centrum (afhængig af, hvorledes vi konverterer energi til temperatur).

Neutronstråling

For at verificere, at vi virkelig kan lave fusion, har vi også målt neutronstrålingen fra processen. Da en neutrontektor er meget kostbar, har vi selv bygget en, baseret på et gammelt russisk militært helium-3 fyldt proportional-detektor rør. For at kunne detektere de højenergetiske neutroner fra fusionsprocessen, har vi anvendt en moderator af paraffinvoks for at bremse neutronerne [8]. Røret forsynes med 1350V højspænding fra en meget stabil strømforsyning og forstærkes i en ldningsfølsom forstærker, som vi har bygget. Signalet digitaliseres i et lydkort.

Neutronstrålingen er målt ved 20 kV højspænding og stabilt plasma i 4 minutter. For at subtrahere støj og baggrundsstråling er der fortaget to målinger med uændret opstilling, men uden højspænding. Disse målinger er udført umiddelbart før og efter målingen med højspænding. Resultaterne er vist i figur 11.

For at udregne netto-neutronsignalet har vi valgt at trække den højeste baggrund fra, samt lægge en tærskel ved 50 keV for at fjerne støj fra målingerne.

Der gøres opmærksom på, at den viste energiskala ikke er kalibreret, og at moderatoren bremser neutronerne. Det er derfor ikke den rigtige neutronenergi, der vises på x-aksen.

Dette giver et nettoresultat på 51236 neutroner i løbet af 240s eller 213 neutroner/s.

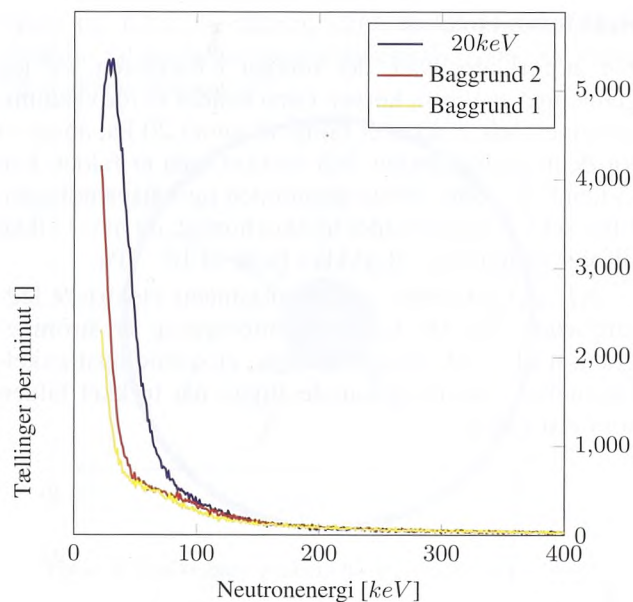
Vores detektor dækker en rumvinkel på 0,2 steradianer. I henhold til det russiske datablad for helium-3-detektoren skal den have en effektivitet på 70%. Dette giver en total neutronproduktion på 19.000 neutroner/s. Da hver anden fusion giver protoner, som ikke detekteres, svarer dette til en fusions hastighed på 38.000 fusioner/s, som giver en frigivet effekt på 22 nW.

Dette passer meget godt med en simpel teoretisk beregning. Virkningstværsnittet σ for deuteriumfusion ved 20 keV er 0,3 mBarn. Hvis ionstrømmen er I , iontætheden er $\frac{dN}{dV}$ og rumfanget af plasma er V , vil reaktionshastigheden være givet ved:

$$\dot{N} = I \cdot \frac{dN}{dV} \cdot V \cdot \sigma = 48.000s^{-1} \quad (6)$$

Her har vi anvendt en meget simpel model med stabilt, uniformt plasma inden for katoden.

Desværre er vores fusionsreaktor ikke nogen god energikilde. Under forsøget udviklede reaktoren ca. 200W, men kun 22 nW kommer fra fusionsprocessen, svarende til en virkningsgrad på $5,5 \times 10^{-11}$.



Figur 11: Målt neutronspektrum og baggrund.

Referencer

1. P. Farnsworth, US 3258402 (1966).
2. R. L. Hirsch, Inertial-Electrostatic Confinement of Ionized Fusion Gasses. *Journal of Applied Physics* **38** (1967).
3. T. W. Donnelly, J. A. Formaggio, B. R. Holstein, R. G. Milner, B. Surrow, *Foundations of Nuclear and Particle Physics* (Cambridge University Press, 2017).
4. D. Maoz, *Astrophysics in a Nutshell* (Princeton University Press, udg. 2, 2016).
5. J. P. Freidberg, *Plasma Physics and Fusion Energy* (Cambridge University Press, 2009).
6. G. L. Kulcinski, *Progress in Steady State Fusion of Advanced Fuels in the University of Wisconsin IEC Device* (presented at the Japan-U.S. IEC Workshop, 2001).
7. C. Grupen, B. Schwartz, *Particle Detectors* (Cambridge University, udg. 2, 2008).
8. T. W. Crane, M. P. Baker, i *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials* (Los Alamos National Laboratory, 1993), kap. 13, s. 386–393.



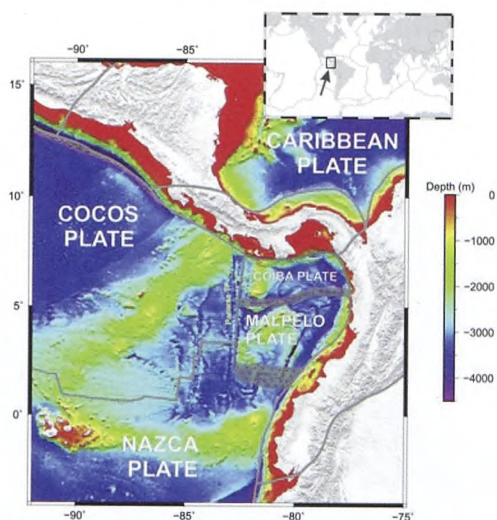
Bernhard Lind Schistad er Cand.Real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Forskere opdager ny tektonisk plade

GEOFYSIK.

Geofysikere har opdaget en ny tektonisk plade mellem Galápagosøerne og Ecuadors kyst. Den nye tektoniske plade, som er en mikroplade, der er blevet kaldt Malpeloplade, hjælper dem med at løse et geologisk puslespil. Udregninger af de tektoniske mikroplader Nazca og Cocos bevægelse i området passede nemlig ikke sammen, og det fik forskerne til at lede efter endnu en mikroplade. Forskerne havde studeret pladernes bevægelser relativt til hinanden og de enkelte pladers vinkelhastighed. De store lithosfæreplader danner jordskælv, når de støder sammen, mens mikroplader, der befinder sig mellem lithosfærepladerne, vekselvirker ved at dreje rundt om hinanden. Udformningen af havbunden og vinklerne, hvormed pladerne glider forbi hinanden, kan bruges til at udregne vinkelhastighederne af pladerne. Da forskerne lagde vinkelhastighederne af mikropladerne sammen, blev den ikke lig nul, hvilket den bør være, men 15,0 mm pr. år, hvilket er stort. Derfor kiggede de efter en anden plade, der kunne forklare forskellen. Forskerne fandt ud af, at en del af Nazcapladen bevægede sig individuelt i forhold til hele Nazcapladen, så her var en mikroplade, der ikke før var opdaget. Forskerne brugte derefter multibeam-sonarmålinger til at finde Malpelomikropladens kanter. Men udregningerne gik stadig ikke helt op, nu blev summen af vinkelhastighederne 11,6 mm pr. år. Derfor tror forskerne, at der findes en endnu uopdaget plade.



Figur 1: Malpeloplade, som er opdaget mellem Galápagosøerne og Ecuadors kyst. Figur fra kilde.

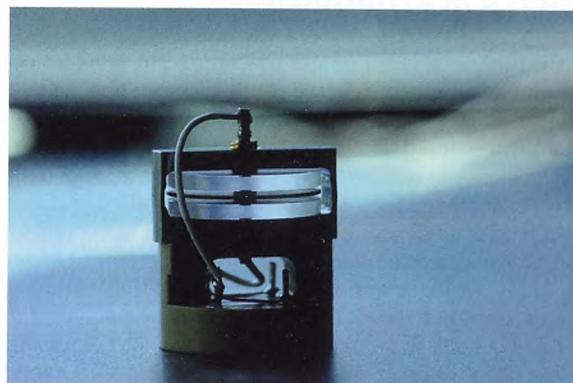
Kilde: T. Zhang et al.: The Malpelo Plate Hypothesis and Implications for Non-closure of the Cocos-Nazca-Pacific Plate Motion Circuit, *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, 16, pp. 8213–8218 (2017). DOI: 10.1002/2017GL073704

RUC-MIT samarbejde sætter ny verdensrekord

MATERIALEFYSIK.

Mekaniske egenskaber af materialer er tidsafhængige. Mange stoffer, f.eks. glas og plastik, er hårde, når de

deformeres pludseligt, men flyder efter nogen tid. Det er derfor vigtigt, at kunne måle et stofs egenskaber over mange forskellige tidsskalaer; fra sekunder over millisekunder og helt ned til picosekunder. Forskerne Tina Hecksher og Jeppe Dyre fra gruppen Glas og Tid på Roskilde Universitet (RUC), har i samarbejde med en gruppe fra Massachusetts Institute of Technology (MIT) målt en silikoneolies mekaniske egenskaber over 13 dekader i tid (en dekade er en faktor 10) og i øvrigt ved forskellige temperaturer fra væske- til glastilstande. Det er en verdensrekord, da kommercielle instrumenter normalt højst dækker 5 dekader. Rekorden er opnået ved at kombinere syv forskellige målemetoder, flere af dem udviklet netop til dette arbejde. De tre af metoderne er udviklet ved RUC og bygger på brugen af piezo-keramiske transducere, mens de fire andre metoder er udviklet ved MIT og bygger på brugen af korte laserpulser i forskellige sammenhænge. De mekaniske målinger har bl.a. anvendelser inden for polymerforskning, geofysik og multifunktionelle materialer.



Figur 2: En piezo-keramisk transducer til måling af forskydningsmodul. Figur fra kilde.

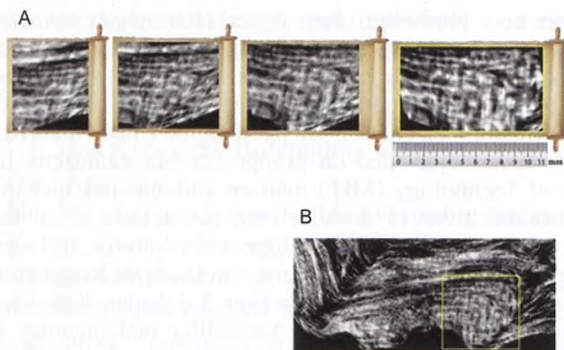
Kilde: T. Hecksher et al.: Toward broadband mechanical spectroscopy, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol. 114, 33, pp. 8710–8715 (2017). DOI: 10.1073/pnas.1707251114

Røntgen-tomografi læser papyrus fra Herculaneum

RØNTGENFYSIK.

Vesuvus udbrud i 79 e.Kr. forkullede ikke kun mennesker og dyr i Pompeii og Herculaneum, men også oldgræske manuskriptroller lavet af papyrus. Det har delvist bevaret dem, men forkulningen gør også, at det er svært at åbne dem, uden at de smuldrer. Desuden vil oxygen i luften forværre tilstanden af skriften på papyrusrullen, hvilket gør det næsten umuligt at læse papyrusrullen. Herculaneum-papyruserne skulle indeholde tekster skrevet af græske filosoffer bl.a. Philodemus af Gadara. Det er derfor interessant at læse teksterne. Forskere har vist, at de ved hjælp af en ny type røntgen-fasekontrast-tomografi teknik kan lave et 3D-billede af papyrusrullerne, og selvom de stadig er rullet sammen, kan de virtuelt udrulle papyrusrullen, lag for lag, uden at skade den. Forskerne har været i stand til at skelne forskellige områder af papyrusrullen med forskellig densitet, og derfor kunne de skelne den kulbaserede blæk fra selve papyrussen, der bestod af fibre. Opløsningen af opfindelsen har været så god, at forskeren har kunne identificere og tyde de græske tekster og med deres teknik er det nu muligt læse de mest omfattende tekstdele nogensinde læst af Herculaneum-papyrusrullerne.

Kilde: I. Bukreeva et al.: Investigating Herculaneum papyri: An innovative 3D approach for the virtual unfolding of the rolls, arXiv:1706.09883 (2017).



Figur 3: Virtuel udrulning af Herculaneum-papyrus med X-ray fasekontrast tomografi. Figur fra en tidligere artikel af I. Bukreeva.

Kunstige neurale netværk analyserer data fra gravitationslinser

COMPUTERFYSIK.

Når lys fra et fjernt objekt passerer forbi et andet objekt med masse f.eks. en galakse, afbøjes lyset pga. galaksens gravitationsfelt (galaksen krummer rumtiden omkring den). Dette kaldes gravitationslinseffekten og gør, at lyset, når det når Jorden, giver et forvrænget billede af objektet ofte med en lysring omkring objektet eller flere billeder af samme objekt. Ved at analysere forvrængningen kan man opnå vigtig information om fordelingen af stof og mørkt stof i Universet. Men analysen tager normalt meget lang tid og går ud på at sammenligne det observerede billede med mange computersimulationer for at finde et match. For et enkelt billede kan det tage flere måneder. Nu har forskere fra Stanford University i USA brugt kunstige neurale netværk til at løse opgaven, hvilket på denne måde kun tager få sekunder og således er 10 millioner gange hurtigere end konventionelle metoder. Kunstige neurale netværk er computersystemer, der er inspireret af biologiske netværk. Disse netværk kan lære at løse opgaver ved træning, altså ved at se mange eksempler på, hvordan opgaven skal løses. De kan f.eks. lære billedegenkendelse ved at se flere billeder af samme objekt, og derefter kan de lede efter objektet i en stor mængde data. Forskerne trænede deres kunstige netværk i at analysere billeder af gravitationelle linser med forskellige egenskaber. De kunstige netværk kunne bestemme egenskaberne af hver linse, og hvordan deres stof var fordelt, samt hvor meget de forstørrede billedet af objektet. Teknikken gør, at forskerne kan analysere meget data hurtigt, hvilket er vigtigt, særligt da forskerne forventer at få rigtig mange billeder af gravitationslinser fra de nye teleskoper som Large Synoptic Survey Telescope (LSST), der skal stå færdigt i 2019 i Chile.



Figur 4: Gravitationslinseffekten. Blåt lys fra et fjernt objekt afbøjes af en galaksens gravitationsfelt. En ring af blåt lys kommer frem omkring galaksen. Kilde: NASA

Kilde: Y. D. Hezaveh et al.: Fast automated analysis of strong gravitational lenses with convolutional neural networks, *Nature*, Vol. **548**, pp. 555–557 (2017). DOI:10.1038/nature23463.

Undervands-qubits

KVANTEFYSIK.

Fornylig viste kineserne satellitbaseret kvanteteleportation, og nu har en anden kinesisk gruppe taget det første skridt mod undervandskvantekommunikation. Kvantekommunikation er attraktivt til at sende krypteret information mellem to parter 100% sikkert, da det, hvis en aflytter forsøger at lytte med, vil blive opdaget, siden en aflytter vil ændre på den kvantemekaniske tilstand af de sendte qubits (kvantebits). Forskerne sendte både qubits bestående af enkelte fotoner og entangled fotoner (sammenflettede fotoner, hvor en måling på den ene foton påvirker den anden foton instantant) gennem 3 m havvand og opnåede en fidelity på 98% (fidelity er et mål for, hvor meget sluttstanden ligner begyndelsestilstanden). Til sammenligning var afstanden i satellitforsøget 1203 km, men det er væsentlig sværere at sende lys gennem vand, da vandet absorberer mere end luft. Fotoner er ellers gode bærere af kvanteinformation, da de kan bevæge sig langt uden at vekselvirke meget med det omgivende medium, f.eks. i en optisk fiber eller i luft. Forskerne brugte fotoner med en bølglængde på 405 nm, da blå-grønt lys absorberes mindst i vand. Kvanteeinformation blev indkodet i polarisationstilstanden af fotonerne, da det giver bedst mulighed for, at fotonen kommer igennem vandet, uden at for mange kollisioner med vandmolekyler afpolariserer det, siden havvand er isotropisk og ikke bør vise nogle afpolariseringseffekter. Motivationen for forsøget var bl.a. det faktum, at Jorden består af 70% vand, og derfor vil det være nyttigt at kunne (kvante)kommunikere under vandet. Men om kvantekommunikation mellem ubåde bliver en realitet er, ikke sikkert, da havvand absorberer meget lys, og det derfor vil blive vanskeligt at kommunikere over lange afstande, det vil i hvert fald kræve mange fotoner.



Figur 5: Om kvantekommunikation mellem ubåde bliver en realitet, er tvivlsomt, men forskere har vist, at det i hvert fald kan lade sig gøre at sende qubits i havvand gennem en afstand på 3 m.

Kilde: L. Ji et al.: Towards quantum communications in free-space seawater, *Optics Express*, Vol. **25**, 17, pp. 19795–19806 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.019795.

Kilde: J. Yin et al.: Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, *Science*, Vol. **356**, 6343, pp. 1140–1144 (2017). DOI: 10.1126/science.aan3211

Aktuelle Bøger

Af Jens Olaf Pepke Pedersen

Vi anmelder normalt ikke børnebøger i KVANT, men der kan være læsere som savner en god gaveide, gør vi en undtagelse denne gang med to bøger, som vi har modtaget.

Med Andreas i rummet

Henrik Bendix og Thomas Djursing: "Vil du med i rummet?", 176 sider, 200 kr. Politikens Forlag 2017. Sidste år udkom bogen "Min rejse til rummet" om Andreas Mogensens tur til Rumstationen i 2015, som beskrev den lange rejse, der gik forud, lige fra hans barndrøm om at blive astronaut, hans valg af uddannelse og senere det lange træningsprogram på astronautskolen.

Nu har videnskabsjournalisterne Henrik Bendix og Thomas Djursing omskrevet bogen til en børne- og ungdomsbog, og det er blevet en rigtig vellykket "oversættelse", hvor de voksne sagtens kan læse med. Det sker naturligvis på bekostning af en række detaljer, og Andreas Mogensens karriere har nok ikke været helt så planlagt, som det ser ud i bogen, men jeg tror, at bogen fanger mange af de spørgsmål, som store børn og nok også mange voksne stiller sig: hvordan kommer man ud i rummet og hvordan er det at være i vægtløs tilstand.

Heldigvis er der ikke blevet plads til historien om, at DTU i sin tid afslog Andreas Mogensens ansøgning om et phd-stipendium, hvorfor han i stedet fik sin phd fra University of Texas. I bogen går forfatterne noget let hen over det emne, at Andreas venter i flere år på en chance for at søge ind på ESA's astronautskole. Der skulle også en usædvanlig god portion held til at være klar på det rigtige tidspunkt. Jeg husker således, at ESA søgte efter astronauter i 1991, og det vakte min nysgerrighed så meget, at jeg rekvirerede ansøgningsmaterialet. Min hustru nedlagde dog veto mod tanken, og jeg var sikkert også blevet sorteret fra på et meget tidligt tidspunkt, men herefter gik der faktisk 17 år, før ESA igen søgte nye astronauter i maj 2008.

Andreas Mogensen blev som bekendt udvalgt blandt næsten 10.000 ansøgere til sammen med fem andre at starte på skolen i Tyskland, og herefter fulgte seks års hårdt arbejde og træning, inden turen til rumstationen.

Andreas Mogensen fortæller i bogen på en underholdende måde, alle de ting astronauterne skal lære for at blive i stand til at klare tænkelige situationer, og bortset fra, at det både var svært og kedeligt at lære russisk, virker det til at han har nydt alle elementerne i uddannelsen. Der er parabolflyvning, hvor man opnår vægtløshed i 20 sekunder ved at lade et fly følge en kasteparabels bane, ophold på en undervandsbase og en uge i et underjordisk grottesystem i Sicilien. Da Andreas Mogensen kom ud af grotten igen, var hans lugtesans skærpet så meget, at han på flere meters afstand blev overvældet af den kraftige lugt af sæbe og shampoo fra instruktørerne, der tog imod. En anden øvelse gik ud på at klare sig om vinteren i den russiske

ødemark, hvis nu rumskibet skulle lande et forkert sted.

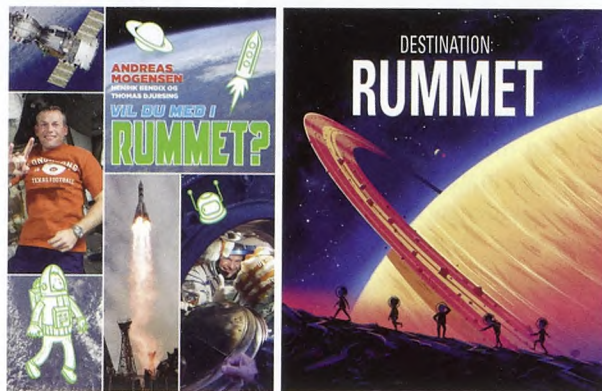
Der er nogle faktasektioner om, hvordan en raket virker, om rumskrot og risikoen ved at være astronaut, men den interessante del er nok, hvordan man spiser, sover og vasker sig, når alt er vægtløst. Toiletbesøg er en særlig udfordring i vægtløs tilstand, og det bliver der også gjort en del ud af i bogen, men der er også gode råd om hvilke madvarer, der egner sig bedst til at blive spist i vægtløs tilstand. Det er således en grundregel, at maden ikke kan lave krummer!

Andreas Mogensens rumfærd varede blot ti dage, og heraf gik de to dage med turen op til Rumstationen. Det mest fascinerende ved bogen er måske, hvor mange år Andreas har brugt på at forberede sin rumrejse, som kun varede ti dage. Men han håber at få endnu en tur, selvom det tidligst bliver i år 2020.

Tegneserie i 1950'er stil

Christof Englert: "Destination: Rummet". Illustreret af Tom Clohosey Cole. 48 sider, 230 kr., Gyldendal 2017.

Bogen "Destination: Rummet" er en illustreret fagbilledbog om Universet, galakser, sorte huller, stjerner, planeter og meget mere. Forfatteren er lektor i fysik ved Glasgow Universitet og bogen er oversat fra engelsk af Lars Thomas. Ifølge forlaget er bogen holdt i en 1950'er-stil, hvilket formodentlig er interessant for tegneserieentusiaster, men ikke er nogen oplagt god ide til et emne som rummet, hvor der netop findes så mange flotte og fantastiske billeder. Forlaget oplyser også at målgruppen er børn mellem 5 og 9 år, hvilket teksterne nu kun i begrænset omfang er tilpasset. I afsnittet om lys forudsættes det således, at børnene er bekendt med eksponenter. Til gengæld vil de mere fysikkyndige læsere nok ærgre sig over at læse, at solvinden består af "magnetisk ladede partikler". De mange faktabokse indeholder til gengæld en hel del information, og bogen når også langt omkring på de 48 sider.



Nekrolog over Thor A. Bak

Af Dorte Olesen

SNU's tidligere præsident Thor A. Bak er død, 88 år gammel.

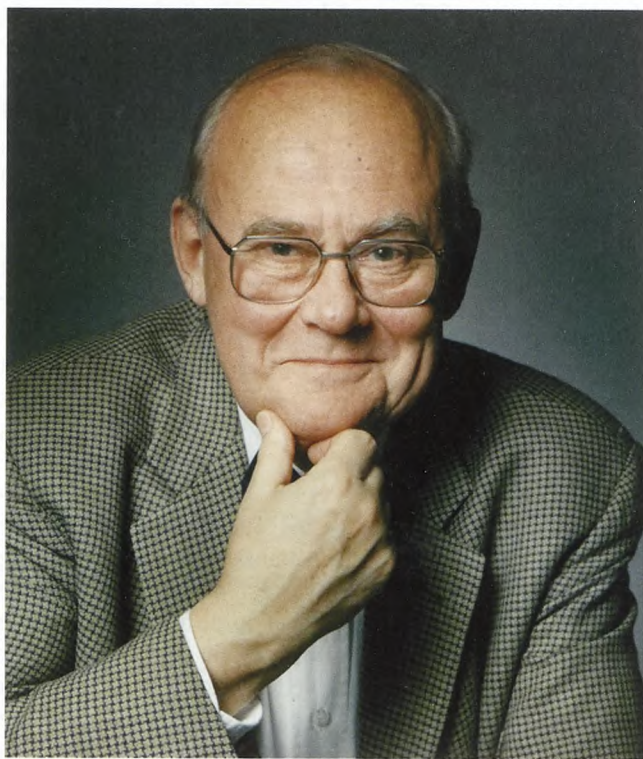
I årene 1967-88 var Thor A. Bak en stærk ledende kraft i SNU, først som sekretær i årene 1967-76 og derefter fra 1976 selv som præsident for Selskabet. Han var sidst i denne periode initiativtager til omlægningen af SNU's publikation Fysisk Tidsskrift, som i næsten 90 år havde bragt videnskabelige artikler på dansk, til et mere populært tidsskrift, bladet KVANT, som nu har fejret sine første 25 år som et succesrigt blad, hvis artikler også kan bruges i gymnasiet.

Thor A. Bak var en ildsjæl inden for formidling af naturvidenskab og teknik. Det gjaldt både til voksne og til børn og unge – han var bl.a. sammen med fysikeren K.G. Hansen drivkraft bag SNU's initiativ "Ungdomslaboratoriet", hvor store skoleelever kunne udføre selvstændige fysik og kemi eksperimenter under kyndigt opsyn. Og han var en drivkraft bag de opfinderkonkurrencer for børn og unge, som i mange år blev sponsoreret af Phillips-fabrikkerne, derefter her i Danmark af Jyllandsposten og senere Ingeniøren, og som i dag videreføres i form af den succesrige konkurrence "Unge Forskere" med Prins Joachim som protektor.

Thor A. Baks virke i SNU byggede på en flot videnskabelig karriere og et stort engagement i både hans eget fag og forskning i det hele taget. Hans videnskabelige karriere gik meget hurtigt i de unge år – efter at være blevet civilingeniør i kemi i 1953 fik han Københavns Universitets guldmedalje i 1954, blev Ph.D. fra Columbia University 1956 og dr.phil. allerede i 1959. Han var derefter visiting scientist i USA ved General Electric og Bell Labs i 1960-61, og hjemme igen blev han professor ved Københavns Universitet i 1963. I 1965 blev han medlem af både Akademiet for de Tekniske Videnskaber og Videnskabernes Selskab, og han fik stor betydning for udviklingen af fagområdet kemisk kinetik. Hans tidlige arbejder indenfor studiet af reaktionsmekanismer nævnes i dag som pionerarbejder, og han fik samlet en gruppe unge talenter omkring sig på Københavns Universitet.

Gennem næsten 30 år som professor i kemi ved Københavns Universitet var han en begejstret kemiunderviser, både for lægestuderende og for kemistuderende, i såvel indledende som mere avancerede kurser. Og han engagerede sig også i at få lært fysik- og kemistuderende den nødvendige matematik, og udgav sammen med Jonas Lichtenberg lærebogen "Videregående matematik for ikke-matematikere" i 1960. Bogen blev i udvidet form oversat til engelsk og udgivet i USA i 1966 som "Mathematics for Scientists"; og på spansk kom den i 1969.

Det forsknings- og uddannelsespolitiske optog ham også meget, og i årene 1972-76 var han rektor for Københavns Universitet, han var bl.a. også medlem af Atomenergikommissionen 1970-76 og formand for Planlægningsrådet for Højere Uddannelser 1972-74. Efter rektortiden vendte han tilbage til forskningen og fik kombineret sit kendskab til teoretisk kemi og matematik i nogle artikler sammen med en Princeton-professor i matematisk fysik. For sin imponerende aktivitet både inden for formidling af naturvidenskab og teknik og inden for forskningen modtog han i 1989 H.C. Ørsted Medaljen i guld fra SNU. Den blev overrakt af Dronningen i Videnskabernes Selskab, hvor han fra 1985-99 var generalsekretær. Han engagerede sig også særdeles aktivt i det europæiske forskningspolitiske arbejde, bl.a. som medlem af Fællesmarkedets Forskningsråd CODEST 1989-94 og Academia Europaea fra 1994. Hans bredere samfundsmæssige engagement kom bl.a. til udtryk i formandskabet for Dansk Flygtningehjælp 1984-89 og i medlemskab af Jyllandspostens Fond 1994-2004. Thor A. Bak var et meget alsidigt begavet menneske, også på det musiske felt, og vi husker ham med glæde og taknemlighed i SNU.



Thor A. Bak

Drivhuseffekten

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space

Nogle af gasserne i Jordens atmosfære absorberer den infrarøde stråling fra Jorden og opvarmer dermed atmosfæren. Vanddamp er langt den vigtigste gas i denne drivhuseffekt, men der er stor opmærksomhed omkring kuldioxid. Sådan har det imidlertid ikke altid været, men det er fortsat svært at afgøre, hvor meget varmere det bliver på grund af kuldioxid. En modelberegning, der blandt læserne af Videnskab.dk blev valgt til Årets Danske Forskningsresultat¹, tyder på, at virkningen stiger med temperaturen.

Kuldioxid – CO₂ – er essentielt for livet på Jorden. Det er nødvendigt for planternes fotosyntese og dermed for hele fødekæden, det er ugiftigt, det lugter ikke og hvis det ikke var fordi CO₂ også har betydning for energistrømmene i atmosfæren, ville der næppe være ret mange politikere, der havde hørt om CO₂.



Figur 1: Joseph Fourier (1768–1830)

I meget lang tid var der dog heller ikke den store opmærksomhed om CO₂. Ganske vist havde den den franske fysiker og matematiker Joseph Fourier (1768–1830), som nok er mere kendt for at have fået Fourier-transformationen opkaldt efter sig, allerede i 1827 beskrevet drivhuseffekten kvalitativt [1]. Det var noget af en bedrift på et tidspunkt, hvor termodynamikken først var ved at blive udviklet, men det var ikke et resultat, der vakte større opsigt i samtiden.

Noget uretmæssigt bliver den svenske kemiker Svante Arrhenius (1859-1927) ofte nævnt som opda-

geren af drivhuseffekten, og men hans fortjeneste er, at han som den første i 1896 beregnede, hvor meget en fordobling af CO₂-koncentrationen i atmosfæren ville betyde for den globale temperatur [2]. Denne størrelse kaldes også for klimafølsomheden overfor CO₂. Arrhenius kom frem til, at en CO₂-fordobling ville øge temperaturen med 6°C, hvilket nogle gange bliver fremhævet som overraskende tæt på moderne resultater. I Arrhenius' tilfælde var resultatet nu mere held end gode beregninger, for selvom hans beregning var baseret på datidens state-of-the-art, indeholdt den to store fejlkilder, som trak i hver sin retning.



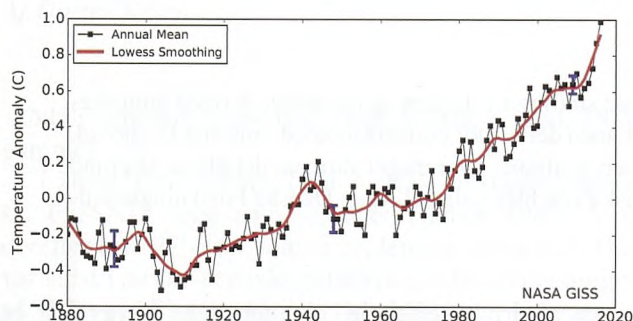
Figur 2: Svante Arrhenius (1859-1927)

Hans svenske kollega, fysikeren Knut Ångström² (1857-1910) viste kort efter ved at måle spektret af CO₂, at absorptionsbåndene for CO₂ i atmosfæren allerede var mættede. Konklusionen var derfor, at mere

¹ <http://videnskab.dk/naturvidenskab/vinderne-af-aarets-danske-forskningsresultat-sejr-for-klimaforskningen>

² Knut Ångström er søn af den svenske fysiker Anders Jonas Ångström (1814-74), og det er faderen Anders, der har lagt navn til enheden Ångström (1 Å = 10⁻¹⁰ m).

CO₂ i atmosfæren ikke ville ændre noget på energibalancen i atmosfæren og dermed heller ikke have nogen særlig effekt på den globale temperatur.



Figur 3: Global temperatur (land og ocean) 1880-2017 (NASA).

Nu var klimaændringer ikke nogen nyhed i starten af 1900-tallet, og ikke mindst i 1920'erne og 1930'erne kunne man konstatere, at Jorden blev varmere (se figur 3), med særligt tydelige forandringer i Arktis. Der var dog ikke den store interesse for at finde årsagen til de aktuelle klimaændringer, og interessen samlede sig i stedet om at forklare de store istider, som man kunne se tydelige spor af i landskabet. Især den serbiske fysiker Milutin Milanković (1879-1958) bidrog til en forklaring på istiderne med sin teori om, at istiderne var styret af små variationer i solindstrålingen på grund af ændringer i Jordens bane og rotationsakse.

Konsensus: CO₂ har ingen klimaeffekt

Men med hensyn til de aktuelle klimaændringer var den fremherskende holdning blandt forskerne dengang, at det da var interessant, at vi kunne se, at klimaet ændrede sig, men der var også konsensus om, at det ikke havde noget med menneskelige aktiviteter at gøre.

Der var dog også skeptikere, som den britiske ingeniør Guy Stewart Callendar (1897-1964), der imidlertid kun havde meteorologi som hobby. Han argumenterede for drivhusteorien med den begrundelse, at selvom CO₂ allerede absorberede den infrarøde stråling fra Jorden, ville mere CO₂ betyde, absorptionen skete højere oppe i atmosfæren, hvilket ifølge hans beregninger ville føre til opvarmning. Callendar kunne også – omend på et noget spinkelt grundlag – beregne, at temperaturrendringen ved en CO₂-fordobling var 2°C. Han påpegede også, at både temperatur og CO₂ i atmosfæren var steget i løbet af det sidste halve århundrede, hvilket den daværende direktør for det britiske meteorologiske institut – og autoriteten på området – George Simpson (1878-1965) dog afviste som en tilfældighed. Selvom Callendar holdt fast ved sin teori helt frem til sin død i 1964, blev den i hele perioden bestridt eller fortiet af hovedparten af det videnskabelige samfund.

Problemet var blandt andet, at den globale temperatur siden 1940'erne var begyndt at falde igen, og vi skal helt frem til midten af 1970'erne før drivhuseffekten begynder at blive taget mere seriøst. På det tidspunkt var bekymringen for global afkøling, og dermed muligheden for en ny istid, imidlertid større end bekymringen for global opvarmning.



Figur 4: Guy Stewart Callendar (1897-1964)

En førende klimatolog var tyskeren Helmut Landsberg (1906-85), der i en oversigtsartikel i 1970 skrev, at vi ikke vidste meget om menneskeskabte klimaændringer, og i værste fald mente han, at stigningen i CO₂-koncentrationen med den nuværende hastighed højst ville medføre en temperaturstigning på 2°C i løbet af de næste 400 år. Den engelske klimatolog Hubert H. Lamb (1913-97), der er grundlæggeren af den britiske Climatic Research Unit, mente, at virkningen af CO₂ var tvivlsom og han påpegede ganske korrekt, at CO₂ ikke kunne redegøre for de mange klimaændringer, han havde afdækket fra middelalderen til nutiden.

Sidst i 1970'erne blev det klart, at afkølingen siden 1940'erne på ny var afløst af en periode med opvarmning, og samtidig begyndte der at komme iskernemålinger fra Grønland og Antarktis, der viste, at CO₂-koncentrationen i atmosfæren havde ændret sig meget med temperaturen over tusinder af år. CO₂ måtte derfor have betydning som drivhusgas, der i hvert fald kunne forstærke ændringer i klimasystemet. Det amerikanske videnskabsakademi, National Academy of Sciences, nedsatte derfor en ad hoc-gruppe, ledet af meteorologen Jule Charney (1917-81), som skulle undersøge, om CO₂ fra fossile brændstoffer kunne påvirke klimaet. I en kort rapport på 22 sider konkluderede gruppen, efter at have gennemgået stabiliserende mekanismer i klimasystemet, at CO₂ måtte betragtes som en væsentlig en faktor i klimaet [3]. På grundlag af en gennemgang af forskellige modelberegninger anslog gruppen endvidere, at klimafølsomheden for CO₂ lå et sted mellem 1,5 og 4,5°C.

Konsensus: CO₂ har en klimaeffekt

Herefter blev der stigende opmærksomhed omkring CO₂'s rolle, og da den globale temperatur samtidig begyndte at stige igen, førte det også voksende bekymring for klimaændringer, men nu overfor et varmere klima. Det førte i 1988 til oprettelsen af FN's klimapanel (IPCC), som siden har offentliggjort ialt fem store klimarapporter. Den sidste udkom i 2013, og måske lidt overraskende er konklusionen i den seneste rapport fortsat, at klimafølsomheden for CO₂ ligger et sted mellem 1,5 og 4,5°C. Næsten 40 års omfattende klimaforskning har således ikke gjort det muligt at bestemme klimafølsomheden mere præcist.

Når det er så svært, skyldes det, at vi ikke bare kan måle klimafølsomheden direkte i selve klimasystemet. Desuden virkning forstærkes effekten af CO₂ af vanddamp, skyer og andre komponenter i Jordens atmosfære. En CO₂-fordobling vil i sig selv kun give anledning til en opvarmning på omkring 1°C. Men fordi denne opvarmning ændrer på blandt andet mængden af vanddamp, forstærkes opvarmningen og bliver større. Mange af disse effekter er omgærdet af stor usikkerhed, og derfor er klimafølsomheden en svær størrelse at få styr på. I stedet må man ty til modelberegninger eller se på, hvordan temperatur og CO₂ har varieret førhen. Disse analyser har haft en tendens til at give forholdsvis lave værdier for klimafølsomheden, især hvis man tager de nyeste data efter år 2000 med, hvor temperaturen ikke har ændret sig så meget, selvom CO₂-koncentrationen er steget.



Figur 5: Bispehøjen på Limfjordsøen. Fur er en høj top af moler med talrige lag af aske fra de enorme vulkanudbrud, der fandt sted omkring nutidens Island i overgangen mellem palæocæn og eocæn for 56 millioner år siden, hvor Jorden var langt varmere end i dag. (Foto: K.P. Pedersen)

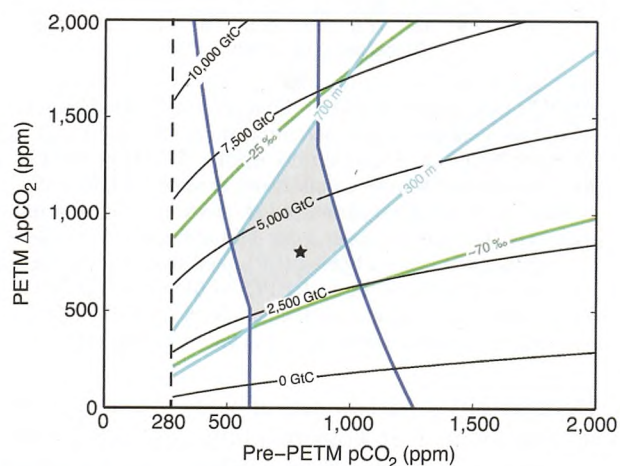
CO₂ i Jordens fortid

En anden mulighed er at gå tilbage i Jordens geologiske fortid, hvor overgangene mellem de geologiske perioder ser ud til at være ledsaget af dramatiske ændringer i klimaet. En af de særligt interessante overgange er mellem paleocæn og eocæn for 56 millioner år siden, hvor kloden oplevede en kortvarig, men kraftig opvarmning. Overgangen er blevet kendt som det paleocæne-eocæne termale maksimum (PETM) og har længe været fremhævet som et forhistorisk eksempel på en global opvarmning, der kunne minde om nutidens.

³Størrelsen $\delta^{13}\text{C}$ angiver ændringen (typisk i promille) i $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ forholdet, målt i forhold til en standard. Standarden kaldes Pee Dee Belemnite (PDB) efter det marine fossil, Belemnites americana, fra Peedee Formation i South Carolina hvor $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ forholdet er 0.0112372.

I forvejen har rekonstruktioner af paleocæn vist, at Jorden dengang var omkring 10°C varmere end i dag, og under selve PETM steg temperaturen med yderligere 5°C. Den ekstra stigning blev formodentlig udløst af store undersøiske lagre af metanhydrat, som blev ustabile og boblede op til atmosfæren, hvor metan (CH₄) virker som en kraftig drivhusgas. I atmosfæren har CH₄ en levetid på omkring 9 år, hvorefter det omdannes til CO₂, men hvis atmosfæren indeholder meget CH₄ stiger levetiden og forøger dermed virkningen af CH₄.

Ved hjælp af modellen DCESS (Danish Center for Earth System Science [4]) har vi analyseret PETM-overgangen. Her er et af problemerne, at vi ikke har en præcis viden om sammensætningen af Jordens atmosfære før og under PETM, som derfor må bestemmes indirekte. Her kan forekomster af forskellige former for natriumkarbonater i aflejringer fra PETM overgangen sammen med isotopanalyser af kulstoffet fra andre aflejringer bruges til at afgrænse de mulige koncentrationer af CO₂ (se figur 6)[5].



Figur 6: Mulige intervaller for CO₂-koncentrationen i atmosfæren før PETM og stigningen ($\Delta p\text{CO}_2$) under PETM. Forekomsten af en bestemt form af natriumkarbonat giver afgrænsningen vist med de mørkeblå linjer, og kalciumkarbonat i sedimenter under havbunden giver afgrænsningen vist med de lyseblå linjer. Tilsammen definerer de det skraverede grå område, og stjernen markerer et muligt PETM-scenarie.

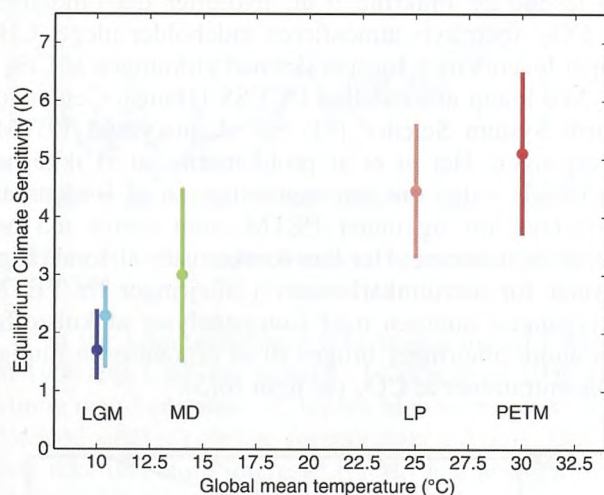
De mineralogiske og andre data fra PETM kan nu kombineres med modelkørsler for at beregne atmosfærens koncentration af CO₂ såvel før som i løbet af PETM episoden, ligesom kilden til CO₂-udslippene også kan vurderes. De sorte linjer i figur 6 viser den mængde kulstof (i Gigaton), der i modellen er nødvendigt for at øge temperaturen under PETM med 5°C, og de grønne linjer viser den såkaldte $\delta^{13}\text{C}$ -værdi³ kulstoffet skal have for at gengive den ændring i kulstofisotoperne, som fås fra sedimenterne.

Metan af biologisk oprindelse har typisk meget negative $\delta^{13}\text{C}$ -værdier på -60 promille (nederste grønne kurve), mens organisk materiale har værdier på omkring -25 promille (øverste grønne kurve).

Modelkørslerne kan nu bruges til at beregne, hvilken mængde CO₂, der er nødvendig for at frembringe en

temperaturstigning på 5°C og dermed kan vi beregne en klimafølsomhed for CO₂ under PETM.

Resultatet viste, at klimafølsomheden ikke er en konstant størrelse, men ser ud til at stige med opvarmningen. Værdien stiger således fra omkring 4,5°C (3,3–5,6°C) før PETM til 5,5°C (3,7–6,5°C) under PETM (se figur 7).



Figur 7: Den grønne bjælke (MD) viser klimafølsomheden i dag, hvor gennemsnitstemperaturen er ca. 14°C og klimafølsomheden er ca. 3°C. Den blå bjælke (LGM) er beregninger af klimafølsomheden under den seneste istid, hvor de globale gennemsnitstemperaturer var omkring 3–4°C lavere end i dag. De nye resultater viser klimafølsomheden sidst i palæocæn, den orange bjælke (LP), med temperaturer ca. 10°C højere end i dag, og under PETM (den røde bjælke), for 56 millioner år siden, hvor temperaturen var 15°C højere end i dag, og klimafølsomheden også var væsentlig højere.

Dermed bliver virkningen af CO₂ større i et varmere klima end i et koldere klima, og den globale opvarmning kan således få en selvforstærkende effekt. At klimafølsomheden stiger med temperaturen støttes også af nye og uafhængige beregninger fra sidste istid, som viser, at klimafølsomheden i det kolde istidsklima kun var 2°C og dermed noget lavere end i dag. Vi er dog i dag er meget langt fra de høje temperaturer i paleocæn, og effekten af den øgede klimafølsomhed derfor vil være mere beskedent.

Samtidig viser studiet, at den mængde kulstof, som drev PETM-opvarmningen, var af omtrent samme størrelse som de nuværende reserver af fossile brændsler på omkring 4.000 milliarder tons. Dengang gav det som nævnt en opvarmning på fem grader, og når stigningen trods alt ikke blev større, skyldes det, at det ekstra CO₂ blev tilført til en atmosfære, hvor CO₂-koncentrationen i forvejen var meget høj – formodentlig 800 ppm (stjernen i figur 6). I en sådan atmosfære vil et udslip på 800 ppm øge CO₂-indholdet til 1600 ppm, og dermed svare til en fordobling. I dag, hvor CO₂-indholdet i atmosfæren kun er 400 ppm, vil den samme mængde øge koncentrationen til 1200 ppm, men det svarer til at nutidens CO₂-niveau øges 3 gange. Dermed vil den samme mængde CO₂ som under PETM give en langt større temperaturændring i dag end i paleocæntiden, og det vil derfor være en dårlig ide at bruge alle reserverne af fossile brændsler.

Til gengæld ser det ikke ud til, at den ekstra op-

varmning under PETM har sat sig større spor i livet på landjorden. Det er svært at finde eksempler på dyrearter, der uddøde på grund af episoden. Faktisk udviklede der sig efter PETM en række nye arter, der er forfædre til nutidens heste, får, køer og primater – og således også mennesket. Det samme kan man ikke sige om dyrelivet i oceanet, hvor en lang række encellede organismer, de såkaldte foraminiferer, uddøde især i dybhavet. Samtidig blomstrede andre arter i oceanet op, så denne uddøen kan også skyldes andre effekter end den direkte opvarmning af havet – for eksempel manglende ilt og forurening på grund af de store mængder CO₂.

På klimatopmødet i Paris i 2015 lykkedes det i en sen natteftime forsamlingen at nå til enighed om, at den globale temperatur fremover kun må stige med 2°C. Om den målsætning vil lykkes, afhænger imidlertid ikke blot af, hvor store mængder drivhusgasser landene fremover vil udlede, men især af hvor stor virkningen af den ekstra mængde drivhusgasser er på atmosfærens temperatur.

Erfaringerne fra Jordens fortid peger derfor i flere retninger. Naturen trives tilsyneladende fint med høje temperaturer, men forskellen er, at vi i dag har meget mindre sammenhængende natur, fordi vi har inddraget store områder til landbrug og gennemskåret den resterende natur med veje og jernbaner. I forhold til tidligere vil nutidens dyre- og planteliv derfor have sværere ved at håndtere kommende klimaudsving.

Referencer

1. J. Fourier, Mémoire sur les Température du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* **7**, 569–604 (1827).
2. S. Arrhenius, On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (fifth series)* **41**, 237–275 (1896).
3. National Research Council, *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*.
4. G. Shaffer, S. M. Olsen, J. O. P. Pedersen, Presentation, calibration and validation of the low-order, DCESS Earth System Model (Version 1). *Geoscientific Model Development* **1**, 17–51 (2008).
5. G. Shaffer, M. Huber, R. Rondanelli, J. O. P. Pedersen, Deep time evidence for climate sensitivity increase with warming. *Geophysical Research Letters* **43**, 6538–6545 (2016).



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker på institut Rumforskning og Rumteknologi på Danmarks Tekniske Universitet samt medlem af Kvants redaktion.

Foreningsnyt – kommende foredrag i 2017

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
November				
6/11	19.15	Stjerner i par og stjerner i hobe	Karsten Brogaard	AS (Kbh)
13/11	19.15	Stjerner i par og stjerner i hobe	Karsten Brogaard	AS (Aarh)
13/11	19.30	Why Video Games could be the Key towards Artificial Intelligence (engelsk)	Sebastian Risi	SNU
18/11	14.15	Intromøde for Astronomisk Ungdom		AU (Aarh)
27/11	19.15	Kompakte stjerner	Niels Lund	AS (Kbh)
December				
4/12	19.15	Kompakte stjerner	Niels Lund	AS (Aarh)
4/12	19.30	Citizen Science: grænsefladen mellem menneskelig og kunstig intelligens	Jacob Sherson	SNU
Efter foredraget er der medaljeuddeling og reception				

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Aud.F/G122, 8000 Aarhus C.

AU (Aarh): Astron. Ungdom (Aarh), Institut for Fysik og Astronomi, AU, Ny Munkegade 120, Det Skæve Rum, 8000 Aarhus C.

SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturvidenskab.net, facebook.com/SNU1824).

Astronomisk Selskab lancerede i sommer et nyt initiativ målrettet unge, der er eller kunne blive interesseret i astronomi, og de tilbyder skoleforedrag, SRP-hjælp og observationsture. Så er du mellem 12 og 18 år, er Astronomisk Ungdom Danmark måske noget for dig. Se mere på astronomisk-ungdom.dk.

Børne- og unge-initiativet Kosmosklubben, som Astronomisk Selskab startede i 2013, fortsætter, men bliver fremover i højere grad målrettet dem under 12 år.

Mange af foredragene, som Selskabet for Naturlærens Udbredelse afholder, bliver optaget og redigeret af Eyvind Dekaa, hvorefter de kan ses på hans Youtube-kanal "Dansk Videnskab" (youtube.com/channel/UCh7-6NYc4pOKneR40wEi6lw/). Så var du forindret i at komme til foredraget, eller vil du høre det igen, så søg efter "Dansk Videnskab" på Youtube.

The screenshot shows the YouTube channel page for 'Dansk Videnskab', which has 33 subscribers. The channel banner features a purple and blue abstract image with the text 'Klima, politik & videnskab'. Below the banner, there are tabs for 'STARTSIDE', 'VIDEOR', 'PLAYLISTER', 'KANALER', and 'OM'. The 'VIDEOR' tab is selected, showing a grid of video thumbnails. The videos include:

- Thomas Bolander om kunstig intelligens (1:06:20)
- Kinetic impactor (36:39)
- Asteroidernes dag i Danmark (5:45)
- Årets danske forskningsresultat 2016 (51:33)
- Global opvarmning for 56mill. år siden - og i dag. (58:49)
- Fremtidens energilagring - næste generation af (1:02:31)
- Konventionel kernekraft og Thorium (44:35)
- Atomkraft v. Kasper Hewitt Klens (1:10:56)
- Er Jordens temperaturer pålidelige? (1:07:45)
- Er gassen ved at slippe ud af Urtidens super-drivhus? (39:51)
- Wake-up call for klimaet 67 visioner - for 1 år siden (1:02:31)

En positiv nyhed fra Mellemøsten

Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet



Den 16. maj, midt i Mellemøstens kaos, indviedes SESAME, en facilitet for intens synchrotronstråling. Navnet står for Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East. Projektet er født ud fra ønsker om at styrke naturvidenskaben i området og ud fra troen på, at videnskabeligt samarbejde kan være en lille skridt henimod bedre relationer mellem landene. De involverede partnere er Cypren, Iran, Israel, Jordan, Pakistan, Det Palæstinensiske Selvstyre, Tyrkiet og Ægypten.

Ideen til SESAME opstod omkring 20 år tidligere, og efterhånden er det lykkedes

det at skaffe hjælp og støtte fra mange sider, bla. CERN og EU. Jordans kong Abdullah II har støttet med byggegrund og bygninger og, meget vigtigt, et løfte om at forskere fra alle lande vil få adgang. Placeringen er ved Allan, 25 km nordøst for hovedstaden Amman. To beamlines er klar, mens finansieringen af drift og yderligere 14 beamlines er ikke sikret. Synchrotronens elektronenergi er 2,5 GeV, kun lidt mindre end for eksempel SOLEIL ved Paris eller MAX IV ved Lund.

Fotos:
SESAME (sesame.org.jo)

