

KVANT December 4 2011

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 22. årgang

- 
- MOLEKYLÆRE MOTORER
 - ÅRETS NOBELPRIS I FYSIK
 - OM ENHEDEN MOL I SI-SYSTEMET
 - HÅND OG ÅND I OLE RØMERS MEKANISKE ASTRONOMI
 - SOLAKTIVITET OG KLIMAÆNDRINGER
 - KVANT-NYHEDER

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet

Universitetsparken 5

DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af

Astronomisk Selskab,

Dansk Fysisk Selskab,

Dansk Geofysisk Forening,

Selskabet for Naturlærens Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),

Christianshavns Gymnasium

Torsten Freltoft,

Sophion Bioscience A/S

Mogens Esrom Larsen,

Institut for Matematiske Fag, KU

Sven Munk (nyhedsredaktør)

John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør),

Aurehøj Gymnasium

Jens Olaf Pepke Pedersen,

DTU Space

Finn Berg Rasmussen,

Ørsted Lab, Københavns Universitet

Svend Erik Rugh

Korrektur

Natalia Golubeva,

Aarhus Universitet

Torben Westerberg

Foreningsrepræsentanter

Lone Djernis Olsen (KIF)

Torben Lund Skovhus (SNU),

Teknologisk Institut

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.

Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr

1/4 side: 1600 kr.

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

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

Produktionsplan

Nr. 1-12 udkommer ca. 15. marts

Nr. 2-12 udkommer ca. 15. maj

Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Hånd og ånd i Ole Rømers mekaniske astronomi

Karin Tybjerg 3

Om enheden mol i SI-systemet

Finn Berg Rasmussen 10

Årets nobelpris i fysik bygger videre på resultater opnået af danske forskere

Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen og Leif Hansen 11

Annonce: KVANT samlesæt 16

Foreningsnyt – foredrag i foråret 17

Planetkalender for København 2012

Martin Götz 18

Stjernehimlen

Michael Cramer Andersen 19

KVANT-nyheder

Sven Munk og John Rosendal Nielsen 20

Molekylære motorer: Små systemer langt fra ligevægt

Natalia Golubeva 22

Solaktivitet og klimaændringer

Jens Olaf Pepke Pedersen 26

Aktuelle bøger

John Rosendal Nielsen og Michael Cramer Andersen 32

Afkølingstid – breddeopgave 45 og 46 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 34

Rest fra Jordens fødsel fundet

John Rosendal Nielsen Bagsiden

Billedet på forsiden viser

lynneslag under den totale måneformørkelse tidligere på året (15. juni). Den græske astrofotograf Chris Kotsiopoulos, havde efter måneders forberedelser fundet en smuk lokalitet som baggrund, nemlig den græske ø Ikaria kendt for sit mærkelige klippelandskab, og stillet fotoudstyret parat.

En række truende tordenskyer blokerede imidlertid for udsynet. Heldigvis klarede det lidt op i ca. 10 minutter midt under totaliteten, hvor han kunne tage dette smukke billede. Tålmodigheden blev belønnet. Den formørkede måne ses som en lille rød skive.



KVANT udsendes gratis til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser 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), samt DTU Fotonik, DTU Fysik og DTU Nanotech.

Hånd og ånd i Ole Rømers mekaniske astronomi

Af Karin Tybjerg, Medicinsk Museion, Københavns Universitet

Rømers videnskabelige arbejde er præget af en utrolig spændvidde mellem opdagelser af stor teoretisk betydning og håndgribelige tekniske løsninger på praktiske problemer. Forholdet mellem videnskab og praktik portrætteres til tider som modsætningsfyldt hos Rømer, men skal her i stedet ses som en produktiv dynamik, hvor sansbarheden, håndgribeligheden og mekanikken er en kreativ drivkraft for Rømer og udgør den astronomiske videns fundament.¹

I det følgende vil jeg karakterisere Rømers astronomi – ikke ud fra hans videnskabelige resultater eller hans astronomiske metoder – men ved at undersøge, hvordan Rømer *præsenterede* sin astronomi, og derigennem afdække hans idealer for astronomisk arbejde. Jeg vil tage udgangspunkt i de opgaver, han arbejdede med i sit tidlige liv, nemlig udgivelsen af Tycho Brahes observationer og hans arbejde med mekaniske projekter ved Académie Royale des Sciences (Det Kongelige Videnskabernes Akademi, herefter Akademiet). I begge disse opgaver var observationer og instrumenter – den sansbare og den tekniske side ved astronomien – i centrum. Rømer var selvfølgelig ikke unik i sit fokus på observationer og instrumenter, men for ham var de ikke blot midler til at undersøge verdens indretning. Nej, observationer og instrumenter skulle selv fremvise de fysiske fænomener og overbevise om en given teoris rigtighed. Rømer fremstillede astronomien efter samme idealer som samtidens “mekaniske filosoffer”, som gennem deres eksperimenter påstod, at de lod naturen tale direkte. Om periodens fokus på eksperimentel viden se fx [2] og [3].

Rømer skrev kun lidt om sin astronomi, men i hans tilbageholdenhed gemmer sig en vigtig indsigt i hans idealer for videnskabelig fremstilling inden for astronomien. Periodens fokus på visuelle demonstrationer, detaljeret observation og en mekanisk produktion af data hvilede så tungt på hans skuldre, at det vanskeliggjorde publikation. Rømer krævede at blive læst gennem sine instrumenter og observationer snarere end gennem sin egen stemme, men af samme grund holdt han sig tilbage med at skitsere sine konklusioner, før de var fuldstændig overbevisende demonstreret af instrumenter og observationer.

Rømer fik aldrig udgivet et hovedværk inden for astronomien, men konturerne af et værk kan gisnes ud fra efterladte afhandlinger samt otte kobberplader, som sandsynligvis blev udfærdiget til at illustrere et samlet værk (se [4], s. 96, og [5]). I min karakteristik af Rømers astronomi antager jeg, at de instrumenter, som er afbildet på kobberpladerne, var centrale for Rømers astronomi sammen med de observationer, som han gennem hele sit liv søgte at perfektionere til udgivelse. Efter en

beskrivelse af arbejdet med Tycho Brahes observationer og miljøet ved Akademiet, vil jeg derfor analysere Rømers behandling af de instrumenter, som han senere fik afbildet på kobberstik, samt hans kommentarer til observationerne, for at vise hvordan Rømer lader sine observationer og instrumenter fremstille astronomien.

Tycho Brahes observationer

Rømer begyndte sin astronomiske karriere i huset hos professor Rasmus Bartholin, hvor han over en årrække assisterede ham med at redigere Tycho Brahes observationer og gøre dem klar til udgivelse. Med dette projekt fik Rømer en gennemgribende træning i at efterbehandle astronomiske observationer samt indgående kendskab til et banebrydende arbejde inden for den observationelle astronomi. Han lavede beregninger på observationer fra forskellige instrumenter og blev introduceret i, hvordan Tycho arbejdede med at eliminere systematiske fejl. Tycho Brahe fortæller, hvordan han ved at variere observationer på forskellige instrumenter kan opdage fejl i disse,² og denne ide med at bruge instrumentet selv til at opdage fejlkilder bliver senere central hos Rømer. I redaktionsprocessen lærte Rømer også Tycho Brahes metoder til at opnå stadig mere præcise målinger at kende indefra – og forstod derved instrumenternes rolle for kvaliteten af observationerne. Rømers kendskab til Tycho Brahe gik i høj grad direkte gennem hans data: Rømer “læste” Tychos projekt gennem hans observationer og lærte, at et astronomisk projekt *kan* læses direkte gennem observationerne.

Projektet gjorde også værdien af gode observationer klar, da Tycho Brahes eftermæle i høj grad var baseret på hans observationer. I den franske filosof, astronom, matematiker og præst Pierre Gassendis biografi om Tycho fra 1654 beskrives han netop som en stor empiriker, der utrætteligt indsamler stadig mere præcise observationer – et billede som i høj grad afspejler Gassendis egne interesser, men som måske også var et tidstypisk billede af Tycho (se [7], s. 221-222). Tychos observationerne var ydermere af en sådan kvalitet, at det var vigtigt for astronomer på Rømers tid at kunne sammenligne egne nye observationer med dem. Da et nyt stort observatorium blev bygget i Paris i forbindelse

¹ Denne artikel er genoptrykt med tilladelse fra *Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste*, Aarhus Universitetsforlag (2011) [1].

² Fx skriver Tycho i introduktionen til *Mechanica*, at med flere instrumenter kan man bruge dem til at checke hinanden og opdage fejl, [6], s. 6, lin. 35-37, og senere under instrumentbeskrivelserne, at den kyndige vil kunne læse fejlene ud af observationerne, hvis de bliver varieret, [6], s. 19, lin. 1-3.

med det nyoprettede Akademi, blev et af dets medlemmer, Jean Picard, sendt til Danmark for at måle den præcise placering af Tycho Brahes observatorium på Hven. Ved at bestemme afstanden mellem Hven og Paris i længde- og breddegrader kunne man sammenligne Tycho Brahes resultater med observationer foretaget i Paris.

Picard tog kontakt til Bartholin, og Rømer blev helt naturligt inkluderet i opgaven. Han kom til at stå for en række observationer på Hven af Jupiters måner, som blev brugt til at bestemme afstanden til København og derefter til Paris (se Pedersens artikel ("Jean Picard og Ole Rømer på Hven") i [1]). Rømer blev herved skolet i den praktiske observationskunst af Picard, som selv havde deltaget i kartografiske projekter for Akademiet, se [8].

Senere i sit liv skrev Rømer, at han ved hjemkomsten til Danmark vendte tilbage til Tycho Brahes projekt med at bestemme planeters og fiksstjerner positioner, og at han i årene med redaktionsarbejdet var blevet dybt fortrolig med Tychos principper (se senere i afsnittet "Arven fra Tycho Brahe"). Det er interessant at overveje, hvad han identificerer som Tychos principper. I Rømers bibliotek fandtes flere værker af Tycho Brahe, bl.a. hans *Mechanica (Astronomiae instauratae mechanica)* eller *Den nye astronomis mekanik*, en samling af breve og dokumenter, *Epistolæ Astronomicae (Astronomiske breve)*, og *Astronomiae Instauratae Progymnasmata (Den nye astronomis øvelser)*, se [9]. Disse værker indeholdt detaljerede beskrivelser af Tychos instrumenter, og Tychos stadige jagt på at forbedre instrumenternes præcision blev fortsat med Rømers instrumentudvikling. *Mechanica* blev publiceret i et forsøg fra Tychos side på at opnå Rudolf II's gunst, men det blev oprindeligt samlet som en første del af et værk om astronomien.³ Tycho Brahes astronomi tager således sit udgangspunkt i instrumenterne, hvis konstruktion og anvendelse beskrives minutøst.

Da den danske kong Frederik III, som havde igangsat projektet med at udgive Tycho Brahes observationer, blev afløst af den mere krigsinteresserede Christian V, fik observationerne mindre opmærksomhed, hvorfor Rømer fik tilladelse til sammen med Picard at tage til Paris og søge at udgive observationerne der.

Mekanik ved Akademiet

Akademiet blev grundlagt i 1666 på foranledning af Louis XIV's finansminister Colbert som en forskningsinstitution, der skulle servicere staten. Gennem viden skulle Akademiet udvikle handel, industri, medicin og militær. Det anvendelsesorienterede udgangspunkt spillede sammen med en betydelig indsats inden for grundlæggende teori, og Akademiet kombinerede således kommercielle og akademiske interesser [10].

Ved oprettelsen af Akademiet blev der slået en medalje. Sammen med påskriften "Det Kongelige Videnskabernes Akademi 1666" viste den Minerva – kundskabens gudinde – med en ugle ved sine fødder

og symboler på astronomi, kartografi, anatomi, botanik og kemi. På medaljens bagside står der "Naturae investigandae et perficiendis artibus", "For at undersøge naturen og fuldende de tekniske videnskaber". Hermed udtryktes Akademiets dobbelte formål: kontinuerlig undersøgelse af naturen og færdigudvikling og anvendelse af nyttig viden. Akademiet var ligesom det engelske Royal Society inspireret af den engelske empiriker Francis Bacon's værk *Ny Atlantis* (1626), hvor han beskriver en ny type lærdomsinstitution, *Salomon's House*. Bacon argumenterede for en videnskab, som var empirisk og brugbar samt stræbte efter teknologisk fremskridt, og hans fokus på førstehåndsviden, eksperimenter og anvendelsesorienteret viden findes i flere af de videnskabelige akademier og selskaber, som fulgte.

Maskiner var allestedsnærværende på Akademiet. På observatoriet, som selvfølgelig også var astronomiens hovedsæde, fandtes en sal med udstillede maskiner og modeller af maskiner [11]. Den blev oprettet i 1668 og indeholdt bl.a. et brændspejl, modeller af industrielle, militær- og landbrugsmaskiner, astronomiske instrumenter og et Månekort. En besøgende fortæller, hvor imponeret han var over samlingens anvendelighed for militærteknikere og undervisere i fortifikation og navigation [10]. Det er således tydeligt, at konkrete fysiske maskiner blev opfattet som en vidensressource i sig selv. Maskinerne demonstrerede ikke bare den tekniske know-how i Frankrig – de materialiserede også teknisk og videnskabelig viden.



Figur 1. De Kongelige Franske Akademier for Videnskab og Kunst. Billedet minder om Rafaels portræt af en anden lærdomsinstitution, Skolen i Athen, men viser et væld af de maskiner, håndværk, plancher og instrumenter, som materialiserede Akademiernes viden. Tryk af Sebastian Le Clerc 1698 (Bibliothèque Nationale, Paris).

I sit historiske værk om Académie Royale des Sciences fastslår Bernard le Bovier de Fontenelle, som var Akademiets sekretær, at Akademiet omkring tidspunktet for Rømers ankomst i 1672 ikke ignorerede den sansbare eller håndgribelige del af mekanikken; i 1675 giver finansministeren Colbert ordre til, at der skal skrives en afhandling om mekanik, som afdækker såvel de teoretiske principper som alle håndværk og tekniske videnskaber i Frankrig. Diskussionerne ved møderne gik straks i gang, og i en mødeprotokol fra den 6. juli står der, at "Hr. Rømer tilbød at demonstrere

³Brev til Caspar Peucer 13. september 1588.

sin opfindelse”, som viste sig at være nogle særlige epicykloide tandhjul, se artiklerne af Nielsen (“Ole Rømers tandhjul”) og Darnell (“Ole Rømers planetmaskiner”) i [1].

Akademiet havde yderligere den funktion at bedømme maskiner, som blev indsendt til godkendelse. Medlemmerne, deriblandt Rømer, bedømte instrumenterne, og fandt de nåde for Akademiets øjne, fik de et svar med formuleringen “godkendt af Académie Royale des Sciences”. Rømers første optræden ved Akademiets møder, som er nedfældet i referaterne, var netop en rapport om to maskiner.⁴ Alle de godkendte maskiner – heriblandt de maskiner, som Akademiets egne medlemmer demonstrerede – blev samlet i ét værk, og det er tydeligt, at maskiner blev opfattet som en central del af Akademiets intellektuelle produktion [12].

I Akademiets tidlige historie blev der udfærdiget lister over projekter af særlig interesse for Akademiet. Den hollandske fysiker og matematiker Christiaan Huygens, som var én af de højst lønnede af forskerne, lavede en samlet liste over forskningsprojekter for områderne fysik og mekanik. Listen er påvirket af ønsket om både at skabe praktisk anvendelige resultater og tage de spørgsmål op, som samlede den videnskabelige interesse i perioden (gengivet i F&T, s. 117-119).

I beskrivelsen af mekanikkens arbejdsområde tager Huygens udgangspunkt i den antikke tilgang til mekanikken gennem studiet af de simple maskiner (trissen, vægtstangen, spillet, skruen, kilen). Han modificerer dog den antikke fremgangsmåde ved ikke at inkludere kilen og skriver endvidere, at teorien kan forbedres. Efter klassisk forbillede søger han et fælles princip, men Huygens understreger også vigtigheden af at inkludere den eksperimentelle side og har bl.a. studiet af dyrs trækkræfter med på listen. Den praktisk anvendelige forskning integreres på den måde i den antikke teoretiske tradition. Rømer arbejder også aktivt både inden for mekanikkens praktiske og teoretiske aspekter med teoretiske forelæsninger ved Akademiets lørdagsmøder og afhandlinger om hestes trækraft på et skråplan. Igen med en fornyelse af den antikke dagsorden foreslår Huygens ikke bare at undersøge vandets statik, men også måle mængden af rindende vand, og Rømer demonstrerer et instrument til dette formål. I en anden redegørelse over mekanikken nævner Huygens ballistikken, og Rømer udvikler ballistiske teorier og eksperimenter til undervisningsbrug for Louis XIV's søn.

Huygens skrev også en liste med forskningsområder inden for fysikken og astronomien, og også her er der næsten fuldstændigt sammenfald mellem listens emner og Rømers aktiviteter i Akademiet. Inden for astronomien opremser Huygens: at finde meridianen for Paris, at bestemme fiksstjernernes position, at måle Solen og Månens diameter, at observere størrelsen af brydningen i atmosfæren, at perfektionere kikkerter og mikroskoper, at observere planeternes pletter samt

at observere Jupitermånerne og lave tabeller. Rømer skriver afhandlinger, observerer og designer instrumentering til alle disse opgaver. Inden for de mere fysiske emner arbejdede Rømer – også efter Huygens' liste – på at fastslå et længdemål ved hjælp af et pendul, at hæve vand, at undersøge kraft ved legemers sammenstød samt selvfølgelig at observere, om lyset overføres på et øjeblik.

Rømers præsentationer af projekter er opført i mødeprotokollen, som dermed tegner en profil over hans arbejde. Hvis man skuer ned over listen af afhandlinger og aktiviteter, som optog Rømer, mens han opholdt sig ved Akademiet, kan det tage sig ud, som om han har beskæftiget sig med idiosynkratisk udvalgte emner. I virkeligheden fulgte han nærmest til punkt og prikke de fokusområder, som var blevet udstukket af Colbert og ledende medlemmer af Akademiet. Kombinationen af opgaver inden for astronomi og mekanik viser, at der var en høj grad af samklang mellem Akademiets intellektuelle stil og Rømers talenter inden for observationel astronomi, hans teoretiske ekspertise og sans for instrumentelle løsninger.

Rømer fremviser instrumenter på Akademiet

I Akademiets mødeprotokoller får vi desuden et indtryk af, hvordan Rømer præsenterede videnskabeligt arbejde. Rømer fremlægger sit arbejde som afhandlinger, demonstrationer af instrumenter, fremvisning af instrumenter, observationer, kommentarer til observationer og oplæsning af observationer. Observationer og instrumenter spiller altså hovedrollen, og Rømers kommentarer understøtter blot præsentationen af det fysiske instrument eller observationerne. I næsten alle tilfælde medbringer Rømer et instrument eller nogle observationer, når han fremlægger i Akademiet.

Når de mekaniske apparater fremvises, og deres konstruktion beskrives, er det med sans for detaljerne. De af Rømers afhandlinger, som er nedskrevet i referaterne af Akademiets møder, koncentrerer sig om at give nøjagtige beskrivelser af tekniske opfindelser. Rømers måde at præsentere viden på – som han lærer det på Akademiet, og som han desuden har haft talent for – er den direkte fremvisning af maskiner, instrumenter og astronomiske observationer.

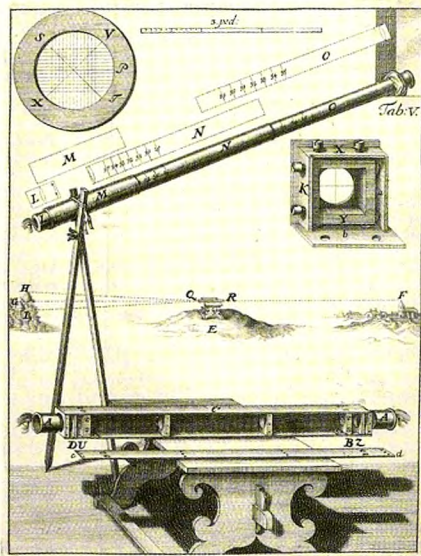
Den 19. december 1676 “fremviser [Rømer] et instrument af egen opfindelse. Han oplæser brugsanvisningen til dette instrument” (fra Akademiets referater, *Procès-Verbaux*, F&T, s. 629). Det drejer sig om gitterrøret, som var en kikkert med to okularer og et trådgitter.⁵ Ved at flytte på okularerne kan himmellegemer i forskellig størrelse passes ind i trådgitteret, så man ikke behøver flere instrumenter til at måle objekter af forskellig størrelse. Det kunne bruges til at observere formørkelser eller til at måle diameter på himmellegemer.

I sine fremlæggelser fokuserer Rømer på en detaljeret beskrivelse af instrumentet: Hvordan det er

⁴Det Franske Videnskabernes Akademi, *Procès verbaux*, 1. februar 1676, F&T, s. 628.

⁵Beskrivelsen af instrumentet er publiceret af Rømers elev Horrebow på basis af et manuskript fra Rømers hånd, [4], s. 350; [13], s. 64-95.

konstrueret, hvilke materialer der er brugt, hvordan man indstiller det og foretager observationer med det. Rømer vægter og understreger instrumentets præcision. Han skriver bl.a. at "[d]et er ikke spildt ulejlighed at viske disse linjer ud mere end ti gange og tegne dem igen, indtil det ved forskellige undersøgelser på alle leder og kanter står klart, at de sidder fuldstændig rigtigt og svarer til forventningerne." (F&T, s. 351). Ligesom Tycho Brahe i sin *Mechanica* skriver Rømer eksplicit, at måleskalaerne ofte kræver flere forsøg for at blive tilfredsstillende (TBOO, VI, s. 18.42-19.3).



Figur 2. Tryk af Rømers gitterrør og amfioptr, som han beskrev og demonstrerede for Akademiets medlemmer [13], Tab. V).

Han gennemgår i detaljer, hvordan en måleskala afmærkes på kikkertrøret. Processen er iterativ og baseret på målinger af Månen, når den er tættest og fjernest fra Jorden. Skalaen kan bruges til at måle den tilsyneladende størrelse af himmellegemer. Han giver derefter en geometrisk demonstration, som "lægger hele sagen frem for øjnene af én, og som med fordel kan bruges til at fremme og bestyrke den ovenfor fremlagte metode til mekanisk at inddele kikkerter." (F&T, s. 354). I sidste ende er det dog den mekaniske metode, som Rømer foretrækker. Den geometriske metode forudsætter kendskab til glassets brydninger, så det er "bedre at indrette vort teleskop med den ovenfor anførte mekaniske metode." (F&T, s. 355). De første inddelinger kaldes også "grundlæggende" (F&T, s. 353), så det mekaniske arbejde fremstilles som systematisk i tråd med den geometriske demonstration.

Samme dag fremlagde Rømer en anden opfindelse, nemlig et teleskop eller sigteinstrument, med hvilket man kan sigte fra begge ender, dvs. man kan måle højder i modsatte retninger uden at skulle vende instrumentet – det såkaldte amfioptr. Det kunne bruges til at lave højdemålinger både inden for astronomi og landmåling. Igen giver han en udførlig beskrivelse af konstruktionen og brugen af instrumentet med en liste over praktiske anvendelser. Instrumentet er et hjælpeinstrument, og

Rømer gentager, at "brug og justering bliver enklere", og der kan spares tid ved at bruge instrumentet. Sigteinstrumentet kan også gøre kvadranter og oktanter mere fleksible, da de kan måle en større vinkelafstand, når man kan måle fra begge ender. Han slutter med at sige, at han har sagt tilstrækkeligt om fremstillingen og behandlingen af instrumentet. Når han har udeladt visse typer observationer, forklarer han, er det, fordi de er "af en sådan art, at de vil kunne ses og forstås lettere ved et enkelt øjekast på selve apparatet..." (F&T, s. 381). Brugervejledningen er sekundær i forhold til studiet af selve det fremviste instrument.

Rømer arbejdede gennem hele sin karriere på at konstruere mekaniske og instrumentelle løsninger med stadig større præcision. Samtidig lægger han altid vægt på, at instrumenterne skal gøre den praktiske side af astronomien nemmere. I beskrivelsen af mikrometeret skriver han, at han, da han fremlagde opfindelsen i Akademiet, blev gjort opmærksom på, at opfindelsen var gjort før ham. Han blev pinligt berørt ved den blotte tanke om, at nogen kunne tro, at han fremlagde et instrument, som ikke var hans egen opfindelse. Han forsvarede sin egen opfindelses særegenhed med, at den var lettere at håndtere, at den var fleksibel, og at den kunne bruges i mange sammenhænge. Præcision, enkelhed i brug og fleksibel anvendelse er værdier for den mekaniske del af astronomien.

Som bemærket er Rømers fremstillinger i Akademiet næsten altid direkte relateret til instrumenter og observationer. Rømer fremviser og demonstrerer instrumenter og observerer eller læser højt af observationer. Han foretrækker instrumentbeskrivelsen frem for den geometriske demonstration og foretrækker en egentlig fremvisning frem for beskrivelser. Instrumenter, brugen af instrumenterne og observationer er primære. Dette galdt også for hans undervisning af Louis XIV's søn, som bl.a. inkluderede ballistiske demonstrationseksperimenter.

Planetmaskinerne

Mellem 1677 og 1679 byggede Rømer et antal maskiner til at demonstrere planeternes bevægelse mekanisk. Han byggede først en maskine, som viste Jupiter og dens måner (1677). Ved at dreje på et håndtag kunne man se månerne forsvinde ind bag Jupiter og komme frem igen. Maskinen var relateret til det kolossale arbejde, der blev gjort på Akademiet for at kortlægge Jupiters måners bevægelser og Rømers egen opdagelse af lysets tøven. Det er tankevækkende, at han aldrig selv skrev om lysets tøven, ud over de breve han skrev til Huygens, men at han byggede en model, som demonstrerede, med hvilke observationer han havde opdaget lysets tøven. Den store diskussion i Akademiet var baseret på en observation af en "forsinkelse" i Jupiters månens tilsynekomst i forhold til tabellerne.

I 1678 designede Rømer en Saturnmaskine og i 1679 et sæt bestående af en planetmaskine og et eklipsarium (som viser sol- og måneformørkelser); de to sidstnævnte blev bygget af Akademiets instrumentbygger Isaac Thuret i 1680. Rømers planetmaskine var den første

model, som demonstrerede det kopernikanske verdensbillede, og den viste planeterne positioner hundrede år fremad og hundrede år bagud. Planetmaskinen var et elegant objekt, som favnede alle Akademiets interesser. Cassini blev imponeret: Planetmaskinen var en hurtig og nem måde at finde planetpositioner til planlægning af observationer, da man blev fri for at slå op i tabellerne, og samtidig blev maskinerne brugt af Solkongens hof som gaver til udenlandske statsoverhoveder for at demonstrere Frankrigs tekniske og videnskabelige formåen.

Eklipsariet viste formørkelser af Sol og Måne og var direkte baseret på Tycho Brahes astronomiske observationer. Formørkelsesmaskinen virker ved, at Solens, Månens og Jordens indbyrdes stillinger gentager sig i nogle cykler, og på baggrund af kendte formørkelser kan man derfor forudsige nye. Eklipsariet beregner mekanisk konsekvenserne af Tycho Brahes observationer.

Planetmaskinerne er imponerende demonstrationer af Rømers teoretiske og tekniske snilde, men de er mere end det i vores sammenhæng. De demonstrerer Rømers ideal for videnskabelig præsentation, fordi maskinerne selv fremviser de teorier, der ligger bag dem, og fungerer som mekaniske observationstabeller. De demonstrerer astronomisk viden mekanisk, og, som vi skal se til sidst i artiklen, prøver Rømer at få sine instrumenter og observationer til at demonstrere hans teorier på lignende måde.

Arven fra Tycho Brahe: observationer og instrumenter

Efter omkring 10 år i Akademiet blev Rømer kaldt hjem til København af Christian V, som havde fået øjnene op både for Rømers arbejde med springvandene i Versailles, og for hvordan Akademiets tekniske og naturvidenskabelige arbejde understøttede kongemagten. Kongen udnævnte Rømer til kongelig matematiker og medlem af kommissionerne for gadebelægning og vandforsyning i København.

Fra København skriver Rømer til Akademiet med nye observationer af en måneformørkelse. I brevet fortæller han også, at han ønsker at holde kontakten med Akademiet fra den nye verden, han er blevet revet bort til, og fortsætter derefter med at kommentere på forholdet mellem astronomi og mekanik:

Alle mine astronomiske forsøg er faldet ud efter mit ønske. Selv om Astronomia på tåbelig vis er blevet latterliggjort på grund af sin moder Astrologia, forsøger hun her under sin tjenerinde Mechanics beskyttelse at komme til live igen og leve. Kongen er utrolig interesseret i anvendt mekanisk matematik. På grundlag af vores hydrostatiske paradokser har jeg fremlagt og anvendt adskilligt med det til følge, at astronomien har fundet lettere adgang til den kongelige gunst. Jeg er ved at indrette et observatorium... (F&T, s. 213-214).

Det ambivalente i forholdet astronomi og mekanik kommer tydeligt til udtryk. Astronomien beskæftiger

sig med højere ting end mekanikken, og mekanikken er blot dens tjenerinde. Samtidig har astronomien brug for mekanikken, og den trives bedre under mekanikken end under sit mødrene ophav, astrologien. Forholdet har en videnskabelig side: Astronomien behøver mekanikken for at nå sine resultater; og en pragmatisk side: Magthaverne har brug for løsninger på mekaniske problemer (såsom vandforsyning), og mekanisk kompetence kan derfor bane vejen for investering i astronomien.

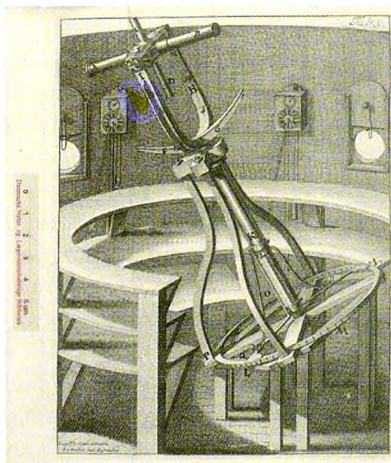
Nogle år senere bliver Rømer udnævnt til direktør for Rundetårn og professor i astronomi. Som allerede nævnt skriver han, at han efter hjemkomsten til København ændrede sin astronomiske dagsorden, og at han fokuserede på det projekt, han læste ud af Tycho Brahes observationer. Hans ambition er at fuldende Tycho Brahes værk med en gennemgang, som består af beskrivelser af instrumenterne, beskrivelser af deres brug og selve observationerne. Han vil demonstrere rigtigheden af det kopernikanske verdensbillede, men med Tychos metoder, som han fik ind under huden ved redigeringen af hans observationer:

Siden jeg var blevet fuldstændig fortrolig med Tychos principper i de fire år, som jeg havde brugt på forberedelsen af en udgave på baggrund af hans manuskripter, har jeg haft den del af astronomien for øje, som drejer sig om at finde og så præcist som muligt at bestemme fiksstjernernes og planeterne placeringer og bevægelser, og jeg har aldrig ment, at den prestigefyldte del af astronomien, som beskæftiger sig med pletter, måner og planetbevægelser, kan sidestilles med den første. Derfor har jeg arbejdet på at tilpasse alle det forrige århundredes kunstfærdige opfindelser til brug for en kraftfuld astronomi, idet jeg var sikker på, at jeg skulle tage observationernes objekter og stoffet fra Tycho, hvorimod midlerne skulle tages fra senere metoder (se F&T, s. 310).

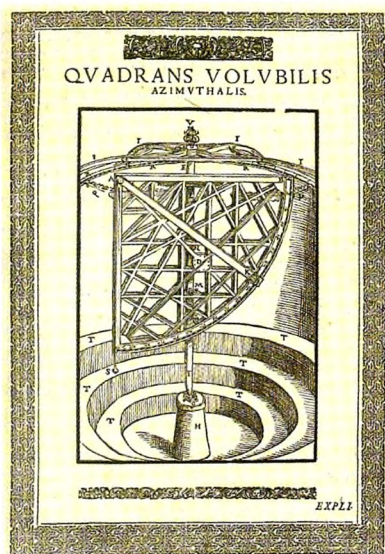
Rømer tager afstand fra nogle af de aktiviteter, han beskæftigede sig med på Akademiet, bl.a. observation af planeterne pletter og af Saturns og Jupiters måner – det selv samme arbejde, som vandt ham berømmelse med opdagelsen af lysets tøven. Han koncentrerer sig om at kortlægge rummet, men bruger de instrumenter, som blandt andet blev udviklet og beskrevet af ham selv under hans ophold i Paris.

Som direktør for Rundetårn var han også ansvarlig for at udstyre observatoriet med nye astronomiske instrumenter. Han fik bygget to hovedinstrumenter: en azimutal- og en ækvatorial-maskine (dvs. kikkerter, der drejede henholdsvis om en akse med samme hældning som Jordens og om en akse vinkelret på Jordens overflade). I det astronomiske værk, som Rømer sandsynligvis planlagde at udgive, viser tavlerne de instrumenter, han må have ment, var hans vigtigste: Jupitermaskinen, instrumenterne på Rundetårn, en kikkert i hans hjem i St. Kannikestræde og meridiankredsen fra det landobservatorium, han observerede fra i sine sidste år.

Hvis vi kikker nærmere på stikkene af instrumenterne i Rundetårn, afbilder de ikke en instrumenttype – det er snarere et *portræt* af et specifikt instrument (se [14], s. 139). De er også i høj grad en hyldest til Tycho Brahes *Mechanica* – Tycho Brahes værk om astronomiske instrumenter, hvor han, som nævnt, beskriver sine instrumenter i detaljer: deres konstruktion og brug (*usus et fabrica*). Rømer følger samme model. Begge er også optaget af at minimere fejlene på målingerne. Observationerne skal sammen med en beskrivelse af instrumenterne kunne stå alene. Instrumentet demonstrerer observationernes troværdighed, og som Rømer også fremhæver, så kan fejkilder spores ved at studere det instrument, som observationerne er blevet foretaget med.



Figur 3. Rømers ækvatorialmaskine i Rundetårn [13].



Figur 4. Tycho Brahes drejelige azimutalkvadrant fra hans *Mechanica* [6], VI, s. 32).

Afbildningen af store astronomiske instrumenter som portrætter bliver gængs praksis i det 18. århundrede, hvor de store observatorier publicerede billeder af instrumenter sammen med deres observationskataloger. Et billede af instrumentet gav autoritet til observationerne, fordi kvaliteten af observationerne i høj grad afhang af kvaliteten af instrumenterne, og Rømers illustrationer

havde sandsynligvis netop dette formål – at bringe læseren så tæt som muligt på selve observationssituationen.

Rømer følger Tycho Brahes fokus på observationer til det sidste. På sit dødsleje kopierer Rømer Tycho Brahe ved at overlevere sine observationer til sin konfessor, på samme måde som Tycho selv umiddelbart før sin død overleverede sine til efterfølgeren Kepler. De var hans livsværk. På samme måde som Rømer lærte Tycho Brahes metoder at kende direkte gennem studiet af observationerne og instrumentbeskrivelserne, ønskede Rømer, at hans observationer skulle publiceres for eftertiden sammen med hans beskrivelser af instrumenter og observationsmetoder.

Observatorier, observationer og mekanik

Rømer fik i sine sidste leveår mulighed for at bygge et lille observatorium på sin svigerfars ejendom uden for København. Her kunne han opstille det instrument, han havde lavet forarbejdet til dels i Rundetårn, dels i sit lille husobservatorium, som Rømer havde oprettet i sit logi i St. Kannikestræde. Her havde han opstillet det første såkaldte passageinstrument – “solidt, fast og enkelt” (F&T, s. 310). Ved at låse kikkerten fast i nord-syd-retningen og dermed kun måle højder på himmellegemerne, var det muligt at reducere instrumentfejl betragteligt og – måske endnu vigtigere – at afsløre fejkilder ved kredsens inddelinger. Rømer kunne med sine cirkulære kredse til aflæsning af målinger krydschecke sit instrument for fejl på en endnu mere effektiv måde, end Tycho Brahe kunne ved at sammenligne flere instrumenter.

Rømer beskrev sine planer for landobservatoriet i et brev til sin gode ven, filosofen og matematikeren Georg Wilhelm Leibniz. Brevet var et svar på Leibniz’ forespørgsel om råd til, hvordan man kunne indrette et lille observatorium til én eller to observatorer. Rømer svarede, at han ikke kunne give sine råd om observatorium og instrumentkonstruktion ordentligt i et brev – han ville hellere gøre det mundtligt.

Rømers tøven med at publicere og præference for mundtlig overlevering eller – endnu bedre – direkte demonstration af instrumenterne, blev også udtrykt af Horrebow i hans kommentar til brevet til Leibniz. Horrebow skrev, at Rømer kun kunne forklare sit arbejde til én, som er fortrolig med at observere, og som “med egne hænder” kan dreje instrumenterne og bruge sine egne Øjne og derved gøre sig fortrolig med deres konstruktion og anvendelse. Hvis ikke det blev til noget, vil det, sagde salig Rømer, vise sig, når observationerne engang ved skæbnens gunst bliver offentliggjort (se [13], kap. 17; [5], s. 109).

Rømers resultater kan altså forstås på to måder: ved at observere med instrumenterne selv eller gennem observationerne. Det var praksis, dvs. instrumenterne og observationerne, som demonstrerede resultaterne.

I samme brev til Leibniz karakteriserede Rømer astronomien, dens tætte tilhørsforhold til mekanikken og dens generelle ambivalente stilling mellem håndens og åndens arbejde. Efter at han har fået bygget sit observatorium og arbejdet med observationer, skriver

han til Leibniz i 1704:

Da jeg desuden har fået det mest mekaniske arbejdsområde af alle i den litterære verden (sådan opfatter jeg astronomien), der kræver sanser og hænder i lige så høj grad som tanke, så er der som bekendt altid noget, der mangler at blive eftersat eller justeret, og som ikke kan tilføjes ud fra spekulationer (dette ville jo være bedrag) eller opnås, når lejlighed byder sig; som regel kræver det kedsommelig venten (F&T, s. 309).

Videre skriver han, at hans metode indeholder så meget kontroversielt, at den ville være vanskelig at fæstne lid til "medmindre enhver observationsproces med disse instrumenter blev beskrevet klart og omfattende." Senere i 1704 skriver Rømer om sin meridiankreds på landobservatoriet:

Jeg mener at have opnået mine to forsæt. Det ene er, at det, der skal observeres, skal kunne stå til troende snarere ved sig selv end ved observatoren; ikke sådan at der ikke begås fejl, men sådan at fejlene afslører sig selv af selve det observerede og lader sig bedømme (se "Brev til Leibniz 1704", F&T, s. 330). Det andet er, at observator om dagen fra et lukket rum skal kunne overskue hele meridianen og første vertikal, hvorved horisonten bliver synlig.

Det er det første forsæt, som er spændende i denne sammenhæng. Rømer ønsker, at observationerne skal kunne stå alene. Det er ikke observatoren, som står inde for dem med sin personlige autoritet. Nej, fejlene afsløres af observationerne og instrumentet selv. På denne måde prøver Rømer at mekanisere observation – en proces som fortsatte op gennem de næste århundreder. Han prøver også at lade instrumenterne selv vise deres fejl og selv garantere konklusionerne nærmest uafhængigt af observatoren. Ligesom Rømers planetmaskiner simpelthen viste planeternes stillinger, skulle observationer og instrumentbeskrivelser vise det kopernikanske systems sandhed. Rømer ville kun skride til publikation, når observationer og instrumenter var selvforklarende, viste resultatet uden yderligere argumentation og selv påpegede fejkilder. Ikke overraskende endte han med ikke at publicere størstedelen af sit arbejde.

Konklusion

Rømer følger idealerne for naturvidenskaben, som udviklede sig i det 17. århundrede, hvor fokus var på at fremvise naturens fænomener med instrumenter og lade observationerne tale for sig selv (se fx [2]). Til sammenligning havde Royal Society, som Rømer besøgte under sit ophold i England, det berømte motto *nullius in verba* – "tag ikke nogens ord for det". Det lader til, at Rømer i højere grad end sine samtidige tog denne forpligtelse på sig og ikke ønskede, at nogen behøvede at tage hans ord for de konklusioner, han nåede frem til. Her er han i modsætning til den faktiske

praksis i Royal Society, hvor benægtelsen af ordets vigtighed var en retorisk strategi, se [15].

Måske kan vi – som det tidligere er antydnet – finde noget af Rømers modvilje mod at publicere i hans jagt på at skrive sig selv ud af sine videnskabelige demonstrationer. At få observationerne til at klargøre teorien, instrumenterne til at påpege deres fejkilder og metoden til at overflødiggøre den individuelle observator var dog for meget selv for Rømer, og hans store værk blev aldrig fuldført. Det lykkedes heller ikke Rømer at skrive sig selv ud af videnskaben og historien. Heldigvis da.

Litteratur

- [1] Karin Tybjerg, Jakob Danneskiold-Samsøe og Per Friedrichsen (2011), *Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste*, Aarhus Universitetsforlag.
- [2] Simon Schaffer og Steven Shapin (1985), *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle and the Experimental Life*. Princeton.
- [3] Peter Dear (2001), *Revolutionizing the Sciences. European Knowledge and its Ambitions, 1500-1700*. Basingstoke.
- [4] "F&T", Per Friedrichsen og Chr. Gorm Tortzen (2001), *Ole Rømer – Korrespondance og afhandlinger samt et udvalg af dokumenter*, C.A. Reitzel.
- [5] Elis Strömberg (1944), *Ole Rømer som Astronom*. København.
- [6] "TBOO", Tycho Brahe Dani Opera omnia, red. J.L.E. Dreyer (1913-1929). København.
- [7] Helge Kragh (2005), *Fra middelalderlærdom til den nye videnskab, 1000-1730. Dansk Naturvidenskabs Historie, bd. 1. Århus*.
- [8] Jean Picolet red. (1987), *Jean Picard et les débuts de l'astronomie de précision au XVII^e siècle*. Paris.
- [9] Tycho Brahe (1598); Tycho Brahe (1506); Tycho Brahe (1602).
- [10] Alice Stroup (1990), *A Company of Scientists: Botany, Patronage and Community in Seventeenth Century France*. Berkeley.
- [11] Jean-Pierre Séris (1987), *Machine et communication: du théâtre des machines à la mécanique industrielle*. Paris.
- [12] Jean-Gaffin Gallon (1735), *Machines et Inventions Approuvées par l'Académie Royales des Sciences depuis son établissement jusqu'à présent; avec leur description*. Paris.
- [13] Peder Horrebow (1735), *Basis astronomiæ sive astronomiæ pars mechanica in qua describuntur observatoria, atque instrumenta astronomica Roemeriana Danica simulque eorumdem usus, sive methodi observandi Roemerianæ in usum publicum, et præsertim in gratiam una prodeuntis valde insignis atque usus amplissimi nunquam non posteris memorandi Tridui Observationum Tusculanarum Roemerii ex fundamentis, exponuntur a Petro Horrebowio*. København.
- [14] Jim Bennet (2000), *Instruments and Illustrations in Eighteenth-Century Astronomy*. Artikel i bogen *Science and the Visual Image in the Enlightenment*, s. 137-154, red. William R. Shea. Canton.
- [15] Peter Dear (1985), *Totius in Verba: Rhetoric and Authority in the Early Royal Society*, *Isis* 76 (2), s. 145-161.



Karin Tybjerg er lektor på Medicinsk Museion ved Københavns Universitet. Hun forsker i grænsefladerne mellem medicin og fysik og arbejder musealt med at sammenkæde historiske samlinger, naturvidenskab og videnskabsfilosofi.

Om enheden mol i SI-systemet

KVANT har ikke nogen egentlig brevkasse, og svartiden ville jo også let blive 3-4 måneder. Det skal imidlertid ikke afholde os fra lejlighedsvis at forsøge at besvare et interessant spørgsmål.

'Et elementært fysikspørgsmål'

Kære kloge fysikere

Jeg har et spørgsmål, som med mellemrum har rumsteret i mit hovede lige siden min gymnasietid, men som jeg aldrig har kunnet finde noget svar på. Det drejer sig om SI-enhederne for stofmængde.

Idealgasloven siger at hvis man ganger trykket, målt i pascal, med rumfanget, målt i kubikmeter, og dividerer med den absolutte temperatur, målt i kelvin, så får man et udtryk for stofmængden, målt i joule pr kelvin.

Når der findes én SI-enhed for stofmængde, så har man ikke brug for en til. Alligevel har man standardiseret måleenheden "mol". Jeg forstår ikke hvorfor. [....] — det ser ikke ud til at der er nogen som ved hvorfor i alverden man dog har standardiseret "mol".

Jeg har efterhånden mistanke om at den 14. CGPM blev dårligt rådgivet i 1971. De var ikke opmærksom på at problemet allerede var løst.

Hvis man afskaffede "mol", så slap man af med gaskonstanten, som er omregningstallet mellem enhederne. Så blev livet lidt nemmere for fysikerne, og meget nemmere for kemikerne. For eksempel ville specifik varmekapacitet blive dimensionsløs.

Jeg hører gerne jeres kommentar.

Venlig hilsen,

Bo Jacoby [1]

Svar

Der er noget vilkårligt ved definitioner, i den forstand at en definition er resultat af en menneskelig beslutning. En definition kan vedtages i en forsamling, fx Folketinget, Generalkonferencen for Mål og Vægt (CGPM), eller et enkelt individ. Den kan være mere eller mindre præcis og mere eller mindre hensigtsmæssig, men den kan aldrig være forkert. En fysisk formel har naturligvis kun mening, når de indgående størrelser er defineret; derefter må eksperimenter afgøre, om formelen giver en korrekt beskrivelse (her er det naturen, der bestemmer).

"Mol" optræder som synonym for "gram-molekyle" så tidligt som 1893 i to lærebøger i kemi [2]. Ordet har vist sig ganske levedygtigt, sikkert fordi det dækker et umådeligt vigtigt begreb i kemien. CGPM's vedtagelse i 1971 af den stadigt gældende definition, fulgte da også efter en koncensus i det internationale kemiske samfund [2]. Jeg tror, at der er meget få kemikere (og materiale- eller faststoffysikere), der i dag ville undvære denne enhed.

Idealgasligningen forbinder trykket p og rumfanget V af stofmængden n med temperaturen T :

$$pV = nRT. \quad (1)$$

R er den såkaldte gaskonstant, hvis enhed er joule/(kelvin·mol). Hvis man regner på enhederne i denne ligning og forkorter de kendte enheder ud, ender man med " $1 = \text{mol/mol}$ ", hvilket er vanskeligt at benægte, og som lader definitionen af mol-enheden stå helt åben. Jeg har derfor svært ved at følge spørgerens argumentation på dette punkt. Gaskonstanten R er ganske rigtigt en omregningsfaktor, men mellem temperatur og energi. Det er tydeligst, hvis man udtrykker den som $R = N_A k_B$, hvor N_A er Avogadros tal (antal molekyler per mol) og k_B er Boltzmanns konstant. I en ideal énatomig gas er den gennemsnitlige kinetiske energi for et molekyle $\frac{3}{2}k_B T$.

Hele spørgsmålet får mig til at tænke på Richard Feynman, som beklagede definitionen af enheden kelvin, fordi temperaturen er et mål for en gennemsnitlig molekylenergi, så at en energienhed ville være mere rimelig [3]. "Kelvin" er således endnu et eksempel på en enhed, hvis definition grunder sig på en lang og veludviklet tradition, og som er fast etableret i det praktiske liv (en kelvin blev netop defineret, så én grad Celsius er lig med én kelvin).

Spørgerens idé om fordelene ved en dimensionsløs varmekapacitet er også svær at følge. Betydningen af denne størrelse bliver netop klar, når enheden er joule per kelvin. Iøvrigt må det være den *mol*-specifikke varmekapacitet, han tænker på (hvis man ser bort fra den tidligere tilsyneladende formelfejl).

SI-systemets grundenheder er et meget aktuelt emne, fordi hele fire af de syv grundenheder kan ventes omdefineret om nogle år, når resultaterne af en række igangværende målinger foreligger. Det drejer sig om både kilogram, ampère, kelvin og mol.

Med venlig hilsen,

Finn Berg Rasmussen, KVANT-redaktionen

Litteratur

- [1] bojacoby@yahoo.dk
- [2] Martin J. T. Milton: A new definition of the mole based on the Avogadro constant: a journey from physics to chemistry, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 3993-4003 (2011).
- [3] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands: The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts 1977, side 39-10.

Årets nobelpris i fysik bygger videre på resultater opnået af danske forskere

Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, DTU Space og Leif Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Nobelprisen i fysik 2011 gik til Saul Perlmutter, Brian Schmidt og Adam Riess. De fik prisen for at påvise, at Universets ekspansion er accelererende, således at fjerne galakser bevæger sig hurtigere og hurtigere væk fra hinanden. Effekten blev fundet ud fra studiet af supernovaer detekteret på kosmologiske afstande, dvs. supernova-begivenheder, som fandt sted for milliarder af år siden. Danske forskere var imidlertid først til at påvise supernovaer på kosmologiske afstande og dermed bevise, at supernovaer kunne bruges til at studere Universets ekspansion over tidsrum, der udgør en væsentlig brøkdel af Universets alder.

Universets ekspansion

Det ekspanderende Univers er blevet sammenlignet med en gærdej, der hæver og er fyldt med rosiner. Under hævnningen drives rosinerne fra hinanden. På lignende vis drives galakserne fra hinanden, når rummet ekspanderer. Almen relativitetsteori forudsiger en sådan effekt, hvilket i 1917 forskrækkede Albert Einstein i den grad, at han indførte den såkaldte kosmologiske konstant i sine ligninger for at opnå en statisk model af Universet, hvilket man forventede på den tid. Da Edwin Hubble i 1929 påviste, at galakserne i vor nære omegn af Universet har hastigheder bort fra os proportionalt med deres afstande fra os, erkendte man, at det skyldes rummets ekspansion. Det fik Einstein til at fortryde sit fusk med den kosmologiske konstant. Den blev imidlertid aldrig glemt og kan i dag gives et fysisk indhold, som dog ikke medfører et statisk univers.

Det følger ligeledes af den almene relativitetsteori, at en foton, der forplanter sig i det ekspanderende Univers, vil forøge sin bølgelængde proportionalt med skalafaktoren, som repræsenterer den relative størrelse af udvidelsen. En foton, der eksempelvis blev udsendt, da afstande til kosmologiske objekter blot var den halve af, hvad den er i dag, vil derfor observeres med en bølgelængde, der er den dobbelte af den udsendte. Effekten kaldes rødforskydning og angives ved:

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

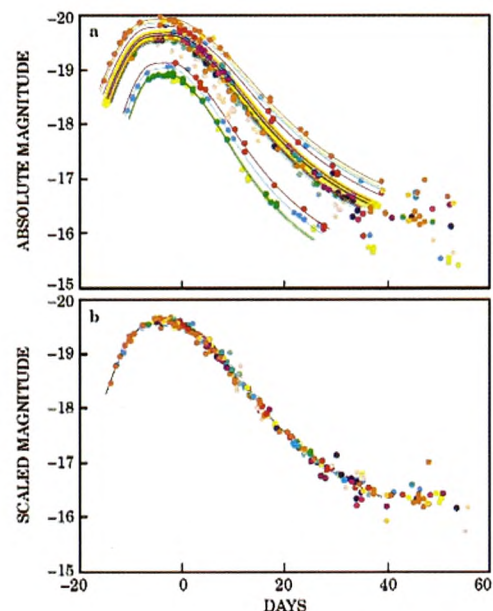
hvor λ_{obs} er den observerede bølgelængde, og λ_0 er bølgelængden ved udsendelsen. Således defineret bliver skalafaktoren på observationstidspunktet $(1+z)$ gange større, end den var på emissionstidspunktet. Rødforskydningen kan måles for fjerne lyskilder, hvis bare man kan skaffe lys nok.

Rødforskydningen giver os altså størrelsen af skalafaktoren på emissionstidspunktet. Hvis vi ønsker at bestemme udviklingen i ekspansionen, må vi have flere oplysninger. Vi må bestemme afstanden, som lyset har tilbagelagt fra lyskilden.

Afstandsbestemmelse med standard-lyskilder

En meget brugt metode til at finde afstanden til galakser er at udnytte standard-lyskilder, dvs. en veldefineret gruppe af lyskilder, som man har undersøgt og fundet, at de har samme totale udstråling og ens spektrere – eller næsten ens, så man med passende korrektioner kan regne sig til en standardværdi for udstrålingen. Måler man fluxen fra en fjern standard-lyskilde, kan afstanden til kilden beregnes. Under jordiske forhold er det nemt nok: Fluxen falder med kvadratet på afstanden. For kosmologiske afstande må man tage hensyn til relativistiske effekter i det ekspanderende Univers, men den store udfordring er dog at finde tilstrækkeligt klare standard-lyskilder. De skal i praksis have en udstråling sammenlignelig med en hel galakse. Her er det, at supernovaerne kommer ind.

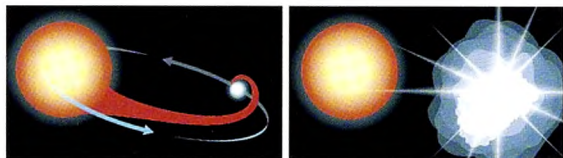
Fænomenet: Supernova Ia



Figur 1. Lyskurver for en række nære type Ia supernovaer (a). Det er tydeligt, at de supernovaer, der ikke er så lysstærke i maksimum, udvikler sig hurtigere efter maksimum end de lysstærke. Når man korrigerer lyskurverne for denne effekt, bliver de meget ens (b).

Så tidligt som i 1938 foreslog Walter Baade, at man kunne bruge supernovaer til at undersøge Universets ekspansion. Supernovaer er stjerner, der eksploderer og for en kort periode lyser op mange gange deres tidligere lysstyrke. Hvis udgangspunktet er en stjerne, der er meget tungere end Solen, får man en supernova af type II. Da den maksimale lysstyrke afhænger af massen af den oprindelige stjerne, er disse ikke særligt velegnede til kosmologiske undersøgelser. De supernovaer (SN), der er mest interessante til disse undersøgelser, er af typen Ia. Detaljerede undersøgelser har vist, at de med stor nøjagtighed (<10 procent) har samme maksimale lysstyrke og spektrr, og at lysstyrken svarer til en hel galakse, der indeholder 100 milliarder stjerner som Solen. Der er dog små, men systematiske forskelle mellem de enkelte SN Ia, men det er muligt at korrigere for disse forskelle (figur 1).

Den mest accepterede model for SN Ia er et dobbeltstjernesystem bestående af en hvid dværg og en stjerne, der stadig producerer energi ved kernereaktioner i de centrale dele. En hvid dværg er en stjerne, der ikke længere har muligheder for at skaffe sig energi ved kernereaktioner. Den består mestendels af kulstof og ilt og har en masse omkring Solens, men da størrelsen kun er som Jordens, får den en ekstrem høj massetæthed. Hvis stjernerne er tilstrækkelig tæt på hinanden, kan tyngdekraften fra den hvide dværg rive stof over fra den anden stjerne. Når massen af den hvide dværg vokser til omkring 1,4 gange Solens masse (Chandrasekhar-grænsen), kan den ikke holde sammen på sig selv mere, og det udløser en kæmpemæssig eksplosion. Da grænsen er uafhængig af den hvide dværts detaljerede historie, dens oprindelige kemiske sammensætning etc., så forklarer denne model, hvorfor alle SN Ia er så ens. Det er meget usikkert, hvor lang tid det tager for et dobbeltstjernesystem at udvikle sig til SN Ia stadiet, men det tager helt sikkert mange milliarder år. Derfor var det på ingen måde indlysende, at disse SN Ia fandtes i kosmologiske afstande, hvor vi jo ser tilbage på et meget yngre Univers.



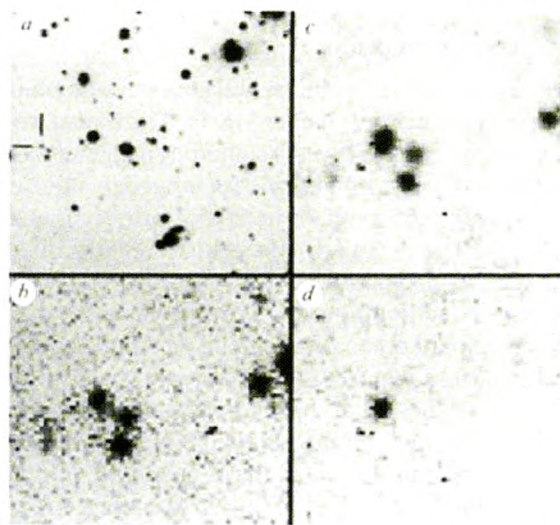
Figur 2. En hvid dværg i et dobbeltstjernesystem trækker masse til sig fra ledsageren. Når massen af den hvide dværg er vokset til 1,4 gange Solens masse, eksploderer den som en supernova Ia.

Eftersøgning efter Supernovaer Ia

Tidligere var observerende astronomer henvist til fotografiske optagelser, der havde lav respons og problemer med kalibreringen. Ved fremkomsten af CCD-kameraer (som nu sidder i hvert eneste digitale fotografiapparat) kunne man gøre sig håb om at nå meget svagere objekter med god nøjagtighed. Et af de første CCD-kameraer overhovedet på European Southern Observatory (ESO) i Chile blev i starten af 1980'erne placeret på den

danske 1,5 m kikkert der. Det gav os et forspring i brugen af den nye teknik.

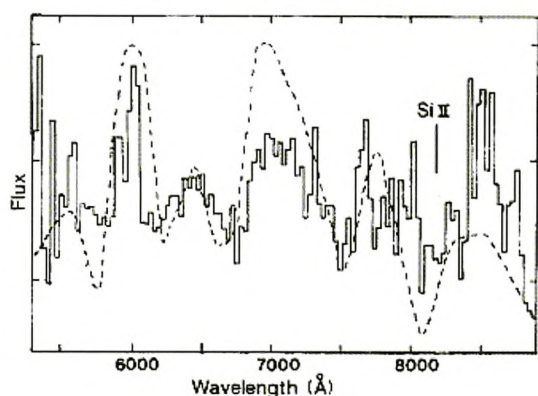
Det var før, Hubble Space Telescope (HST) blev sendt op, og på den tid overvejede man indgående, hvorledes man bedst kunne udnytte HST. Denne artikels forfattere deltog i en konference om emnet ved ESOs hovedkvarter i Garching. Professor Gustav Tammann diskuterede brugen af supernovaer type I til kosmologiske undersøgelser. På det tidspunkt var type I endnu ikke splittet op i Ia, Ib og Ic. Det skete kort efter og før, vort projekt kom i gang. Tammann konkluderede, at grundet dårlige erfaringer med at lede efter SN fra Jorden og specielt at følge op med detaljerede observationer (på grund af dårligt vejr, månelys etc.) så foreslog han, at man skulle bruge HST til at finde dem. Men det ville kræve megen observationstid at detektere SN med HST (man kikker jo i blinde), og det ville blive meget dyrt.



Figur 3. Detektion af supernova 1988U i den rige galaksehob AC118 ved $z=0,31$. (a) Et hjørne af AC118 fra en 1-times optagelse fra 30. august 1986. Markeringen udpeger galaksen, hvori SN 1988U senere blev fundet. (b) Et udsnit af samme billede viser denne galakse øverst til venstre i en gruppe på tre. (c) Samme udsnit fra en optagelse taget 8-9. august 1988. Umiddelbart er det svært at se, at galaksen er blevet klarere. Efter korrektion for forskellige optagelsesbetingelser subtraheres (b) fra (c). Resultatet er (d), hvor supernovaen står tydeligt frem.

Med vores erfaringer med CCD-kameraet på 1,5m-teleskopet stod det straks klart for os, at vi med dette, relativt billige teleskop ville kunne detektere SN ved kosmologiske afstande, altså væsentligt større afstande, end det tidligere var gjort. Vi kontaktede australske og britiske kolleger med adgang til teleskoper i Australien og på De Kanariske Øer, som ville kunne verificere detektionen fra Jorden. Herefter ville vi følge op med detaljerede observationer på HST. Fra nære galakser vidste vi, at der er mellem 100 og 1000 år mellem supernovaer af type Ia i en pæn stor galakse, så man skulle undersøge mange på en gang for at have en rimelig chance for at finde én SN. Et af de svære problemer ved at bruge SN Ia til kosmologiske undersøgelser er at korrigere tilstrækkelig nøjagtigt for absorptionen af det støv, der ligger i galaksen omkring supernovaen. Vi valgte derfor at koncentrere os om de ca. 60 rigeste

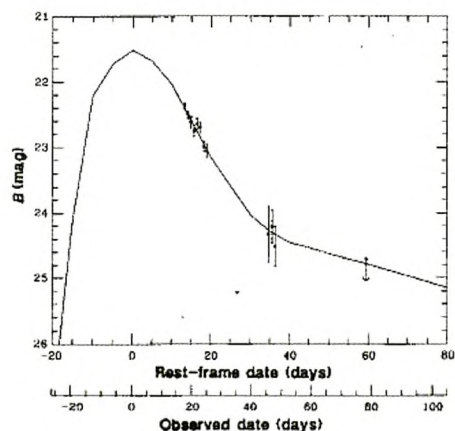
galaksehohe, der var til rådighed ved kosmologiske afstande. Sådanne hohe indeholder langt overvejende elliptiske galakser, som er støv-fri.



Figur 4. Spektrum (fuldt optrukken) af SN 1988U med overlejret spektrum af modergalaksen. Til sammenligning vises (stiplet linje) spektrum af en anden SN fra det nære univers 17 døgn efter maksimum og transformeret til $z = 0.31$. Man identificerer den karakteristiske Si II absorptionslinje trods galaksens forstyrrende lys.

Disse hohe observeredes systematisk i løbet af årene 1987 og 1988. Der blev optaget over 300 eksponeringer á 1 time. Vi havde udviklet software, så vi kunne nå at sammenligne en ny eksponering med en tidligere af samme felt, alt imens vi var i gang med den næste optagelse. Ved hjælp af det antal SN, som man havde fundet i nære galakser, havde vi beregnet, at vi skulle detektere mellem 3 og 10 SN i dette projekt. Vi fandt kun 2: én SN II og én SN Ia. figur 3 viser, hvordan denne SN (SN 1988U) blev fundet. SN 1988U havde en rødforskydning $z = 0,31$, dvs. stjernen eksploderede omtrent samtidigt med, at Solen blev dannet for ca. 4,5 milliarder år siden.

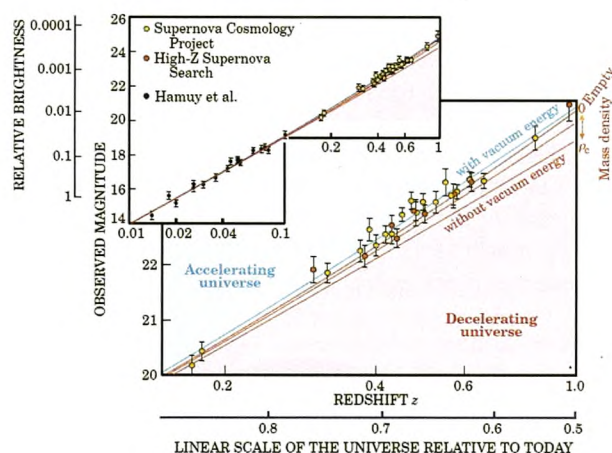
Figur 4 viser et spektrum af SN 1988U optaget med AAT 4m teleskopet i Australien. Dette spektrum beviste, at det faktisk var en SN Ia, specielt den brede Si II absorptionslinje ved 8060 Å, der er et vigtigt karakteristikum for SN Ia supernovaer.



Figur 5. Den observerede lyskurve for SN 1988U overlejret standard-lyskurven for en SN Ia transformeret til $z = 0.31$. Den gode overensstemmelse opnås kun, når man korrigerer for den relativistiske tidsforlængelse med faktoren $(1 + z) = 1,31$.

Figur 5 viser, at den observerede flux som funktion af tiden følger standard-lyskurven for SN Ia, når man korrigerer for en tidsforlængelse med faktoren $(1 + z)$, som det kræves ifølge almen relativitetsteori. Senere SN Ia har bekræftet tidsforlængelsen.

Vi søgte naturligvis om observationstid på HST for at få bedre spektraler, bedre lyskurver og en bedre bestemmelse af, hvilken type galakse supernovaerne ligger i. Vi fik det svar, at det var et vigtigt projekt, men nu havde vi jo vist, at det kunne klares fra Jorden. Derfor var der ingen grund til at bruge kostbar HST tid på det! Det var naturligvis meget skuffende. Som anført ovenfor havde vi designet eftersøgningen til primært at finde SN i støv-fri elliptiske galakser, men den, vi fandt, var tydeligvis i en lille spiralgalakse (se figur 3). I denne type galakser har man problemet med at bestemme den interne absorption, og man skal have mange SN for at kunne minimere indflydelsen af denne fejlkilde. Med vores 'succesrate' kunne vi se, at det ville tage mange år, før vi havde et tilstrækkeligt antal SN til at udlede noget sikkert om, hvilken type univers vi lever i. Alt i alt besluttede vi os for at stoppe projektet.



Figur 6. Resultatet af de to konsortiers supernova-eftersøgning. Størrelsesklasser (relativ klarhed) er afbildet mod z (svarende til relativ skalafaktor). Øverst ses diagrammet for både nære SN og SN på kosmologiske afstande. Nederst kun de sidste. Som forklaret i teksten viser de, at Universets ekspansion er accelereret.

I midten af 1990'erne tog 2 store amerikanske konsortier over ledet af de 3 nobelpristagere: 'The Supernova Cosmology Project' med Saul Perlmutter som leder, og 'The High- z Supernova Search Team' med Brian Schmidt og Adam Riess som ledere. De havde adgang til 4m kikkerte, og der havde desuden været en løbende udvikling af CCD-kameraer, så de havde adgang til mosaikker af CCD'er med billedfelter over 10 gange så store som CCD'en på den danske 1,5 m. På den måde kunne de naturligvis undersøge mange flere galakser på en gang og dermed få en meget højere succesrate. De havde nogenlunde samme observationsstrategi, som vi brugte, men de havde altså også adgang til meget bedre grej. Konsortierne fandt tilsammen omkring 50 fjerne SN Ia og offentliggjorde deres resultater i 1998/1999.

Mørk energi og det accelererende Univers

Siden Hubble i slutningen af 1920'erne fandt Universets ekspansion, har man spekuleret over, hvad denne ekspansion ender med. Der er kun én kraft, mente man, der kan ændre galaksernes bevægelse væk fra hinanden, nemlig tyngdekraften. Ikke så meget tyngdekraften fra de enkelte galakser, men den samlede tyngdekraft fra alle galakser. Den er naturligvis proportional med middeltætheden i Universet. Hvis middeltætheden er stor, så vil tyngdekraften efterhånden bremse selv de fjerneste galakser op, og måske falder hele Universet sammen i et 'Big Crunch'. Omvendt, hvis middeltætheden er lille, så er tyngdekraften ikke i stand til at bremse galakserne væsentligt op, og de vil bare fjerne sig mere og mere fra hinanden. Den middeltæthed, der betyder, at galakserne lige netop bliver bremsede ned til hastigheden nul i grænsen, kaldes den kritiske tæthed.

Resultaterne fra de to konsortier er givet i figur 6. Den røde trekant er det område, som supernovaerne ville ligge i, hvis de kun var påvirket af tyngdekraften. Supernovaerne ville falde på den øverste røde linje, hvis der ikke var noget stof i Universet, og på den nederste røde linje, hvis middeltætheden i Universet var lig den kritiske. Men det er jo tydeligt, at supernovaerne i middel ligger over den øverste røde linje. Det betyder, at supernovaerne er for langt væk sammenlignet med det tomme Univers, altså er der noget, der har accelereret dem. Dette 'noget' har man givet navnet mørk energi. Den blå linje i figur 6 er tilpasset SN dataene under antagelse af, at massetætheden (summen af almindeligt stof og mørkt stof) er $1/3$ af den kritiske tæthed, mens tætheden af mørk energi er $2/3$ af den kritiske tæthed.



Figur 7. Supernova-resultaterne fortæller os, at Universet er domineret af mørk energi. Sammenholdt med andre resultater kan vi sige, at Universets masse/energi tæthed er lig den kritiske værdi, at stof, som vi kender det (atomer etc.), kun udgør små 5 %, mørkt stof ca. 25 %, mens den mørke energi udgør godt 70 %.

Figur 7 viser, hvad Universet består af: Nemlig af ca. 5 procent stof, som vi kender (atomer, molekyler etc.), ca. 25 procent mørkt stof (som man ikke ved, hvad er, men som er forbundet med galakser og galaksehobe og påvirker omgivelserne med tyngdekraft), og så de sidste 70 procent, som er mørk energi. Alt i alt en tæthed som er tæt på den kritiske.

Den samlede masse/energi tæthed i Universet kan også bestemmes ud fra temperatur-fluktuationerne i den

kosmiske mikrobølge baggrundsstråling (CMB). Bedre og bedre observationer viste i 2003, at tætheden er lig den kritiske med en usikkerhed på få procent. Men det er ud fra SN observationer, at man ved, at størstedelen af denne tæthed kommer fra mørk energi.

At Universet netop har den kritiske tæthed, betyder, at rummet – bortset fra lokale tæthedsfluktuationer – er rumligt fladt, dvs. Euklids geometri gælder. Det følger også, at den totale energi er nul. Det gør det ulige meget lettere at kreere et univers, bare man ved hvordan.

Hvad er mørk energi?

Einsteins kosmologiske konstant vil for passende værdier give samme effekt som mørk energi. Man valgte dog at kalde fænomenet mørk energi for ikke at låse sig fast på en fortolkning. Det er interessant, at modelberegninger af udviklingen i Universets 'klumpethed' eller storskalastruktur op gennem 1990'erne indikerede, at man manglede en parameter i modellerne. En kosmologiske konstant kunne gøre tricket, og med påvisning af mørk energi synes problemet at have fundet sin løsning.

Også fra kvantemekanikken kommer der hints om, at der kunne findes noget eksotisk, som skulle have samme effekt som mørk energi. Inden for kvantemekanikken kaldes det vakuumenergi. I det tomme rum bliver virtuelle partikler hele tiden dannet og forsvinder, så selv om der er vakuum, er der altså noget alligevel. Den russiske astrofysiker Zeldovich var den første, der beregnede den kvantemekaniske vakuumenergi. Han fandt en tæthed, som er ca. 10^{120} gange større end den tæthed, som SN giver. Senere beregninger har mindsket forskellen til ca. 10^{55} , men stadigvæk er der en kolossal forskel. Hvordan man kommer uden om denne forskel af astronomiske dimensioner, er uvist, men fysikere synes altså ikke at have problemer med eksistensen af vakuumenergi. Det er dens lidenhed, der overrasker.

I kvantemekanikken er tætheden af vakuumenergi konstant gennem Universets ekspansion (helt naivt er det vel svært at forstille sig, at man kan udtynke vakuum), hvorimod de andre tætheder varierer kraftigt i løbet af Universets udvikling. Så det er meget muligt, at det kun er inden for de sidste få milliarder år, at mørk energi har domineret de andre komponenter i Universet. Omvendt: Hvis mørk energi havde udviklet sig på samme måde som de andre komponenter, dvs. at tætheden hele tiden har været dobbelt så stor end de andres tilsammen, så ville den have forhindret, at tyngdekraften havde dannet de strukturer (galaksehobe, galakser, stjerner etc.), vi kender i Universet i dag.

Universets fremtid afhænger af hvilken karakter, den mørke energi viser sig at have. Hvis den er konstant, vil galakserne drive ud af hinandens synsfelt, således at gravitationelt bundne systemer – så som den lokale gruppe af galakser med Mælkevejssystemet – vil blive ganske isolerede. Interessant er det at tænke sig, at vi formodentlig ville være afskåret fra at udvikle Big Bang-modellen, hvis vi havde levet i en sådan æra. Man kan dog sagtens forestille sig, at mørk energi ændres

med tiden. Måske har vi et fortilfælde i Universets inflationsfase, der menes at havde fundet sted 10^{-35} sekunder efter Big Bang – eller Planck-æraen, om man vil. Der er stærke indicier på, at Universets skalafaktor i denne fase blev blæst op til monstrøse dimensioner. Drivkraften menes at være et skalart energifelt af eksorbitant størrelse, der havde karakter af kosmologisk konstant. Dette felt henfaldt ved afslutningen af inflationen.

Kortlægning af mørk energi

Samme dag, som årets Nobelpris i Fysik blev annonceret, valgte ESA, at den næste videnskabelige satellit skal give helt nye, detaljerede oplysninger netop om mørkt stof og mørk energi. Satellitten hedder EUCLID og skal sendes op i 2019. EUCLID skal undersøge morfologi og afstande til millioner af galakser. Galaksernes morfologi observeres nemlig en smule deformationeret på grund af de tæthedskoncentrationer i massefordelingen, der findes mellem dem og os (såkaldt weak lensing). Ved at kortlægge disse deformationer kan man udlede, hvordan mørkt stof og mørk energi er fordelt i rummet, og dermed få helt nye oplysninger om deres egenskaber.



Figur 8. ESA forbereder satellitten EUCLID, der skal undersøge Universets indhold af mørkt stof og mørk energi.

Danske forskere fra DTU Space og Niels Bohr Institutet er involveret i forberedelsen af den videnskabelige analyse af disse sofistikerede data. Desuden vil Danmark bidrage med faciliteter til testning af det meget kritiske optiske system i EUCLID-satellitten.

Konklusion

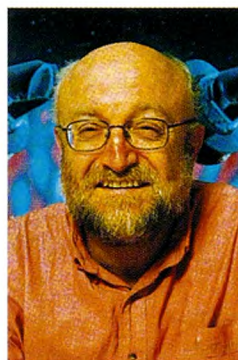
Der er ingen tvivl om, at mørk energi er kommet for at blive. Den store udfordring er at finde ud af i detaljer, hvad der giver anledning til denne mærkelige acceleration af Universets ekspansion.

Vi er naturligvis stolte over, at vi udførte pionerarbejde ved at vise, at disse vigtige SN Ia faktisk findes på kosmologiske afstande, og demonstrerede, hvorledes man kunne finde dem. De vil uden tvivl fortsat spille en central rolle i udforskningen af de fjerneste egne af Universet.

NOTE: Vi udførte denne eftersøgning efter SN Ia på den danske 1,5 m kikkert sammen med Professor Henning E. Jørgensen. Han døde desværre i november 2010.

Litteratur

- [1] Krauss, Turner (2004), *Scientific American*, 23-4
- [2] Nørgaard-Nielsen, Hansen, Jørgensen, Salamanca, Ellis, Couch (1989), *Nature*, **339**, 523
- [3] Perlmutter et al. (1999), *Astrophysical Journal*, **517**, 565
- [4] Perlmutter (2003), *Physics Today*, Vol **56**, #4
- [5] Perlmutter, Schmidt (2003), *Lecture Notes in Physics*, astro-ph/0303428
- [6] Riess et al. (1998), *Astronomical Journal*, **116**, 1009



Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen er seniorforsker ved DTU Space. Samarbejdede med Leif Hansen og Henning E. Jørgensen om forskellige ekstragalaktiske projekter, herunder eftersøgning af fjerne supernovae. Har været ansvarlig for de danske bidrag til ESA Planck satellitten og til ESA/NASA MIRI instrumentet til James Webb Space Telescope.



Leif Hansen er lektor emeritus ved Niels Bohr Institutet. Arbejdede fra 1980 og frem til sin pensionering i 2003 tæt sammen med Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen og professor Henning E. Jørgensen inden for ekstragalaktiske og kosmologiske emner, bl.a. aktive galakser, rige galaksehobe og Universets storskalastruktur.

KVANT samlesæt sælges til favorable priser

KVANT tilbyder forskellige pakker med samlesæt af ældre årgange.

Pakke med 3 årgange: 200 kr.

Indeholder årgang 2008-2010 (de øverste tre rækker vist til højre, bortset fra nr. 1/09 og 2/10). Der er fem temanumre om:

- *Kosmologi og rumtid*
- *Videnskab og kunst*
- *Astronomi* (astronomiår 2009)
- *Large Hadron Collider*
- *Lavtemperaturfysik*.

Pakke med 5 årgange: 300 kr.

Indeholder årgang 2006-2010 (alle blade vist til højre, bortset fra nr. 1/06, 1/09 og 2/10). I årgang 2006-2007 er der temanumre om:

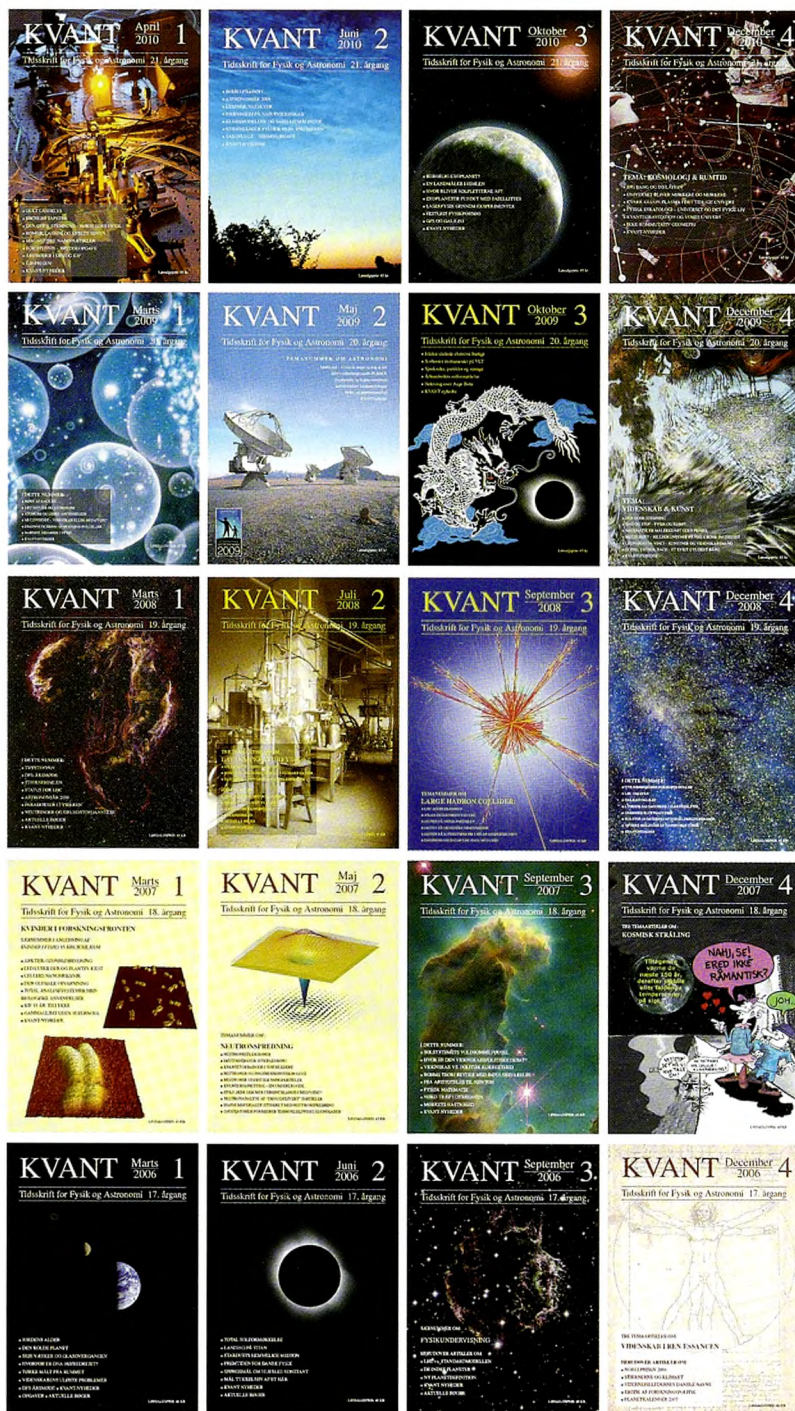
- *Kosmisk stråling*
- *Neutronspreddning*
- *Kvinder i forskningsfronten*
- *Videnskab i renæssancen*
- *Fysikundervisning*.

Årgang 1990-2010

Prisen for disse 'næsten komplette sæt' af alle årgange af KVANT varierer fra 1200 kr. for de mest komplette sæt (der mangler en håndfuld numre) til 600 kr. for sæt, hvor godt 1/3 mangler. Kontakt kvant@kvant.dk for at få en opdateret prisliste.

Bestilling og betaling:

Pakkerne kan bestilles ved at sende en e-mail til kvant@kvant.dk, hvor du opgiver navn og adresse. Betaling sker via netbank eller girokort. Oven i priserne skal lægges udgifter til forsendelse.



Foreningsnyt – foredrag i foråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Feb.				
6/2	19.15	Røntgen observatorierne Chandra og XMM	Desiree D.M. Ferreira	AS (Kbh)
6/2	19.30	Dansk-kinesisk genomforskning	Karsten Kristiansen	SNU
13/2	19.00	Røntgen observatorierne Chandra og XMM	Desiree D.M. Ferreira	AS (Årh)
20/2	19.30	De danske registre og biobanker	Mads Melbye	SNU
27/2	19.15	Kepler – store nyheder på basis af små variationer	Hans Kjeldsen	AS (Kbh)
Mar.				
5/3	19.00	Kepler – store nyheder på basis af små variationer	Hans Kjeldsen	AS (Årh)
12/3	19.30	Menneskets og dets bakteriers genomer – betydningen for risiko for type 2 diabetes og fedme	Oluf Borbye Pedersen	SNU
19/3	19.15	Herschel – Universets varmekølsomme øje	Thomas Greve	AS (Kbh)
26/3	19.00	Herschel – Universets varmekølsomme øje	Thomas Greve	AS (Årh)
Apr.				
2/4	19.30	Virksomhedsbesøg	se www.naturvidenskab.net	SNU
16/4	19.15	Tidsmaskiner i Rummet: Hubble og James Webb Rumteleskoperne	Peter Jakobsen	AS (Kbh)
16/4	19.30	The Danish Disease Network. Derefter generalforsamling	Søren Brunak	SNU
23/4	19.00	Tidsmaskiner i Rummet: Hubble og James Webb Rumteleskoperne	Peter Jakobsen	AS (Årh)
Maj.				
7/5	19.15	NuSTAR – astronomernes skarpe røntgenblik	Allan Hornstrup	AS (Kbh)
14/5	19.00	NuSTAR – astronomernes skarpe røntgenblik	Allan Hornstrup	AS (Årh)

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

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

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

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

Astronomisk Selskab

Astronomi fra rummet. Foredrag foråret 2012. Muligheden for at foretage astronomiske observationer fra satellitter har betydet et stort fremskridt for vores forståelse af Universet, fordi satellitterne kan observere de former for stråling, som Jordens atmosfære ikke slipper igennem til de jordbaserede teleskoper.

Stråling med høj energi – ultraviolet, røntgen og gammastråling – stoppes helt af atmosfæren. Stråling med lav energi – f.eks. infrarød og mikrobølgestråling – slippes kun til en vis grad igennem atmosfæren, mens synligt lys og radiostråling passerer stort set uhindret ned til jordoverfladen.

For astronomerne er der masser af information at hente ved at studere optagelser af de forskellige slags stråling, der kommer fra det samme objekt, idet det typisk er forskellige fysiske mekanismer, der er årsag til de forskellige typer stråling. I denne foredragsrække vil førende forskere fortælle om den nyeste igangværende forskning der udføres med forskellige typer af rumteleskoper.

Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Anja C. Andersen, Astronomisk Selskab.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Foredragsrække med temaet Den genetiske tsunami. Virksomhedsbesøget annonceres på www.naturvidenskab.net.

Videnskabshistorisk Selskab

Foredragene afholdes på H.C. Ørsted Institut i København. Kl. 16.30 byder selskabet på kaffe, te og frugt i Institut for Matematiske Fags frokoststue, rum 04.4.19 på 4. sal. Man er velkommen til at gå med ud at spise med foredragsholderen efter foredraget, på egen regning.

PFEIFFER  **VACUUM**

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

TAKKER FOR I ÅR OG
ØNSKER ALLE VORE KUNDER

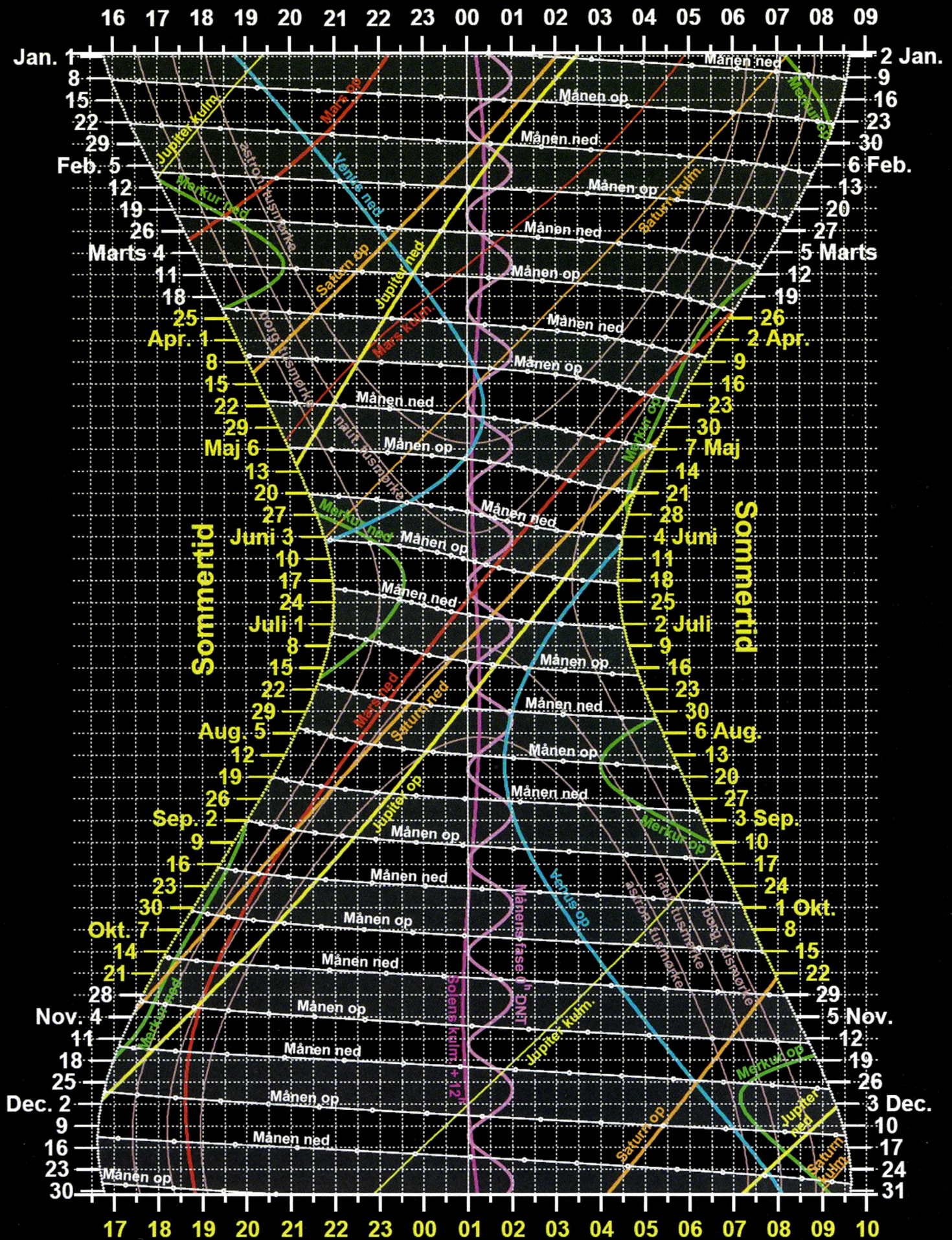
**Glædelig Jul
&
Godt nytår**

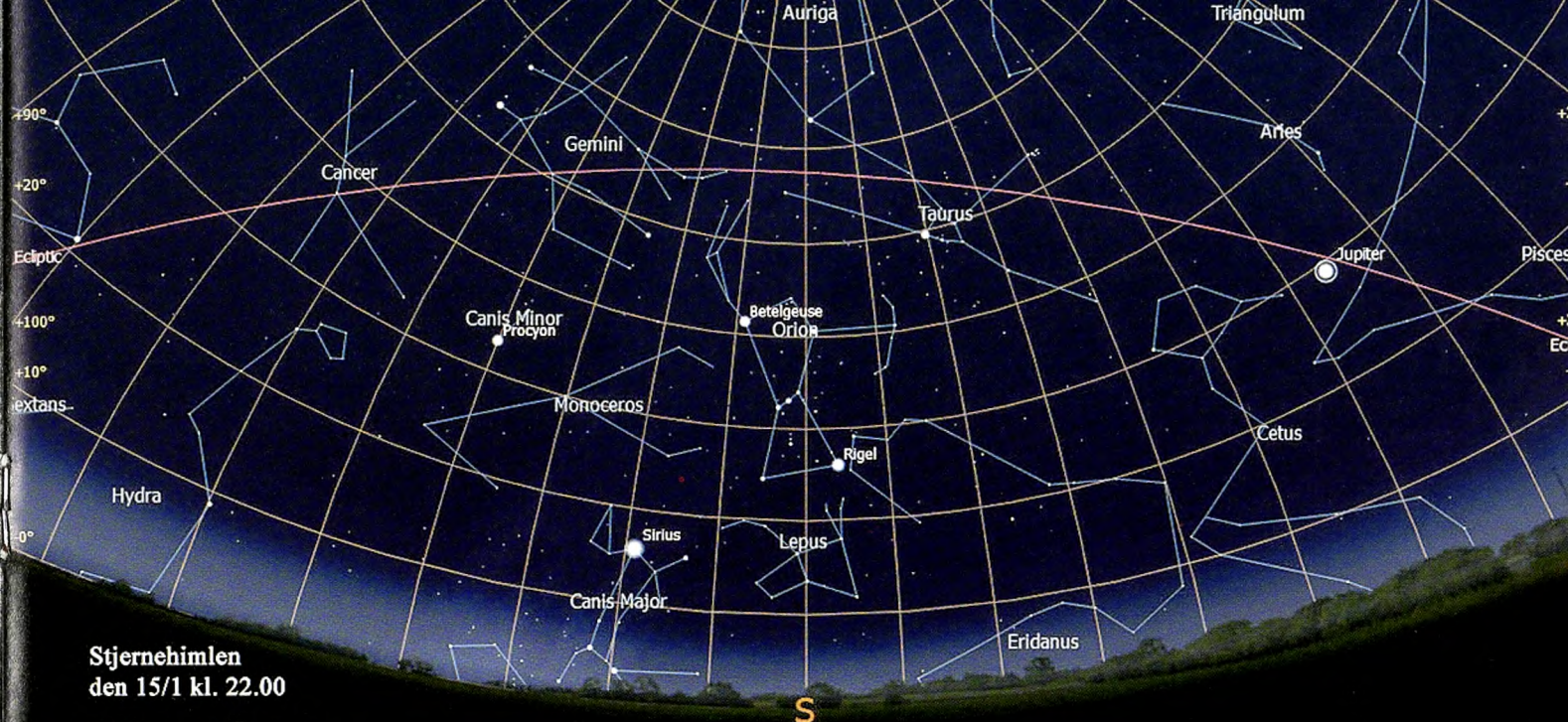
På gensyn i 2012

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fieldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Planetkalender for København 2012

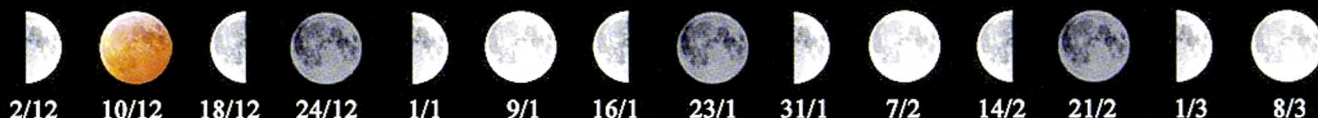
Dansk Normaltid





Stjernehimlen
den 15/1 kl. 22.00

Månens faser



På *morgenhimlen* ses Merkur, Mars og Saturn.
På *aftenhimlen* ses Venus og Jupiter.

Solsystemet ca. 15. januar

Kun planeter synlige med det blotte øje er vist nedenfor.
Udenom planetbanerne ses Dyrekredsens 12 stjernebilleder.
Den røde streg markerer Ekliptika - Solsystemets baneplan.

Astronomiske begivenheder

- 10/12 Total måneformørkelse. Midten af totaliteten kl. 14.24
- 13/12 Stjerneskydssværmen *Geminiderne* kulminerer
- 22/12 Vintersolhverv
- 3/1 Stjerneskydssværmen *Kvadrantiderne* kulminerer
- 4/1 Jorden nærmest Solen



KVANT-nyheder

Af Sven Munk og John Rosendal Nielsen, KVANT

Russisk radioteleskop i kredsløb

ASTRONOMI. Satellitten "RadioAstron" er forsynet med en antennediameter på 10 m, som kan opfange mikrobølge/radiostråling fra sorte huller og eksploderende stjerner. Instrumentet bevæger sig i en langstrakt elliptisk bane rundt om Jorden og opnår en største afstand på 375.000 km.



Systemmæssigt er der tale om VLBI = Very Long Baseline Interferometri (XLBI eXtremely long ... ville være mere passende), hvor måledata fra mikrobølgemodtageren kombineres med data fra andre radioteleskoper, som befinder sig på jorden. På grund af den store afstand mellem modtagerne er den teoretiske opløsningsevne blot 7 mikrobuesekunder, hvilket er 10.000 gange bedre end det, Hubble Rumteleskopet kan præstere.

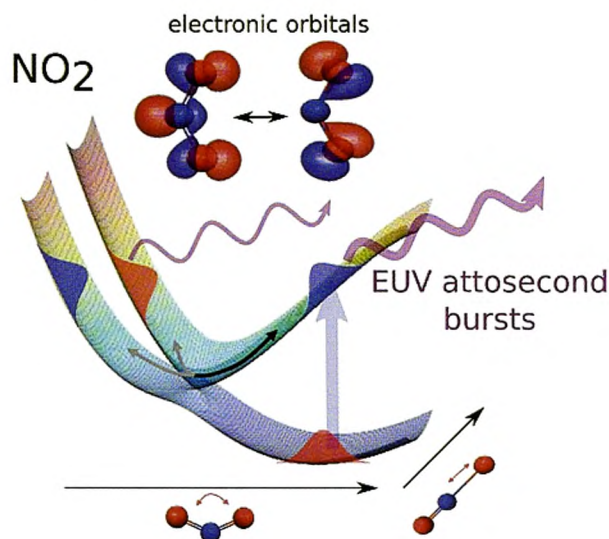
Det russiske projekt, som styres af Lebedev Physical Institute, bygger videre på de erfaringer, som blev indhøstet i årene 1997-2005 med en lignende, men mindre, japansk satellit, Halca.

Kilder: <http://www.lebedev.ru/en/> og <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/>; Nyt fra Baikonur: <http://www.federalspace.ru>. Info om Halca kan findes på Wikipedia.

Molekylespaltning observeres

ATOMFYSIK. Spaltning af molekyler er en dynamisk proces, hvor elektroner omplaceres. Dette kan i mange tilfælde ikke behandles teoretisk, fordi det er for kompliceret. En ny eksperimentel metode åbner mulighed for "at filme" elektronbevægelser, når molekyler spaltes. Metoden er afprøvet på kvælstofdioxid (NO_2), som er et ret simpelt molekyle.

Molekylets egenskaber under spaltning er kendte, hvilket selvfølgelig er en fordel, når selve målemetodens kvalitet skal bedømmes. En ultrakort lyspuls med en bølglængde på 400 nm skydes ind i en gasstråle af NO_2 . Herved frigøres en elektron for et øjeblik senere at blive indfanget igen. Indfangningen ledsages af lysimpulser af endnu mindre varighed. Ved at analysere dette lys, kan der siges noget om molekylets "øjeblikkelige" konfiguration.



Den nye spektroskopiske metode forventes at være til stor gavn for de forskere, som arbejder med f.eks. fotosyntese (klorofyl). Den vil også være nyttig ved udviklingen af andre fotokemiske processer af biologisk karakter og udvælgelse af sensibilator-farvestoffer til solceller.

Kilder: "Conical Intersection Dynamics in NO_2 Probed by Homodyne High-Harmonic Spectroscopy", H.J. Wörner et al.; *Science*, <http://www.sciencemag.org/content/334/6053/208>

At være eller ikke at være Higgs

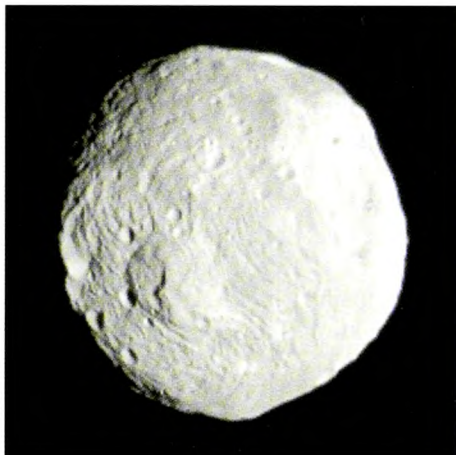
Forskerne ved CERN leder stadig uden det store held efter den mest eftersøgte partikel i fysikken, Higgs-bosonen. Partiklen er den sidste manglende brik i Partikelfysikkens Standardmodel og den skulle give alt stof en masse. Det vil derfor være et kæmpe gennembrud for CERNs Large Hadron Collider (LHC), der er verdens mest kraftfulde partikelaccelerator, hvis partiklen findes.

Ved en konference i Paris den 18. november i år præsenterede forskere fra ATLAS- og CMS-eksperimenterne resultater, der udelukker mulige masser af Higgs-partiklen. Masseintervallet fra $141\text{--}476 \text{ GeV}/c^2$ er blevet udelukket fra disse eksperimenter, hvilket efterlader et lille interval på kun $114\text{--}141 \text{ GeV}/c^2$, hvor Higgs-partiklen stadig kan findes. Viser det sig, at Higgs'en ikke gemmer sig i dette masseinterval, bliver det spændende, hvilke teorier partikelfysikerne vil præsentere for at redde standardmodellen.

Kilde: <http://videnskab.dk/miljo-naturvidenskab/higgs-jaegere-indleder-slutspurt>

Asteroiden Vesta omkredses

ASTRONOMI. Efter en rejsetid på 4 år har rumsonden Dawn gjort ophold ved Vesta og cirkulerer nu om asteroiden. Dawn er forsynet med en ion-raket-motor, så rumsonden bevæger sig hurtigt igennem rummet. Vesta er med en gennemsnitlig diameter på 500 km det næststørste objekt i asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. Dawn skal fotografere og udføre kemiske analyser af Vesta. Med en flyvehøjde på 50 km kan det fotografiske udstyr præstere en opløsning på 5-10 m af Vestas overflade.



Forskningsprojektets arbejdshypotese synes at være, at Vesta i det store og hele har bevaret sine træk fra den tid, hvor protoplaneterne var dominerende. Det Vesta kan afsløre, vil således fortælle noget om Solsystemets skabelse.

Efter at have tilbragt 1 år med at undersøge Vesta vil Dawn fortsætte mod næste mål, Ceres. For at nå dertil skal Dawn rejse yderligere 5 mia. km., men så ankommer det også (2015) til det største objekt i Asteroidebæltet. Med sin fladtrykte kugleform (900 km i diameter) klassificeres Ceres i vore dage som en dværgplanet.

Kilde: <http://dawn.jpl.nasa.gov>

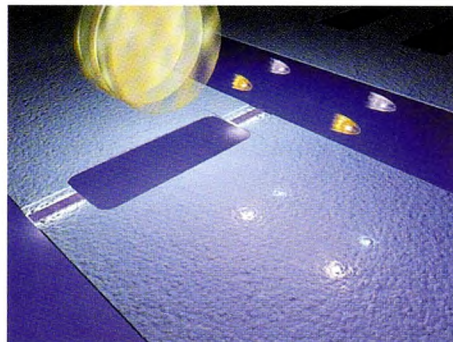
Lys fra vakuum

KVANTEFYSIK. Det kan måske lyde underligt, men vakuum er ikke tomt. I vakuum vil der være fyldt med forskellige partikler, der skabes for derefter hurtigt at forsvinde igen. Partikler, der fluktuere ind og ud af eksistens, kaldes for virtuelle partikler og er egentlig ikke rigtige partikler, idet deres korte levetid gør dem meget flygtige.

Det er dog blevet foreslået tilbage i 1970'erne af en fysiker ved navn Moore, at virtuelle fotoner kunne forlade deres virtuelle tilstand og kunne blive til måleligt lys. Han forudsagde, at man kunne få virtuelle fotoner til at springe tilbage fra et spejl, der bevæger sig med en hastighed tæt på lysets hastighed, hvorved de virtuelle fotoner ville blive til rigtige fotoner. Denne effekt – kendt som den dynamiske Casimir-effekt – har været efterstræbt af fysikere siden da, men det har været et problem at få et spejl til at bevæge sig med en meget stor hastighed.

Det er nu lykkedes for forskere ved Kalmar Tekniske Universitet at skabe lys fra vakuum. Problemet med det hurtige spejl er løst: I stedet for at ændre den fysiske afstand til et spejl, ændres en "elektrisk afstand" til en elektrisk kortslutning, der virker som et spejl. "Det elektriske spejl" består af kvanteelektroniske komponenter kaldet for SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), der er ekstremt følsomme overfor magnetiske felter. Ved at ændre retningen af magnetfeltet flere milliarder gange i sekundet, var muligt for forskerne ved Kalmar at få "spejlet" til at vibrere med en hastighed på op til 25 % af lysets hastighed.

Grunden til at man kan skabe virkelige fotoner fra virtuelle fotoner er, at "spejlet" overfører noget af sin kinetiske energi fra bevægelsen til den virtuelle foton, hvilket hjælper den til at materialisere sig. Dette kan kun lade sig gøre for fotoner, idet de ingen hvilemasse har.



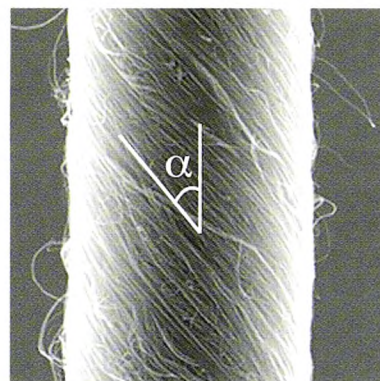
Resultatet af eksperimentet var at fotoner opstod parvist i form af mikrobølgestrålning fra vakuum. Fotonerne havde præcist de egenskaber, som kvantemekanikken havde forudsagt. Eksperimentet har stor betydning for vores forståelse af vakuum-fluktuationer og kan bidrage til vores forståelse af Universet, hvor mørk energi består af egenskaber i vakuumet selv. Der er også håb for at man kan benytte forskningsresultaterne i fremtiden til et forskningsfelt som kvantecomputere.

Kilde: *Nature* <http://www.nature.com/nature/journal/v479/n7373/full/nature10561.html>

Nanorør kan vride sig

NANOFYSIK. For at kunne få nanomekanik til at udføre kontrollerede bevægelser, ønskes nanomotorer og kunstige muskler. Sidstnævnte er blevet realiserede med "memory-metal" (metal, som erindrer tidligere form) og specielle organiske polymerer.

Forskere fra Wollongong og Dallas har nu præsenteret et nyt koncept, hvor et opviklet garn af nanorør udfører en drejende bevægelse. Tusindvis af små stykker nanorør bruges til at lave en garntråd, som vist på billedet.



Tråden neddyppes i en elektrisk ledende væske. Når tråden er mættet med væske, tilsluttes en spændingskilde (< 5 V). Elektrisk ladede ioner vil på grund de elektrostatiske kræfter vandre ind i det porøse garn, der i et vist omfang opkvælder (vikles op). Samtidig bliver trådens samlede længde 1 % mindre. Resultatet er, at det opviklede garn snor sig. Forskerne sammenligner dette med en elefantsnabel – den kan vrides rundt, men ikke uendelig mange gange.

Forskerne skjuler ikke, at der bruges en speciel elektrisk ledende væske. Desuden, at de små nanorør begynder at løsne sig efter en snes drejninger.

Kilder: "Torsional Carbon Nanotube Artificial Muscles", Javad Foroughi et al.; *Scienceexpress*, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1211220>

Molekylære motorer: Små systemer langt fra ligevægt

Af Natalia Golubeva, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Inden i vores kroppe opererer de såkaldte molekylære motorer langt fra termodynamisk ligevægt, hvor deres opførsel på grund af deres lille størrelse ultimativt er bestemt af termiske fluktuationer. Helt ny fysik er nødvendig for i detaljer at studere energiprocesser i disse små biologiske maskiner.

Indledning

En lang række biologiske systemer, der udfører vigtige opgaver inden i kroppen som fx kopiering af DNA og transport af molekyler inden i cellen, hører til i kategorien af små systemer, der opererer langt væk fra ligevægt. Motivationen for at studere disse systemer har derfor ikke manglet, men det er først for 20 år siden, da teknologiske landvindinger gjorde det muligt, at studere de små systemer eksperimentelt, at forskningen i ikke-ligevægtstermodynamik af små systemer for alvor tog fart. En særlig klasse små systemer er de såkaldte molekylære motorer. Vi vil se på, hvad de er for nogle størrelser, og vise hvordan nye resultater indenfor ikke-ligevægtstermodynamik kan bruges til at studere energiprocesser i disse biologiske motorer.

Molekylære motorer

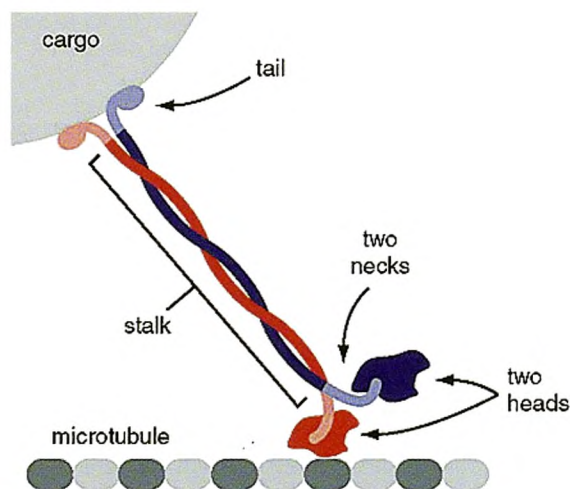
Molekylære motorer er fællesbetegnelsen for biologiske komplekser, der opererer ved at omdanne kemisk energi, som oftest ved hydrolyse, til brugbart mekanisk arbejde. Hydrolyse er en kemisk reaktion, hvor et organisk molekyle, dvs. et kemisk stof, der indeholder kulstofatomer, bliver spaltet til to organiske molekyler under vandoptagelse. Disse molekylære maskiner udfører et utal af forskellige opgaver i cellen såsom transport af store molekyler, reparation af DNA eller kopiering af DNA og RNA. RNA består ligesom DNA af kæder af nukleotider, og har forskellige funktioner i cellen. Én slags RNA bruges til at transportere aminosyrer hen til ribosomerne, cellens proteinfabrikker, under den naturlige proteinsyntese, mens en anden slags RNA er et midlertidigt budbringermolekyle, der bringer en gensekvens lagret i DNA ud til cellens cytoplasma, hvor sekvensen oversættes til protein.

Et af de mere kendte eksempler på en molekylær motor er kinesin-motoren (se figur 1), der netop transporterer større livsnødvendige molekyler rundt i cellen, idet disse er for store til selv at diffundere til deres destinationer, dvs. at nå frem på egen hånd i deres tilfældige vandring rundt i cellen. Disse molekylære motorer kunne fx være vesikler, der er en slags beholdere, som cellen bruger til at lagre, transportere eller fordøje diverse materialer. Kinesin-motoren bruges også til at transportere større organeller, dvs. strukturer i cellen, der er omgivet af en membran, og som spiller en rolle i cellens stofskifte. Et eksempel herpå er de såkaldte mitokondrier, der er cellens energifabrikker. Motoren bevæger sig langs de

såkaldte mikrotubuli, der har form af små rør opbygget af proteinet tubulin med en diameter på ca. 24 nm, hvorimod længden kan variere fra et par mikrometer helt op til en millimeter. Selve motoren består af to hoveder, der via en stilk er forbundet til halen, hvorpå molekylet, der skal transporteres, er fastgjort. Denne motor er drevet af den frigjorte energi i hydrolysen af ATP (adenosintrifosfat), som er cellens primære brændstof. Reaktionskemaet for processen kan skrives



hvor produkterne er ADP (adenosindifosfat) og fosfat, P_i . Motoren hydrolyserer ét ATP-molekyle per skridt, dvs. hver gang et af de to hoveder flyttes, hvorved den bevæger sig 8 nm frem. Den kemiske energi, der bliver frigivet under hydrolysen, er omkring $20 k_B T$. Når vi snakker om små systemer, er den termiske energi $k_B T$, hvor k_B er Boltzmanns konstant, og T er temperaturen, en bekvem enhed for energi. Det udførte arbejde er til gengæld $12 k_B T$, hvormed effektiviteten af motoren bliver ca. 60 %.



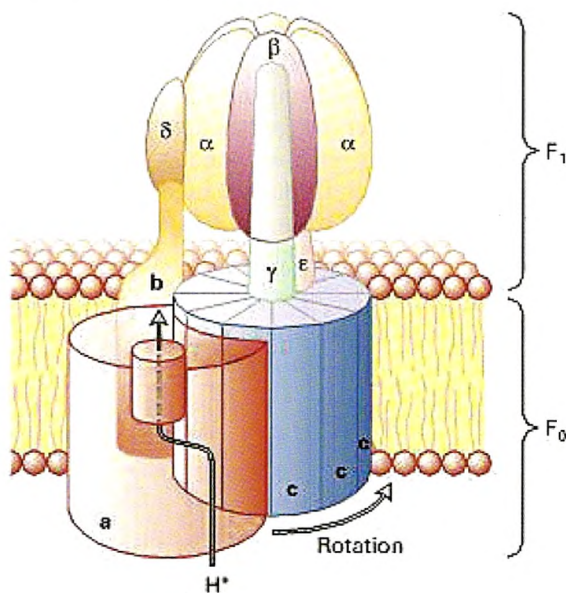
Figur 1. Illustration af hvordan kinesin-motoren opererer. Motoren kommer fremad ved skiftevis at flytte et af de to hoveder i en "hånd-over-hånd"-fremgangsmåde.

Et andet centralt eksempel er F_1 -ATPase-motoren. Denne roterende motor er under naturlige forhold en del af enzymet ATP-syntase (se figur 2). Dette enzym befinder sig i mitokondrierne og forsyner cellen med energi ved at syntetisere ATP fra ADP og fosfat, altså ved den modsatte reaktion af den, vi betragtede ved hydrolysen. For at danne de energirige ATP-molekyler

må vi derfor tilføre en mængde energi, som oftest er i form af protoner, der bevæger sig i en elektrokemisk gradient. Enzymet er omsluttet af en membran, og det er koncentrationsforskelle henover membranen, der giver anledning til gradienten.

ATP-syntase består af en F_0 - og en F_1 -del. Den førstnævnte er en protonpore, der er placeret i mitokondriemembranen. F_1 -delen (også kaldet F_1 -ATPase) er den roterende del, der befinder sig henover membranen, og består af et γ -skaft, der roterer inden i en ring af tre α -enheder og tre β -enheder. Syntesen af ATP sker på aktive steder på β -enhederne og er drevet af formændringerne af de sidstnævnte. Disse er til gengæld forårsaget af rotationen af gammaskafte, der roterer grundet energitilførslen fra protongradienten.

Som for andre enzymer, er virkningen af ATP-syntase reversibel, dvs. at store mængder af ATP kan forårsage en protongradient henover membranen. Dette bliver faktisk udnyttet af fx gærbakterier, der hydrolyserer ATP for at skabe en gradient, som de bruger til bl.a. at transportere næringsstoffer ind i cellen. I laboratoriet kan man også tvinge motoren til at operere baglæns ved blot at øge ATP-koncentrationen i opløsningen. Desuden fokuserer de fleste studier kun på det simple system F_1 -ATPase, der er den mindste bestanddel af det store enzymkompleks, der kan fungere som en selvstændig motor. Lad os derfor fra nu af snakke om F_1 -ATPase som en molekylær motor, der opererer ved at hydrolysere ATP-molekyler til at skabe mekanisk bevægelse i form af rotation af γ -skaftet.



Figur 2. Illustration af F_0F_1 -ATP-syntase-komplekset, hvoraf F_1 -ATPasen udgør den mindste selvstændige roterende motor.

Tre ATP-molekyler bliver hydrolyseret per omdrejning, så energien fra et enkelt ATP-molekyle bliver altså brugt til en 120° rotation. Inden for den eksperimentelle usikkerhed er denne motors effektivitet målt til 100%. Det er her værd at bemærke, at dette resultat ikke er i modstrid med termodynamikkens anden lov, som vi

kender den formuleret for Carnot-motorer, fordi molekylære motorer ikke opererer mellem to varmebade, hvilket er tilfældet for Carnot-maskiner.

Netop de høje effektiviteter er et af kendetegnene for molekylære motorer. For at forstå årsagen til dette er det vigtigt at studere de energiprocesser, der finder sted i motoren. Specielt er det udførte arbejde, og dermed effekten, samt varmen afsat til omgivelserne afgørende for motorens effektivitet. Vi vil senere se på, hvordan man ved brug af ny teori kan bestemme kraftmomentet, og dermed det udførte arbejde, af F_1 -ATPase eksperimentelt. Kraftmomentet beskriver populært sagt den "trækraft", der får roterende legemer til at dreje rundt.

Brug for ny teori

Klassisk termodynamik har vist sig at være et yderst succesfuldt værktøj til at beskrive energiudveksling i så vidt forskellige makroskopiske systemer som sorte huller, væsker og superledere. Disse systemers opførsel er reproducerbar, og fluktuationer, dvs. afvigelser fra den typisk observerede, gennemsnitlige opførsel, er neglige. I takt med at systemets størrelse bliver mindre og mindre, bliver fluktuationerne større og større, og i små systemer langt fra ligevægt kan termiske fluktuationer lede til væsentlige afvigelser fra systemets gennemsnitlige opførsel. I denne grænse er den velkendte termodynamik ikke længere en god beskrivelse, og ny teori skal til for at forstå disse systemers opførsel.

Små systemer er i denne sammenhæng systemer med en størrelse på omkring 100 nm eller mindre. Molekylære motorer har en størrelse på 2 – 100 nm og er dermed naturligvis inkluderet i denne klasse af systemer, men forskere er også interesseret i andre eksempler såsom magnetiske domæner i ferromagneter, kvanteprikker og små elektriske kredsløb.

Den store interesse for at forske i små ikke-ligevægtssystemer kom i 1990'erne, hvor moderne metoder til mikroskopisk manipulation kom til verden. Værktøjer som optiske og magnetiske pincetter har givet eksperimentalerne adgang til information omkring, hvordan systemerne udveksler varme og arbejde med sine omgivelser. Teoretikerne har fulgt efter med en lang række resultater, der i dag tilsammen går under navnet "stokastisk termodynamik". Vi vil se nærmere på en speciel type relationer kaldet "fluktuationssætninger", der netop kan fortælle os, hvordan sandsynligheden for at observere fluktuationer i energiudvekslinger opfører sig.

Fluktuationssætninger

Ligesom for makroskopiske systemer skelner man for mikroskopiske systemer mellem to forskellige slags tilstande, hvor systemets opførsel ikke ændrer sig med tiden: dels ligevægstilstande, og dels ikke-ligevægts stationære situationer, fx væskestrømning gennem et rør ved en konstant trykforskel. I ikke-ligevægts stationære situationer (ILSS) flyder der strømme igennem systemet, men deres tidsafhængighed er negligerbar. Kinesin-mikrotubulus-systemet er et eksempel,

hvor den tidsafhængige variabel er kinesins (gennemsnits)hastighed. Det kræver en konstant energitilførsel for at opretholde en ILSS, og der bliver konstant afsat energi i det omgivende medie.

Et motormolekyle, der vekselvirker med sin bane og med de andre molekyler i dets vandige omgivelser, er dermed i besiddelse af rigtig mange frihedsgrader. Heldigvis varierer de fleste af disse variable hurtigt og er tilnærmelsesvist i ligevægt sammenlignet med motorens bevægelse. Vi kan altså effektivt set beskrive deres indflydelse på motoren i form af et varmebad med temperaturen T , der vil påvirke bevægelsen gennem fluktuerende, stokastiske kræfter.

Termodynamikkens 1. lov for sådanne stokastiske systemer kan formuleres på følgende måde

$$\Delta U_\tau = W_\tau - Q_\tau, \quad (2)$$

hvor vi forestiller os, at vi observerer et system over et tidsrum τ og måler ændringen i løbet af dette tidsrum i dets totale energi, ΔU_τ , arbejdet udført på systemet, W_τ , og varmen, som systemet afsætter i omgivelserne, Q_τ . Fordi systemet er påvirket af fluktuerende kræfter som diskuteret ovenover, ville vi få forskellige resultater for hver gang, vi gentog ovenstående måling, fordi systemet altså følger en forskellig bane i faserummet hver gang. Med andre ord er ΔU_τ , W_τ og Q_τ stokastiske variable, og vi kan spørge om, hvilke sandsynlighedsfordelinger $P_\tau(\Delta U)$, $P_\tau(W)$ og $P_\tau(Q)$, vi ville få for dem, hvis vi målte et stort antal gange.

Utroligt nok viser det sig, at man kan sige noget meget generelt om fordelingerne i grænsen, hvor τ er tilstrækkelig stor. Lad os for eksempel betragte forholdet $P_\tau(Q)/P_\tau(-Q)$ mellem hhv. sandsynligheden for at måle varmen Q og $-Q$. I ligevægt er der netto set ingen varmeoverførsel mellem system og varmebad, så sandsynligheden for positive og negative varmeoverførsler er lige stor, altså er $P_\tau(Q)/P_\tau(-Q) = 1$. Væk fra ligevægt er dette ikke længere tilfældet. Under en række rimelige antagelser kan man vise, at følgende fluktuationssætningsrelation gælder for en ILSS:¹

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{P_\tau(Q)}{P_\tau(-Q)} = e^{Q/k_B T} \quad (3)$$

Her skal $\tau \rightarrow \infty$ grænsen forstås således, at τ skal være meget større end den tid, det tager systemet at vende tilbage til ILSS efter en lille perturbation.

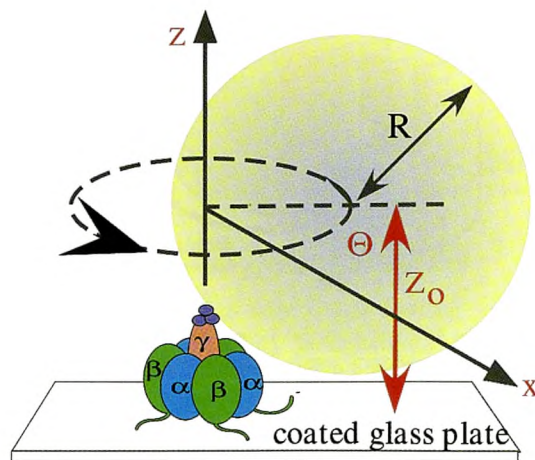
Der er flere ting at bemærke ved ovenstående relation. Først og fremmest siger den, at der er en endelig sandsynlighed for at observere negative værdier af Q , dvs. negative værdier af entropiproduktionen $\sigma = Q/\tau T$. Dette er umiddelbart i uoverensstemmelse med termodynamikkens anden lov. Hvordan kan det være? Bemærk dog, at middelværdien Q altid er positiv, så den 2. lov er altså opfyldt for middelværdier. Desuden fortæller (3), at sandsynligheden for at observere en hændelse, hvor Q er negativ, aftager eksponentielt med størrelsen af Q . Siden varmen og entropien er

ekstensive størrelser, dvs. at Q vokser proportionalt med systemets størrelse, er sandsynligheden for varmeabsorption fra varmebadet altså forsvindende lille for makroskopiske systemer. Dette forklarer, hvorfor vi aldrig observerer "overtrædelser" af termodynamikkens 2. lov i den klassiske termodynamik.

Der eksisterer lignende fluktuationssætninger for W_τ og for en række andre termodynamiske variable under forskellige antagelser. Fluktuationssætninger har en række vigtige konsekvenser og anvendelser, som fx den berømte Jarzynski-lighed, der gør det muligt at bestemme forskellen i Gibbs' frie energi mellem to makroskopiske tilstande ved at måle sandsynlighedsfordelingen for det udførte arbejde i en vilkårlig transformation mellem disse tilstande (se [2] for en detaljeret gennemgang). Man kan også ved hjælp af fluktuationssætninger udlede en fluktuations-dissipations-sætning for ILSS, der kan bruges til at forudsige, hvordan systemet vil reagere på en perturbation. Indtil videre har dette kun været muligt for systemer i ligevægt. Desuden kan man også bruge fluktuationssætninger til at måle gennemsnitlige værdier af det udførte arbejde og dermed effekten. Vi skal i næste afsnit se, hvordan dette er blevet brugt til at måle kraftmomentet af F_1 -ATPase.

Kraftmomentet af F_1 -ATPase

I 2010 publicerede en japansk forskningsgruppe en artikel i det anerkendte tidsskrift *Physical Review Letters*, hvor de beretter om, at de har bestemt kraftmomentet af motoren F_1 -ATPase ved brug af en fluktuationssætning [4]. Dette resultat er interessant af flere årsager. For det første er der endnu kun et fåtal af eksperimenter, der benytter fluktuationssætninger som den underliggende teori. For det andet er det første gang, at kraftmomentet af motoren er blevet målt så præcist, idet der normalt er store usikkerheder forbundet med "konventionelle" måder at bestemme kraftmomentet på, som vi skal se.



Figur 3. Den eksperimentelle opstilling til bestemmelse af kraftmomentet af F_1 -ATPase. En stor perle er fastgjort til motorens γ -skaft og følges med et mikroskop. [1].

¹Fluktuationssætninger er med succes blevet testet eksperimentelt. For en gennemgang se [1].

Eksperimentet er udført på følgende måde. Motoren er fastgjort til en glasplade ved hjælp af en passende belægning på overfladen af pladen. Idet motorens størrelse er få nanometer, er det ikke muligt at observere skaflets rotation i et almindeligt optisk mikroskop, så en probe i form af en stor perle med en størrelse på få hundrede nanometer bliver sat fast på rotoren. Perlen kan nu nemt følges med et mikroskop, og motorens position kan derved bestemmes som funktion af tiden (se figur 3).

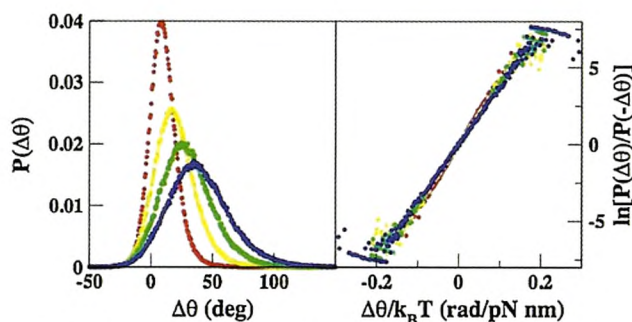
For lange tider kan vi beskrive motorens bevægelse ved den såkaldte Langevin-ligning,²

$$\Gamma\dot{\theta} = N + \xi. \quad (4)$$

Her er $\dot{\theta}$ motorens vinkelhastighed, og N er kraftmomentet. Desuden virker der en friktionskraft på motoren, der er proportional med vinkelhastigheden, hvor proportionalitetskonstanten er friktionskoefficienten Γ . Tilfældige kollisioner med molekyler i det omgivende medie er repræsenteret ved den hvide støj fra varmebadet, ξ . Der gælder derfor, at middelværdien er $\xi = 0$. Hvis vi tager middelværdier på begge sider i (4) får vi altså

$$N = \Gamma\dot{\theta}, \quad (5)$$

idet N er antaget tilnærmelsesvist konstant. Det virker tilsyneladende som om, at vi nemt kan finde N ud fra denne formel, men problemet ligger i bestemmelsen af Γ , som bl.a. afhænger af viskositeten af den omgivende væske, formen og størrelsen af proben samt dens afstand fra glaspladen. Især den sidstnævnte parameter er svær at bestemme i eksperimenter, hvilket betyder, at Γ , og dermed N , bliver behæftet med store usikkerheder ved denne fremgangsmåde.



Figur 4. Venstre: Sandsynlighedsfordelinger $P_\tau(\Delta\theta)$ for forskellige værdier af τ , hvor den mindste og den største værdi er hhv. $\tau = 2, 5$ ms (rød kurve) og $\tau = 10$ ms (blå kurve). Sandsynligheden for at observere negative fluktuationer for $\Delta\theta$ aftager med voksende τ . Højre: Kraftmomentet N kan findes som hældningen af den rette linje. For dette forsøg findes $N = 38$ pN·nm for $\tau = 10$ ms. [4].

Lad os nu se, hvordan vi kan undgå problemet med bestemmelse af Γ ved at bruge en fluktuationssætning. Arbejdet udført af motoren i tidsrummet τ er givet ved

$$W_\tau = \int_t^{t+\tau} N\dot{\theta}(t)dt = N(\theta(t+\tau) - \theta(t)) = N\Delta\theta_\tau, \quad (6)$$

idet N er konstant. Fluktuationssætningen for W_τ tager nu følgende form (jf. ligning (3) med Q erstattet med W)

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{P_\tau(\Delta\theta)}{P_\tau(-\Delta\theta)} = e^{N\Delta\theta/k_B T}. \quad (7)$$

Det følger, at vi kan finde N som hældningen af den rette linje, der fremkommer ved at plotte $\ln(P_\tau(\Delta\theta)/P_\tau(-\Delta\theta))$ som funktion af $\Delta\theta/k_B T$! Dette er netop blevet gjort af den japanske gruppe, og resultater fra en af deres målinger kan ses i figur 4. Kraftmomentet blev bestemt til omkring 40 pN·nm, men varierer dog lidt for de forskellige typer prober pga. systematiske usikkerheder. Ikke desto mindre er usikkerheden på resultatet for den enkelte type probe væsentligt reduceret i forhold til usikkerheden på resultatet opnået ved brug af ligning (5). Fluktuationssætningen (7) har altså muliggjort en præcis bestemmelse af kraftmomentet ved gentagne gange "blot" at observere ændringen i motorens position i løbet af et givet tidsrum.

Dette var blot et eksempel på, hvordan stokastisk termodynamik kan bruges til at studere egenskaber af molekylære motorer. Som nævnt tidligere er anvendelsen dog langt fra begrænset til molekylære motorer. Samtidig bliver der i dag forsket intenst i fundamentale aspekter af den nye teori om ikke-ligevægtssystemer, så den nærmeste fremtid vil uden tvivl bringe en masse interessante og revolutionerende resultater indenfor området af både teoretisk og eksperimentel karakter.

Litteratur

- [1] S. Ciliberto et al. (2010), *Journal of Statistical Mechanics*, december 2010, P12003
- [2] C. Bustamante et al. (2005), *Physics Today*, 2005, vol. **58**, s. 43
- [3] C. Bustamante et al. (2001), *Accounts of Chemical Research*, 2001, vol. **34**, s. 412
- [4] K. Hayashi et al. (2010), *Physical Review Letters*, 2010, vol. **104**, 218103



Natalia Golubeva er ph.d.-studerende, ved "Statistical Physics Group" ved Aarhus Universitet, indenfor emnet statistisk mekanik og ikke-ligevægtstermodynamik på biologiske systemer.

²En diskussion af modeller for motorernes bevægelse kan findes i [3].

Solaktivitet og klimaændringer

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space

Solpletter er et tydeligt tegn på Solens aktivitet, og de er sandsynligvis blevet observeret gennem flere tusinde år. Det har også i mange år været klart, at der er sammenhæng mellem Jordens klima og Solens aktivitet, men vi er først nu ved at afdække den fysiske mekanisme bag sammenhængen.

Solkonstanten er ikke konstant

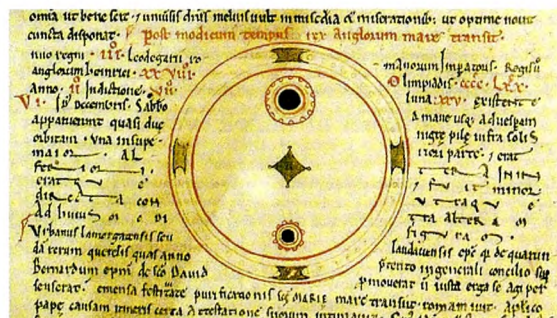
Et *oxymoron* er et ord eller en kort vending, der kombinerer begreber, som modsiger hinanden. Et godt eksempel på et oxymoron er *solkonstanten*, som er et mål for Solens udstråling lige udenfor Jordens atmosfære. Tallet er omkring 1.365 W/m^2 , men det er netop ikke en konstant, for det varierer i takt med Solens aktivitet. Solens mest kendte rytme, den 11-årige Schwabe cyklus er i øvrigt heller ikke konstant, men varierer mellem ca. 9 og 12 år, og derudover er der perioder på blandt andet ca. 90 år (opkaldt efter Gleissberg), 210 år (Suess eller de Vries) og 2.300 år (Hallstatt).

Ændringen i solkonstanten over en enkelt solcyklus er relativt lille, ca. en promille, men det bliver dog alligevel til omkring $1,4 \text{ W/m}^2$, hvilket integreret over Jorden bliver til en enorm energimængde. Ændringen er ikke jævnt fordelt over alle bølgelængder og i UV området er variationen således langt større over en solcyklus (omkring 6 % ved 200 nm), men ændringerne er alligevel så små, at det har været svært at måle dem fra Jorden. Siden 1977 er der dog foretaget systematiske målinger af soludstrålingen fra flere satellitter.

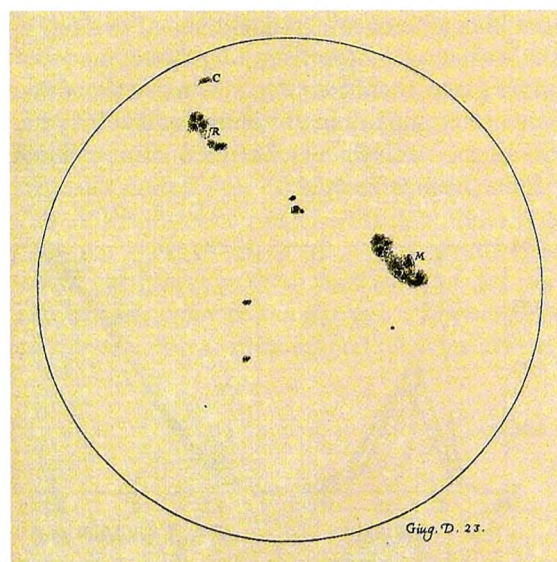
Historiske observationer

Allerede meget tidligt har man dog været klar over, at Solen ikke var en konstant lysende lampe. Theofrast (ca. 372-287 før Kristi fødsel), som var en elev af Aristoteles, har således i sin afhandling *De Signis Tempestatum* (Om Vejrvarsler) flere referencer til pletter på Solen [1]. Større solpletter kan godt ses med det blotte øje, hvis man kigger på Solen ved solopgang eller -nedgang, og Theofrast konkluderer, at hvis Solen har et sort mærke, når den står op er det et tegn på regn (*Fragm. 6.1.11*). Et andet sted (*Fragm. 6.2.27*) skriver han, at sorte pletter på Solen og Månen er et tegn på regn, mens røde pletter er et tegn på vind. Omvendt indikerer en solopgang med en Sol uden særlige mærker, at det bliver godt vejr (*Fragm. 6.4.50*). Det er også interessant, at Theofrast ikke blot noterer sig, at Solen kan have pletter, men også mener at der er en sammenhæng mellem solpletter og vejret. Selvom Theofrast måske er den første, der har skrevet om solpletter, betyder det ikke nødvendigvis, at han selv har observeret dem, men han har snarere samlet den tilgængelige viden på daværende tidspunkt. Nogle forskere [2] argumenterer således for, at observationerne skal tilskrives astronomen Meton (ca. år 400 før Kristi

fødsel), der observerede Solen fra bjerget Lycabettus i Athen, og som også omtales af Theofrast (*Fragm. 6.1.4*).



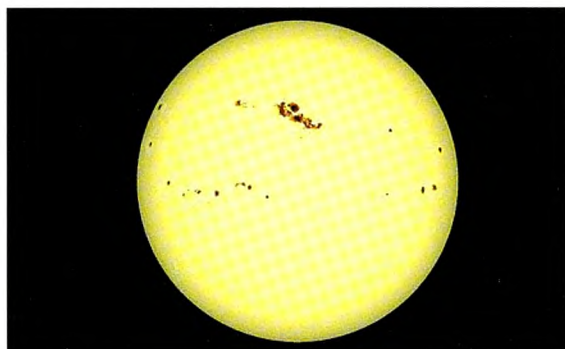
Figur 1. Solpletter tegnet af John fra Worchester [3].



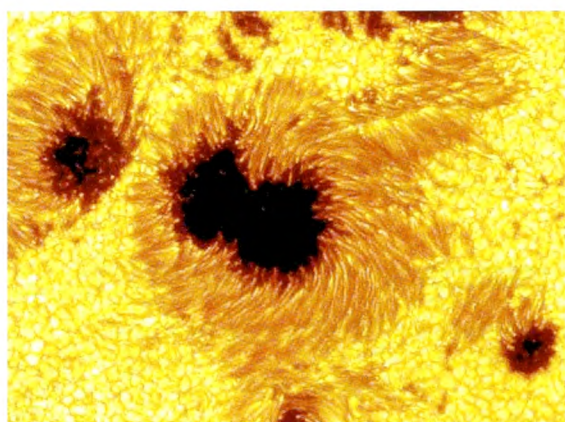
Figur 2. Galileo Galileis tegning af solpletter, observeret i sommeren 1612.

Formodentlig har kinesiske og koreanske astronomer observeret solpletter endnu tidligere, og op igennem middelalderen er der mange eksempler på observationer, bl.a. den engelske munk og krønikeskriver John fra Worchester (ca. 1130, se figur 1). I dag kan man godt undre sig over, at disse observationer ikke gav anledning til større opmærksomhed, men både Aristoteles og senere kristendommen havde erklæret himlen og dens legemer for uforanderlige, og formodentlig derfor blev solpletter enten ignoreret eller fejlagtigt tilskrevet passager af de indre planeter Merkur og Venus. Først opfindelsen af teleskopet og Galileis beskrivelse af sine

observationer (figur 2) af solpletter i 1610 ændrede dette verdensbillede, og med så stor effekt, at det er blevet sammenlignet med den første månelanding [4].



Figur 3. Solpletter fotograferet fra NASA's Solar Heliospheric Observatory (SoHO). Solpletterne ligner Galileis tegninger og ser mørke ud fordi de har lavere temperatur (ca. 4.200 K i centrum) i forhold til omgivelserne (ca. 5.800 K). De lever fra dage til uger.

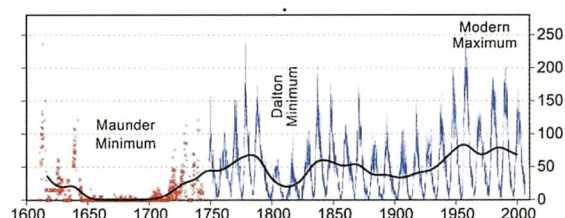


Figur 4. Nærbillede af solpletter. Magnetfeltet er stærkt koncentreret i solpletten.

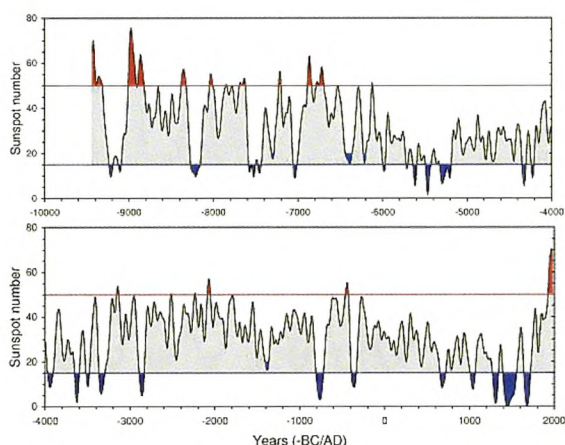
Siden da har der været utallige eksempler på og forslag til korrelationer mellem Solens aktivitet og Jordens klima [5]. Galileis samtidige, den italienske astronom Giovanni Riccioli, spekulerede tidligt over om solpletterne havde indflydelse på klimaet, dog uden at have empiriske målinger som grundlag for teorien, men i slutningen af 1700-tallet undersøgte den britiske astronom William Herschel spørgsmålet med en mere videnskabelig tilgang. I mangel på gode meteorologiske data brugte han prisen på hvede, idet han fornuftigt nok antog, at prisen afspejlede årets høst og dermed klimaet. Hans første forsøg på at overbevise medlemmerne af The Royal Society gennem en forelæsningsrække om korrelationen gik dog ikke så godt, og efter blot en enkelt forelæsning måtte han aflyse resten af foredragene. Forsamlingen var simpelthen ved at dø af grin, efter at han havde luftet sin teori om at Solen ikke blot var kold indei, men også beboet [4,6].

I 1873 publicerede den britiske meteorolog Charles Meldrum, der arbejdede i Indien, en artikel om sammenhængen mellem solpletter og cykloner i Indien [5], og herefter fulgte en hel række forskere trop med mere eller mindre overbevisende korrelationer mellem klimaparametre på Jorden og antallet af solpletter. En af de

prominente solpletforskere var den engelske astronom Edward Maunder (1851-1928), som havde været fascineret af solpletter siden han var en stor dreng. Senere blev han medarbejder ved observatoriet i Greenwich og optog i tusindvis af billeder af solpletter, hvilket satte ham i stand til at kortlægge deres regelmæssige bevægelser hen over Solens overflade. Han foreslog også at perioden fra 1645 til 1715, hvor der var observeret usædvanligt få solpletter, måtte falde sammen med en kølig periode i Jordens klima, men desværre blev hans teori først generelt accepteret efter hans død [2]. Til gengæld er det lange solpletminimum i 1645-1715 blevet opkaldt efter Maunder (figur 5), selvom det egentlig var den tyske astronom Gustav Spörer, som først identificerede perioden. Som trøst har Spörer dog fået opkaldt et mindre solpletminimum fra 1460 til 1550 efter sig.



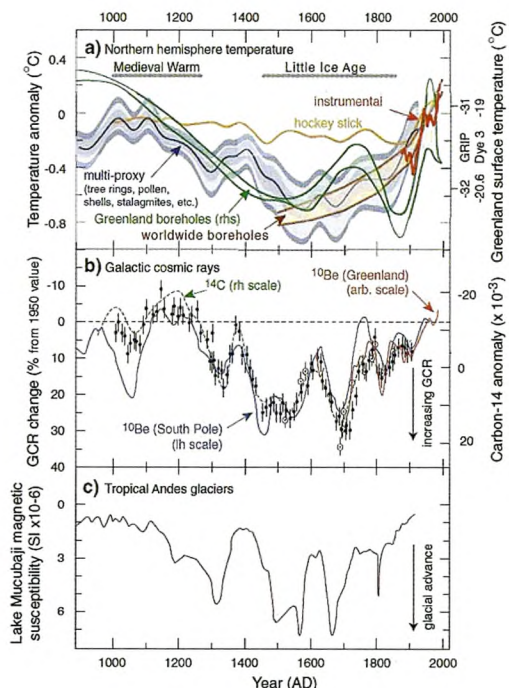
Figur 5. Antallet af solpletter siden 1600.



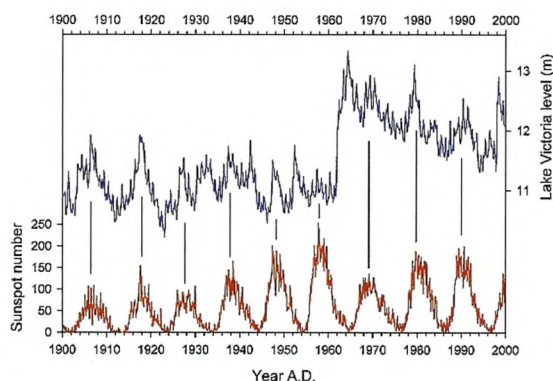
Figur 6. Rekonstruktion af solpletallet siden afslutningen på sidste istid. Solaktiviteten i 1900-tallet var den højeste i mere end 10.000 år.

Nyere forskning

I en serie efterhånden klassiske artikler fra 1987 og frem viste Karin Labitzke og Harry van Loon [7] fra NCAR i Boulder, Colorado, at der var en overbevisende korrelation mellem temperaturerne i stratosfæren og antallet af solpletter. I begyndelsen brugte forskerne data for perioden 1958-1986, og på trods af en vis skepsis har korrelationen vist sig at holde selvom perioden nu er udvidet til 1942-2010, dvs. over cirka seks solcykler. Siden er robuste korrelationer blevet observeret (figur 7 og 8) mellem solaktivitet og klimaparametre som ozonkoncentrationer, temperatur, vind, skyer, nedbør og cirkulationer i atmosfæren som den Nordatlantiske Oscillation (NAO) [9].



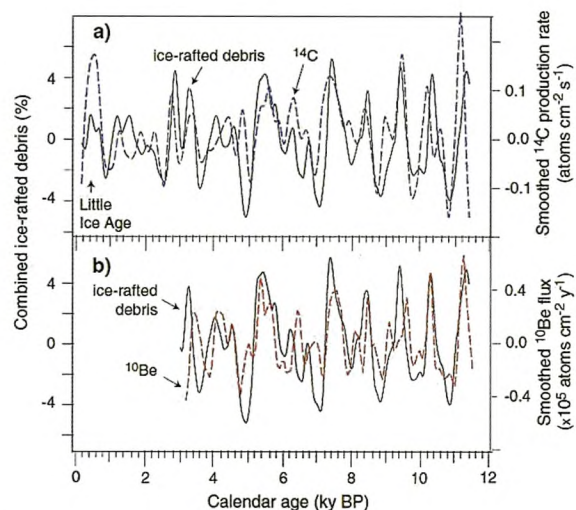
Figur 7. Korrelationer gennem de sidste 1.000 år i henholdsvis: (a) klodens gennemsnitstemperatur, baseret på forskellige rekonstruktioner, (b) solaktiviteten, baseret på produktionen af radioaktive isotoper (Be-10 og C-14), samt (c) ændringer i størrelsen af en gletsjer i den tropiske del af Andesbjergene i Venezuela. [8].



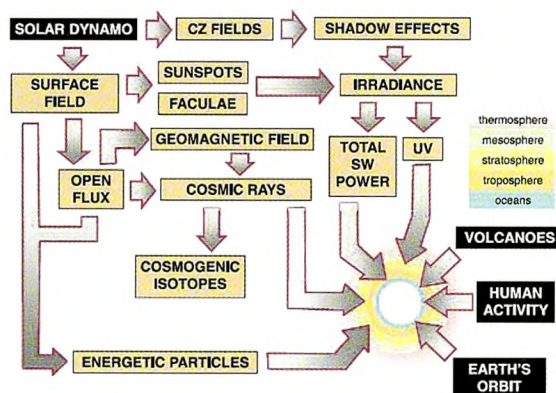
Figur 8. Korrelation mellem vandstanden i Victoriasøen og antallet af solpletter.

Desuden har analyser af bla. sedimenter fra Nordatlanten (hvor mængden af materiale er et udtryk for antallet af isbjerge) og sammenligninger med rekonstruktioner af fortidens solaktivitet vist en overbevisende korrelation med Jordens klima, der går 12.000 år tilbage i tiden (figur 9). Der er således ikke længere tvivl om, at variationer i Solens stråling påvirker klimaet, men der er til gengæld uenighed om størrelsen af effekten, og også mange forslag til hvilke mekanismer, der overfører Solens påvirkning. Korrelationer er i sig selv ikke nok til at afsløre den fysiske mekanisme og i forhold til de store energistrømme i Jordens klimasystem er variationerne i den direkte påvirkning fra Solen ret beskedne, så der er brug for mekanismer, der kan forstærke effekten. Groft sagt kan man gruppere idéerne i to grupper, hvor den ene involverer klimasystemets

respons på den direkte variation i Solens udstråling, og den anden gruppe involverer partikler udsendt fra Solen, og som enten påvirker Jorden direkte eller (i form af solvinden) modulerer intensiteten af kosmiske partikler fra verdensrummet (figur 10).



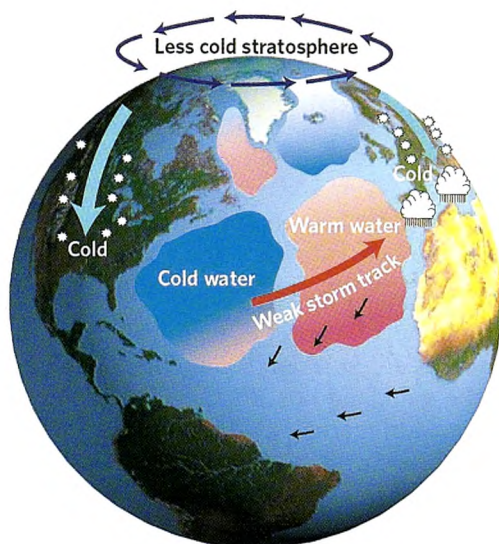
Figur 9. Korrelation mellem solaktivitet, udtrykt ved produktionen af C-14 (blå kurve) og Be-10 (rød kurve), samt mængden af materiale aflejret fra smeltende isbjerge i Nordatlanten (sorte kurver) [8].



Figur 10. Oversigt over forskellige påvirkninger af Jordens klima, især hvordan ændringer i Solen kan overføres til Jorden [9].

Direkte påvirkninger

Den direkte variation fra soludstrålingen har relativt størst virkning i stratosfæren, hvor UV strålingen absorberes og påvirker fotokemiske processer. Herfra kan virkningen af en variation i Solens UV udstråling forplante sig ned i troposfæren og f.eks. ændre fremherskende cirkulationsmønstre. For nylig offentliggjorde en britisk forskergruppe [10] således modelleringer, der viste at et solpletminimum kunne ændre vindstrømmene over Nordatlanten således, at de traditionelle vestenvinde slapper af og ikke bringer de varme luftmasser ind over Europa, der normalt giver os milde vintre. I stedet trænger kolde luftmasser ned over USA og det nordlige Europa, og giver de kolde vintre vi har oplevet de seneste to år (figur 11).



Figur 11. Den Nordatlantiske Oscillation (NAO) kan skifte mellem to tilstande (faser) og en klimamodel har nu vist, hvordan ændringer i Solens UV-stråling kan skubbe atmosfæren mellem den positive og negative NAO-fase. Figuren viser situationen under den negative fase, som har været fremherskende de foregående tre vintre. De fugtige og milde vestenvinde fra Atlanterhavet mister styrke og i stedet strømmer der kold luft fra polarområdet ned over Europa og giver de meget kolde vintre.

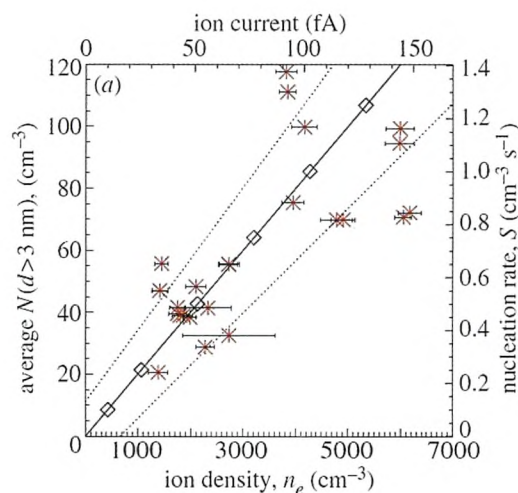
Indirekte påvirkninger

Solens udstråling af partikler kan som nævnt også modulere mængden af kosmiske partikler, der når ned i Jordens atmosfære. Her ioniserer de kosmiske partikler molekylerne i atmosfæren, og den resulterende koncentration af ioner varierer derfor også i takt med Solens ændringer. Eksperimenter udført ved DTU [11], Aarhus Universitet [12] og på CERN [13] har de seneste år vist, at ioner er med til at fremme kondenseringen af gasser i atmosfæren til små klynger eller aerosoler af nanometer-størrelse (figur 12 og 13). Små klynger dannes konstant i atmosfæren, men om de vokser sig større er en konkurrence mellem fordampning fra og kondensering på klyngen, og her virker ladning på klyngen stabiliserende fordi Coulomb-tiltrækningen forhindrer molekylerne i at fordampe. Mekanismen kaldes ion-induceret nukleation og der er nu udviklet flere modeller, der inkluderer mekanismen [14, 15]. En lille aerosol på nogle få nm påvirker klimaet direkte, fordi den reflekterer en del af solindstrålingen, men hvis aerosolen vokser sig til en skydråbe, får den langt større betydning, da skyer har en stor effekt på Jordens klima. I så fald er mekanismen, at ændringer i Solaktiviteten ændrer intensiteten af kosmiske stråler, som igen ændrer mængden af skyer i Jordens atmosfære, og dermed får klimaet til at blive varmere (færre skyer) eller koldere (flere skyer). En aerosol skal dog op på en størrelse på omkring 80-100 nm, før den kan gøre sig håb om at blive til en skydråbe, og nogle modeller [15] antyder, at produktionen af små aerosoler ikke er vigtig for hvor mange store aerosoler det resulterer i, fordi de små aerosoler blot konkurrerer om de samme kondenserbare gasser i atmosfæren eller støder ind i hinanden og dermed bliver til færre store aerosoler. Der

er derfor et stort behov for eksperimenter, hvor man kan følge aerosolernes vækst gennem mange timer. Det kræver et stort aerosolkammer, så partiklerne ikke går tabt for hurtigt i kollisioner med væggene, men sådanne forsøg er nu undervejs både på DTU og på CERN.



Figur 12. Forsøgsopstilling på DTU Space til måling af aerosoldannelse.



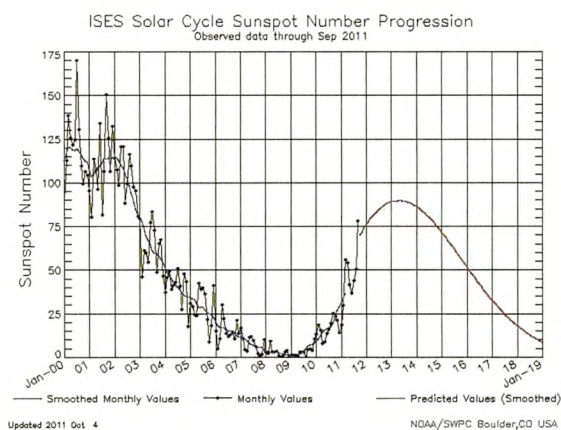
Figur 13. Målinger ved DTU Space har vist, at der er et sammenhæng mellem antallet af ioner i atmosfæren og produktionen af aerosoler på 3 nm [11]. Stjerneerne er eksperimentelle målinger, mens ruderne er resultatet af en modelberegning.

Fremtiden

Solaktiviteten har været voksende gennem 1900-tallet, men i det nye årtusinde er aktiviteten dalende. Den seneste solcyklus, der sluttede i december 2008 har været usædvanlig langvarig, nemlig 12,6 år, hvilket er det længste i over 200 år, og man tager den lange solcyklus som et tegn på at Solen er blevet svagere. Vi skal også tilbage til starten af 1900-tallet for at finde en cyklus, hvor der har været lige så mange dage helt uden solpletter. Solens opførsel er derfor usædvanlig i øjeblikket, og der har været spekulationer om, at Solen er ved at gå ind i et meget dybt minimum svarende til Maunder-minimummet (1645-1715). Som det ses af figur 5 var solaktiviteten i starten af 1800-tallet nede i et minimum – Dalton-Minimummet (efter den

engelske meteorolog John Dalton) – og med den 210-årige Suess-cyklus passer det meget godt med Solens forhistorie, at der er et nyt minimum på vej.

Desværre er vores forståelse af Solens dynamik ikke god nok til at vi kan konstruere modeller, der kan give en pålidelig forudsigtelse af Solens opførsel flere år ude i fremtiden. Det skyldes ikke-lineære effekter i den dynamo, der producerer Solens magnetfelt, som er ansvarlig for solaktiviteten, men et forsøg fra NASA's Center for Rumvejsforudsigelser [16] er alligevel vist i figur 14. Her er gættet, at det kommende solmaksimum i foråret 2013 vil være endnu mindre end det seneste maksimum i marts 2000, men det skal understreges, at indtil nu har langt de fleste gæst vist sig at være helt forkerte. Hvis man kan bruge fortiden som rettesnor, så ser det kommende solmaksimum dog ud til at blive kraftigere end de sidste to cykler, der gik forud for Maunder-minimummet, og i så fald er et nyt stort minimum derfor mindst to årtier ude i fremtiden. Den høje solaktivitet i sidste halvdel af 1900-tallet omtales nu som det "moderne maksimum", og historien har vist at 40 år efter et stort maksimum er sandsynligheden for et stort minimum kun 8 %. Halvdelen af de store maksimummer har endda vist sig at blive efterfulgt af endnu et stort maksimum inden et stort minimum indtraf [17], så hvis vi stadig holder os til historien, er sandsynligheden for et stort minimum altså beskedent indenfor den næste generation, og det næste ekstremum kan lige så godt blive endnu et maksimum i stedet for et minimum.



Figur 14. Antallet af solpletter (gennemsnit per måned) siden 2000. Den røde kurve viser en forudsigtelse for resten af den igangværende solcyklus [14].

Hvad der vil ske, hvis Solen går helt i dvale som under Maunder-minimummet, er et åbent spørgsmål, men det kan sætte en del af den klimaforbedring over styr, der er sket siden afslutningen på den lille istid. Som man kan se af figurene 7 og 9 er der en god korrelation mellem Solens aktivitet og Jordens klima siden istidens afslutning, så alt andet lige vil det blive koldere. I samme periode kan CO₂ ikke have været ansvarlig for klimavariationerne eftersom CO₂-koncentrationen har været næsten konstant indtil industrialiseringen. Det har som bekendt ændret sig siden og derfor vil konsekvenserne af en lav solaktivitet blive modvirket af

menneskeskabte ændringer af bl.a. atmosfærens sammensætning. Den globale temperatur er steget siden midten af 1900-tallet, og ifølge FN's klimapanel (IPCC) er det "meget sandsynligt", at det skyldes udledning af drivhusgasser, især CO₂.

IPCC

Siden slutningen af 1990'erne er den globale temperatur ikke steget, og det er nærliggende, at det hænger sammen med den lavere solaktivitet. Den tanke vinder dog ikke genklang hos IPCC, der vurderer at kun 8% af klimaændringerne skyldes Solens aktivitet. Panelet indrømmer dog, at tallet er meget usikkert, eftersom kvantificeringen af Solens bidrag til klimaændringerne er meget ufuldstændig. De fleste store klimamodeller (Global Circulation Models) inkluderer således kun en brøkdel af de mange bidrag fra Solen til Jordens atmosfære. Typisk bruger modellerne den totale solindstråling og strålingen i UV-området som input, mens de komplekse effekter af variationer i solvinden, magnetfeltet og partikler fra Solen eller kosmiske partikler negligeres. Som nævnt tidligere kan en lille ændring i Solens udstråling tænkes at udløse et skifte i de fremherskende vindsystemer på Jorden og dermed ændre klimaet, og hertil kommer at de mange påvirkninger fra Solen vil virke samtidigt.

Hvis IPCC har ret i, at Solen er nærmest uden betydning, så behøver vi naturligvis hverken at bekymre os om dens udfordsigelige opførsel eller kommende ekstremer. Hvis IPCC derimod ikke har ret i vurderingen af Solens rolle, så betyder det, at CO₂ har en mindre andel i de sidste 50 års temperaturstigning, men det aflyser jo ikke fremtidige klimaændringer, for alt tyder på, at klodens CO₂ udslip vil fortsætte med at stige i de kommende årtier, og en nedgang i Solaktiviteten vil i så fald blot udsætte virkningen af de øgede CO₂-koncentrationer.

For tiden arbejder IPCC på sin femte rapport, og der cirkulerer allerede nu et første udkast til rapporten, som jeg dog ikke har set og som man i øvrigt heller ikke må citere fra, men som ifølge rygterne indeholder et afsnit (nummer 7.4.7.2) om kosmiske partikler og aerosoler/skyer. Stadigt ifølge rygterne skulle formuleringerne være ekstremt forsigtige, men IPCC's konklusion er dog, at kosmiske stråler ikke er vigtige.

Her vil jeg imidlertid mene, at IPCC's konklusioner heller ikke er så vigtige. Ideelt set skulle IPCC efter min mening sammendrage den eksisterende viden på klimaområdet og herunder også i sine rapporter objektivt gøre rede for de uenigheder og modstridende synspunkter, der eksisterer blandt forskerne. Desværre fungerer IPCC mere som et politisk organ, der producerer de argumenter, politikerne ønsker at bruge som grundlag for beslutninger. IPCC bryster sig gerne af de over 2.000 deltagende forskere, men reelt skrives rapporterne af et lille antal hovedforfattere, som ofte kender hinanden i forvejen og citerer hinandens artikler, mens de mange bidragsydere ikke har nogen indflydelse på hverken indhold eller konklusioner. Den lakkede e-mail korrespon-

dance mellem nogle af de centrale IPCC-forfattere, som blev kendt under betegnelsen Climategate, viser således hvordan flere af forfatterne optræder mere som politikere end forskere og for eksempel udmærket er klar over, at der er problemer med deres data og konklusioner, men i stedet drøfter hvordan de skal undgå at udlevere deres datamateriale samt forhindre, at konkurrerende forskere får offentliggjort deres artikler. I midten af november blev endnu en samling e-mails offentliggjort [18] og indholdet bekræfter desværre endnu engang dette indtryk.

I årevis har der således været mystik om flere rekonstruktioner af Jordens klima gennem de sidste 1.000-2.000 år, især den berømte Hockeystav (den gule kurve i figur 7a), som samstemmende viser, at klimaet var nærmest konstant indtil temperaturen begyndte at stige voldsomt i starten af 1900-tallet. Hockeystaven har derfor fået nærmest ikon-status i klimadebatten som et tydeligt bevis på, at mennesket var skyld i en global opvarmning. Imidlertid har forskerne bag de forskellige "hockeystave" ikke villet lade andre forskere få adgang til deres data eller computermodeller.

Man har naturligvis ikke temperaturmålinger så langt tilbage i tiden og er derfor nødt til at beregne en temperatur på grundlag af indirekte målinger af f.eks. årringstykkelser i træer, ligesom de områder, man har målinger fra, ikke er jævnt fordelt over Jordkloden. Alt dette sker ved hjælp af forskellige statistiske metoder, og ved ikke at lade andre efterprøve deres resultater, har disse klimaforskere kortslettet de normale videnskabelige metoder, der normalt sikrer forskningen mod fejl og fusk.

Hvor galt det kan gå i dette krydsfelt mellem forskning og politik, er beskrevet i en nylig bog af Andrew Montford [19], som har samlet hele historien omkring Hockeystaven og samtidig formået at gøre den spændende som en kriminalroman. Det sidste kapitel i bogen handler i øvrigt om den første serie Climategate e-mails, så måske kommer der snart en fortsættelse på bogen.

Litteratur

- [1] Den originale tekst og en engelsk oversættelse af Theofrast *De Signis* kan findes her: http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/-Theophrastus/De_signis*.html
- [2] D. V. Hoyt og K. H. Schatten (1997), *The Role of the Sun in Climate Change*, Oxford University Press, U. K.
- [3] J.M. Vaquero og M. Vázquez (2009), *The Sun Recorded Through History*, Springer.
- [4] R. Cohen (2010), *Chasing the Sun*, Simon & Schuster, U.K.
- [5] G. Tsiropoula (2003), Signatures of solar activity variability in meteorological parameters, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, bind **65**, side 469-482.
- [6] W. Herschel fik dog publiceret sine overvejelser i 1801 i artiklen: Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of

its variable emission of light and heat: With remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations, *Philos. Trans. R. Soc. London*, bind **91**, side 265-318.

- [7] Se f.eks. K. Labizke og H. van Loon (1988), Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter, *J. Atmos. Terr. Phys.*, bind **50**, side 197-206.
- [8] J. Kirkby (2007), Cosmic Rays and Climate, *Surv. Geophys.*, bind **28**, side 333-375.
- [9] L.J. Gray m.fl. (2010), Solar influences on climate, *Rev. Geophys.*, bind **48**, RG4001.
- [10] S. Ineson m.fl. (2011), Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere, *Nature Geosci.*, bind **4**, side 753-757.
- [11] H. Svensmark, J.O.P. Pedersen, N.D. Marsh, M.B. Enghoff og U.I. Uggerhøj (2007), Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, *Proc.Roy.Soc.* bind **463**, side 385-396.
- [12] M.B. Enghoff, J.O.P. Pedersen, U.I. Uggerhøj, S.M. Paling og H. Svensmark (2011), Aerosol nucleation induced by a high energy proton beam, *Geophys. Res. Lett.* bind **38**, L09805.
- [13] J. Kirkby m.fl. (2011), Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation, *Nature*, bind **476**, side 429-433.
- [14] J.R. Pierce og P.J. Adams (2009), Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates?, *Geophys. Res. Lett.*, bind **36**, L09820.
- [15] F. Yu, Z. Wang, G. Luo og R. Turco (2008), Ion-mediated nucleation as an important global source of tropospheric aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, bind **8**, side 2537-2554.
- [16] NOAA Space Weather Prediction Center (<http://www.swpc.noaa.gov>).
- [17] S.K. Solanki og N.A. Krivova (2011), Analyzing Solar Cycles, *Science*, bind **334**, side 916-917.
- [18] Climategate 2 FOIA 2011 – Searchable Database, <http://foia2011.org/>
- [19] A. Montford (2010), *The Hockey Stick Illusion: Climategate and the Corruption of Science*, Stacey International,



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker på DTU Space og medlem af Kvants redaktion. Han arbejder især med eksperimentelle undersøgelser af ionernes rolle i dannelsen af aerosoler i Jordens atmosfære. Han er desuden medlem af styregruppen for et europæisk samarbejdsprojekt (COST action ES1005) med titlen "Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth's climate".

Aktuelle bøger

Af John Rosendal Nielsen og Michael Cramer Andersen

Vi higer og søger i gamle bøger

Af: Morten Brydenholt, Tommy Gjøe, Claus Jessen, Ole Keller, Jan Møller og Jens Vaaben.

“Orbit BA – 2. udgave”, Systime 2011, 504 sider, 300 kr., <http://www.systime.dk>.

Så udkom Orbit BA-bogen langt om længe. Forlaget havde lovet at bogen skulle være mulig at købe allerede i 2010, men trykningen var åbenbart en mere krævende opgave, af Gutenbergske dimensioner, så det var nødvendigt for forlaget at udskyde udgivelsen af bogen med mere end et år. Det har sikkert givet en del grå hår hos samlingspasseren på flere gymnasier.

Det er ikke fordi der ikke findes en bog til A- og B-niveau fysikundervisning fra Systime, men 1. udgaven ville mange fysiklærere end ikke røre med en ildtang. Orbit BA havde flere afsnit, hvor eleverne blev præsenteret for nogle kuriøse (og historiske) fortællinger. Disse kuriositeter var måske underholdende, men gjorde ikke meget for forståelsen af fysikken. Mangel på gode nye fysikbøger betyder, at de fleste lærere underviser efter de meget ældre Orbit 1, 2 og 3 bøger. De var fra midten af 1990'erne, hvilket betød at de var beregnet til den tidligere gymnasireform. De gamle Orbit-bøger har været en meget eftertragtet vare, der praktisk talt var umulige at opdrive, da de ikke blev trykt længere.

I den nye udgave af Orbit BA er en hel del af de kuriøse historier blevet trimmet væk, og samtidigt er det faglige niveau blevet hævet. Sidetallet er gået fra de oprindelige 541 sider til 504 sider. Overskrifter som 'En strålende familie' er blevet udskiftet med 'Elektromagnetisk stråling'. Kapitler, som 'Viden eller tro', 'Sport i fysik' og 'Rejse i rummet' er udeladt fra 1. udgaven, og til gengæld er der blevet plads til et kapitel om fremtidens energiformer. Kapitlet om materialefysik er ligeledes blevet droppet, men resistivitet bliver stadigvæk beskrevet i kapitlet om elektricitet, hvilket kun skal tale til forfatternes fordel. Det er klart, at de mange udeladelser har givet mulighed for forfatterne at hæve niveauet.

Der er blevet plads til det nye pensum på fysik-A om elektriske og magnetiske felter, hvilket gør bogen tidssvarende. Begreber som feltvektorer og induktion bliver introduceret, og flere lovmæssigheder som Laplaces lov og formler for forskellige magnetfelter omkring strømførende ledninger gør, at bogen er velegnet til fremtidige elever. Et andet emne, som mange lærebøger savner, er tryk og opdrift. Det bliver også beskrevet tilfredsstillende på syv sider, og der er ligefrem blevet plads til vægtstangsreglen, hvilket kan bringe glædestårer frem hos Arkimedes' venner.

Opgaverne er blevet henvist til afslutningen af hvert kapitel, hvilket efter min bedste overbevisning både har sine fordele og ulemper. Opgaverne bliver mindre koblet til afsnittene, men det betyder samtidig at eleven skal bladere mere rundt i bogen og derved risikerer at miste overblikket. Der er stadig gode regneeksempler i løbet af bogen, men der kunne sagtens være flere eksempler. Eksempler er gode til at give svage elever en indsigt i, hvordan de skal løse en kompliceret opgave.

Min overordnede mening om bogen er, at den hører til en af de bedre lærebøger til fysik på A- og B-niveau. Den læner sig måske en del op ad de gamle Orbit-bøger, men det er kun til 2. udgavens fordel. Mange af illustrationerne og opgaverne er direkte genbrug fra de gamle lærebøger, men Orbit BA er samtidigt blevet tidssvarende, idet den har inkluderet det nye pensum.

John Rosendal Nielsen



Ny fysikbog til gymnasiet

Af: Kurt Jakobsen, “Fysik i øjenhøjde – Gymnasiets B- og C-niveau”, Nyt Teknisk Forlag 2011, 223 sider, 349 kr., <http://www.nyttf.dk>.

Denne bog dækker dels det centrale stof på gymnasiets obligatoriske C-niveau og dels de emner der yderligere indgår på B-niveauet. Visse af afsnittene fra B-niveauet - f.eks. om kvantitative energiformler - kan inddrages på C-niveauet efter behov og nogle kapitler kan bruges som valgfrit stof. Bogen kan med fordel bruges på C-niveau hold hvor mange eller alle forventes at fortsætte på B-niveauet. Den er også velegnet til blandede fysik B-valghold, hvor eleverne har haft forskellige lærere og bøger, idet hele C-niveauet er indeholdt i bogen.

Indholdet af bogen følger nøje lærerplanen. Der er således ikke meget overflødigt fedt. Pladsen udnyttes godt og der er en fin balance mellem tekst, tegninger

og fotos. Med sine blot 640 g vejer bogen kun ca. en tredjedel af "Fysikbogen", som nok har vægtrekorden. Men nogle steder er teksten dog lige lovlig kortfattet og forklaringerne bliver derfor ikke altid detaljerede nok.

Mange af opgaverne i bogen har til formål at træne nye begreber og der er både simple og svære opgaver. Enkelte opgaver berører dybe erkendelser om stof, energi, rum og tid. I nogle af opgaverne behandles eksperimentelle opstillinger som typisk udføres som rapportforsøg, f.eks. "Gitterformlen", "Svingninger på en streng" og "Galileis faldlove". Men for at opøve de nødvendige eksperimentelle færdigheder skal læreren supplere undervisningen med de øvelser, der skal skrives rapporter over. Forfatteren var i en årrække formand for opgavekommissionen og der er derfor ikke meget at udsætte på denne del af bogen.

I første kapitel gennemgås nogle grundbegreber med udgangspunkt i laboratoriearbejde. Niveauet er her på C-niveau. Hvis elever på B-niveau skal udfordres mere, kan man inddrage det lille afsnit om antal betydende cifre i appendiks A, men der savnes et par afsnit mere til B-niveauet om f.eks. statistik på målinger og tilpasning af matematiske modeller til eksperimentelle data. Det sidste indgår naturligt i forsøg med dataopsamling, hvor datalogger-software typisk har avancerede muligheder for kurvetilpasning, hvilket hjælper betydeligt i den fysiske fortolkning af et forsøg. Hvis eleverne skal være træned i dette til den eksperimentelle del af eksamen på B-niveau, skal læreren altså supplere med materiale om dette. Dette er dog en mangel ved de fleste fysikbøger og det er svært at skrive noget der er aktuelt i mange år frem.

I appendiks A-B findes en kvantestige, oversigter over talspotenser, eksponentiel notation, SI-enheder, Store og små størrelser, Antal betydende cifre og de første 100 grundstoffer (navn og symbol). Der er også træningsopgaver til disse emner. Det kan undre, at der ikke findes en tabel over naturkonstanter, som det ellers hører sig til i en fysikbog.

Bogen må primært betragtes som en teori- og opgavebog med hovedvægten på fagets centrale begreber, herunder erkendelsesmæssige diskussioner af disse. Hvad angår diskussioner af de teknologiske og samfundsmæssige perspektiver, som der ifølge læreplanen skal undervises i, så er bogen lidt mangelfuld. Det historiske perspektiv berøres kun overfladisk, primært i forbindelse med det klassiske verdensbillede. Man vil også lede forgæves efter aktiviteter, der træner elevernes evne til at formidle fysikfagligt indhold. Man kunne godt ønske sig et større fokus på de naturfænomener, som fysikken tager udgangspunkt i, så de enkelte kapitler blev lidt mere levende og bundet bedre sammen. Men alle disse praktiske, perspektiverende og anvendelsesorienterede aspekter ved faget er typisk noget der ændrer sig hurtigt.

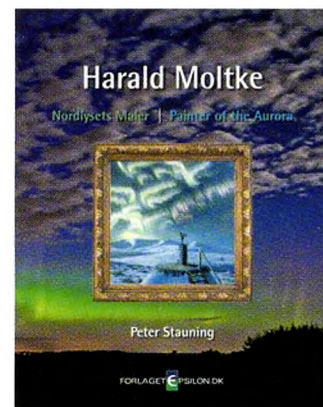
Man kan således både se det som en styrke og en svaghed ved bogen, at der er skåret så meget ind til benet. Det er en fordel at hovedvægten ligger på de centrale begreber, når der skal regnes opgaver. Men hvis

teksten ikke går nok i dybden til, at eleverne forstår den, er de dårligt stillet til eksamen. For helt uerfarne fysikundervisere er bogen nok utilstrækkelig, og de vil skulle anskaffe sig det supplerende undervisningsmateriale som behøves. Bogen anbefales derfor primært til de mere erfarne undervisere, der har opbygget et arsenal af øvelsesvejledninger og supplerende noter, som de kan benytte. Det er altid et stort arbejde at skrive en undervisningsbog, fordi den både skal opfylde de faglige og pædagogiske krav, samtidig med at den godt må være lidt spændende. Desværre døde forfatteren kort efter manuskriptet var afleveret og den er derfor skrevet færdig af andre forfattere. Det er prisværdigt, at forlaget - som i øvrigt ikke har så stor tradition for fysiklærebøger til gymnasiet - har færdiggjort bogen. Bogen er velskrevet og vi må håbe, at nogle af manglerne vil blive udbedret og f.eks. lagt ud på en hjemmeside for bogen, så alle perspektiverne i undervisningen dækkes bedre ind.

Michael Cramer Andersen

Kunst og natur mødes

Af: Peter Stauning,
"Harald Moltke –
Nordlysets maler",
Forlaget Epsilon 2011,
216 sider, 295 kr.,
<http://forlagetepsilon.dk>.



Denne bog fortæller historien om to vellykkede nordlysekspeditioner til Island og Finland, hvor kunstmaleren greve Harald Moltke (1871-1960) malede 26 fremragende malerier af det smukke naturfænomen.

Ekspeditionerne blev udsendt af Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) under ledelse af direktøren Adam Paulsen og med deltagelse af den unge fysiker Dan la Cour. Første ekspedition til Island (1899) gik til byen Akureyri lidt syd for polarcirklen. På det nærliggende bjerg Sulur sad Harald Moltke om natten og tegnede skitser af det svage lys fra nordlys og om dagen malede han sit indtryk i større detalje. Få år efter gennemførte Dan la Cour og Harald Moltke en nordlysekspedition til Finland.

Billederne hænger i dag på DMI og er ikke offentligt tilgængelige. Bogens forfatter, Peter Stauning, har i mange år været ansat som forsker ved DMI, hvor han bl.a. har arbejdet med Ørsted-satellitten. Efter sin pension i 2009 har han samlet malerierne, skitser, fotos og beretninger fra ekspeditionerne, til denne interessante og smukke bog. Teksten findes både på dansk og engelsk.

Michael Cramer Andersen

Afkølingstid – breddeopgaver 45–46 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt to nye opgaver. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver fra RUC (nr. 45 og 46 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 45 og 46. Afkølingstid

Hvad er størrelsesordenen af tiden, det vil tage for varmen at fordele sig i en jernklump af Jordens størrelse med et opvarmet indre? I E. S. Johansens ældre lærebog i varmelære er der følgende data for jern: massefylde ved 18°C : 7.86 g cm⁻³, lineær udvidelseskoefficient mellem 0°C og 100°C : 0.000125 grad⁻¹, varmfylde ved 18°C : 0.111 cal g⁻¹ grad⁻¹ og varmeledningsevne ved 18°C : 0.20 cal grad⁻¹ cm⁻¹ s⁻¹. Begrund svaret.

Når man sætter hånden på et stykke koldt metal mærkes en kraftig varmemstrøm fra hånden ud i metallet. Hvordan ændrer varmemstrømtætheden sig med tiden (til korte tider)? Begrund svaret ved en dimensionsanalyse.

Løsning

45. Opgaven kan løses ved dimensionsanalyse. Afkølingstiden, dvs. en karakteristisk tid indenfor hvilken varmen i jernklumpens indre fordeles sig, så temperaturen er den samme overalt, må alene afhænge af jernklumpens radius R , jernets varmfylde per volumen, c , og jernets varmeledningsevne k . Og måske af temperaturforskellen ΔT mellem centrum og overfladen af jernklumpen ved start. Hvis vi skulle løse opgaven mere eksakt ville vi nemlig stille en differentilligning op for temperaturen som funktion af afstand til centrum og tid ved at sætte forskellen mellem energistrømmen per tid ind og ud af to infinitesimalt adskilte kugleskaller lig med ophobningen af energi per tidsenhed i mellemrummet mellem kugleskallerne. Her er k bestemmende for størrelsen af energistrømmen og c bestemmende for energiophobningen. Herudover må løsningen til differentilligningen afhænge af temperaturvariationen karakteriseret ved ΔT som begyndelsesbetingelse og R på grund af randbetingelsen, at varmemstrømtætheden i jernklumpens overflade skal være nul. Inputvariable, som afkølingstiden kan tænkes at afhænge af, er altså k , c , ΔT og R . Da dimensionen af k er givet ved $[k] = \text{M L T}^{-3} \text{ K}^{-1}$ og dimensionen af c ved $[c] = \text{M L}^{-1}$

$\text{T}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kan en tid kun dannes ved en kombination af de fire inputvariable, hvis k og c indgår i kombinationen c/k , da dimensionen M ellers ikke udgår. Idet $[c/k] = \text{L T}^{-2} \text{ K}$, fremgår det heraf, at den efterspurgte afkølingstid τ ikke kan afhænge af ΔT . Den eneste måde, hvorpå inputvariablene kan kombineres til en tid, er da:

$$\tau = a R^2 \frac{c}{k}, \quad (1)$$

hvor a er et dimensionsløst tal. Indsættes materialeverdierne for jern fra opgaveteksten og $R = 6000 \text{ km}$, fås $R^2 \frac{c}{k}$ til at være $50 \cdot 10^9 \text{ år}$.

46. Varmeledningsevnen af metallet er meget større end varmeledningsevnen af hånden. Derfor vil tempoet for varmeafgivelsen fra hånden til metallet være bestemt af varmemstrømningen i hånden. Varmemstrømtætheden af varmemstrømmen fra hånden ud i metallet afhænger derfor tilsvarende til omstændighederne i opgave 45 af varmeledningsevnen k i hånden, og af håndens varmfylde per volumen, c . Men da hånden til korte tider fungerer som et uendeligt halvrum uden nogen karakteriserende længde, kan der i modsætning til i opgave 45 ikke findes nogen karakteristisk tid for fænomenet. Derimod kan vi godt ved dimensionsanalyse finde ud af, hvorledes varmemstrømtætheden ved grænsefladen mellem hånd og metal, j , afhænger af k , c , temperaturforskellen ΔT mellem hånd og metal til en start, og tiden t , der er gået fra hånden blev sat på metallet. Idet dimensionen $[j] = \text{M T}^{-3}$, $[k] = \text{M L T}^{-3} \text{ K}^{-1}$, $[c] = \text{M L}^{-1} \text{ T}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $[\Delta T] = \text{K}$ og $[t] = \text{T}$, fås ved enkle regninger:

$$j(k, c, \Delta T, t) = b \Delta T \left(\frac{kc}{t} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

hvor b er et dimensionsløst tal. Varmemstrømtætheden fra hånden ud i metallet ændrer sig altså med tiden som $t^{-\frac{1}{2}}$.

Kommentar

Uanset hvilken form man antager for temperaturfordelingen til $t = 0$, er det ikke nogen nem sag at besvare opgave 45 ved at løse varmeledningsligningen, dvs. finde temperaturen som funktion af tiden og afstanden til centrum. Jeg kunne i alle tilfælde ikke, før jeg fik hjælp til det af min kollega Tage Christensen. I første omgang

kunne jeg dog hjulpet af min medlærer på Breddekursen, Poul Winther Andersen, uden at nå frem til det endelige resultat godt ud fra varmeledningsligningen og randbetingelsen, at varmestrømtætheden i overfladen skal være nul, uanset temperaturfordelingen til en start, argumentere for, at afkølingen finder sted med en henfaldstid af størrelsesordenen R^2c/k som fundet ved dimensionsanalysen. Ligeledes kan der generelt argumenteres for, at ΔT kun indgår som proportionalitetskonstant i udtrykkene for varmestrømtætheder og temperaturforskelle som funktioner af tid og sted i begge de to opgavesituationer. Det hænger sammen med, at varmeledningsligningen som differentiaalligning for $T(t, r)$ er lineær. Vi kunne derfor godt ved dimensionsanalyseløsningen af opgave 45 på forhånd have udeladt ΔT som inputvariabel.

Hvor tidsafhængigheden af varmestrømtætheden i opgave 45 kan beskrives ved hjælp af en karakteristisk henfaldstid, gælder det ikke for tidsafhængigheden af varmestrømtætheden, der er svar på opgave 46. Det er interessant, at det forhold, at løsningerne på de to opgaver nødvendigvis matematisk set må være kvalitativt forskellige, allerede fremgår af dimensionsovervejelser. Indgår der en karakteristisk længde i varmeledningsproblemet kan der dannes en karakteristisk tid. Det kan der derimod ikke, hvis der ikke indgår en karakteristisk længde i problemet.

I en tidligere artikel i KVANT har jeg i kommentarerne til breddeopgave 42 og 43 redegjort for, at det tidligere såkaldte Breddekursus på RUC siden 2007 har været niveaudelt i de to kurser "Fysisk problemløsning I" og "Fysisk problemløsning II" med hver sine tilhørende eksamener. Opgave 45 er en eksamensopgave fra eksamen i Fysisk problemløsning I. Den var derfor ment som en opgave, der skulle høre til i den nemmere ende af breddeopgavespektret. Og med det interessante resultat, at Jorden ikke er gammel nok til, at der har været tid til udjævning af temperaturforskelle, når der ses bort fra konvektion. Men opgaven viste sig både for svær og for nem.

Det var for nemt at få øje på, at besvarelsen lå gemt i en dimensionsanalyse. Af de lidt flere end 10, der var til eksamen, gik de fleste direkte i gang

hermed. Men desværre på en ret så automatiseret måde. Således inddrog de fleste fejlagtigt den opgivne lineære udvidelseskoefficient i analysen. Den havde jeg opgivet i opgaveteksten, fordi den sammen med massefylden, varmfylden og varmeledningsevnen er netop de materialkonstanter for jern, der er data for i E. S. Johansens lærebog. Og fordi der skulle være lidt forhindring på vejen til dimensionsanalysen som rutineteknik, når nu relevante talværdier til at nå frem til resultatet $50 \cdot 10^9$ år var oplyst. Men rutinen lod sig altså ikke udfordre under eksamenspresset.

Under indtryk af de studerendes automatiserede måde at besvare opgave 45 til eksamen på har jeg i ovenstående løsning og kommentar til opgaven forsøgt at antyde, hvilken slags mere eller mindre eksplicite overvejelser jeg selv oprindeligt må have lagt til grund, da jeg formulerede opgaven og fandt den overkommelig at besvare ved dimensionsanalyse. Og de ligger en del ud over, hvad der kan forventes af de studerende. På den vis var opgaven for svær. I modsætning til opgave 46 er den ikke en god breddeopgave. I opgave 46 (fra Tage Christensens hånd) inviteres der ikke på samme måde til rutineopførsel. På den anden side forudsætter opgave 46 ikke helt så megen kvalitativ erfaring med differentiaalligningsløsning som opgave 45.

Breddeopgave 47 og 48. Relativistisk bordtennis og neutronabsorption

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til disse to opgaver fra breddekursen på RUC (fra vintereksamen 2010 og vintereksamen 2009, nr.47 og 48 i rækken her i KVANT):

Et bat bevæges imod en bordtennisbold kastet op til serv. Find ved en relativistisk beregning farten af bordtennisbolden umiddelbart efter at være blevet stødt til af battet. Begrund svaret.

En neutron med stor fart absorberes af en hvilende atomkerne. Med hvilken fart bevæger den nye atomkerne sig herefter? Begrund svaret.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer.

Rest fra Jordens fødsel fundet

Nye observationer viser, at asteroiden Lutetia er en rest fra det oprindelige materiale, som Merkur, Venus og Jorden blev dannet af.

Asteroidebæltet, der ligger mellem Mars og Jupiter, er hjemsted for de fleste asteroider i Solsystemet. De er en rest fra Solsystemets dannelse for ca. 4,6 milliarder år siden, hvor en planet måske blev forhindret i at blive dannet pga. Jupiters tyngdepåvirkning. Én af disse asteroider er "Lutetia", der er ca. 100 km stor. Tidligere studier af Lutetias overflade og farve har allerede vist, at Lutetia er et underligt medlem af asteroidebæltet. De tidligere undersøgelser kunne forklares med, at Lutetia er blevet skabt blandt de inderste planet for derefter at udvandre til asteroidebæltet.

Denne konklusion er baseret på observationer gennemført med den eu-

ropæiske rumsonde Rosetta, ESOs New Technology Telescope ved La Silla Observatoriet i Chile, NASAs infrarøde teleskop på Hawaii og Spitzer-rumteleskopet. Samlet har observationerne gjort det muligt for astronomerne at se, hvordan Lutetia reflekterer både ultraviolet, synligt og infrarødt lys. Ved at sammenligne disse data med laboratorieundersøgelser af meteoritsten er forskerne kommet frem til, at Lutetia er opbygget af det samme materiale, som de indre planeter er blevet dannet af.

Man kan kun gisne om, hvordan Lutetia er kommet ud i asteroidebæltet. En formodning er, at Lutetia er kommet for tæt på én af de indre planeter, hvorved asteroiden har ændret bane. Jupiter har formentligt også en finger med i spillet, da den har sørget for, at Lutetia ikke helt har forladt Solsystemet.

Kilde: <http://www.eso.org/public/denmark/news/eso1144/>



Lutetia optaget af Rosetta-rumsonden i juli 2010.