

KVANT

Marts
2015

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 26. årgang

- KRABBETÅGEN
- RENDEZVOUS MED ALMA
- LYSETS ÅR SKUDT I GANG
- NOBELPRISEN I FYSIK 2014 – DEN REVOLUTIONERENDE BLÅ LYSDIODE
- KVARK-GLUON PLASMAET – DEN PERFEKTE VÆSKE VI IKKE KAN FORSTÅ
- AT GENSKABE MIDDELALDERENS OPFINDELSER
- DA TYVE STJAL BILLEDET
- 25 ÅR MED KVANT
- AKTUELLE BØGER
- BREDDEOPGAVER
- 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
Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

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

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 på: kvant@kvant.dk (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri ApS.
Oplag: 2200.

Produktionsplan

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

Indhold:

Nobelprisen i fysik 2014 – den blå lysdiode, der revolutionerede lysvidenskaben

Paul Michael Petersen 3

Rendezvous med ALMA

Holger Nielsen 7

KVANT-nyheder

Sven Munk 13

Krabbetågen

Michael Quaade 16

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2015

. 17

25 år med KVANT

Jens Olaf Pepke Pedersen 19

Da tyve stjal billedet

Mogens Esrom Larsen 21

At genskabe middelalderens opfindelser

Kåre Johannessen 22

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen 27

Bræt imod væg og selvinduktion i koaksialkabel – breddeopgave 63 og 64 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 28

Kvark-gluon plasmaet – den perfekte væske vi ikke kan forstå

Peter Christiansen 30

Lysets År skudt i gang

Jørgen Schou Bagsiden

Billedet på forsiden viser *Hestehovedtågen*, der også er kendt under katalognumrene B33 og LDN 1630. Hestehovedtågen står forholdsvis lavt på himlen i Danmark, og kommer kun ca. 31 grader over horisonten, når den står i syd. Hestehovedet er en mørk molekylær sky, der ses på baggrund af den røde emissionståge IC434.

Optagelserne er lavet over fire nætter i perioden 20.-26. december 2014 med et (hjemmebygget) 12,5" f:5 Newton spejlteleskop påmonteret et CCD-kamera (Atik 383L). Eksponeringstiderne var igennem fem forskellige (36 mm) Baader interferensfiltre: 45 min (rød), 42 min (grøn), 39 min (blå), 270 min (H-Alpha) og 183 min (Luminans). I alt 9 timer. Billedet er derefter "stacket" i "Maxim DL 5" og er efterbehandlet i "Photoshop CS" af Flemming R. Ovesen og Torben Taustrop. De har igennem 25 år sammen drevet "TOC Observatory" nær Aarhus (<http://tocobs.org>).

KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, 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), DTU Nanotech, DTU Fotonik og DTU Fysik.



Nobelprisen i fysik 2014 – den blå lysdiode, der revolutionerede lysvidenskaben

Af Paul Michael Petersen, DTU Fotonik, Danmarks Tekniske Universitet

Nobelprisen i fysik 2014 blev givet for opfindelsen af en ny energieffektiv og miljøvenlig lyskilde – den blå lysdiode. De tre japanere Isamu Akasaki, Hiroshi Amano og Shuji Nakamura belønnes for deres forskningsmæssige gennembrud, i starten af 1990'erne, et gennembrud der muliggør det lysteknologiske paradigmeskifte, som vi, i disse år drager nytte af. LED er baseret på den blå lysdiode, og allerede nu ser vi at LED-belysning vinder hastigt frem i boligen, på kontoret og i udendørsbelysningen. LED bliver den altdominerende lysteknologi i fremtiden, og i denne artikel beskrives teknologien bag de blå lysdioder, og hvordan nobelprisvindernes forskning har revolutioneret lysvidenskaben.

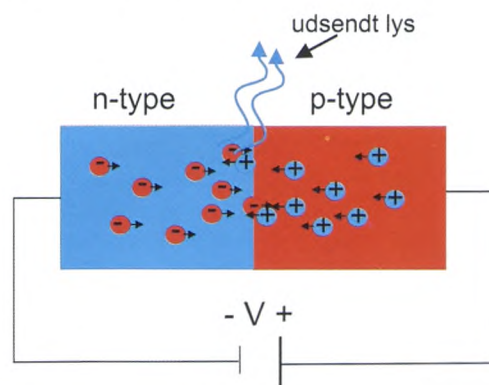
Lyset til det 21. århundrede

Nobelkomiteen begrundet pristildelingen til de tre japanere med, at de har leveret det afgørende bidrag til udviklingen af en teknologi, der er til stor gavn for menneskeheden. Med fremkomsten af LED lamper har vi fået et langt mere energieffektivt og miljøvenligt alternativ til ældre lyskilder som glødepærer, halogenpærer og sparepærer. Belysning, både indendørs og udendørs, udleder betydelige mængder drivhusgasser. Med LED-teknologi kan vi opnå markant reduktion af strømforbruget til belysning, og tilsvarende reduktion af CO₂-udledningen i atmosfæren. Der kan spares langt over halvdelen af en storby energiforbrug til belysning ved at skifte til diodelys. Ud over den umiddelbare miljøgevinst giver teknologien også en række nye "intelligente" muligheder. Eksempelvis kan lysdioder udsende datainformation kodet i lysets fotoner, og lysdioden er en elektronisk komponent, der kan styres over internettet. På den måde kan gadelys omdannes til langt mere end blot en service, der gør indbyggerne i stand til at se hvor de færdes om natten. LED-lys kan således udsende signaler som et kamera eller en smartphone kan opfange. I princippet kan man stå under en lysstander og udveksle data mellem standen og et elektronisk styresystem. Når lyset bruges til at transmittere data, får man med en intelligent gadelampe samtidig en specifik GPS-position. Sammen med andre lysstanderes data kan man realisere intelligent trafikstyring via "grønne bølger", give information om nærmeste ledige p-plads samt sende besked til trafikstyringssystemer ved trafikuheld. De kan også anvendes som informationstavler i forhold til nærområdets seværdigheder eller aktuelle begivenheder. Det er en teknologi, hvor vi kun lige er begyndt at afdække mulighederne. Glødepærer har været benyttet til belysning i det 20. århundrede – det 21. århundrede vil være oplyst af LED-lamper. Teknologiskiftet inden for belysning er på vej.

Principperne bag lysdiode-teknologien

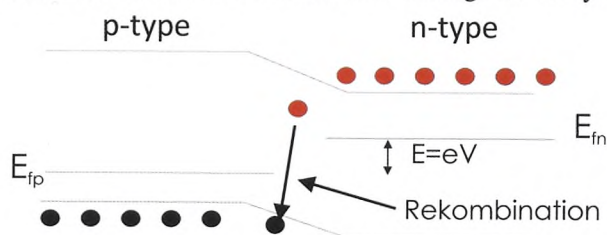
I 1990'erne havde røde og grønne dioder været kendt i mere end 30 år, men selvom man havde ydet en betydelig indsats, både i det videnskabelige samfund og i industrien, var man endnu ikke i stand til at udvikle

en blå diode. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano og Shuji Nakamura fik succes, hvor alle andre fejlede. Akasaki arbejdede sammen med Amano ved universitetet i Nagoya, mens Nakamura var ansat på "Nichia Chemicals", et lille firma i Japan. Deres samarbejde førte til produktionen af blåt lys fra halvledere, og derved blev det for første gang muligt at danne ægte hvidt LED-lys, der er både energibesparende og brugbart som almindelig belysning. Den opfindelse var revolutionerende. Gennembruddet byggede oven på mange års forskning inden for halvlederteknologi, og fører helt tilbage til opfindelsen af den første transistor i Bell laboratorierne i 1947. Shockley, Bardeen og Brattain fik i 1956 Nobelprisen for udviklingen af transistoren, en af den moderne fysiks helt store landvindinger. Under arbejdet med at udvikle transistoren opdagede man, at der samtidigt blev udsendt lys. I 1956 publicerede J.R. Haynes fra Bell laboratorierne således en artikel [1] hvori han forklarede, at lyset der blev udsendt ved elektroluminescens i germanium skyldtes rekombination af huller og elektroner i en pn-overgang. Princippet for lysudsendelse i en pn overgang er vist i figur 1. En p-type halvleder og en n-type halvleder er bragt i tæt kontakt, og når de to halvledermaterialer påtrykkes en spænding, vil der udsendes lys fra området tæt på pn-overgangen. I halvlederkrystaller samler de enkelte atomers elektrontilstande sig i energibånd med et stort antal elektrontilstande i hvert bånd.



Figur 1. En lysdiode med pn-overgang påtrykket en spænding i lederetningen udsender lys, når ladningsbærere rekombinerer i diodens pn-overgang.

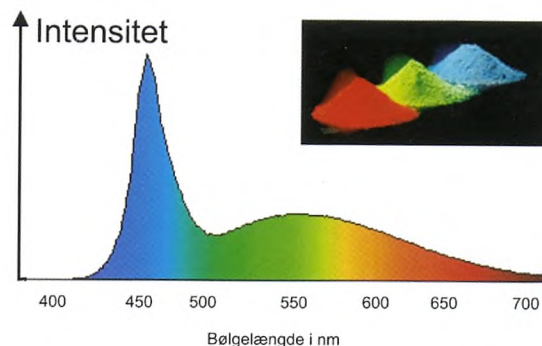
Elektroner som exciteres til ledningsbåndet efterlader en fri plads (hul) i valensbåndet. Energibåndene for halvlederen i pn-overgangen er vist i figur 2. Man kan ændre halvlederes optiske og elektriske egenskaber dramatisk ved at tilsætte små mængder af fremmedatomer (doteringsmaterialer). I en n-type halvleder tilsættes fremmedatomer med overskud af elektroner (vist som røde cirkler) og i en p-type halvleder tilsættes fremmedatomer med underskud af elektroner. Herved dannes frie elektroner i n-type halvlederen og huller (vist som sorte cirkler) i p-type halvlederen. Elektroner og hullerne fordeler sig energimæssigt i termisk ligevægt med omgivelserne efter Fermi-Dirac fordelingen. I figur 2 vises Fermi-energien for både n- og p-type materialet. Når man påtrykker en spænding, vil elektronerne trænge ind i p-type området og hullerne vil trænge ind i n-type området og herved går der en strøm igennem pn overgangen. Processen kaldes en minoritetsbærerinjektion, fordi elektroner som minoritetsbærere i p-type området rekombinerer med huller, som er majoritetsbærere i p-type området. Ved rekombinationsprocessen frigives energi, der kan udsendes som lys. Lysets bølglængde λ er bestemt af materialets båndgab E_g ud fra formelen: $\lambda = hc/E_g$. Dvs. forskellige halvledermaterialer udsender forskellige farver lys.



Figur 2. Energibåndene i halvlederens pn-overgang. Elektroner i ledningsbåndet vil rekombinere med huller i valensbåndet, når spændingen V påtrykkes. E_{fn} er Fermi-energien i n-type halvlederen og E_{fp} er Fermi-energien i p-type halvlederen. De to Fermienerginiveauer forskydes med energien eV (e er elektronens ladning), når der påtrykkes en spænding.

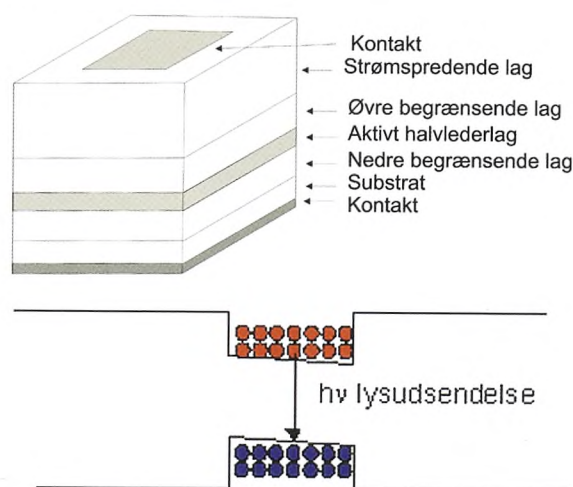
Vejen til den blå diode

De første effektive lysdioder blev udviklet i 1962 i materialet GaAs [2]. Båndgabets i GaAs er 1,4 eV og derfor sker lysudsendelsen som infrarødt lys ved bølglængder omkring 900 nm. Man kan ændre bølglængden i disse LED ved at legere med andre III-V forbindelser, og man kan opnå lysudsendelse i bølglængdeområdet fra 1000 nm til 1700 nm med legeringer af $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$ ved at vælge x og y passende. Ved at benytte legeringer af (GaP_xAs_{1-x}) kan man ændre båndgabets, og således udsende synligt lys. I 1962 lykkedes det N. Holonyak Jr. [3] at fremstille lysdioder, som udsendte rødt lys. I 1970 havde man også grønne og gule lysdioder, og interessen for udviklingen af blå lysdioder blev intensiveret. Det var nemlig først med den blå farve, at man ville være i stand til at danne hvidt lys. I figur 3 er vist hvorledes en blå lyskilde med peakbølglængde på omkring 460 nm exciterer et fosforescerende materiale, og herved dannes grønne, gule og røde bølglængder. Det opfatter det menneskelige øje som hvidt lys.



Figur 3. Lysspektret fra en blå lysdiode med fosforescerende materialer.

Udviklingen af den blå lysdiode blev imidlertid meget vanskeligere end forudset. De første forsøg blev foretaget i materialerne ZnSe og SiC, men disse materialer viste sig uegnede til effektiv lysudsendelse. Det var materialet GaN, der viste sig at fungere, men der skulle gå omkring 30 år fra N. Holonyak Jr.'s første røde lysdiode til det omsider lykkedes at fremstille en effektiv blå lysdiode. For at opnå lysudsendelse skal man have både n-type halvledere og p-type halvledere til rådighed. Problemet var at udvikle p-type halvlederen. I 1988 opdagede Akasaki og Amano imidlertid, at når GaN doteret med zink placeres i et elektronmikroskop, afgiver det meget mere lys [4]. Elektronbestraling forbedrede lysudsendelsen i p-type halvlederen - en effekt, der senere blev forklaret af Nakamura. Den første effektive blå lysdiode blev udviklet af Shuji Nakamura i 1994 [5]. Lysdioden var baseret på dobbelt heterostrukturen som Z.I. Alferov og H. Kroemer modtog nobelprisen for i 2000.



Figur 4. Øverst: Dobbelt heterostruktur LED består af et aktivt område med lysudsendelse. Det aktive område er omsluttet af to halvledermaterialer med større båndgab end det aktive område. Denne sandwichstruktur fører til en øget koncentration af frie ladningsbærere i det aktive område. Nederst: Skematisk tegning af energibåndstrukturen, hvor det fremgår, at elektroner og huller samles i det aktive lag med lysudsendelse.

I figur 4 ses dobbelt heterostrukturen [6], som har været altafgørende for udviklingen af effektive lysdioder. Lysudsendelse sker ved rekombination og denne proces kræver en høj og rumligt veldefineret

ladningsbærerkoncentration. I en simpel pn-overgang, som beskrevet i figur 2, diffunderer ladningsbærerne imidlertid væk fra pn-overgangen, hvilket giver en relativt lav værdi af ladningsbærtætheden. Den dobbelte heterostruktur består af en sandwichstruktur, hvor det aktive lag med lysudsendelse foregår i en halvleder med lille båndgab omgivet af to halvledermaterialer med højere båndgab. Herved indfanges elektroner i en potentialbrønd, og der opnås en effektiv lysudsendelse. En yderligere fordel ved heterostrukturen er, at de optiske tab reduceres kraftigt, så levetiden bliver signifikant større. Dette er årsagen til at lysdioder i dag kan have en levetid på omkring 50.000 timer.

Nobelprisen og vores hverdag

20 % af verdens elforbrug går til belysning. I skoler, kontorer og boliger er indendørs belysning ansvarlig for 20 til 50 % af det samlede energiforbrug. Ud over at de direkte omkostninger er betydelige, så har det høje strømforbrug som nævnt også en skadelig effekt på miljøet.



Figur 5. Nat i New York. Belysning i byerne er ansvarlig for en stor andel af elektricitetsforbruget. I nogle byer er belysningens andel over 50 % af det samlede forbrug.

Ved at erstatte glødepærer, halogenpærer og energisparepærer med LED-belysning, kan der derfor både opnås store besparelser og betydelige miljøgevinster. Diodebelysning har de seneste år gennemgået en hastig udvikling og anses af de fleste for at være fremtidens lysteknologi. Lysudbyttet pr. W fordobles hvert 3. år for diodelys, og dioder forventes snart at blive mere energieffektive end de mest effektive kendte lyskilder i dag. I september 2009 udgik de matte glødepærer af produktion, og i 2012 blev de klare glødepærer ligeledes udfaset. Udfasningen er nødvendig, fordi energieffektiviteten i glødepærerne er for ringe til, at vi kan nå de fastlagte politiske mål for energibesparelser, både i Danmark og i EU som helhed.

Belysningsområdet står over for meget store udfordringer. Der er tale om et globalt teknologiskifte, hvor politisk regulering og lovgivning af hensyn til miljøet udfaser kendte lyskilder. Når man i de kommende år skal udskifte en lang række konventionelle lyskilder, skal man naturligvis finde de bedst mulige erstatninger.

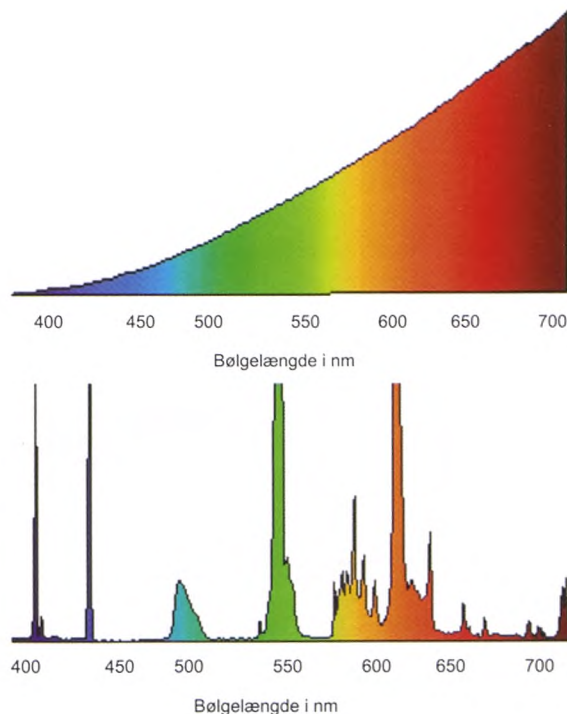
Umiddelbart er LED det oplagte alternativ. Den nye lyskilde tilbyder energibesparelser samt en lang række nye interaktive muligheder, men det skal retfærdigvis nævnes, at den også har nogle børnesygdomme. Derfor er det vigtigt, at vi tester og kvalitetssikrer hele denne udskiftningsproces. I det følgende afsnit præsenteres en oversigt over de centrale parametre, når vi kvalitetsvurderer nye energibesparende lyskilder.

Sammenligning af forskellige lyskilder

Hvis LED skal dominere den almene bolig, kontoret og udendørsbelysningen, er det en forudsætning at brugerne er tilfredse med den nye teknologi. For at sikre brugertilfredshed er det nødvendigt, at teste de forskellige lyskilder for en række faktorer, der tilsammen bestemmer hvordan vi subjektivt opfatter lyskildens kvalitet og hvordan vi kan måle dens energieffektivitet. De centrale parametre er farvegengivelse, farvetemperatur, lysstrøm, belysningsstyrke og effektivitet.

Lyskildens farvegengivelse udtrykkes ved Ra-indekset, der angiver lyskildens evne til at gengive farver på belyste genstande. Farvegengivelsen måles i forhold til farverne i en referencebelysning, eksempelvis en glødepære eller dagslyset. Ved målinger benyttes otte standardiserede farver, og ved fuldstændigt sammenfald har lyskilden et farvegengivelsesindeks (Ra-indeks) på 100.

Lyskildernes spektre er vigtige for lyskilderne farvetemperatur og farvegengivelse. I figur 6 er vist spektrene for henholdsvis en glødepære (øverst) og et lysstofrør (nederst).



Figur 6. Bølgelængdespektrene for henholdsvis en glødepære (øverst) og et lysstofrør (nederst). Glødepæren har en god farvegengivelse men det er en meget ineffektiv lyskilde, fordi der udsendes meget infrarødt lys. Lysstofrøret har en bedre effektivitet, men farvegengivelsen er ikke optimal.

Hvidt lys, som udsendes fra en lyskilde, har en farvetone som angiver om lyset er koldt (blåligt) hvidt eller mere varmt (røddigt) hvidt som kendes fra en solnedgang.

Farvetemperaturen knytter sig til lyskildens farvetone og angives i kelvin (K). Farvetemperaturen bestemmes ved at sammenligne farveindtrykket fra lyskilden med farveindtrykket fra et opvarmet sort legeme. Når lyskilden og det sorte legemes farver er ens, registreres det sorte legemes temperatur i kelvin, og lyskilden siges at have den pågældende farvetemperatur. En høj farvetemperatur svarer til blåligt hvidt lys og en lav farvetemperatur svarer til røddigt hvidt lys.

En lyskildes lysstrøm angiver det samlede lys fra en lyskilde og den måles i SI-enheden lumen (symbol: lm). Lysstrømmen udtrykker lysenergi pr. tidsenhed i fotometriske enheder som er vægtet med øjets følsomhed, for forskellige bølgelængder.

Lyskilders effektivitet måles i lumen pr. watt (lm/W), og den er et udtryk for lyskildens effektivitet og dermed for effektforbruget for lyskilden. Nutidens bedste kommercielle dioder har en energieffektivitet på op til 140 lm/W, mens glødepærer ligger på 8-12 lm/W, og de mest effektive lysstofrør ligger på omkring 125 lm/W. Det teoretiske maksimum afhænger af hvor bredspektret hvidtlyskilden skal være, men den vil ikke kunne overstige 400 lm/W hvis lyskilden skal have en god farvegengivelse.

Belysningsstyrken måles i lux eller lumen pr. m².

Fremtidens belysning med halvlederteknologi

Belysning baseret på lysdioder er i dag den mest effektive kilde til frembringelse af høj kvalitet hvidt lys. Den seneste eksperimentelle rekord er lidt over 300 lm/W [7], der kan sammenlignes med 10 for glødepærer og ca. 60 for energisparepærer. Herudover har LED potentiale for at levere en meget høj lyskvalitet beskrevet ved Ra-værdien, og endelig tilbyder de en meget lang levetid på mere end 50.000 timer. Imidlertid udviser LED'erne et signifikant fald i effektivitet ved høje strømtætheder og lumenværdier [8] (Eng: The efficiency droop in LEDs). Dette fald i effektiviteten begrænser output lumen signifikant for enkeltelement LED. Årsagen til faldet i effektiviteten er stadig ikke helt klart. I faglitteraturen er det blevet foreslået, at følgende elementer kan være ansvarlige for fald i effektivitet ved høj lumen output:

- "Overflow" af ladningsbærere i halvlederens kvantebrøndstruktur,
- Rekombination i krystalurenheder ved høje ladningsbærertætheder
- Rekombination uden lysudsendelse (fx dannelse af "hot electrons" i halvlederen)

For nylig blev Auger-rekombination også foreslået som den dominerende mekanisme [9] og det er nok den mest sandsynlige forklaring. Brug af diodelasere kunne

muligvis løse problemet, da diodelasere potentielt er mere effektive til lysudsendelse. En yderligere fordel ved diodelasere til belysning er, at den høje effektivitet kan opnås ved høje lumenniveauer i et enkelt emittelement. Endelig har diodelasere en høj retningsbestemmelse af det genererede lys, hvilket øger energibesparelseffekten i mange applikationer. Derfor er det realistisk at forvente, at vi i fremtiden vil få flere belysningssystemer som er baseret på laservirkning i pn-overgangen.



Figur 7. De tre modtagere af Nobelprisen i Fysik, 2014. Fra venstre: Hiroshi Amano, Shuji Nakamura og Isamu Akasaki.

Litteratur

- [1] J.R. Haynes (1955), *Phys. Rev.* **98**, 1866; J.R. Haynes & W.C. Westphal (1956), *Phys. Rev.* **101**, 1676.
- [2] J.I. Pankove, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 283-285 (1962); J.I. Pankove & J.E. Berkeyheiser (1962), *Proc. IRE*, **50**, 1976-1977.
- [3] N. Holonyak Jr. & S.F. Bevacqua (1962), *Appl. Phys. Lett.* **1**, 82.
- [4] H. Amano, I. Akasaki, T. Kozawa, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Ikeda & Y. Ishii (1988), *J. Lumin.* **40 & 41**, 121.
- [5] S. Nakamura, T. Mukai & M. Senoh (1994), *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1687.
- [6] Z.I. Alferov (2000), *Reviews of Modern Physics* **73**, 767.
- [7] CREE pressemeddelelse, 26. marts 2014, Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier, <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>
- [8] J. Wierer, Jr., J.Y. Tsao, & D.S. Sizov (2013), *Laser Photonics Rev.* **7**, No. 6, 963.
- [9] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J.S. Speck, og C. Weisbuch (2013), *Phys. Lett.* **110**, 177406.



Paul Michael Petersen er professor på DTU Fotonik og er desuden leder af et markant initiativ indenfor LED-belysning kaldet DOLL – a Photonics Green lab, som er Nordeuropas største. DOLL hjælper danske virksomheder med at udvikle konkurrencedygtige tiltag indenfor LED-teknologi.

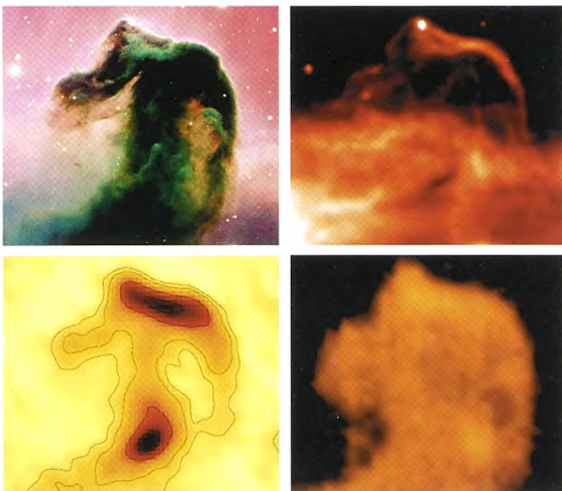
Rendezvous med ALMA

Af Holger Nielsen

På den flade højslette *Llano de Chajnantor* ca. 40 km øst for den lille chilenske ørkenby *San Pedro de Atacama* har et internationalt konsortium opbygget verdens mest ambitiøse submillimeter-observatorium i en højde af 5000 m. Her ligger ALMA, *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*, som er opbygget af ikke mindre end 66 store parabolteleskoper, der kan anbringes med op til 16 km indbyrdes afstand. Ved hjælp af interferometri og en supercomputer er det blevet muligt at skaffe information om og konstruere billeder af astronomiske objekter, der er meget koldere, end de stjerner, som vi forbinder med nattehimlen. De første resultater er nu begyndt at indløbe.

Stråling fra rummet

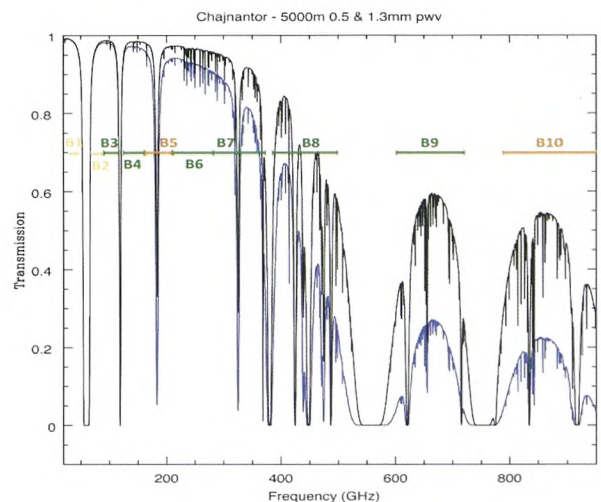
Vores øjne er som følge af evolutionen konstrueret, så de fungerer optimalt i sollys: Nethindens følsomhed er højest ved en bølgelængde på omkring $\lambda = 500$ nanometer tæt på maximum i spektret af Solen. Vi kan se det synlige spektrums farver fra violet til rødt med bølgelængder rundt regnet i intervallet 400 til 700 nm. Det er absorption i Jordens atmosfære ved bl.a. vanddamp, oxygen og ozon, som forhindrer anden stråling i at nå overfladen.



Figur 1. Det sete afhænger af øjnene der ser. Her vises den berømte *Hestehovedtåge*, der er en del af et kompleks af molekyleskyer i stjernebilledet Orion og hvis afstand er ca. 1500 lysår. Tågen er en tæt samling af gas og støv, der danner en silhuet mod baggrunden af spredt lys fra nydannede stjerner i nærheden. De fire billeder viser objektet i forskellige spektralområder: I synligt lys ser man den mørke støvsky (øverst til venstre). I det infrarøde område (øverst til højre) dukker varme, glødende gasskyer op inde i tågen. Billedet nederst til venstre viser Hestehovedet registreret af ALMA i submillimeterområdet, dog endnu ikke med maximal vinkelopløsning. Nederst til højre ses tågen i radiobølgeområdet (ESO/ESA/CSO/ALMA).

I mange århundreder var astronomiens erfaringsområder begrænset til den synlige del af spektret. I 1800 rapporterede astronomen *William Herschel* opdagelsen af infrarød stråling, de første målinger i radioområdet af spektret blev udført af ingeniøren *Karl Jansky* i 1931, og med moderne rumteleskoper (bl.a. *Hubble*, *Chandra* og det kommende *James Webb Rumteleskop*, planlagt opsendt i 2018) er hele det elektromagnetiske spektrum blevet tilgængeligt, se figur 1. Nu er det jo begrænset,

hvor store instrumenter man kan sende i kredsløb, så jordbaseret astronomi spiller stadig hovedrollen.



Figur 2. Gennemskinneligheden af Jordens atmosfære i submillimeterområdet. Til frekvenser på hhv. 200 og 800 GHz svarer bølgelængder på hhv. 1499 og 375 μm . Vi ser, at der findes en del "vinduer" i spektret med god transmission markeret "B1" til "B10". Den blå kurve gælder for et vanddampindhold på 1,3 mm pwv, den sorte for 0,5 mm pwv; her står "pwv" for "precipitable water vapor" og betyder, at såfremt al vanddamp i atmosfæren over stedet kunne fortættes til vand, så ville tykkelsen af vandlaget være som angivet. For "almindeligt vejr" herhjemme ligger værdierne mellem 10 og 70 mm; ved ALMA normalt mellem 0,5 og 2 mm, rekorden er på 0,12 mm. På Sydpolen kan man typisk komme ned på 0,1 mm, og ved den højtliggende iskappe *Dome A*, der regnes for Jordens koldeste sted (-90°C), helt ned til 0,025 mm.

Når det drejer sig om stråling i mikrometer- og millimeterområdet (submillimeter), er det først og fremmest vanddamp, der absorberer. For at observere effektivt i disse dele af spektret må man derfor finde steder, der ligger højt (for at undgå så meget atmosfære som muligt) og hvor luften er meget tør. Det mest optimale sted er Sydpolen, som ligger i 2835 m højde og hvor den stærke kulde giver en ekstremt tør atmosfære, og her findes da også to submm-observatorier, *BICEP* og *Keck Array*. Et sted, der er noget mere tilgængeligt, ville være ønskeligt, og det har man fundet i Chiles *Atacama-ørken*. Figur 2 viser, at der findes vinduer i mikrobølgeområdet, men også, at gennemsigtigheden i disse er meget følsom overfor mængden af vanddamp, som der er meget lidt af i *Atacama-ørkenen*.

Generelt om ALMA

I 1995 begyndte flere astronomiske organisationer at udføre "site testing" i Chile med henblik på at finde den bedste beliggenhed for et stort submillimeterobservatorium. Et område i den østlige udkant af Atacamaørkenen blev udpeget som optimalt. Området, der vises på figur 3, ligger langt længere inde i landet end de store optiske observatorier. Der blev indgået en overenskomst mellem *Det Europæiske Syd Observatorium* (ESO), det amerikanske *National Science Foundation*, *National Research Council of Canada* og den chilenske stat om at bygge og drive ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*; "alma" = "sjæl" på spansk og portugisisk). Det første spadestik på *Llano de Chajnantor*¹ blev taget i 2003. Siden har Japan og Taiwan tilsluttet sig projektet. Opførelsen har kostet omkring 1,5 milliarder dollar. Efter nogle år med afprøvning blev observatoriet indviet den 13. marts 2013.



Figur 3. Landskabet ved og omkring submillimeterobservatoriet ALMA. Området midt i billedet er eksterrialt og her ligger *Operations Support Facility* (OSF) i en endnu menneskevenlig højde på 2928 m. Her blev ALMAs antenner monteret og testet, og herfra styres samlingen af antennerne på *Array Operations Site* (AOS), som ligger 28 km fra OSF i 5059 m højde. Navne skrevet med gul skrift betegner markante udslukte vulkaner. Kort fremstillet med *Google Earth*.

ALMA befinder sig på et eksterrialt område, dvs. at Chile ikke har adgang til f.eks. vejbyggeri eller minedrift her. Det er lejet ud i 99 år mod, at astronomer tilknyttet chilenske institutioner råder over op til 10 % af observationstiden (og den bruger de!).

Organisatorisk består ALMA af tre dele: En administrativ enhed i Santiago de Chile samt "Operations Support Facility" (OSF) og "Array Operations Site" (AOS), se figur 3. De to operative enheder er forbundne med et 28 km langt gigahertz fiberkabel.

Observationstid tildeles efter ansøgning ud fra en vurdering af den videnskabelige betydning, idet projekter fra de bidragende lande favoriseres; Danmark er med via ESO. ALMAs videnskabelige stab udfører observationerne afhængigt af vejrforhold og antennernes opstilling. Der observeres døgnet rundt, bortset fra perioder med teknisk vedligeholdelse. Det første

år efter en observation er det kun ansøgerne, som har adgang til data, herefter bliver de alment tilgængelige.

ALMA kan nu foretage målinger ved bølgelængder mellem 0,42 og 3,6 mm (svarende til frekvenser på 84-720 GHz) og fuldt udbygget mellem 0,32 mm og 10 mm (31-950 GHz). De tilgængelige spektralbånd fremgår af figur 2. ALMA er billeddannende, synsfeltet er dog begrænset til ca. 2° (ca. fire månediameter), men opløsningsevnen er overordentlig høj: 10 millibuesekunder. Det svarer til diameteren af en 20-krone-mønt i en afstand på 557 km! Eller detaljer på knap 20 m på Månens overflade. Den rumlige opløsning er 10 gange bedre end hos radioobservatoriet VLA (i New Mexico) og 5 gange bedre end for *Hubble Rumteleskopet* i det optiske. ALMA er dermed det største og mest følsomme instrument i millimeter- og submillimeterområdet. Man kan observere både dag og nat (også Solen og Månen), men dagtimerne er frem til indvielsen mest blevet brugt til teknisk indkøring.

Antennerne

Det nu færdigbyggede observatorium består af i alt 66 store antenner, hvoraf 54 har en diameter på 12 m og er leveret af de europæiske og amerikanske deltagere, mens tolv med en diameter på 7 m er leveret af Japans NAOJ. Antennerne kan anbringes på 192 forskellige fundamenter spredt ud over landskabet. Den mulige indbyrdes afstand mellem antennerne strækker sig fra 15 m til ca. 16 km. Antennerne er alle bygget til at kunne opfylde en række stringente kriterier, herunder følgende:

- Afvigelse fra ideel paraboloidform: 25 μ m for 12 m antenner og 20 μ m for 7 m antenner.
- Retningsnøjagtighed:
 - Absolut afvigelse over hele himlen på højst 2,0".
 - Relativ afvigelse inden for felt på 2° på højst 0,6".
- Omgivelsestemperaturer mellem -20 °C og +20 °C.
- Vindhastigheder på op til 9 m/s.
- Fuld solpåvirkning.
- Antennerne skal kunne tåle flytning og have en forventet levetid på 30 år.

Den relative position af antennerne på jordoverfladen har kunnet bestemmes i 3D med en nøjagtighed på 65 μ m! For at opnå dette har man benyttet observationer af kvasarer, hvis positioner på himlen er kendt med meget stor nøjagtighed.

I antennebrændpunktet sidder en række modtagere anbragt i en *kryostat*. Det er nemlig nødvendigt at nedkøle antennemodtagerne for at varmestråling fra dem ikke generer signalet fra rummet. Kølingen af kryostaten sker med heliumgas med en temperatur på nogle få kelvin.

Antennerne køres i adskilt tilstand til OSF (højde 2928 m), hvor de samles og testes. Flytningen af de 100 ton tunge antenner op til AOS (højde 5059 m) foregår ved hjælp af to specialkonstruerede U-formede(!) køretøjer, *Otto* og *Lore*, fremstillet af det tyske firma *Scheuerle Fahrzeugfabrik*, se figur 4.

¹Det flot klingende navn udtales (med tysk skrivemåde) "Tschach-nan-toor" – og man må gerne rulle på 'r'-et! På lokalt indianersprog betyder det "Stedet for afsked" (med de døde). Sletten tager navn efter den nærliggende vulkantop Cerro Chajnantor (som på *Google Earth* noget misvisende betegnes "Purico Complex", et navn som dækker hele det omkringliggende pyroklastiske skjold).



Figur 4. *Otto* ankommer til AOS med den første antenne efter en køretur på 28 km fra OSF (23. september 2009). Køretøjet kan styres både fra førerhuset nederst i højre side og med en håndholdt styrepult, her båret af manden med seletøjet og gul hjelm. Det har 14 par individuelt styrbare hjul med hver to dæk og kan vende rundt på stedet. Målene på køretøjet er 10 m × 20 m × 6 m og massen er 130 tons.

Antennen omfavnes af køretøjet, der trækker den op på sin rampe og låser den fast. Antennen køres nu i løbetempo de 28 km op til AOS. Her lader man dem forsigtigt glide ned på ét af 192 betonfundamenter med tre sokler af stål anbragt i hjørnerne af en ligesidet tre-

kant. *Otto* og *Lore* bruges i dag til at flytte antennerne, når man ønsker en ny geometrisk opstilling af dem, se figur 5.

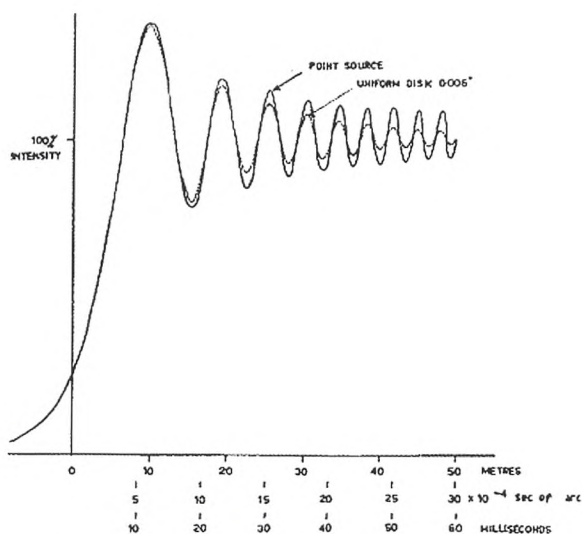
Interferens

ALMAs virkemåde bygger på fænomenet *interferens*, der skyldes, at lys, lige som lyd, har bølgeegenskaber: Hvis to vandbølger løber mod hinanden, og det er to bølgetoppe (eller to bølgedale) der mødes, så vil der ske *konstruktiv interferens*: Der dannes en ekstra stor bølgetop (eller bølgedal). Hvis en bølgetop og en bølgedal mødes, indtræffer *destruktiv interferens*: Der dannes et svækket eller intet udslag.

At et tilsvarende fænomen kan optræde for lys blev første gang påvist gennem et berømt forsøg udført af Thomas Young i 1803, der viste, at lys plus lys kan resultere i mørke. Man kan med lidt fingersnilde selv konstatere fænomenet: Hold den ene hånds tommel og pegefinger tæt mod hinanden; brug en finger fra den anden hånd som støtte til at fastholde en ganske lille afstand mellem de to andre fingre. Holder man nu dette mellemrum op mod et øje og sigter gennem det mod en lys flade, vil man i gabet kunne se en række lyse og mørke striber som tegn på interferens.



Figur 5. Luftfoto af antennerne på Llano de Chajnantor fra december 2012 fire måneder inden indvielsen af ALMA den 13. marts 2013. De mange trekantede flader er betonfundamenter, som antennerne anbringes på. De giver den mekaniske stivhed, som kræves til en præcis retningsindstilling, og de leverer elektrisk strøm og kølegas til driften samt dataforbindelse til AOS via optisk fiberkabel. Antennerne placeres af to specialkonstruerede køretøjer med en nøjagtighed på 2 mm. Midt i billedet ses en tæt gruppe på tolv 7-meter og fire 12-meter antenner. De udgør *ALMA Compact Array*, som bruges til iagttagelse af udstrakte objekter (molekyleskyer, nære galakser). Desuden kan tælles 32 af de i alt 66 store antenner på 12 m, der giver anlægget den store opløsningsevne. Til højre finder vi *Technical Building*, som rummer supercomputeren og beskedne faciliteter for ingeniører og andre medarbejdere. Man overnatter ikke her. I mellemgrunden ses det karakteristiske bølgede landskab dannet af sporadiske regnskyl mellem december og februar, hvor en jetstrøm kan skifte retning og sende fugtig luft ind østfra. Bagerst i billedet ser vi toppen af den imponerende stratovulkan *Licancabur*, hvis sne er næsten bortsmettet på dette sommerbillede. Foto: Clem & Adri Bacri-Normier/ESO.



Figur 6. Under en måneokkultation forsvinder en stjerne bag Månen og dukker senere op igen. På grund af *diffraction* af lyset ved Månens rand sker disse begivenheder ikke brat. Graferne viser det teoretiske forløb af intensiteten ved stjernens genopdukken. Nulpunktet angiver, hvor stjernen ville blive synlig, hvis der ikke var diffraction. Faktisk ses den lidt før, intensiteten vokser hurtigt til over 100 % og nærmer sig så det normale niveau efter en række svingninger. Den ydre kurve viser forløbet for en punktførm stjerne, den indre for en stjerne med en jævnt lysende overflade og en vinkeldiameter på 6 millibuesekunder. På de tre første akser vises dels mønsterets udstrækning ved jordoverfladen, udstrækningen på himlen i buesekunder samt tidsforløbet; vi ser, at registrering kræver et hurtigt tidsopløsende fotometer!

Hvordan kan ALMA danne billeder af områder på himlen ved at lade stråling fra de mange antenner interferere? Dette er et overordentligt kompliceret problem, så lad os i stedet betragte en simplere situation. Når Månen bevæger sig hen over himlen, vil den uundgåeligt med mellemrum komme til at dække stjerner. Man taler om en *måneokkultation*, og det er ganske charmerende at opleve begivenheden i en lille kikkert. Mange amatørastrofysikere brugte tidligere tid på at bestemme tidspunkter for okkultationer for at forbedre kendskabet til Månens bane. Men der er også en anden videnskabelig mulighed. For det menneskelige øje vil en stjerne, der kan opfattes som et lyspunkt, forsvinde eller genopdukke øjeblikkeligt. På grund af lysets bølgenatur er situationen mere kompliceret, der vil optræde afvigelser fra retlinjet udbredelse, kaldet *diffraction*. Det mønster, som optræder ved en okkultation, er vist på figur 6. Allerede inden stjernen geometrisk set burde være synlig, bøjer noget af dens lys sig rundt om Månens rand, og der viser sig herefter et bølgemønster i intensiteten, som hurtigt dæmpes og bliver konstant.

Men selv om stjerner er langt væk, er de ikke punktluskilder, men små lysende skiver. Det samlede signal bliver da summen af bidragene fra de forskellige dele af stjerneskiven. Da en top fra én del af skiven kan mødes med en dal fra en anden del, bliver det fremkomne mønster mere udtværet, se igen figur 6. Man måler nu intensitetsforløbet ved stjernens genopdukken og tilpasser data med en model, der indeholder stjernens vinkelradius; hvis data er gode nok, vil man også kunne udtale sig om intensitetsforløbet hen over stjerneskiven!

Pointen er altså, at man ved interferometriske målinger kan slutte sig tilbage til lysfordelingen på himlen. Og det er netop, hvad man gør med ALMA. Andre observatorier benytter også interferometri. Det ældre radioobservatorium *Very Large Array* i New Mexico består af 27 antenner (det var mange i sin tid!) og ESOs optiske *Very Large Telescope* (med fire separate 8,2 m-teleskoper) er eksempler. Her lader man dog strålingen fra de forskellige kilder interferere fysisk og registrerer det derved fremkomne signal. Ved ALMA derimod registreres og digitaliseres output fra de mange antenner, hvorefter man matematisk forener de digitaliserede signaler.

ALMAS korrelator og behovet for oxygen

Styring af de mange radioteleskoper og især databehandling af deres målinger er en meget omfattende proces. Det har derfor været nødvendigt at forsyne anlægget med slagkraftigt dataudstyr. Dette er lokaliseret i *Technical Building* nær antennekomplekset og består af to *korrelatorer*, supercomputere der opererer med 17 petaflops/s ($1,7 \cdot 10^{16}$ operationer per sekund med flydende tal). Den ene korrelator kan bearbejde signaler fra op til 64 store antenner. Output fra hvert par af disse antenner giver et interferenssignal, som afhænger af de to antenners geometriske placering. Med 64 antenner bliver det op til $64 \cdot 63/2 = 2016$ samtidige par af signaler, som korrelatoren skal bearbejde for at producere et billede. Den anden korrelator betjener *ALMA Compact Array* (se figur 5). I bygningen findes også en lokal oscillator til frembringelse af ekstremt stabile frekvenser (et "atomur"). Den matematiske model, som er udviklet til brug for den løbende datareduktion, tager bl.a. hensyn til 1) den såkaldte "Chandler-wobble", dvs. det fænomen, at Jordens rotationsakse ikke ligger helt fast i den geometriske jordfigur, men ved polerne flytter sig i en uregelmæssig cirkellignende figur med en radius på 0,14" (svarende til 4 m) og en periode på 433 døgn samt 2) effekter fra almen relativitetsteori. Korrelatoren beskrives fint i [6].

Under opstillingen af korrelatoren blev luften i bygningen tilført ekstra oxygen for at ingeniører og teknikere kunne holde hovedet klart. Dette system kan stadig tages i brug om nødvendigt. Også som besøgende skal man kunne klare opholdet i de store højder. Ved portnerbygningen ved indgangen til området bliver man indlagt til at se en video om sikkerhedsforskrifter i forbindelse med besøget. Efter en køretur på 15 km (grøn rute på figur 3) når man AOS i 2928 m højde. Her undersøger en læge ens blodtryk og iltoptagelse, og kun i tilfælde af en opadrettet tommelfinger får man lov til at komme videre op. En pressemedarbejder hos ALMA står for transporten de sidste 28 km op til OSF (5059 m, cyan rute på figur 3) og rundvisningen her. Turen foregår i en jeep udstyret med iltpåse og iltflasker til nødstilfælde og guiden skal melde sig over radio for hver 10 kørte kilometer; man tager sikkerheden meget alvorligt. Chajnantor-sletten er et fortryllende sted, omgivet af mange imponerende (udslukte) vulkantoppe. Landskabet er ørkenagtigt og flere steder bølgende.

Himlen er markant mørkere end ved havoverfladen, og mængden af ultraviolet stråling er høj. Og så skal man pga. den lave iltkoncentration bevæge sig stille og roligt når man går rundt!

Resultater

ALMA opererer i et område af det elektromagnetiske spektrum, som svarer til termisk stråling udsendt fra meget kolde objekter. Ifølge *Wiens forskydningslov* gælder for varmestråling, at

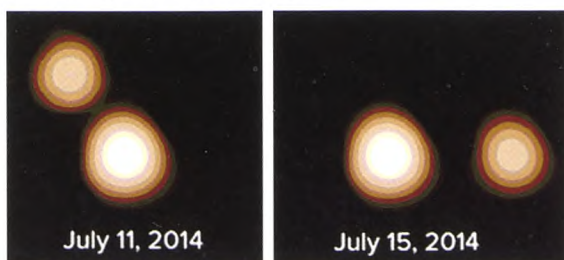
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant} \quad (1)$$

hvor $\lambda_{\max}$ er den bølgelængde ved hvilken objektets strålingsstrøm er størst og T er dets absolutte temperatur. I indledningen blev det nævnt, at vores øjne er mest følsomme ved den bølgelængde, hvor Solen ($T = 5788$ K) udsender mest lys, nemlig ca. $\lambda_{\max} = 500$ nm. Med forskydningsloven til rådighed er det nu en smal sag, at vise, at ALMAs bølgelængdeområde mellem 0,32 mm og 10 mm svarer til temperaturer på hhv. 9 K og 0,3 K. ALMA er altså i stand til at måle på ekstremt kolde himmellegemer.

ALMA har fem primære arbejdsområder: 1) Stjerneudvikling og Solen, 2) cirkumstellare skiver (f.eks. protoplanetsystemer), exoplaneter og Solsystemet, 3) interstellart stof, stjernedannelse og astrokemi (lav temperatur!), 4) galakser og galaksekerner samt 5) kosmologi og det fjerne Univers. I det følgende beskriver jeg nogle af de resultater, som man hidtil har opnået.

Pluto-Charon-systemet

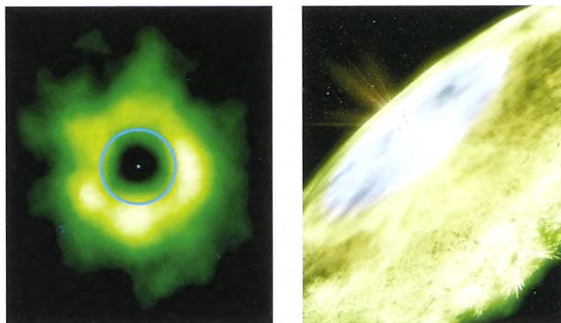
ALMA er noget usædvanligt brugt til astrometri, nemlig til at fastlægge nøjagtige positioner på himlen af dværgplaneten Pluto og dens store måne Charon. Det er sket, fordi NASA har rumsonden *New Horizons* på vej mod Pluto og dens system af 5 måner, hvortil den ankommer i juli 2015. Plutos position var hidtil kun kendt med en nøjagtighed på omkring 1000 km. Når man betænker, at afstanden er 4,5 milliarder km, så er det ikke så tosset endda. Men for at spare så meget som muligt på sondens brændstof, må positionen så tidligt som muligt kendes så nøjagtigt som muligt. Et forskerhold fik derfor lov til at udnytte, at ALMA har en vinkelopløsning, der er 5 gange bedre end *Hubble Rumteleskopet*, og kan måle positioner i forhold til meget fjerne kvasarer (læs: meget fjerne himmellegemer, der ikke flytter sig på himlen!), se figur 7. Man kan nu foretage en sikrere kurskorrektur af *New Horizons*.



Figur 7. Astronomer ved *National Radio Astronomy Observatory* har observeret Pluto og dens måne Charon med ALMA i november 2013 samt i april og juli 2014 (vist herover). De indhøstede data bruges til markant at forbedre kendskabet til Plutos position. Fotos: NRAO/AUI/NSF.

Is og støv omkring TW Hydrae

Denne stjerne, som befinder sig i en afstand af 176 lysår og skønnes at have en masse på 0,8 solmasser, tilhører klassen af *T Tauri*-stjerner. Her er der tale om helt unge stjerner, som stadig er under sammentrækning og endnu ikke har nået den langvarige hydrogenforbrændende fase. Halvdelen er omgivet af en cirkumstellare skive og TW Hydrae er det nærmeste medlem af denne type. Den skønnes at have en alder på kun 5-10 mio. år. Man har brugt 26 af ALMAs antenner til undersøgelse af systemet, og resultatet vises i figur 8.

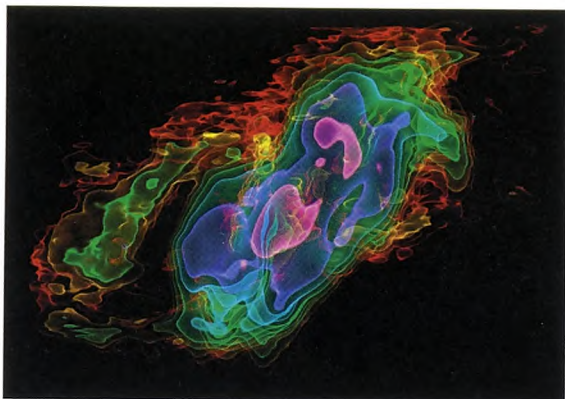


Figur 8. Venstre: Den unge stjerne TW Hydrae som ALMA har observeret den. Stjernen selv er for varm til at give sig til kende i submillimeterområdet. Radius i den blå cirkel svarer til Neptuns afstand i Solsystemet. Grøn farve markerer, hvor der er blevet påvist sne af carbonmonoxid (CO) og det begynder i en afstand på ca. 30 au (astronomiske enheder, 1 au = 149.597.870.700 m, omtrent Jordens gennemsnitsafstand fra Solen) fra stjernen. Højre: En tegners fremstilling af is- og gasskiven omkring stjernen. Snegrænsen for CO, inden for hvilken der er for varmt til, at der kan dannes CO-sne, ses ved overgangen fra den indre gas- og støvskive med H₂O og CO₂-is markeret med blå og den ydre grønt tegnede CO-sneskive. Grænsen er observeret netop, hvor man teoretisk formodede, at den ville være. Foto og grafik: ESO og Chunhua Qi.

På figur 8 (t.v.) ser vi næsten lodret ind på den protoplanetariske skive omkring stjernen. ALMA har målt stråling fra molekyleionen N₂H⁺ (diazetyl), som er kraftigt strålende ved frekvensen 93,174 GHz, svarende til bølgelængden 3,22 mm, hvilket jo lige er guf for ALMA. Fiksen er, at diazetyl let ødelægges af CO på gasform. Når det kan påvises i de ydre områder, må det være fordi CO her er frosset til is. Der findes også snegrænser for hyppige molekyler som H₂O, CO₂ og CH₄. For en solignende stjerne ligger snegrænsen for vand i en afstand fra Solen mellem Mars og Jupiter, og for carbonmonoxid omtrent i Neptuns afstand, som vist på figur 8 (t.h.). De forskellige istyper kondenseres på støvkorn, der bliver klæbrige. Det forbedrer muligheden for sammenklumpning og for dannelse af *planetesimaler*, de kilometerstore byggesten, som er forstadiet til planeter.

Starburst-galaksen NGC 253

ALMA kan måle *radialhastigheder* med en nøjagtighed på 50 m/s. Et objekts radialhastighed er jo den del af bevægelsen, som foregår i synslinjens retning. Den ændrer signalets bølgelængde og frekvens og kendes fra passerende udrykningskøretøjer, der nærmer sig med en højere og fjerner sig med en lavere frekvens end den hvilende lyd kilde.



Figur 9. Hvad ser vi her? Det kunne være et billede til en Rorschach-test, men det viser slet ikke et fysisk objekt, men derimod et snit gennem en 3D-fremstilling af bevægelsesforholdene for gas omkring centret af galaksen NGC 253, hvor der finder en voldsom stjernedannelse sted. I vandret retning vises gassens afstand fra centret, i lodret retning dens hastighed; farverne indikerer strålens styrke med magenta som stærkest og rødt som svagest. De to magenta områder nær midten af billedet svarer til gasbobler, som udsendes i hver sin retning fra centret. En roterende 3D-illustration kan findes via [8]. Grafik: ALMA/ Erik Rosolowsky.

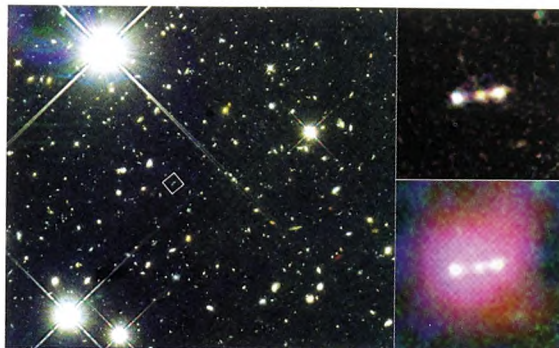
Spiralgalaksen NGC 253 befinder sig i en afstand på 11,3 mio. lysår fra Mælkevejsgalaksen og er af *starburst*-typen, dvs. der finder en usædvanligt voldsom stjernedannelse sted i dens centrale områder. Dette er en forholdsvis kortvarig fase i en galakses udvikling, fordi en stor mængde interstellar gas omdannes til stjerner. En gruppe på tolv astronomer har med ALMA målt stråling udsendt af ^{12}CO -molekyler, som er den mest almindeligt anvendte sporgas for molekyleskyer. Resultatet af deres analyse vises på figur 9. For første gang har man iagttaget udslyngningen af store mængder kold gas fra en galakses centrale del som følge af det tryk, som de mange nydannede stjerner udøver. Det skønnes, at starburst-området årligt mister omkring 9 solmasser og at gastætheden her om 60-120 millioner år vil være reduceret så meget, at stjernedannelsen falder markant fra den nuværende høje rate.

“Himiko”, et galaksefoster

Figur 10 illustrerer et eksempel på anvendelse af ALMA til undersøgelse af det fjerne Univers og på, at det kan være nyttigt at sammenholde resultater opnået i forskellige dele af spektret. Det indrammede område viser tre lysende klumper, som først blev undersøgt med det japanske Subaru-teleskop på Mauna Kea (Hawaii) og kaldt “Himiko” efter en legendarisk japansk dronning. Det infrarøde rumteleskop *Spitzer* har leveret data, der fører til en samlet masse på omkring 40 milliarder solmasser. De tre stjerneklumper forventes i fremtiden at smelte sammen og danne en galakse.

I nære galakser har ALMA påvist store mængder af carbon (i form af CO-molekyler), men man har intet fundet i *Himiko*. Forklaringen er nærliggende: Den gas, som blev dannet kort efter *Big Bang*, bestod praktisk taget udelukkende af H og He. Tungere grundstoffer som C og O blev først dannet senere i det indre

af stjerner og siden, bl.a. ved supernovaeksplosioner, spredt ud i det interstellare stof. Men *Himiko* er så ungt et objekt, at der endnu ikke har været tid til at producere tungere grundstoffer. Vi ser her et objekt, som består af førstegenerations-stjerner!



Figur 10. Billedet til venstre viser et lillebitte himmelområde fotograferet af *Hubble Rumteleskopet*. Det lille firkantede område vises forstørret øverst til højre. Lyset i de tre pletter er udsendt da Universet kun var 800 millioner år gammelt. Udstrækningen er ca. 55.000 lysår. Nederst til højre ses de tre klumper omgivet af en enorm sky af hydrogen. Vi ser her en galakse under dannelse i det tidlige Univers. Fotos: NASA, ESA og Masami Ouchi.

Egnen omkring San Pedro

ALMA OSF ligger 33 km sydøst for ørkenbyen *San Pedro de Atacama*, se figur 3. Byen og egnen omkring den er afgjort et besøg værd: Vest for byen finder man *Valle de la Luna* og *Valle de la Muerte*, der rummer fantastiske landskabsformer og farver, og hvor der ikke er faldet nedbør i flere hundrede år. Der er mulighed for udflugter f.eks. til den irgrønne bolivianske sø *Laguna Verde* med flamingoer og *vicuñaer* (en vild lamaart) eller til *El Tatio*-gejserne i morgensol. Man kan også køre til saltsletterne i Atacama-ørkenen syd for byen. Endvidere arrangerer flere operatører aftenfremvisning af stjernehimlen, en af dem har ti teleskoper opstillet til at vise hver sit interessante objekt på den sydlige himmel og slutter med servering af varm kakao. Der findes udmærkede hoteller i San Pedro, som kan nås i bil på en fortrinlig asfaltvej fra lufthavnsbyen Calama.

Afslutning

I maj 2014 endte den første observationscyklus (*Cycle 1*), hvor man ikke benyttede indbyrdes antenneafstande større end 1,5 km. I juni 2014 gik ALMA ind i *Cycle 2*. Her vil man i første omgang øge til afstande op til 10 km og efterhånden til maximum på 16 km. Man vil herefter skifte mellem kompakte opstillinger (der kan registrere udstrakte himmelobjekter) og udbredte konfigurationer (der giver stor opløsningsevne) alt efter, hvad de godkendte videnskabelige projekter kræver. Mens en antenne flyttes, kan de øvrige stadig observere.

Af hensyn til de læsere, som ikke kan få tiden til at gå en søndag eftermiddag, kan som et kuriosum nævnes, at en japansk(!) medarbejder ved ALMA har konstrueret ark, som kan klippes ud og samles til bevægelige modeller af et radioteleskop hhv. en antennetransportør, se henvisning [9].

Litteratur

- [1] ALMAs hjemmeside: <http://www.almaobservatory.org>
- [2] ESOs hjemmeside om ALMA, <http://www.eso.org/sci/facilities/alma.html>
- [3] ALMA Newsletters (informativ, men går kun frem til februar 2012), <http://almascience.eso.org/news/newsletters/aggregator>
- [4] *60 minutes* om ALMA (30 min, fornem formidling, men reklamebelastet), <http://www.cbsnews.com/videos/alma-peering-into-the-universes-past>
- [5] *The Birth of the ALMA Observatory* (reklamefri, 52 min, grundig, amerikansk stil), <https://www.youtube.com/watch?v=lQ2m-GSaX8E>
- [6] ALMAs korrelator, <http://almaobservatory.org/en/visuals/videos/521-esocast-51-all-systems-go-for-highest-altitude-supercomputer>
- [7] Indvielse med mere, 6 min, <http://www.eso.org/public/videos/eso1312b>
- [8] 3D visualisering af CO-gas i NGC 253, <http://www.eso.org/public/usa/videos/eso1334b>
- [9] Kartonmodeller, <http://alma.mtk.nao.ac.jp/e/multimedia/papercraft>



Holger Nielsen er cand.scient. i astronomi og fhv. lektor i fysik, matematik og astronomi ved Støvring Gymnasium. Han medvirkede i 1990'erne i arbejdet med at få indført astronomi som gymnasiefag. Han har i 25 år deltaget i forevisninger ved Urania Observatoriet i Aalborg. Holger og konen var i februar 2014 inviteret på besøg ved ALMA.

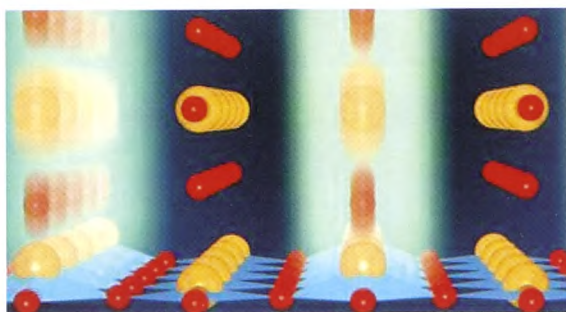
KVANT-nyheder

Af *Sven Munk*, KVANT

Superleder ved stuetemperatur?

FASTSTOFFYSIK. Man kender efterhånden mange materialer/stoffer, som bliver superledende ved meget lave temperaturer. Det vakte opmærksomhed, da man opdagede, at et keramisk materiale kunne blive superledende ved en relativ høj temperatur. Det drejer sig om det nu velkendte materiale Yttriumbariumkobberoxid (YBaCuO eller blot "YBCO"). Sidste år blev det påvist, at samme materiale kortvarigt kan blive superledende ved stuetemperatur, ved bestråling med en "IR-laser-blitz".

Forskerne giver følgende beskrivelse af mekanismen bag dette fænomen: Krystalgitteret i YBCO har skiftevis et ledende og ikke-ledende lag. Superledende strøm gennem det ikke-ledende lag kan normalt kun løbe, når temperaturen er langt under stuetemperatur.



Billedet illustrerer krystalstrukturen i YBCO. Det antydes, at atomerne er i bevægelse.

At IR-stråling kan fremkalde superledning virker ikke som en nærliggende idé, men forskerne udførte følgende eksperiment: IR-stråling blev sendt ind i en krystal af YBCO. Umiddelbart efter en IR-laser-puls fulgte en Röntgen-puls, hvis opgave var af afsløre, om der var sket ændringer i selve krystalstrukturen. Her blev det så afsløret, at det ikke-ledende

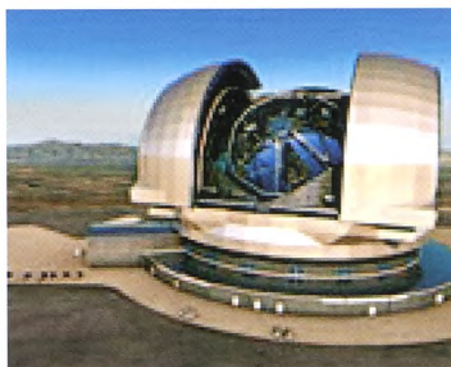
lag kortvarigt blev en lille smule tyndere. Herved forbedres muligheden for at opretholde en superledende strøm. Dette forhold underbygges af de teoretiske beregninger, forskerne har udført. Andre superleder-forskere vil utvivlsomt finde resultatet interessant. Hvornår stuetemperatur-superledere bliver en del af hverdagen, tør ingen spå om.

Kilder: R. Mankowsky et al., "Nonlinear lattice dynamics as a basis for enhanced superconductivity in YBa₂Cu₃O_{6.5}", *Nature* 2014, <http://dx.doi.org/10.1038/nature13875>; Roman Mankowsky, Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie, <http://qcemd.mpsd.mpg.de/index.php/roman-mankowsky.html>.

Europæisk superteleskop: E-ELT

ASTRONOMI. ESO (European Southern Observatory) har besluttet at bruge én mia. euro på at bygge European Extremely Large Telescope (E-ELT). Teleskopet placeres på højderyggen Cerro Armazones i Atacama-ørkenen, Chile. Spejlet får en diameter på 39 m, og bliver således blandt de største i verden.

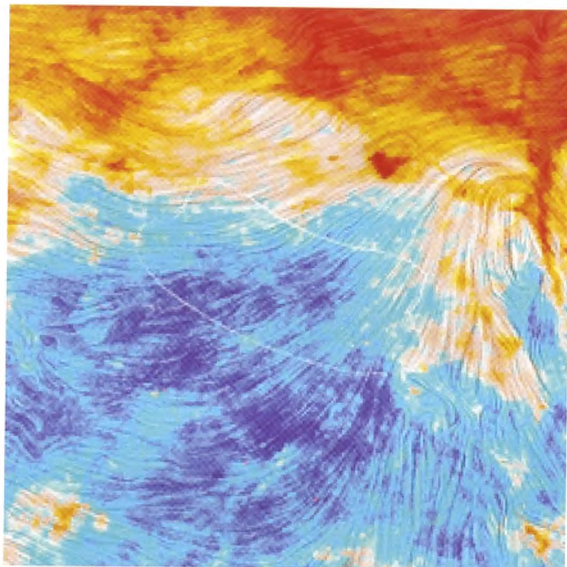
Ifølge planerne forventes det at være helt færdigt om 10 år, men det ser ud til at nogle typer af målinger kan begynde tidligere. Teleskopet skal arbejde i det synlige og nære infrarøde område af spektret. Temaer for forskningen vil være exoplaneter, stjerner i de nære galakser og det fjerne univers.



Kilder: <http://www.eso.org/public/about-eso/faq/faq-e-elt>; <http://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1440/messenger.pdf>

Gravitationsbølger begravet i støv

KOSMOLOGI. I KVANT-nyheder nr. 2, 2014 blev det omtalt, at det med det specielle instrument BICEP2 via mikrobølgestråling var lykkedes at detektere gravitationsbølger stammende fra Big-Bang. Nyeste resultater fra rumteleskopet Planck afkræfter denne antagelse. Ved at sammenholde måledata fra BICEP2 med dem fra Planck er konklusionen nu, at de mikrobølgesignaler BICEP2 opfangede er påvirket af støj. Støjkilden er støv i vor egen galakse.



Billedet viser hvorledes Planck registrerer stråling fra det samme felt, som BICEP2 havde under observation. Stråling fra støvet er markeret med farverne rød til blå, hvor rød er kraftigst. I billedets øverste del ses ret meget af den røde farve, hvilket betyder at BICEP2 har opfanget meget mikrobølgestråling fra dette område. På billedet ses også noget, som ligner spaghetti. De giver oplysning om magnetfelter i området.

En kvalitet ved Plancks målinger er, at mikrobølgestrålingen er registreret ved 9 forskellige frekvenser. Herved er det lettere at frasortere den stråling, som kommer fra vor egen galakse.

Selv om de nye målinger ikke bekræfter eksistensen af gravitationsbølger fra Big-Bang, kan man dog ikke konkludere, at sådanne ikke findes. *Physical Review Letters* vil bringe en artikel om emnet.

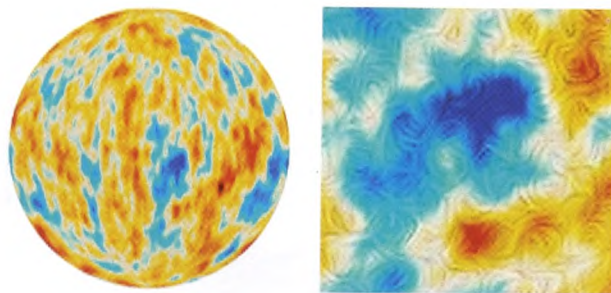
Kilder: <http://sci.esa.int/planck>; Rumteleskopet Planck, <http://sci.esa.int/planck/55362-planck-gravitational-waves-remain-elusive>; John Kovac, Harvard University, <https://www.cfa.harvard.edu/~jmkovac>; BICEP2-Teleskop, <http://www.cfa.harvard.edu/CMB/bicep2>

Allerførste stjerner

KOSMOLOGI. Udviklingen af Universet efter Big Bang kan opdeles i forskellige faser. Eksempelvis var de første 350.000 år kendetegnet ved, at Universet ikke var transparent for elektromagnetisk stråling. Efterhånden som tiden gik, blev stofkoncentrationen og temperaturen mindre. Stabile atomer blev dannet og disse fandt sammen i gasskyer. På dette tidspunkt, var der ikke dannet stjerner – det skete først mange millioner år senere.

Det europæiske rumteleskop Planck har skabt det hidtil mest detaljerede billede af eftergløden af Big Bang. Planck har opmålt den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling og derved bestemt strålingens temperatur og polarisation. Billedet til venstre viser hele himmelhælvet, som set af Planck.

Til højre er der zoomet ind på et udsnit. De spaghetti-formede strukturer afslører noget om magnetfelterne i rummet.



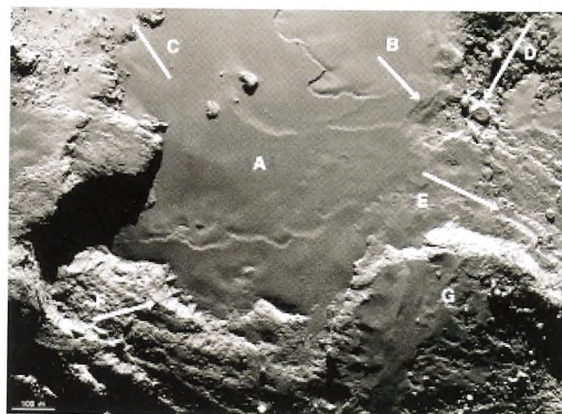
På basis af disse observationer konkluderer forskerne, at de første stjerner i Universet blev dannet 100 mio. år senere end hidtil antaget. Det vil sige 550 mio. år efter Big Bang.

Kilder: Planck 2015 Results, <http://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications>; Planck-Mission (ESA), <http://sci.esa.int/planck>.

Nyt fra Rosetta-missionen

ASTRONOMI. Selv om landingen af modulet Philae på kometen ikke var helt vellykket, har Rosetta ikke desto mindre hentet interessante data hjem til forskerne. Sortere end kul er kometens overflade, så det bliver svært fremover at forestille sig kometer af frosset vand, værende hvid som sne. Overfladen er dækket af et tykt lag støv, som skjuler isen og de frosne gasser. Man må forestille sig det indre som en ret porøs struktur, hvor der også er mange stenbrokker. Når kometen er tæt på solen vil de flygtige dele fordampe og de mørke, faste stoffer forblive hvor de er.

Billedet viser kometens overflade med forskernes markering af interessante områder. Afstanden fra venstre til højre kant er ca. 1500 m.



Det sorte støvlag kan indeholde organisk stof (kulstof). Da Rosetta tog de første billeder, bemærkede forskerne, at kometen lignede et meget stort kødben, to klumper i hver sin ende. Der blev tænkt over, om kometen var dannet ved at to mindre kometer var stødt sammen. Forskerne peger nu på en anden mulighed. Måske er den "tynde" del af kometen opstået, fordi der her var en mere flygtig substans, som hurtigere er dampet af. Det var ventet, at afdampningen hovedsagelig ville være vanddamp, men man har i stedet fundet en stor koncentration af kuldioxid. Kometen og Rosetta vil være tættest på Solen d. 13. august, hvor forskerne så forventes at være særligt aktive.

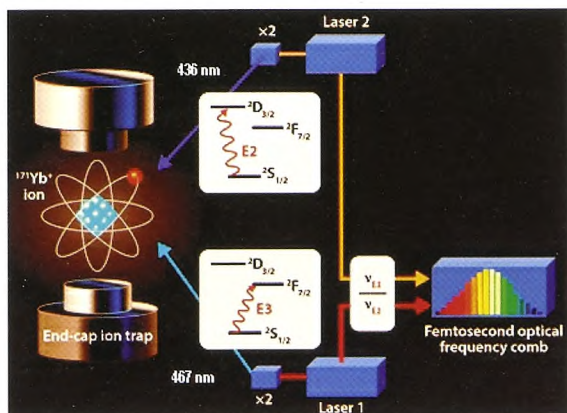
Kilder: Rosetta (ESA), http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta; Flere artikler i *Science*, 2015, fx N. Thomas et al., "The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko", *Science* 2015, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aaa0440>.

Er naturkonstanterne virkelig konstante?

METROLOGI. Det ville få vidtrækkende konsekvenser, hvis naturkonstanterne mod forventning ikke er – netop konstante. På den anden side er det eksperimentelt vanskeligt at fastslå, at nogle naturkonstanter ikke ændrer sig bare en lille smule. Kosmologer og fysikere, som beskæftiger sig med “The Grand Unified Theory” kan forestille sig, at et ekspanderende univers kan påvirke naturkonstanterne. Nogle astronomiske målinger kan tolkes som bekræftelse, mens andre peger i modsat retning.

Den såkaldte “finstruktur-konstant”, $\alpha = e^2/hc$, forbinder elektromagnetisme og kvantemekanik, og er derfor genstand for opmærksomhed, når temaet er naturkonstanternes stabilitet. En anden fysisk størrelse, som er interessant i denne sammenhæng, er forholdet mellem protonens masse (m_p) og elektronens masse (m_e) – altså m_p/m_e .

Forskere ved National Physical Laboratory (NPL), England – og Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Tyskland, har konstrueret et atomur med ekstrem stabilitet/nøjagtighed. Med et sådant ur kan man ikke alene måle tid, men også frekvenser og dermed lysbølgelængder. Det er således muligt, at måle om bølgelængden af lys fra de fjerneste egne af Universet er den samme, som stråling frembragt i laboratoriet.



Billedet fortæller i kompakt form, hvorledes måleopstillingen er designet og dens virkemåde. Centralt i måleprocessen er en Ytterbium-171 ion ($^{171}\text{Yb}^+$). Ytterbium-ionen befinder sig i en ionfælde, som ses helt til venstre. Den valgte atomversion har to elektron-energi-niveauer, som så at sige kan aktiveres hver for sig uden nogen gensidig påvirkning. To lasere med hver sin lysbølgelængde (467 nm og 436 nm) sender lys mod Ytterbium-ionen, hvor det absorberes, hvis bølgelængden passer eksakt med energigabet. En reguleringsløkke fra ion-fælden tilbage til laseren sørger for, at laserlyset har den helt korrekte bølgelængde.

Bølgelængden på 467 nm svarer til energigabet E3 på figuren (nederst). For netop denne bølgelængde har NPL og PTB bestemt frekvensen af lyset. Det gav følgende:

NPL: 642.121.496.772.644,91 Hz

PTB: 642.121.496.772.645,36 Hz

En forskel på 0,45 Hz... Kan det gøres bedre?

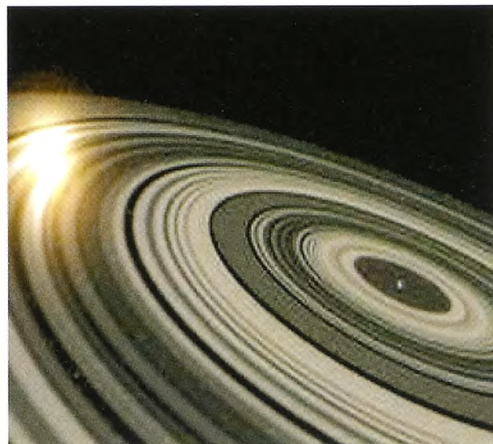
Kilder: R.M. Godun et al., “Frequency Ratio of Two Optical Clock Transitions in Yb^{+171} and Constraints on the Time Variation of Fundamental Constants”, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 210801 (2014), <http://journals.aps.org/prl>; <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si>.

Saturn i størrelse XL

ASTRONOMI. I en afstand af 430 lysår har man fundet exoplaneten J1407b. Denne er omgivet af et ringsystem, som er 200 gange større end Saturns. Huller i ringen tolkes sådan, at flere måner allerede kredser om J1407b.

Det er vist en udbredt opfattelse blandt astronomer, at planeter som Jupiter og Saturn i deres ungdom var omgivet af store skiver/ringe af gas og støv. I disse opstod så de måner/drabanter, som bevæger sig rundt om planeterne.

Fundet af exoplaneten J1407b kan kaste lys over, hvordan måner dannes, når afstanden til planeten er flere millioner km. Til historien hører også, at J1407b kredser om en ung stjerne (alder 16 mio. år) med omtrent samme masse som Solen.



Exoplaneten blev identificeret for 3 år siden ved hjælp af det automatiske afsøgningsprogram SuperWASP. J1409b afslørede sin tilstedeværelse, da den passerede den unge stjernes lysende overflade. I modsætning til det man ofte ser, når exoplaneter opdages, var der store fluktuationer i det opfangede lys. Disse variationer varer mere end 56 dage – hvilket er lang tid. Forskerne mener, at de har fundet forklaringen: J1407b er omgivet af et ringsystem med 37 ringe og en diameter på 120 mio. km. Ringene kan absorbere op til 95 % af stjernens stråling. Der må derfor være meget materie, som formentlig kan danne flere måner end den, der befinder sig 61 mio. km fra exoplaneten. Skal man tegne et billede af situationen er Saturn er godt bud.

Kilder: Matthew A. Kenworthy et al., “Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: sculpting by exomoons?”, *Astrophys. Jour.* (i trykken), <http://arxiv.org/abs/1501.05652>; Matthew A. Kenworthy, Leiden University, <http://home.strw.leidenuniv.nl/~kenworthy>; SuperWASP, <http://www.superwasp.org>.

Solformørkelse den 20. marts

ASTRONOMI. Den 20. marts om morgenen vil der optræde en total solformørkelse, som er synlig omkring Færøerne. Flere hundrede danskere forventes at overvære denne begivenhed, bl.a. på turen omtalt i KVANT nr. 3, 2013. I Danmark bliver formørkelsen ca. 80 %.

Krabbetågen

Af Michael Quaade

I 1054 eksploderede en supernova i stjernebilledet *Tyren*. Resterne efter eksplosionen kan i dag ses som Krabbetågen lidt over en grad fra spidsen af Tyrens nederste horn – stjernen ζ Tauri. Den er en forholdsvis lille, lyssvag tåge, som kun kan ses i en astronomisk kikkert. Krabbetågen tager sig godt ud på billeder, fordi den indeholder farverige trådlignende strukturer. Filamenterne stammer fra de ydre dele af den eksploderede stjerne og indeholder et stort udvalg af ioniserede og neutrale grundstoffer [1].



Figur 1. Krabbetågen optaget i synligt lys i 2005. Billedet er samlet af 24 enkeltoptagelser med Hubble rumteleskopet i tre forskellige farver. Udstrækningen af billedet på himlen er lidt over en tiendedel grad på hver led. Til sammenligning fylder Solen og Månen omkring en halv grad. Foto: NASA, ESA, Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University), Davide De Martin (ESA/Hubble)

I dag måler krabbetågen omkring et lysår. Den størrelse har den opnået i løbet af knap 1000 år, der er gået siden eksplosionen. Krabbetågen udvider sig ud i det omgivende rum med omkring 1000 km/s. Det er tydeligt at se tågens udvidelse ved at sammenligne optagelser af den taget med mange års mellemrum, fx i 1973 og 2001 [2].

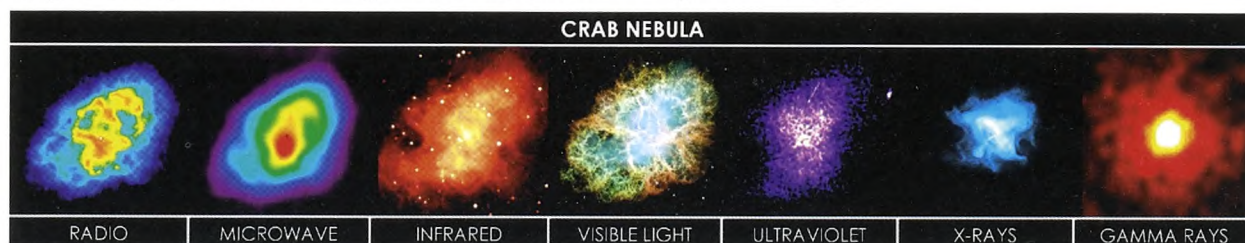
Meget af Krabbetågens udstråling er synkrotronstråling, som udsendes fra elektroner, der bevæger sig rundt i tågens kraftige magnetfelt med stor hastighed. Den slags stråling dækker et meget stort interval i

bølgelængder fra helt kortbølget røntgen- og gammastråling til langbølget radiostråling. I synligt lys danner synkrotronstrålingen den diffuse blå baggrund.

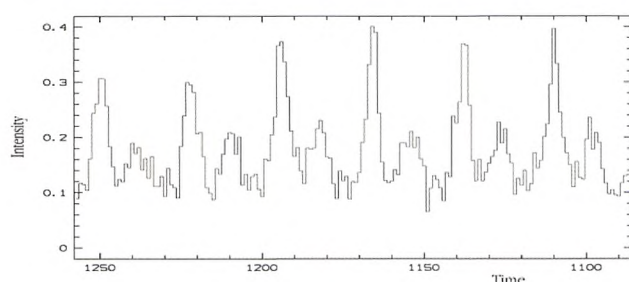
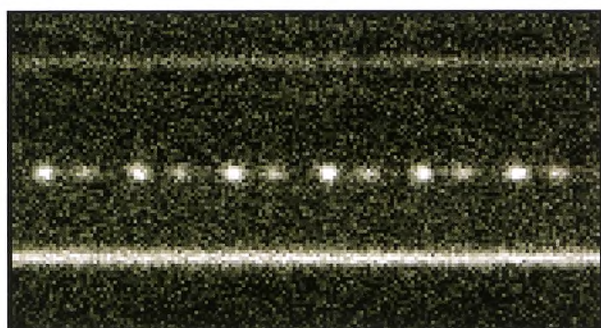
Ud over, at Krabbetågen er et spændende objekt i sig selv, har den også bidraget til undersøgelse af objekter i vores eget solsystem. Den står omkring $1,5^\circ$ fra ekliptika, så Solen og planeterne passerer af og til tæt forbi tågen. I 2003 passerede Saturns måne Titan ind foran Krabbetågen, så Chandra røntgenrumteleskopet kunne måle størrelsen af Titans skygge i røntgenområdet [3]. Skyggens radius viste sig at være næsten 900 km større end radius af Titans faste overflade på 2575 km. Det skyldes, at Titans tætte atmosfære ligesom Jordens atmosfære er helt ugennemtrængelig for røntgenstrålingen, så den observation viser, at Titans atmosfære strækker sig knap 900 km ud fra overfladen.

Inde i tågen findes et ualmindeligt, besynderligt himmellegeme. Det er en pulsar – en ganske lille, hurtigt roterende stjerne, som udsender hurtige og regelmæssige lysglimt. Den er dannet ved den supernovaeksplosion, der sendte resten af den oprindelige stjerne ud i rummet. Stjernen er ikke lavet af brint og helium som de fleste andre stjerner, men af tætpakkede neutroner. En sådan stjerne kaldes meget naturligt for en neutronstjerne. Den vejer mere end Solen, men dens diameter er knap 30 km. Det betyder med andre ord, at en enkelt kubikcentimeter af den vejer mere end 100 millioner tons.

Pulsaren i Krabbetågen roterer 30 gange i sekundet (se figur 3). Lysglimtene skyldes, at det meste lys kommer fra to poler på modsatte sider af stjernen. Hver gang en af polerne passerer retningen til Jorden, ser vi et glimt. Glimtene kan ikke kun observeres i synligt lys, men også i andre bølgelængder lige fra lange radiobølger til kortbølget røntgenstråling. Det kræver observationer med høj tidsopløsning at måle pulsarens lysvariationer [4].



Figur 2. Krabbetågen i mange bølgelængder fra langbølgede radiobølger til venstre til gammastråling til højre. Foto: Torres997, Wikimedia commons.

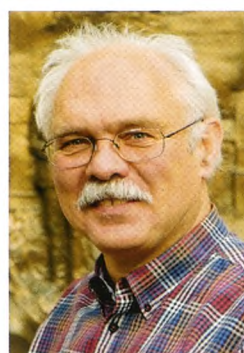


Figur 3. Øverst: Optagelse med høj tidsopløsning med FORS2-kameraet på et af de fire 8-meter teleskoper, der udgør ESOs Very Large Telescope [4]. Øverst og nederst i billedet ses to konstant lysende stjerner, mens pulsaren langs midten af billedet ses som en række prikker med to for hver 33 millisekunder. Nederst: Grafisk fremstilling af FORS2-observationerne [4]. Lysintensiteten er vist på den lodrette akse, mens den vandrette viser tiden i millisekunder (ESO).

Den hurtige rotation skyldes, at massen i den langsomt roterende stjerne ved supernovaeksplosionen er klempt sammen i en ganske lille kugle i forhold til det, materialet fyldte før eksplosionen. Fænomenet kaldes bevarelse af impulsmomentet, og det er samme fysiske mekanisme, der øger rotationshastigheden for en skøjteløber, der laver en pirouette og trækker armene ind langs kroppen.

Litteratur

- [1] Fesen og Kirschner (1982) *Astrophys.J.* **258**, 1-10;
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1982ApJ...258....1F>
- [2] Astronomy Picture of the Day 27. december 2001;
<http://apod.nasa.gov/apod/ap011227.html>
- [3] Mori et.al. (2004) *Astrophys. J.* **607** 1065-1069;
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0403283>
- [4] ESO press release 9948;
<http://www.eso.org/public/news/eso9948/>



Michael Quaade er kommunikationsmedarbejder ved Niels Bohr Institutet og arbejder primært med initiativer overfor gymnasie- og folkeskoleelever. Han har i en årrække været formand for Astronomisk Selskab.

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2015

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Mar.				
2/3	19.30	Den svage kernekraft	<i>Steen Hannestad</i>	AS (Aarh)
2/3	19.30	Mikro- og nanomekaniske strukturer som sensorer	<i>Anja Boisen</i>	SNU
16/3	19.15	Den stærke kernekraft	<i>Mads Toudal Frandsen</i>	AS (Kbh)
23/3	19.30	Den stærke kernekraft	<i>Mads Toudal Frandsen</i>	AS (Aarh)
23/3	19.30	Nanosikkerhed – nanoteknologi og arbejdsmiljø	<i>Ulla Vogel</i>	SNU
Apr.				
13/4	19.15	Er der flere naturkræfter?	<i>Ole Eggers Bjælde</i>	AS (Kbh)
13/4	19.30	Observing nature with glasses that see at nanometer scale (på engelsk)	<i>Susan Stipp</i>	SNU
		Generalforsamling (efter foredraget)		
20/4	19.30	Er der flere naturkræfter?	<i>Ole Eggers Bjælde</i>	AS (Aarh)
Maj				
4/5	19.15	Tyngdekraften (foredrag på engelsk)	<i>Niels Obers</i>	AS (Kbh)
11/5	19.30	Fremtidens medicin	<i>Jørgen Kjems</i>	SNU
11/5	19.30	Tyngdekraften (foredrag på engelsk)	<i>Niels Obers</i>	AS (Aarh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (København), Auditorium 4, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (www.astronomisk.dk).
AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarhus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Auditorium D2, 8000 Aarhus C.
SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net).

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Temaet for foredragsrækken er den nyeste udvikling indenfor nanoscience og nanoteknologi. Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjerteligt velkomne!

Indstillinger modtages til H.C. Ørsted Medaljen 2015

I december tildelte Selskabet for Naturlærens Udbredelse H.C. Ørsted Medaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab til lektor *Pia Halkjær Gommesen*, Fåborg Gymnasium.

Det var et resultat af, at Selskabet i disse år sætter specielt fokus på den vigtige formidling i gymnasiet med en årlig uddeling af H.C. Ørsted Medaljen til inspirerende gymnasielærere inden for Selskabets fagkreds.

Det er således Selskabets intention også i 2015 at uddele en medalje til en fremragende formidler inden for naturvidenskab. Uddelingen vil finde sted i slutningen af året med frist for indstilling med udgangen af uge 42.

Selskabet skal hermed opfordre rektorer, gymnasielærere og elever og andre til allerede nu at overveje værdige kandidater til indstilling til årets medalje.



Fra venstre ses: Dorte Olesen, Jeppe Willads, Hans Lindemann, Pia Gommesen og Per Dal Jensen.

Generalforsamling i SNU den 13. april:

Dagsorden

1. Beretning for året 2014
2. Forelæggelse af regnskab for 2014
3. Forelæggelse af budget for 2015
4. Fastsættelse af kontingent for 2016
5. Direktionens medlemmer, jfr. vedtægterne.
6. Valg af revisor.
7. Evt.

Astronomisk Selskab

Foredragenes tema er Universets naturkræfter. Når planeter bevæger sig, stjerner lyser, galakser støder sammen, kvasarer udsender intens stråling og gravitationsbølger bevæger sig gennem Universet skyldes det de fire naturkræfter der hersker i Universet, nemlig:

- Den elektromagnetiske kraft
- Den svage kernekraft
- Den stærke kernekraft
- Tyngdekraften.

Tilsammen er de ansvarlige for alle fysiske vekselvirkninger, som finder sted i Universet helt fra processer, som holder bittesmå kvarker sammen i atomkerner til processer hvor

gigantiske galaksehobe støder sammen. I foredragsrækken sættes fokus på de fire naturkræfter og deres betydning for Universet. Fem forskere fra danske universiteter fortæller om de nyeste opdagelser, som involverer naturkræfterne. Fire foredrag handler om hver af de fire naturkræfter, mens det femte foredrag stiller spørgsmålet: Kan der være en femte naturkraft? Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab og Folkeuniversitetet i København og Aarhus. De er tilrettelagt af Johan Fynbo og Ole Bjælde, Astronomisk Selskab

Indkaldelse til Generalforsamling i Astronomisk Selskab

Lørdag den 11. april 2015 på Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Program:

Kl. 11.00: Foredrag ved professor mso Johan Fynbo (foreningens formand): "Glæden ved Galakser". Foredraget vil omhandle lidt om videnskabshistorien bag opdagelsen og studiet af galakser som er foredragsholderens lidenskab. Derfra tages afsæt til en beskrivelse af hvordan man kan studere meget fjerne galakser vha. absorptionsstudier i overraskende stor detalje.

Kl. 12.00: Frokost i kantinen. NB: Pris 75,- kr. (excl. drikkevarer). Tilmelding påkrævet til kasserer Steen Traberg-Borup på email: steen@traberg-borup.dk – senest onsdag den 1. april 2015.

Kl. 13.00: Generalforsamling.

Dagsorden for generalforsamlingen:

1. Valg af dirigent og referent.
2. Godkendelse af referatet fra generalforsamlingen 26. april 2014. (Kan ses på astronomisk.dk).
3. Formandens beretning om Astronomisk Selskabs virksomhed i det forløbne år.
4. Beretning fra sektioner og udvalg.
5. Kassererens beretning for det reviderede regnskab. Regnskabet fremlægges ved generalforsamlingen.
6. Godkendelse af bestyrelsens budgetforslag for indværende år og fastsættelse af medlemskontingent for det kommende år. Budgettet fremlægges ved generalforsamlingen.
7. Godkendelse af vedtægtsændringer for Wieth-Knudsen Observatoriet.
8. Indkomne forslag. (Der er ikke indkommet forslag fra medlemmerne).
9. Valg af to bestyrelsesmedlemmer for tre år. Ole Eggers Bjælde og Ole Berg Nielsen er på valg. Ole Eggers Bjælde ønsker ikke at genopstille. Bestyrelsen foreslår genvalg af Ole Berg Nielsen.
10. Valg af en første og en anden suppleant til bestyrelsen for ét år. Bestyrelsen foreslår genvalg af Jens Jessen-Hansen.
11. Valg af formand for ét år. Bestyrelsen foreslår Johan Fynbo.
12. Valg af to revisorer samt en første og en anden revisorsuppleant for ét år. Bestyrelsen foreslår genvalg af Steen Lærke og Bent Schou som revisorer og genvalg af Birgit Fejerskov og Erik Høeg som hhv. første og anden revisorsuppleant.
13. Eventuelt.

25 år med KVANT

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space og Polar DTU

Med dette nummer af Kvant tager vi hul på bladets 26. årgang og det betyder, at vi i år kan fejre Kvants 25 års jubilæum. Kvants rødder går dog meget længere tilbage, eftersom én af hovedopgaverne for bladet var at overtage den rolle "Fysisk Tidsskrift" havde spillet siden 1902.

Fysisk Tidsskrift [1] var i 87 år tidsskrift for Selskabet for Naturlærens Udbredelse, indtil selskabet i 1990 gik sammen med Dansk Fysisk Selskab om at udgive Kvant, og navnet Fysisk Tidsskrift blev derfor videreført i Kvants undertitel. Et andet formål var at udvide læserkredsen, og siden starten er Kvant – takket være bidrag fra landets fysikinstitutter – blevet sendt gratis i et eksemplar til lærerværelserne på alle landets gymnasier, seminarer, hf-kurser m.m.

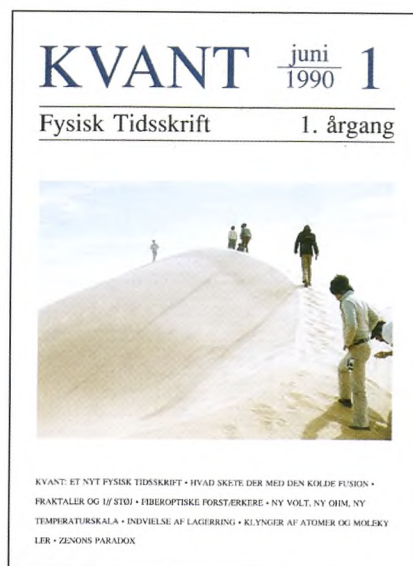
De 25 år er derfor kun en lille del af bladets forhistorie, men i en verden, hvor over 1.000 små dansksprogede tidsskrifter de sidste ti år enten er holdt helt op med at udkomme eller kun udkommer på nettet, er selv 25 år en succeshistorie, der er værd at markere. At starte et blad og udgive det i 25 år er ingen automatisk historie, for udover at det naturligvis kræver, at der både er nogen til at skrive og nogen til at læse i bladet, kræver det især en vedholdende redaktion. Jeg vil derfor indledningsvis bemærke, at to af de oprindelige fem redaktionsmedlemmer, nemlig Finn Berg Rasmussen og Mogens Esrom Larsen, også kan fejre et 25 års jubilæum som vedholdende og aktive redaktionsmedlemmer, samt at et tredje af de oprindelige redaktionsmedlemmer, Torsten Freltoft, først for et par år siden valgte at udtræde af redaktionen på grund af travlhed med andre projekter.

Det vedholdende er også kendetegnende for Kvant derved, at bladet ikke har været underlagt skiftende grafiske modeluner, og sammenligner man dette nummer af Kvant med det første nummer fra 1990, springer det i øjnene, at bladet har været særdeles trofast overfor sit oprindelige layout. Den teknologiske udvikling afslører sig nærmest kun i små detaljer, som at Kvant i dag ikke alene har en mailadresse, men også en hjemmeside og endda en Facebook-profil. Kvant er også vedvarende udkommet med fire numre om året, hvilket ifølge redaktionens matematiker Mogens betyder, at vi nu har udgivet ét hundrede numre – et emne, han behandler nedenfor.

Det første nummer

Den første artikel i Kvant blev skrevet af den daværende formand for Dansk Fysisk Selskab, Bent Elbek, som fortalte den noget bizarre historie om kold fusion, som var det hotte emne i det forgangne år [2]. Den 23. marts 1989 blev der på samme dag afholdt to pressekonferencer, hvor to grupper begge hævdede at have fundet hidtil ukendte kernereaktioner i simple elektrolyseforsøg med tungt vand, hvilket de tolkede som fusionsprocesser ved stuetemperatur. Bent Elbek beskriver levende den opstandelse, der opstod, hvor mange forskere straks kastede sig over det nye emne. Resultaterne blev "øjeblikkeligt kolporteret videre over de nye kommunikationsmidler telefax og bitnet".

Det viste sig dog hurtigt, at det ikke var muligt at reproducere de sensationelle eksperimentelle resultater, og det fik Elbek til at understrege, at der er gode grunde til, at videnskabelige opdagelser først skal offentliggøres i fagtidsskrifter og efter grundig fagfælle vurdering. Elbek mente dog også, at der var en positiv lære af episoden, nemlig at den traditionelle og meget dyre fusionsforskning var blevet styrket, ved at der ikke var fundet en genvej til fusionsenergien.



Figur 1. Forsiden af Kvants første nummer var en sandbunke og skulle illustrere en artikel af Henrik Jeldtoft Jensen fra NORDITA om fraktaler og $1/f$ -støj. Sandbunken er et eksempel på en fraktal struktur.

I dag er kold fusion nærmest blevet en klassiker, når journalister skal finde eksempler på, hvor meget forskere kan tage fejl, men i virkeligheden viste episoden to stærke sider ved naturvidenskaben. Dels at forskerne faktisk er meget åbne overfor nye og kontroversielle ideer, og dels at naturvidenskaben er selvkorrigerende, fordi det er et krav, at eksperimenter skal kunne reproducere, og derfor bliver forkerte teorier, der strider mod eksperimenterne, opgivet igen. I tilfældet med den kolde fusion kan vi se, at teorien allerede var falsificeret på mindre end et år.

I en anden artikel fra Kvants første nummer redegjorde Finn Berg Rasmussen (som på det tågede sort/hvide billede ser ret fuldskægget ud) for en ny international temperaturskala og nye vedtægter for størrelsen af en volt og en ohm, som var trådt i kraft ved årsskiftet [3]. Specielt justeringen af temperaturskalaen var noget kompliceret, og betød fx at en temperatur der året før var blevet målt til 100°C , nu ville være $0,026^{\circ}\text{C}$ lavere, mens temperaturer omkring 800°C skulle forøges med ca. $0,35^{\circ}\text{C}$.

Enheder går heldigvis ikke af mode i naturvidenskaben, og for tre år siden havde Finn (nu i farver, men alligevel i en mere gråskægget udgave), igen en artikel i Kvant om en revision af SI-systemet som var på vej, og som snart ville føre til nye definitioner på kilogram, ampere, kelvin og mol [4]. Senere samme år måtte Finn efter et læserspørgsmål i Kvant også rykke ud med et forsvar for at bevare enheden mol [5].

Kvants første redaktør Jørgen Friis Bak bidrog også til det første nummer med en artikel om lagringen ASTRID, der netop var indviet i Århus og således også kan fejre 25 år [6]. Artiklen forklarer pædagogisk om princippet i en lagring og de planlagte eksperimenter, og at navnet står for Aarhus Storage Ring Denmark. Navnet blev i øvrigt valgt efter en

hurtig konkurrence på instituttet, hvor undertegnede vist var den eneste deltager. Til gengæld havde jeg indsendt flere forslag, og eftertiden må derfor glæde sig over lagerringen ikke kom til at hedde GANDALF (GrundforskningsANlægget DANmarks LagerringsFacilitet) – det var jo ellers ringen over alle lagerringe – eller “Østjyllandsringen” (eftersom navnet “Jyllandsringen” allerede var taget).

Tjernobyl på forsiden

I 1993 overtog Mads Hammerich redaktørjobbet. Som redaktør kommer man let til at se bladet som sit eget barn, og alle redaktører har nok et nummer, de er særligt stolte af. For Mads’ vedkommende er det et temanummer om Tjernobyl 10 år efter reaktorulykken [7]. Det viste sig, at Risø siden midten af 1950’erne har foretaget ugentlige målinger af nogle radioaktive isotoper i luft, mælk og græs på Roskildeegnen, og Heinz Hansen [8] fra Risø skrev om dosisbelastningen efter branden. Tidsserierne er tankevækkende, fordi de viser, at udslippet fra Tjernobyl kun i en kort periode på nogle måneder kom op over det niveau som vi havde været udsat for i årtier pga. kernevåbenafprøvningerne i atmosfæren. Ifølge Mads bruges nummeret stadig i gymnasiekredse, især i forbindelse med studieretningsopgaver.

I 1998 var Mads nået til den konklusion, at han stort set var nået raden rundt, når det gjaldt om at få de fysikere i landet, der kunne skrive gode artikler, til at bidrage, og derfor fik jeg så lov til at overtage redaktørjobbet. Heldigvis tog han fejl med hensyn til, at der ikke var flere tilbage, som kunne skrive noget læseværdigt, men han havde til gengæld ret i en anden forudsigelse, nemlig at det ville vælte ind med uønskede artikler om alskens hjemmestrikkede teorier.

Artikler, der ikke kom i Kvant

Mit første manuskript i den kategori var fra en forfatter, som havde oplevet, at naturen var besjælet, og nu havde hans analyse ført ham frem til den konklusion, at bittesmå sandkorn og vanddråber også måtte have sjæl og dermed, at sjælen findes i hvert enkelt atom. Atomerne var derfor også udstyret med en form for fri vilje, og derfra kunne han forklare kemiske bindinger, ubestemthed i kvantemekanikken, universets endelige skæbne og meget mere. Bestemt en interessant tanke, men desværre noget udenfor Kvants formål.

Senere fulgte flere manuskripter, som ofte vidnede om stor originalitet, men desværre også ofte uden større indsigt i moderne fysik, og som læserne derfor ikke har fået fornøjelse af. De første år begik jeg den fejl, at jeg påpegede problemerne i de tilsendte manuskripter og kom med velmente faglige kommentarer. Det førte altid til en begejstret respons, men det blev også hurtigt klart, at forfatterne i virkeligheden ikke var interesserede i mine kommentarer, men blot ønskede at få deres tanker bekræftet og udgivet. Derfor endte det som regel med, at jeg kun bekræftede dem i, at der vitterlig eksisterer en sammensværgelse blandt fagfysikere, som skal forhindre, at nye ideer kommer frem.

Kært barn har mange fædre

Lige før årtusindskiftet kom Astronomisk Selskab med i udgiverforeningerne, hvorefter undertitlen blev ændret til “Tidsskrift for Fysik og Astronomi”, og til gengæld ophørte bladet “Astronomisk Tidsskrift”. Også dette tidsskrift havde en lang historie, idet det blev grundlagt i 1916 samtidig med stiftelsen af Astronomisk Selskab. Fra 1968 blev det udgivet som et fælles tidsskrift af de astronomiske selskaber i Danmark, Norge og Sverige.

Et par år senere begyndte også Dansk Geofysisk Forening at benytte Kvant som medlemsblad, således at udgiverkredsen både blev meget bredere og ikke mindst bidrog til at sikre

bladets økonomi. Der var dog grænser for vækst, for på et tidspunkt forsøgte vi at fusionere med Niels Bohr Institutets blad “Gamma”, men ideen vandt desværre ikke genklang på instituttet.

Fra 1990 til 2012 havde Astronomisk Selskab desuden bladet “Knudepunktet” som foreningens medlemsblad, men i 2012 besluttede selskabet at samle foreningens udgivelser i Kvant, således at en del af medlemsstoffet nu bringes dels i Kvant og dels på selskabets hjemmeside. Kvant må således betegnes som etært barn med mange fædre.

Redaktørens opgaver

Som redaktør er man ikke bare redaktør, men også layouter, korrekturlæser, økonomiansvarlig, annoncesælger og meget mere. I starten af min redaktørkarriere modtog jeg stadig håndskrevne manuskripter, og overførslen til trykkeriet forgik ved at en medarbejder fra trykkeriet afhentede alle postscriptfiler på en stak floppy-disks samt en kuvert med illustrationer og fotografier, som så blev scannet og sat op af trykkeriet. Der var også kun råd til at have farver på otte af siderne, hvilket efter bedste evne blev skjult for læserne, idet de otte farvesider blev trykt på ét stort ark, og ved kreativ foldning kunne man få farvetryk på forskellige sider. Det betød dog, at jeg til tider og til forfatternes utilfredshed var nødt til at klumpe illustrationer sammen på en enkelt side eller lade teksten få omløb på bagsiden.

En anden udfordring kom, da den generøse portostøtteordning bortfaldt, som ellers havde betydet, at vi kunne sende et blad ud til abonnenterne for få kroner pr. stk. Pludselig steg prisen til det firedobbelte, og med et par tusinde eksemplarer hvert kvartal, blev det til en betragtelig ekstraudgift. For Kvant betød det, at vi i en årrække kæmpede med underskud og en negativ egenkapital. Vi måtte sætte prisen op og bede udgiverforeningerne indskyde ekstra kapital. Alle udgifter blev gået igennem med en tættekam, papirtykkelsen blev trimmet, så vægten lige præcis kom under 100 gram og bladet skiftede trykkeri. I dag er økonomien nu i så god form, at vi sidste år kunne tilbagebetale foreningernes ekstrabidrag. Samtidig er det lykkedes at holde abonnementsprisen i ro – prisen er siden 1990 steget fra 135 kr til 180 kr om året, hvilket kun er det halve af den gennemsnitlige prisstigning i samme periode.

Ansvarshavende redaktører af Kvant

1990-1993 Jørgen Friis Bak

1993-1998 Mads Hammerich

1998-2004 Jens Olaf Pepke Pedersen

2004- Michael Cramer Andersen

Ligesom Mads kan jeg også sige, at flere af mine temanumre stadig bruges i undervisningen, men efter seks år begyndte det at blive svært at kombinere redaktørjobbet med andre opgaver. Heldigvis havde Astronomisk Selskab fra starten været skeptisk overfor, om jeg ville prioritere astronomistof i bladet, og havde derfor ansat Michael Cramer Andersen, der dengang var astronomistuderende med en lang erfaring fra Gamma, som nyhedsredaktør. I 2004 lykkedes det at overtale Michael til at tage redaktørjobbet, uden at han helt var klar over, hvad han gik ind til.

Michaels første nummer var et temanummer om astrobiologi [9], hvor han selv stod for meget af indholdet, bl.a. oversættelse af en lang artikel fra engelsk samt nyheder og boganmeldelser, samtidig med at det var en stor udfordring at lære særhederne ved Kvants layout i Latex og andre mærkelige funktioner. Det blev derfor en overvældende start, og det krævede efterfølgende noget overtalelse, og især en bedre fordeling af opgaverne, at få ham til at blive på posten.

De næste 25 år

Heldigvis har Michael også vist sig særdeles vedholdende som redaktør, og Kvant har i dag udviklet sig til et bedre blad end de foregående redaktører nok har turdet håbe på. De mange hundrede artikler, som er udkommet i bladet, repræsenterer nu et vigtigt bidrag både til beskrivelsen af dansk naturvidenskab og i formidlingen af naturvidenskab generelt, og vi må håbe, at det på et tidspunkt vil lykkes at få digitaliseret de tidligere numre, så de i højere grad kan blive læst og brugt også i dag. I en tid, hvor der er bekymring for at vi i dag taber dannelse og ikke mindst den almene viden, der gør, at man kan navigere i samfundet, er der et stort behov for seriøs formidling af naturvidenskabelig viden.

Der er heldigvis mange opgaver for fremtidens fysikere og astronomer. Som Peter Christiansen skriver i dette nummer af Kvant, har vi stadig problemer med at forstå kvarkgluon plasmaet i det tidlige univers. Her har vi også svært ved at forstå inflationsfasen efter Big Bang, ligesom forskerne heller ikke er enige om Universets fremtidige udvikling. Vi undrer os over forklaringen på kosmiske partikler med energier så høje, at de ikke burde forekomme, vi leder efter det mørke stof i Universet og mørk energi er endnu mere mystisk. Måske finder vi engang den store samlede "Teorien om alting", men indtil da er der med sikkerhed emner nok for Kvant også de næste 25 år.

Da tyve stjal billedet

– I anledning af Kvant nummer femsindstve!

Af Mogens Esrom Larsen

Blandt min barndoms små gåder var skuddagen (24. februar) og tallene, fx "fyrretyve", det halve af "firsindstve", og "halvfemsindstve", men ikke "femsindstve".

De danske talord

Værre bliver det, når man får kendskab til fremmedsprog. Svensk og engelsk har meget simple talord, fx 30: trettio, thirty, 40: fyrtio, forty, 50: femtio, fifty, osv. En del af forklaringen er, at ordet "tyve" på dansk er flertal af "ti". Og stavelsen "sinds" betyder "gange". Derfor er 40 "fyrretyve" simpelthen fire tiere, mens 80 "firsindstve" er fire gange tyve, hvor "tyve" er 20, det mindste flertal af ti.

Og så er der de mystiske halve, "halvtreds", "halvfjerds" og "halvfems". De afspejler en idé, som vi kender fra tidsangivelserne, "halv otte" på dansk er samme tid som "half past seven" på engelsk. Så vi siger halvvejs til den tredie, fjerde og femte (snes).

Tallet 100 har engang heddet "femsindstve", så sent som 1558. Ordet "hundrath" på oldnordisk angav tallet 120. Men kom til at betyde 100 i mange germanske sprog.

Skuddagen

Forklaringen på skuddagen er den samme idé om at trække fra. I oldtidens februar talte man dagene fremad til og med den 23. Derefter sagde man 5. dag før marts. I skudår begyndte man nedtællingen en dag senere, så skuddagen blev dagen mellem den 23. og den –5.

DIFFERENZE LINGUISTICHE

97



$$90 + 7$$



$$7 + 90$$



$$9 \times 10 + 7$$



$$4 \times 20 + 10 + 7$$



$$7 + (-\frac{1}{2} + 5) \times 20$$

Litteratur

- [1] Fysisk Tidsskrift (1902-1989) blev grundlagt af fysikeren Kirstine Meyer som erstatning for "Nyt Tidsskrift for Fysik og Kemi", der kun nåede at udkomme 1896-98, og som igen var efterfølgeren til "Tidsskrift for Fysik og Chemi samt disse Videnskabers Anvendelse", som udkom 1862-94.
- [2] B. Elbek (1990), Hvad hændte med den kolde fusion?, Kvant 1. årg., nr. 1, side 3-4.
- [3] F.B. Rasmussen (1990), Ny volt, ny ohm, ny temperaturskala, Kvant 1. årg., nr. 1, side 14-16.
- [4] F.B. Rasmussen (2011), SI-systemet under revision, Kvant 23. årg., nr. 1, side 3-6.
- [5] F.B. Rasmussen (2011), Om enheden mol i SI-systemet, Kvant 23. årg., nr. 4, side 10.
- [6] J.F. Bak (1990), Lagerringen i Århus, Kvant 1. årg., nr. 1, side 17-19.
- [7] Kvant (1996), 7. årg., nr. 1.
- [8] H. Hansen (1996), Den radioaktive sky fra Tjernobyl – dosis og virkning, Kvant 7. årg., nr. 1, side 21-28.
- [9] Kvant (2004), 15. årg., nr. 3.



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker på DTU Space og Polar DTU, hvor han arbejder med satellitter i Arktis og klimaændringer. Medlem af Kvants redaktion.

At trække fra i talbetegnelserne var meget mere udbredt end denne ene. Latin havde 19 "un-de-viginti", 58 "duo-de-sexaginta". Angelsaxisk har 19 "anes wona twentig" og oldnordisk 29 "nott midr enn thritögr".

De franske talord

I gymnasiet mødte man de franske talord, bl.a. "quatre-vingts" dvs fire tyvere. Helt hjemligt! Selv om kelterne i Gallien menes at have et tyvetalsbaseret talsystem, som ikke længere er kendt, så er det ikke herfra de stammer. Efter Cæsars erobring indførtes et latinsk talsystem med tiere som grundstamme.

Tyvetalssystemet dukker op i Normandiet i det 11. århundrede efter de danske normanneres erobringer. 80 er kun et rudiment. Dengang talte man med 60 "trois-vingt", – også stavet "trois-vint", – 120 "six-vingt", 140 "sept-vingt", 360 "dix-huit-vingt". Nogle af disse tal overlever som morsomme betegnelser. "Les onze-vingts" er navnet på en hær enhed på 220 mand. "Quince-vingts" er navnet på et hospital for blinde med 300 sengepladser, og så er "un quince-vingt" slang for en blind person, mens "entre au quince-vingts" betyder at falde i søvn. Man må formode, at normannerne var flittige købmænd, som dominerede regnskaber med deres foretrukne tal. At vikingerne (sådan) var handelsfolk vises også af deres tals andre erobringer. På vikingernes ø, Sicilien, tælles æg stadig med 40 "du vintini", 50 "du ventini e deci" op til 100 "cincu vintini".

Slutbemærkning

Der er en vis tilfredsstillelse ved at få løst sine gåder, selv om Martin A. Hansen siger, at man også kan nyde dem, som de er (Løgneren).

Litteratur:

Karl Menninger "Zahlwort und Ziffer". Vanderhoeck & Ruprecht, Göttingen 1957-58.

At genskabe middelalderens opfindelser

Af Kåre Johannessen

Teknologi er normalt ikke noget, vi i særlig høj grad forbinder med en fjern fortid. I de fleste menneskers optik er teknologi noget, der i udpræget grad hører den moderne verden til – biler, motorer, elektronik osv. For størstedelen af os er teknologi noget, der kan følges tilbage til den industrielle revolution i England i starten af det 19. århundrede... men så heller ikke længere, som bl.a. arbejde ved Middelaldercentret i Nykøbing F viser.

Indledning

For de, der interesserer sig blot en lille smule for sagen, vil dette selvfølgelig være åbenlyst vās. Selvfølgelig har teknologien rødder, der går meget længere bagud end blot et par sølle århundreder. Ægypterne havde ikke været i stand til at konstruere pyramiderne uden én eller anden form for teknologiske hjælpemidler, og det samme gælder naturligvis det 4.500 år gamle Stonehenge, Akropolis i Athen, og en mængde andre kolossale for- og tidligt-historiske anlæg. Og har man blot den mindste smule indsigt i processerne bag fremstillingen af stenalderens flinteredskaber, må de velkendte økser naturligvis aftvinge én dyb respekt; om teknologi er avanceret eller ej afhænger dybest set ikke kun af, hvor kompleks den er – det afhænger i høj grad også af, hvor kompleks den er i forhold til sin samtid.

Det kræver med andre ord i grunden ikke megen spekulation at nå til erkendelsen af, at også fortiden har haft sine teknologiske landvindinger. Og dét gælder selvsagt også middelalderen.

På Middelaldercentret i Nykøbing Falster har man siden 1992 arbejdet med at formidle højmiddelalderens kulturhistorie og levevis – med særlig fokus på teknologien. Faktisk er centrets fulde navn “Forsøgscenter for Historisk Teknologi”. Dette skyldes især, at institutionen så at sige har sine rødder solidt fæstnet i teknikens verden. Middelaldercentret udsprang nemlig af et projekt, der indgik i fejringen af Nykøbing Falsters 700-års jubilæum i 1989. Ét af de tiltag, der skulle markere og festligholde den store dag, var genskabelsen af én af datidens betydelige teknologiske landvindinger: Det stenkastende krigsapparat bliden!

I 1989 var bliden et stort set ukendt apparat, som kun en lille kreds af fagfolk på verdensplan var blot nogenlunde fortrolige med. Ingen havde forsøgt sig med rekonstruktioner af bliden, siden den tyske major Erwin Schramm i starten af det 20. århundrede på kejserlig ordre rekonstruerede det århundredgamle krigsapparat. Formålet dengang var at undersøge, om bliden kunne have en funktion i moderne krigsførelse (konklusionen på de tyske eksperimenter var, at det kunne den trods alt ikke. Til gengæld udnyttede briterne få år senere en beslægtet teknologi i den såkaldte “West Spring Gun”, der slyngede håndgranater mod fjenden under den Første Verdenskrig).

Gennem tiden har centrets faglige personale stiftet bekendtskab med en lang række eksempler på mid-

delalderlig teknologi. Og i 2013 udmøntede denne akkumulerede viden sig i et nyt, selvstændigt projekt på Middelaldercentret: Åbningen af den Middelalderlige Teknologipark!

Der kan ikke herske tvivl om, at betydningen af de teknologiske landvindinger i den periode, vi i mangel af bedre kalder for middelalderen, har haft vidtrækkende konsekvenser. Periodens rygte som statisk, mørk og primitiv er for længst blevet tilbagevist med talløse eksempler; inden for snart sagt alle områder ses det, at middelalderen ikke lader de omgivende historiske perioder noget efter. Og skønt den klassiske byggestil forsvandt var der jo stadig en arkitektur i Europa. Først den romanske, sidenhen den gotiske – som begge i virkeligheden er fuldt på højde med antikkens, og i slet ikke så få tilfælde ligefrem overgår den; 1200-tallets katedraler er på ingen måde ringere bygningsværker end Parthenon i Athen, eller Colosseum i Rom.

At renaissancens *raison d'être* i egen optik – at man her havde genvundet antikkens storhed efter århundreders intellektuel ørkenvandring – for længst er blevet tilbagevist på næsten alle punkter ændrer imidlertid ikke ved, at der selvfølgelig i mange henseender kan konstateres et distinkt nyt kultursyn med middelalderens afslutning. Vist kan renaissancen fremvise nye elementer, der retfærdiggør at vi definerer den som en selvstændig historisk periode. De store opdagelsesrejser, billedkunsten, den verdslige og religiøse nytænkning og en række andre faktorer er åbenlyst forskellige i middelalderen og renaissancen. Men i grunden er der i de fleste henseender tale om en naturlig udvikling, ikke om et radikalt nybrud med eksisterende paradigmer. Renaisancen er middelalderens ægtefødtte barn, ikke dens besejrer og undertvinger. Der er altså – både før og efter middelalderen – tale om en kontinuerlig udvikling, ikke radikale brud.

Det maskineri, der måtte være til disposition for at opføre domkirken i Köln eller Sainte Chapelle i Paris, var jo mindst lige så avanceret som det, der skulle bruges for at bygge Parthenon, Pergamon, eller for den sags skyld Cheopspyramiden i Ægypten: Den teknisk baserede evne til at fragte og løfte enorme byggesten til imponerende højder (og somme tider over betydelige afstande) med meget stor præcision. Og de matematiske beregningsmodeller og den almene byggetekniske formåen, der gjorde det muligt at opføre gotikkens kolossale katedraler eller fæstningsværker, er hverken

ringere eller enklere end de, der skulle til for at opføre antikkens templer.

I ret vid udstrækning ses det da også, at middelalderens maskineri hviler på skuldrene af – og i nogle tilfælde direkte viderefører – antikkens teknologi.

Opfindsomhedens drivkraft

Hvad lå der så til grund for den teknologiske udvikling i middelalderen? Spørgsmålet kan egentlig besvares i al korthed: Nøjagtig de samme faktorer, som alle dage har drevet udviklingen frem – konkrete behov i kombination med den basale nysgerrighed og opdagetrang, der fra naturens hånd kendetegner mennesket og dets evne til abstrakt tænkning. Sidstnævnte kan vi antage er en fællesmenneskelig faktor, der må formodes at have været til stede gennem hele menneskehedens udvikling. Der har altid eksisteret særligt visionære eller kreative individer, hvis trang til udforskning har ført til resultater, der har bragt hele menneskeheden fremad. Det er ét af de fundamentale, grundliggende brændstoffer i historien. At middelalderen – særligt den senere middelalder, fra midten af 1200-tallet – kan fremvise en perlerække af opfindere og ingeniører, skyldes selvsagt, at det er en periode, hvis udvikling skabte et mentalt klima, hvor der var efterspørgsel på netop den type tankegods.

Med den urbane kulturs udbredelse op gennem middelalderen tager også de store byggerier og anlægsarbejder fart efter at have været gået næsten i stå i middelalderens første århundreder i kølvandet på det romerske imperiums sammenbrud i 400- og 500-tallet. Vi ser de store katedralbyggerier, mange europæiske byer forsynes med enorme forsvarsmure, og på et lidt mere beskedent plan begynder udbredelsen af sten- og teglbyggerier at intensiveres, også blandt købmænd og andre ikke-adelige. I takt med at de byggetekniske erfaringer akkumuleres, bliver middelalderens bygmestre også i stand til at gennemføre langt mere ambitiøse projekter. Milepæle som genopdagelsen af teglbrændingskunsten, tønde- og kuppelhvælv osv. flytter inden for relativt kort tid grænserne for det mulige, og åbner op for en massiv opblomstring af den byggefaglige kunsten. Med denne "middelalderens tidlige renaissance" skabtes altså et behov for teknologi, der naturligvis blev besvaret – som et sådant behov historisk set næsten altid gør.

Men der er også andre faktorer på spil. Middelalderen opfattes populært som stærkt præget af krig. I praksis var perioden reelt ikke mærkbart mere krigerisk end antikken eller renaissance, men det er naturligvis sandt, at evnen til at angribe og forsvare i allerhøjeste grad var i fokus. Krigsherrers, fyrsters og regenters interesse i våbentechnologi har alle dage været massiv, og middelalderen er ingen undtagelse. Selv i dag udspringer mange teknologiske nyskabelser af et i sin oprindelse militært behov. Grundprincipperne for vor tids civile transportsektors jet-teknologi blev udviklet under den 2. Verdenskrig, og det moderne køkkenudstyrs teflonbelægning er fx oprindeligt opfundet til brug

i rumfarten – der har sine rødder i Werner von Brauns arbejde med V1 og V2-raketterne til bombningerne af London i 1943-44.

Militærteknologi prioriteres idag højt, fordi det vedrører essentielle sikkerhedsspørgsmål (hvilket det også gjorde i middelalderen), og derfor er de økonomiske midler, der stilles til rådighed for forskning med militært udnyttelsespotentiale, i almindelighed betydeligt rigere end midlerne til den mere civile forskning.

Kilderne – manuskripter og skitser

Det er et fåtal af middelalderens opfindelser, der blot er overleveret som løse skitser. Langt størstedelen findes inkluderet i større samlinger, eller endog i egentlige, samlede bogværker. En del af disse er de såkaldte "krigsbøger", hvori de forskellige opfindere præsenterer et blomstrende vildnis af indfald. Disse bøger tolkes oftest som en art kataloger brugt af ophavsmændene til at illustrere deres individuelle kunnen overfor potentielle arbejdsgivere – konger og fyrster. Ganske som i dag har det selvfølgelig ofte været en bekostelig affære rent faktisk at konstruere disse maskiner (som i øvrigt ville have været temmelig vanskelige at fragte rundt mellem de europæiske hoffer), hvorfor man i stedet har udfærdiget "præsentationsmapper"; hvis kunden lod sig begejstre tilstrækkeligt til at ansætte ophavsmanden kunne maskinerne jo altid udføres i praksis på grundlag af tegningerne.

Middelalderens ingeniører søger ofte at håndhæve en slags "copyright" ved at indbygge bevidste fejl i deres skitser; kun den, der i forvejen kender til fejlen, kan omsætte tegningen til praksis. Adskillige moderne rekonstruktionsprojekter har demonstreret disse forsøg på hemmeligholdelse i praksis. Flere uafhængige nutidige versioner af Leonardo da Vincis berømte tallerkenformede "kampvogn" har alle ført til samme resultat: Når maskinen konstrueres trofast efter skitserne, er resultatet uafvendeligt det samme – en konstruktion, der kun kan køre rundt i en snæver cirkelform, fordi hjulsættene modarbejder hinanden. Når blot et enkelt tandhjul monteres modsat i forhold til skitsen afhjælpes dette imidlertid, og maskinen bevæger sig frit og ubesværet fremad!

Et andet af Leonardos særkender, hans tilbøjelighed til at skrive spejlvendt, kan formentlig også tolkes som et forsøg på at sløre teksten.

Begrebsapparatet – fagets redskaber

Tolkningen af mange af disse plantegninger kan volde besvær. Ibland kræves der en betydelig mængde overvejelser for at klarlægge, hvordan en given konstruktion i grunden skal forstås (hvilket selvfølgelig yderligere vanskeliggøres af de bevidst indlagte fejl).

Der kan være flere årsager til dette: Dels er opfindernes evner som illustratører stærkt svingende, og dels mangler man redskaber til beskrivelsen af maskineri, der i dag tages for givet. Middelalderen har ikke nogen fast vedtaget terminologi, hverken sprogligt eller visuelt, til beskrivelse af teknik. I vor tid er de fagspecifikke

konventioner omkring teknologi fastlagte og velkendte; i dag ved vi, hvordan man beskriver en maskine. Det gjorde man ikke i middelalderen, hvor enhver så at sige var henvist til selv at udvikle sit eget bud på sprog og grafiske virkemidler, for at overføre en konstruktion fra tanke til papir.

Lidt forenklet kan man sige, at hvor en moderne ingeniør som noget helt naturligt ville illustrere en maskines enkeltdele og deres indbyrdes interaktion systematisk, da pladrer de middelalderlige opfindere ofte alle lag eller aspekter af maskinen ned oven i hinanden i én stor, forvirrende pærevælling – hvor alle detaljer præsenteres samtidig og sideordnet. Et eksempel er Konrad Kyesers krigsvogn, der synes at være tegnet direkte ovenfra, med alle lag oven i hinanden, så resultatet er et uoverskueligt virvar af kanonrør, hjul og lansespids m.v. der stritter i alle retninger, gengivet fladt oveni i den bærende tømmerkonstruktion. Det giver sig selv, at dette stiller betydelige krav til den, der ønsker at forstå mekanikken!

Men det gør jo på ingen måde opfindernes teknologiske bedrifter ringere. At tegningerne iblandt er forvirrende gør jo ikke slutproduktet mindre effektivt. Tvært imod må det aftvinge en moderne beskuer betydelig respekt for de gamle ingeniører; ikke blot var de i stand til at udtænke meget raffinerede konstruktioner – de var også i stand til at gøre det uden det fælles “sprog”, der i dag er så altafgørende for teknologisk kommunikation!

Faggrænser...

Én af de ting, der først slår et moderne menneske, der studerer middelalderens opfindere, er deres enorme spændvidde. I vor tid er der trukket meget skarpe og ofte uoverstigelige grænser mellem de enkelte, involverede fagområder; opfinderen opfinder, tegneren tegner, grafikerer præsenterer, håndværkeren udfører – og så videre. Men også dette er et fænomen, der er af nyere dato end middelalderen.

På de fleste punkter var middelalderens professioner faktisk mindst lige så skarpt afgrænset indbyrdes som idag. På det daglige plan, blandt byernes håndværkere, var skillelinien mellem de forskellige fag ekstremt vigtig og nidkært vogtet. Udøverne af et givent fag var, i hvert fald i de større byer, organiseret i et laug eller gilde, der havde en lang række funktioner – men den suverænt vigtigste var at sikre, at ingen udefrakommende sneg sig ind på deres fagområde. I de fra 1400- og 1500-tallet bevarede danske gildeskråer – altså formelle regelsamlinger – ses meget ofte betydelige bøder og hårde straffe for at lære fagets teknikker til udenforstående.

Men netop blandt middelalderens opfindere synes disse rigide faggrænser at være fuldkomment fraværende. En middelalderlig opfinder fungerede på skift og efter behov som produktudvikler, designer, tekstforfatter og kunstner – samt hvad der iøvrigt måtte være behov for. Igen kan der henvises til Leonardo, der jo fungerede som anatom, naturhistoriker, kunstner, ingeniør, våbendesigner og alt muligt andet, alt efter hvad der tilfældigvis fanger hans interesse. Det samme

gør sig gældende for en lang række af hans kolleger. Ofte ser man (tilmed i de samme manuskripter) skitser, der relaterer til arkitektur, krigsmaskineri, naturstudier eller andet, tilsyneladende fuldkomment tilfældigt organiseret. Det eneste, der binder disse manuskripter sammen, er så vidt vi kan se, at de enkelte elementer på én eller anden måde er “nyttige” eller “interessante” – eller med andre ord: Den fælles faktor lader til alene at være ophavsmandens interesse!

Det er bemærkelsesværdigt, at opfinderne fungerede på vilkår, der ikke blot var anderledes, men decideret i modstrid med det omgivende samfunds. Men i virkeligheden er det jo dybest set ikke spor overraskende. Disse mennesker var unikke, de var enere, hvis hele eksistensgrundlag jo netop var deres særegenheder. Når de skulle finde afsætning for deres ydelser, skulle de jo lige netop ikke sælge et afgrænset og klart defineret fag i traditionel forstand, men den samlede sum af deres særlige, individuelle kundskaber og evner.

Af samme grund findes der da heller ingen gennemgående stillingsbetegnelse for disse mænd. Leonardo søgte ikke ansættelse som opfinder, kunstner, naturhistoriker, musiker, våbenmager eller noget andet specifikt; Han søgte i virkeligheden slet og ret ansættelse som... Leonardo!

Dette skyldes, at middelalderen i visse henseender anskuede verden på en helt anden – og væsentlig mindre organiseret – måde, end vi gør i vor tid. Man kan vælge at se det som et udtryk for manglende systematik og organisation eller det rene og skære roderi... men man kan i virkeligheden lige så vel betragte det som sprudlende, frit og engageret.

Fri forskning

Lige som i dag var der i middelalderen selvfølgelig et samspil mellem efterspørgsel og praktisk anvendelse. Størsteparten af de opfindelser, vi har overleveret, er umiddelbart anvendelige. Det gælder selvfølgelig alle de krigsteknologiske maskiner, men i lige så høj grad fx vandpumpe- og løfteanordninger, hvis positive effekt fx har muliggjort både kunstvanding og lænsning af skibe, og – hvad der historisk set har vist sig nok så væsentligt – modvirkning af indsvivende vand i mineskakter.

Men sideløbende hermed ses dog også en gren af den teknologiske udvikling, der forekommer ganske uafhængig af konkrete behov. Opfindelser, der ikke synes at tjene noget fornuftigt formål, men blot er blevet til, fordi nogen har fundet det interessant. Det er disse projekter, der er middelalderens virkeligt frie forskning. Og der ligger måske en lektie til nutiden i, at ikke så helt få af disse konstruktioner på længere sigt fik stor betydning, selv om de ikke i samtiden havde nogen særlig værdi.

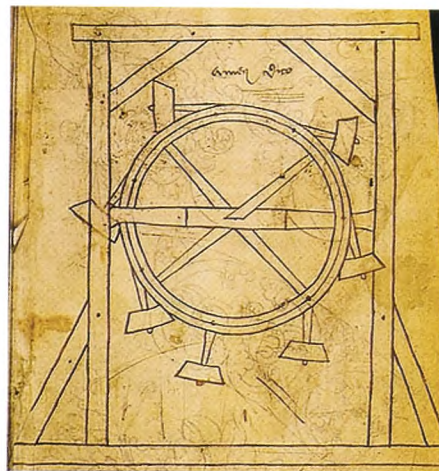
Konrad Kyeser og flere andre udviklede således tidlige dykkerdragter og -klokker (se figur 1), hvis funktionsdygtighed i de fleste tilfælde er mere end tvivlsom, og Leonardos berømte flyvende apparater (se figur 2) har selvfølgelig ikke en chance for at løfte sig fra Jorden. Alligevel har de i høj grad en videnskabelig

værdi. De er nemlig væsentlige stadier i den udvikling, der i sidste ende kulminerede med de fuldt fungerende redskaber, vi i dag har til rådighed.



Figur 1. Italieneren Mariano di Jacopo, kaldet Taccola (1382-1453), var én blandt flere middelalderlige opfindere, der designede en fungerende dykkerdragt. Hans skitse illustrerer tidens forsøg på at sikre ophavsretten ved at udelade en væsentlig detalje - her blæsebælgene, som ses på billede 2, der viser en rekonstruktion af den middelalderlige dykkerdragt på Middelaldercentret i Nykøbing F. Uden bælgene ville dykkeren indånde sin egen udåndingsluft, hvilket ville betyde døden efter kort tid.

Man bør altså være overordentlig forsigtig med at undervurdere den frie, ikke-målttede forskning. Også i middelalderen blev der gjort overvejelser, der i sig selv ingen umiddelbar praktisk anvendelse havde. Der blev gjort opfindelser, der slet og ret blev gjort, fordi de var interessante. Et eksempel er således de udkast og skitser til såkaldte "evighedsmaskiner", som periodens manuskripter kan fremvise.



Figur 2. Villard de Honnecourts evighedsmaskine bygger på den fundamentalt fejlagtige antagelse, at en faldende hammer kan generere tilstrækkelig kraft til at løfte en identisk hammer. Pudsigt nok gengives den efterfølgende i manuskripter gennem flere hundrede år, uden at nogen gennemskuer dens ubrugelighed.

Villard de Honnecourts vægt-drevne bud på en evighedsmaskine fra begyndelsen af det 13. århundrede (se figur 2) ligner med moderne øjne et, ganske vist naivt, forsøg på at løse en energimæssig udfordring. Kunne man fremstille en fungerende evighedsmaskine, ville man i princippet have løst verdens energiproblem; reelt er en sådan maskine naturligvis en fysisk umulighed, der ikke kan levere tilstrækkelig energi til at holde sig selv igang, endsi en overskudsproduktion. Men på netop dette punkt adskiller 1200-tallet sig markant fra vor tid. Der var ikke nogen energikrise som vi kender det idag, ikke noget desperat behov for alternative energikilder. Honnecourt udviklede ikke sin maskine for at spare energi. Han udviklede den med temmelig stor sikkerhed alene af én grund: Fordi det var interessant. Fordi selve tanken fascinerede ham.

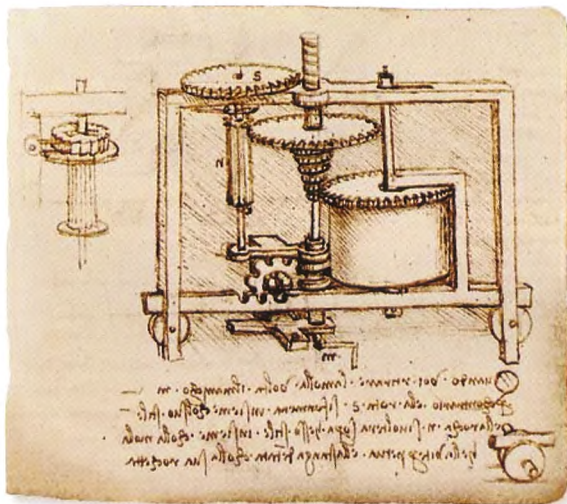


Figur 3. Der er i nyere tid gjort en del forsøg på at rekonstruere flere af Leonardos maskiner – en del af dem med betydelig succes. Det er dog aldrig lykkedes nogen at få hans forskellige bud på flyvende maskiner til at lette fra jorden!

Det samme gælder formentlig Leonardo velkendte heli- og ornithopter. Begge disse maskiner er tilsyneladende ikke designet med noget andet formål end det helt indlysende: At flyve. Leonardo, der som bekendt ellers kunne være krigerisk nok, har aldeles undladt at forsyne disse skitser med bevæbning.



Figur 4. Venezianeren Giovanni Fontana (1395-1455) var bl.a. skaberen af denne muskeltrukne køre-maskine. Det er påfaldende, i hvor høj grad køretøjets udformning minder om børnetegninger af biler. Bemærk, at Fontana selv tilsyneladende er i tvivl om mekanismens finere detaljer, idet træktovet er gengivet ført begge veje rundt om top-akselen på samme tid. Det er iøvrigt en pudsig detalje, at chaufføren på verdens første bil er en kvinde. Maskinen er i princippet operationel, men næppe særlig praktisk: den kan ikke dreje, og kræver betydelig mere energi end blot at spadserere(!)



Figur 5. Leonardo da Vincis illustration af et gear – i princippet identisk med dét, vi finder i vor tids biler.

Giovanni Fontanas tovværks-drevne køretøj fra 1. halvdel af det 15. århundrede, "verdens første bil" (se figur 4), er i grunden også alt andet end praktisk. Energibehovet til fremdrift er langt større end blot at gå, den kan ikke styres, og er i alle måder blot en meget, meget besværlig måde at bevæge sig fremad på. Det er selvfølgelig at tage munden for fuld ligefrem at hævde, at uden Fontana, ingen Henry Ford. Men

Fontana er en del af dét samlede kulturelle tankegods, der et halvt årtusinde senere skabte en Henry Ford, ligesom brødrene Wrights flyvning i 1903 naturligvis var kulminationen på en århundredelang tankeproces, hvori Leonardos maskiner har en helt naturlig plads.

I virkeligheden er der noget søgende, næsten legende, over opfindelser som disse. Noget praktisk formål med dem er ikke umiddelbart til at få øje på – men de vidner om en nysgerrighed, en trang til at undersøge, eksperimentere og prøve kræfter med omverdenen. I grunden kan man sige, at sideløbende med tidens trang til at udforske og kortlægge den geografiske verden i al dens mangfoldighed, forsøger man også at udforske og kortlægge de teknologiske muligheder. Og ganske som opdagelsesrejsende af og til vender hjem uden at have opdaget noget som helst, så ender opfindere også iblandt med at opfinde komplet ubrugelige ting – de "nødvendige svinkeærinder"!

Man kan i mange henseender se på middelalderens opfindere og deres til tider nyttige og rent ud geniale, til andre tider fuldkomment håbløst naive og åbenlyst umulige produkter som helt essentielle, afgørende stadier i en udvikling, der i sidste ende (foreløbig!) kulminerer med vor egen hyperteknologiske verden. Men måske er den vigtigste, enkeltstående lektie til nutiden netop dén, at fri og ubunden forskning – den legende, kaotiske og sprudlende undersøgelse af naturens muligheder, uafhængigt af kommercielle potentialer – er et nødvendigt element, uden hvilket udviklingen på længere sigt simpelthen ville stagnere. Havde ingeniørstanden for 6-800 år siden ikke kastet sig over projekter, hvis umiddelbare nytteværdi heller ikke dengang kan have været let at forsvare, ville vi i dag have stået væsentligt ringere end vi faktisk gør!

Litteratur

- [1] G.E.R. Lloyd (1970), *Early Greek Science: Thales to Aristotele*. Norton & Co.
- [2] A.M. Alioto (1987), *A History of Western Science*. Prentice Hall.
- [3] B.S. Hall (1978), *Notes Towards a Typology of Medieval Technological Writings*, i *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- [4] J.K. Christensen (2013), *Ingeniør og Arkitekt anno 1400-2000*, i *Middelaldercentrets Nyhedsblad*.
- [5] J. Gimpel (1992), *Medieval Machine – The Industrial Revolution of the Middle Ages*. Pimlico.



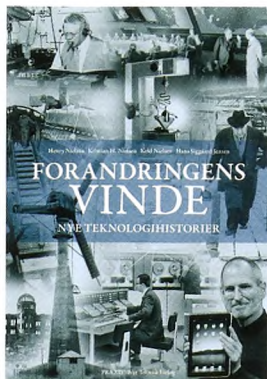
Kåre Johannessen, f. 1964, er historiker, og var gennem 15 år inspektør på Middelaldercentret i Nykøbing F. Han ernærer sig i dag som foredragsholder, forfatter og tv-vært. Hans faglige interesser omfatter vikingetid, middelalder og den 1. Verdenskrig.

Aktuelle bøger

Af Michael Cramer Andersen

Teknologihistorie

Henry Nielsen, Kristian H. Nielsen, Keld Nielsen og Hans Siggaard Jensen, "Forandringens vinde – nye teknologihistorier". PRAXIS – Nyt Teknisk Forlag, 375 sider, 329 kr., www.praxis.dk.



Det er fire erfarne videnskabshistorikere, der står bag dette værk. Bogen beskriver, i 9 spændende og lærerige historier, mange af de faktorer, der former teknologien og konsekvenserne for samfundet. Bogen udløber bl.a. af bestselleren "Skruen uden ende", skrevet af tre af forfatterne.

Første del handler om *energiteknologi*. Først om den globale udvikling indenfor atomenergi, der bl.a. nævner Fukushima-ulykken og klimaproblematikken. I de næste to kapitler besvares spørgsmålet om, hvorfor Danmark aldrig fik atomkraft, men til gengæld blev verdens førende vindmølleland, bl.a. pga. opfinderen og læreren Poul la Cour, der byggede den første mølle i 1891 og fra 1903 efteruddannede elektrikere, som installerede vindelekticitetsværker på landet.

Anden del handler om *kommunikations- og informationsteknologi*. Den internationale udvikling af radioen, fra trådløs telegrafi, krævede udover ny teknologi (radiomodtageren) i lige så høj grad nogle "lyttere", hvor de første var radioamatørerne. Med udgangspunkt i Apples iPad fra 2010 fortælles om Leibniz' drøm om fri adgang til al viden og den lange udvikling af teknologier, som har virkeliggjort drømmen. To andre kapitler fortæller om tilblivelsen af den personlige computer, og hvordan it blev en central del af vores liv.

Tredje del handler om *militærteknologi*. Her berettes om, hvordan militærets enorme ressourcer muliggjorde nogle af de tidligste computerprojekter, herunder det netværk, som blev til internettet. I det sidste kapitel fortælles om forskningsstationen "Camp Century" – en lille by, drevet af et atomkraftværk, bygget 10 m under den grønlandske indlandsis, af den amerikanske hær omkring 1960. Basen skulle demonstrere, at USA kunne forsvare sig under den kolde krig, men den blev afviklet i 1963.

Det er nogle meget lærerige og spændende historier, der fortælles i denne bog og de er veldokumenterede. Bogen anbefales til alle med interesse i teknologi- og videnskabshistorie og måske kan den være med til at vække interessen hos endnu flere. Den kan desuden inspirere til projekter i gymnasiet.

MCA

Vilde ideer fra forskningsfronten

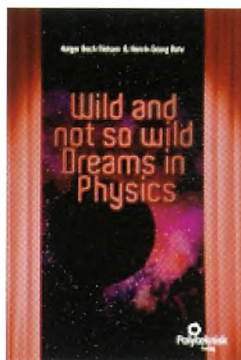
Holger Bech Nielsen og Henrik Georg Bohr, "Wild and not so wild Dreams in Physics" (engelsk). Polyteknisk Forlag, 254 sider, 349 kr., www.polyteknisk.dk.

Forfatterne, der stammer fra hhv. Niels Bohr Institutet og DTU, fortæller om 'vilde ideer' indenfor partikelfysik, kosmologi og biofysik.

Blandt de emner der diskuteres, er de nye fantastiske eksperimentelle anvendelser af kvantemekanikken, fx langsomt lys og teleportation. Proteinfoldning beskrives vha. differentialgeometri. Fænomenet "ormehuller" bliver brugt som analogi indenfor levende cellers kommunikation. Aage Bohr og Ole Ulfbecks teori om, at *symmetrier* er de fundamentale størrelser diskuteres, og tyngdekraften (gravitonen) søges forklaret, som en effekt af den stærke kernekraft.

Hvis man kan læse teknisk engelsk og vil have et indblik i alternative ideer, er der meget inspiration at hente. Man mærker også forfatternes smittende nysgerrighed og undren over livets fantastiske kompleksitet, som resultat af fundamental fysik. Bogen har haft en meget lang tilblivelsesproces og har derfor nogle skønhedspletter.

MCA



Astronomilærebog i ny udgave

Helle og Henrik Stub, "Det levende univers, 2. udgave". PRAXIS – Nyt Teknisk Forlag, 288 sider, 350 kr., www.praxis.dk.

Det levende univers er en grundbog til faget astronomi i gymnasiet, og behandler de fysiske love bag planeter, stjerners liv og død, galakser og kosmologi samt astronomernes værktøj. Fremstillingen er overvejende beskrivende (teoretisk) og historisk, og lægger desværre ikke op til en mere praktisk orienteret undervisning med fx observationer. Bogen er opdateret på områder, hvor der er sket nyt, særligt indenfor exoplaneter og kosmologi. I et nyt kapitel om "Universets store historie" knyttes menneskets og livets udvikling sammen med Universets udvikling. Som teoribog er bogen god, men der savnes projektforslag.

MCA

Bræt imod væg og selvinduktion i koaksialkabel – breddeopgave 63 og 64 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

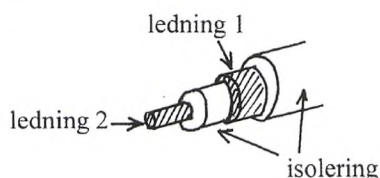
Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere.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

Her bringes løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver (nr. 63 og 64 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 63 og 64. Bræt imod væg og selvinduktion i koaksialkabel.

Ved hvilken hældning skrider et bræt, der er stillet skråt op af en forholdsvis glat væg? Begrund svaret.

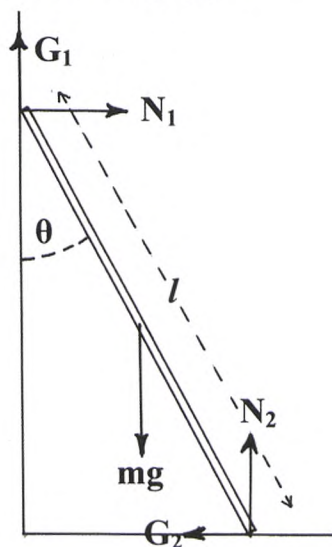
I et elektrisk kredsløb indgår et stykke koaksialkabel (jf. figuren), hvor strømmene i dets to ledninger er lige store og modsat rettede.



Hvor meget bidrager kablet til kredsløbets selvinduktionskoefficient (induktans)?

Løsninger

63. På skitsen af brættet skråtstillet mod væggen er indtegnet normalreaktionerne N_1 og N_2 på brættet fra henholdsvis væggen og gulvet og de statiske gnidningskræfter G_1 og G_2 , ligeledes fra henholdsvis væg og gulv.



Figur 1. Bræt skråtstillet imod væg.

Brættets længde kaldes l og det antages at have en ligelig massefordeling med tyngdepunkt i midten. Brættets masse

kaldes m , så tyngdekraften på det er mg . Brættets vinkel med lodret kaldes Θ .

I opgaven antages G_1 tilnærmelsesvis lig nul. Så længe brættet ikke skrider, gælder da for summen af de vandrette kræfter:

$$N_1 - G_2 = 0, \quad (1)$$

for summen af de lodrette kræfter:

$$N_2 - mg = 0, \quad (2)$$

og for summen af kraftmomenterne om tyngdepunktet:

$$N_1 \frac{l}{2} \cos \Theta + G_2 \frac{l}{2} \cos \Theta - N_2 \frac{l}{2} \sin \Theta = 0. \quad (3)$$

De tre ligninger fastlægger entydigt N_1 , N_2 og G_2 som funktioner af Θ og mg til at være:

$$N_2 = mg; N_1 = \frac{mg}{2} \tan \Theta; G_2 = \frac{mg}{2} \tan \Theta. \quad (4)$$

Gnidningskraften G_2 kan ikke blive større end $\mu_2 N_2$, hvor μ_2 er den statiske gnidningskoefficient imellem bræt og gulv. Dette indtræffer, når

$$\tan \Theta = 2\mu_2, \quad (5)$$

og så skrider brættet.

64. Opbygningen af en strøm I i et elektrisk kredsløb med selvinduktionskoefficienten L kræver arbejdet $\frac{1}{2} LI^2$. Opgaven kan besvares ved at identificere dette med energiindholdet af det magnetiske felt i koaksialkablet. Energitætheden af et magnetfelt er $\frac{1}{2\mu_0} B^2$, hvor B er styrken af magnetfeltet og μ_0 er permeabilitetskonstanten i vakuum. Ifølge Amperes lov er B i mellemrummet imellem koaksialkablets to ledninger givet ved:

$$2\pi r B(r) = \mu_0 I \quad (6)$$

i afstanden r fra kablets midte. Den samlede opmagasinerede energi E i mellemrummet i et koaksialkabel med længden l er derfor:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2\mu_0} \int_{r_1}^{r_2} B(r)^2 l 2\pi r dr \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} l I^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} l I^2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

hvor r_1 er radius af den indre ledning, og r_2 er den indre radius af den ydre ledning. Uden for den ydre ledning er magnetfeltet nul, fordi den samlede strøm igennem en flade med rand uden om den ydre ledning er nul. Der er også magnetfelter og opmagasineret energi i de to ledninger.

Hvis tykkelsen af dem er lille i forhold til mellemrummets tykkelse kan vi se bort herfra. Ved at sammenholde ligning (7) med, at den opmagasinerede energi er lig med det arbejde, det har krævet at opmagasinere den, $E = \frac{1}{2}LI^2$, fås i denne grænse:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (8)$$

som svar på opgaven.

Kommentar

Skridningen af det hældende bræt imod en glat væg er et hyppigt valgt eksempel på en statisk beregning i introducerende fysiklærebøger på universitetsniveau. Men hvad nu, hvis væggen ikke er glat? Hvorfor forekommer dette eksempel ikke i lærebøgerne?

Hvis $G_1 \neq 0$ skal ligningssystemet (1), (2) og (3) ændres til:

$$N_1 - G_2 = 0, \quad (9)$$

$$G_1 + N_2 - mg = 0, \quad (10)$$

og

$$G_1 \frac{l}{2} \sin \Theta + N_1 \frac{l}{2} \cos \Theta + G_2 \frac{l}{2} \cos \Theta - N_2 \frac{l}{2} \sin \Theta = 0. \quad (11)$$

Vi har da stadig kun tre ligninger til at bestemme de nu fire ubekendte N_1 , N_2 , G_1 og G_2 som funktioner af Θ og mg i den statiske situation. Det lader sig jo ikke gøre entydigt. Der er mange forskellige måder, kræfterne N_1 , N_2 , G_1 og G_2 kan kombineres på, som opfylder ligningerne (9), (10) og (11). Når et bræt står lænet op af en væg, kan man altså ikke alene ud fra iagttagelse af det beregne kræfterne imellem bræt og væg og bræt og gulv, medmindre væggen antages glat. Det er nok derfor eksemplet ikke forekommer i lærebøgerne, selvom ru vægge forekommer hyppigere end glatte vægge i praksis. Det er ligesom i Storm P-tegningen af manden, der leder efter sin gadedørsnøgle under gadelygten, selvom han tabte den i mørket, fordi det kun er under lygten, der er lys til at finde noget. Måske er det sådan, at vi i fysik løser de problemer, fysik kan kaste lys på, og lader resten ligge.

Er hældningen, hvor brættet skrider, også ubestemt, når væggen er ru? Nej, brættet skrider ved en bestemt hældningsvinkel. Der er to grænser for de statiske gnidningskræfter, $G_1 \leq \mu_1 N_1$ og $G_2 \leq \mu_2 N_2$, hvor μ_1 er den statiske gnidningskoefficient imellem bræt og væg. Så længe disse to uligheder kan opfyldes, står brættet fast. Hvis grænsen for den ene af ulighederne nås, fx $G_1 = \mu_1 N_1$, fastlægger denne ligning, sammen med ligningerne (9), (10) og (11), entydigt N_1 , N_2 , G_1 og G_2 som funktioner af Θ og mg . Skrider brættet da? Nej, der er stadig en krog i det. Det skrider først, når det løfter sig af begge kroge: $G_1 = \mu_1 N_1$ og $G_2 = \mu_2 N_2$. Skridningen er derfor fastlagt ved disse to ligninger sammen med ligningerne (9), (10) og (11). Skridningen finder sted ved den vinkel, der kan findes ved løsning af de fem ligninger med de fem ubekendte N_1 , N_2 , G_1 , G_2 og $\tan \Theta$. For skridningsvinklen findes herved:

$$\tan \Theta = \frac{2\mu_2}{1 - \mu_1\mu_2} \quad (12)$$

Resultatet ses at stemme overens med ligning (5) for $\mu_1 = 0$. Resultatet er eftervist eksperimentelt (se J. Bennett and A. Mauney, "The Static Ladder Problem with Two Sources of Friction", *THE PHYSICS TEACHER* **49**, 567-569 (2011)).

Også koaksialkabelopgaven er et eksempel på, at fysik, mere end så mange andre fag, er et fag efter devisen: Svar haves, spørgsmål søges.

Spørgsmålet i koaksialkabelopgaven er velvalgt i forhold til svaret, at energien i det opbyggede magnetfelt ved selvinduktion kan identificeres med $\frac{1}{2}LI^2$. Men hvad hvis der blev spurgt om selvinduktionsbidraget fra en almindelig ledning? Så kommer vi umiddelbart i vanskeligheder. Regningerne tilsvarende løsningen af koaksialkabelopgaven fører til ligning (8) med $r_2 = \infty$, dvs. en uendelig selvinduktionskoefficient. I dette mere almindelige tilfælde er vi ved brugen af Amperes lov derfor nødt til at tage højde for, at strømmen i ledningen forudsætter et kredsløb, og at strømmen igennem et plan vinkelret på netop et kredsløb løber begge veje igennem planet. Magnetfelterne fra de to gennemløb ophæver da tilnærmelsesvis hinanden i afstande fra kredsløbet, der er store i forhold til kredsløbets udstrækning d . En tilnærmelse til kredsløbets selvinduktionskoefficient er så ligning (8) med d indsat i stedet for r_2 .

Både i tilfældet brættet imod den glatte væg og i tilfældet selvinduktionskoefficientsbidraget fra koaksialkablet er der spurgt til specialtilfælde, som teknisk set ikke er repræsentative, men som til gengæld lader sig belyse med de umiddelbart tilgængelige fysiklamper. Sådan er det ofte i fysikundervisning, fordi den mere orienterer sig imod læring af tankegange end imod tilegnelse af fænomensviden. Ifølge den fysikuddannede videnskabsteoretiker Thomas Kuhn er det også typisk sådan i fysikforskning. I efterskriftet fra 1969 til hans meget refererede bog "Videnskabens Revolutioner" karakteriserer han fag ved deres såkaldte "faglige matrix" (i første omgang brugte han begrebet "paradigme" til også at karakterisere fag). En afgørende ingrediens i et fags matrix er en række "eksemplarer", konkrete problemløsninger, som fagets udøvere via deres uddannelse er fælles om, og som kan tjene som forbilleder på en større klasse af problemstillinger. Eksemplarerne er svarene, hvis anvendelighed i forhold til en udvidet klasse spørgsmål undersøges.

Fysikere behøver ikke at være fløve over at praktisere og uddanne studerende til devisen: Svar haves, spørgsmål søges. Det er karakteristisk for teoretisk orienteret normalvidenskab. Hvorimod praktisk orienteret videnskab opererer efter den nemmere forståelige devise: Spørgsmål haves, svar søges. Derfor er praktisk orienteret videnskab mere end anvendt teoretisk videnskab. Og derfor kan fx ingeniørvidenskab ikke reduceres til anvendt fysik.

Breddeopgave 65. Temperaturbølger

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen september 1987, nr. 65 i rækken her i KVANT):

Temperaturændringerne på Jordens overflade i løbet af døgnet, i løbet af året og fra istid til istid afspejler sig hver for sig i dæmpede temperaturbølger ned gennem undergrunden. Hvordan afhænger bølgelængden af svingningstiden og undergrundens egenskaber? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

Kvark-Gluon Plasmaet – den perfekte væske vi ikke kan forstå

Af Peter Christiansen, Lunds Universitet

Ved Large Hadron Collider på CERN er en måned om året afsat til et tungionsprogram, hvor man kolliderer store atomkerner. Målet for dette program er, at studere *kvark-gluon plasma* (forkortet “QGP” efter “Quark Gluon Plasma”), en makroskopisk ny tilstand for kvarker med stærke kollektive egenskaber. I det tidlige univers, få mikrosekunder efter Big Bang, indtraf en faseovergang, hvor kvarkerne gik fra at udgøre et QGP til at blive indespærret i protoner og neutroner². Det er denne oprindelige QGP-fase vi genskaber i laboratoriet og som har vist sig at have mange overraskende egenskaber, bl.a. at den opfører sig som den mest perfekte væske vi kender til.

For at forstå kvark-gluon plasmaet, må vi starte med at beskrive den stærke kernekraft, som er én af de fire fundamentale kræfter. Hvor den velkendte elektromagnetiske (EM) kraft kobler til elektrisk ladning og formidles af fotoner, så kobler den stærke kraft til farveladning og medieres af gluoner. Der er tre forskellige typer farveladning (rød, grøn og blå), og det er kun kvarkerne og gluonerne, som bærer farveladning dvs. disse er de eneste partikler, som kan vekselvirke stærkt. En proton består af to up (op) og en down (ned) kvark med hver af de tre farveladninger, så protonen i sig selv er farve-neutral. Protonen er bundet sammen ved at kvarkerne udveksler gluoner (“glue” betyder lim på engelsk). Anti-kvarker bærer anti-farve: anti-rød, anti-grøn eller anti-blå. Vi har aldrig observeret farveladede partikler direkte, så man siger, at kvarkerne (farveladninger generelt) er “confined” (indespærret) i farve-neutrale *hadroner*. Der findes to typer hadroner: *Baryoner*, som består af tre kvarker (fx protonen) eller anti-kvarker (fx anti-protonen) og *mesoner*, som består af en kvark (farve) og en anti-kvark (med modsvarende anti-farve) som fx π -mesonen, der er den letteste hadron, ca. 7 gange lettere end protonen³, og derfor er den partikel, der produceres flest af i hadronkollisioner.

I mikroskopiske teorier for kræfter er de overordnet set karakteriseret ved massen af den type partikel, der udveksles (0 for både fotoner og gluoner), og styrken hvormed de kobler til ladninger: For EM er koblingen proportional med finstrukturkonstanten $\alpha_{EM} \approx 1/137$, mens den for den stærke kraft typisk er $\alpha_{stærk} \approx 1$. Normalt bruger man et matematisk trick til at løse de teoretiske ligninger, hvor man laver en Taylor-agtig rækkeudvikling i α , men det fungerer typisk ikke for den stærke kraft, da højere ordens led ikke kan negligeres, så rækken konvergerer ikke. Dvs., at selvom vi kender den eksakte form af den stærke kraft, kan vi typisk ikke løse selv ganske simple problemer (fx hvordan kvarkerne er indespærret i protonen), og det er derfor området er så vigtigt og overraskende at udforske.

Nu viser det sig, at α ikke er konstant. I det tomme rum opstår virtuelle partikel-antipartikel par hele tiden. De lever i så kort tid, at de ikke kan måles direkte pga. Heisenbergs usikkerhedsrelation dvs. $\Delta E \cdot \Delta t \leq \hbar$,

men påvirker indirekte målingerne af normale partikler. Hvis der er en negativ elektrisk ladning, så vil positivt ladede virtuelle partikler være nærmere denne end de negativt ladede virtuelle partikler. På den måde afskærmes ladningen af de virtuelle par, og den ladningsstyrke vi observerer afhænger derfor af, med hvilken opløsning vi observerer: Ved en bølgelængde, som er ca. 100 gange mindre end protonens radius, observerer vi omtrent 10 % stærkere ladning (α_{EM}) i overensstemmelse med teorien. For den stærke kraft er der en twist, fordi gluoner også bærer farve (de otte forskellige gluoner bærer en farve og en anti-farve fx rød-anti-blå), og derfor (modsat fotoner) kan vekselvirke med andre gluoner. De virtuelle gluon-fluktuationer viser sig at forstærke kraften, så $\alpha_{stærk}$ på store afstande bliver stor (confinement), mens den på små afstande bliver lille (asymptotisk frihed). Ved en bølgelængde, som er 100 gange mindre end protonens radius, observerer vi at farveladningen er ca. 10 gange mindre ($\alpha_{stærk} \approx 0,1$) i overensstemmelse med teorien.

At gluoner er farvede og kobler stærkt betyder også, at de farve-elektriske felter for to ladninger ikke er additive! Det viser sig, at hvis man har en rød kvark og en anti-rød anti-kvark, så vil feltet mellem dem, på store afstande, fx når man prøver at skille dem ad, blive næsten 1-dimensionalt, og man får en farvestreng mellem dem, som det kræver en konstant kraft at strække. Den konstante kraft (1 GeV/fm) svarer til tyngdekraften på en 10 tons tung lastbil, og er et af de billeder, vi har til at beskrive confinement og forklare, hvorfor man ikke kan observere en fri kvark.

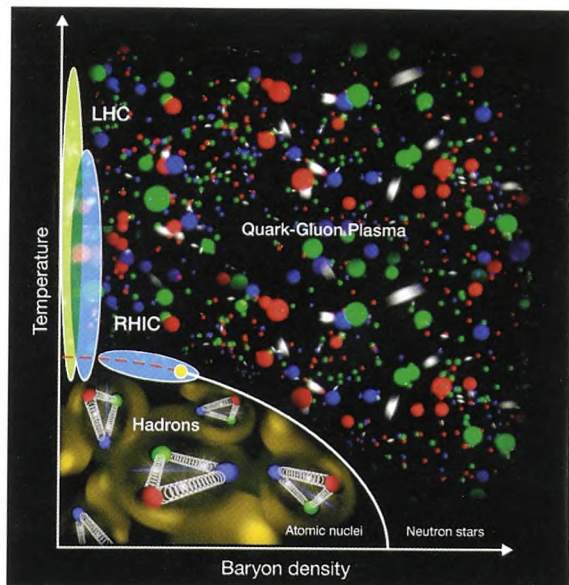
Kvark-gluon plasmaet

Den teori for kvarker og gluoner, som lige er blevet ridset op, hedder kvantekromodynamik (forkortet “QCD” efter “Quantum Chromo Dynamics”). Hvis man vil studere QCD i confinement-grænsen, er man nødt til, da $\alpha_{stærk} \approx 1$, at bruge numeriske computersimuleringer, kaldet Lattice QCD (LQCD) fordi beregningerne laves på et gitter. Ved hjælp af LQCD simuleringer kan man beregne, at hvis man varmer kvarkerne op til omkring 170 MeV (100.000 gange temperaturen i Solens centrum), så vil der ske en faseovergang til en ny fase, hvor kvarkerne og gluonerne er i et plasma (deconfined) kaldet QGP, se figur 1. I denne tilstand kan vi altså

²Se fx J.J. Gaardhøje “Kvark-gluon plasma i det tidlige univers” i KVANT nr. 4, 2010.

³ π -mesoner er ustabile. De to ladede π -mesoner henfalder til en muon og en muon-neutrino, mens den neutrale henfalder til to fotoner.

studere et medie af kvarker og gluoner, som er QCDs fundamentale frihedsgrader, og prøve at forstå teorien bedre.



Figur 1. QCD fasediagram [1]. I både det tidlige Univers og ved LHC er der stort set lige mange baryoner og anti-baryoner, så man bevæger sig effektivt set langs y -aksen ($x \approx 0$), hvor faseovergangen er anden ordens, og sker ved en temperatur på ca. 2.000.000.000.000 K.

Når vi genskaber QGP-fasen (mediet) i laboratoriet, bruger vi tunge/store (næsten) sfæriske atomkerner som bly (Pb) og guld (Au), der accelereres til høje energier og kolliderer, så vi får et område i centrale stød som er stort, med en radius på ca. 5-7 fm, sammenlignet med den typiske hadroniske radius på ca. 1 fm. Den primære proces, der sker i sammenstødene er, at der udveksles farveladning mellem kvarker og gluoner i de to kerner men ikke en egentlig nedbremsning – de to kerner er gennemsigtige for hinanden. Når kernerne bevæger sig væk fra hinanden, ophobes der energi i farve-strengene, fordi de strækkes. Til sidst er der blevet tilføjet så meget energi, at strengene “knækker”, ved at der produceres nye kvarker og tilsvarende antal anti-kvarker (Lund String Model [2]). I sjældne tilfælde sker det, at en kvark (eller gluon) i en kerne støder direkte sammen med en kvark (eller gluon) i den anden kerne. I disse stød kommer kvarkerne meget tæt på hinanden, så α_s er derfor lille (asymptotisk frihed), og vi kan beregne processen. Der kan ske det, at de bliver slynget ud med meget stor energi ryg-mod-ryg (pga. impulsbevarelse). Når disse kvarker eller gluoner bevæger sig væk fra hinanden, dannes der igen farve-strengene og man får et kollimeret sprøjt af hadroner kaldet jets, som kan observeres i detektoren. Det er primært ved hjælp af disse jets, at man har studeret QCD i laboratoriet⁴.

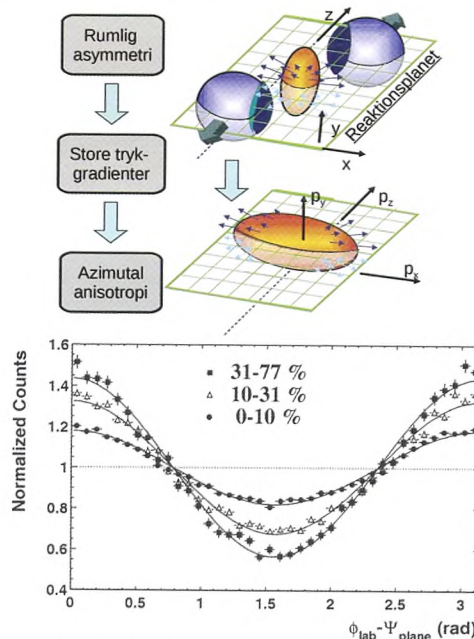
Målet med vores eksperimenter er nu, at se om der dannes et kvark-gluon plasma og at måle dets egenskaber. Problemet er, at i sluttilstanden måles der kun normale hadroner, så det er ud fra dem vi skal forsøge at bestemme, hvad der skete undervejs i forløbet.

⁴I endnu sjældnere tilfælde kan man i stedet for jets producere nye partikler, og det er de kollisioner, som de andre eksperimenter ved LHC er mest interesserede i at studere. Fx sker det i ca. én ud af tusind milliarder kollisioner ved LHC, at man producerer en Higgs boson, se Troels C. Petersens artikel i KVANT nr. 2, 2014.

I næste afsnit vil vi specielt fokusere på de kollektive egenskaber, men her kommer lidt mere overordnede eksperimentelle resultater. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) er én af de fire store detektorer ved Large Hadron Collideren (LHC) på CERN. I de mest centrale stød har ALICE målt, ved hjælp af den FMD-detektor der er bygget på Niels Bohr Institutet [3], at der produceres ca. 17.000 ladede partikler (bevægelsesenergien omdannes til masse via $E = mc^2$). Jet-partikler, der dannes i mediet taber energi (“jet quenching”), som svarer til, at de skal trække en lastbil efter sig (ca. 1 GeV/fm), så det skabte medie består af stærkt vekselvirkende farveladninger. Bundne tilstande af to eller flere tunge kvarker er undertrykt på grund af afskærmning i QGP-fasen (fx J/ψ , Υ), men ved LHC, hvor antallet af tunge kvarker er højt, ser vi for første gang beviser for, at disse tilstande (J/ψ) gendannes ved, at tunge kvarker tilfældigt bindes sammen i sluttilstanden.

Den perfekte væske

I 2000 startede en ny accelerator, Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC), ved Brookhaven National Laboratory uden for New York i USA. I 2001 kom de første overraskende resultater: Man målte stærke kollektive egenskaber, som var i overensstemmelse med næsten ideelle hydrodynamiske beregninger. I ikke-centrale stød udgør det område, hvor de to kerner overlapper, næsten en ellipsoide, se figur 2.



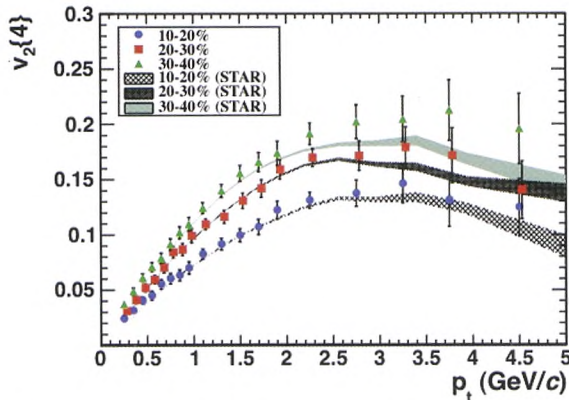
Figur 2. Øverst: illustration af hvordan den rumlige asymmetri i starttilstanden omdannes til en impulsasymmetri, elliptisk flow, i sluttilstanden. Den nederste figur viser data fra STAR-eksperimentet ($2 < p_T < 6$ GeV/c), som er brugt til at bestemme v_2 ved at måle hvordan det relative antal af partikler varierer med den azimutale vinkel i forhold til reaktionsplanet. Fordelingen har størsteværdien $1 + 2v_2$ og mindsteværdien $1 - 2v_2$. Det elliptiske flow v_2 er ca. 0,1 for de mest centrale stød (0-10 %) og 0,2 for de mest perifere stød (31-77 %) [4].

Hvis der ikke dannes et medie i kollisionen, forventer man, at den rumlige fordeling af partikler er homogen, så partiklerne udsendes i vilkårlige retninger. Hvis der i stedet dannes et medie, og dette medie ekspanderer som en væske, dvs. udvidelsen følger gradienterne af energitætheden, så udvidelsen er stærkest i reaktionsplanet, så vil man, pga. det skub som er forbundet med det opståede flow, også få en asymmetrisk fordeling af partiklerne i slutttilstanden: Man observerer flere partikler, som udsendes parallelt med reaktionsplanet end vinkelret på det. Man karakteriserer flowet ved hjælp af Fourierkoefficienter. Elliptisk flow (v_2), som er beskrevet her, er af anden orden sådan, at den azimutale fordeling af partikler, $f(\varphi)$, er givet ved:

$$f(\varphi) \propto 1 + 2v_2 \cos(2\varphi), \quad (1)$$

hvor φ er den azimutale vinkel i forhold til reaktionsplanet.

Indtil da havde man forestillet sig, at QGP-fasen ville opføre sig som en gas pga. asymptotisk frihed. Beregninger af energitætheden i QGP-fasen, ved hjælp af LQCD, viser også, at denne er tæt på Stefan-Boltzmann grænsen for en relativistisk gas af kvarker og gluoner. Det var derfor en stor overraskelse, at man pludselig havde beviser for, at et medie blev dannet, og at det havde egenskaber, der tydede på meget stærke iboende korrelationer som i en væske.



Figur 3. Det elliptiske flow v_2 som funktion af transversal impuls, p_T , ved LHC (ALICE, de farvede punkter) og RHIC (STAR, de grålige kurver) for tre centralitets-klasser [5].

Nu vil vi diskutere resultaterne i figur 2 og 3. Geometrien i enhver tungionskollision er primært bestemt af stødparameteren, dvs. den korteste afstand mellem centrene for de to kerner i kollisionen. Hvis denne afstand er meget lille, siger vi, at kollisionen er central, og det er primært disse kollisioner, vi ønsker at studere, for det er de voldsomste kollisioner, hvor næsten alle protoner og neutroner støder sammen. Geometrien af disse kollisioner er næsten sfærisk, så det elliptiske flow er større, når vi undersøger mere perifere kollisioner. Kvantitativt snakker man om centralitet, og intervallet 0-10 % betyder de 10 % af alle kollisioner, som har mindst stødparameter. Man kan ikke direkte måle stødparameteren, men bruger typisk den totale afsatte mængde energi i en detektor som et mål for aktiviteten, og estimerer centraliteten derudfra.

Hvordan man måler flow

Vi antager at sandsynlighedsfordelingen for partiklerne er:

$$f(\varphi) \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\varphi - \Psi_2)], \quad (2)$$

hvor φ er den azimutale vinkel. Hvis Ψ_2 kendes, kan det elliptiske flow, v_2 , bestemmes som:

$$v_2 = \langle \cos[2(\varphi - \Psi_2)] \rangle, \quad (3)$$

hvor $\langle \dots \rangle$ angiver, at det er et gennemsnit (typisk laver man to gennemsnit: Først over de målte spor i en enkelt kollision og derefter over gruppen af kollisioner). Hvis man ikke kender Ψ_2 , kan den approksimeres i hver kollisionsbegivenhed som

$$\Psi_2 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\langle \sin(2\varphi) \rangle}{\langle \cos(2\varphi) \rangle} \right] \quad (4)$$

Man kalder denne metode "Event Plane"-metoden og skriver $v_2\{EP\}$, det er den metode som er vist i figur 2. Men det betyder, at vores resultater bliver afhængige af opløsningen af Ψ_2 . Det kan undgås ved at studere 2-partikel korrelationer:

$$\begin{aligned} \langle \cos[2(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle &= \text{Re} \langle e^{i2(\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle \\ &= \text{Re} \langle e^{i2(\varphi_1 - \Psi_2 - \varphi_2 + \Psi_2)} \rangle \\ &\approx \text{Re} \left[\langle e^{i2(\varphi_1 - \Psi_2)} \rangle \langle e^{i2(\varphi_2 - \Psi_2)} \rangle \right] \\ &= \langle \cos[2(\varphi_1 - \Psi_2)] \rangle \langle \cos[2(\varphi_2 - \Psi_2)] \rangle \\ &= v_2^2, \end{aligned} \quad (5)$$

hvor gennemsnittet er over alle par og antagelsen i 3. linie er, at der ingen direkte korrelationer er mellem partikel 1 og 2 men kun en indirekte korrelation med anden-ordens symmetriplanet Ψ_2 . På den måde bestemmes 2-partikel korrelationsfaktoren $\langle 2 \rangle = \langle \cos[2(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle$ og vi skriver $v_2\{2\} = \sqrt{\langle 2 \rangle}$. På samme måde kan man nu bestemme 4-partikel korrelationsfaktoren $\langle 4 \rangle = \langle \cos[2(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4)] \rangle$ og bestemme $v_2\{4\} = \sqrt[4]{-\langle 4 \rangle + 2\langle 2 \rangle^2}$ som er specielt smart, fordi den korrigerer for 2-partikel korrelationer, som fx skyldes partikel-henfald.

Problemet med $\langle 4 \rangle$ er, at hvis man fx har 1000 spor i hver kollision, så skal man beregne gennemsnittet af 10^{12} led. Hvis man gør det direkte, ved hjælp af fire indlejrede løkker i sit dataanalyseprogram, så tager det alt for lang tid at køre. Tricket er, at definere $Q_n = \sum_{\text{spor}} e^{in\varphi}$, som man let kan bestemme med en enkelt løkke, med hvilken det er let at vise at:

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_2|^2 - M}{M(M-1)} \quad (6)$$

hvor M er antallet af spor. Det er betydeligt sværere at vise at:

$$\begin{aligned} \langle 4 \rangle &= \frac{|Q_2|^4 + |Q_4|^2 - 2 \cdot \text{Re}[Q_4 Q_2^* Q_2^*]}{M(M-1)(M-2)(M-3)} \\ &\quad - 2 \frac{2(M-2) \cdot |Q_2|^2 - M(M-3)}{M(M-1)(M-2)(M-3)} \end{aligned} \quad (7)$$

På den måde kan alle flow-koefficienter bestemmes præcist uden approksimationer.

Det var Ante Bilandzic, som er postdoc i højenergitungionsgruppen (HEHI) ved Niels Bohr Institutet, som var med til at finde frem til disse og mange flere analytiske resultater [16].

Boksen “Hvordan man måler flow” diskuterer i stor detalje de avancerede teknikker, som er blevet udviklet til at bestemme v_2 . Typisk måler man v_2 som funktion af den transversale impuls, p_T , som inden kollisionen er 0. Den målte transversale impuls er derfor et resultat af kollisionen, og flow vil give et transversalt impuls-skub⁵, så det er ikke mærkeligt, at flow i starten vokser med p_T . Ved høje p_T måler man også partikler fra jets, som ikke er en del af det skabte medie, så v_2 aftager og får ved meget høje p_T , hvor der kun er partikler fra jets, en ny fortolkning relateret til jet quenching.

Vi kan nu kvalitativt forstå, hvordan v_2 opfører sig som funktion af p_T og centralitet i figur 3. Endelig bemærker vi, at på trods af, at ALICE ved LHC måler ved en kollisionse energi, som er ca. 14 gange større, end den som STAR har haft ved RHIC, finder vi næsten de samme resultater. Det skyldes, at den relative geometri stort set er den samme, og hvis mediet derfor har de samme egenskaber, bliver v_2 , målt som funktion af p_T , stort set den samme. Resultatet kan synes lidt kedeligt, men inden det kom frem, var der faktisk både ideer baseret på asymptotisk frihed, om at flowet skulle aftage “fordi man endelig ved LHC kom ind i gas-fasen” og naive ekstrapolationer, som antydede, at flowet skulle vokse voldsomt. Så resultatet slog fast, at man ser det samme medie ved RHIC og LHC.

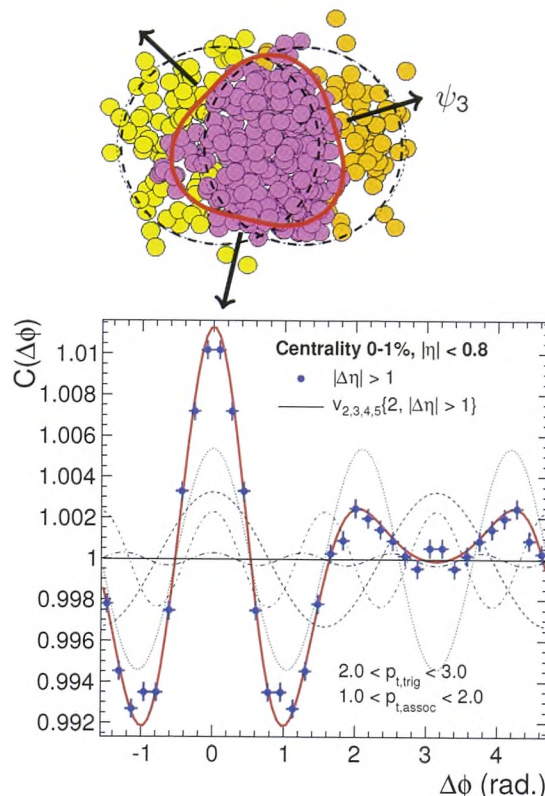
Triangulært flow

I 2005 påviste PHOBOS-eksperimentet ved RHIC, at for at forstå det elliptiske flow i perifere kollisioner var man nødt til at tage højde for de fluktuationer, der skyldes, at kernerne ikke er homogene, men består af individuelle kernepartikler. Det betyder, at i teoretiske beregninger er reaktionsplanet, som er parallelt med stødparametervektoren, ikke altid det rigtige plan at bruge, men man er i stedet nødt til at bruge det egentlige symmetriplan for de protoner og neutroner, der støder sammen, når man skal beregne flowet (den vinkel man skal bruge for Ψ_2 forklares i boksen “Hvordan man måler flow”).

I 2010 skete det største paradigmeskift da to eksperimentelle fysikere, Alver og Roland [6], kunne påvise, at triangulært flow (trekantsflow) spillede en stor rolle i centrale kollisioner. Teoretikere havde i 20 år argumenteret for, at de ulige Fourierkoefficienter var nul pga. symmetri, men Alver og Roland viste, at de fluktuationer, som PHOBOS havde påvist vigtigheden af, også spillede en stor rolle i centrale kollisioner, se figur 4, og at de ulige koefficienter faktisk kunne være ganske store. ALICE viste, at man ved at gå til de mest centrale kollisioner, som er næsten sfæriske, kunne undertrykke v_2 og dermed direkte observere trekantskorrelationer i to-partikel korrelationsfigurer, se figur 4.

I 2011 blev alle disse nye flowkoefficienter målt, og man kunne sammenligne med teoretiske beregninger. Det, der umiddelbart var fantastisk var, at de samme modeller, som man havde brugt til at beskrive v_2 med,

også kunne beskrive alle de nye flowkoefficienter med nogenlunde samme præcision. I næsten 10 år havde man troet, at trekantskorrelationerne skyldtes to effekter: Et kollektivt “boost” mellem partikler med samme retning (en “højderyg” ved 0 grader, se figur 4) og en Mach-agtig chokbølge relateret til jet quenching i modsat retning (ved 120 og 240 grader, se figur 4). På ganske kort tid blev det klart, at alle disse fænomener kunne forklares meget mere præcist og simplere med flow.

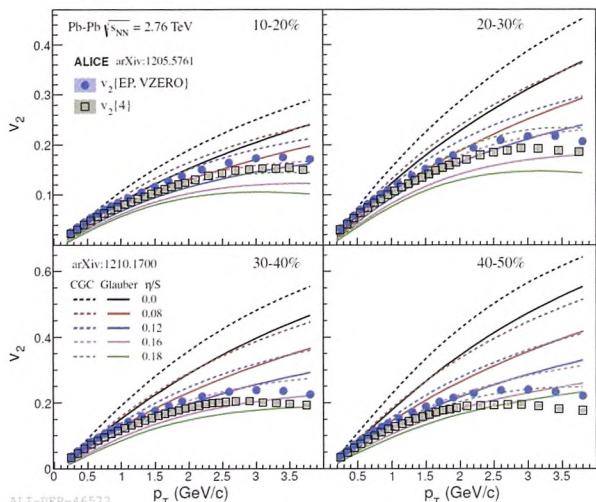


Figur 4. Triangulært flow. Øverst: Fluktuationer kan medføre, at der opstår en triangularitet i det skabte medie. Nederst: Ved at gå til de 1 % mest centrale stød kan man undertrykke v_2 og se trekantskorrelationerne direkte i 2-partikel korrelationerne, dvs. at toppene er ved 0, $2/3\pi$ og $4/3\pi$ radianer (0, 120, og 240 grader). Bemærk, at den røde kurve er summen af de tynde sorte kurver, som er beregnet ud fra flowkoefficienterne v_2, v_3, v_4, v_5 [7].

På den teoretiske side har man i løbet af de sidste 10 år udviklet korrektioner til ideel relativistisk hydrodynamik, se bl.a. [9], og man kan nu sammenligne disse beregninger med data, se figur 5. Da de observerede data er tæt på de ideelle hydrodynamiske beregninger, ved man, at korrektionerne er små. I beregningerne er korrektionerne givet ved den dynamiske viskositet normaliseret til entropitætheden kaldet η/s . Korrektionerne gør, at flowgradierne bliver mindre i mediet, og da der er mange flere partikler ved lav p_T , betyder det, at specielt ved høj p_T bliver v_2 reduceret. Det viser sig, at de værdier for η/s , som er konsistente med data, er de mindste man nogensinde har målt, og derfor siger vi, at QGP opfører sig som den mest perfekte væske, vi kender. Præcisionen af beregningerne er primært bestemt af usikkerhederne i den teoretiske forståelse

⁵Generelt er dette skub større for tungere partikler, så v_2 for protoner har et højere maksimum end v_2 for pioner.

af kollisionsgeometrien. Denne usikkerhed skyldes, at man forventer overlap-effekter pga. de mange farvestreng⁶, men at størrelsen af disse ikke er indsnævret præcist nok af data endnu.



Figur 5. Elliptisk flow sammenlignet med relativistisk hydrodynamik beregninger med varierende værdi af den dynamiske viskositet normaliseret til entropitætheden, kaldet η/s , for to måder, at beregne kollisionsgeometrien på: En direkte superposition af nukleonerne (Glauber) og en model hvor aktiviteten reduceres i områder, hvor mange kernepartikler overlapper (CGC) [8, 10]. Bemærk at $\eta/s = 0,08$ sandsynligvis er den lavest mulige værdi, en væske kan have ifølge AdS-CFT og Heisenbergs usikkerhedsrelation.

Det sidste store emne som man studerede var flow-fluktuationer, hvor det viste sig, at disse næsten én til én er givet ved de geometriske fluktuationer i kollisionsgeometrien.

Lad os prøve at sammenfatte i ord, hvorfor disse resultater er så spektakulære. Når atomkernerne kolliderer, opnår det skabte medie temperaturer, der er 100.000 gange højere end temperaturen i Solens centrum. Man forventer naivt, at stokastiske processer som diffusion spiller en stor rolle, og fører til, at det meste af informationen om det tidlige skabte medie går tabt under ekspansionen. I stedet måler man, at fluktuationer på kernepartikelniveau i de allerførste kernekollisioner bevares gennem hele processen, og er synlige i sluttilstanden som azimutale variationer i impulsrummet, og at den transformation er næsten perfekt beskrevet af ideel relativistisk hydrodynamik. Det betyder altså, at dynamikken i QGP-fasen næsten er reversibel, og det tyder på et system med utroligt stærke indbyggede korrelationer.

Nu sidder der måske nogle og tænker: Hvor perfekt er den væske egentlig? Det overraskende er, at QGP er den mest perfekte væske vi kender. Den næstmest perfekte væske er lavet med ultrakolde ($T \ll 1$ K) fermioniske lithium-6 atomer, som man har tunet til at vekselvirke meget stærkt ved hjælp af en “Feshbachresonans”, og som man slipper løs fra en asymmetrisk laserfælde [12]. Ved at analysere de optiske data kan

man ekstrahere η/s og bestemme, at den er noget større end for QGP-fasen.

Kan strengteori beskrive QGP?

Endnu er der ikke en QCD-forklaring på, hvorfor QGP opfører sig som en væske, og hvordan kvarkerne og gluonerne organiserer sig selv i QGP-fasen. Det viser sig, at man måske kan få hjælp fra uventet side. I den mest citerede partikelfysikartikel nogensinde (ca. 10.000 citationer) postulerer Maldacena den såkaldte AdS-CFT formodning, der siger, at man kan beregne ting, som er stærkt koblet (koblingskonstant $\alpha \approx 1$) i en QCD-lignende partikelteori (CFT) i en dual svagt koblet ($\alpha \ll 1$) kvantegravitations strengteori (AdS) [13]. Charlotte Fløe har tidligere skrevet i KVANT (nr. 3, 2009) om arbejdet med at bevise AdS-CFT formodningen. Det er vigtigt her at nævne, at disse QCD-teorier generelt har egenskaber, som er meget anderledes end QCD bl.a. et uendeligt antal farver, en koblingskonstant, som virkelig er konstant, supersymmetri og ingen confinement.

For AdS-CFT kan man vise, at alle disse QCD-lignende teorier har en ekstraordinær lav $\eta/s = 1/(4\pi)$. Det er blevet påstået, at der er en universel laveste grænse⁷, da det er tæt på, hvad man forventer alene pga. Heisenbergs usikkerhedsrelation. Man kan med samme teorier forklare, at man sagtens kan have systemer med energitætheder tæt på Stefan-Boltzmann grænsen (op til $\approx 75\%$) med en vilkårligt stærk vekselvirkning, så der ikke er et misforhold mellem Lattice QCD-beregninger og de eksperimentelle resultater. Slutteligt kan man vise, at signaler kan udbrede sig med lysets hastighed i mediet – en indsigt, der måske kan forklare, hvordan systemet kan organisere sig så smidigt, at det ikke genererer entropi under ekspansionen.

Der er andre forudsigelser fra AdS-CFT, som man er ved at teste, og det er endnu for tidligt at sige, om det er teorien, der skal give den endelige dybe fundamentale indsigt i kvark-gluon plasmaet.

Et nyt paradigme?

I slutningen af 2012 og starten af 2013 har LHC kørt et intensivt proton-bly program. Det var mest en formalitet, da sådanne data er vigtige for fortolkningen af visse bly-bly data. Det har imidlertid vist sig, at der også i disse stød er flow-lignende effekter, se figur 6 hvor v_2 er bestemt i de kollisioner med allerhøjeste aktivitet.

Der er flere forskellige mulige forklaringer på fænomenet. Det kan fx skyldes, at der dannes et egentligt hydrodynamisk system. Det kan også skyldes gluonkorrelationer i kernens bølgefunktion. Undertegnede er også selv kommet med et bud baseret på, at der faktisk er flow-agtige korrelationer i de fleste proton-proton generatorer, som er implementeret ved, at farvestrengene kan rekonfigurere sig selv for at minimere “længden” [15]. Der er mange andre resultater, som

⁶Den mest populære model for at beskrive disse overlap-effekter er “Color Glass Condensate” (CGC) modellen, hvor man antager at aktiviteten “mætter” efter et vist antal overlap, se bl.a. [11].

⁷Man kan dog godt finde teorier med noget lavere η/s

også tyder på, at der er flow i små systemer, men på den anden side har man teoretisk altid set, at de bedste teorier for bly-bly ikke beskriver data specielt godt, når man går til meget perifere kollisioner, så de nye resultater er i kontrast til det billede, man indtil nu har opbygget.

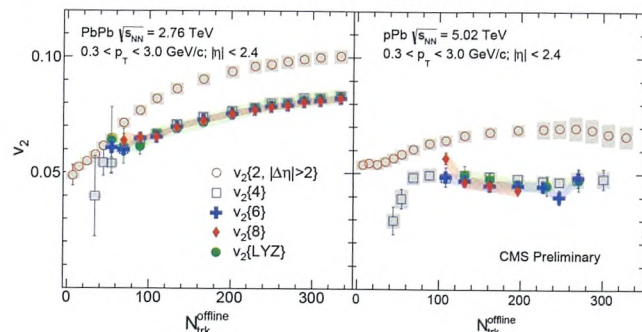


Figure 6. CMS foreløbige resultater for v_2 i bly-bly (venstre) og proton-bly stød (højre) som funktion af multipliciteten i detektoren [14].

Generelt er små systemer svære at modellere med hydrodynamik, fordi man ikke har en god forståelse af kollision geometrien og fordi mange af de approksimationer, som kan virke rimelige for store systemer virker urimelige for små systemer, hvor alt synes at være nær randen. Så det er ikke let at blive enige om, hvordan man kan falsificere de forskellige ideer.

Konklusion

Eksperimentel kvark-gluon plasmafysik har leveret utroligt mange spændende resultater, som kan beskrives med effektive teorier, men som af naturlige årsager savner en fundamental teoretisk forklaring. Væskeegenskaberne er i mine øjne det største resultat indtil videre, men det er både spændende og udfordrende, at man nu også observerer lignende effekter i små systemer. Skyldes det, at de væskelignende egenskaber er en generel QCD effekt, eller er der forskellige forklaringer på de to fænomener?

LHC starter op igen i år (2015), og flow i små systemer er nok det hotteste emne lige nu inden for QGP-fysikken, og det som der vil være mest fokus på at studere med de nye data. Resultaterne af disse studier vil få enorm betydning for vores forståelse af den stærke kraft (QCD) og kan måske endda ændre vores opfattelse af protoner og neutroner.

Litteratur

- [1] B. V. Jacak and B. Muller, *Science* **337**, 310 (2012).
- [2] B. Andersson, G. Gustafson, G. Ingelman and T. Sjöstrand, *Phys. Rept.* **97**, 31 (1983).
- [3] E. Abbas *et al.* [ALICE Collaboration], *Phys. Lett. B* **726**, 610 (2013).
- [4] C. Adler *et al.* [STAR Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **90**, 032301 (2003).
- [5] K. Aamodt *et al.* [ALICE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **105**, 252302 (2010).
- [6] B. Alver and G. Roland, *Phys. Rev. C* **81**, 054905 (2010).
- [7] K. Aamodt *et al.* [ALICE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **107**, 032301 (2011).

- [8] B. Abelev *et al.* [ALICE Collaboration], *Phys. Lett. B* **719**, 18 (2013).
- [9] M. Luzum and P. Romatschke, *Phys. Rev. C* **78**, 034915 (2008) [Erratum-ibid. *C* **79**, 039903 (2009)].
- [10] V. Roy, B. Mohanty and A. K. Chaudhuri, *J. Phys. G* **40**, 065103 (2013).
- [11] E. Iancu, A. Leonidov and L. D. McLerran, *Nucl. Phys. A* **692**, 583 (2001).
- [12] K. M. O'Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade and J. E. Thomas, *Science* **298**, 2179 (2002).
- [13] J. M. Maldacena, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231 (1998).
- [14] CMS Collaboration [CMS Collaboration], CMS-PAS-HIN-14-006.
- [15] A. Ortiz Velasquez, P. Christiansen, E. Cuautle Flores, I. Maldonado Cervantes and G. Paic, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 042001 (2013).
- [16] A. Bilandzic, R. Snellings and S. Voloshin, *Phys. Rev. C* **83**, 044913 (2011).

Peter Christiansen er lektor i (eksperimentel) partikelfysik ved Lunds Universitet. Han forsvarede sin ph.d. i 2003 på Niels Bohr Institutet om baryon stopping i guld-guld stød målt med BRAHMS-detektoren ved RHIC i USA. Han har siden 2004 været tilknyttet ALICE-eksperimentet (med en kort afstikker til RISØ), hvor han har specialiseret sig i identificering af hadroner med høj transversal impuls (ved hjælp af den afsatte ionisering i TPC-gasdetektoren), for at kunne måle jet quenching og flow.



PFEIFFER VACUUM

125 YEARS

NOTHING IS BETTER

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

Lysets År skudt i gang

Dansk Fysisk Selskab åbnede Lysets Internationale År i Danmark med sit årsmøde på DTU den 22.-23. januar 2015, nøjagtigt to dage efter UNESCOs Internationale åbning af lysets år i Paris.

De to institutter, DTU Fotonik og DTU Fysik, var værter for det danske åbningsmøde, som henvendte sig til fysikere og personer, der i deres dagligdag arbejder med fysik og fotonik. Der var til dette møde tilmeldt 150 deltagere, som kom til at høre en enestående række af foredrag fra internationalt førende fysikere.



Foredragsholdere ved åbningen. Fra venstre, Ferenc Krausz, München, Jesper Mørk, DTU Fotonik, Sune Svanberg, Lund, John Dudley, EPS, Chris Barty, NIF, Anders Bjarklev, DTUs rektor, Susanne Siebentritt, Luxembourg, Wolfgang Ketterle, MIT, og Jørgen Schou, formand for DFS.

Lys var naturligt nok det gennemgående tema i alle foredrag. Efter en kort velkomst af DFS' formand Jørgen Schou bød DTUs rektor, Anders Bjarklev, deltagerne velkommen. Han glædede sig over, at åbningen af Lysets År i Danmark netop skulle foregå på DTU. John Dudley, den nuværende formand for det Europæiske Fysiske Selskab, og formand for den Internationale komité for Lysets År, fortalte baggrunden for at UNESCO accepterede at gøre 2015 til Lysets År, men også et år for lys-baseret teknologi. Sune Svanberg fra Lunds Lasercenter (også formand for Nobelkomitéen i 1998-2006) åbnede foredragsrækken med at fortælle om laserens fantastiske udvikling siden "opfindelsen" i 1960. Ferenc Krausz fra Max-Planck-Institutet for Kvanteeptik i München talte om de korteste lyspulser, man i dag kan frembringe, af attosekund-varighed. Det blev efterfulgt af et foredrag af Jesper Mørk fra DTU Fotonik om "langsomt lys", lys der gik omveje i fotoniske krystaller og derfor brugte længere tid til at passere en krystal.



Foredrag af nobelpristageren Wolfgang Ketterle den 22. januar.

Dagen blev afsluttet med et formidabelt foredrag af nobelpristageren Wolfgang Ketterle fra MIT i Boston, der fortalte om, hvordan man kunne styre partikler i et kondensat med en temperatur på nogle få nanokelvin

over det absolutte nulpunkt med laserlys og dermed få indsigt i nye fænomener.

Aftenen sluttede med et foredrag i en hel anden retning om det svage lys fra exoplaneter. Didier Queloz fra Cambridge, UK, fortalte om hvilke muligheder, der fremover ville være, når det nye European Extremely Large Telescope (E-ELT) bliver færdigt.

Fredag morgen holdt John Dudley et foredrag om solitoner med lys og med andre bølgebevægelser, fx på vandoverflader, hvorefter Chris Barty fra National Ignition Facility i Lawrence Livermore fortalte om, hvordan man med 200 intense lasere efterlignede processer i stjerners indre og skabte betingelser for fusion. Endelig var der foredrag om et helt andet aspekt, de fremtidige muligheder for at bruge solenergi med tynde celler, og hvordan man med plasmoneffekter kan styre farven i lys. Mødet blev afsluttet med to foredrag af prismodtagerne for Kvinder i Fysik. Prisen for den mest engagerede gymnasielærer gik til Dorte P. Agerkvist ved Herlev Gymnasium og HF. De to forskerpriser til kvindelige fysikere gik til Alison Man og Anne Ersbak Bang Nielsen.



Overrækkelse af prisen for den mest engagerede gymnasielærer til Dorte Petersen Agerkvist (t.v.). I midten Mette Grage fra Kvinder i Fysik og til højre Kristine Niss (RUC) fra priskomitéen.

Den 17. februar holdt den Danske National Komité for Lysets År et åbnings-arrangement på dansk for en bredere kreds sammen med DTU fotonik. Der var mødt 100 personer frem for at høre om Nobelprisen til den blå lysdiode, lys i verdensrummet, lys i kunst, solenergi i Afrika og lys fra nye lyskilder og lys indenfor sundhedsvæsenet. Der vil komme flere arrangementer i forbindelse med Lysets År, se <http://www.dfs-lysetsaar.fotonik.dtu.dk>.



Paul Michael Petersen, DTU Fotonik, holder foredrag i Oticonsalen på DTU til det danske åbningsmøde den 17. februar.