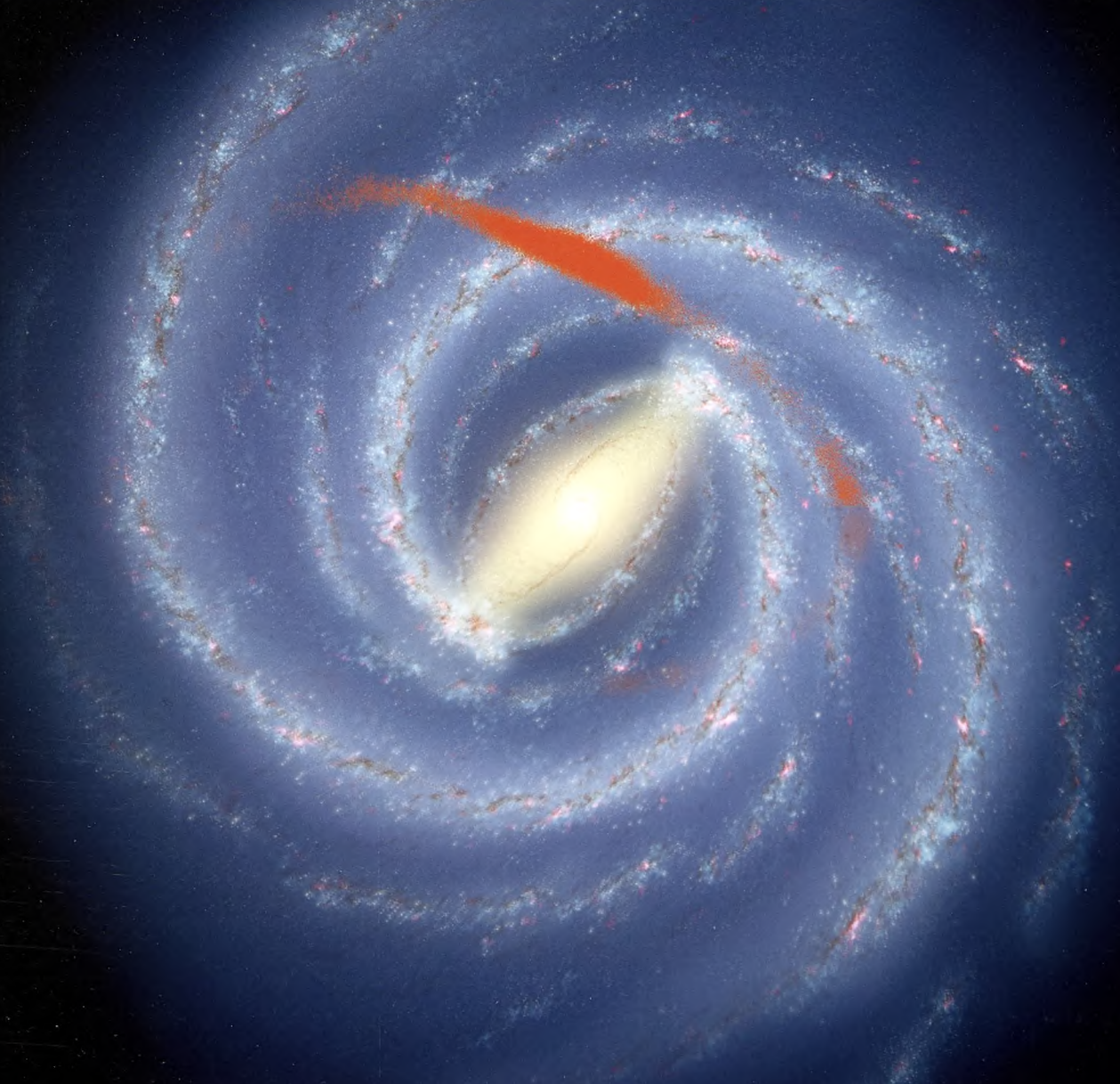

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 28. årgang

- 
- MÆLKEVEJENS BJÆLKE KAN SLÅ HUL I STJERNESTRØMME
 - STRUKTUREL KOMPLEKSITET I BLØDE MATERIALER
 - KVANTEKROMODYNAMIKKEN
 - KOBBERNANOTRÅDE OG KULSTOFNANORØR
 - OLE RØMERS LOMMEUR
 - DEN INTERNATIONALE FYSIKOLYMPIADE
 - HEISENBERG – FYSIK, FILOSOFI OG TRO
 - STEPHEN HAWKING (1942–2018)

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

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

Redaktion

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

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnement tegnes på www.kvant.dk.
Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:
christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncpriser

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

Priserne er excl. moms og for reproklart
materiale i farver. Henvendelser om an-
noncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk
(tlf. 28 91 87 74).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2400.

Produktionsplan

Nr. 2-18 udkommer ca. 15. juni
Nr. 3-18 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Mælkevejens galaktiske bjælke kan slå hul i stjernestrømme <i>Sarah Pearson</i>	3
Strukturel kompleksitet i bløde materialer <i>Jacob Kirkensgaard</i>	6
Kvantekromodynamikken – teorien for den stærke vekselvirkning <i>Bernhard Lind Schistad</i>	10
Kobbernanotråde og kulstofnanorør <i>Aksel Nielsen og Frederik Hegaard</i>	16
Opgave stillet af Ole Rømer: “beregning og anvendelse af mit lommeur” <i>Poul Darnell</i>	20
Den Internationale Fysikolympiade <i>Niels Hartling</i>	21
Foreningsnyt – foredrag, årsmøde og generalforsamling	23
Usikkerhedsrelationen og Bohrradius – breddeopgave 74 og 75 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	25
KVANT-nyheder <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	27
Heisenberg – fysik, filosofi og tro <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	29
Stephen Hawking (1942–2018) <i>Svend E. Rugh</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden er en illustration af vores galak-
se, Mælkevejen, set fra oven. I illustrationen ses Mæl-
kevejens spiralarmer, den centrale galaktiske bjælke
samt en projektion af stjernestrømmen Palomar 5
(orange) som har fået slået huller i sig på grund
af tyngdepåvirkningen fra den roterende galaktiske
bjælke. Credit: NASA/JPL-Caltech, Pearson, Price-
Whelan



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

kommet 1% af et lysår væk endnu!



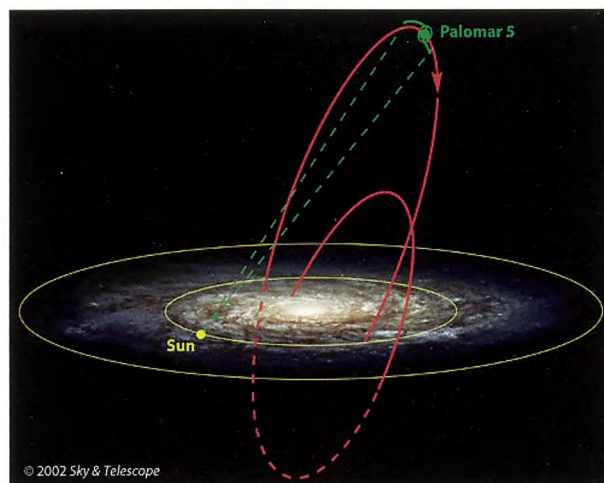
Figur 2. Illustration af en strøm af stjerner der omslutter en hel spiralgalakse. Disse stjerner undslipper de kuglehobe, som de befinder sig i, fordi tidevandskræfter fra galaksens samlede massefordeling "hiver" i stjernerne. Disse strømme af stjerner er som regel lige lange i både deres ledende (fremadrettede) og bagudrettede strømme (se længdesymmetrien i længden af strømmene som set fra den orange kuglehob) [Jon Lomberg].

I vores egen galakse kan vi dog få en ide om hvordan massen er fordelt i hele galaksen ved at studere, hvordan stjerner bliver hevet ud af kuglehobe (klumper af stjerner) mens de bevæger sig rundt om Mælkevejen [1]. Når disse stjerner bevæger sig rundt i baner om vores galakse, vil nogle af stjernerne slippe ud af kuglehobene på grund af tidevandskræfter fra hele Mælkevejens massefordeling (se et eksempel i figur 2). Som når Månens tidevandskræfter påvirker havene på Jorden vil det punkt der er tættest på Månen føle en lidt større tyngdekraft end det punkt på Jorden der er længst fra Månen, og der er derfor højvande på begge sider samtidigt. Forestil dig så at denne kraft var så stor at oceanerne kunne blive hevet af Jorden. Dette ville ske fra begge sider. Dette er analogt til, hvad der sker for stjerner i kuglehobene. Nogle stjerner føler en kraftpåvirkning fra Mælkevejen, der er større end kraften fra deres egen hob af stjerner. De kan dermed undslippe deres hob. Dette vil skabe to lange symmetriske strømme af stjerner der danner en ledende og en bagudrettet strøm af stjerner (se figur 2). Stjernerne i strømmene har en lidt anden energi end stjernerne i selve kuglehoben. De stjerner der er i den ledende arm har en lavere energi, og de stjerner der er i den bagudrettede arm har en lidt højere energi, og disse stjerner vil komme længere foran og bagved selve hoben som tiden går.

Palomar 5-stjernestrømmen

Palomar 5 er et eksempel på sådan en kuglehob, der har både en ledende og bagudrettet strøm af stjerner omkring sig (se figur 3 og [3]). Lige nu befinder den sig ca. 52.000 lysår over Mælkevejens stjerneskeive, men klumpen af stjerner har bevæget sig i baner rundt om vores galakse i mange milliarder år og har tidligere flere gange pløjet igennem stjerneskeiven. Indtil for nylig havde man ikke kigget med teleskoper i den retning hvor den ledende strøm fortsatte, men alle beregninger forudsagde, at den ledende og bagudrettede strøm af

stjerner skulle være symmetriske og lige lange [4]. I en ny artikel fandt forskere til stor forundring ud af, at den ledende strøm af stjerner var meget kortere end den bagudrettede strøm [5], og dette kunne ikke forklares. Undertegnede har været med til at foreslå en ny forklaring [6], der går ud på, at den asymmetriske længde af strømmene kan forklares ved en tidligere interaktion med den galaktiske bjælke.



Figur 3. Illustration af Palomar 5's kredsløb (rød) omkring vores egen galakse. Palomar 5 befinder sig lige nu ca. 52.000 lysår over galakseskiven, men den har tidligere bevæget sig igennem skiven og derfor været i tæt kontakt med den galaktiske bjælke (se figur 1).

Palomar 5-stjernestrømmen er sammenlagt cirka lige så lang som afstanden fra Solen til centrum af vores galakse. I takt med at Palomar 5-stjernestrømmen bevæger sig rundt om Mælkevejen, vil stjernerne i den ledende arm bevæge sig gennem Mælkevejens skive af stjerner (hvor bjælken befinder sig), før stjernerne i den bagudrettede strøm passerer skiven. Fordi bjælken bevæger sig rundt med en bestemt hastighed vil nogle af stjernerne føle et gravitationelt "slag" fra bjælken, når enden af bjælken svinger forbi stjernerne, men alle stjernerne i strømmen vil ikke nå at blive slået af bjælakens ende i en passage gennem stjerneskeiven.

Selvom Palomar 5 stjernerne ikke direkte kolliderer med bjælken, så viste vi [6], at tyngdefeltet fra bjælken, der svinger forbi, har en påvirkning på stjernerne i strømmen. Når bjælken svinger forbi giver det de stjerner, der er foran bjælken, en smule mindre energi, da de bliver "hevet tilbage" af bjælken. Derimod vil de stjerner, der er bagved bjælken, når de bevæger sig gennem stjerneskeiven, få lidt ekstra energi, fordi de bliver hevet frem af bjælken. Dette vil ændre på disse stjernes baner, og dette vil kun påvirke lige præcis de stjerner, der var i nærheden af det område, hvor bjælken svingede forbi, idet stjernerstrømmen passerede galakseskiven.

Der blev yderligere vist at dette er sket i Palomar 5's ledende strøm af stjerner for under en milliard år siden, hvilket kan forklare, hvorfor den ledende stjernerstrøm nu ser ud til at være kortere [5]. Der er simpelthen blevet slået et "hul" i stjernerstrømmen, som vil blive ved med at vokse på grund af det skift i energi, stjernerne mærker, når den galaktiske bjælke svinger forbi dem. Den præcise størrelse af dette hul

vil afhænge af, hvornår hullet dannedes, hvor meget bjælken vejer, hvor hurtigt bjælken bevæger sig, og hvor hurtigt Palomar 5-strømmen bevæger sig. Vi kan altså indirekte studere den galaktiske bjælke i vores egen galakse ved at studere, hvordan bjælken påvirker Palomar 5-stjernestrømmenes udsende. Ud fra beregningerne i [6] lader det til, at Mælkevejen har en enormt hurtigt roterende bjælke (den lader til at bevæge sig en gang rundt om sig selv på kun 100 millioner år, hvorimod Solen bruger ca. 220 millioner år på at nå en gang rundt i galaksen). Dette er interessant, da andre forskere har forudsagt at bjælken vil sænke farten under sin levetid – måske har vi altså en relativt nyligt formet bjælke i vores galakse?



Figur 4. Udsnit af en computersimulering af hvordan mørkt stof fordeler sig rundt om en galakse, der vejer det samme som vores egen galakse. Man tror man kan finde disse klumper af mørkt stof, da de i princippet kan slå hul i stjernestrømme [10].

Opdagelsen af at bjælken kan slå huller i stjernestrømme, der vokser over tid, har vigtige konsekvenser for kosmologien. Fra vores nuværende forståelse af vores Univers, skal en galakse, som den vi bor i, være fyldt med klumper af mørkt stof med forskellige størrelser [7] (se figur 4). Disse klumper af mørkt stof er ekstremt vanskelige at finde, da de udelukkende består af det endnu udetekterede mørke stof. En foreslået metode til at detektere de mørke stofklumper er, at søge efter dem indirekte gennem deres interaktion med netop stjernestrømme. Man mener nemlig at klumperne af mørkt stof også vil skabe huller i stjernestrømme, hvis de passerer gennem eller tæt ved stjernestrømmene [8,9]. I denne artikel har vi nu hørt, at bjælken også kan lave disse huller. Man skal altså være forsigtig, før man drager konklusioner om mørkt stof ud fra huller i stjernestrømme. Hvis man finder et hul i en af disse stjernestrømme kan man derfor ikke længere gå ud fra, at dette var på grund af at en klump af mørkt stof bevægede sig igennem den.

Man kan altså bruge stjernestrømme til at finde ud af, hvordan den galaktiske bjælke i Mælkevejen

bevæger sig, hvor meget den vejer og måske hvordan den er dannet. Derudover er opdagelsen af, at bjælken kan slå huller i stjernestrømme vigtig at holde i mente, når vi vil teste teorier for mørkt stof. Det vil være svært at se forskel på huller dannet fra den galaktiske bjælke og dem, der kunne være dannet af klumper af mørkt stof, men nye teleskoper kan hjælpe med dette (fx Gaia rumteleskopet).

Litteratur

- [1] K. V. Johnston (1998) *A Prescription for Building the Milky Way's Halo from Disrupted Satellites*, *Astrophysical Journal*, bind **495**, side 297.
- [2] O. Gerhard (2011) *Pattern speeds in the Milky Way*, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, bind **18**, side 185.
- [3] M. Odenkirchen, E. K. Grebel, W. Dehnen, H.-W. Rix, og K. M. Cudworth (2002) *Kinematic Study of the Disrupting Globular Cluster Palomar 5 Using VLT Spectra*, *Astronomical Journal*, bind **124**, side 1497.
- [4] W. Dehnen, M. Odenkirchen, E. K. Grebel og H.-W. Rix (2004) *Modeling the Disruption of the Globular Cluster Palomar 5 by Galactic Tides*, *Astronomical Journal*, bind **127**, side 2753.
- [5] E. J. Bernard m.fl. (2016) *A Synoptic Map of Halo Substructures from the Pan-STARRS1 3 Survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **463**, side 1759.
- [6] S. Pearson m.fl. (2017) *Gaps and length asymmetry in the stellar stream Palomar 5 as effects of Galactic bar rotation*, *Nature Astronomy*, bind **1**, side 633-639.
- [7] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela og F. Prada (1999) *Where Are the Missing Galactic Satellites?*, *Astrophysical Journal*, bind **522**, side 82.
- [8] J. Bovy, D. Erkal og J. L. Sanders (2017) *Linear perturbation theory for tidal streams and the small-scale CDM power spectrum*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **466**, side 628.
- [9] J. H. Yoon, K. V. Johnston og D. W. Hogg (2011) *Clumpy Streams from Clumpy Halos: Detecting Missing Satellites with Cold Stellar Structures*, *Astrophysical Journal*, bind **731**, side 58.
- [10] J. Diemand m.fl. (2008) *Clumps and streams in the local dark matter distribution*, *Nature*, bind **454**, side 735-738.



Sarah Pearson er PhD-studerende i astrofysik ved Columbia University, New York. Sarah fik sin bachelorgrad i fysik fra Københavns Universitet i 2012, og hun er ekspert i galakser, galakse-kollisioner og mørkt stof. Udover sin forskning har Sarah en passion for formidling af astrofysik til omverdenen, og hun startede derfor i 2017 en YouTube-kanal "Space with Sarah", hvor hun svarer på spørgsmål om rummet i korte videoer.

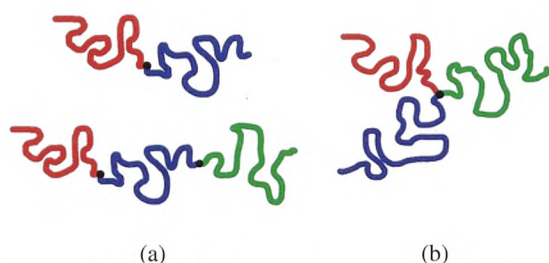
Strukturel kompleksitet i bløde materialer

Af Jacob Kirkensgaard, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Selvansamling af blokpolymerer muliggør dannelsen af en række spektakulære nanostrukturer og giver indsigt i fundamentale spørgsmål om optimale rumpakninger og samspillet mellem geometri og topologi.

Blokpolymerer

Polymerer er makromolekyler bygget af kæder af underenheder. Naturligt forekommende eksempler på polymerer inkluderer proteiner bygget af kæder af aminosyrer eller cellulose bygget af kæder af glukoseenheder. De fleste syntetiske polymerer er bygget fra en enkelt underenhed, monomeren og betegnes som homopolymerer. Forbindelsen af to eller flere homopolymerkæder til et større makromolekyle betegnes en *blokpolymer*, og disse kan fremstilles med adskillige komponenter forbundet i både lineære eller forgrenede molekylære arkitekturer som illustreret i figur 1.

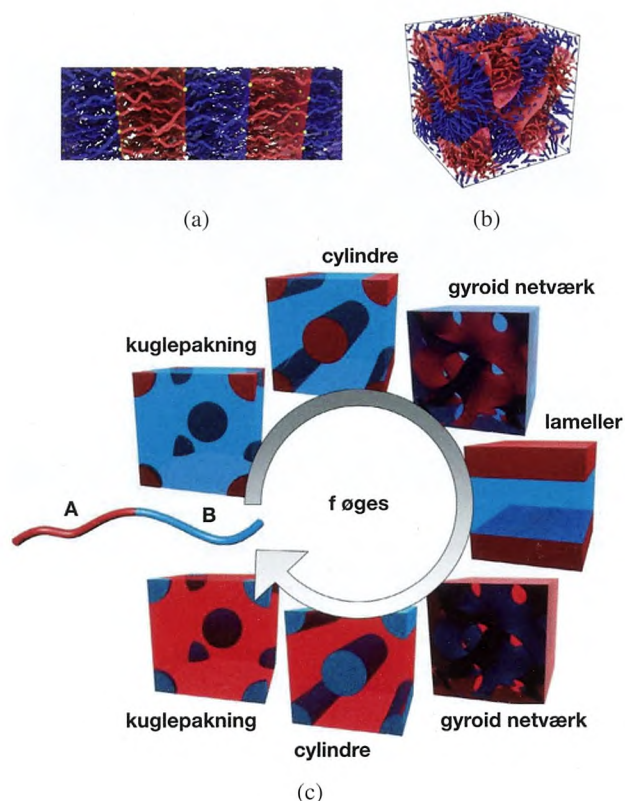


Figur 1. Eksempler på forskellige blokpolymerarkitekturer og nomenklatur: (a) Lineær AB diblockcopolymer og ABC triblockterpolymer. (b) Stjerneformet mikroarm ABC triblockterpolymer. Bemærk at hver af de farvede polymerkæder, hhv. A, B, C osv., er opbygget af mange monomerer. Følgende farvekode anvendes gennem hele artiklen: rød A, blå B, grøn C og gul D.

Blokpolymerer er interessante materialer, dels som selvansamlende strukturdannere i forskellige opløsningsmidler, dels som *smelter*, dvs. som rene stoffer hvor de kan opføre sig som flydende krystaller under de rette betingelser. Fordi kæderne er bundet sammen forhindres deres naturlige tendens til at (makro)faseeparere til adskilte domæner, analogt til olie og vand. Istedet forekommer mikrofase separation hvor kædernes konnektivitet medfører dannelsen af ordnede strukturer med karakteristiske længdeskalaer i størrelsesordenen af kædernes dimensioner (ca. 10 – 100 nm). I figur 2(a,b) er illustreret hvordan kæderne lokalt er uordnede (flydende) men på en lang længdeskala organiserer sig i ordnede strukturer (krystaller).

Dannelsen af ordnede mikrofaseparate strukturer i blokpolymer-smelter kan forstås som et kompromis mellem overfladespænding mellem de forskellige kemiske domæner og entropien af kæderne, hvor det ultimative mål er at opnå en ligelig fordeling af domænestørrelser og overfladekrumning i systemet mens den lokale og globale pakningsfrustration af kæderne samtidig minimeres.

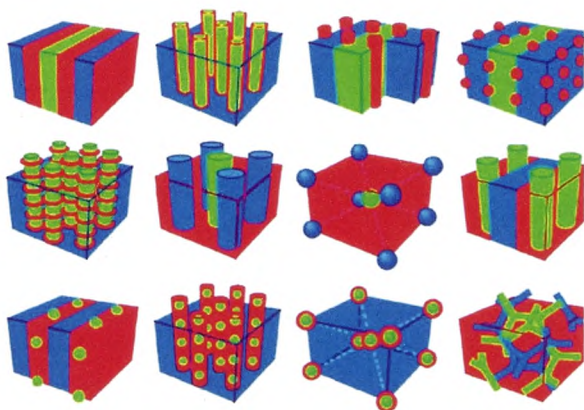
Samspillet mellem disse til tider modsatrettede tendenser giver anledning til dannelsen af spektakulære og komplicerede nanostrukturer. Samtidig øges kompleksiteten naturligt desto flere komponenter der indgår og påvirkes også af de enkelte makromolekylers arkitektur, eller molekylære topologi.



Figur 2. Illustration af kædernes lokale uordnede pakning, men globale ordnede pakning i hhv. lamel (a) og gyroidstrukturen (b). Figurer af M. Fischer. (c) De fire dominerende ligevægtsstrukturer i diblokssystemer. En symmetrisk diblok danner lameller og som asymmetrien stiger finder man hhv. gyroid netværk, hexagonalt pakkede cylindre og kubisk kuglepakning. Figur modificeret fra [1].

Lineære AB blokpolymerer

De simpleste og mest velforståede blokpolymerer er lineære AB diblokke illustreret i figur 1(a) – altså en blokpolymer bestående af to kæder kovalent bundet. Diblokkenes faseopførsel er primært bestemt af to parametre: kompositionen beskrevet ved volumenfraktionen af blokkene ($f = f_A = 1 - f_B$) og segregeringsstyrken som angiver hvor kemisk inkompatible de to kæder er.



Figur 3. Et udsnit af strukturer fundet i lineære ABC terpolymerer. Bemærk den trefarvede gyroid-struktur nederst til højre som er en kiral struktur. Figur fra [2].

Fasediagrammet for diblokke består hovedsageligt af fire ordnede faser der er generelt accepteret som termodynamisk stabile ligevægtsstrukturer: en rumcentreret kubisk kuglepakning, hexagonalt pakkeede cylindre, gyroidstrukturen - en bicontinueret netværksstruktur - og endelig en lamelstruktur - se figur 2(c). Lamelstrukturer findes når diblokken er symmetrisk, dvs. A og B domænerne optager tæt på det samme volumen mens de øvrige strukturer formes når asymmetrien øges.

Lineære ABC blokpolymerer

Udvider man antallet af komponenter til tre og sætter dem sammen på række, som i lineære ABC blokpolymerer, stiger antallet af forskellige ordnede strukturer dramatisk. Der er hidtil identificeret >35 forskellige ordnede strukturer i lineære ABC blokpolymersystemer, hvoraf et udsnit er vist i figur 3. Et fælles karaktertræk mellem de strukturer man finder i lineære ABC og simplere AB systemers strukturer er, at grænsefladen mellem de forskellige kemiske domæner kan beskrives med matematiske flader. For eksempel vil man sige, at grænsefladerne i de fire diblokstrukturer vist i figur 2 kan beskrives som kugle, cylinder, minimalflade og plan for hhv. kuglepakning, cylinderstruktur, gyroid og lamel-struktur. Som vi vil se herunder skal dette koncept udvides når vi tillader forgrenede molekyllære arkitekturer som fx stjerner. En særlig interessant struktur

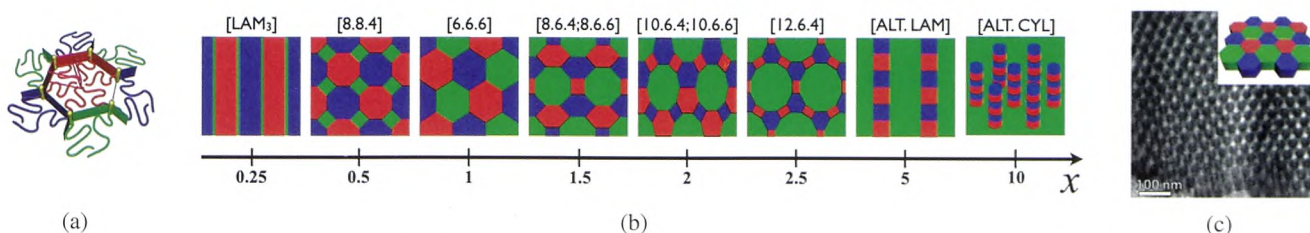
er den tre-farvede gyroid i nederste højre hjørne af figur 3. Gyroiden er opbygget af to treforgrenede net viklet ind i hinanden. Det helt specielle er at de to net er spejlbilledisomerer, dvs. det ene net er venstredrejet mens det andet er højredrejet - de har modsat *kiralitet*. I dibloksystemer består begge net af samme kemiske materiale og strukturen er derfor overordnet ikke kiral, men i ABC gyroiden er de to net dannet af kemisk forskellige kæder hvorved symmetrien brydes og den resulterende struktur er kiral.

ABC stjerne blokpolymerer

Har man udvidet antallet af komponenter til mere end to, bliver det muligt at ændre topologien af molekylet fra lineært til forgrenet. I tilfældet med tre komponenter resulterer det i et trearmet molekyle kaldet en ABC 'miktoarm' stjerne blokpolymer, se figur 1(b). Mikto er det græske ord for 'blandet'. Som nævnt ovenfor vil der imellem hvert par af komponenter dannes en grænseflade (AB, AC, BC), men pga. af stjernearkitekturen er disse tre grænseflader tvunget til at mødes langs en linie hvor molekylecentrene placerer sig (se figur 4(a)). Herved pålægges et topologisk bånd på hvilke mulige strukturer disse molekyler kan danne - de skal indeholde tre grænseflader, der mødes langs disse molekylecenterlinjer.

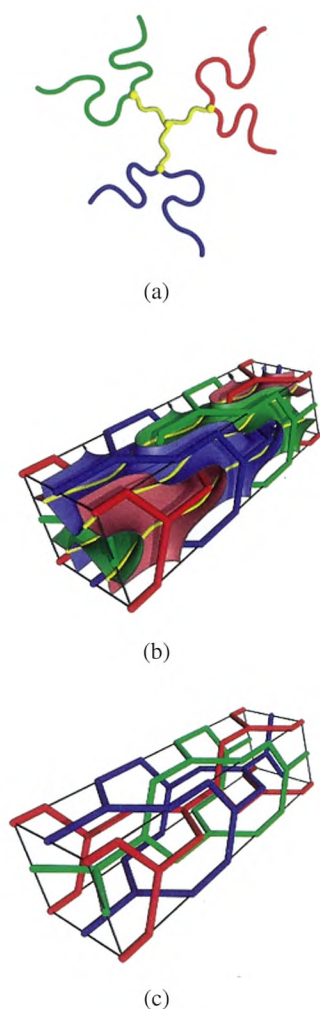
I figur 4(b) er dette illustreret med et generisk fase-diagram baseret på både eksperimenter og simuleringer. Der betragtes en situation hvor to af komponenterne (rød A og blå B) hver udgør den samme volumenfraktion i systemet, og hvor størrelsen af den sidste komponent (grøn C) varieres relativt til de to andre. Aksen på figuren er således det relative volumen af C i forhold til A kvantificeret ved parameteren x (for $x = 2$ er C-armen altså dobbelt så lang som A-armen).

For små x er molekylet effektivt set en symmetrisk AB diblok, og vi finder en lamelstruktur som forventet. Når x øges, fremkommer en region for ca. $0,5 < x < 2,5$ hvor ligevægtsstrukturene er cylindriske faser, hvis tværsnit er tre-farvede arkimediske flisemønstre. Bemærk at som x øges varieres der systematisk så C komponenten danner polygoner med progressivt højere antal kanter. En anden interessant konsekvens af den molekyllære arkitektur er, at hvert knudepunkt i flisemønsteret skal omgives af tre forskellige farver



Figur 4. (a) Polygondomæner i smelter af ABC stjerner. Molekylecentrene pakker langs linjer hvor de tre domæner mødes. (b) Generisk fasediagram for ABC stjernepolymerer hvor A og B komponenter har samme volumen og x -parameteren beskriver volumenratioen mellem C og A komponenten. Flisemønstrene beskrives ud fra hvilke polygoner de forskellige knudepunkter omgives af, fx [6.6.6] i den hexagonale pakning for $x = 1$. (c) Eksperimentel transmissionselektronmikroskopi observation af [6.6.6] flisemønster i 3-armet stjernesystem med domæner af polydimethylsiloxane (hvide domæner), poly(1,4-isoprene) (sorte domæner) og poly(methyl methacrylate) (grå domæner). Fra [3].

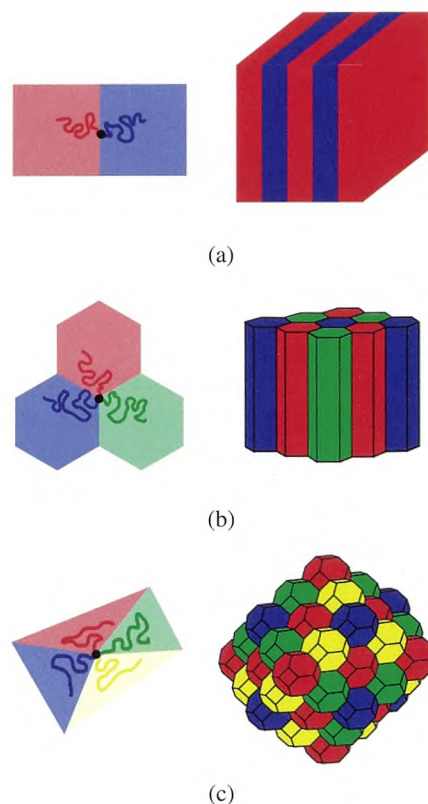
hvilket umuliggør at flisemønstrene kan indeholde ulige polygoner! For x højere end ca. 3 dannes såkaldte *hierakiske* faser, dvs. strukturer med orden på mere end en længdeskala, først en alternerende lamelstruktur hvor to lamelstakke organiserer sig vinkelret på hinanden og dernæst hexagonalt pakkede lamellære cylindre. Som nævnt ovenfor sætter forbindelsen mellem ABC-stjerner en topologisk begrænsning på de mulige selvansamlingsmorfologier, men fører også til nye muligheder. En meget spændende mulighed er en generalisering af bikontinuerte faser som den ovenfor nævnte gyroid i form af nye tri- og polykontinuerlige morfologier [4]. I figur 5 er vist et eksempel hvor en ændring af den molekylære arkitektur, bl.a. indsættelsen af en forstørret kerne, forskubber balancen mellem overfladespænding og kædepakningsentropi nok til at stabilisere en spektakulær *trikontinuert* fase. Dvs. rummet nu er fyldt ud af tre ækvivalente, kontinuerte og periodiske domæner viklet ind i hinanden, men hvor hvert domæne indeholder forskellig kemi.



Figur 5. (a) En $A_2B_2C_2$ miktoarm stjerne blokpolymer med udvidet kerne. (b) Trikontinuert struktur dannet af molekylet fra (a). Tre treforgrenede net er viklet sammen og udfylder rummet. (c) Net-repræsentation af de tre sæt kanaler. Figurer fra [4].

ABCD stjerne blokpolymerer

“Har du sagt ABC må du også sige ABCD!” Polymer-syntesekemikere kan nu i princippet fremstille vilkårligt komplicerede molekylære arkitekturer opbygget af mange forskellige komponenter – og eksempelvis er ABCD 4-miktoarm stjerner blevet fremstillet af flere forskningsgrupper. Der eksisterer dog endnu ikke nogen strukturelle studier af disse molekyler, så her må vi indtil videre søge viden fra computersimuleringer. Molekyler med fire komponenter, hvor kemi og komposition kan varieres uafhængigt, udgør selvfølgelig et helt uoverskueligt stort faserum så lad os begrænse os til en situation med 4 lige lange kæder som vekselvirker symmetrisk – analogt med ABC stjernen nævnt overfor som dannede [6.6.6] flisemønsteret. Monte Carlo simuleringer har vist at et sådant molekyle vil danne en ordnet struktur hvor hver polymerkæde danner afgrænsede cellulære domæner, se figur 6(c).



Figur 6. Den fælles grænseflade ændrer dimensionalitet når den molekylære arkitektur ændres for symmetriske blokpolymerer. (a) Diblokke danner lameller – 2D grænseflade (b) Triblokke danner flisemønstre – 1D og 2D grænseflader (c) Tetrablokke danner cellulære strukturer – 0D, 1D og 2D grænseflader. Sidstnævnte er et fire-farvet Kelvin-skum.

Ligevægtsstrukturen for en symmetrisk ABCD stjerne er altså *ikke* en cylinderstruktur med et 4-farvet kvadratisk [4.4.4.4] flisemønster analogt til ABC stjernerne. Bemærk hvordan dimensionaliteten af den fælles grænseflade for alle domæner ændres sig med konnektiviteten af molekylerne – fra flader (2D - diblokke) til linier (1D - triblokke) til punkter (0D - tetrablokke) – se figur 6. Denne forudsagte struktur er helt spektakulær:



Figur 7. Beijing National Aquatics Center er baseret på et Weaire-Phelan-skum.

hvert domæne er en trunkeret oktahedron (eller mere teknisk: Wigner-Seitz cellen af et kubisk rumcentrert gitter) og betegnes populært et Kelvin-skum. Lord Kelvin postulerede i 1887 at den optimale pakning af rummet med polyhedra med samme volumen var via trunkerede oktahedra som illustreret i figur 6 – hvor der med optimal menes mindst muligt grænsefladeareal pr. volumenenhed. Et Kelvin-skum er relateret til fundamentale spørgsmål vedrørende den mest optimale pakning af rummet. I mange år stod Kelvins konjektur urørt, men i 1993 fremførte Weaire og Phelan numerisk bevis for en mere optimal skumstruktur, se figur 7.

Spørgsmålet er så hvorfor Kelvin-skummet tilsyneladende er optimalt i konteksten af ABCD stjernepolymerer? Svaret skal findes i den topologiske begrænsning som den molekulære arkitektur pålægger – på samme måde som med flisemønstrene nævnt ovenfor tillades de fire-armede ABCD stjerner kun at pakke i polyedre som har sideflader opbygget af lige polygoner. Weaire-Phelan-skummet består imidlertid af to forskellige celler der begge indeholder pentagoner, så denne struktur kan ikke dannes – derfor vinder Kelvin-skummet.

Afsluttende bemærkninger

Det er interessant i hvor mange tilsyneladende urelaterede sammenhænge man genfinder strukturerne beskrevet her: mange af dem optræder helt analogt i amfifile systemer (altså molekyler som har både hydrofile (vand-elskende) og hydrofobe (vandskyende) dele) der danner flydende krystaller, blot på mindre længdeskala og de findes i mange biologiske cellulære systemer, fx i form af såkaldte kubiske membraner. Den bikontinuerte gyroid struktur er i særdeleshed repræsenteret, fx agerer den som farvedannende fotonisk krystal i visse sommerfuglevinger og fornylig blev Weyl fermioner vist at eksistere som en kollektiv eksitation i mikrobølger rejssende gennem en gyroid [5].

En anden nylig realisation er at den fuldstændig analoge faseekvens som diblokke viser (figur 2) optræder i simuleringer af nuklear pasta fra neutronstjerner

[6]. Det synes derfor naturligt at drage konklusionen at studiet af blokpolymer strukturer har generel interesse for systemer hvor geometri og topologi spiller en fundamental rolle og at de sammen med en række andre bløde materialer udgør en frugtbar legeplads for at udforske selvansamling og mulige/optimale rumpakninger.

Litteratur

- [1] I. Botiz and S. Darling, *Materials Today*, 2010, **13**(5), 42–51.
- [2] F. Bates, *MRS Bulletin*, 2005, **30**, 525–532.
- [3] S. Chernyy, J. Kirkensgaard, J. Mahalik, H. Kim, M. M. L. Arras, R. Kumar, B. Sumpter, G. Smith, K. Mortensen, T. Russell, and K. Almdal, *Macromolecules*, 2018, **51**, 1041–1051.
- [4] M. Fischer, L. de Campo, J. Kirkensgaard, S. Hyde, and G. Schröder-Turk, *Macromolecules*, 2014, **47**, 7424–7430.
- [5] L. Lu, Z. Wang, D. Ye, L. Ran, L. Fu, J. Joannopoulos, and M. Soljačić, *Science*, 2015, **349**(6248), 622–624.
- [6] M. E. Caplan and C. J. Horowitz, *Rev. Mod. Phys.*, 2017, **89**, 041002.



Jacob Kirkensgaard er lektor i Forskningsgruppen Neutron- og Røntgenspredning på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Han er særligt interesseret i hvordan molekulær arkitektur påvirker selvansamlingsstrukturer i bløde materialer. Han bruger computersimuleringer til at designe og forudsige nye strukturer og spredningsmetoder til at undersøge virkelige materialer.

Kvantekromodynamikken

– teorien for den stærke vekselvirkning

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

En af de største triumfer i fysikken i det 20. århundrede var skabelsen af kvante-elektrodynamikken, feltteorien for elektromagnetismen. Den forklarer hvorledes elektrisk ladede partikler vekselvirker med hinanden ved udsendelse og absorption af fotoner. Den giver forudsigelser som er testet ved eksperimenter med 8 decimalers nøjagtighed. Det viste sig at blive en formidabel udfordring at lave en tilsvarende teori for den stærke vekselvirkning, som forklarer vekselvirkningen mellem kvarkerne. Det lykkedes dog til sidst og denne teori, som kaldes kvantekromodynamikken indgår nu som en del af Standardmodellen for partikelfysikken. Vi vil i denne artikel prøve at beskrive denne teori, som er lidet kendt udenfor partikelfysik miljøet.

Efter at kvark modellen i løbet af 1960'erne overbevisende havde gjort rede for masser og symmetrier af mesonerne og baryonerne, genstod at finde en feltteori for kvarkernes vekselvirkning. En sådan teori skulle også gerne forklare et af de store mysterier i forståelsen af hadronerne (partikler opbygget af kvarker eller antikvarker):

Hvis alle hadroner består af kvarker med ladning $-1/3$ og $+2/3$ af elementærladningen, hvorledes kan det så være at ingen nogensinde har set en fri kvark? Hvorfor findes kvarkerne kun i kombinationen tre kvarker eller kvark/antikvark par?

Inden vi beskriver udviklingen af feltteorien for kvarkernes vekselvirkning, skal vi se på om der overhovedet fandtes evidens for, at der er "noget" inde i hadronerne eller om kvarker kun er matematiske størrelser, som man troede i 1960'erne.

Den indre struktur af hadroner

I 1963 udførte Richard Taylor, Henry Kendall og Jerome Friedman en række forsøg ved elektron lineacceleratoren SLAC ved Stanford [1]. De undersøgte dybt inelastisk spredning (kollisioner hvor der skabes mange sekundære partikler) af elektroner mod protoner og neutroner, for at studere nukleonernes eventuelle indre struktur. Dette er analogt med de forsøg som Rutherford udførte, da han afslørede atomkernens eksistens. Grunden til at man anvendte elektroner, er at disse ikke selv har nogen indre struktur (de er punktformede) og da de er upåvirket af kernekræfterne, vil de kun mærke den elektromagnetiske vekselvirkning.

Ligesom ved Rutherfords forsøg, ville en jævn ladningsfordeling inde i nukleonerne føre til at meget højenergetiske elektroner kun vil opleve en lille afbøjning, mens en koncentration af ladningen i kvarker vil afsløre sig ved, at nogle elektroner vil ramme en kvark og afbøjes i stor vinkel. Taylor har senere fortalt at de forventede at finde meget få elektroner afbøjet i store vinkler, svarende til en jævn ladningsfordeling, lidt à la Thomsons plumbudding model for atomet. Hvad de fandt, var lige så overraskende som Rutherfords spredningsforsøg:

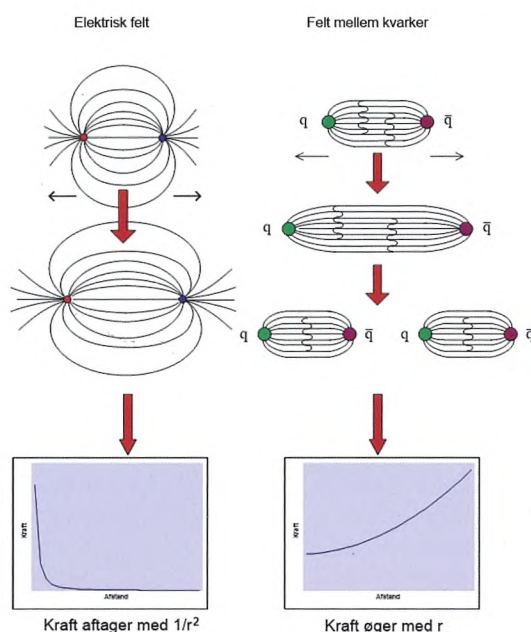
En stor del af elektronerne blev spredt i meget store vinkler. Den observerede vinkelfordeling var konsistent med at protonen består af tre punktformede ladninger!

Endvidere fandt de, at for lavere energier afhænger strukturfunktionen (en funktion som beskriver indre struktur) for protonen af elektronernes energi og af størrelsen af den impuls som overføres ved kollisionen, men når elektronernes energi øges afhænger strukturfunktionen ikke længere af energien. Dette kaldes Bjorken skalering efter den teoretiske fysiker James Bjorken [2].

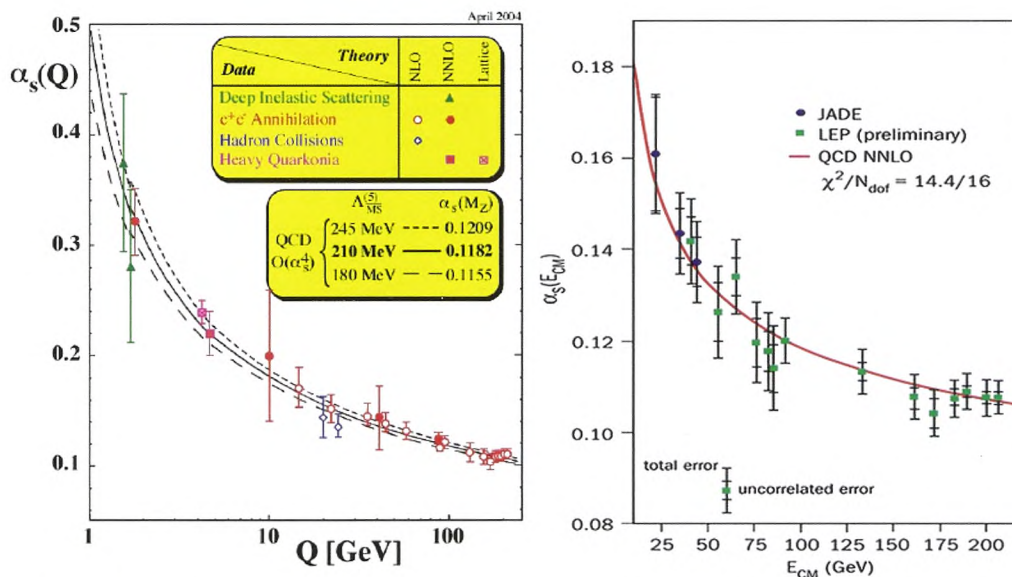
Forklaringen på dette blev fundet af Richard P. Feynmann: Des højere energi elektronerne havde, des mere opførte protonens bestanddele sig som frie partikler [3].

Feltteorien for kvarkerne

Det store gennembrud for den teoretiske fysik i 1970'erne var skabelsen af en feltteori for den stærke vekselvirkning. En sådan teori skulle ligne kvante-elektrodynamikken så meget som muligt, men skulle forklare hvorfor kvarker altid er bundet i kombinationer af tre kvarker (baryoner) eller en kvark og en antikvark (mesoner). Man måtte derfor lede efter et felt som var fundamentalt anderledes end det elektromagnetiske felt.



Figur 1. Feltet mellem to partikler med modsat elektrisk ladning (tv) og feltet mellem to kvarker (th).



Figur 2. Variation af koblingskonstanten for den stærke vekselvirkning. Højere energi (i GeV) svarer til højere impuls.

Lad os først betragte det elektromagnetiske felt. Dette felt skyldes udveksling af virtuelle fotoner. Alle partikler med ladning kan udsende og absorbere fotoner. Der findes positiv og negativ ladning og ulige ladninger tiltrækker hinanden, mens lige ladninger frastøder hinanden. Vi kan kun skabe bundne tilstande af partikler med forskellig ladning.

To elektriske ladninger tiltrækker eller frastøder hinanden med en kraft der aftager med kvadratet af afstanden. Dette skyldes at feltet er sfærisk symmetrisk og skalerer som arealet af en kugleflade.

Men hvad sker der hvis feltet tiltrækker sig selv?

Hvis feltet tiltrækker sig selv, vil feltlinjerne samles til et rør, som forbinder de to ladninger. Når ladningerne fjernes fra hinanden, bliver røret længere, men feltet beholder samme styrke. Bliver vi ved med at trække ladningerne fra hinanden, sker det at når vi har tilført tilstrækkelig energi, dannes der et partikel/antipartikel par og røret "knækker" som illustreret på figur 1.

Et sådant felt vil give en kraft der øger med afstanden og det vil kræve uendelig energi at separere ladningene. Det er præcis sådan et felt, der er ophavet til kraften mellem kvarkerne og forklarer hvorfor vi ikke kan separere dem fra hinanden.

Asymptotisk frihed

Indtil starten af 1970'erne var der få fysikere som mente at kvarkerne havde nogen fysisk realitet eller at kvantefeltteori kunne anvendes på den stærke vekselvirkning. Tværtimod var den fremherskende teori dengang at alle elementarpartiklerne bestod af en blanding af hinanden (bølgefunktionen for en partikel var en blanding af bølgefunktionen for alle de andre), den såkaldte Bootstrap model.

Men i 1969 begyndte David J. Gross ved Princeton universitetet at prøve at forstå den Bjorken skalering som var observeret ved dyb inelastisk spredning (Taylor, Kendall og Friedman). Han kunne påvise at protonen opfører sig som om den består af punktformede partik-

ler med spin = 1/2. Videre fandt han at bestanddelene havde baryontal = 1/3. Men ingen kendt teori kunne forklare hvorledes sådanne partikler kunne opføre sig som frie partikler, da de jo måtte udøve en enorm tiltrækning på hinanden via den stærke vekselvirkning.

Gross besluttede sig for at prøve om han kunne konstruere en feltteori som kunne forklare denne asymptotiske frihed (asymptotisk: højere energi = mere frihed). Fra 1972 arbejdede han sammen med PhD-studenten Frank Wilczek og senere også David Politzer. De fandt inspiration i et gammelt arbejde af Chen-Nin Yang og Robert Mills fra 1954 hvor de havde forsøgt at konstruere en feltteori baseret på SU(2) gruppen for isospin og gauge symmetri (dvs. at da fasen af feltet ikke kan måles, må teorien være uafhængig af justering af fasen) [5].

Gross, Wilczek og Politzer konstruerede en teori [4] baseret på gauge symmetri, hvor kvarkerne i tillæg til den elektriske ladning, havde en ny ladning kaldet farveladning, med værdierne rød, grøn og blå. Årsagen til at der skulle være tre værdier var at det ville gøre det mulig at baryonernes bølgefunktion kunne blive antisymmetrisk, som krævet af Pauliforbudet, da baryonerne er fermioner. Teorien var baseret på eksakt SU(3) symmetri i farve kvantetallet. Til at formidle feltet mellem kvarkerne indførte de en ny partikel, gluonen, som spiller samme rolle i den stærke vekselvirkning som fotonen spiller i elektromagnetismen. Men i modsætning til fotonen, har gluonen selv ladning (farveladning). Dette gør at gluonerne mellem kvarkerne udfører en form for afskærmning af feltet, ligesom et magnetiserbart materiale som jern, afskærmer magnetisme.

I feltteorier med ladede partikler vil koblingskonstanten (styrken af feltets kobling til partiklen) afhænge af afstanden og dermed den overførte impuls (efter usikkerhedsrelationen) fordi vakuum indeholder virtuelle partikel/antipartikel par, som skærmer feltet. Normalt øger koblingskonstanten med impulsen, fordi partiklerne kommer tættere på hinanden. Dette er til-

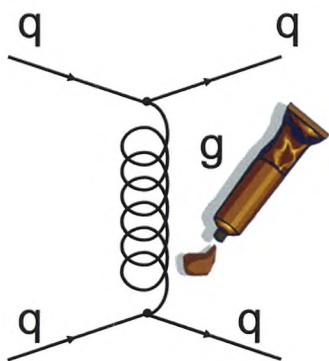
fælde for den elektromagnetiske vekselvirkning hvor finstruktur konstanten, der normalt er $1/137$ øger til $1/127$ ved høje impulser. En tilsvarende effekt ses ved den svage vekselvirkning. Men i den ny teori falder koblingskonstanten logaritmisk med impulsen.

Nu kunne Gross vise at deres nye teori havde både Bjorken skalering og asymptotisk frihed. Videre kunne man konstruere bølgefunktioner for alle mesoner og baryoner og de kunne beregne partiklernes masser med stor nøjagtighed, samt strukturfunktionerne til beregning af spredningsvikler og forholdet mellem forskellige mulige udfald af spredningsforsøg. Dette var en af de største succeser for kvantefeltteori siden kvanteelektrodynamikken. Pludselig faldt brikkerne på plads i vores forståelse af den stærke vekselvirkning. Teorien fik navnet QCD, kvantekromodynamikken.

På figur 2 ser vi hvorledes den målte værdi for koblingskonstanten α_s smukt følger den teoretiske forudsigtelse [6], det vil sige at koblingskonstanten aftager når energien (i GeV) og dermed impulsen, øger.

Gross, Wilczek og Politzer fik nobelprisen i fysik i 2004 for deres teori for asymptotisk frihed.

Den sidste brik i puslespillet var at vise at teorien var renormaliserbar, dvs. at uendelighederne kan fjernes (uendeligheder har en tendens til at dukke op i kvante feltteorier). Heldigvis havde den hollandske fysiker Gerard 't Hooft (Nobelprisen i 1999 sammen med Martinus Veltman) vist at alle (ikke abelske) gauge invariante feltteorier er renormaliserbare, selv ved brud på symmetrien [7].

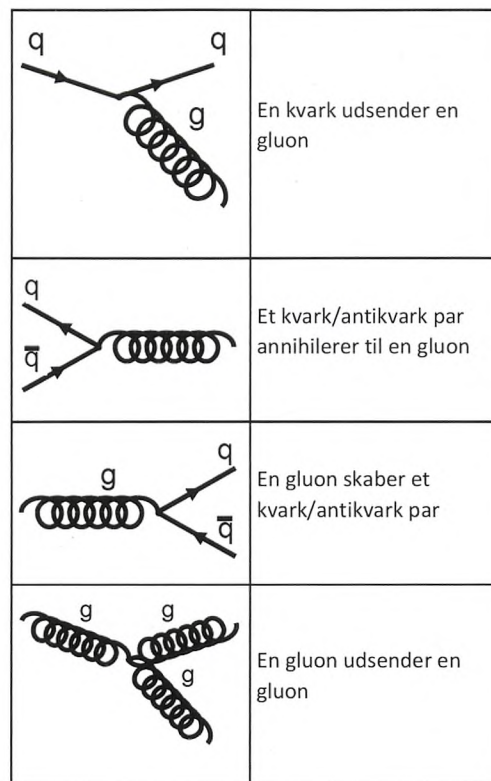


Figur 3. Feynmann diagram.

Gluonerne

Som nævnt kaldes bæreren af den stærke vekselvirkning for gluonen (limpartiklen). Vi kan illustrere vekselvirkningen med simple diagrammer kaldet Feynmann diagrammer. Her repræsenterer den horisontale akse tiden og den vertikale akse rumkoordinaterne. En heltrukket linje med pil mod højre er en partikel mens en pil til venstre er en antipartikel. En bølgelinje er en foton eller gluon. Når tre linjer mødes i et punkt, sker der en vekselvirkning hvis styrke bestemmes af koblingskonstanten. Hvert ben i diagrammet repræsenterer et matematisk udtryk og ud fra Feynmann diagrammet kan man udregne en amplitude. For at udregne sandsynligheden for en bestemt sluttillstand, skal man summere amplituderne for alle diagrammer, som kan give denne sluttillstand.

Gluonen er som fotonen en vektor boson (spin = 1), men i modsætning til fotonen har den selv ladning og kobler til sig selv, dvs. gluoner kan udsende og absorbere gluoner. Dette giver følgende grundlæggende diagrammer for vekselvirkningen mellem kvarker og gluoner (figur 4).



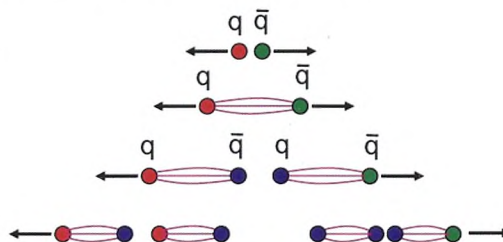
Figur 4. Vekselvirkningen mellem kvarker og gluoner.

Fordi gluonen vekselvirker med sig selv, vil gluon feltet samle sig et rør.



Figur 5. Gluonen vekselvirker med sig selv.

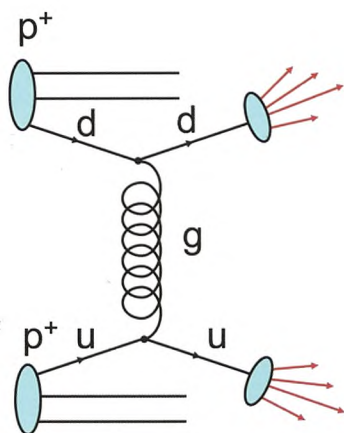
Dette gør at når vi prøver at fjerne kvarkerne fra hinanden, vil vi tilføre nok energi til at skabe flere kvark/antikvark par som vist på figur 6.



Figur 6. Dannelse af kvark-antikvark par.

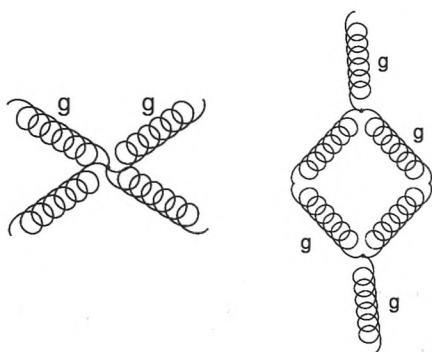
Dette er årsagen til de jets af partikler vi observerer ved sammenstød med hadroner.

Figur 7 viser et eksempel på Feynmann diagrammet for inelastisk sammenstød mellem to protoner.



Figur 7. Inelastisk sammenstød mellem to protoner.

Da gluonerne vekselvirker med sig selv, har vi alle former for gluon-gluon spredning og indre loops som giver ophav til den afskærmning, som påvirker koblingskonstanten (figur 8).



Figur 8. Vekselvirkning mellem gluoner.

Farveladning

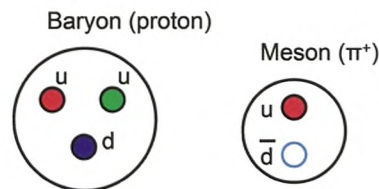
Som vi har nævnt introducerede QCD en ny form for ladning, associeret med en stærke vekselvirkning [8]. Da denne ladning har tre værdier, faldt det naturligt at bruge analogien til grundfarverne i RGB systemet og kalde værdierne for rød, grøn og blå. Dette har selvsagt intet med lysets farver at gøre, det er kun en nem måde at betegne ladningen på, ligesom + og - for elektrisk ladning. Hver kvark findes nu i tre udgaver med forskellig farve, mens antikvarerne har en antifarve, her angivet ved komplementærfarverne (figur 9).

Kvarker	Anti-kvarker
rød	antirød
grøn	antigrøn
blå	antiblå

Figur 9. Farveladning.

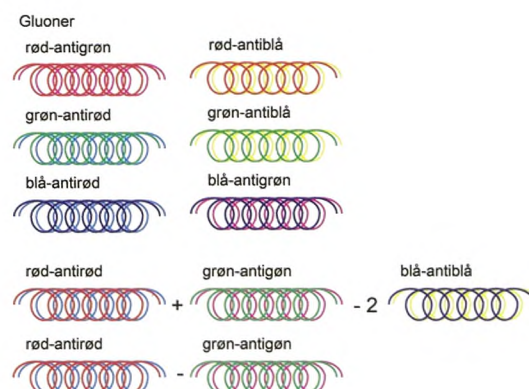
Nu får bølgefunktionen for hadronerne den rigtige paritet (odde for fermionerne og lige for mesonerne). Alle baryonerne består af tre kvarker med forskellig farve og er derfor "hvide" mens mesonerne består af en kvark med en farve og en antikvark med den tilsvarende

antifarve og er derfor også hvide. Kun hvide partikler er tilladt og vupti, vi har "forklaret" hvorfor der ikke findes partikler med flere eller færre kvarker.



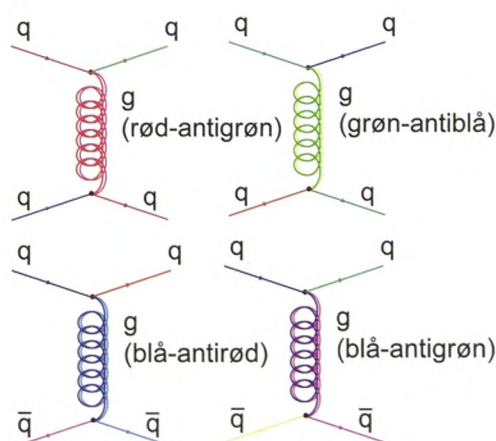
Figur 10. Farveladning i baryoner og mesoner.

For gluonerne er situationen lidt mere kompliceret. En kvark kan skifte farve ved at udsende en gluon og det samme kan en antikvark. Det skulle give $3 \times 3 = 9$ kombinationer, men den ene er kombinationen $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$. Den bortfalder da den er hvid (farve neutral) og følgelig ville kunne slippe ud af partiklen. De forskellige reaktioner svarer til rotationer i et tredimensionalt farverum og symmetrigruppen er den velkendte SU(3). Vi står derfor tilbage med otte gluoner, som hver bærer en farve og en antifarve. De otte gluoner er vist i figur 11.



Figur 11. Farveladning i gluoner.

Som vi ser er de to sidste gluoner linearkombinationer af farve/antifarve. Kun partikler med farveladning kan udsende eller absorbere gluoner, derfor mærker leptonerne ikke den stærke vekselvirkning.



Figur 12. Kvark/kvark spredning.

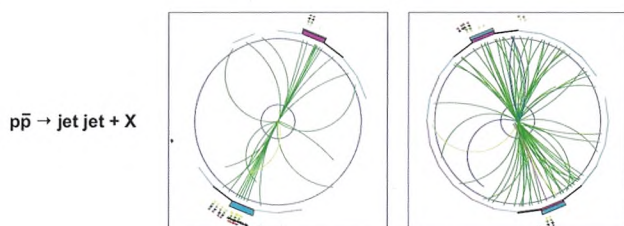
Vi kan nu tegne et par Feynmann diagrammer med eksempler på farveskifte. Først et eksempel på kvark/kvark spredning (figur 12).

Vi må fremhæve at der ikke eksisterer nogen måde at observere en kvarks farve på. Den er udelukkende en matematisk størrelse, som er indført for at give teorien den rigtige symmetri.

Eksperimentel verifikation af QCD

QCD giver meget nøjagtige forudsigelser af alle kendte eksperimentelle data, ikke kun partikel masserne men også levetider og forholdet mellem forskellige henfald [9]. Vi kan lige vise et par eksempler.

Når protoner og antiprotoner kolliderer ved lager-ringerne ved Tevatronen i Stanford, producerer de jets af sekundærpartikler fra kvarkerne når de prøver at undslippe og røret af feltet brydes. Figur 13 viser et par eksempler på sådanne jets.



Figur 13. Jets observeret fra kvarker som forsøger at undslippe.

Ud fra QCD kan man beregne vinkelfordelingen af disse jets ved forskellige energier. Som vi ser viser disse beregninger en overbevisende overensstemmelse med målingerne. Figur 14 viser sandsynligheden for spredning i forskellige vinkler, som funktion af overført transversal energi.

Vi har nu også direkte bevis på gluon produktion ved CERNs LEP elektron/positron lagring. Her ser vi et eksempel på reaktionen:

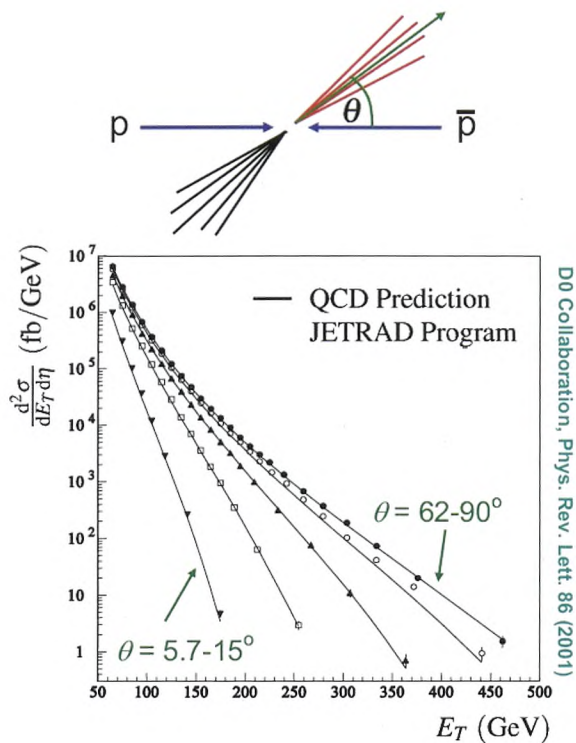
$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow q + \bar{q} + g \quad (1)$$

De to kvarker og gluonen giver hver en jet som tydelig ses i detektoren (figur 15).

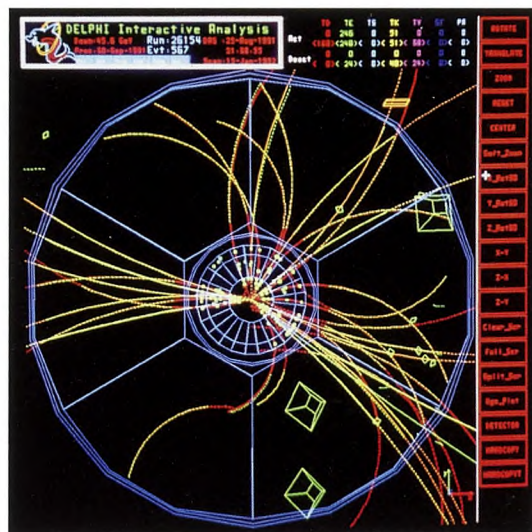
Valenskvarker og søkvarker

De tre kvarker i baryoner og kvark/antikvark parret i mesoner, som giver partiklen dens ladning, spin, isospin, charme osv. kaldes valenskvarker. I tillæg til disse findes der en sø af virtuelle kvar/antikvark par og gluoner som skyldes kobling af højere ordens Feynmann diagrammer til valens kvarkerne [10]. Nogle eksempler på sådanne diagrammer findes på figur 16.

På grund af den stærke kobling mellem kvarker og gluoner, er hadronerne fulde af virtuelle kvark/antikvark par. Disse kaldes søkvarker. Ved spredning af f.eks. neutrinoer mod protoner, kan man derfor opleve at neutrinoen vekselvirker med en strange kvark, selv om protonen ikke indeholder stangeness. Dette skyldes at det kun er valenskvarkerne der er u og d kvarker, mens søkvarkerne også indeholder strange (og charm + en lille smule top og og bottom).

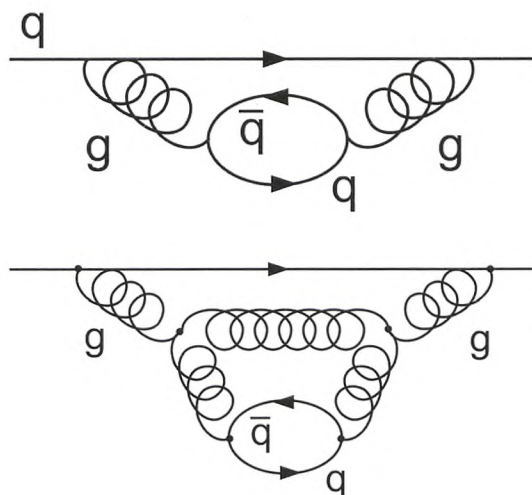


Figur 14. Vinkelfordeling af jets fra kvarker.



Figur 15. Jets fra to kvarker og en gluon.

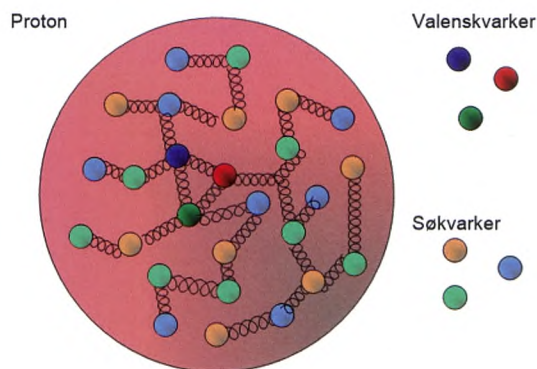
Da gluonerne kobler lige stærkt til kvarkerne som til hinanden, er hadronerne også fulde af gluoner. De kommer dels fra kraften mellem valenskvarkerne, men også fra at gluonen selv udsender nye gluoner. Dette medfører, at en væsentlig del af hadroners energi ligger i gluonerne. Selv om de er masseløse, kan de alligevel have impuls og man regner med, at ca. halvdelen af hadronernes impuls bæres af gluonerne, mens valenskvarkerne bærer den anden halvdel. Tilsvarende udgør valenskvarkernes masse kun en lille del af hadronens totale masse. Det meste af massen kommer fra bindingsenergi i feltet, altså fra gluonerne.



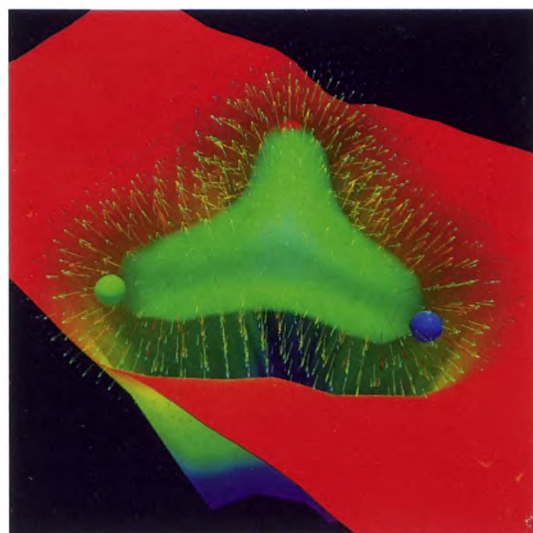
Figur 16. Dannelse af søkvarker.

Elementarpartiklernes masse

Det viser sig at den langt overvejende del af hadronernes masse skyldes bindingsenergi i gluonfeltet. For at illustrere dette vil vi sammenligne brint atomet med protonen. Brint atomet er en bundet tilstand af en elektron og en proton bundet sammen af den elektromagnetiske vekselvirkning.



Figur 17. Valenskvarker og søkvarker i protonen.



Figur 18. Gluonfeltet i protonen.

Brintatomets masse er 938,5 MeV, hvoraf bindingsenergien er 13,6 eV ($1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$). Protonens masse er 938 MeV, men summen af masserne til de tre kvarker er ca. 12 MeV, det vil sige at 98,7% af protonens masse er bindingsenergi og vakuum polarisations energi fra gluonfeltet.

Figur 18 viser en computerberegning af gluonfeltet mellem valenskvarkerne i protonen. Pilene angiver graderterne i fluksen af feltet [11].

Litteratur

- [1] Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall og Richard E. Taylor (1991) *Deep inelastic scattering*, Rev. Mod. Phys., bind **63**, side 629.
- [2] J. Bjorken og E. Paschos (1969) *Inelastic Electron-Proton and γ -Proton Scattering and the Structure of the Nucleon*, Physical Review, bind **185**, side 1975–1982.
- [3] R. P. Feynman (1969) *The Behavior of Hadron Collisions at Extreme Energies. High Energy Collisions: Third International Conference at Stony Brook, N.Y.* Gordon & Breach, side 237–249.
- [4] F. Wilczek og D. J. Gross (1973) *Asymptotically Free Gauge Theories*, Physical Review D., bind **8**, side 3633.
- [5] C. N. Yang og R. Mills (1954) *Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance*, Physical Review D, bind **96**, side 191–195.
- [6] T. Wengler (2006) *Determination of the strong coupling constant at LEP*, Proceedings of DIS06, XIV International Workshop on Deep Inelastic Scattering, Tsukuba, Japan, 20-24 April.
- [7] G. 't Hooft og M. Veltman (1972) *Combinatorics of Gauge Fields*, Nuclear Physics, bind **B44**, side 189, ibid. bind **B50**, side 318.
- [8] O. W. Greenberg (1964) *Spin and Unitary-Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons*, Phys. Rev. Lett., bind **13**, side 598.
- [9] S. Bethke (1964) *Experimental tests of asymptotic freedom*, Progress in Particle and Nuclear Physics, bind **58**, side 351–386.
- [10] Roelof Bijker og Elena Santopinto (2015) *Valence and sea quarks in the nucleon*, J. Phys.: Conf. Ser., 578 012015.
- [11] F. Bissey, F.-G. Cao, A. R. Kitson, D. B. Leinweber, B. G. Lasscock, A. I. Signal og A. G. Williams (2007) *Gluon flux-tube distribution and linear confinement in baryons*, Phys. Rev. D, bind **76**, side 114512.



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

Kobbernanostråde og kulstofnanorør

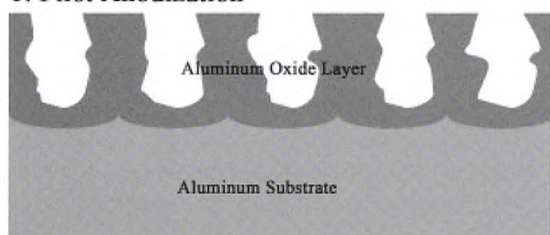
Af Aksel Nielsen og Frederik Hegaard, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, SDU

Denne artikel beskriver vores bachelorprojekt, hvor vi arbejdede med at lave kobbernanostråde, som kan bruges til at danne en bakteriedræbende overflade, samt at lave lange, ensformige kulstofnanorør. Disse nanorør vil efterfølgende kunne fyldes med metaller eller halvledende stoffer. Begge materialestrukturer vil have stor praktisk anvendelse, hvis der findes en stabil metode til deres dannelse, som kan skaleres op i så stor en målestok, at det giver mening i industriel sammenhæng.

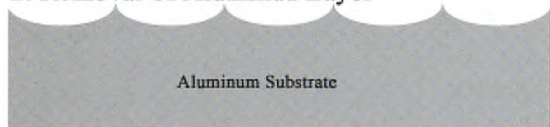
Dannelsen af porøs aluminiumoxid

I vores projekt har vi arbejdet på at danne en skabelon af aluminiumoxid. Dette blev gjort ud fra en velkendt process. For at lave skabelonen tages der udgangspunkt i et stykke rent elektropoleret aluminium. På aluminiumsstykket laves det, der kaldes en to-trins anodisering (effekten af dette kan ses på figur 1), hvilket gøres på følgende måde: Aluminiumsstykket placeres et par centimeter fra et andet stykke metal (her rustfrit stål) i låget af en beholder med oxalsyre ved 0°C, sådan at begge metalstykker er delvist nedsænked i væsken. Der sættes en spænding over metalstykkerne med aluminiumsprøven som anode. Derved trækkes en strøm i gennem væsken, som fungerer som elektrolyt, og der skabes et aluminiumoxidlag på aluminiumsstykkets ene side.

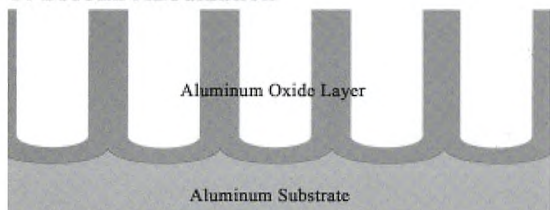
1. First Anodization



2. Removal of Alumina Layer



3. Second Anodization

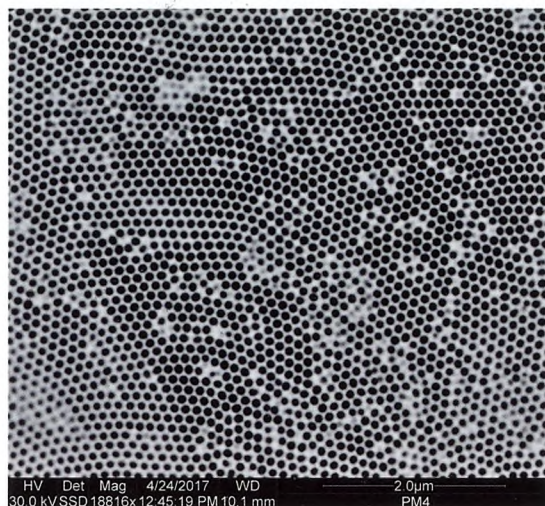


Figur 1. To-trins anodiseringsproces [1].

Aluminiumoxidlaget vokser langsomt, så længe spændingsforskellen bevares og strømmen løber. På grund af indre spændinger kommer der i starten af processen huller tilfældige steder i aluminiumoxidlaget. I takt med at aluminiumoxidlaget vokser, vokser hullerne sig til porer ned igennem aluminiumoxidlaget, og de

ændrer langsomt deres placering, så de ordner sig i et hexagonalt mønster i forhold til hinanden. Når opstillingen har kørt i 24 timer, er der skabt et aluminiumoxidlag på den ene side af aluminiumsstykket med den ønskede grad af orden. På aluminiumoxidlagets overflade er porerne tilfældigt fordelt, men dybere, i overgangen mellem aluminiumsstykket og aluminiumoxidlaget er porerne ordnet i et ensartet mønster.

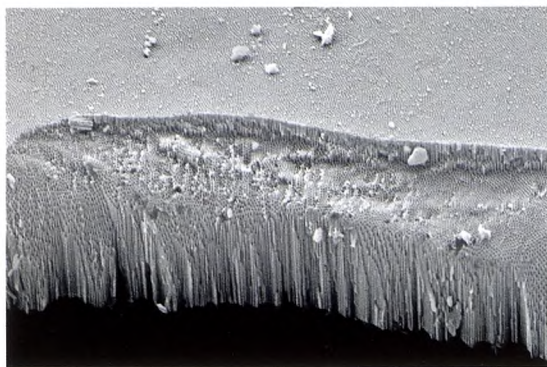
Når porerne er blevet dannet, ætzes størstedelen af aluminiumoxidlaget væk, sådan at det kun er den nederste del, det vil sige delen med de ordnede porer, der er tilbage. Så gentages anodiseringsprocessen. Aluminiumsstykket nedsænkes igen i oxalsyre, og der sættes spænding over. Fordi der denne gang er en smule af de ordnede porer tilbage, gror aluminiumoxidlaget med udgangspunkt i den ordnede struktur, og porerne vokser derfor helt ordnet denne gang. Efter 1 time i oxalysen er der dannet et aluminiumoxidlag med en tykkelse på 1,5 μm med ens porer ned igennem hele aluminiumoxidlagets tykkelse. Porerne har en ensartet størrelse og ligger i et ensartet hexagonalt mønster over hele aluminiumoxidlaget. På figur 2 kan strukturen af de ordnede porer ses fra toppen. Figur 3 viser et tværsnit af aluminiumoxidlaget, den øverste del af billedet er toppen af porerne, cirka halvvejs nede i billedet er aluminiumoxidlaget "brækket" så porelaget kan ses fra siden, i den øverste del af dette er aluminiumoxidlaget brækket lidt skævt, men længere nede er der brækket langs porerne og det ses derved at porerne ligger lige ned igennem oxidlaget.



Figur 2. Elektronmikroskopbillede af porestrukturen i aluminiumoxid set fra oversiden af aluminiumoxid laget.

Deponering af kobber

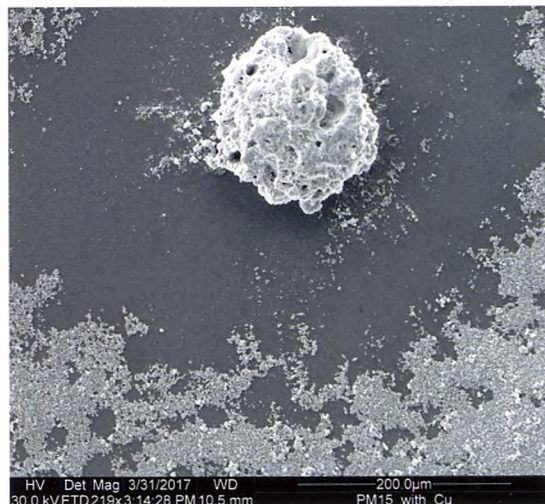
Når skabelonen er dannet, kan man arbejde videre med forskellige anvendelser. Vi havde to forskellige anvendelser, som vi arbejdede med. Vi arbejdede mest med at finde en metode til at fylde porerne præcist op med kobber. Kobber og kobberoxid har en bakteriedræbende effekt. Ved at putte kobber ned i porerne, er det kun toppen af kobbernanostrående der vil blive oxideret, hvilket medfører, at kobberionerne vil blive frigivet langsommere, end ved et rent stykke kobber. Dette betyder at materialet vil beholde sin bakteriedræbende effekt i længere tid. Udover dette er mængden af kobber der skal bruges per overfladeareal markant mindre i forhold til at bruge rent kobber, hvilket giver en økonomisk gevinst. Dette gør det meget attraktivt til anvendelse i bakteriedræbende overflader, der for eksempel vil kunne bruges på hospitaler og i andre sammenhænge, hvor det er vigtigt at mindske smittefare [2]. Derudover er kobbernanostråde lovende til brug i nanoelektronik [3].



Figur 3. Elektronmikroskop billede af porestrukturen i aluminiumoxidet set fra siden. Det synlige lag er aluminiumoxidlaget, under dette er aluminiumslaget, hvilket fremstår sort pga. den valgte kontrast.

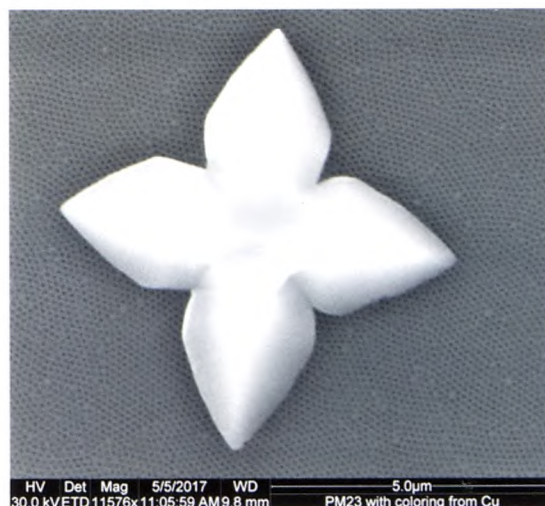
Man kan deponere kobber i ordnede aluminium-oxidporer på flere forskellige måder. Deponering med jævnstrøm er en metode, der har vist sig effektiv i forhold til at fylde porerne op på en kontrolleret måde, men det er også en meget tidskrævende metode, der er svær at skalere op til en industriel størrelsesorden. For at kunne fylde porerne ved brug af jævnstrøm-deponering skal aluminiumskabelonen med porerne igennem en række processer. Først fjerner man aluminiumstykket ved at ætse det væk, så man kun har det porøse aluminiumoxidlag tilbage. Herefter ætser man det lag af aluminiumoxiden, der lå tættest på aluminiumlaget uden porer, væk. Det betyder, at man ender med et oxidlag med ordnede porer, der er åbne i begge sider. På den ene side af oxidlaget lægges et ledende metal, ofte guld. Prøven nedsænkes dernæst i en væske med kobberioner og bruges som katode, hvorved kobberionerne først sætter sig på guldet i bunden af porerne og derefter begynder at fylde porerne op med kobber. Opfyldningen af porerne sker i et langsomt og ensartet tempo, der gør at det er muligt at få en stabil og ensartet opfyldningsgrad for små prøver. Fordi der er mange trin i processen, tager metoden lang tid. Hvis processen skal udføres på en stor prøve, bliver det svært at sikre at der ætzes ens over hele prøven, og

en ensartet ætsning er nødvendigt for at få ensartethed i det endelige resultat. Grunden, til at alle disse trin udføres, er at det aluminiumoxidlag der ligger neden under porerne, kaldet barriere-oxid laget, har en meget stor elektrisk modstand, der gør, at jævnstrøm ikke har nogen effekt før dette lag er fjernet eller gjort tyndere.



Figur 4. Elektronmikroskop billeder af eksempel på prøve med for stor mængde kobber deponeret i porerne og de derved dannede kobberdefekter på overfladen.

I dette projekt har der derfor i stedet været arbejdet med en metode, der benytter vekselstrøm til at fylde porerne op. Fordelen ved at bruge vekselstrøm frem for jævnstrøm er, at barriere-oxidlaget i bunden af porerne opfører sig som en ensretter, hvilket betyder, at det er ledende i katoderetningen, men kun meget svagt ledende i anoderetningen. Derfor er der en fordel ved at bruge vekselstrøm, da metoden kan bruges på samme måde som jævnstrøm, men i stedet for at skulle igennem en masse indledende trin, kan prøven bruges som den er, efter der er dannet aluminiumoxidlaget med de ensartede porer.



Figur 5. Elektronmikroskopbilleder af eksempel på prøve med tilpas mængde kobber deponeret i porerne og en meget lille kobberkrystal. Andre optagelser forskellige steder på prøven viser at porerne er fyldte.

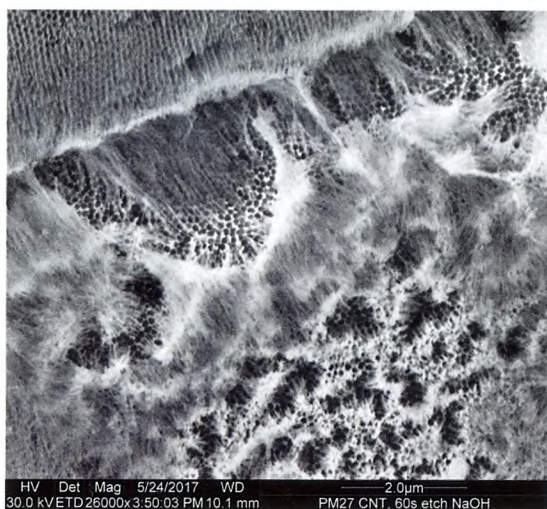
Problemet med vekselstrøm i forhold til jævnstrøm er, at det er svært at styre, hvor meget porerne fyldes, og hvornår de er helt fyldte. Hvis spændingsforskellen

bevares efter at porerne er fyldte, lægger kobberet sig oven på aluminiumoxiden. Dermed kan der dannes et tykt kobberoxidlag, og noget af fordelene ved at opbevare kobberet i aluminiumoxidporerne går tabt. Det lykkedes dog at finde en metode at få et rimelig ensartet resultat uden væsentlig deponering på overfladen. Vi fandt en god metode ved at prøve os frem og forsøge at fylde porerne ved varierede spændinger og over varierende tidsrum, indtil der til sidst begyndte at komme resultater, hvor det med et elektronmikroskop så ud til, at porerne var fyldt til randen, som ønsket.

På figur 4 er vist et eksempel på hvordan overfladen af aluminiumoxidlaget ser ud når porerne er overfyldt med kobber. Den mørke del af billedet er det porøse oxidlag, mens resten er kobber. Når porerne blev overfyldt kom det til udtryk ved at der lå kobber på det meste af overfladen og der blev dannet forskellige former af sammenklumpninger på overfladen. På figur 5 er vist et eksempel på en vellykket fyldning på en anden prøve. Igen er det mørke område det porøse oxidlag, hvori porestrukturen kan anes. På denne prøve blev der observeret blomsterlignende strukturer som den vist på billedet fordelt ud over prøven med stor spredning. Dette indikerer at porerne lige akkurat er fyldte og da de blomsterlignende klumper ligger med stor afstand til hinanden, er oxidering af disse ikke et problem da der stadig vil være kontakt til kobberet i porerne. Bemærk den store størrelsesforskel på strukturen i figur 4 og 5.

Deponering af kulstof

Ud over at deponere kobber, arbejdede vi også med at danne kulstofnanorør i vores aluminiumoxidporer. Der findes forskellige måder at danne kulstofnanorør på, men fordelene ved at bruge en skabelon er, at de rør der laves, kan laves lige så lange og lige som porerne i skabelonen. Samtidig er de kulstofnanorør, der dannes, åbne i toppen, så der kan deponeres metaller ned i kulstofnanorørene så længe at de opbevares i skabelonen. Der kan fx deponeres platin, som kan bruges som elektrokatalysator til brændselsceller [4], eller der kan deponeres silicium med henblik på brug i solceller [5].



Figur 6. Elektronmikroskopbilleder af eksempel på prøve med kulstofnanorør efter blotlægning ved ætsning med NaOH.

Indersiden af porerne belægges med kulstof ved hjælp af mikrobølgeaktiveret plasmaforstærket kemisk dampaflejring (plasma enhanced chemical vapor deposition) mens prøven holdes ved 600°C, der ligger lige under aluminiums smeltepunkt på 660°C. For at finde ud af hvorvidt der er deponeret kulstofnanorør eller ej, har vi været nødt til at ætse en del af aluminiumoxidlaget væk. Derved bliver de formodede kulstofnanorør fritlagte på overfladen og kan ses med et elektronmikroskop.

På figur 6 er vist et elektronmikroskopbillede af en prøve hvor der i det porøse oxidlag er deponeret kulstofnanorør og derefter er en del af porestrukturen ætset væk med NaOH for at blotlægge nanorørene. Rundt omkring på billedet, særligt i den nederste højre del, kan noget af porestrukturen anes. Når dele af nanorørene er fritlagt knækker de og lægger sig i klumper oven på prøven. Dette kommer til udtryk ved de områder på billedet der ser lidt "uldne" ud, fx lige midt i billedet og helt ude til venstre i den nederste halvdel af billedet.

Eksperimentelt bachelorprojekt

I løbet af de tre år som en fysikbachelor varer, er det begrænset, hvor meget vi som studerende får arbejdet med eksperimental fysik. Rigtig meget af det, vi gennemgår i løbet af sin bachelor, er det fundament, man skal bruge videre på sin uddannelse. Der bliver derfor brugt meget tid på meget grundlæggende fysik, som for eksempel klassisk mekanik. Tit har man set forsøgene, der hører til denne grundlæggende fysik, allerede i gymnasiet, og forsøgene er oftest demonstrationsforsøg, hvor man følger en manual slavisk og ikke selv har indflydelse på forsøgsopstilling. Det kan også være fag, hvor det simpelthen ikke er muligt at inddrage eksperimenter i undervisningen, da der skal bruges for dyrt eller specialiseret udstyr. Derfor takker vi tidligere lektor Per Morgen, nu emeritus, for frivilligt og uden omkostninger for instituttet at have stillet sit udstyr, ideer og tid til rådighed for os i dette projekt.

Det har derfor været en kæmpe fornøjelse at få lov til at lave et eksperimentelt bachelorprojekt. Her kom vi virkelig tæt på nogle af de udfordringer, der tilsyneladende kan opstå ud af den blå luft, og vi fik arbejdet med, hvordan man griber dem an. Vi fik oplevet hvordan en hel arbejdsdag let kommer til at gå med at løse et pludseligt opstået problem i stedet for at arbejde på det, der var planlagt. Den glæde og lettelse man oplever, når man efter flere måneder får det resultat, man har ledt efter. At den bagvedliggende teori ikke bare er noget, der foregår i en bog, men i den grad har betydning for den virkelige verden.

En anden fordel ved at lave et bachelorprojekt med en eksperimentel del, frem for et rent teoretisk projekt er, umiddelbart virker mere interessant for personer, der ikke lige arbejder inden for samme felt. Det nåede vi også at have gavn af, da vi deltog i Dansk Fysisk Selskabs årsmøde med en poster for vores projekt. Her lykkedes det os at vinde en pris for bedste posterpræsentation, hvilket nok i nogen grad skyldtes, at en god del af de andre poster var for teoretiske projekter eller simuleringer, hvor det kan kræve en større baggrundsviden om

emnet for at kunne forstå hvad projektet går ud på.

Vores bachelorarbejde bygger videre på det arbejde der blev lavet af Esben Nielsen og Daniel Drasbæk i deres respektive specialer [6,7].

Litteratur

- [1] M. Mohajeri og H. Akbarpour (2013) *Knowledge-based prediction of pore diameter of nanoporous anodic aluminum oxide*, J. Electroanal. Chem., bind **705**, side 58, fig 1, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2013.07.026>.
- [2] M. A. B. Naafs (2017) *Antimicrobial Properties of Copper and Copper Alloys for Infection Control*, <https://infectioncontrol.tips/2017/08/09/antimicrobial-copper/>
- [3] R. Inguanta, S. Piazza og C. Sunseri (2009) *Influence of the electrical parameters on the fabrication of copper nanowires into anodic alumina templates*, Applied Surface Science, bind **255**, side 8816–8823.
- [4] L. Zhaolin, L. Xuanhao, Y. L. Jim, Z. Weide, H. Ming og M. G. Leong (2002) *Preparation and Characterization of Platinum-Based Electrocatalysts on Multiwalled Carbon Nanotubes for Proton Exchange Membrane Fuel Cells*, Langmuir, bind **18**, side 4054–4060.
- [5] Z. Fan, H. Razavi, J.-W. Do, A. Moriwaki, O. Ergen, Y.-L. Chueh, P. W. Leu, J. C. Ho, T. Takahashi, L. A. Reichertz, S. Neale, K. Yu, M. Wu, J. W. Ager og A. Javey (2009) *Three-dimensional nanopillar-array photovoltaics on low-cost and flexible substrates*, Nature Materials, bind **8**, side 648–653.
- [6] E. S. Nielsen (2012) *Growth of nanowires of Ni and nanotubes of C inside the pores of a self organized nanoporous structure of alumina*, Master Thesis, SDU.
- [7] D. B. Drasbæk (2016) *Structuring of Materials on the Nanoscale for Photovoltaic Applications: First step - Deposition of Carbon Nanotubes into Nanoporous Aluminum Oxide*, Master Thesis, SDU.



Aksel Nielsen (tv.) og Frederik Hegaard (th.) er begge fysikstuderende på SDU. De er på nuværende tidspunkt i gang med 2. semester af deres kandidat som udvekslingsstuderende på Nanyang Technological University i Singapore, hvor de udforsker nogle af de forskellige områder indenfor fysik, såsom økonofysik og medicinsk fysik.

PFEIFFER VACUUM

Vacuum pumper

To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

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

KVANT på Facebook

KVANT har sin egen Facebookside:

KVANT.fysiktidsskrift

som 718 personer “synes godt om”, ligesom 722 personer følger siden. Du kan være med til at udbrede kendskabet til KVANT ved at “synes om” siden. Desuden bliver du så informeret om kommende arrangementer i udgiverforeningerne, og du får også en forsmag på indholdet af de kommende nummre. Julie Søgaard fra Astronomisk Selskab er redaktør af siden.

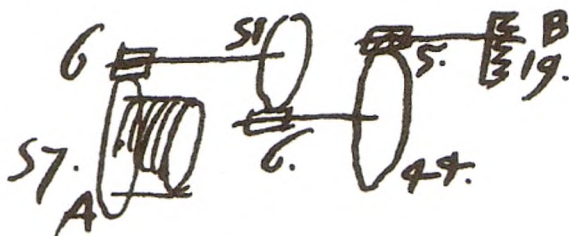


Opgave stillet af Ole Rømer:
 “beregning og anvendelse af mit lommeur”

Af Poul Darnell

Poul Darnell har på vegne af Ole Rømer stillet en opgave om Rømers lommeur. Poul Darnell er pensioneret ingeniør, og hans interesse for Ole Rømer stammer fra, at han som den første nogensinde i 1982–84 fik lov til at adskille, opmåle, tegne og beskrive Ole Rømers planetarium og eklipsarium, som findes på Rosenborg Slot.

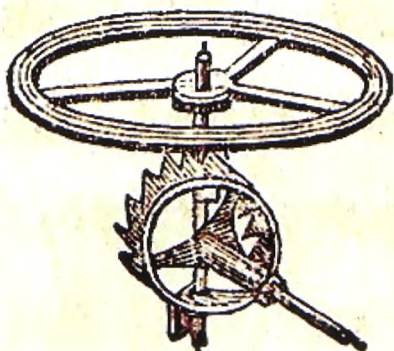
Ole Rømer tegner og fortæller i et brev fra Paris til filosofen John Locke. Brevet er dateret den 9.7.1679 [1]:



Figur 1. Ole Rømers skitse viser antallet af hjul og deres tandantal i lommeuret.

“Der blev foreslået et tandhjul B med 19 tænder eller 17 (for hvis man antager 15, er sagen såre simpel, men dette tal undgås på grund af den lille størrelse). Der blev desuden foreslået en omdrejning af den store drivfjeders hjul A på halvanden time. Man skulle så finde de samme tal som i hjul B's omdrejning, som har 38 halvsvingninger eller slag. For hvert sekund skulle der komme 5 slag. Derfor bør der i hele omdrejningen af hjulet A, som tager $1\frac{1}{2}$ time, indeholdes 27.000 slag. Der indeholdes imidlertid $27.002\frac{1}{2}$, hvilket fremgår af en foretaget beregning”

Jeg (Ole Rømer) har på skitsen ovenfor (figur 1) udeladt urets spindel og uro, da funktionen af disse to ting forudsættes at være bekendt; men i anledning af denne opgave i KVANT, vil jeg imidlertid tilføje to forklarende figurer.



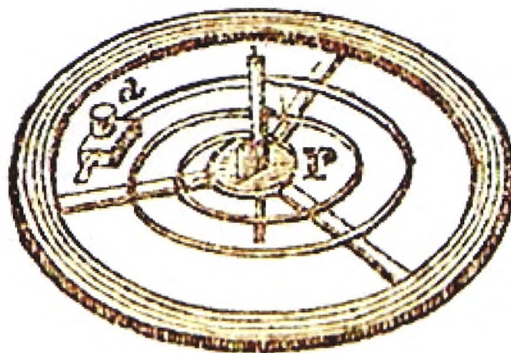
Figur 2. Lommeurets ganghjul, spindel og uro.

Ganghjulet er det, som på figur 1 er benævnt “B”. Figur 2 viser spindlen med den lodrette aksel, hvorpå

to flige eller lapper er fastgjort. Lapperne går i indgreb med ganghjulet således, at når ganghjulet drejes, overføres der en kraftimpuls til snekken via lapperne. Impulsen bevirker, at urets uro som er placeret øverst på spindlen, er i stand til at udføre 5 slag (svingninger) pr. sekund.

I figur 3 er uroen vist. Til uroen er fastgjort en spiralfjeder, der sørger for at uroen får en frem- og tilbagegående drejning. Et særligt arrangement gør, at man er i stand til at stramme eller slække spiralfjederen. Når fjederen strammes, vil det bevirke, at uret går hurtigere, og hvis fjederen slækkes, vil uret gå langsommere. Som det forstås, kan man regulere urets gang på denne måde.

Ganghjul, spindel og uro benævnes "spindelgang". Det var min hollandske kollega Christiaan Huygens der i 1675 fik idéen til at forbinde uroen med en spiralfjeder (figur 3). Dermed havde han opfundet den regulator der benyttes i mekaniske ure.



Figur 3. Uroen med en spiralfjeder

Opgaven består nu i følgende:

1. Opstil det matematiske udtryk som viser, hvorledes tandhjulsudvekslingen vil frembringe $27000\frac{1}{2}$ slag (svingninger) pr. $1\frac{1}{2}$ time.
 2. Beregn hvilke tider mit lommeur vil vise.
 3. Fremkom med forslag til urets anvendelse.
- Løsningen bringes i næste nummer af KVANT.

Litteratur

- [1] 1. Per Friedrichsen og Chr. Gorm Tørtzen (2001) *Ole Rømer, Korrespondance og afhandlinger samt et udvalg af dokumenter*, Det Danske Sprog- og Litteraturselskab, C.A. Reitzels Forlag, København.

Den Internationale Fysikolympiade

Af Niels Hartling

Den Internationale Fysikolympiade (IPhO) er en årlig konkurrence i fysik for dygtige og interesserede unge. I dag deltager unge fra mere end 80 lande, normalt fem fra hvert land. Danmark har været med hvert år siden 1996, og i 2013 havde Danmark værtskabet. Kravene er særdeles høje, og deltagerne må gennemføre et længere forløb med træning og selvstudier, hvis de skal have en chance for at klare sig

Hver sommer afholdes et eller andet sted i verden en konkurrence, Den Internationale Fysikolympiade, kaldet IPhO = International Physics Olympiad [1] for unge med en aldersgrænse 20 år fra hele verden. Konkurrencen blev afholdt første gang i 1967 i Polen, og i de første år var der tale om et østeuropæisk initiativ. Efterhånden kom flere og flere lande med, for eksempel Sverige i 1976, Holland i 1982, Norge i 1984 og USA i 1986. I 1996 tog jeg sammen med andre gymnasielærere og universitetsfolk initiativ til, at også Danmark kom med, og vi har været med hvert år siden da.

Interessen er i de seneste år nærmest eksploderet, efterhånden deltager mere end 80 lande. Hvert land stiller med fem deltagere til konkurrencen. Deltagerne gennemfører en teoretisk prøve på fem timer. Den består af tre store og hundesvære fysikopgaver, som, på nær en simpel lommeregner, skal klares uden hjælpemidler. (Se tidligere års opgaver på hjemmesiden [1]). Ud over den teoretiske prøve er der en eksperimentel prøve ligeledes på fem timer. Her skal deltagerne udføre og fortolke nogle forsøg, som i reglen indbefatter omfattende måleserier.

De dygtigste deltagere opnår anerkendelse i form af guld-, sølv- og bronze-medaljer eller HM, en slags 4. plads. (HM står for "honorable mention", som vel kan oversættes til "hædrende omtale"). Det er ikke sådan, at der kun er én guldmedalje, én sølvmedalje og én bronzemedalje, derimod får de ca. 8% bedste deltagere guld, de ca. 17% derefter sølv, de ca. 25% derefter bronze og de ca. 17% derefter HM. Således får ca. 2/3 af deltagerne noget med hjem. Alligevel er det svært at opnå de eftertragtede medaljer, konkurrencen er særdeles hård.

Der er også andre fag end fysik, som gennemfører årlige olympiader i de matematisk naturvidenskabelige fag. Ud over fysik deltager Danmark i årlige olympiader i biologi, datalogi, geografi, kemi og matematik.

Det er selvfølgelig dejligt at klare sig godt og vinde medaljer, men man kan for en gangs skyld med rette bruge den kendte kliche om, at det vigtigste ikke er at vinde, men at være med. Det er ikke for meget sagt, at de fem elever fra Danmark, som slipper gennem nåleøjet til årets IPhO, får en oplevelse for livet. Den indbefatter samvær med og kontakter til unge fra hele verden. Hvert år ser vi, at der opstår venskaber mellem unge på tværs af landene. Dertil kommer, at deltagerne på alle måder bliver forkælede. De cirka ti dage indbefatter, ud over det faglige og de sociale kontakter, store turistmæssige oplevelser.

IPhO omgives i mange lande med stor prestige og stor mediebevågenhed. For deltagerne i flere lande betyder en medalje et tilbud om at komme på de bedste universiteter.

Finansiering

Det siger sig selv, at der er ganske store udgifter forbundet med gennemførelsen af science olympiaderne. Det koster at transportere, indkvartere og bespise elever fra hele landet. Rejsen til – ofte fjerne – destinationer for elever og ledere kan løbe op. Dertil kommer et deltagergebyr, som dækker overnatning og bespisning på stedet. Endvidere er der et mindre honorar for undervisning og administrationen. Science olympiaderne er støttet af Undervisningsministeriet og gennem en række år også af Carlsbergs Mindelegat. Science olympiaderne har fra 2018 og tre år frem fået en ny sponsor, nemlig Villum Fonden. Sponsoratet betyder, at vi vil blive i stand til at udvide aktiviteterne yderligere.



Figur 1. Det danske logo ved den Internationale Fysikolympiade (IPhO) i 2013 i København. Som det ses, viser logoet de synlige overgange i brintatomet og en figurmæssig beskrivelse af Niels Bohrs teori. Dette symbol blev valgt, fordi 2013 var hundredåret for Niels Bohrs epokegørende teori.

Holdningen har ændret sig

Det er interessant, at tidligere var der mange, som var imod at Danmark skulle være med i Internationale Science-olympiader. Jeg hørte selv udsagn som: "Det er et eliteprojekt, som ikke passer til dansk tradition og dansk mentalitet" eller "Det er vigtigere at gøre noget for de svage elever, de dygtige klarer sig nok". Lidt ulogisk mente næsten alle samtidig, at det var i orden at dyrke eliten, hvis der var tale om fodbold eller ballet, men det forhold, at man ved træning kunne blive ud

År	Sted	Deltagere	Resultat
1996	Oslo, Norge	5 deltagere	ingen præmie
1997	Sudbury, Canada	5 deltagere	1 HM
1998	Reykjavik, Island	5 deltagere	4 HM
1999	Padova, Italien	4 deltagere	2 HM
2000	Leicester, UK	5 deltagere	ingen præmie
2001	Antalya, Tyrkiet	5 deltagere	1 HM
2002	Bali, Indonesien	5 deltagere	1 bronze og 4 HM
2003	Taipei, Taiwan	5 deltagere	3 HM
2004	Pohang, Sydkorea	5 deltagere	1 HM
2005	Salamanca, Spanien	5 deltagere	1 HM
2006	Sigapore	5 deltagere	1 bronze og 2 HM
2007	Isfahan, Iran	5 deltagere	2 HM
2008	Hanoi, Vietnam	5 deltagere	1 bronze og 3 HM
2009	Merida, Mexico	5 deltagere	4 bronze og 1 HM
2010	Zagreb, Kroatien:	5 deltagere	3 HM
2011	Bangkok, Thailand:	5 deltagere	2 bronze og 1 HM
2012	Tallinn, Estland:	5 deltagere	3 HM
2013	København, Danmark	5 deltagere	1 bronze og 2 HM
2014	Astana, Kasakhstan	5 deltagere	3 HM
2015	Mombai, Indien	5 deltagere	1 bronze og 2 HM
2016	Zürich, Schweiz	5 deltagere	2 bronze og 1 HM
2017	Yogyakarta, Indonesien	5 deltagere	2 sølv, 2 bronze og 1 HM

over det almindelige dygtig i et skolefag, faldt ikke altid i god jord. Den indstilling har helt ændret sig. Nu er det blevet i orden at fremme talentet på alle punkter, ja hvert gymnasium har i dag en "talentchef".

Man har opdaget, hvad man altid har vidst inden for sportsverdenen eller musikverdenen, at selv de bedste kan blive endnu bedre, hvis talentet dyrkes. De dygtigste elever mangler nogle gange noget at bide i den almindelige undervisning, de nyder ofte, at der stilles helt særlige krav. Det er vores erfaring, at holdkammeraterne til en specielt dygtig elev, ikke mopper denne, tværtimod, de er kun stolte. Den særlige præstation højner hele holdets niveau, som det også kendes fra sportsverdenen: En stærk elite styrker bredden.

Danmark som værtsland i 2013

Det blev allerede fra 1998 fastlagt, at Danmark skulle have værtskabet i 2013, og Danmark udsendte en officiel invitation ved daværende undervisningsminister Margrethe Vestager. Årstallet 2013 blev valgt, bl.a. fordi dette år var 100-året for Niels Bohrs epokegørende teori for brintatomet.

Det blev en særdeles vellykket olympiade, som blev gennemført på KU og DTU.

Udvælgelsen og forberedelsen af de danske deltagere

Gennem årene har vi opbygget en tradition for, hvordan vi finder og efteruddanner de danske deltagere [2].

I september måned sender olympiadeudvalget en plakat til ophængning ud til alle gymnasier og HTX kurser i Danmark. På plakaten er der nogle små opgaver, som skal virke som appetitvækkere. Endvidere er der en invitation til at deltage i en landsprøve, som afholdes på skolerne i oktober-november. Tilmeldingen til denne prøve sker gennem lærerne.

Lærerne får tilsendt prøvesættet elektronisk, og lærerne tilbagesender de bedste opgavebesvarelser til olympiadeudvalget. De 35 bedste elever fra hele landet

inviteres til København til landsfinalen, som finder sted ultimo november. Eleverne vil typisk være 3.g-elever, men der er også eksempler på, at specielt dygtige 2.g-elever kan klare sig.

I København gennemføres en teoretisk prøve og en prøve med eksperimentelt indhold. Prøveresultatet danner baggrund for udvælgelsen af 15 elever til næste runde. De 15 elever undervises og trænes i en række forlængede weekender i løbet af vinteren og foråret. Det kan måske lyde sært, at man "træner" de i forvejen dygtige elever. Men man skal være klar over, at hvis man ikke forbereder sig og dygtiggør sig, så falder man totalt igennem! Det hænger sammen med, at det danske pensum for fysik på højt niveau er ret beskedent sammenlignet med det internationale pensum. Der går derfor meget tid med at tilegne sig nye områder (mekanik for stive legemer, den specielle relativitetsteori, termodynamik, elektromagnetisme m.m.). Træningen er også nødvendig, fordi opgaverne ved IPHO er meget større og har en lidt anden karakter end de opgaver, som eleverne kender fra den daglige undervisning. Typisk skal man i en dansk eksamensopgave anvende kendt stof, mens man i en opgave ved IPHO skal bruge det kendte stof til at udlede nye sammenhænge. Dertil kommer, at eleverne skal vænne sig til at klare opgaverne uden hjælpemidler.

I april udtages de fem, som skal repræsentere Danmark ved IPHO den følgende sommer. Normalt samles det danske olympiadehold med det tyske olympiadehold inden afrejsen til en sidste afpudsning af formen. Allerede her ser vi de første kontakter mellem vores studenter og udenlandske studenter.

Hvordan klarer de danske deltagere sig?

Sammenlignet med det fjerne østen (Kina, Japan, Syd Korea, Indien osv.) og store lande (USA, Tyskland, Frankrig, Storbritannien) kan vi ikke være med. Men sammenlignet med andre mindre lande, herunder vores

nordiske nabolande, klarer vi os fint. Tabellen viser, sted for IPhO siden 1996 samt Danmarks resultat.

Resultaterne for Danmark er gennem årene gennemgående blevet bedre. Siden 2001 har vi hvert år fået "noget" med hjem, og langt det flotteste resultat blev opnået i 2017 med to sølvmedaljer, to bronzemedaljer og én HM.

Efter 2017 har Danmark gennem årene haft i alt 109 deltagere med i en IPhO. Det er vores erfaring, at mange elever gennem kvalifikationen bliver opmærksom på deres egne usædvanlige evner. Dette medvirker til, at disse topstudenter i langt de fleste tilfælde fortsætter med studier inden for de matematisk-naturvidenskabelige fag eller inden for ingeniørvidenskab. Det er utvivlsomt til glæde for dem selv, og det er givetvis til stor gavn for landet.

I skrivende stund forbereder vi næste hold, IPhO 2018 finder sted i Lissabon, Portugal.

Litteratur

- [1] Den internationale hjemmeside: <http://ipho.org>.
[2] den danske hjemmeside: <http://fysikolympiade.dk>.



Niels Hartling er tidligere lektor ved Birkerød Gymnasium og tidligere fagkonsulent i fysik. Modtog H.C. Ørsted medaljen i bronze i 2013 blandt andet for arbejdet med Danmarks deltagelse i IPhO, herunder værtskabet i 2013.

Foreningsnyt – foredrag, årsmøde og generalforsamling

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
April				
9/4	19.15	Detektion af mørkt stof	Chris Kouvaris	AS (Aarh)
9/4	19.30	Hjernen og bevidstheden	Gitte Moos Knudsen	SNU
9/4	20.50	SNU Generalforsamling		SNU
14/4	22.00	Åbent hus i Wieth-Knudsen Observatoriet		Tisvildeleje
16/4	19.15	Detektion af mørkt stof	Chris Kouvaris	AS (Kbh)
18/4	22.00	Åbent hus i Wieth-Knudsen Observatoriet		Tisvildeleje
30/4	19.15	Sorte Huller	Marianne Vestergaard	AS (Kbh)
Maj				
7/5	19.15	Sorte Huller	Marianne Vestergaard	AS (Aarh)
7/5	19.30	Den kulturelle hjerne	Andreas Roepstorff	SNU
26/5	23.00	Åbent hus i Wieth-Knudsen Observatoriet		Tisvildeleje
Juni				
6-7/6		DFS Årsmøde		DFS
9/6	23.00	Åbent hus i Wieth-Knudsen Observatoriet		Tisvildeleje
30/6	19.30	Asteroid Day	Geologisk Museum	SNU
30/6	23.00	Åbent hus i Wieth-Knudsen Observatoriet		Tisvildeleje

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

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

Tisvildeleje: Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 19. Åbent hus arrangementer slutter kl. 23.

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

Bemærk, at Asteroid Day afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K.

DFS Årsmøde 2018

Bestyrelsen i Dansk Fysisk Selskab (DFS) glæder sig over at kunne annoncere Årsmødet 2018 med det samme, nye, kick-off koncept som i 2016 & 2017 og igen med et solidt line-up af inviterede foredrag fra vækstlaget i dansk fysikforskning!

Årsmødet i Dansk Fysisk Selskab kommer i år til at ligge 6.-7. juni, og vil igen foregå på Fænø Park ved Middelfart. Programmet vil indeholde både fæl-

les plenar-foredrag og foredrag i parallelle tematiske sessioner, samt selvfølgelig poster-session, middag og godt samvær med nuværende, tidligere og kommende kollegaer og studiekammerater!

De bekræftede inviterede foredragsholdere til Årsmødet er:

- Stela Canulescu, DTU Fotonik
- Tina Heckscher, RUC
- Sebastian Hofferberth, SDU

- Sune Jespersen, AU
- Ferdinand Kuemmeth, NBI/QDEV
- Michele Della Morte, SDU
- Jonas Schou Neergaard-Nielsen, DTU Fysik
- Stefan Kragh Nielsen, DTU Fysik
- Søren Raza, DTU Nanotech
- Heidi Rzehak, SDU
- Klaus Seiersen, Dansk Center for Partikelterapi
- Oriol Vendrell, AU
- Aftenforedrag bliver ved Ole Mouritzsen, KU Food, "Gastrophysics"

– og Årsmødet vil derfor give mulighed for at se de nyeste resultater indenfor en bred vifte af fysiske discipliner, fra astro-, partikel- og fusionsfysik til glasfysik, meta-materialer og kvantekommunikation. Udover de inviterede foredrag vil der naturligvis også være en lang række "contributed" foredrag i programmet, idet vi med DFS's Årsmøder gerne vil skabe en god ramme for at også yngre fysikere kan præsentere deres arbejde for fagfæller.

Alle deltagere, særligt studerende, opfordres til at medbringe en poster, og der vil være kontante præmier til den/de bedste poster, og vinderne vil desuden blive inviteret til at skrive en artikel om deres projekt til KVANT. To af sidste års vindere, Aksel Nielsen og Frederik Hegaard fra SDU, skriver således om deres projekt i dette nummer af KVANT

Information om mødet, herunder pris, tilmelding og indsendelse af abstracts vil kunne findes på DFS's hjemmeside www.dfs.nbi.dk. Der vil i år være fripladser til både gymnasielærere og studerende, og medlemskab af DFS vil som altid medføre en rabat på konferencegebyret.

TILMELDINGSFRISTEN er 1. maj og yderligere information om tilmelding, program og ansøgning om friplads vil kunne findes på hjemmesiden.

Generalforsamling i SNU

Årets generalforsamling i SNU finder sted den 9. april, og dagsordenen kan findes på www.naturvidenskab.net.

Vi beder også om indbetaling af årets kontingent. Medlemskontingentet er fortsat 250 kr om året, det dækker de 4 numre af bladet KVANT og adgang til alle SNU's arrangement samt P-tilladelse og en sikker siddeplads ved foredrag, der tiltrækker mange tilhørere. Samtidig støtter I vores frivillige indsats for formidling af naturvidenskab og teknik.

Kontingentet bedes indbetalt til SNU's konto i Danske Bank, reg.nr. 1551, kontonr. 9032363.

Vær opmærksom på P-restriktioner ved H. C. Ørsted Instituttet. Man må slet ikke parkere ved hovedindgangen – og man må kun holde på P-pladsen mellem Instituttet og Zoologisk Museum med en særlig P-tilladelse. SNU har et begrænset antal P-tilladelser, som medlemmer af SNU kan få udleveret indtil kl. 19:15 (sålænge lageret rækker) af SNU's repræsentant ved hovedindgangen. De skal udfyldes med bilnummer og

dato og placeres i forruden. Der kan desuden parkeres med Easypark på Nørre Allé, i kørselsretning mod centrum.

Forårets tema er "Hjernen: den menneskelige og kunstige intelligens" – se oversigten ovenfor.

Verdensbilledet i forandring – et hundredårigt perspektiv

Medlemmer og nyindmeldte i Astronomisk Selskab kan lige nu købe foreningens jubilæumsbog til blot 125 kr. Bogens vejledende pris er 325 kr.

Bogen fik flotte anmeldelser, da den udkom. *Ingeniøren* skrev således: "I 12 kapitler giver forfatterne et godt og velskrevet overblik over, hvordan vores viden om universet har ændret sig de seneste 100 år – primært drevet af den teknologiske udvikling, der har givet forskere helt nye observatorier til at se ud i rummet og tilbage i tiden." og KVANT skrev, at "bogen kan læses af alle astronomi-interesserede og kan bl.a. læses med stort udbytte af gymnasieelever. Bogen er svær at lægge fra sig og man får lyst til at vide endnu mere"

Bogen er på 220 sider og indeholder 12 kapitler, der handler om hvert sit emne blandt de fascinerende opdagelser i de sidste 100 år, der har vendt helt op og ned på vores verdensbillede. Bogen vil både kunne finde anvendelse i undervisningssammenhænge i gymnasiet og læses af folk med almen astronomisk interesse.

Bogen er skrevet af førende forskere fra DTU Space, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet og Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.



Medlemmer kan skrive til kasserer Julie Søgaard på js@astronomisk.dk med følgende oplysninger:

Navn, medlemsnummer, antal ønskede bøger og om bogen/bøgerne skal fremsendes (du betaler porto) eller afhentes til foredragene.

Nye medlemmer skal udfylde tilmeldingsformular på astronomisk.dk/foreningen/bliv-medlem/. I beskedfeltet skal man skrive antal ønskede bøger og om de/den skal afhentes eller fremsendes (du betaler porto).

Usikkerhedsrelationen og Bohrradius – breddeopgave 74 og 75 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaverne fra KVANT 2017 nr. 3 samt en ny opgave. De seneste opgaver var Breddeopgaver 74 og 75:

Usikkerhedsrelationen og Bohrradius

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

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

Løsning

Lad os fokusere på det simpleste atom, brintatomet. Hvorfor kollaberer det ikke? Et semiklassisk svar herpå kunne se sådan ud:

En elektron, der bevæger sig omkring en proton, har potentiel energi E_{pot} og kinetisk energi E_{kin} .

Ifølge Coulombs lov er elektronens potentielle energi givet ved $E_{\text{pot}}(r) = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r)$, hvis vi sætter E_{pot} til nul, når elektronen er uendelig langt fra protonen. Her er ϵ_0 dielektricitetskonstanten i vakuum, e elektronens og protonens ladning og r afstanden imellem elektronen og protonen.

Elektronens kinetiske energi er ikke givet som en funktion af r , som det er tilfældet for dens potentielle energi. På grund af usikkerhedsrelationen kan vi imidlertid i grove træk vurdere en mindste kinetisk energi, $E_{\text{kin,min}}$, som er en funktion af r :

Hvis vi tænker os, at elektronen befinder sig inden for en kugleskal i afstanden r fra protonen, så er størrelsesordenen af usikkerheden på dens positionsbestemmelse i f.eks. x -retningen, Δx , mindre end r : $\Delta x < r$. Heisenbergs usikkerhedsrelation kan skrives: $m_e \Delta v_x \Delta x \geq h/4\pi$, hvor m_e er elektronens masse, Δv_x er usikkerheden på hastigheden v_x i x -aksens retning, og h er Plancks konstant. Heraf ses, at Δv_x , og dermed elektronens kinetiske energi, ikke kan være nul, medmindre Δx er uendelig. Definerer vi Δv_x som kvadratroden af middelværdien af kvadratafvigelse imellem v_x og middelværdien af v_x , $\Delta v_x =$

$\sqrt{\langle v_x^2 - \langle v_x \rangle^2 \rangle}$, er Δv_x her lig med middelværdien af v_x^2 , fordi middelværdien af v_x af symmetrigrunde er nul. Af samme grund er $\langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$. Som konsekvens af usikkerhedsrelationen har vi alt i alt for middelværdien af den kinetiske energi for elektroner inden for kugleskallen:

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = \frac{3}{2} m_e \langle v_x^2 \rangle = \frac{3}{2} m_e \Delta v_x^2. \quad (1)$$

Dermed har vi

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle \geq \frac{3m_e h^2}{2(4\pi m_e \Delta x)^2}. \quad (2)$$

Hvis vi tænker os, at elektronen befinder sig inden for en kugleskal omkring protonen med radius r , dvs $\Delta x \approx r$, så må vi ifølge usikkerhedsrelationen altså gå ud fra, at den i gennemsnit mindst har den kinetiske energi:

$$E_{\text{kin,min}} \approx \frac{3h^2}{32\pi^2 m_e r^2} \quad (3)$$

Benytter vi overslagsmæssigt elektronens potentielle energi i afstanden r fra kernen som tilnærmelse for dens gennemsnitlige potentielle energi inden for kugleskallen, har vi for den minimale totalenergi som funktion af r :

$$E_{\text{tot,min}}(r) \approx \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{3h^2}{32\pi^2 m_e r^2}. \quad (4)$$

Funktionen $E_{\text{tot,min}}(r)$ har et minimum for $r = r_0$ givet ved:

$$r_0 = \frac{3h^2 \epsilon_0}{4\pi m_e e^2}. \quad (5)$$

Det findes ved differentiation af $E_{\text{tot,min}}(r)$. Indsættelse af r_0 , givet ved ligning (5), i ligning (4), giver herefter:

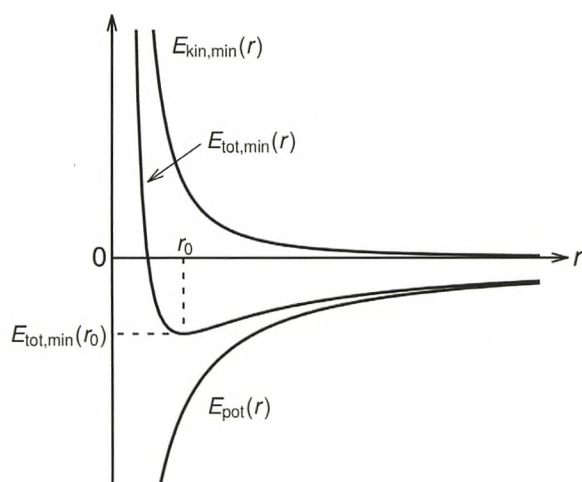
$$E_{\text{tot,min}}(r_0) = -\frac{m_e e^4}{6(h\epsilon_0)^2}. \quad (6)$$

At r_0 repræsenterer et minimum, og ikke et maksimum, ses af, at $E_{\text{tot,min}}(r_0)$ er negativ og dermed mindre end nul, som er energien, når elektronen er i hvile uendeligt langt fra protonen. For at øge r fra r_0 til uendelig skal der tilføres energien $-E_{\text{tot,min}}(r_0)$. Der skal også tilføres energi for at ændre r fra r_0 til mindre

værdier af r . I ligning (4) er det andet og positive led proportionalt med r^{-2} , der ender med at dominere over det første og negative led proportionalt med r^{-1} , når r går imod nul. $-E_{\text{tot,min}}(r)$ går derfor imod plus uendeligt, når r går imod nul. Det kræver tilførsel af energi at ændre r fra r_0 til noget andet både i opadgående og nedadgående retning. Derfor repræsenterer $r = r_0$ den stabile konfiguration af elektron/proton parret. Situationen minder om et potentialminimum, hvor $E_{\text{pot}}(r)$ repræsenterer en tiltrækkende kraft, og $E_{\text{kin,min}}(r)$ repræsenterer en frastødende kraft, som ophæver hinanden for $r = r_0$. Men "frastødningen" skyldes altså ikke en kraft. Den skyldes usikkerhedsrelationen.

Bortset fra talfaktorerne kendes resultaterne i ligningerne (5) og (6) som henholdsvis Bohr radius og brintatoms bindingsenergi. I stedet for Bohrs postulater har vi benyttet usikkerhedsrelationen.

Svaret på den anden opgave er da: Usikkerhedsrelationen er grunden til, at atomer ikke kolliderer. Den medfører en minimal kinetisk energi ("nulpunktsenergien"), der i udregningerne indgår svarende til, at der var en frastødende kraft ved siden af den tiltrækkende Coulomb kraft, således at de to ophævede hinanden i en afstand karakteristisk for atomernes størrelse. Det tilsvarende "potentialminimum" er vist på figur 1.



Figur 1. "Potentialminimum" for brintatomet.

Svaret på den første opgave er: Det synes ikke rimeligt at forestille sig neutronen som en elektron og en proton holdt sammen af elektrostatiske kræfter. Den stabile tilstand for en elektron og en proton alene holdt sammen af elektrostatiske kræfter er som udledt brintatomet med en radius, der er 10^5 gange så stor som neutronens radius. Der skal altså mere end usikkerhedsrelationen og elektrostatiske kræfter til at give neutronen dens størrelse.

Kommentar

Den semiklassiske udledning her af Bohr radius ved hjælp af usikkerhedsrelationen giver som sagt samme resultat som Bohrs model af brintatomet, bortset fra en talfaktor af størrelsesorden nær 1. Den kvantemekaniske udregning ved brug af Schrödingerligningen giver samme resultat som Bohrs. Overensstemmelsen imellem de tre udregninger er ikke overraskende. Alle tre

udregninger har $e^2/(4\pi\epsilon_0)$, m_e og h som de indgående parametre i udregningerne. Og en dimensionsanalyse viser, at r_0 givet ved ligning (5), bortset fra talfaktoren, er den eneste måde, som en hvilken som helst model eller teori, baseret på disse tre inputparametre, kan levere en karakteristisk længde på (jf. breddeopgave 68, KVANT, marts 2016).

På kurserne i Fysisk problemløsning I og Fysisk problemløsning II på RUC, som breddeopgaverne er knyttet til, underviser vi ikke i kvantemekanik som matematisk formuleret teori. Det sker på et decideret kvantemekanikkursus. På Fysisk problemløsning II kurset nøjes vi, udover Bohrs atommodel, med en mere kvalitativ indgang til kvantefysik. I hovedsagen præsenteres kvantemekanik som afvigende fra klassisk mekanik på tre punkter: Kvantiseringen af fysiske størrelser, usikkerhedsrelationen og partiklers uskelnelighed (Pauliprincippet). Det er i denne undervisningssammenhæng breddeopgaverne her om usikkerhedsrelationen og Bohrradius skal forstås.

På den ene side kan Bohrradius udregnes fra Bohrs model for brintatomet. På den anden side kan den udregnes fra Schrödingerligningen. Ingen af de to udregninger giver den kvalitative forståelse af, hvorfor stof ikke kolliderer, som udregningen her gør det. Bohrs model rummer ikke usikkerhedsrelationen, og Schrödingerligningen rummer den kun implicit. Som supplement og/eller introduktion til den eksakte kvantemekanik håber vi at støtte de studerendes kvalitative forståelse af kvantemekanik ved på Fysisk problemløsning II kurset at stille opgaver, der inviterer til at benytte kvantiseringen af fysiske størrelser, usikkerhedsrelationen, og/eller Pauliprincippet direkte som tilfældet er ved løsningen her af breddeopgave 74 og 75.

Angrebsmåden oven for kan minde om situationer i kemi. Det kan være hensigtsmæssigt at tænke i kvalitative billeder som ion-bindingen og den kovalente binding. Og med ion-bindingen at tænke på en frastødning og en tiltrækning, der ophæver hinanden i et potentialminimum. Imidlertid skyldes "frastødningen" i ion-bindingen ikke en kraft, men kvantisering, usikkerhedsrelation og Pauliprincip. I tilfældet kovalent binding skyldes både frastødning og tiltrækning kvantisering, usikkerhedsrelation og Pauliprincip. Helt principielt kan man ikke tale om de to bindinger som af forskellig slags. Det er samme fysik, der i princippet kan forklare både ion-bindingen og den kovalente binding (og bindinger derimellem), Coulombs lov og Schrödingerligningen. Alligevel er de kvalitative billeder, som er det, de to bindingstyper er, helt nødvendige i kemisk tankegang.

Breddeopgave 76. Opdrift på flyvinge

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra samlingen af træningsopgaver ved starten af "Breddekursus", nr. 76 i rækken her i KVANT):

Hvorfor er vingen på en flyvemaskine mere buet på oversiden end på undersiden?

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Tesla Roadster i rummet

RUMFYSIK. For første gang i flere årtier er en enorm rumraket blevet opsendt. Tirsdag den 6. februar blev rumraketten Falcon Heavy opsendt fra Kenney Space Center i Florida. Falcon Heavy er bygget af firmaet SpaceX, som er ejet af multimillionæren Elon Musk. Raketten havde Musks røde Tesla Roadster med sig ombord og en dukke klædt i rumdragt var placeret i den. Falcon Heavy er den kraftigste raket, der er opsendt siden de sovjetiske Energia raketter, som blev brugt i 1987–1988. I USA har der kun været en kraftigere raket end Falcon Heavy, kaldet Saturn V, som blev brugt i 1969–1972. Opsendelsen af Falcon Heavy er derfor en milepæl i rumfartshistorien, men den er også kun starten på mange planlagte fremtidige opsendelser. Både Rusland, Kina og USA har planer om gigantiske raketter.



Falcon Heavys opsendelse var særlig vellykket, idet to af løfteraketterne, som var blev genbrugt fra tidligere opsendelser, landede sikkert efter raketopsendelsen. Den tredje løfteraket styrtede desværre ned i Atlanterhavet. Teslaen skulle egentlig sendes en tur mod Mars, men raketten der skulle skyde den afsted overgik sit mål så Teslaen ikke kom ind i den korrekte bane. Forskere der har regnet på Teslaens bane mener at bilen muligvis vil kolliderer med enten Jorden eller Venus, dog først om mange millioner år. De har beregnet, at der er en sandsynlighed for at Teslaen kolliderer med Jorden på 6% og med Venus på 2,5%. Første gang raketten kommer tæt forbi Jorden vil være i år 2091. Hvis raketten kolliderer med Jorden vil den dog formentlig brænde op i atmosfæren.

Kilde: Hanno Rein m.fl. (2018), The random walk of cars and their collision probabilities with planets, arXiv:1802.04718

Symmetribrud forklarer forskellen på køling af vand og af kvarts

MATERIALEFYSIK. Det er kendt at kvarts (SiO_2) ikke fryser så let som vand (H_2O), hvor molekylerne ved nedkøling danner en krystalstruktur. Når temperaturen sænkes i kvarts sætter molekylerne sig fast hvor de er,

sådan at der opstår en uordnet struktur som i en væske. Fænomenet kaldes superkøling og resultatet er et glas. Vand og kvarts har ellers flere ligheder, bl.a. kan de i molekylebindingerne danne den samme tetraederstruktur. Nu har forskere fundet ud af hvorfor vand og kvarts opfører sig så forskelligt, når de bliver kolde. Deres simulationer viste at atomerne arrangerer sig ordnet i vand, men ikke i kvarts. Når væsker køles, samler atomerne sig i mønstre. Hvis vi betragter et enkelt atom, opstår der en serie af koncentriske skaller omkring dette atom med naboatomerne. I både vand og i kvarts er den første skal (omkring O-atomet/Si-atomet) tetraederformet, hvilket er rotationssymmetribrydere dvs. retningsmæssigt ordnet. Forskellen er i den anden skal, som for vand stadig er ordnet retningsmæssigt, men for kvarts er tilfældigt udsmyret med lille retningsmæssig orden.



Det er netop den retningsmæssig orden der gør, at vand fryser så hurtigt. I kvarts er der lille retningsmæssig orden, og det forhindrer krystallisering og resulterer i glasformation. Rotationssymmetrien er simpelthen sværere at bryde i kvartsstrukturen. Forskerne forklarede denne forskel ved at sammenligne bindingerne i de to strukturer. Vand består af individuelle H_2O -molekyler, der er holdt sammen af stærke kovalentbindinger, men vekselvirker med svagere hydrogenbindinger. Denne stabile molekyllstruktur forhindrer atomernes bevægelsesfrihed, hvilket resulterer i en høj retningsmæssig orden. Kvarts har ikke nogen molekyleform, og atomerne er derfor bundet med mindre retningsmæssig orden. Forskerne satser nu på at udvikle en generel teori for, hvordan glasformere adskiller sig fra krystalformere.

Kilde: Rui Shi m.fl., Impact of local symmetry breaking on the physical properties of tetrahedral liquids, Proceedings of the National Academy of Sciences (2018). DOI: 10.1073/pnas.1717233115

Liv i Atacama ørkenen kan fortælle om muligt liv på Mars

GEOFYSIK. For første gang er der fundet liv i Atacamaørkenen, den tørreste ørken på Jorden, hvor der kan gå flere årtier uden regn. At liv opstår og overlever her, kan indikere at det også kan opstå og overleve på Mars, da Mars har et klima der ligner Atacamaørkenen. Forskerne, som gjorde opdagelsen, ville undersøge, om

de mikroorganismer der findes i jorden i Atacamaørkenen, er der permanent eller om de er døende og er blevet blæst ind i ørkenen udefra. De fandt ud af at mikroorganismerne lever i jorden og kan gå i dvale i årtier – måske århundreder – uden vand, hvorefter de “kommer tilbage til livet” og kan reproducere sig selv igen, når det regner. Forskerne var meget heldige, da de besøgte Atacama ørkenen; der skete nemlig det helt utrolige at det regnede. Efter regnen kunne de se en masse biologisk aktivitet i jorden, og de fandt forskellige typer af mikroorganismer der levede i jorden. I Atacama er der før fundet døende mikroorganismer nær jordoverfladen, men det her er første gang at nogen har fundet vedvarende liv i ørkenen.



På Mars er der mere tørke, og det er meget koldere end i Atacamaørkenen. Men det har ikke altid været sådan. For millioner af år siden havde Mars oceaner og søer, der kunne have været hjemsted for liv. Efterfølgende tørrede planeten ud, men inden da kunne mikroorganismerne have udviklet sig. Vi ved i dag at der er is og snefald på Mars, og det kunne være medvirkende til, at der kan eksistere mikroorganismer som dem der er fundet i Atacamaørkenen, som sjældent har brug for vand. Forskerne vil nu lede efter liv i Antarktis i Don Juan-søen, der er en speciel sø, der indeholder så meget salt at den ikke fryser til is, selv ved ekstreme minus grader. Søen er som Atacamaørkenen et bud her på Jorden på, hvor eksterme miljøer man kan forstille sig at finde på Mars.

Kilde: Dirk Schulze-Makuch m.fl., “Transitory microbial habitat in the hyperarid Atacama Desert,” PNAS (2018). www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1714341115

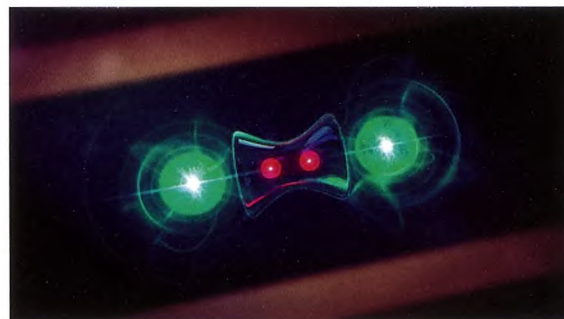
Fysikere skaber ny form for lys

KVANTEFYSIK. Fysikere fra MIT har skabt en ny form for lys, der vekselvirker som atomer. Lysformen er en bunden tilstand bestående af tre fotoner.

Det er kendt at fotoner kan vekselvirke ved diffraktion og interferensmønstre, men det nye er, at i denne tilstand opfører fotonerne sig som atomer, dvs. de er bundet sammen. I 2013 lykkedes det forskerne at skabe en bunden to-fotontilstand, og herefter har de undersøgt tilstande med flere fotoner. De skabte tre-fotontilstanden i en sky af ultrakolde rubidiumatomer (Rb). Ved ultrakolde temperaturer har atomerne så lidt energi, at de næsten ikke bevæger sig og nærmest står stille. Forskerne skød en meget svag laserstråle (dvs. meget få fotoner) gennem skyen, og da fotonerne kom ud af skyen igen, kom de ikke enkeltvis, men i par eller

tre ad gangen. Forskergruppen forklarede det med, at i rubidiumskyen kan fotonerne hoppe fra atom til atom, og binde sig med et rubidiumatom, hvorved de former en såkaldt polariton (et atom-foton par). To polaritoner kan vekselvirke med hinanden gennem deres to rubidiumatomer. Når polaritonerne kommer til kanten af rubidiumskyen, bliver atomerne tilbage, og fotonerne bevæger sig videre som en bunden fotontilstand. At fotonerne kan vekselvirke og binde sig til hinanden kaldes sammenfiltring (entanglement) og er en vigtig egenskab for kvanteinformationsteknologi.

Kilde: Qi-Yu Liang m.fl., “Observation of three-photon bound states in a quantum nonlinear medium,” Science (2018), Vol. 359, Issue 6377, pp. 783-786, DOI: 10.1126/science.aao7293



Bjerguret

MEKANISK FILOSOFI. Et projekt drevet af “The Long Now Foundation” går ud på at bygge et enormt mekanisk ur inde i et bjerg i Texas, som efter planen skal gå i 10.000 år. Hvorfor dog gøre det?, tænker de fleste nok, hvilket netop er grunden til hele projektet: at få mennesker til at sætte spørgsmålstegn ved projektet og selve tidsrammen på 10.000 år. Om 10.000 år vil verden være et helt andet sted end vi kender den idag, en verden man slet ikke kan forstille sig. The Long Now Foundation forklarer at der idag eksisterer avanceret teknologi, hvilket er godt, men som de mener også kan skabe problemer og derfor ønsker de at uret, for de fremtidige generationer, kommer til at fremstå som et symbol på langtidstænkning, ansvarlighed og eftertænkksomhed. Det er vigtigt at uret, som bliver 60 m højt, bygges på et stabilt sted, hvilket projektet har valgt til at være Sierra Diablo bjergene i Texas.

Uret er et stort pendul og bygges blandt andet af rustfrit stål og af titan, men da nogle af delene bevæger sig meget langsomt er det vigtigt at materialet også kan det, så her bruges nogle særlige keramiske materialer bestående af zirkoniumdioxid (ZrO₂).

Uret bevæges ved hjælp af energi der lagres fra temperaturændringer i toppen af bjerget, hvor temperaturen i løbet af et døgn ændres drastisk. Selvom uret skulle gå i 10.000 år skal det dog trækkes op en gang imellem (af et menneske), så projektet formår ikke at isolere uret helt fra menneskelig indblanding. Derfor er uret nok en teknologisk kuriositet, der mest må betragtes som et kunstnerisk projekt, der sætter spørgsmål ved tiden og menneskeheden.

kilde: <http://www.10000yearclock.net/learnmore.html>, <https://ing.dk/artikel/uret-bjerget-vil-male-tiden-de-naeste-10000-ar-211156>

Heisenberg – fysik, filosofi og tro

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, KVANT

Udenfor fysikkredse er Werner Heisenberg (1901–1976) måske mest kendt i kraft af den britiske dramatiker Michael Frayns skuespil “København”, som skildrer et møde mellem Niels Bohr og Heisenberg under den tyske besættelse i København i 1941. Men i fysikken er Heisenberg især kendt for grundlæggende bidrag til kvantemekanikken, som han modtog nobelprisen for i 1932. Han var imidlertid også dybt interesseret i fortolkningen af kvantemekanikken og de filosofiske konsekvenser, ligesom han var optaget af forholdet mellem naturvidenskab og religion, hvilket er emnet for denne artikel, som således bringes i forlængelse af KVANTs temanummer om naturvidenskab og religion (2017/4).

Samarbejde med Bohr

Werner Heisenberg mødte Niels Bohr for første gang i 1922 i forbindelse med en “Bohr-festival” i Göttingen, hvor Bohr var gæsteforelæser. Mødet fik stor indflydelse på den unge Heisenberg, og i de efterfølgende år opholdt han sig flere gange i længere perioder i København, hvor han arbejdede sammen med Bohr. Udover at det var et meget frugtbart samarbejde, udviklede de også et nært venskab, som imidlertid sluttede ved det møde i 1941, som var genstand for Michael Frayns skuespil. Skuespillet foregiver ikke at være historisk korrekt, og hvad der egentlig blev sagt under mødet har siden optaget mange personer.

Tilbage i en lykkeligere periode i midten af 1920'erne udviklede Heisenberg sammen med Max Born og Pascual Jordan kvantemekanikken i den såkaldte matrixmekanik, og få år senere formulerede han sin berømte ubestemthedsrelation. Han fik således afgørende betydning for udviklingen af den moderne fysik, og han var kun 30 år gammel, da han i 1932 modtog Nobelprisen i fysik.



Figur 1. Niels Bohr i samtale med Werner Heisenberg og Wolfgang Pauli. Fotografiet er taget i København omkring 1930.

Da Heisenberg begyndte at læse fysik og matematik i 1920 på universitetet i München og senere på universitetet i Göttingen, havde naturvidenskaberne igennem 1800-tallet og begyndelsen af 1900-tallet gennemgået en rivende udvikling, der dels havde ført til nye erkendelser og også fundet mange nye og imponerende anvendelser indenfor fx medicin, landbrug og industri.

Naturvidenskabens succes styrkede også udviklingen af den materialistiske filosofi, der mente, at hele tilværelsen kunne forklares med fysik og kemi.

Naturvidenskab fremmer mekanisk verdensopfattelse

En del af den materialistiske pakke var en mekanisk og deterministisk opfattelse. Verden var en stor maskine, hvor alt kunne beregnes og derfor også forudsiges. Tankegangen kan føres tilbage til den franske astronom og matematiker Pierre-Simon Laplace (1749–1827) og hans berømte udtalelse om at “en intelligens med kendskab til alle deles positioner og hastigheder i det store verdensmaskineri ville være i stand til at forudsige enhver efterfølgende hændelse i verden, inklusive dyrenes og menneskenes adfærd.”

Heisenberg har i sin bog “Fysik og Filosofi” [1] kommenteret situationen især i det sidste kapitel i bogen, som har titlen “Den moderne fysiks betydning for tænkningens udvikling i nutiden.” Her beskriver han, hvordan naturvidenskaberne i det nittende århundrede var med til at skabe en fast ramme, der “ikke blot blev bestemmende for videnskaben, men også for befolkningens almindelige horisont. Denne ramme støttedes af grundbegreberne i den klassiske fysik: rum, tid, stof og kausalitet. Virkelighedsbegrebet blev knyttet til de ting eller begivenheder, vi kunne opfatte med vore sanser, eller som kunne observeres ved hjælp af de forfinede instrumenter, de tekniske videnskaber havde skabt. Stoffet var den primære realitet. Man forestillede sig videnskabens fremskridt som et erobningskorstog ind i den materiale verden. Nytte var tidens løsen.”

Ifølge Heisenberg var denne ramme så stiv og snæver, at “det var vanskeligt at finde plads i den til mange af vort sprogs grundbegreber, f.eks. begreber som bevidsthed, sjæl og liv.” Det betød, at “livet (måtte) forklares som en fysisk og kemisk proces, der blev styret af naturlove og var fuldstændig årsagsbestemt. Darwins udviklingslære stemte smukt med denne fortolkning.”

Samtidig blev det “især vanskeligt at finde plads til de dele af virkeligheden, som havde udgjort den traditionelle religions indhold, og som nu virkede mere eller mindre uvirkelige.” Konsekvensen heraf blev, at videnskaben udviklede ligegyldig eller ligefrem en “åbent fjendtlig indstilling til religionen”, hvor “tilliden

til den videnskabelige metode og til den rationelle tænkning afløste alt det, den menneskelige bevidsthed hidtil havde slået sin lid til.”

Fysikken ændrer den materialistiske opfattelse

Heisenbergs påvisning af, at det ikke var muligt på samme tid at bestemme en elektrons position og hastighed rokkede ved den strenge determinisme, og diskussionen om den frie vilje blev taget op igen, sammen med spørgsmålet om, hvorvidt videnskaben alene er tilstrækkelig til at give os et livsgrundlag.

I ”Fysik og Filosofi” kommenterer Heisenberg også, at den nye fysik, han var med til at udvikle, ændrede den materialistiske opfattelse af tilværelsen og at ”vor holdning over for begreber som bevidsthed, sjæl, livet og Gud, efter den moderne fysiks erfaringer må være forskellig fra det nittende århundredes, idet disse begreber hører til dagligsproget og derfor står i umiddelbar forbindelse med virkeligheden.”

Heisenberg opfatter således virkeligheden som rummende mere end den rent ydre verden, som fysikken kan undersøge.

I bogen ”Del og Helhed” [2] gengiver Heisenberg to samtaler, hvor forholdet mellem naturvidenskab, etik og religion blev drøftet. Deltagerne i den første samtale, der fandt sted en aften i forbindelse med Solvay-konferencen i Bruxelles i 1927 var udover Heisenberg selv, Wolfgang Pauli og Paul Dirac, og udgangspunktet var Max Plancks skarpe skelnen mellem tro og viden: naturvidenskaben handler om den objektive, materielle verden, mens religionen handler om de subjektive værdier i livet, og de to måtte holdes ude fra hinanden.



Figur 2. Heisenberg i samtale med Bohr ved en konference i København.

Har naturvidenskabens sprængt den religiøse ramme?

Spørgsmålet var, om denne opdeling kunne bevares, og især Pauli var bekymret for, at naturvidenskabens fremgang havde sprængt den gamle religiøse ramme for mange mennesker. ”Den fuldstændige adskillelse mellem viden og tro er sikkert kun en nødforanstaltning for meget begrænset tid,” mente han og han frygtede, at der ”i den vestlige kulturkreds ... i en ikke alt for fjern fremtid (kan) komme det tidspunkt, da den hidtidige

religions lignelser og billeder ikke længere har nogen overbevisende kraft, end ikke for den jævne befolkning; jeg frygter, at da vil også den hidtidige etik meget hurtigt bryde, og at der vil ske ting af en forfærdelighed, som vi nu slet ingen forestilling kan gøre os om.” Han tilsluttede sig Einsteins opfattelse:

”Den Vorherre, som han (Einstein) så gerne påberåber sig, har på en eller anden måde med de uforanderlige naturlove at gøre. Einstein har en følelse af tingenes centrale orden. Han fornemmer denne orden i naturlovenes enkelthed. Man kan antage, at han har oplevet denne enkelthed stærkt og umiddelbart ved opdagelsen af relativitetsteorien. Ganske vist er der herfra en lang vej til religionens forskellige indhold. Han er næppe knyttet eller bundet til en religiøs tradition, og jeg vil tro, at forestillingen om en personlig Gud er ham ganske fremmed. Men der består for ham intet skel mellem videnskab og religion. Den centrale orden hører for ham til det subjektive lige så vel til det objektive domæne, og det forekommer mig at være et bedre udgangspunkt.”



Figur 3. Møde i 1930 på Institut for Teoretisk Fysik (Niels Bohr Institutet) i København. Første række fra venstre: Oscar Klein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev D. Landau, Hans A. Kramers; anden række: Ivar Waller, Piet Hein, Rudolf Peierls, Walter Heitler, Felix Bloch, Tatiana Ehrenfest, Walter Colby, Edward Teller.

Dette standpunkt tilfredsstillede ikke helt Heisenberg, men Pauli fortsætter og viser, hvordan videnskabens udvikling i de sidste to århundreder har ændret menneskers tanker, også langt ud over den kristne kulturkreds. ”Det er følgelig ikke uvigtigt, hvad fysikerne tænker. Og det var netop snæverheden i dette ideal: en objektivt, i rum og tid efter årsagsloven fortløbende verden, der har fremmanet konflikten med de forskellige religioners åndelige former. Når naturvidenskaben selv sprænger denne snævre ramme – og det har den gjort i relativitetsteorien og turde langt mere gøre det i kvanteteorien, som vi nu diskuterer så heftigt – ser forholdet mellem naturvidenskaben og det indhold, som religionerne søger at gribe i deres åndelig former, jo igen anderledes ud. Måske har vi ved hjælp af de sammenhænge, som vi har erfaret i de sidste tredive år i naturvidenskaben, vundet en større bredde i tænkningen. For eksempel var det komplementaritetsbegreb, som Niels Bohr nu stiller så stærkt i forgrunden ved tydingen af kvanteteorien, jo på ingen måde ukendt i åndsvidenskabernes, i filosofien, selvom det ikke er

blevet formuleret så udtrykkeligt. ... først gennem dette begreb (komplementaritetsbegrebet) kan man gøre det forståeligt, at forestillingen om et materielt objekt, der er helt uafhængigt af den måde, på hvilken det bliver iagttaget, kun repræsenterer en abstrakt ekstrapolation, til hvilken intet virkeligt svarer ganske nøje. I Asiens filosofi og i de derværende religioner findes den dertil komplementære forestilling om erkendelsens rene subjekt, over for hvilket der intet objekt står. Også denne forestilling vil vise sig at være en abstrakt ekstrapolation, til hvilken ingen psykisk eller åndelig virkelighed svarer ganske nøje.”

Ifølge Pauli kan videnskaben være tvunget til at styre mellem disse to ekstremer, og vil “ikke kun være mere tolerant over for religionens forskellige former, men, da den overskuer helheden bedre, måske kunne yde bidrag til værdiernes verden.”

Nu kom den 25-årige Dirac ind i samtalen. Han var (i hvert fald dengang) kommunist og rettede et skarpt angreb på religionerne: “Jeg kan ikke indse, at antagelsen af en almægtig Guds eksistens hjælper os videre på nogen som helst måde. Derimod kan jeg indse, at antagelsen fører til absurde problematikker, for eksempel til det spørgsmål, hvorfor Gud har tilladt ulykke og uretfærdighed i vor verden, de riges undertrykkelse af de fattige og alt det andet frygtelige, som han jo kunne forhindre. ... Religionen er en slags opium, som man giver folket lov til at tage for at vugge det i lykkelige ønskedrømme og dermed trøste det for den uretfærdighed, som de er ude for.”

Hertil svarede Heisenberg: “Dermed bedømmer du religionen ud fra de politiske misbrug af den, og da man kan misbruge næsten alt i denne verden – sikkert også den kommunistiske ideologi, du nylig har talt om – er problemet ikke klaret med en sådan bedømmelse. I sidste instans vil der altid eksistere menneskelige samfund og sådanne samfund må også finde et fælles sprog, på eller i hvilket der kan tales om døden og livet og om den store sammenhæng, under hvilken samfundets liv forløber. De åndelige former, der i historiens løb har udviklet sig ved denne søgen efter et fælles sprog, må alligevel have besiddet en stor overbevisningskraft, når så mange mennesker århundreder igennem har orienteret deres liv efter disse former. Religionen lader sig ikke affærdige så let, som du siger.”

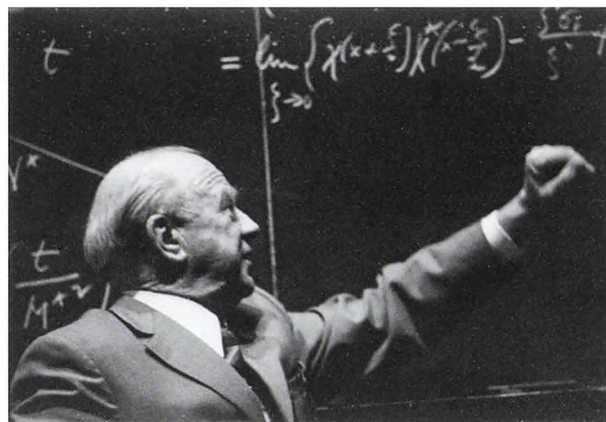
Diracs svar er, at han “principielt ikke (kan) bruge de religiøse myter til noget. ... Allerede denne talen om en stor sammenhæng og deslige er mig i grunden imod. Det er i livet som i vor videnskab: Vi stilles overfor vanskeligheder, og vi må forsøge på at overvinde dem. Og vi kan altid kun overvinde én vanskelighed ad gangen, ikke flere på én gang; at tale om sammenhæng er altså ikke andet end en intellektuel overbygning, der er sat på bagefter.”

Diskussionen fortsatte en stund frem og tilbage, indtil Pauli så op og sagde: “Ja, ja, vor ven Dirac har en religion, og denne religions hovedsætning lyder: ‘Der er ingen Gud, og Dirac er hans profet’.” Herefter lo alle sammen, også Dirac, og samtalen var til ende.

Religionens sprog

Heisenberg refererede senere samtalen for Bohr, der tog Dirac i forsvar og sagde: “Jeg finder det vidunderligt, hvor kompromisløst Paul Dirac står i forholdet til det, der lader sig udtrykke klart i logisk sprog. Hvad der overhovedet lader sig sige, mener han også lader sig sige klart, og for at tale med (filosoffen Ludwig) Wittgenstein – det, man ikke kan tale om, må man tie om.”

Senere tilføjer Bohr: “Om religion kan man nok ikke tale sådan. Ganske vist har jeg det på samme måde som Dirac, nemlig at forestillingen om en personlig Gud er mig fremmed, men man må dog frem for alt være klar over, at sproget i religionen bruges på en helt andet måde end i videnskaben. Religionens sprog er nærmere beslægtet med digtningens end med videnskabens. Man er ganske vist straks tilbøjelig til at tænke, at i videnskaben drejer det sig om informationer om objektive foreteelser og sammenhænge, i digtningen om vækkelse af subjektive følelser. I religionen menes der objektiv sandhed, følgelig bør den være underkastet videnskabens sandhedskriterier. Mig forekommer hele denne inddeling i verdens objektive og subjektive side alt for kunstig. Når der i alle tiders religioner tales i billeder og lignelser og paradokser, kan det næppe betyde andet, end at der ganske simpelt ikke findes andre muligheder for at fatte den virkelighed, som her menes. Men det betyder ikke, at den ikke er ægte virkelighed. ... Den kendsgerning, at forskellige religioner søger at give dette indhold skikkelse i meget forskellige åndelige former, betyder i så fald ingen indvending mod religionens virkelige kerne. Måske bør vi se på disse forskellige former som komplementære beskrivelsesmåder, der ganske vist gensidigt udelukker hinanden, men først i deres totalitet formidler et indtryk af den rigdom, der udgår fra menneskenes relation til den store sammenhæng.”



Figur 4. Heisenberg ved en forelæsning.

Et par år senere var Dirac og Heisenberg på vej over Stillehavet fra møder i USA til møder i Japan, og turen gav dem god tid til både at studere delfiner og flyvefisk samt til at fortsætte deres diskussion. Heisenberg formulerede det således, at han troede fast på, at naturens “sammenhænge i den sidste instans var enkle; ... at naturen er indrettet sådan, at den kan forstås. Eller måske burde jeg snarere omvendt sige, at vor intelligens er indrettet sådan, at den kan forstå naturen”, og Heisenberg slutter: “Det er de samme ordnende kræfter, der har dannet naturen i alle dens

former, og som er ansvarlige for vor psykes og dermed vor intelligens' struktur."

Og Dirac gentog sit synpunkt fra samtalen i Bruxelles: "Man kan ikke klare mere end én vanskelighed ad gangen", og han mente derfor ikke, at der var tale om sammenhæng i naturen. I følge Heisenberg var uenigheden således ikke blot et spørgsmål om den mest velegnede metode til at udvikle fysikken, men også en uenighed om det grundlæggende syn på verden og dens ordnede struktur.



Figur 5. Dirac og Heisenberg.

Heisenberg og den personlige Gud

Den sidste samtale finder sted i København i 1952 og begynder i Bohrs æresbolig på Carlsberg. Efter samtalen fortsætter Heisenberg og Pauli på en lang spadseretur gennem byen, og da de når til Langelinje spørger Pauli: "Tror du i grunden på en personlig Gud?" Hertil svarer Heisenberg: "Må jeg formulere det på en anden måde? Da ville det lyde: Kan du eller kan man træde så direkte frem over for den tingenes eller begivenhedernes centrale orden, der jo ikke kan tvivles på – træde i så direkte forbindelse med den – som det er muligt i forholdet til et andet menneskes sjæl? Jeg anvender her udtrykkeligt det meget vanskelige ord 'sjæl' for ikke at blive misforstået. Hvis du spørger sådan, ville jeg svare Ja."

Pauli siger nu "du mener altså, at den centrale orden kan være nærværende for dig med samme intensitet som et andet menneskes sjæl."

"Måske."

"Jeg ved ikke, om jeg helt kan følge med dig her.

Man bør jo heller ikke overvurdere sine egne oplevelser."

"Ganske rigtigt, men selv i naturvidenskaben påberåber man sig jo sine egne og også andres oplevelser, når disse er os fortalt på en troværdig måde."

Samtalen slutter med at Heisenberg siger: "Jeg holder mig til Max Webers tese: at pragmatismens etik i sidste instans stammer fra calvinismen, altså fra kristendommen. Når man i vor vestlige verden spørger, hvad der er godt, og hvad der er slet, hvad der er tilstræbellesværdigt, og hvad der må fordømmes, så finder man atter og atter kristendommens værdimålestok selv der, hvor man forlængst ikke længere kan udrette noget med denne religions billeder og lignelser. Når engang den magnetiske kraft, som har styret dette kompas, helt er udslukket – og kraften kan jo kun komme fra den centrale orden – frygter jeg, at der kan ske meget forfærdelige ting, der endog vil stille koncentrationslejrene og atombomben i skyggen.

Heisenberg er et eksempel på en forskers vej til en religiøs holdning, hvor han ikke blot søger sandheden i naturen, men også i den, der er bagved naturen.

Personlig kommentar

Udover at Heisenbergs to bøger har været en kilde til inspiration, minder de mig også om, at der ikke altid er så meget nyt under solen, når vi i dag fortsat diskuterer forholdet mellem religion og naturvidenskab. Mange af de argumenter, som jævnligt bliver nævnt, er således allerede fint repræsenteret ved Paul Diracs indlæg under samtalen tilbage i 1927, når han siger, at han ikke kan bruge de religiøse myter til noget, og at al denne tale om en større sammenhæng er ham inderligt imod.

Sidste år besøgte jeg Museum of Fine Arts i Boston, hvor jeg stødte på Paul Gauguins store billede [3] "*Hvor kommer vi fra? Hvem er vi? Hvor går vi hen?*" Gauguin malede billedet på Tahiti i 1897, og han har i et brev til malervennen George-Daniel de Monfreid forklaret, at det skal "læses" fra højre mod venstre: De tre kvinder med barnet symboliserer starten på livet, gruppen i midten den voksne tilværelse og endelig yderst til venstre den gamle kvinde, der nærmer sig døden. Den underlige hvide fugl på hendes venstre side ser ud, som om den skal have det sidste ord, men symboliserer ifølge Gauguin "ubrugeligheden af tomme ord", mens den blå statue i baggrunden repræsenterer det hinsidige. Gauguin mente selv, at det var det bedste billede, han havde malet, og han ikke ville være i stand til at male et, der var bedre.

De tre spørgsmål fra billedets titel, som Gauguin har skrevet i øverste venstre hjørne, er eksempler på, hvad filosofen Karl Popper har kaldt for "ultimative spørgsmål." Det er spørgsmål om vores eksistens og meningen med tilværelsen, som ethvert barn kan stille, men som den samlede naturvidenskab ifølge Popper ikke kan svare på.

Hvis vi tager udgangspunkt i mennesket som et biologisk væsen, er spørgsmål om meningen med livet derfor forkert stillet, for ifølge biologien findes der ikke nogen mening med hverken vores arts eller vores egen individuelle eksistens.



Figur 5. Paul Gauguin: *Hvor kommer vi fra? Hvem er vi? Hvor går vi hen?* (1897–1898). Boston Museum of Fine Arts

Alligevel har vi åbenbart behov for at finde en mening med tilværelsen, og som Søren Kierkegaard konstaterede: “Ethvert Menneske, hvor ringe begavet han end er, hvor underordnet hans Stilling i Livet end er, har en naturlig Trang til at danne sig en Livs-Anskuelse, en Forestilling om Livets Betydning og dets Formaal.”

Her står vi over for et paradoks: Den rationelle videnskabelige tankegang siger, at der ikke er nogen mening med tilværelsen, og alligevel bruger vi energi på at lede efter den. Vi kan dog trøste os med, at den forgæves jagt trods alt giver et godt udbytte, som i Gauguins tilfælde, hvor de ultimative spørgsmål førte ham til at male sit mesterværk.

Men paradokset er kun tilsyneladende, for naturvidenskaben siger ikke, at livet ikke har mening. Den siger blot, at den ikke kan besvare spørgsmålet. Min konklusion er derfor, at vi har brug for både fysik, metafysik og tro. Dette behov har i øvrigt vist sig inden for fagfysikken, idet fysikernes teorier om eksistensen af myriader af parallelle universer bevæger sig langt ind på metafysikkens domæne, da man ikke eksperimentelt kan afgøre, om der er mere end ét univers.

To forskellige måder at udforske verden på

Fysikken fortæller mig, at Universet har en alder og en begyndelse, men også at alt, hvad det indeholder af galakser, stjerner og planeter, opstod spontant og ud af ingenting. Selvom det kaldes for et moderne naturvidenskabeligt verdensbillede, er der for mig at se ikke den store forskel fra den kristne tro på, at “i begyndelsen skabte Gud himlen og Jorden.” Det er imidlertid to forskellige måder at tænke på, og forskellen er blandt andet, at hvis verden er skabt, indebærer det også den mulighed, at tilværelsen har en mening.

Naturvidenskab og kristendom er således to forskellige måder at udforske verden på, men de har det tilfælles, at de forsøger at forstå verden og menneskets plads i den. Den naturvidenskabelige metode involverer, at vi gennem eksperimenter og observationer kan falsificere forkerte hypoteser og dermed udvælge

teorier, som giver de bedste forklaringer. Tilsvarende forklarer kristendommen observationer og erfaringer inden for områder, som ikke dækkes af naturvidenskab.

Egentlig er det ikke overraskende, at vi har et behov for at forstå meningen med tilværelsen, eftersom vi også har et stort behov for at forstå den fysiske verden, der omgiver os, og dette behov driver både forskere og den generelt store interesse for forskningen. Men vi ønsker ikke blot at forstå vores verden, men også at sætte den ind i et større billede. Derfor leder fysikerne også efter den underliggende “teori om alting. Selv om det skulle lykkes, kan videnskaben dog alene aldrig frembringe det fuldstændige billede af verden.

Et eksempel på dette finder vi i romanen Morgenvandrerens rejse af C. S. Lewis, hvor Ramandu fortæller, at han er en gammel stjerne, der hviler sig på en af øerne i Narnia, inden han endnu engang vil stige op og lyse på himlen. Da et af børnene siger, at i “vores verden er en stjerne en kæmpe stor kugle af brændende gas”, svarer Ramandu, at “selv i din verden er det ikke, hvad en stjerne er, men hvad den er lavet af.”

Tænker vi nærmere over det, er det egentlig ganske overraskende, at vores intelligens, som Heisenberg påpeger, er indrettet sådan, at den kan forstå naturen. Vores hjerne er naturligvis udviklet til at kunne forstå de daglige omgivelser, vi befinder os i, men det er ikke oplagt, at den også er indrettet til at forstå kvantemekaniske fænomener i atomernes verden, hvor vore dagligdags erfaringer og intuition ikke længere kan anvendes.

Der ser ikke ud til at være grænser for, hvad vores hjerne vil være i stand til at forstå af kommende videnskabelige landvindinger, så hvorfor skulle vores hjerne ikke også være i stand til at erkende den del af verden, der ligger uden for naturvidenskab?

Her vil ateister indvende, at det ikke giver mening at stille spørgsmål, som ikke kan besvares af naturvidenskab, og at hvad naturvidenskaben ikke kan besvare, kan mennesket ikke vide. Til gengæld kan naturvidenskaben fortælle os rigtig meget, og Richard

Dawkins har også været inde på den tankegang, at hvis blot vi kender vores gener godt nok og ved, hvordan de påvirker vores adfærd, har vi mulighed for at ændre samme adfærd.

Men her er netop problemet: Hvis min adfærd og moralske intuition, alene er bestemt af fysiske og kemiske processer, hvordan skal en viden om disse processer så ændre min adfærd eller moral? For mig at se fører denne tankegang – om at vi kan sætte os ud over vores genetiske grundlag – os nærmere et livssyn baseret på tro end på videnskab eller i det mindste til et samspil mellem de to tilgange. I modsætning til den ateistiske opfattelse mener jeg derfor ikke, at videnskab fører til ateisme, men snarere til tro, og at man som forsker – også uden at være troende – kan anvende kristendommen som et filosofisk tilfredsstillende grundlag for tilværelsen.

Mit eget forbillede er teologen K. E. Løgstrup, der tager afsæt i, at verden er skabt, og i kraft af skabelsen er verden på forhånd værdiladet. Livet skal ses som en gave og ikke noget, vi selv har skabt. Derfor er det naturligt at tyde Universet religiøst, men tro kan ikke begrundes rationelt, og man kan ikke argumentere sig frem til, at man skal tro eller beslutte sig for at ville tro. For mit eget vedkommende er det en opdagelse, man kan gøre, ligesom Haruki Murakami i slutningen af sin trilogi *1Q84* lader den kvindelige hovedperson Aomame opdage, at hun tror.

Det er også godt nyt for ateister, der mener, at menneskeheden var bedre tjent med at være fri for religioner, for historien har givet os flere skrækkesejpler på, hvordan ideologier, der har forsøgt at udvikle rent ateistiske samfund, er endt i rædselsregimer som under nazismen eller under de mange varianter af kommunismen.

Her er den traditionelle indvending gerne, at islamismen har vist, at også religiøst baserede ideologier kan udvikle sig til en trussel mod menneskeheden. Men ligesom der er forskel på ideologier, er der også forskel på religioner, og i en verden, hvor den religiøse tolerancce er på tilbagetog, er kristendommen nok ateisternes bedste allierede.

Naturvidenskab og kristendom er således ikke naturlige fjender. Der har været velkendte sammenstød i forbindelse med, at naturvidenskaben har flyttet først Jorden og siden mennesket bort fra en plads i Universets centrum, men den underliggende strømning har været et frugtbart samspil. På trods af den behandling, Galileo fik, så konkluderede videnskabshistorikeren J. L. Heilbron i bogen *“The Sun in the Church”*, at den katolske kirke fra det 12. til det 18. århundrede var den institution, som udgjorde den største støtte for astronomien.

Endelig skal vi huske på, at selv naturvidenskaben ikke giver endelige svar. For hundrede år siden var fysikerne enige om, at Universet var evigt og uendeligt,

men siden har kosmologi, kvantemekanik og relativitetsteori ændret afgørende på vores opfattelse af stof, rum og tid. Måske vil biologerne om hundrede år have revideret evolutionsteorien til ukendelighed, og vi ved med sikkerhed, at en stor del af vores nuværende viden ikke er korrekt, blot ved vi ikke, hvilken del der vil vise sig at være forkert. Som Karl Popper har udtrykt det, så bygger vi ikke videnskabelige teorier på fast grund, men vi rammer pælene til fundamentet så langt ned i dyndet, at vi indtil videre er tilfredse med grundlaget.

Hvad er så svaret på det ultimative spørgsmål om livets mening? Bohr har på sin egen underfundige måde sagt, at det i hvert fald ikke giver mening at sige, at livet ingen mening har. Så her er der mere hjælp at hente hos Heisenberg, når han siger, at religioner i modsætning til videnskab ikke giver præcise definitioner på ord og begreber, men bruger lignelser. Derfor har Biblen kunnet overleve årtusinderne, fordi den åbner for uendelige fortolkninger. Alligevel mener han, at sproget i de religiøse lignelser binder mennesker mere sammen end noget andet fælles sprog, og at den gamle søgen efter meningen med livet derfor besvares i de lignelser, som ligger til grund for religionen. Ifølge Heisenberg kan lignelserne således tale direkte om meningen med livet, men det sprog, der er dannet i lignelsen, kan være af en sådan art, at spørgsmålet om livets betydning ikke længere er formuleret i ord.

Så måske er det nærmeste, vi kan komme et svar på det spørgsmål, det som Wittgenstein har givet, nemlig at livets mening opstår, når vi tror, at vi tænker og lever i overensstemmelse med noget, der er dybere og større end os selv.

Litteratur

- [1] W. Heisenberg (1960) *Fysik og Filosofi*, Thaning & Appel, København.
- [2] W. Heisenberg (1971) *Del og Helhed*, Thaning & Appel, København.
- [3] Det følgende bygger på en kronik bragt i Weekendavisen den 28. april 2017, J. O. P. Pedersen, *Det varer ved*.



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

Stephen Hawking (1942-2018)

(2) Hawkings ideer om at der er udstråling fra sorte huller – den berømte “Hawking stråling”. Sorte huller er således alligevel ikke helt sorte: “Sorte huller lyser”. Meget små sorte huller lyser endog rigtig meget!²

(3) Hawkings (og Bekensteins) ideer om at tilskrive sorte huller en entropi, der – forholdsvis overraskende – vokser proportionalt med *overfladearealet* af det sorte hul og ikke med dets volumen.

(4) Hartle-Hawkings “no-boundary” betingelse: Universet har den begyndelsesbetingelse, at det ingen begyndelse har. En ide der er udarbejdet sammen med Murray Gell-Manns tidligere student Jim Hartle.

Den meget lille plads her gør det ikke muligt i nogen detalje at beskrive disse ideer, som især blev udviklet over en periode på tyve år, fra midt 1960’erne til midt 1980’erne. En god kilde til mere information er Stephen Hawkings hjemmeside (www.hawking.org.uk), der indeholder gode (og ikke tekniske) manuskripter og mange interessante oplysninger.

Hvad angår (1) er singularitets-teoremerne idag et alment accepteret og matematisk velfunderet teoretisk resultat.³

Derimod er (2) og (3) noget kontroversielle og nærmest at regne for “kvalificerede gæt” som dog er bygget på fysiske argumenter.⁴ Men det er vigtigt, for eksempel, at fortælle at Hawking-strålingen (2) ikke er eksperimentelt eftervist. Hvad angår sorte hullers entropi (3) er det tætteste på en fysisk (mikrofysisk) fundering af entropien (i et forsøg på at optælle et sort huls mikrotilstande og ikke alene basere sig på termodynamiske analogier) vist et tyve år gammelt arbejde af Andrew Strominger og Cumrun Vafa (hep-th/9601029), som forsøger at fundere entropien mikrofysisk for en klasse af 5-dimensionale sorte huller indenfor en strengteori-formulering. Hvad angår (4) sker formuleringen matematisk i termer af et ikke-veldefineret funktionalintegral – der bl.a. involverer en

“*imaginær tid*”.⁵ Det er ikke muligt (p.t.) at formulere ideen på en matematisk velfunderet måde og som reelt gør det muligt at regne på teorien. Murray Gell-Mann (kvarkernes opfinder) fortalte ofte – i sine foredrag – at “Hartle-Hawking-no-boundary”-betingelsen udtrykker “en drøm om at det er *muligt* at beskrive *randen af* vort Univers i termer af begreber (matematik sprog m.m.) som er opstået i det *indre af* vort Univers.”

Tilslidst en personlig anekdote. En af de gange hvor vi var fysikere fra København, der havde mulighed for at mødes og diskutere med Stephen Hawking var på Kreta i 1998 til et såkaldt “Triangulært Møde” (der var udvidet til en 5-kant, dvs. fem universiteter havde leveret fysikere til mødet). Jeg tog dér et billede (som bringes på bagsiden) af tre gode og meget forskelligartede fysikere: Holger Bech Nielsen, Gerard ’t Hooft og Stephen Hawking, som på billedet sidder i sin kørestol og hører Holger fortælle. Hawking havde en fin hørelse og ville gerne have at folk snakkede til ham. Det tog bare lang tid for ham at svare!

Senere blev der ud på aftenen spillet op til dans. Hawking dansede med og futede rundt i sin kørestol – meget energisk! – og deltagerne hyggede sig gevaldigt over det. Sidste gang jeg så Hawking, var for et par år siden til konferencen “Philosophy of Cosmology” i september 2014. Den var arrangeret af bl.a. Cambridge University, men blev afholdt på en af De Kanariske Øer med et behageligt klima. Hawking måtte egentlig ikke rigtig vise sig til konferencen (men alle hans venner var der; George Ellis, Don Page, Jim Hartle, osv, så Hawking kunne slet ikke holde sig væk!) Hawking var nemlig inviteret – som en af hovedtalerne – til den *efterfølgende* konference i hvilken der deltog *virkelige berømtheder* såsom astrofysikeren og rockmusikeren Brian May fra rockbandet Queen og en Apollo 16 astronaut der havde gået rundt på jordklodens måne. Det havde vist altid været en af Hawkings drømme at komme på en sådan rejse!

²Udstrålingen er en sortlegemestråling (blackbody radiation) ved en Hawking-temperatur T_H som er omvendt proportional med det sorte huls masse M . Hvis vi angiver det sorte huls masse M i forhold til massen $M_\odot$ af Solen fås følgende overslag for Hawking-udstrålingstemperaturen (angivet i kelvin K)

$$T_H = \left(\frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B} \right) \cdot \frac{1}{M} \sim 10^{-7} \text{ K} \cdot \frac{M_\odot}{M}.$$

Et sort hul med masse som Solen har en forsvindende Hawkingtemperatur på $\sim 10^{-7}$ K. Teorien for Hawkingudstrålingen fører til at levetiden (“fordampningstiden”) for det sorte hul bliver proportional med M^3 (det sorte huls masse opløftet i tredje potens). Fx vil et sort hul med en masse $M_\odot$ som Solen leve $\sim 10^{67}$ år, mens et sort hul med masse $\sim 10^5$ kg kun lever et enkelt sekund. Så er det strålet ud! Ifølge Hawking.

³De fleste fysikere mener at rumtidssingulariteter – fx hvor rumtids-krumningen kan divergere og blive uendelig stor – ikke er en *fysisk egenskab* ved vort univers, og derfor peger eksistensen af sådanne singulariteter på *grænser* for anvendelsen af Einsteins *klassiske* (ikke-kvantiske) teori for gravitationsfeltet. Dvs. at denne teori ikke er den endelige og fuldt tilfredsstillende beskrivelse af gravitationsfeltets opførsel i alle fysiske situationer.

⁴Holger Bech Nielsen, med hvem jeg har diskuteret dette, synes at dette træk ved teorierne i en vis forstand gør teorierne til et flottere bidrag til fysikken, idet man netop ikke bare kan udlede dem ved brug af et pålideligt og sikkert ræsonnement!

⁵Holger Bech Nielsen er en af de fysikere i Danmark der f.eks. i sine foredrag har forholdt sig til nogle af Hawkings mere spekulative tanker, fx “baby universes” og “no-boundary”-betingelsen for Universet, og Holger slog altid ud med armene og sagde “...og dét forstår jeg ikke helt!”, når han nåede netop dét sted i sit foredrag, hvor han skulle redegøre for, at Stephen Hawking lader tiden blive imaginær.

Stephen Hawking (1942-2018)

Af Svend E. Rugh, KVANT



Gerard 't Hooft, Holger Bech Nielsen og Stephen Hawking, som på billedet sidder i sin kørestol, mens Holger Bech Nielsen fortæller.

Vi vil i redaktionen af tidsskriftet KVANT meget gerne bringe nogle ord om Stephen Hawking, der i levende live nåede at blive nogenlunde lige så berømt som de allermest berømte filmskuespillere fra Hollywood. Det var fortræffeligt, og heldigt, at Hawking overlevede "sine lægers dødsdom" med mere end et halvt århundrede, i hvilket Hawking – trods tiltagende fysiske handicap – fik bidraget med overraskende ideer til fysikken. Endvidere fik Stephen Hawking – med humor¹ og sans for at finde på illustrative, anskuelige billeder – fortalt om sine ideer og tanker i mange forskellige sammenhænge.

Hawkings forskningsfelt var *især* teorier for gravitationsfeltet, og hans tanker har haft meget stor slagkraft og virkning på fysikere, der pusler med projekter indenfor dette emne. Fx følgende ideer:

(1) Stephen Hawking anvendte – allerede i sin ph.d.-afhandling fra 1965 – Roger Penroses singularitetsteoremer *på hele* Universet, hvor Penrose i tale og på skrift selvsamme år kun havde anvendt sine nye matematiske metoder på sorte huller og matematisk bevist, at disse må have en singularitet under visse rimelige antagelser.

Fortsættes på side 35.

¹Her i Danmark har lektor i fysik (ved Syddansk Universitet) Arne Lykke Larsen præcis samme sygdom – ALS – som Stephen Hawking, og med en dejlig (og fantastisk imponerende og beundringsværdig) humor skrevet bøger derom. Fx bogen "Alt er muligt" fra 2011. En bog der er skrevet alene ved at blinke med øjnene. Sådan blev også Hawking nødt til at opbygge sine foredrag og skrive sine bøger, hvis han ville skrive dem selv.