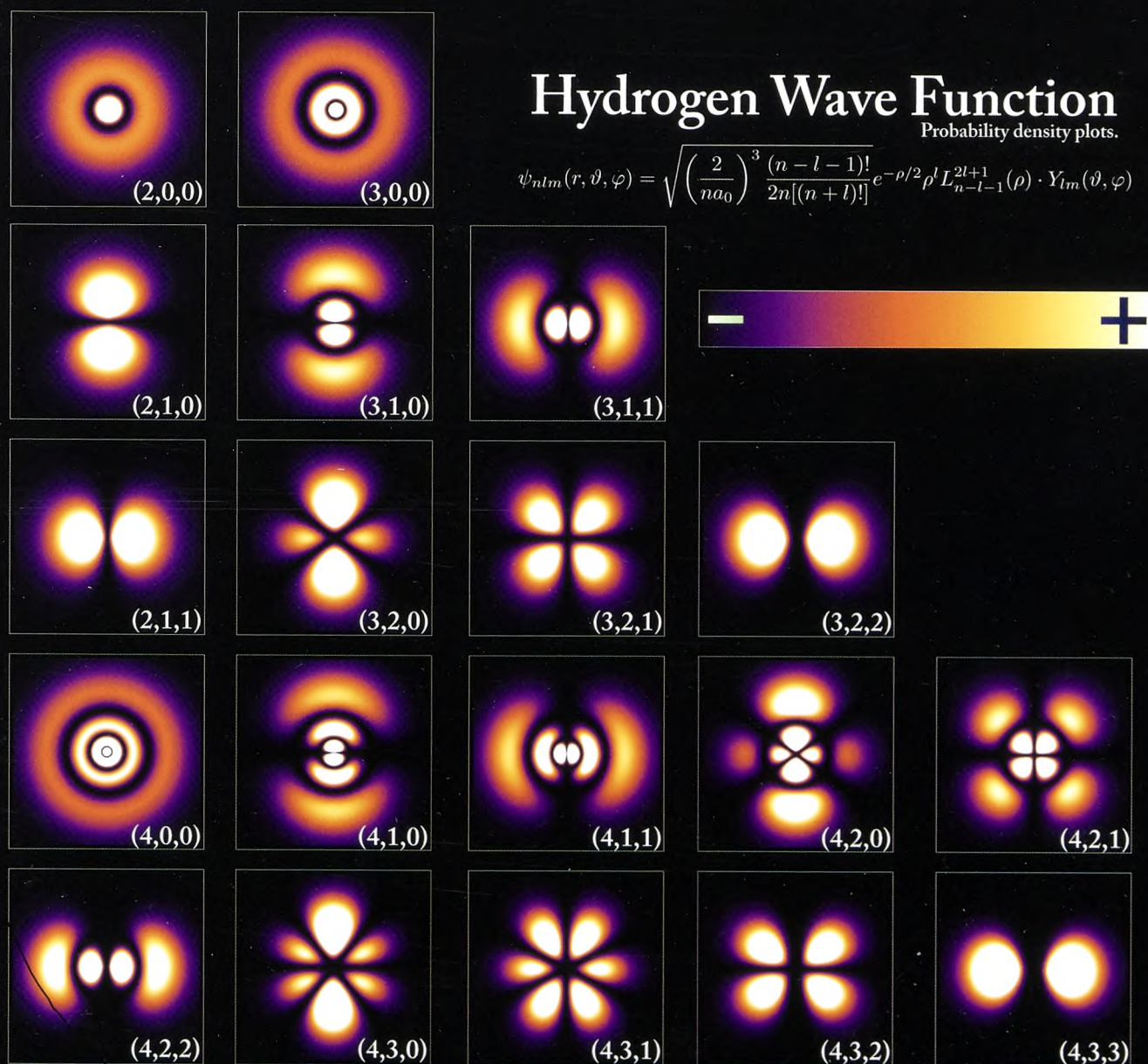




STORT TEMANUMMER OM KVANTEMEKANIK

- EINSTEIN OG KVANTEMEKANIKKEN
- KVANTEMEKANIKKENS OPRINDELSE
- NIELS BOHR OG MARGRETHE NØRLUND
- KVANTEMEKANIKKENS FORTOLKNINGER
- PÅ TÆRSKLEN TIL EN NY KVANTETEKNOLOGISK REVOLUTION
- ARVEN FRA NIELS BOHR • NYT FRA MARS • AKTUELLE BØGER • ØRSTEDMEDALJER

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space, Centrifugevej 356
DK-2800 Kgs. Lyngby

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

Selskabet for Naturlærers Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),

DTU Space

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Health Technology

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 Søgård (Facebookredaktør og AS)

Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

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).

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reprojekteret
materiale i farver. Henvendelser om annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 3-2021 udkommer ca. 15. september

Nr. 4-2021 udkommer ca. 15. december

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

Indhold:

“... som en mor for mine elever?” – Niels Bohr og Margrethe Nørlund,
1910–1913

Finn Aaserud 3

Einstein og kvantemekanikken

Per Hedegaard 10

Kvantemekanikkens oprindelse (1925–1927)

Christian Joas 14

Nyt fra foreningerne 20

Kvantemekanikkens fortolkninger

Klaus Mølmer 21

På tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution

Peter Lodahl, Kim Splittorff og Anders S. Sørensen 26

Arven fra Niels Bohr

Thomas Grønland Nielsen 29

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen 33

Benzinforbrug og covidsmitte – breddeopgave 91 og 92 med didaktisk
kommentar

Jens Højgaard Jensen 34

Nyt fra foreningerne 36

Nyt fra Mars: Ingenuity-helikopteren begejstrer

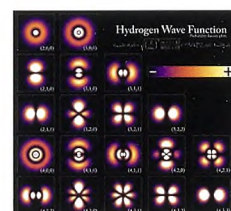
Christine Pepke Gunnarsson 37

Kommende foredrag 39

Ørstedmedaljer til to lærere Bagsiden

Billedet på forsiden viser sandsynlighedstætheden
for elektronen i et brintatom for hovedkvantetallet n
op til 4, dvs. ved forskellige energiniveauer. Kvan-
temekanik kan ikke forudsige den nøjagtige placering
af en partikel i rummet, kun sandsynligheden for at
finde den på forskellige steder i rummet.

Grafik: Wikimedia Commons.



Dette nummer af Kvant er et temanummer om kvan-
temekanik, som er udgivet for at markere 100-året for
indvielsen af Niels Bohr Institutet.

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), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for
Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Kvant omdeles fra 2021 med PostNord. Såfremt bladet udebliver opfordres
du til at kontakte PostNords kundeservice på telefon 70707030 samt orientere
Kvant på e-mail kvant@kvant.dk.

“... som en mor for mine elever?”

Niels Bohr og Margrethe Nørlund, 1910–1913

Finn Aaserud, Niels Bohr Arkivet

Niels Bohrs revolutionerende teori om kvanteatomet fra 1913 havde sin baggrund i hans studieophold i England 1911–1912. Inden han tog afsted fra København, havde han forlovet sig med Margrethe Nørlund, som skulle blive hans livsledsagerske. Meget af korrespondancen mellem de to under Englandsopholdet er bevaret. Den viser, som argumenteret i denne artikel, at forholdet til Margrethe var helt essentielt for Niels’ videnskabelige udvikling, og udgør en specielt klar dokumentation for hans behov for at dele sine tanker med andre, et behov som senere skulle blive en væsentlig forudsætning for den berømte “Københavnerrånd” på Københavns Universitets Institut for Teoretisk Fysik (fra 1965 Niels Bohr Institutet), der blev oprettet for Niels Bohr i 1921.

Efter at Niels Bohr fik oprettet sit Institut for Teoretisk Fysik ved Københavns Universitet i 1921, blev det et af de internationalt mest centrale forskningssteder i faget. Dette skyldtes ikke alene Bohrs videnskabelige kompetencer, men i høj grad også hans evne til at skabe et helt specielt miljø for de overvejende yngre udenlandske medarbejdere, der besøgte instituttet i kortere eller længere tidsrum. Dette miljø er blevet kaldt “Københavnerrånden”, og bestod i en helt speciel uformel atmosfære, hvor videnskabelige problemer blev diskuteret på lige fod mellem deltagerne [1]. For mange af de yngre fysikere var det en stor ære at blive valgt som Bohrs specielle medarbejder, som på papir skulle nedfælde de tanker, som Bohr udtrykte, mens han gik rundt om arbejdsbordet og prøvede at tænde sin pibe, eller på lange spadserture i naturen. At have en sådan medarbejder var ikke en bevidst strategi fra Bohrs side, men en psykologisk nødvendighed for at han overhovedet kunne tænke.



Figur 1. Bohrfamilien på trappen til boligen i Bredgade. Fra venstre: Christian, Harald, Ellen, Niels, Jenny (forrest).

Dette var et træk ved Bohrs personlighed, som hans forældre tidligt blev klar over, og som de dyrkede. Således blev nogle af Bohrs fysikafhandlinger under studietiden på Københavns Universitet skrevet i hånden af Bohrs mor, Ellen, og Bohrs far, den prominente fysiolog Christian Bohr, engagerede sig også i sønnens videnskabelige tanker og arbejde (figur 1). Bohrs tidlige

behov for at have nogen at dele sine tanker med kommer særligt tydeligt frem i hans private korrespondance med hans forlovede, og senere hustru, Margrethe Nørlund 1910 til 1913 [2]. Det meste af korrespondancen fandt sted under Niels’ måske mest kreative periode, hvor han befandt sig i England efter at have fuldført sin doktorafhandling i Danmark, hvilket gav ham anledning til at arbejde med de spørgsmål i atomfysikken, som han i 1922 skulle få Nobelprisen for [3].



Figur 2. Margrethes forældre, Sophie og Alfred Nørlund.

Forholdet begynder i København

Margrethe var født og opvokset i Slagelse (figur 2). Hun var en yngre søster af Poul og Niels Erik Nørlund. De to brødre studerede på Københavns Universitet samtidig med Niels, som kendte dem begge. Margrethe erindrer, at hun mødte Niels første gang ved et middagsselskab i København i begyndelsen af september 1909. Selv om hun sad ved hans side, kan hun ikke huske, at de talte sammen ved den lejlighed (figur 3). Hun var flyttet til København blot en uge før for at studere ved *Zahles Faglærerindeskole*, grundlagt i 1905 af pioneren Natalie Zahle [4]. På skolen koncentrerede Margrethe sig først og fremmest om fransk litteratur.

Parret blev hurtigt forelsket og besluttede sig for at blive forlovet samme sommer. Forlovelsen blev holdt i Slagelse søndag den 21. august 1910 (figur 4). Broder Haralds gratulationsbrev fortæller om den nærmeste families syn på Niels (figur 5):

Du forstår ham som maaske ingen anden, og forstaar ham netop som den samme Niels som alle vi andre hans nærmeste altid har elsket og set op til som det største og rigeste menneske, vi har kendt.

I vild forventning om Margrethes snarlige flytning fra Slagelse til København skrev Niels mindst ti breve til sin forlovede i perioden fra fredag den 26. til onsdag den 31. august 1910. Han forsikrede hende om, at han var "det lykkeligste Menneske paa Jorden" og forudså, at deres fremtid ville blive "så indholdsrig og skøn at der ingen Grænser er derfor".



Figur 3. Margrethe på husmorskole, 1908, før hun mødte Niels.

Gennem resten af 1910 handlede Niels' breve til Margrethe om udviklingen af hans skrivelser i forbindelse med hans fysikuddannelse. Den 1. december skriver han, at "nu kaster jeg det hele over på Dig, min egen elskede lille Skat og skal nu forsøge om det ikke kan hjælpe."

På dette tidspunkt var Margrethe indlagt på professor Knud Fabers Klinik i Københavns centrum, formentlig med fordøjelsesbesvær (figur 6). I Niels' fravær var hans mor, Ellen, tit på besøg og læste højt af Dickens for sin kommende svigerdatter. Et brev til Margrethe fra den 10. december bekræfter, at Ellen har samme mening om Niels, som Harald har:

Jeg synes, at den Opgave Du har valgt at knytte Dit Liv til en saa sjælden Natur som Niels allerbedst viser Din egen sjældne Natur, og kunde Du gøre hans Liv og dermed Dit eget saa rigt og lykkeligt som Du med Din kærlige, milde og blide Karakter kan, saa er dette Formaal et helligt og stort Formaal, ligesaa alvorligt og lige saa godt, som om Du selv vilde vie Dine Kræfter til Studier eller anden Beskæftigelse som

kunde give Dig hvad Du i Dit lille taabelige Sind tror at Du mangler, Evne til at tale om alt muligt.



Figur 4. Forlovelsesselskabet i Slagelse. Niels og Margrethe er henholdsvis yderst til venstre og yderst til højre. Harald er stående med mørk hat.

Det synes som om, at Margrethe var i vildrede med hensyn til, hvordan hun kunne balancere mellem sin egen uddannelse og forholdet til Niels. Man kan kun spekulere, om hendes sygdom var et resultat af en sådan indre konflikt. Under alle omstændigheder opgav Margrethe kort efter sin uddannelse på *Zahles Faglærerindeskole*, hvor hun ud over sine humanistiske studier også havde påbegyndt et kursus i matematik, muligvis for bedre at kunne hjælpe Niels.



Figur 5. Harald og Niels Bohr. Fotografiet var en fødselsdagsgave fra Harald til Niels på broderens 26-årsdag den 7. oktober 1911. Han mente, at det udtrykte deres sammenhold trods forskellige personligheder.

Cambridge: Trøst gennem litteratur

Den 13. maj 1911 forsvarede Niels sin doktorafhandling om *Metallernes Elektronteori* (figur 7), og den 23. september samme år var han på vej til Cambridge, hvor han skulle studere under Professor Joseph John Thomson, som havde påvist elektronens eksistens i 1897. Det er velkendt, at Niels' ophold i Cambridge ikke var udelt vellykket, først og fremmest fordi han ikke fik diskuteret sin doktorafhandling med Thomson,

som aldrig læste den. Den 23. november søgte han trøst og hjælp hos Margrethe: "Lille Unge jeg faar næppe Tid til at tænke rigtigt over det alt herovre, men sig mig om Du vil hjælpe mig til engang at samle nogle af mine smaa Tanker sammen, og hjælpe at prøve om vi maaske kan faa lidt ud af dem."



Figur 6. Margrethe i Knud Fabers klinik, 1910.

Længslen efter videnskabeligt samarbejde i Cambridge fik Niels til nostalgisk at skrive til Margrethe den 12. december, ikke alene om den hjælp, han forventede af hende, men også om den støtte han tidligere havde fået af sin familie: "Og tænk hvad de siden har gjort for os, hvad de har gjort for mig, er ufattelig meget. Tænk, lille Unge! Tænk!"

Niels' familie, og ikke mindst faren, som var afgang ved døden i en alder af 54 år den 3. februar 1911, forblev et vigtigt omdrejningspunkt i korrespondancen. Den 3. februar skrev Margrethe således til Niels:

... og naar Du kommer hjem, saa skal vi sammen sidde og tænke paa Din Far og Du vil maaske fortælle mig mere om Din Barndom. Kære Niels, hvor har vi et smukt Billede i ham, det smukkeste og største man kan tænke sig, og som jeg nogensinde har truffet. Jeg har netop tænkt saa meget paa ham i denne Tid.

Faderen var et forbillede ikke bare for Niels, men også for Margrethe. Læsning af bøger uden for faget var en stor trøst for Niels, som han delte med den ligeledes litteraturinteresserede Margrethe. I begyndelsen af sit ophold læste han Charles Dickens' *David Copperfield* på originalsproget for at forbedre sit engelsk, og i december skrev Margrethe til ham om Thomas Carlyles foredragsserie *Heroes*, først udgivet på bogform i 1841. Margrethe var muligvis blevet bekendt med bogen på et engelsk-kursus i Slagelse, som hendes mor havde anbefalet hende at følge for bedre at kunne hjælpe Niels med hans skrivelser. Den 17. december meddeler Niels, at han har læst det første kapitel "om den gamle nordiske Tro" [5]. Læsningen satte Niels' fantasi i sving:

Aa lille Unge, jeg kan ikke beskrive hvad jeg følte; jeg ved ikke om det er saa meget Carlyle (jeg holder saa meget af hans

Maade; og glæder mig til at læse mere) men altid naar jeg ser den mindste Hentydning til det gamle Norden, saa brænder mit Hjerte saa vildt, saa vildt, Lille Unge, jeg drømmer mig til Norges Klipper og Skær. Min egen lille elskede, sig mig om Du vilde tage med mig til Island i Vikingebaad; sig mig, om Du vilde, og sig mig, om Du vilde hvad mere var, sidde alene tilbage paa Island, naar jeg om Sommeren maatte ud (Bryd Dig ikke om, at jeg sidder og drømmer i disse Aftener).

Tre dage senere reagerer Margrethe på Niels' drømme:

Om jeg vil tage med Dig til Island I Vikingebaad og om jeg vil sidde og vente om Sommeren, om jeg vil, ja Du kan tro, at jeg vil, aah Niels, det vilde jo være vidunderligt. Jeg kommer til Dig Niels, som Solvejg kom til Peer Gynt ... Jeg kommer til Dig alene, Du faar være mig alt, baade Ven og Trøster.

Med sin interesse for litteratur, forstod Margrethe umiddelbart Niels' reference til Ibsens skuespil [6]. Efter et besøg af Harald i januar var Niels endnu mere deprimeret over, at der var for lidt mulighed for selvstændigt arbejde. Den 27. januar skriver han til Margrethe:

Min Sjæl der i Gaar var saa bedrøvet over sig selv, for der var gaaet den noget imod; den havde pludselig set at noget af det eneste, den havde troet, at den havde fundet ud af i Aar, kun var det haabløseste Vrøvl.

Han fandt trøst i Goethes digt "Wer nie sein Brot", som han i sit brev til Margrethe den 27. januar citerede næsten fejlfrit efter hovedet [7]. Som han skrev til Margrethe, bekræftede digtet ham i, at "visse sjæle har jo saa store Rigdomme at de kan betale for andre." I en nøddeskal var det netop den rolle, som Margrethe i Niels' øjne skulle spille for ham.

I sit brev den 9. februar bekræfter Margrethe, at hun vil hjælpe:

Kære kære Niels, Du spørger til sidst i Dit Brev, om jeg vil bryde mig om Dit Arbejde, aah, kære Niels, jeg kan slet ikke beskrive Dig, hvor jeg elsker Dig og hvor jeg elsker Dit Arbejde, og jeg kan jo slet ikke skille Dig fra det og jeg kan slet ikke beskrive Dig, hvor jeg længes efter Fremtiden, efter at faa Lov til at hjælpe Dig lidt engang, hvis jeg bare kan.

Litteratur generelt og Goethe specielt figurerede stadig som en basis for forståelsen mellem de to. Den 14. februar citerede Niels Goethes digt "Weite Welt und breites Leben" som en inspiration for ham til "at føre et stort og virksomt Liv" og kærede det til "vores Vers" [8]. Dagen efter var det Henrik Ibsens *Brand*, hvorfra Niels citerer Ejnar i første akt ("Jeg skal løfte dig varlig paa haand ...") [9], der gav grundlag for Niels' håb og

ønske om, at Margrethe skulle "betale for al den Gæld for mig, som min fattige lille Sjæl maa stifte."

Niels' brev den 22. februar viser, hvordan han sidestillede videnskabelig og anden litteratur, hvilket utvivlsomt bidrog til hans udholdenhed i Cambridge:

... jeg havde helt glemt hvor morsomt det var for mig at læse i Larmors Bog. Naar jeg læser saadan noget, der er godt og stort, saa føler jeg saadan Mod og Lyst til selv at prøve om jeg ogsaa skulde kunde udrette en lille Smule. Sig mig, vil Du hjælpe mig. Og saa at læse i Othello.

Den første reference er til fysikeren James Larmors klassiske værk *Aether and Matter* fra 1900, som Niels havde brugt flere dage på at studere [10]. Den anden reference er til William Shakespeares skuespil *Othello: The Moor of Venice*, sandsynligvis skrevet i 1603 [11]. Niels var så betaget af Shakespeares skuespil, at han så det flere gange under sit Englandsophold.

Brevene drejede sig dog også om andet end litteratur. I brevet fra den 14. februar skriver Niels:

... om Du, dersom mine Planer vilde føje sig saadan som jeg i Øjeblikket synes vilde være rarest, kunde have Lyst til at være som en Mor for mine Elever, for ellers vilde jeg jo aldrig selv have Kræfter til at prøve at være en lille Smule af en Far for dem. Jeg sidder og tænker paa Far, paa alt hvad han har været for saa mange, mange. Vil Du hjælpe mig; blot at turde tænke paa hans Exempel.

Margrethe svarede prompte,

... at der er slet ingen Grænser for, hvor jeg ønsker, at jeg kunde faa Lov til at prøve paa, at være en Mor for Dine Elever og hvor vi sammen skal tænke paa Din Far, og sige Dig, at Du gør mit Liv saa usigelig rigt.

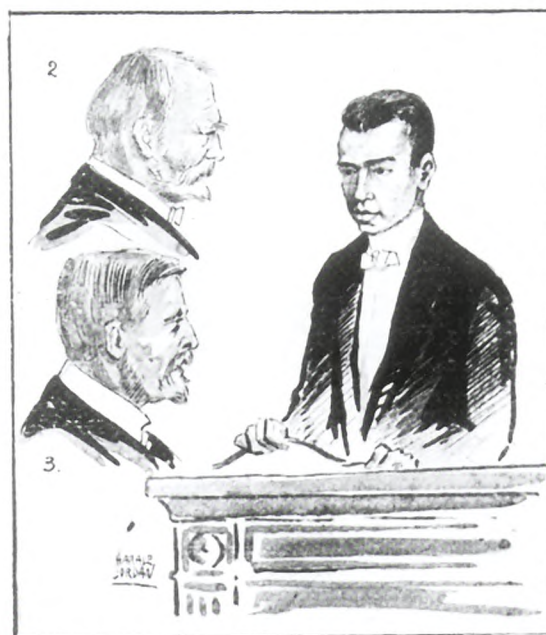
Faderen, som havde opbygget et fysiologisk laboratorium af international klasse, og som flere gange var blevet indstillet til Nobelprisen, var Niels' rollemodel, og Margrethe var den person, som skulle virkeliggøre Niels' ambition om at følge i faderens fodspor (figur 8).

Manchester og København: Hjælpen realiseres

Midt i april 1912 foretog Niels sin længe ventede flytning til Manchester, hvor han tidligere havde aftalt at arbejde med Ernest Rutherford, hvis eksperimenter blot to år tidligere havde vist, stik imod Thomsons idéer, at atomet består af en positivt ladet tung kerne omgivet af elektroner. Ligesom i Manchester fik Niels opgaver i Rutherfords laboratorium, der i første række var eksperimentelle, denne gang inden for Rutherfords interesseområde, radioaktivitet.

Højdepunktet i Niels' brevskrivning med Margrethe under hans Englandsophold drejede sig dog hverken om

litteratur eller fysik, men om emner i forbindelse med planlægningen af deres forestående bryllup. Niels og Margrethe havde besluttet sig for en borgerlig vielse, en beslutning, som Niels delvis begrundede i mindet om sin far.



Figur 7. En Københavneravis' afbildning af Niels' doktorforsvar. De to udspørgere er Bohrs lærer, Christian Christensen (øverst) og matematikeren Poul Heegaard.

I sit brev til Margrethe allerede den 21. december 1911 havde Niels fortalt hende om farens reaktion på sønnens religiøse krise som ung.

Den Far sagde aldrig et Ord til sin lille Dreng om noget, der havde med Tro eller Tvivl at gøre; og da den lille Dreng var bleven større og efter sine egne ganske alene Kampe en Dag kom og sagde til sin Far, at noget saa frygteligt og forfærdeligt som det (som det han havde troet paa med sin hele lille Sjæl) kunde han ikke tænke sig, saa sagde hans Far heller ingen Ting men smilede blot af hans Ivrigheid. Det Smil, lille Unge, det har lært den lille Dreng meget.

Niels blev bestyrket i sit syn på religion af en prædiken i St. Gileskatedralen i Edinburgh, hvor han besøgte slægtninge af sin mor. Her fremfører præsten det synspunkt, at ulykken med Titanic den 15. april havde været Guds mening fra begyndelsen. I sit brev til Margrethe den 23. april reagerer Niels på denne påstand i ukarakteristisk harmfulde vendinger:

Ja saadan tror jeg for Alvor, at den skotske Kirke (og den danske med) strengt taget lærer, i det mindste har den Mening været forfægtet, af ikke de ringeste blandt "Kirkefædrene."

Senere i brevet fortsætter han:



Figur 8. Christian og Niels Bohr ved Christians skrivebord. Billederne er formentlig taget på samme tid i 1911.

(Og naar man endelig taler om Præster, saa kan det være bekvemt at huske, at det plejer kun at være de mere svagt begavede, der mener at de kan forklare nogetsomhelst ved de fromme Misforstaaelser de kalder Religion, men de mere skarpe plejer, som Du vist ved, at fremhæve som det væsentligste ved Religionen at der er mere i Verden til, end hvad Mennesker kan forstaa, men de plejer blot at glemme at sige, at Mennesker kan forstaa, at det maatte være saadan).

Efter at Margrethe havde fortalt sine forældre om beslutningen om en borgerlig vielse, undgik Niels i en uge at nævne det for dem. Hans takkebrev til Margrethes mor for opholdet hos Nørlund-familien i påsken dateret den 29. april indeholdt ikke et ord hverken om bryllupsarrangementet eller om religion (figur 9). Men da han modtog et brev fra Margrethes mor dateret dagen før, hvor hun fortalte, at hun havde "været saa uendelig bedrøvet alle de sidste Nætter og Dage, siden Margrethe fortalte os, at I havde besluttet, I ikke vilde vies i en Kirke og ikke af en Præst", kunne han ikke vente længere og skrev umiddelbart et langt svar. Han begyndte med at skrive, at "Dit kærlige og smukke Brev"

... har rørt mig dybt, og jeg forstaar Dig saa godt, og det gør mig ondt, at vi har

gjort Dig Sorg; men vi kunde i denne Sag ikke handle anderledes end efter vores Overbevisning.

I brevet skriver Niels eksplicit, at han anså en borgerlig vielse som en pligt over for sin far:

Og da det nu engang er baade Margrethes og min fulde og faste Overbevisning, kan jeg ikke forsvare overfor hans Minde at skjule mit Standpunkt ved en saadan Lejlighed.

Sophie Nørlunds brev berørte Niels så dybt, at han samme aften skrev endnu et brev til hende, hvor han, efter at have gentaget sit standpunkt, tilføjede:

Men paa den anden Side vil jeg jo ikke krænke nogens Overbevisning, og dersom jeg troede, at jeg havde gjort det, vilde det gøre mig meget meget ondt.

Næste aften var Niels stadig usikker på, om han havde udtrykt sig rigtigt. Han var også bekymret, skrev han til Margrethe, for at også hun mente, at han havde handlet forkert. Sophie Nørlunds brev den 5. maj må have beroliget ham:

... det var ikke min Mening at forsøge paa at forandre Eders Beslutning; en saadan Beslutning tager man jo ikke en Dag for at forandre den strax efter – det bliver jo som

I selv ønsker det – men jeg vilde, vi skulde tale sammen og ikke gå udenom hinanden – det vil jeg helst i alle Livets Forhold – saa kommer man blot hinanden nærmere.

Det var ord, som Niels kunne have skrevet under på.

Den 27. maj kan Niels endelig rapportere til Margrethe om et muligt fremskridt i sine fysiske grublerier:

Det kan være, at det er meget dumt, og at det slet ingen Ting er, som det plejer; men jeg tror, at jeg maaske har fundet ud af en lille Smule.

Hvad jeg kan gøre med det, og hvad der kan komme ud af det, det ved jeg slet ikke. Sig mig min egen lille elskede, er Du ked af, at jeg er saa dum at der kan gaa Feber i mit Blod for saa lidt, og af, at jeg længes saa usigelig efter den Tid, da Du skal holde Regnskab med mine Tanker, og faa det til at gro for mig, dersom jeg ejer noget, der har Evne til at gro.

Den 12. juni er Niels mere præcis med hensyn til, hvad fremskridtet drejer sig om:

Det gaar mig maaske ikke saa helt daarligt lige i øjeblikket, for jeg fik maaske alligevel lidt ud af det, og har næsten helt udarbejdet en lille Teori om Absorption af α -Straaler (jeg skal fortælle Dig om det i Sommer).

Samme dag havde Niels sendt et langt brev til Harald, hvor han går ind på detaljerne i arbejdet. Fire dage senere beskriver han sit arbejde for Margrethe i lyriske vendinger:

Hvad det er for et Spor, jeg følger, og hvortil det kunde føre mig, om det vil, det tør jeg slet ikke sige. Men om jeg ikke tager helt fejl, saa har det ført mig forbi nogle smaa Lysninger, hvortil jeg maaske vil kunne vende tilbage, naar selve Sporet ikke vil længere.

I modsætning til korrespondancen med Margrethe er flere af brevene til Harald gengivet i Niels Bohrs samlede værker [12]. Brevet til Harald den 12. juni er citeret af videnskabshistorikere, ligesom et nyt brev til broderen en uge senere. I en banebrydende artikel fra 1969 om oprindelsen af Bohrs atommodel er sidstnævnte brev blevet beskrevet som det endelige bevis på, at "beskaffenheden og dybden af Bohrs engagement havde ændret sig fuldstændig" [13]. Efter flytningen til Manchester havde Niels taget Rutherfords syn på atomets struktur til sig og begyndte nu at teoretisere over, hvordan strukturen kunne præciseres nærmere. Selv om brevene til Margrethe ikke beskriver detaljerne i Niels' tanker, kan de bruges som en kilde til at tidsfæste ændringen i hans emnevalg og tankegang mere præcist.



Figur 9. Margrethe og Niels under Niels' påskebesøg i Danmark 1911.

Mod slutningen af Niels' ophold i Manchester drejede korrespondancen med Margrethe sig mere og mere om udviklingen af hans arbejde, men også om forberedelserne af deres bryllup, som de blev enige om skulle finde sted i Slagelse den 10. august. Niels tilstræbte at nå så meget som muligt videnskabeligt, og beskrev samtidig nødvendigheden af Margrethes rolle deri i et brev den 19. juli:

... saa mange Tanker er faret igennem mit lille Hovede i dette Aar, og jeg har set saa mange Syner; men i mine Hænder er det kun en død Skat, for det er jo kun Antydninger af det flygtigste Hjernesvind, som jeg ikke kan indløse, ja næppe engang har Kræfter til at holde tilbage. Men det er jo alligevel det dyrebareste og eneste jeg ejer, og med det kommer jeg til Dig, og beder Dig, det største og bedste og rigeste Menneske, om at indløse det for mig, for os. Min egen, egen lille elskede, sig mig, vil Du forstaa at det er samtidig Livets rammeste Alvor og største Lykke for

Din egen Niels.

Brylluppet fandt sted om formiddagen, da Niels ivrede efter at komme af sted til bryllupsrejsen. Han havde længe planlagt at den skulle gå til Norge, men turen gik i stedet til England, hvor han kunne diskutere sit arbejde med Rutherford og færdiggøre andre videnskabelige opgaver.

Næste gang Niels skrev til Margrethe, var han igen på vej til England, hvor han i begyndelsen af april 1913 diskuterede den første del af sin berømte trilogi med Rutherford. Det er velkendt, at Rutherford insisterede på en drastisk forkortelse af manuskriptet, hvilket Niels' stædighed var i stand til at forhindre. Niels skrev til Margrethe om mødet:

Jeg har snakket saa rart med Rutherford, og jeg glæder mig nu saa meget til at komme hjem og rigtig tage fat og prøve at faa de andre Dele [af trilogien] hurtigt færdige. Skal vi rigtig prøve? Kæreste lille Unge. Rutherford skulde bare vide at det er Dig der maa gøre det altsammen.

Den 8. juni samme år skrev Niels til Margrethe under en vandretur i Nordsjælland sammen med sin broder. Niels takkede

... for al, al Hjælpen, for at Afhandlingen blev færdig, for at jeg kom afsted. Jeg er saa glad min egen lille elskede; jeg glæder mig saa meget til Turen, og saa til den 3die Del [af trilogien]. Tankerne begynder allerede at strømme ind i mit Hovede igen, alle dem som Du gav mig i Ellekilde.

Ellekilde er en lille kystby i Nordsjælland, hvor Niels kom til at søge hvile og inspiration mange år fremover. Det samarbejde, som både Niels og Margrethe havde hidet efter under Niels' fravær i England, var blevet til virkelighed.

Konklusion

Kærlighedsbreve er en problematisk kilde til forståelse af et menneskes liv og virke, men kan også give et unikt indblik i samme menneskes personlighed. I Niels Bohrs og Margrethe Nørlunds tilfælde var der en tillid mellem de to, der gennem læsning af brevene giver adgang til sider hos dem begge, der næppe kan findes andre steder.

Breve giver indsigt i aspekter ved Bohrs personlighed, som vanskeligt kan læses i hans publikationer eller hans videnskabelige korrespondance, der har gennemgået mange omskrivninger og mangler den umiddelbarhed og impulsivitet, der præger korrespondancen med Margrethe. Stilmæssigt viser brevene en litterær åre hos Bohr, som sjældent eller aldrig kan findes i andre kilder. Indholdsmæssigt viser de, at Niels' stærke behov for hjælp og bekræftelse i hans videnskabelige arbejde, som hans forældre og broder villigt havde givet ham i studietiden i København, var noget, der var helt essentielt for ham at få tilfredsstillet også af sin udkårne. Selv om det ser ud til, at Margrethe i begyndelsen af forholdet søgte en egen uddannelse og karriere, opgav hun hurtigt egne ambitioner under påvirkning fra Niels' mor, Niels selv, samt hendes egne forældre. Der er intet, som tyder på, at det førte til bitterhed fra hendes side. Hun var mere end villig til at være hjælp og støtte for sin Niels.

Der kan næppe herske tvivl om, at Niels' udholdenhed i Cambridge, hvor han kun oplevede modgang i sin forskning, i høj grad blev opretholdt af hans og Margrethes fælles litterære interesser, deres fælles beundring af Niels' far og, ikke mindst, Margrethes umisforståelige bekræftelse af, at hendes højeste ønske for fremtiden var at kunne hjælpe Niels med hans videnskabelige tanker og skrivelser. I Manchester viste Margrethe sin styrke ved at fortælle sine religiøst orienterede forældre om parrets beslutning om en borgerlig vielse, mens Niels behændigt undgik dette, indtil han blev udfordret til åbenhed af Margrethes mor. Og da det begyndte at lysne for Niels' arbejde, viste hun, at hendes ønske om at hjælpe ham videnskabeligt også kunne realiseres i virkeligheden, til trods for hendes begrænsede viden inden for fysik. Samarbejdet forstærkedes væsentligt, som begge havde håbet, efter at de var flyttet sammen i København.

Efter oprettelsen af Institut for Teoretisk Fysik i København blev Margrethe den "mor for mine elever", som Niels havde drømt om i England, hvilket dokumenteres klart i hendes ret omfattende korrespondance om praktiske arrangementer med Niels' nærmeste yngre internationale medarbejdere eller "elever" [14]. Men nu var det udvalgte elever, som overtog rollen som de videnskabelige hjælpere. Korrespondancen med Margrethe under Niels' første Englandsophold bekræfter til fulde, at "Københavnerranden" ikke alene var baseret på en strategi fra Bohrs side, men var dybt forankret i hans personlighed. Uden Margrethe, hvem ved hvordan Niels' karriere havde udspillet sig.

Litteratur

- [1] F. Aaserud (1990) Redirecting Science: Niels Bohr, Philanthropy, and the Rise of Nuclear Physics. Cambridge University Press, side 6–15. Bogen er også udgivet som e-bog: <http://plunkettlakepress.com/rs>.
- [2] Bohrs private korrespondancen med Margrethe (og andre) er citeret mere udførligt i F. Aaserud (2013) Niels Bohr's Private Sphere Revealed through unpublished family correspondence. F. Aaserud og J.L. Heilbron: Love, Literature, and the Quantum Atom: Niels Bohr's 1913 Trilogy Revisited. Oxford University Press, side 1–101. Jeg er Bohrfamilien taknemmelig for at få adgang til disse breve.
- [3] H. Kragh (2012) Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913–1925. Oxford University Press.
- [4] B. Possing (1997) Viljens styrke: Natalie Zahle, en biografi om dannelse, køn og magtfuldkommenhed. Gyldendal, København.
- [5] <https://www.gutenberg.org/files/1091/1091-h/1091-h.htm>.
- [6] https://www.ibsen.uio.no/DRVIT_PG%7CPGht.xhtml.
- [7] <https://kalliope.org/en/text/goethe2019022306>.
- [8] <https://gutezitate.com/zitat/127369>.
- [9] https://www.ibsen.uio.no/DRVIT_Br%7CBRht.xhtml.
- [10] https://en.wikisource.org/wiki/Aether_and_Matter.
- [11] <https://www.nosweatshakespeare.com/wp-content/uploads/2020/09/Othello-PDF.pdf>.
- [12] J. Rud Nielsen (red.) (1972) Niels Bohr Collected Works, Vol. 1: Early Work (1905-1911). North Holland, Amsterdam.
- [13] J.L. Heilbron og T.S. Kuhn (1969) The Genesis of the Bohr Atom, *Historical Studies in the Physical Sciences*, bind 1, side 211–290, citat på side 238.
- [14] Se brevene i Niels Bohrs videnskabelige og personlige korrespondance, som kan findes i digitaliseret form på Niels Bohr Arkivets hjemmeside, www.nbarchive.dk.



Finn Aaserud er cand.real. i fysik fra Universitetet i Oslo og ph.d. i videnskabshistorie fra Johns Hopkins University, Baltimore. Fra 1985 til 1989 var han Associate Historian ved Center for History of Physics, American Institute of Physics, dengang i New York City, og fra 1989 til 2017 arkivleder ved Niels Bohr Arkivet. Han er nu emeritus ved Niels Bohr Institutet.

Einstein og kvantemekanikken

Per Hedegaard, Niels Bohr Institutet

I disse år fejrer vi 100-året for Niels Bohrs Nobelpris og oprettelsen af det, vi nu kender som Niels Bohr Institutet. Niels Bohr modtog som bekendt Nobelprisen i 1922. Prisen var ikke blevet uddelt i 1921, men Planck (som selv fik prisen i 1918) foreslog, at man gav to priser i 1922: en til Einstein for 1921 og en til Bohr for 1922, og derved blev det. Einstein kunne dog ikke være tilstede i Stockholm, da han var på en længere rejse i Japan, så Bohr var ene om at repræsentere fysik. Det var yderligere bemærkelsesværdigt, at både Einstein og Bohr fik prisen for deres bidrag til den tidlige kvantefysik. Einstein fik altså ikke for relativitetsteorien, som han vel er mest berømt for i dag.

Jeg vil her forklare om Einsteins bidrag til kvanteteoriens opbygning, som vitterligt var revolutionært.

Plancks strålingslov

Kvants redaktion skrev til mig og stillede følgende spørgsmål: *Vi undrer os over, hvordan det kan være, at IR-udstrålingen fra alle legemer, uanset om det er luftarter, væsker, metaller eller "sorte legemer", kan beskrives ved Plancks strålingslov. Udstrålingen må jo være forankret i atomernes bevægelser, men hvordan kommer man fra mikrofysikken til Planck?*

Dette udmærkede spørgsmål kan fint kobles sammen med Einsteins bidrag til kvantemekanikken, så lad os komme i gang. Vi starter ca. 1860.

Kirchhoffs lov for stråling

De fleste har observeret, at hvis man varmer en jernstang eller et stykke træ op, så bliver det rødglødende. Den stråling, som er rødlig, kaldes varmestråling. På den anden side er det også velkendt, at en sort væg bliver varmere end en hvid væg, hvis den fx udsættes for direkte sollys. Det skyldes, at den sorte væg absorberer mere af sollyset end den hvide væg. Gustav Kirchhoff prøvede i 1860 at holde regnskab med energien af stråling ind og ud af et legeme. En meget vigtig forudsætning for regnestykket er, at legemet er i ligevægt, dvs. at det har en bestemt temperatur, som ikke ændrer sig. Vi ved fra almindelig termodynamik, at hvis et legeme tilføres energi, så vil temperaturen stige, så hvis temperaturen er uændret, så vil der ikke netto tilføres energi til legemet, dvs. udstråling af energi er lig med absorption af energi.

På Kirchhoffs tid var det velkendt, at stråling består af bølger, der kan karakteriseres ved deres frekvens, ν , der hænger sammen med bølgelængden, λ , som $c = \lambda\nu$, hvor c er lysets hastighed. Forestiller man sig nu, at stråling med frekvenser i et lille interval $d\nu$ rammer overfladen af legemet i et lille tidsrum, så vil en vis brøkdel, a_ν , af strålingen blive absorberet. I termer af energiindholdet i strålingen har vi ligningen

$$dQ_\nu = a_\nu dQ, \quad (1)$$

hvor dQ_ν er den absorberede energi (af stråling i frekvensintervallet $d\nu$), mens dQ er energien af strålingen, der rammer legemet. I det samme tidsrum vil legemet udsende varmestråling. Lad os kalde energien af den stråling, som har en frekvens i intervallet $d\nu$, for $e_\nu d\nu$. Princippet om ligevægt siger nu, at de to energier er ens, dvs. $a_\nu dQ = e_\nu d\nu$, eller



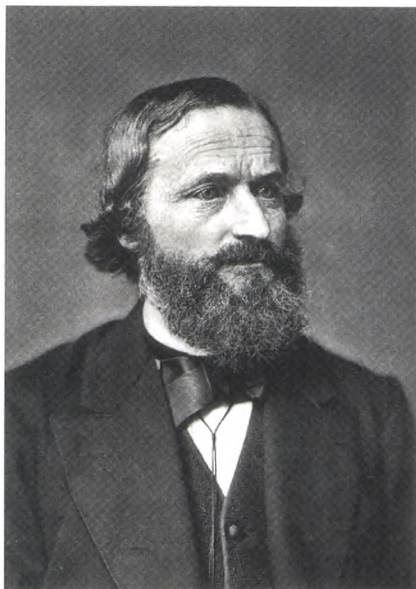
Figur 1. Jern ved 300°C er rødglødende, mens det er hvidglødende ved 1000°C. Det fortælles, at munken Poppo overbeviste Harald Blåtand om, at kristendommen var overlegen ved uskadt at bære *jernbyrd*. Poppo's trick var angiveligt, at han insisterede på at bære hvidglødende jern. Varmeledningsevnen for 1000 grader varmt jern er nemlig kun halvt så stor som 300 grader varmt jern.

$$\frac{dQ}{d\nu} = \frac{e_\nu}{a_\nu}. \quad (2)$$

Lad os nu forestille os, at vi har et hulrum, hvori der er to forskellige legemer, der er udformet helt ens, men som er lavet af forskellige materialer, der gør, at det ene legeme er helt sort, mens det andet fx er hvidmalet. Pointen er nu, at $\frac{dQ}{d\nu}$ er ens for de to legemer, hvilket betyder at brøken $\frac{e_\nu}{a_\nu}$ er ens for legemerne. Dette er faktisk Kirchhoffs lov. Hvis vi nu især betragter det sorte legeme, så er definitionen af ordet "sort" i denne forbindelse, at et sort legeme absorberer al stråling, dvs. $a_\nu = 1$. Kalder vi nu udstrålingen fra et sort legeme E_ν , så siger Kirchhoffs lov altså, at for et vilkårligt legeme i ligevægt ved en bestemt temperatur vil der gælde

$$\frac{e_\nu}{a_\nu} = E_\nu. \quad (3)$$

Kirchhoffs resultat viser, at der findes en universel funktion af bølgelængde og temperatur, E_ν , som beskriver alle materialer i ligevægt med stråling. En af fysikkens store udfordringer blev herefter at måle eller beregne denne vigtige funktion.



Figur 2. Gustav Rober Kirchhoff (1824–1887) formulerede Kirchhoffs lov for varmestråling.

Hvis vi kort skal knytte det til Kvantredaktionens spørgsmål, så er det altså ikke udstrålingen fra et hvilket som helst legeme, der beskrives med en universel funktion, men snarere forholdet mellem udstråling og absorption, der er universelt. Så en hvidmalet væg stråler mindre end en sort ditto, men forholdet mellem udstråling og absorption er det samme for de to vægge.

Den eksperimentelle udfordring bestod i at lave et fuldstændigt sort legeme og måle udstrålingen herfra. En snedig måde at konstruere et sort legeme på er simpelthen at lave et lukket hulrum. Det kan godt være, at en vis mængde stråling ikke absorberes fuldstændigt af hulrummets væg, men den del af strålingen, der reflekteres, vil så ramme hulrummets væg et andet sted, og på et eller andet tidspunkt vil væggen have absorberet strålingen. Så i den forstand er hulrummets

vægge et perfekt sort legeme. Nu kan man så bore et lille hul i væggen og se på den stråling, der strømmer ud gennem hullet. Energimængden af undsluppet stråling i et bestemt tidsrum og med frekvens i et interval omkring ν med bredde $d\nu$ vil være dQ . Fra Kirchhoffs overvejelser får vi så, at $dQ = E_\nu d\nu$. Så for at finde E_ν skal vi blot måle dQ . Størrelsen E_ν beskriver egentlig strålingsenergi i bevægelse. I det følgende vil vi fokusere på energitætheden i strålingen, $u(\nu, T)$. Sammenhængen mellem de to er $u(\nu, T) = (4\pi/c)E_\nu$.



Figur 3. Max Planck (1858–1947) grundlagde i år 1900 kvanteteorien i sit forsøg på at forklare energifordelingen af varmestråling som funktion af strålingens frekvens.

Planck

I år 1900 var den eksperimentelle situation således, at det var klart, at $u(\nu, T)$ var en funktion, der havde et maksimum ved en bestemt bølgelængde, og at denne maksimale frekvens forskyder sig mod lavere bølgelængder ved højere temperaturer. Dette sidste kaldes Wiens forskydningslov, og den siger, at ν_{max}/T er konstant. Dette resultat er baggrunden for den simple og velkendte kendsgerning, at når temperaturen stiger, bliver fx en jernklods først rødglødende og dernæst hvidglødende. Wilhelm Wien havde desuden i 1896 postuleret en empirisk lov, der siger, at $u(\nu, T) \propto e^{-a\nu/T}$. Men i år 1900 havde nye eksperimenter vist, at Wiens lov ikke passede, når frekvenserne blev for lave. Max Planck satte sig for at udlede en generel formel for $u(\nu, T)$, der passer med Wiens lov for høje frekvenser, men også med de nye målinger ved lavere frekvenser. Planck var velbevandret i termodynamikkens love og kendte også til Boltzmanns arbejder, der relaterer termodynamikken med statistiske egenskaber for de mikroskopiske størrelser.

Planck fokuserede på stoffet, som udsender og absorberer lys. Det var kendt, at har man en lille oscillator, der består af en positiv og negativ ladning, der svinger frem og tilbage med en frekvens ν , så vil oscillatoren både udsende og absorbere elektromagnetisk stråling. Dette følger direkte af Maxwells ligninger. Hvis ϵ er oscillatorens energi, så vil der i ligevægt, hvor der

udsendes og absorberes lige meget energi, være en sammenhæng mellem ϵ og $u(\nu, T)$. De er simpelthen proportionale. Så Planck besluttede sig for at finde $u(\nu, T)$ ved at beregne ϵ . I statistisk fysik spiller entropien S en afgørende rolle. S er et mål for, hvor mange måder en vis energimængde kan fordele sig på mellem stoffets forskellige bestanddele. Den vigtigste formel fra den statistiske fysik knytter entropi, energi og temperatur sammen:

$$\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Ekspertene for 120 år siden – og Planck var absolut én af dem – vidste også, at der for en ideal gas eller for en samling af harmoniske oscillatorer gælder, at den anden afledte af entropien er omvendt proportional med kvadratet på energien. Planck kunne desuden regne baglæns og finde, at hvis Wiens lov gælder, så er entropiens anden afledte omvendt proportional med energien i første potens:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \begin{cases} -\frac{a}{U^2} & \text{ideal gas eller oscillator} \\ -\frac{b}{U} & \text{Wiens lov} \end{cases} \quad (5)$$

Planck fik nu den ide at lave en formel, der er en blanding af de to, nemlig

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = -\frac{C}{U(U + \beta)}. \quad (6)$$

Gør man det, så viser det sig, at energien af en oscillator med frekvensen ν må have en bestemt middelenergi ϵ , og den tilhørende energi i strålingen bliver

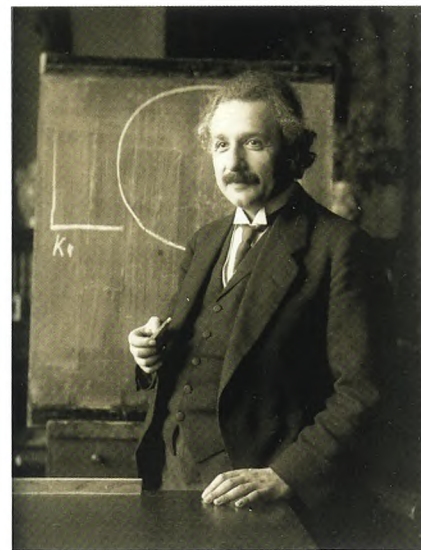
$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{C\nu^3}{e^{h\nu/T} - 1}. \quad (7)$$

(Konstanten h er den, vi nu kalder Plancks konstant, noget Planck naturligvis ikke gjorde). Denne formel, konstaterer Planck, passer meget bedre til de eksperimentelle data. Problemet for Planck var nu, *hvorfor* Plancks termodynamiske formel (7) gælder. Planck vidste, at entropien er en statistisk størrelse, som hænger sammen med på hvor mange måder, en vis energimængde kan fordele sig på mikroskopiske frihedsgrader. Formlen $S = k \ln W$ står ganske vist på Boltzmanns gravsten, men den er faktisk først formuleret i denne moderne version af Planck. Planck fandt, at hvis man skal fordele en energimængde U på N oscillatorer, men energien kun kan forekomme i små pakker ("kvanter") af størrelse $h\nu$, så kan W let beregnes, og man ender med en entropi, der præcis opfylder (7). Hermed var ideen om energikvanter født, og nu skete der ... ingenting!

Einstein 1905

I alt fald ikke før fem år senere. Den 26-årige Einstein publicerede i 1905 tre mirakuløse arbejder. Ét, der introducerer relativitetsteorien, ét, der analyserer brownske bevægelser (og fx leder til en bestemmelse af Avogadros tal, og dermed en forståelse af, hvor store atomerne er), samt den artikel, som vi skal interessere

os for her. Einstein var faktisk den første, der fulgte op på Plancks arbejder fra år 1900. Egentlig var det Einsteins ærinde at forstå den såkaldte fotoelektriske effekt. Når man lyser på et stykke materiale, finder man, at der flyver elektroner væk fra materialet. Hvis man skruer op for intensiteten af lyset, sker der ikke det forventede, nemlig at energien af elektronerne øges. Det eneste, der sker, er, at der kommer flere elektroner. Hvis man derimod øger lysets frekvens, så stiger hastigheden af de løsrevne elektroner. Einstein foreslår en simpel, men meget modig forklaring. Hvis lys består af partikler, hvis energi er direkte proportional med frekvensen, så er det let at forstå det observerede fænomen. Lyspartiklen overfører simpelthen al sin energi til elektronen og forsvinder selv i processen. Grunden til, at forklaringen er modig, er naturligvis, at spørgsmålet om, hvorvidt lys er bølger eller partikler, havde fundet sin løsning med Maxwells teori. Den beskriver alle elektriske og magnetiske fænomener, herunder at lys er elektromagnetiske bølger.



Figur 4. Albert Einstein (1879–1955) var historiens anden kvantepioner.

Einstein var ligesom Planck en af de unge fysikere, der var eksperter i den statistiske fysik. Han havde selv i to arbejder i årene før 1905 helt selvstændigt formuleret grundprincipperne for den statistiske fysik. Han kunne derfor let fokusere på entropien af et system af lys, der opfylder Wiens lov. Fx kunne han se, at hvis man ændrede voluminet af det hulrum, hvori strålingen befinder sig, så ville entropien ændre sig på følgende måde

$$S - S_0 = \frac{U}{h\nu} \ln \frac{V}{V_0}. \quad (8)$$

Her er V og V_0 de nye og gamle volumener. Men hvis nu lys består af partikler med en energi proportional med frekvensen, $\epsilon = h\nu$, så vil faktoren foran logaritmen blot være proportional med antallet af partikler, N . Men en gas af N partikler, hvis volumen ændres, vil have en entropiændring, der er givet ved $N \ln(V/V_0)$. Einstein følte sig derfor bekræftet i sin hypotese om, at lys er partikler, i alt fald for frekvenser, der er så tilpas store, at Wiens lov gælder. Længere kom Einstein ikke i 1905.

En vigtig pointe i Einsteins arbejde er, at han skifter fokus direkte på strålingen i modsætning til Planck, som jo først og fremmest regner på de svingende dipoler, som han mener, at alt stoffet består af. Det er en af fordelene ved den statistiske fysiks beskrivelse af ligevægt, at det ikke betyder noget, hvordan ligevægten er opstået, dvs. detaljerne i, hvordan energi flyder ind og ud af systemet. Dette er et meget stærkt resultat, som Einstein var en mester i at udnytte.

Som nævnt er Einstein den eneste, der for alvor drager konsekvensen af Plancks opdagelse i år 1900, og sådan skulle det stort set blive ved, indtil Niels Bohr i 1913 bruger Planck til at forklare atomets opbygning. Inden da var Einstein på banen i 1907, hvor han fulgte op på Plancks arbejde og forklarede varmekapaciteten af de fleste faste stoffer. I 1918 udleder Einstein faktisk Plancks lov ved at benytte Bohrs formel $E_2 - E_1 = h\nu$ og ideen om spontan emission i stedet for som Planck at benytte oscillerende elektriske dipoler, der stråler. Vi springer detaljerne over og vender os mod det sidste store spring fremad fra Einsteins side.



Figur 5. Satyendra Nath Bose (1894–1974) skrev et indflydelsesrigt brev til Einstein i 1924. Einstein læste omhyggeligt brevet.

Bose og Einstein 1925

Einsteins sidste konstruktive bidrag til kvantemekanikken kommer i 1925. Senere blev Einstein en meget vigtig kritiker af kvanteteorien, og hans kritik var alt-afgørende og medvirkede til at fremprovokere begreber som entanglement og Bells ulighed.

Episoden starter med, at en ung inder, Satyendra Nath Bose, i juni 1924 skriver et brev til Einstein. Han har udledt Plancks strålingslov på en ny måde og vil gerne have Einsteins hjælp til at få arbejdet publiceret og det helst på tysk i tidsskriftet *Zeitschrift für Physik*. Bose selv var meget stolt over at kunne udlede faktoren $8\pi h\nu^3/c^3$, men Einstein så straks, at det var Boses statistiske argument, der var nyt og epokegørende. Bose fokuserer ligesom Einstein i 1905 på lyset selv og bekymrer sig ikke om, hvordan lyset er kommet i ligevægt

ved en bestemt temperatur ved at vekselvirke med stoffet i omgivelserne. Kort fortalt opfatter Bose lyset som en gas af partikler. Disse partikler kan være i forskellige tilstande. Hver tilstand svarer til, at lyspartiklen (fotonen) bevæger sig i en bestemt retning med en bestemt energi. Det statistiske problem består nu i at beregne, hvor mange måder energien kan fordeles på mellem disse partikler. Bose regner på en anden måde, end den Boltzmann benyttede, da han lavede samme beregning for en almindelig ideal gas. Men regnestykket ender dog med Plancks strålingslov. Einstein er som sagt meget fascineret af måden at regne på, og året efter gentager han Boltzmanns beregning af den ideelle gas, men gør det nu på Boses måde. Forskellen mellem fotoner og almindelige partikler, som fx molekylerne i en ideal gas, er, at sammenhængen mellem energi og hastighed er forskellig i de to tilfælde. Fotoner bevæger sig jo alle med lysets hastighed, mens molekyler kan antage alle mulige hastigheder. Under alle omstændigheder gør Einstein en epokegørende opdagelse. En ideal gas af den slags partikler, som skal beregnes på Boses måde, vil opføre sig meget besynderligt, når temperaturen sænkes under en bestemt kritisk temperatur. Her vil en makroskopisk andel af partiklerne ophobe sig i en enkelt kvantetilstand, nemlig den, der svarer til den laveste energi. Einstein har opdaget det fænomen, der nu kaldes *Bose-Einstein-kondensering*.

Senere har fysikere som fx Paul Dirac gjort det klart, at Boses måde at regne på er korrekt, når partiklerne er identiske og vel at mærke så identiske, at hvis man ombytter to partikler, så får man samme kvantetilstand. Noget, som ikke giver mening i en klassisk verden. Den slags partikler er siden benævnt *bosoner*. Det viser sig, at samtlige partikler i den atomare verden kan deles op i to klasser, fermioner og bosoner. Til klassen af bosoner hører fotoner, fononer (lydpartikler) og generelt partikler, der er sammensatte af et lige antal partikler af den anden klasse, fermionerne. Til klassen af fermioner, opkaldt efter den italienske fysiker, Enrico Fermi, hører elektroner, protoner, neutroner osv. Fermionerne opfylder den regel, som kaldes Paulis udelukkelsesprincip.

Vi ser her, at Einstein er pioneren i kvanteverdenen, der har regler, der er helt fremmede i en klassisk fysisk kontekst. Fænomener som superledning, laseren, eller sågar Higgspartiklen kan kun forstås i termer af egenskaberne for bosoner.



Per Hedegård er professor ved Niels Bohr Institutet. Han arbejder med faststoffysik og især med elektronik, der baserer sig på enkeltmolekyler.

Kvantemekanikkens oprindelse (1925–1927)

Christian Joas, Niels Bohr Arkivet og Institut for Naturfagenes Didaktik, Københavns Universitet

Ved udgangen af 1927 så fysikernes verden anderledes ud end i begyndelsen af 1925: Kvantemekanikken var trådt ind på scenen, og den var kommet for at blive. Hvad der skete i denne varme fase af kvantemekanikkens oprindelse, er et af de mest fascinerende emner for videnskabshistorikere. Denne korte artikel fortæller historien om den tidlige kvantemekanik og om vores forsøg på at forstå, hvordan en af de mest indflydelsesrige forandringer i fysikernes opfattelse af verden kom til at ske.¹

Niels Bohrs Como-forelæsning i september 1927 kan betragtes som kulminationen på en hurtig udvikling, der var begyndt blot to år tidligere i juli 1925 med Werner Heisenbergs berømte *Umdeutung*-afhandling (tysk for “omfortolkning”): Oprindelsen til kvantemekanikken, som vi stadig bruger den i dag. Bohrs forelæsning, der blev offentliggjort i to af datidens førende videnskabelige tidsskrifter, *Naturwissenschaften* og *Nature*, kan også ses som den første fremstilling af hans komplementaritetsfortolkning, som siden 1950’erne ofte er blevet omtalt som “Københavnfortolkningen”. En måned efter at Bohr havde holdt sin forelæsning ved Comosøen i Italien, skulle han holde det samme foredrag igen på den femte Solvay-konference i Bruxelles – et møde, der er berømt for de ophedede meningsudvekslinger mellem de to venner Albert Einstein og Bohr om kvantemekanikkens fortolkning.



Figur 1. Niels Bohr i 1927, sandsynligvis ved Comosøen. Alle billeder er fra Niels Bohr Arkivet, undtagen figur 9.

For videnskabshistorikere er denne “varme fase” af kvantemekanikkens oprindelse fra 1925–1927 en yderst interessant periode, ikke mindst fordi kvantemekanikken, i modsætning til andre berømte begrebsskift i fysik, ikke var et enkelt menneskes værk, men et resultat af mange forskellige forskeres arbejde i flere forskellige lande. Dette gør kvantemekanikkens oprindelse meget anderledes end fx den generelle relativitetsteoris oprindelse.

At mange aktører var involveret, undertiden i hektisk konkurrence, gør rekonstruktionen af begivenhederne til en sand detektivopgave, som mange videnskabshistorikere har bidraget til på grundlag af offentliggjorte og ikke-offentliggjorte historiske kilder [1-6]. Blandt disse kilder er især den overleverede korrespondance mellem mange af aktørerne, som i høj grad er bevaret takket være et tidligt forskningsprojekt om kvantefysikkens historie, som blev ledet af Thomas S. Kuhn i kontorlokaler, som Bohr selv havde stillet til rådighed på Gl. Carlsberg lige før sin død. En stor del af denne korrespondance, samt de omfattende mikrofilm fra projektet, findes på Niels Bohr Arkivet.



Figur 2. Arnold Sommerfeld og Niels Bohr i Lund i 1919.

Der er sket meget i de seneste årtier med vores forståelse af kvantemekanikkens tilblivelse baseret på dette væld af historiske kilder [7]. Denne lille artikel er en kort gennemgang ikke blot af selve kvantemekanikkens tilblivelse, men også af den nyere historiske forskning om den.

Den gamle kvanteteori og dens krise

Max Plancks introduktion af kvantehypotesen i 1900 i forbindelse med hans forsøg på at forklare sortlegemestråling samt Einsteins lyskvantehypotese fra 1905 – som af de fleste fysikere langt op i 1920’erne blev anset for at være en ukarakteristisk fejlslutning fra en ellers stor tænker – markerer virkningskvantets indtog i fysikken. Fysikerne begyndte først at tale om “kvanteteori” i tiden omkring den første Solvay-konference

¹Tak til Signe Strecker, Anja Skaar Jacobsen og Finn Aaserud for korrekturlæsning af artiklen.

i Bruxelles i 1911, og i stigende grad efter succesen med Niels Bohrs atommodel fra 1913, der forklarede brintatomets spektrum gennem en kvantebetingelse.

Denne såkaldte “gamle” kvanteteori var fuld af spektakulære succeser, især i den form, som den fik af “kvantepaven” Arnold Sommerfeld fra München i 1916, og gennem dens forbindelse med Hamilton-Jacobi-teorien, da Karl Schwarzschild og Paul Epstein uafhængigt af hinanden i 1916 indførte vinkel- og virkningsvariable, der oprindeligt blev udviklet i forbindelse med himmelmeknikken. Dette førte til forklaringen på Starkeffekten, en stor succes for den gamle kvanteteori. Det åbnede også for, at man i den gamle kvanteteori kunne anvende de kraftfulde metoder fra perturbationsteorien, hvilket Bohr i København måske som den første forstod fuldt ud i 1918. Brugen af de sofistikerede metoder i Hamilton-Jacobi-meknikken til at fremme kvanteteorien blev en fast bestanddel af Max Borns og hans kollegers arbejde i Göttingen i begyndelsen af 1920’erne. Det er ikke tilfældigt, at tre byer er nævnt i dette afsnit. Den gamle kvanteteori udviklede sig i vid udstrækning i en løbende udveksling mellem primært tre centre eller skoler: Sommerfelds skole i München, Bohrs skole på Niels Bohr Institutet i København og Borns skole i Göttingen.



Figur 3. Universitetets Institut for Teoretisk Fysik – i dag og siden 1965 kaldt Niels Bohr Institutet efter dets grundlægger Niels Bohr – i 1926.

Men den gamle kvanteteori var samtidig fuld af gåder og spektakulære fiaskoer [6]. Selv heliums spektrum kunne ikke forklares inden for rammerne af den gamle kvanteteori, skønt helium med sine to elektroner er det næstsimpleste atom efter brint. Mange andre problemer plagede den gamle kvanteteori, fx den anomale Zeemaneffekt, og teoriens logiske opbygning var utilfredsstillende, fordi den lappede den klassiske mekanik sammen med stort set *ad hoc* kvantebetingelser. Bohrs gentagne forsøg på at lave en opskrift til dette formål – hans berømte korrespondensprincip, der allerede var antydnet i tidligere værker og først blev formuleret eksplicit i 1918 – førte til mange nye indsigter, men ikke til en løsning på de uløselige problemer, i hvert fald ikke før 1925.

Problemerne og uoverensstemmelserne blev mere og mere forvirrende i årene op til 1925 – en fase, der

ofte kaldes den gamle kvanteteoris krise efter Kuhns klassiker *The Structure of Scientific Revolutions* fra 1962 [8]. I årene op til 1925 søgte aktørerne selv i stigende grad en kur mod den gamle kvanteteoris problemer i det, de kaldte en “skærpelse” af Bohrs korrespondensprincip: I stedet for på magisk vis at passe i nogle tilfælde og uforklarligt fejle i andre, skulle Bohrs opskrift omdannes til en veritabel kørselv-opskrift, der virkede uanset hvad, og som ville vise den rette vej fra den klassiske mekanik til en ægte “kvantemekanik”.



Figur 4. Carl Wilhelm Oseen, Niels Bohr, James Franck, Oskar Klein og Max Born (siddende) ved “Bohr-Festspiele” i Göttingen i 1922. Her mødtes Niels Bohr og den unge Werner Heisenberg for første gang.

Matrixmeknikken

Der blev gjort mange forsøg på at finde et sådant skærpet korrespondensprincip, og til sidst lykkedes det på ret usandsynlig vis: Ved at genfortolke de dynamiske størrelser i den klassiske mekaniks bevægelsesligninger – sted og impuls – i form af eksperimentelt observerbare størrelser – frekvenser og amplituder (sandsynligheder) for atomovergange – lykkedes det Heisenberg at løse knuden i den gamle kvanteteori.

Heisenberg hentede i sine unge dage erfaringer fra alle de tre store centre inden for den gamle kvanteteori: Fra 1920–1923 havde han været hos Sommerfeld i München, derefter blev han Borns assistent i Göttingen, hvor han allerede i 1922 havde mødt Niels Bohr for første gang, da sidstnævnte besøgte Göttingen i forbindelse med de såkaldte “Bohr-Festspiele”. I foråret 1924 besøgte Heisenberg Bohr i København og kom derefter tilbage på et længere ophold fra september 1924 til maj 1925. Ifølge Carl-Friedrich von Weizsäcker reflekterede Heisenberg engang over sin uddannelse på følgende måde: “Hos Sommerfeld lærte jeg optimisme, hos Göttingen-folkene matematik og hos Bohr fysik” [9].

I juli 1925, efter et efterhånden berømt ophold på Helgoland for at kurere et slemt høfeberanfald,

fremlagde Heisenberg sin *Umdeutung*-afhandling, som markerer begyndelsen på kvantemekanikken. Det var ikke Heisenberg, men Born og Pascual Jordan – begge uddannede inden for den matematisk-fysiske tradition fra Göttingen, der stammer fra Felix Klein og David Hilbert – som kort efter indså, at det, Heisenberg havde fundet på, var en matrixalgebra for uendelige matricer. Heraf kommer også navnet på Heisenbergs nye kvantemekanik: matrixmekanikken.



Figur 5. Heisenbergs første besøg i København i foråret 1924 (Werner Heisenberg, Niels Bohr og Margrethe Bohr med Bohr-børnene Christian, Erik, Hans og Aage).

Hvordan nåede Heisenberg frem til sin kvantemekanik? Han fik det selv til at fremstå, som om det var positivisme à la Mach og Einstein, der havde gjort arbejdet – dvs. en modvilje mod at lade størrelser eller begreber, der i princippet ikke kunne observeres, indgå i en fysisk teori. Som bl.a. videnskabshistorikeren og videnskabsfilosoffen Mara Beller har vist, var det ikke nødvendigvis Heisenbergs positivistiske tænkemåde, der havde ført ham til *Umdeutung*, men snarere, at det forekom ham at være den bedste måde at præsentere sine resultater på [5].

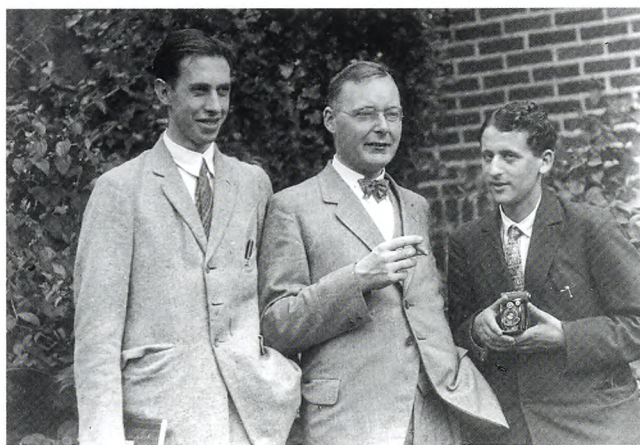
Hvordan nåede Heisenberg så dertil? Fysikhistorikere har undersøgt mange forskellige plausible ruter og er enige om ét væsentligt punkt, nemlig at det var Heisenbergs samarbejde med Kramers, Bohrs mangeårige assistent, om optisk dispersion, som bragte ham på rette spor og i sidste ende motiverede ham til at gå i gang med et forskningsprogram, der endeligt skulle gøre Bohrs korrespondensprincip skarpere [3, 10, 11].

Bohr, Kramers og John Slater havde i maj 1924 offentliggjort deres eget, kortlivede forsøg på en sådan skærpelse, den såkaldte BKS-afhandling, som efter en kort periode med ophedet debat (Pauli fordømte den som et "revolutionært kup") hurtigt var blevet modsagt af Walther Bothes og Hans Geigers koindensmålinger i juni 1924. I BKS-afhandlingen havde de tre mænd introduceret begrebet virtuelle oscillatorer, der mindede om Rudolf Ladenburgs tidligere idéer. Elektronbanerne i et Bohr-atom skulle erstattes af et ensemble af oscillatorer, hvis frekvenser svarede til frekvenserne for alle mulige optiske overgange i atomet.

Dette "orkester af virtuelle oscillatorer" (Alfred Landé) var et stort skridt fremad og spillede en afgørende rolle i Kramers' og Heisenbergs arbejde med

optisk dispersion, som var grundlaget for Heisenbergs arbejde med kvantemekanikken. Den udgjorde den begrebsmæssige kim til de uendelige matricer, der skulle optræde i *Umdeutung*-afhandlingen og skulle erstatte de dynamiske variabler i den klassiske mekanik.

Heisenbergs artikel er notorisk vanskelig at læse for én, der er vant til moderne kvantemekanik, da forbindelsen ikke umiddelbart er tydelig. I stedet for at anvende sine idéer på brintatomet, valgte Heisenberg at studere den anharmoniske oscillator, da det gav ham mulighed for nemmest at komme til en forståelse af den situation, han befandt sig i. Efter at have omfortolket den klassiske mekaniks kinematik ved at erstatte dynamiske variabler som position $x(t)$ med en Fourierrække, der indeholdt amplituder og frekvenser af alle mulige overgange fra et givet atomniveau n , søgte han at forstå, hvordan man kunne komme frem til størrelser som $x^2(t)$ eller også $x^3(t)$. Det var her, han stødte på både to forskellige dynamiske variabelers ikke-kommutativitet og de udtryk, som Born og Jordan genkendte som værende regler for matrixmultiplikation.

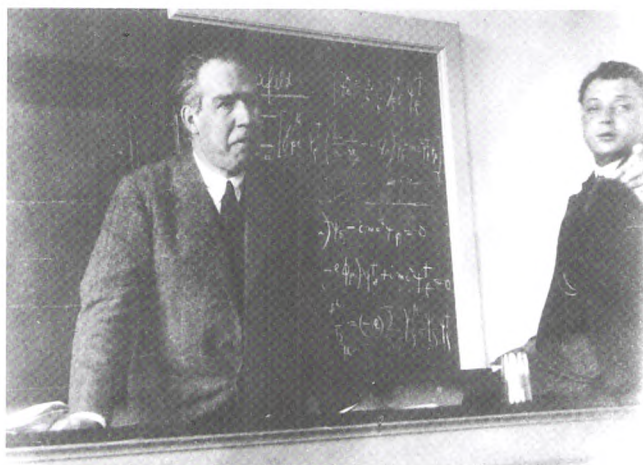


Figur 6. Hendrik Kramers og opdagerne af spin, George Uhlenbeck (tv) og Samuel Goudsmit (th), i Ann Arbor, ca. 1928.

Born og Jordan indsendte deres afhandling i september 1925. Den udgjorde en første systematisering af Heisenbergs nye tilgang og introducerede matricer samt de nu velkendte kanoniske kommutationsrelationer mellem sted og impuls. Den er langt mere tilgængelig for moderne læsere, og det samme gælder den skelsættende "tremandsafhandling" om kvantemekanik, der blev fremlagt i november 1925 af Born, Heisenberg og Jordan, og som afsluttede den formelle udvikling af matrixmekanikken.

Andre bidrog også. Allerede i oktober var det lykkedes Pauli at udlede brintspektret ved hjælp af matrixmekanikken, hvilket var et stærkt argument til fordel for den nye formalisme. Også Paul Dirac i Cambridge, som havde fået en kopi af korrektøren på Heisenbergs *Umdeutung*-afhandling, bidrog tidligt og kom – uafhængigt af Born og Jordan, men kort efter dem – frem til kommutationsrelationerne ved at udnytte deres forbindelse til Poissonparenteserne i den klassiske mekanik [12]. Det lykkedes også Dirac at udlede brintspektret, og han kom her igen ind på en tæt andenplads, denne gang efter Pauli. Matrixmekanikken

havde således haft succes med at forklare brintspektret lige på det tidspunkt, hvor en helt anden beskrivelse af det samme fænomen kom på banen: Schrödingers bølgemekanik.



Figur 7. Niels Bohr og Wolfgang Pauli i Auditorium A på Bohrs institut i København i 1929.

Bølgemekanikken

I slutningen af 1925 og begyndelsen af 1926 udarbejdede Erwin Schrödinger det, man kunne kalde hans egen version af et skærpet korrespondensprincip: bølgemekanikken. I hurtig rækkefølge i første halvdel af 1926 indsendte han fire artikler til *Annalen der Physik*. I et brev til Pauli fra februar 1926 bemærkede Sommerfeld: "Schrödinger synes at finde præcis de samme resultater, som Heisenberg og dig, men på en helt anden, helt vanvittig måde: ingen matrixalgebra, men grænseværdiproblemer."

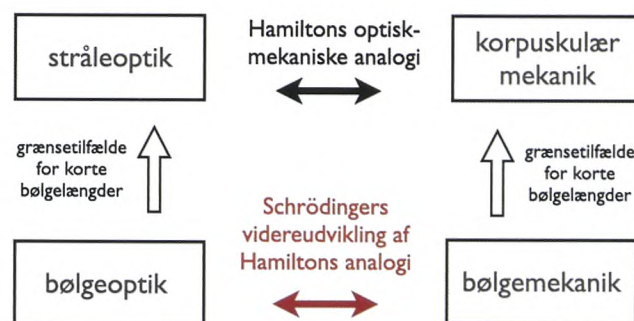
Schrödinger var knap to år yngre end Bohr og havde studeret fysik i Wien hos Boltzmanns efterfølger, Friedrich Hasenöhl. Schrödinger, der var velbevandret inden for mange forskellige områder af fysikken, havde fulgt udviklingen inden for den gamle kvanteteori og havde omkring 1920, stort set uden at offentliggøre noget, iværksat et ambitiøst og i sidste ende mislykket forskningsprogram, der havde til formål at generalisere den klassiske mekanik i lyset af både Einsteins generelle relativitetsteori og kvanteteorien.

I 1925 var Schrödinger stærkt optaget af gasteori, især Einsteins nylige arbejde med kvantestatistikken for idealgasser, herunder den nye Bose-Einstein-statistik. Som én, der var skolet i Boltzmanns tradition, havde han svært ved at acceptere, at der pludselig skulle være brug for en anden statistik end Boltzmanns for mikropartikler. Gennem Einstein fik han kendskab til Louis de Broglies arbejde med stofbølger. Ved at benytte sig af de Broglies idéer opdagede Schrödinger, at den nye Bose-Einstein-statistik for partikler lige så godt kunne fortolkes som en klassisk Boltzmann-statistik for stofbølge-svingninger. For ham var dette en stærk indikation af, at alt stof kunne opfattes som bølger og ikke partikler.

I sin afhandling henviste de Broglie til en analogi mellem Fermats princip og Maupertuis' princip som et argument for stofbølger. Schrödinger erkendte, at

denne analogi var et udtryk for en analogi mellem optik og mekanik, der oprindeligt skyldtes William Rowan Hamilton i 1830'erne: Både (stråle)optik og mekanik er underlagt det samme variationsprincip med hensyn til en særlig karakteristisk funktion, der er relateret til henholdsvis udbredelsestiden og virkningen. Indtil midten af 1920'erne og Schrödingers arbejde med bølgemekanikken havde denne nu velkendte analogi ikke været meget mere end en matematisk ejendommelighed.

Som det fremgår af hans upublicerede notesbøger, udnyttede Schrödinger Hamiltons analogi, og forsøgte at indføre en relativistisk bølgeligning til at beskrive de Broglies stofbølger (i dag kendt som Klein-Gordon-ligningen). Han indså, at kvantiseringsbetingelserne i den gamle kvanteteori i princippet kunne forklares som et egenværdiproblem i en partiel differentialligning. Men efter at have løst den resulterende bølgeligning for brintatomet uden at kunne genfinde Sommerfelds velkendte resultater for brintatomet, forkastede han dette første forsøg på en bølgeligning.



Figur 8. Erwin Schrödingers videreudvikling af William Rowan Hamiltons optisk-mekaniske analogi fra 1830'erne [9].

Frustreret over fiaskoen for sin ellers fascinerende idé forsøgte Schrödinger i begyndelsen af 1926 at formulere en ikke-relativistisk bølgeligning. Til hans overraskelse gav den ikke-relativistiske version de korrekte energiniveauer for brintatomet. At han offentliggjorde ikke én, men to forskellige udledninger af denne bølgeligning i sine to første artikler i *Annalen*, har i årtier undret både fysikere og historikere.

Grunden til, at der er tale om to forskellige udledninger, var en afgørende indsigt, som Schrödinger først fik efter at have sendt sin første artikel: I februar 1926 indså Schrödinger pludselig, at Hamiltons virkningsfunktion udelukkende beskriver bølgefronters fase (og ikke amplituden) [13]. Hvis amplituden varierer, fx i tilfælde af interferens, er bølgefunktionen ikke en simpel funktion af virkningen. Dette førte ham til en betydningsfuld erkendelse: Ligesom stråleoptik kun er et grænsetilfælde af en mere generel teori, bølgeoptik, kunne den klassiske korpuskulære mekanik have en underliggende, mere generel teori, "bølgemekanikken".

Denne videreudvikling af Hamilton-analogien – som etablerede en fuldstændig korrespondens mellem optik og mekanik og ikke blot stråleoptik og korpuskulær mekanik – var det, Schrödinger havde været ude efter. Med hans egne ord: "Måske er vores klassiske mekanik den fulde analogi til stråleoptik, og som sådan

er den forkert og ikke i overensstemmelse med virkeligheden.” Den klassiske mekanik var således for Schrödinger kun et grænsetilfælde (for korte bølgelængder) af hans nye og mere generelle bølgemekanik. Den klassiske verdens korpuskulære struktur var intet andet end et epifænomen af verdens sande bølgestruktur.

Det var dette, der gjorde hans bølgemekanik til en meget speciel udgave af et skærpet korrespondensprincip, selv om det så meget anderledes ud end det, Heisenberg havde fundet frem til. Det forklarer også, hvorfor senere forsøg af fysikere fra Göttingen og København på at vende tilbage til en partikelontologi (som Borns sandsynlighedsfortolkning eller Heisenbergs ubestemt-hedsprincip) forekom Schrödinger absurde [13]. Tingene blev yderligere kompliceret af den erkendelse, at begge nye mekanikker, på trods af deres vidt forskellige intentioner, viste sig at være ækvivalente.



Figur 9. Paul Dirac og Werner Heisenberg ved den syvende Solvay-konference i Bruxelles i 1933.

Ækvivalens

Hverken matrix- eller bølgemekanikken var fuldgældige teorier på det tidspunkt, hvor de oprindeligt blev formuleret, men foreløbige formalismer med oprindeligt snævre områder for succesfuld anvendelse. Allerede i marts 1926, lige efter Schrödingers anden artikel om bølgemekanikken, blev matrix- og bølgemekanikken anerkendt som ækvivalente på trods af de forskellige oprindelige motiver og ontologiske holdninger hos deres ophavsmænd og den stærke kontrast mellem de matematiske former, de antog (uendelig matrixalgebra versus differentialligninger).

Schrödingers, Eckarts og Paulis ækvivalensbeviser gjorde ikke opgaven med at finde en fortolkning af den nu tohovedede formalisme lettere. Tværtimod blev fortolkningen af kvantemekanikken i stigende grad en aktivitet, der havde til formål at fastslå den ene eller den anden formalismes epistemologiske overlegenhed – på trods af deres ækvivalens. Meget af det arbejde, som

Heisenberg og Schrödinger udførte i 1926–1927, og også meget af den tidlige fortolkningsdebat kan bedre forstås, når man har denne vinkel for øje.

En berømt episode i denne historie er Schrödingers besøg i København i begyndelsen af oktober 1926, hvor han mødte både Heisenberg og Bohr. Få dage inde i sit besøg blev Schrödinger forkølet og trak sig tilbage til sin seng, hvilket dog ikke forhindrede Bohr i at følge efter ham til hans værelse og fortsætte diskussionerne ved hans sengekant, hvilket dog var dømt til at mislykkes, fordi selv en udmattet Schrödinger ikke ville opgive den dybe indsigt, han havde opnået om stofs grundlæggende bølgenatur. Efter sin hjemkomst betegnede Schrödinger i sine håndskrevne private noter i stenografisk form Borns sandsynlighedsfortolkning som “det statistiske svineri fra Göttingen”.



Figur 10. Erwin Schrödinger foran bølger, ukendt år og sted. Tilladelse til brug givet af Ruth Braunizer(†), Alpbach i Tyrol, Østrig.

Fortolkning, udvidelse og anvendelse

Der skete mange flere ting i hurtig rækkefølge fra midten af 1926 og fremefter. Den vigtigste i sommeren 1926 var uden tvivl Borns allerede omtalte sandsynlighedsfortolkning, der blev udviklet som et biprodukt i forbindelse med hans forsøg på at anvende bølgemekanikken på aperiodiske fænomener (fx partikelspredning). Born identificerede kvadratmodulet i Schrödingers bølgefunktion som en sandsynlighedstæthed for position. I marts 1927 – angiveligt på et tidspunkt, hvor Bohr var blevet så træt af disse diskussioner, at han havde brug for en pause og tog på ferie i Norge – indsendte Heisenberg egenhændigt sin afhandling om ubestemt-hedsprincippet. Bohr, der ikke var begejstret for, at Heisenberg handlede på egen hånd, tvang Heisenberg til at medtage en note i korrektoren til hans artikel, og begyndte for alvor at arbejde på at redegøre for sin egen komplementaritetsfortolkning af kvantemekanik-

ken, som han præsenterede i Como i september samme år.

Men kvantemekanikkens fortolkning var ikke det eneste åbne spørgsmål for kvantefysikere efter midten af 1926. I hvert fald indtil efteråret 1927 så mange af aktørerne den nye mekanik i høj grad som et lovende, men i sidste ende åbent, projekt, som stadig manglede at demonstrere sin fulde almen gyldighed, og ikke som en teori, der nærmede sig sin afslutning. Fysikerne fortsatte derfor med at afprøve den nye mekaniks gyldighedsområde og udforske dens udvidelse i alle mulige retninger, idet de var fuldt ud klar over, eller endog håbede, at succesrige anvendelser kunne føre til en revision af kvantemekanikken eller til nye grundlæggende indsigter, der ville nødvendiggøre endnu en ny teoretisk ramme, der gik ud over kvantemekanikken: Relativitetsteori (som i Diracs arbejde fra 1927 om den relativistiske bølgeligning), aperiodiske fænomener (som i Borns arbejde) og det nye begreb elektronspin krævede væsentlige udvidelser af formalismen.



Figur 11. Københavnerkonferencen i 1930 med bl.a. (fra venstre i første række) Oskar Klein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev Landau og Hendrik Kramers. Dette billede tydeliggør den uformelle atmosfære på Bohrs institut. På bordet foran Heisenberg ligger en legetøjstrumpe til at give populære idéer en fanfare, mellem Pauli og Gamow står en kanon til at skyde upopulære idéer ned med, og foran Kramers står en legetøjstrømmeslager til at give applaus.

En udvidelse af kvantemekanikken til at omfatte mangelegemesystemer såsom komplekse atomer (begyndende med helium), molekyler, faste stoffer og kerner stod også meget højt på dagsordenen. En anden vigtig udvikling, der begyndte i midten af 1926, var Jordans og Diracs udarbejdelse af transformations-teorien, som lagde grunden til John von Neumanns senere Hilbertrum-aksiomatisering af kvantemekanikken. Endvidere stod det højt på dagsordenen at finde en kvanteelektrodynamik. Allerede i tremandsafhandlingen fra 1925 var Jordan begyndt at tænke over kvantiseringen af det elektromagnetiske felt, og mange teoretiske fysikere skulle komme til at bidrage til den videre udvikling af kvanteelektrodynamikken og kvantefeltteorien i de følgende årtier.

Den varme fase af kvantemekanikkens oprindelse var forbi i efteråret 1927, da der blev opnået enighed om

det, der senere blev kendt som Københavnerfortolkningen, blandt fysikerne i Göttingen og København (som bekendt uden Einstein og Schrödinger). Dette medførte en udbredt optimisme med hensyn til kvantemekanikkens anvendelse og videreudvikling. Det markerede også begyndelsen på et sandt "kvanteårhundrede", hvor teknologiske anvendelser af kvantemekanikken, bl.a. transistoren, laseren og ikke mindst atombomben, skulle forandre vores verden dybt på måder, som aktørerne i 1925–1927 ikke kunne have forudset [4].

Kvantehistoriografi

Selv om kvantemekanikkens oprindelse i dens varme fase fra 1925–1927 uden tvivl allerede er veludforsket, er der stadig mange fascinerende åbne spørgsmål, som vil optage videnskabshistorikere i årtier fremover. Mens mange tidligere har lagt vægt på det revolutionerende brud, som kvantemekanikken uden tvivl var, er historikere i de senere år begyndt at lægge større vægt på de mange fascinerende kontinuiteter. Meget af den viden, der blev skabt inden for både den klassiske fysik og den gamle kvanteteori, overlevede kvantemekanikkens tilblivelse, og hvordan den blev reintegreret i den nye mekanik, er i mange tilfælde stadig ikke blevet undersøgt i detaljer.

Der mangler også stadig meget forskning om kvantemekanikkens anvendelse inden for områder, som vi i dag betragter som selvstændige underdiscipliner af fysikken, fx faststoffysik, kernefysik, partikelfysik eller kvantegravitation og kvanteinformation, eller inden for andre fag som fx kemi og biologi. Indtil for ganske nylig blev sådanne anvendelser betragtet som stort set afledte og dermed i bedste fald som mindre spændende for historikere, der er interesseret i kvantefysikkens grundlag. Dette er ved at ændre sig, og det bliver tydeligt, at mange af disse anvendelser havde vigtige følger for selve kvantemekanikkens grundlag [14].

Historien om kvantemekanikkens mange forskellige fortolkninger giver også løfte om interessante nye veje for forskningen, især når man tænker på, at det, der ofte overfladisk (og oftest i nedsættende vendinger) omtales som "Københavnerfortolkningen" er en sammensmeltning af forskellige synspunkter (Heisenbergs og Bohrs til at begynde med), og også i lyset af den nyere udvikling inden for kvanteinformation og kvantecomputere.

En central udfordring for fremtidige historikere vil være at få adgang til de relevante historiske kilder, også med hensyn til den nyere udvikling inden for kvantefysikken – en opgave, der ikke bliver lettere i en tid, hvor fysikere kommunikerer elektronisk, og hvor noter og manuskripter fødes digitalt frem for på godt gammeldags papir. Måske er der brug for endnu et projekt som det, Kuhn og hans medarbejdere gik i gang med i 1960'erne, for at bevare kvantefysikkens nyere kulturarv.

Litteratur

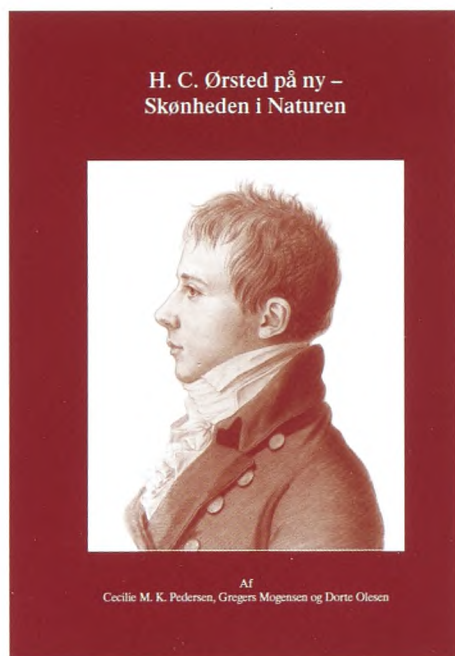
- [1] M. Jammer (1966) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill.
- [2] B.L. van der Waerden (1967) *Sources of Quantum Mechanics*. North Holland.

- [3] O. Darrigol (1992) From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory. University of California Press.
- [4] H. Kragh (1999) Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century. Princeton University Press.
- [5] M. Beller (2001) Quantum Dialogue: The Making of a Revolution. University of Chicago Press.
- [6] A. Duncan og M. Janssen (2019) Constructing Quantum Mechanics. Vol. 1: The Scaffold, 1900–1923. Oxford University Press; Vol. 2: The Arch, 1923–1927 (forv. 2023).
- [7] M. Badino (2016) What Have the Historians of Quantum Physics Ever Done for Us?, *Centaurus*, bind 58, nr. 4, side 327–346.
- [8] T.S. Kuhn (1962) The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press.
- [9] C.F. von Weizsäcker (1985) Niels Bohr, *Physikalische Blätter*, bind 41, nr. 9, side 308–314.
- [10] A. Duncan og M. Janssen (2007) On the Verge of Umdeutung in Minnesota: Van Vleck and the Correspondence Principle, *Archive for History of Exact Sciences*, bind 61, nr. 6, side 553–624; 625–671.
- [11] A. Blum, M. Jähnert, C. Lehner og J. Renn (2017) Translation as Heuristics: Heisenberg's Turn to Matrix Mechanics, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, bind 60, side 3–22.
- [12] H. Kragh (1990) Dirac: A Scientific Biography. Cambridge University Press.
- [13] C. Joas og C. Lehner (2009) The Classical Roots of Wave Mechanics: Schrödinger's Transformations of the Optical-Mechanical Analogy, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, bind 40, nr. 4, side 338–351.
- [14] J. James og C. Joas (2015) Subsequent and Subsidiary? Rethinking the Role of Applications in Establishing Quantum Mechanics, *Historical Studies in the Natural Sciences*, bind 45, nr. 5, side 641–702.



Christian Joas er ph.d. i fysik, leder af Niels Bohr Arkivet og lektor i videnskabshistorie ved Institut for Naturfagenes Didaktik, KU. Hans forskning fokuserer på fysikkens historie i det 20. århundrede, især kvantefysikkens oprindelse og anvendelse. I foråret 2022 vil han undervise i kvantemekanikkens historie sammen med Ricardo Karam og Helge Kragh.

Nyt fra foreningerne



Ny bog om H.C. Ørsted og ny webshop hos SNU

I anledning af 200-året for H.C. Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen skabte Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) en udstilling om Ørsted, som nu er nået til Steno Museet i Aarhus. Selskabet ejer en del af hans oprindelige ejendele, mange som ofte ikke bliver vist frem, og disse skabte grundlag for udstillingen.

SNU har fået mange rosende ord for udstillingen "H.C. Ørsted på ny – Skønheden i Naturen", og har derfor valgt at udgive en bog, der tager udgangspunkt i udstillingen og SNUs samling af Ørstedes ejendele. Bogen kan læses både som et supplement til udstillingen, men også som en god lille all-round introduktion til Ørsted som både forsker og kulturperson.

Bogen er skrevet af Dorte Olesen (SNUs præsident), Cecilie Pedersen (SNUs sekretær) og Gregers Mogenssen (projektleder for udstillingen) baseret på input fra hele SNUs direktion og andre eksperter.

Den kan købes i SNUs nye webshop på naturlaeren.dk, som netop er gået i luften. Bogen koster 75 kr. + fragt. Den sælges også på Steno Museet.

Årsmøde i Dansk Fysisk Selskab



Dansk Fysisk Selskab (DFS) måtte i 2020 aflyse årsmødet på grund af corona-pandemien, men i år har DFS holdt årsmøde på Brogaarden i Middelfart den 21.-22. juni. På årsmødet var der mulighed for at se de nyeste resultater inden for en bred vifte af fysiske discipliner, fra superkølede væsker og katalyse til kvantedevice, og høre om bedre rekruttering og læring i fysik.

Du kan se nyheder fra DFS på hjemmesiden www.danskfysiskselskab.dk.

Kvantemekanikkens fortolkninger

Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kvantemekanikken beskriver mikroskopiske legemers bevægelse med en bølgefunktion Ψ , som på samme tid antager større eller mindre talværdier alle steder i rummet. Alle fysikere er enige om, hvordan bølgefunktionen beregnes, og hvordan den med stor præcision kan forudsige sandsynligheder og middelværdier af udfaldet af målinger på mikroskopiske kvantesystemer. Men enigheden ophører, og der er en ekstrem variation i, hvad fysikere mener, vi kan sige om det, der faktisk foregår på den mikroskopiske skala.

Niels Bohr beskrev i 1913 brintatomet som en elektron i kredsløb om atomkernen i analogi med en planet i kredsløb om Solen. Ved kun at tillade bestemte baner kunne Bohr argumentere for, at atomet kan udsende og absorbere lys med bestemte frekvenser i processer, hvor elektronen foretager et kvantespring mellem disse baner. Niels Bohr var helt klar over denne beskrivelses fundamentale modstrid med kendt fysik og pegede selv på behovet for "med Tiden at bringe en vis Sammenhæng i de nyere Forestillinger". Da Bohrs metode til beregning af de tilladte baneenergier fejlede for heliumatomets to elektroner, var der under alle omstændigheder behov for udvikling af en ny og bedre teori.

I analogi med lyskvanter, som samtidigt er elektromagnetiske bølger, foreslog Louis de Broglie i 1924, at mikroskopiske partikler har bølgenatur. Lyskvantets (fotonens) energi er givet ved den optiske frekvens, $E = hf$, og dets impuls er givet ved bølgelængden, $p = h/\lambda$. Med samme relation for elektroner ville omkredsen af Bohrs baner netop svare til et helt antal bølgelængder, og i 1926 fandt Erwin Schrödingers en matematisk ligning for bølger, hvis løsninger udviste tidlige svingninger med frekvenser, der præcist svarede til Bohrs frekvensbetingelse for brintatomets lysudsendelse og -absorption.

I modsætning til lysbølger, som er løsninger til de kendte Maxwellligninger for elektriske og magnetiske felter, er Schrödingers bølgefunktion en rent matematisk konstruktion. Fysikeren Max Born viste dog kort efter Schrödingerligningens fremkomst, at den rumlige variation af bølgerne i en situation med kollisioner mellem ladede partikler svarede til den måde, en fordeling af klassiske partikler spredes i forskellige retninger ifølge Newtons love. Helt præcist er normkvadratet $|\psi|^2$ proportionalt med antallet af partikler, der spredes i de forskellige retninger (bølgefunktionen betegnes her med det græske bogstav ψ (udtales "psi"), og da ψ er en funktion med komplekse talværdier, skal vi bruge normkvadratet $|\psi|^2$ og ikke ψ^2). Denne teoretiske observation førte til det, vi kalder Borns regel: Hvis vi forudsætter, at integralet af normkvadratet af bølgefunktionen over hele rummet har værdien 1, er den lokale værdi af $|\psi|^2$ lig med sandsynlighedstætheden for, at en enkelt partikel findes netop der. Det gælder ikke kun partiklernes rumlige fordelinger, men også resultater af målinger af andre fysiske egenskaber (impuls, impulsmoment, kinetisk energi, ...) hvis fordelinger

og størrelser, som fx deres statistiske middelværdi og varians, kan forudsiges ved brug af bølgefunktionen og simple formler. Overalt i fysikken og kemien giver Schrödingers ligning og Borns regel resultater i fuld overensstemmelse med eksperimentelle undersøgelser.

Fra et teknisk og beregningsmæssigt synspunkt har vi altså en teori, der virker, men vi vil jo også gerne forstå den verden, vi lever i, og ikke bare have formler for den, og siden 1926 er fysikere kommet med mange forskellige bud på, hvordan kvantemekanikken og specielt bølgefunktionen skal fortolkes. Wikipedia-opslaget "Interpretations of quantum mechanics" opsummerer mange forskellige fortolkninger og diskuterer kort, hvordan de afviger fra hinanden – og endda indbyrdes inden for hver fortolkning. Ingen fortolkning er fri for åbenlyse mangler eller svagheder, men de byder alle ind med relevante spørgsmål og (meget forskellige) svar. I stedet for en gennemgang af alle fortolkningerne og deres principielle forskelle, vil denne artikel diskutere de mest udbredte fortolkninger med udgangspunkt i deres svar på de mest "naturlige" spørgsmål, man kan stille om kvantemekanikken. Selv hvis man ikke abonnerer på en given fortolknings svar på sådanne spørgsmål, eller at det overhovedet er vigtige spørgsmål, kan de måske påpege de svagheder, man let glemmer eller fortrænger ved sin egen foretrukne fortolkning. Og så kan de ofte bidrage med ny intuition og nye ideer til anvendelser og eksperimentelle undersøgelser.

Hvad siger formalismen – og hvad siger den ikke?

Det er et eksperimentelt faktum, at man ved målinger på systemer præpareret i samme kvantetilstand (med samme bølgefunktion), opnår resultater med sandsynligheder givet ved bølgefunktionen og Borns regel. Hverken teorien eller eksperimenterne viser, om de observerbare størrelser allerede havde én eller flere af de mulige værdier, før man målte dem, og heller ikke hvordan eller hvorfor en given observeret værdi blev foretrukket i det enkelte forsøg. Det forventede gennemsnit af mange målinger kan beregnes med en kompakt matematisk formel, som let fortrænger det faktum, at formelen er udledt direkte fra Borns regel, og at der blot er tale om en klassisk vægtet middelværdi af de mulige målresultater med de pågældende sandsynligheder – og ikke en værdi, som den fysiske størrelse "har", uanset om vi måler eller ej.

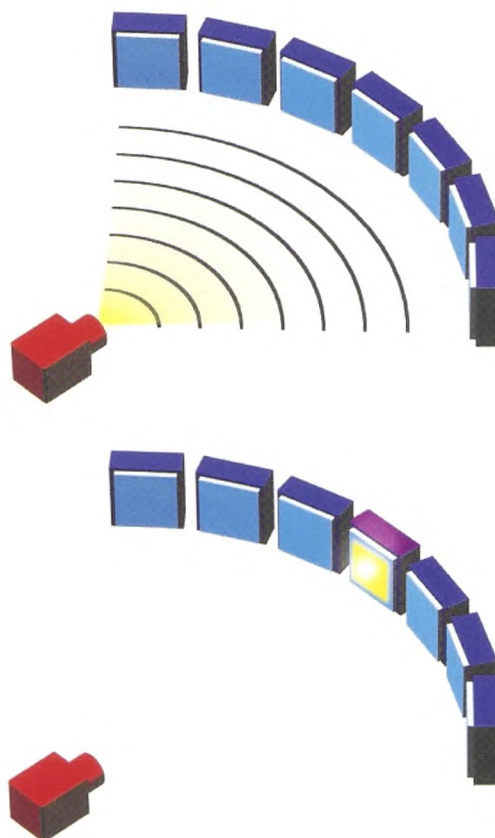
Det er måske fristende at opfatte elektronbølgefunktionen i brintatomet som en bogstaveligt udsmykket lad-

ningsfordeling, men for en ladningsfordeling ville den elektriske vekselvirkning med kernen have en bestemt værdi givet ved et integral over bidrag fra alle dele af fordelingen, mens den for en rumlig sandsynlighedsfordeling er karakteriseret ved en fordeling af mulige energier. Hvis bølgefunktionen og Borns sandsynlighedstæthed ikke må tages bogstaveligt som en fysisk størrelse, hvordan skal den så forstås? Albert Einstein forfægtede det synspunkt, at der måtte eksistere en mikroskopisk virkelighed, som måtte kunne beskrives med en måske mere kompliceret teori end kvantemekanikken, og Erwin Schrödinger blev i stigende grad så utilfreds med teorien, at han udtalte at han "fortrød at have haft noget med den at gøre". Einstein og Schrödingers kritik tog udgangspunkt i rigtig gode spørgsmål og tankeeksperimenter, og de pegede på muligheder og begrænsninger af kvantemekanikken på en så kreativ måde, at de i dag danner grundlaget for de mest subtile test af teorien og nogle af de mest spændende kvanteteknologier [1].

Niels Bohrs fortolkning

Niels Bohr indså, at det ville være en konsistent fortolkning, at kvantemekanikkens formalisme redegør for vores viden, udtrykt helt præcist som vores evne til at komme med forudsigelser af resultaterne ved målinger på systemet, mens man skal være varsom med – og helst undgå – at tro, at den direkte beskriver egenskaber ved det fysiske systems. Niels Bohr tog det som et empirisk faktum og et uomgængeligt grundvilkår ved den matematiske formalisme, at der er grænser for vores viden, og der derfor forekommer sandsynligheder og usikkerhed om måleresultater. Med udgangspunkt i hypotetiske eksperimenter diskuterede Bohr også, hvordan måleopstillinger kan sikre præcis viden om en egenskab, mens de i praksis udelukker samme grad af viden om andre, komplementære egenskaber. Man har både kritiseret Bohrs fortolkning af kvantemekanikken for at reducere teorien til de kvantitative resultater af teoriens formler og for at være filosofisk spekulativ og unødigt problematisere eksistensen af en uafhængig fysisk virkelighed. Men hans analyse er mere end et tilbageskridt til formler og tal, og hans insisteren på at adskille vores viden og evne til at forudsige resultater aflæst af makroskopiske apparater fra ideen om et mikroskopisk systems egentlige opførsel opløser netop de paradoksale konsekvenser, der følger af en for bogstavelig opfattelse af bølgefunktionen som tilknyttet objekter i den fysiske verden.

Det er i dag muligt at udføre målinger på en partikel uden at ødelægge eller absorbere den, så man bagefter vil kunne foretage yderligere målinger af den samme eller andre egenskaber. Måler man den samme egenskab to gange hurtigt efter hinanden, vil man forvente samme resultat, og for at Borns regel skal gælde ved den anden måling, må der ved den første måling ske et kollaps af bølgefunktionen til en ny bølgefunktion, der giver sikkerhed for det næste (samme) måleresultat. For Bohrs fortolkning er disse kollaps af bølgefunktionen en proces, som ikke sker i den fysiske verden, men netop anerkender, at en bølgefunktion, som repræsenterer vores viden, øjeblikkeligt må antage værdien nul overalt i rummet undtagen der, hvor vi har detekteret en partikel. Som den tyske fysiker Werner Heisenberg formulerede det, sker der i målinger "en overgang fra det mulige til det virkelige" – ligesom det sker med klassiske sandsynligheder, når vi løfter et rafflebæger og alle de hidtil sandsynlige udfald bortfalder bortset fra det, vi faktisk ser. I dag kan man udføre hele målesekvenser på enkelte kvantesystemer, og de eksperimentelle resultater reproduceres netop med en teori, der inkluderer løbende ændringer af bølgefunktionen som følge af målinger [2].



Figur 1. En kvantemekanisk partikel på vej fra en kilde imod en række detektorer er beskrevet med en bølgefunktion skitseret med det viste ringmønster i den øverste figur. Der er kun tale om en enkelt partikel, og den nederste figur viser, at kun en enkelt detektor "klikker".

Bohrs fortolkning blev hjulpet på vej af vedvarende udfordringer fra Einstein, og især EPR-paradokset (efter Einstein, Podolsky og Rosen) i 1935. Flere partikler kan være beskrevet med en fælles, såkaldt entangled bølgefunktion, der kun er forskellig fra nul, hvis stedkoordinaterne for begge partikler har den samme afstand til et bestemt punkt, mens selve afstanden kan antage et bredt interval af værdier. Måler man den ene partikels position, ændrer bølgefunktionen sig straks for den anden partikel, så den kun kan blive detekteret i den samme afstand og ikke inden for dens oprindelige sandsynlighedsfordeling. Det var for Einstein svært at forlige sig med, da de to partikler på det tidspunkt kan være meget langt fra hinanden, og måske endda inde-sluttet i hver sit lukkede laboratorium, men kollapset af den fjerne partikels bølgefunktion er meget nemmere

at acceptere med Bohrs fortolkning af bølgefunktionen, som jo blot beskriver, hvordan eksperimentatoren efter den første måling ved, og derfor kan forudsige, hvilke resultater der nu er mulige for målingen på den anden partikel.

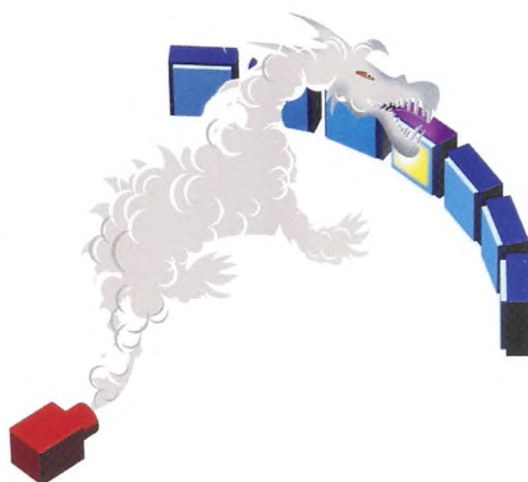
Niels Bohr levede i en tid, hvor kvantemekanikken tjente til at forklare og forudsige fysiske fænomener, og han argumenterede for sin fortolkning med fysiske og erkendelsesmæssige overvejelser over de praktiske og principielle grænser for vores viden. Moderne anvendelser af kvantefysik ved datatransmission og kryptering og ved kontrol med kvantetilstande i præcise sensorer og kvantecomputere har inspireret en ny og mere formel fortolkning ved navn QBism. QBism insisterer ligesom Bohr på, at formalismen vedrører vores viden i form af sandsynligheder for måleresultater, men QBism har mere fokus på rollen af det subjekt, der har (og skal bruge) den viden, og hvordan han eller hun opnår den. Niels Bohr forklarede, hvor godt man kan forudsige et måleresultat, mens det i QBism er helt naturligt, at to personer, Alice og Bob, med adgang til resultaterne fra forskellige tidligere målinger på samme system, har forskellig viden, og derfor bruger forskellige formler til at beskrive samme system. B'et i QBism står for Bayes regel, som siger, hvordan sandsynligheder opdateres, når man opnår gradvis viden om et fænomen, svarende til effekten af kollaps af bølgefunktionen, og det håndterer Alice og Bob altså med forskellige formler. Også før QBism fik sit navn, vidste vi naturligvis, hvordan man teoretisk redegør for vores viden om et kvantesystem under målinger og også, at resultatet er afhængigt af, om man får de korrekte måleresultater oplyst. På det punkt føjer QBism altså ikke meget til Bohrs fortolkning, men QBism samler de forskellige aspekter af teorien på en opdateret og mere systematisk måde, og QBism kan siges at have en mere markant betoning af viden som noget subjektivt.

Det er praktisk, minimalistisk og helt fri for en række paradokser at lade formalismen beskrive vores viden og ikke bekymre sig om, hvad der sker i virkeligheden. Men det kan forekomme unødvendigt verdensfjernt. Er det ikke muligt at klemme bare en smule fysisk virkelighed ind sammen med kvantemekanikkens formalisme? Lad os se på to oplagte muligheder: (1) partikler er lokaliserede og er faktisk lige der, hvor vi ser dem i eksperimenter – tilsyneladende tilfældige steder, men det er kun fordi, vi ikke ved, hvor de er. (2) fysiske objekter er bølger, der løser Schrödingers ligning, og i virkeligheden er flere steder på samme tid, ikke som udsurte ladnings- og massefordelinger, men som samtidige realisationer af at være både det ene og alle de andre steder.

De Brogle-Bohm-teori

Der er en forbløffende simpel måde at genindføre partikler i fortolkningen af bølgefunktionen. Louis de Broglie foreslog tidligt, at bølgefunktionen ikke er partiklen, men kan opfattes ligesom radarbølger, der afsøger et farvand og rådgiver kaptajnerne om, hvor de skal styre skibene hen. Schrödingers ligning kan omskrives til en såkaldt kontinuitetsligning, som viser,

at ændringer i lokale værdier af sandsynlighedstætheden $|\psi|^2$ fører til lokale strømtætheder, som kunne svare til en fordeling af partikler, der følger bestemte baner, ligesom de enkelte molekyler i en luftstrøm. Den teoretiske fysiker David Bohm genopdagede de Broglies ide, og udbyggede den i 1950'erne i modstand mod det, han opfattede som et "shut up and calculate" forbud mod at diskutere kvantemekanikkens fortolkning. Schrödingers ligning skal stadig løses for at beregne partikelbanernes form, men der er tale om en virkelig partikelbevægelse, og når vi måler en partikels position, ser vi altså bare, hvor den allerede er. Partiklerne er i deres baner udsat for både de mekaniske kræfter, som i den klassiske fysik, og en ekstra kvantekraft, der beregnes ud fra bølgefunktionen. Kvantekraften er svag for makroskopiske objekter, men i den mikroskopiske verden udgør den en vigtig korrektion til Newtons mekanik, der skaber interferensstriber og "løfter" partikler over potentialbarrierer ved tunneleffekten, så man opnår samme rumlige fordelinger af partikler som Schrödingers ligning forudsiger for $|\psi|^2$.



Figur 2. I Bohrs fortolkning er kvantemekanikkens formål ikke at beskrive mikroskopiske partiklers eller bølgers bevægelse, men måleapparats signaler – John Archibald Wheeler foreslog humoristisk, at det kunne være en røgdrage (smoky dragon), der får detektor til at "klikke".

Det er mange indvendinger imod Bohms partikelbaner: elektroner og de fleste atomkerner har en indre frihedsgrad, der hedder spin, som ikke har en naturlig banebeskrivelse, og entangled tilstande af flere partikler har så specielle baner, at de i højere grad forvirrer end forklarer den kvantemekaniske opførsel. For tilhængerne af Bohms baner er specielle korrelationer i Bohms baner, når de entangled partikler er langt fra hinanden, en acceptabel pris at betale for en beskrivelse, hvor måleresultater reflekterer en underliggende fysisk virkelighed. Hvad angår spin, har nogle tilhængere af Bohms baner det synspunkt, at kun stedkoordinater er virkelige fysiske egenskaber, og bølgefunktionens spin-frihedsgrader er derfor en del af de Broglies "radarbølge" og ikke af den mikroskopiske virkelighed. Den opfattelse passer med det berømte Stern-Gerlacheksperiment, der påviste kvantiseringen af spin uden at måle selve spinnets, men ved netop at detektere den

rumlige opsplitning af en atomar stråle på grund af vekselvirkningen mellem spinnet og et magnetfelt.

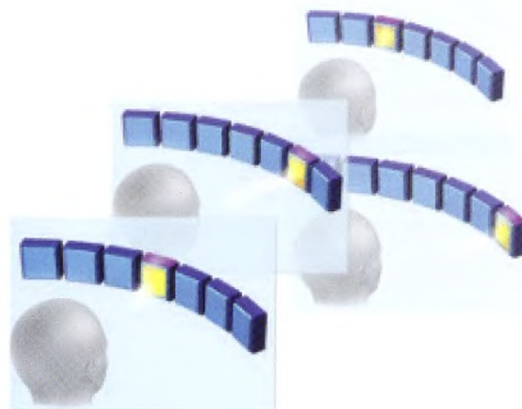
I et bachelorprojekt i min gruppe har vi vist, hvordan Bohm-banerne i Stern-Gerlach-magneterne perfekt reproducerer den kvantemekaniske forudsigelse af hvor mange partikler, der udsendes i hver retning for vilkårlige kvantetilstande af spinnet. Vi kunne også vise, at bølgefunktionen for to partikler i spin-entangled tilstande giver kvantekæfter, der dirigerer begge partiklers baner i retninger, der afhænger af begge magneter. Her blev det sjovt, for orienteringen af magneterne i laboratoriet bestemmer hvilken spinkoordinat, der afgør opsplitningen, og dermed måles i forsøget. John Bell viste i 1966 en matematisk ulighed, der altid gælder for korrelationer mellem par af målinger, hvis de målte resultater har givne (men ukendte) værdier, før de måles. David Bohm havde foreslået en analyse af EPR-paradokset for par af partikler med særlige spintilstande, og for dem forudsiger kvantemekanikken et brud med Bells ulighed, som er bekræftet i eksperimenter med fotoner. Ved valg af forskellige retninger for magneterne fordelte vores baner sig med eksakt samme fordelinger, som kvantemekanikkens forudsigelse. Selvom Bohm-banerne til alle tider repræsenterer partikler, der er bestemte steder, er deres bevægelse styret af den totale spin- og rumbølgefunktion, så begge partiklers baner afhænger vitterligt af den valgte orientering af begge magneter, og det er den mangel på lokalitet, der sikrer bruddet med Bells ulighed. At banerne opfører sig, som de gør, er naturligvis svært at forstå – Bohm kaldte det universets “indfoldede orden” – men Bohm giver i det mindste et bud på, at det er noget, der virkeligt sker.

Mange-verden-fortolkningen

Det er en ligeså naturlig tanke at gå den stik modsatte vej og insistere på, at bølgefunktionen er udtryk for, at mikroskopiske partikler er bølgefænomener ligesom lyd og lys. Den umiddelbare indvending imod en så bogstavelig forståelse af bølgefunktionen er, at vi aldrig ser partikler optræde flere steder på samme tid, men i 1957 foreslog amerikaneren Hugh Everett, at det gør vi måske alligevel – vi har bare ikke opdaget det. Det førte til den radikale mange-verdensfortolkning af kvantemekanikken.

I Everetts arbejde blev det ganske simpelt foreslået, at fysiksystemer virkeligt er flere steder på samme tid, og når vi måler på dem, bruger vi apparater, som også skal beskrives med kvantemekanikken, og derfor også kan være i rumligt udbredte tilstande. Vekselvirkningen mellem kvantesystem og måleapparat, får ikke viseren på måleapparatet til at vælge en tilfældig position, svarende til en tilfældigt målt talværdi efter Borns regel. Viseren vælger i stedet, ligesom de mikroskopiske partikler, alle tilgængelige værdier. Som eksperimentator kigger jeg på måleapparatet og, da jeg også er en del af kvantevirkeligheden, ser jeg ikke bare en værdi, men mange værdier, og min kollega, som står ved siden af, ser også mange værdier. Faktisk kan vi finde vores resultater så interessante, at vi vælger at følge op på dem i en lang række yderligere forsøg, sød musik opstår, og vi bliver gift og får børn, og samtidigt finder vi dem

så uinteressante, at vi i stedet skifter forskningsfelt og aldrig ses igen.



Figur 3. I mange-verdensfortolkningen opnås alle mulige måleresultater, da både de mikroskopiske partikler, måleapparaterne og vi selv er beskrevet ved bølgefunktioner, og kan være i flere tilstande på samme tid. Hver af disse tilstande udgør sin egen verden med tilsyneladende klassiske apparater, der registrerer et enkelt tilfældigt resultat.

Everetts indsigt var, at den samtidige realisering af disse vilde hændelsesforløb ikke er det fjerneste i modstrid med, at vi aldrig ser flere ting ske på samme tid i vores dagligdags oplevelse af verden. Everetts simple argument er, at bølgefunktionen ganske vist består af mange forskellige komponenter eller muligheder på samme tid, men ligesom i EPR-paradokset, hvor to entangled elektroner har deres bevægelse synkroniseret, er også måleapparatet, mine og min kollegas sanser og hukommelsesceller og vores computere og notater kvantemekaniske, og de er entangled med hinanden. Registreringen af et bestemt måleresultat er ledsaget af bestemte tilstande af apparatets komponenter, og når resultatet når min hjerne, kopieres det til flere hukommelsesceller, og de samme informationer registreres og kopieres måske hos min kollega, der iagttager samme apparat. Fordi vi alle er kvantemekaniske, og kan være i flere tilstande på samme tid, er det sådan, at den mange gange kopierede information måske nok antager forskellige værdier på samme tid, men sammenligner man min og min kollegas opfattelse, er vi helt enige om en værdi – og samtidig om en anden, og om en tredje og en fjerde. . . værdi – mens det ikke vil forekomme, at vi holder på forskellige værdier for den målte fysiske størrelse. I den verden, hvor jeg ikke blev gift med min kollega, skal vi heller ikke finde ud af at deles om børnene.

Beskrivelsen kaldes mange-verden-fortolkningen, fordi ikke kun et mikroskopisk system men næsten hele verden splittes op i parallelle underverdener med hver sin del, eller historie, af virkeligheden. Uden kommunikation mellem de forskellige verdener ser vores dagligdag helt almindelig og klassisk ud i hver underverden, og vi har ingen adgang til de andre parallelle verdener, hvor andre mulige resultater forekommer af kvantemålingerne. Og en lille bonus: alle muligheder forekommer i forskellige verdener, og ingen bliver derfor trukket ved en tilfældighed.

Der kan fremsættes flere indvendinger mod mange-verden fortolkningen. En er, at den er “dyr” i verdener, men den kvantemekaniske beskrivelse skal under alle omstændigheder håndtere flere mulige tilstande/steder for hver enkelt partikel, og ligesom elektronbølgefunktionen ikke beskriver flere elektroner, men en enkelt elektron flere steder, er der ikke tale om, at der skabes flere mennesker, Rundetårne og jordkloder, men om, at alt det, der allerede er i vores verden, kan være i flere tilstande på samme tid. Mange-verdensfortolkningen har et mere kvantitativt og praktisk problem, idet den ikke opererer med sandsynligheder, men lader alt ske, og derfor ikke umiddelbart kan forklare, hvorfor vores verden er “typisk”, og har ladet os udføre forsøg og måle resultater, som er i overensstemmelse med Borns regel – det er jo på den baggrund, at vi i den af de parallelle verdener, hvor du læser denne artikel, synes det er vigtigt at diskutere kvanteteoriens kvantitative forudsigelser. Tilhængere af mange-verdensfortolkningen anerkender denne mangel ved teorien og har forskellige ideer om “light” versioner af teorien, der inkorporerer elementer af tilfældighed og sandsynligheder med en mere objektiv mening, end de har hos Bohr.

Dekohærens og spontant kollaps

Den måde, bølger udvikler sig over tid, gør, at bølgens amplitude ψ på flere steder i rummet til et tidspunkt kan bidrage til værdien på et enkelt sted til senere tider, idet de både kan forstærke og udslukke hinanden. Det kendes i optikken som diffraktion og interferens, og det samme sker med den kvantemekaniske bølgefunktion, hvor ikke kun sandsynlighedstætheden, $|\psi|^2$, men også den stedafhængige komplekse fase af ψ har betydning for den senere konstruktive eller destruktive interferens i mønsteret af detekterede partikler. Man kan sagtens inden for kvanteformalismen finde mekanismer, der udviser interferens. Fx vil vekselvirkning med andre kvantemekaniske partikler skabe forstyrrelser i de andre partiklers bølgefunktioner svarende til, at man får ubestemte faser af ψ . Det kaldes dekohærens, og er særligt udtalt for makroskopiske objekter, og det er en ukontroversiel del af forklaringen på, at vi ikke ser kvantefænomener i den klassiske fysik. Med Everetts sammenkobling af de mikroskopiske partikler og de makroskopiske detektorer og eksperimentatorer i store fælles kvantetilstande, er dekohærens med til at sikre, at de forskellige adskilte “verdener” ikke senere interfererer med hinanden, og derfor opleves hver verden som om, at de målte værdier er klassiske og velbestemte. Mens dekohærens af faser af ψ uden videre kan forklare, at vi ikke ser interferens, ændrer den ikke på sandsynlighedstætheden, $|\psi|^2$, og dekohærens løser ikke kvantemekanikkens egentlige måleproblem, idet den ikke forklarer, hvorfor vi registrerer bestemte, tilfældige måleresultater. Her er Everetts radikale svar, at det gør vi også kun tilsyneladende.

Som et forsøg på at forene en mikroskopisk kvante-verden, hvor bølgefunktionen repræsenterer noget fysisk, med den erfaring, at makroskopiske klassiske apparater kun måler tilfældige klassiske værdier, foreslog teoretikerne Ghirardi, Rimini og Weber i 1980’erne, at man kunne tilføje ekstra, tilfældige kræfter til Schrö-

dingers bølgeligning, som var så små, at de ikke ville få konsekvenser for elektroner eller de øvrige atomare partikler, men som ville føre til lokalisering af bølgefunktionerne, ligeså snart man indsætter måleapparaternes tungere objekter i ligningen. Schrödingers ligning indeholder allerede de fysisk kendte kræfter i form af den potentielle energifunktion, og på samme sted i ligningen er det muligt at tilføje svage tilfældige variationer i tid og rum. I forhold til Everetts mange verdener ville de tilfældige kræfter få måleapparatets viser til at lokaliseres tilfældigt på klassisk vis og dermed være skyld i det tilfældige måleresultat. Med den etablerede teori for målinger i kvantefysikken har vi faktisk også en teori for kontinuerte svage vekselvirkninger med måleapparater, hvor Borns regel, tilfældige måleresultater, og de små medfølgende kollaps af bølgefunktion fører til en lignende dynamik, men i stedet for at henvise til postulatet om fundamentalt tilfældige resultater af målinger og Bohrs fortolkning, fører en påstået ydre forstyrrelse altså til det samme resultat.

Hvem har ret?

Det har ikke været formålet med denne artikel at opstille en konkurrence og udpege en vinder blandt forskellige fortolkninger af kvantemekanikken. Niels Bohr fandt det, efter eget udsagn, hverken nyttigt eller nødvendigt at tale om det, der “virkeligt” sker i den mikroskopiske verden i form af en partikel- eller bølgeopførsel, så længe han bare kunne redegøre for de målte resultater. Dermed udelukker hans fortolkning ikke, at vi alle er del af Everetts større kvantetilstand, eller at alle partikler i virkeligheden følger Bohms baner. De forskellige fortolkninger kommer ikke med forskellige kvantitative forudsigelser, og deres relevans skal snarere bedømmes på, om “vi kan lide dem” – et vidunderligt subjektivt kriterium. Et århundredes lidenskabelige diskussioner er en fin påmindelse om, at fysikere også er mennesker.

Litteratur

- [1] C.K. Andersen og A.C.J. Wade (2013) Bohr vs. Einstein: Fortolkning af kvantemekanikken, Kvant, bind 24, nr. 1, side 27–31.
- [2] B. Juelsgaard og K. Mølmer (2013) Hundrede år efter Bohr: Nobelprisen for fysik under gennemsnittet, Kvant, bind 24, nr. 1, side 14–18.
- [3] K. Mølmer (2010) Kvantemekanik – Atomernes vilde verden, Aarhus Universitetsforlag.
- [4] en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics



Klaus Mølmer er professor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvanteoptik, teori for målinger i kvantemekanikken og anvendelser af kvantefysikkens særeste egenskaber i kvante-computere og kvantesensorer.

På tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution

Peter Lodahl, Kim Splittorff og Anders S. Sørensen, Niels Bohr Institutet

Drevet af en rivende teknologisk udvikling åbner der sig netop nu nye muligheder for anvendelse af kvantemekanik, der har potentialet til at revolutionere vores samfund. Vi giver her eksempler på de nye muligheder, og hvordan vi ved at kombinere forskellige kvantesystemer kan realisere hybride systemer i et forsøg på udnytte og optimere fordelene ved de forskellige kvanteteknologiske “byggekloster”. Samtidig giver vi vores bud på, hvordan vi i Danmark kan sikre, at vi uddanner en “kvantekar” arbejdsstyrke, der kan udnytte de muligheder, de nye kvanteteknologier åbner for.

Kvantemekanik er uden tvivl en af de største udfoldelser af menneskets intellekt, måske den allerstørste. Kvantestystemer har deres helt egen logik, der ofte er i direkte modstrid med den intuition, vi har opnået fra klassiske systemer. Fx er det naturligt fra et klassisk synspunkt, at man kan følge en partikels bevægelse uden at ændre den, mens dette er umuligt for et kvantesystem.

Kvantemekanik er ikke blot en intellektuel præstation, der har revolutioneret vores forståelse af verdenen på atomar skala, den har også revolutioneret hele vores samfund: Uden kvantemekanik var der fx ingen smartphones, computere, internet, lasere, osv. Man kunne derfor med rette hævde, at kvantemekanik allerede har gjort sit. Ikke desto mindre står vi måske på tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution, der har potentialet til at løse nogle af de udfordringer, det globale samfund har med fx at udvikle ny medicin og at finde en langsigtet løsning på klimaudfordringerne.

Vi vil her give eksempler på nogle af de fremskridt, der sker netop nu i Center for Hybrid Quantum Networks (Hy-Q) på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og samtidig give vores bud på, hvordan Danmark kan sikre, at vi har en “kvantekar” arbejdsstyrke, der kan høste frugten af den kommende kvanterevolution.

Hvad er nyt, og hvad er udfordringen?

Teknologier, der har potentialet til at kunne ændre vores samfund, kaldes transformative teknologier. Når vi i dag er på tærsklen til at realisere transformative kvanteteknologier, skyldes det, at eksperimentel kvantefysik har gennemgået en rivende udvikling, så vi i dag har fuld kontrol over de basale byggesten for kvanteteknologi. Fælles for de nye kvanteteknologier er, at man søger at lagre information i sammenfiltrede (entangled) kvantemekaniske tilstande. Hermed kan man processere enorme mængder data, som vil være u håndterlige selv med verdens mest kraftfulde klassiske computer, eller sende ubrydelig krypteret information, hvor sikkerheden er garanteret af kvantemekanikkens love.

En af de helt store udfordringer i udviklingen af nye kvanteteknologier er at opskalere små kvantesystemer til større og mere komplekse funktionaliteter. Det er i dag et åbent og fundamentalt forskningsspørgsmål at forstå og dernæst realisere, hvordan man

bedst laver kvantesystemer større samtidig med, at de delikate kvantemekaniske sammenfiltrede tilstande bevares. Udfordringen er, at kvantemekaniske tilstande er skrøbelige og derfor skal skærmes meget effektivt for alle former for forstyrrelse. Af den grund udvikler kvanteteknologi helt nye standarder for teknologi, som også har en kraftigt afsmittende effekt på andre områder end kvanteteknologi.

I Center for Hybrid Quantum Networks (Hy-Q) arbejder vi eksperimentelt med at konstruere kvantenetværk baseret på lys (fotoner) og stof (atomer). Vi fremstiller specielle nanofotoniske komponenter, som muliggør, at en foton og et kunstigt atom kan vekselvirke meget effektivt med hinanden. Baseret på dette, vil vi opskalere til større netværk, og bl.a. demonstrere en såkaldt “kvantesimulator”, der potentielt kan udføre beregninger, som ikke kan udføres på klassiske computere. Vi vil desuden forbinde kvantesystemer over store afstande og derved lave et “kvanteinternet”.

For at opskalere de eksperimentelle kvantesystemer vil vi fx prøve på at generere et netværk af atomer, hvor hvert atom er koblet til andre ved at udveksle netop én foton ad gangen. Kan man dette, opnås en række nye muligheder inden for kvantecomputing og kvantekommunikation. Det er et forskningsfelt i en rivende udvikling, og netop nu begynder mange års fundamental grundforskning at lede til nye anvendelser.

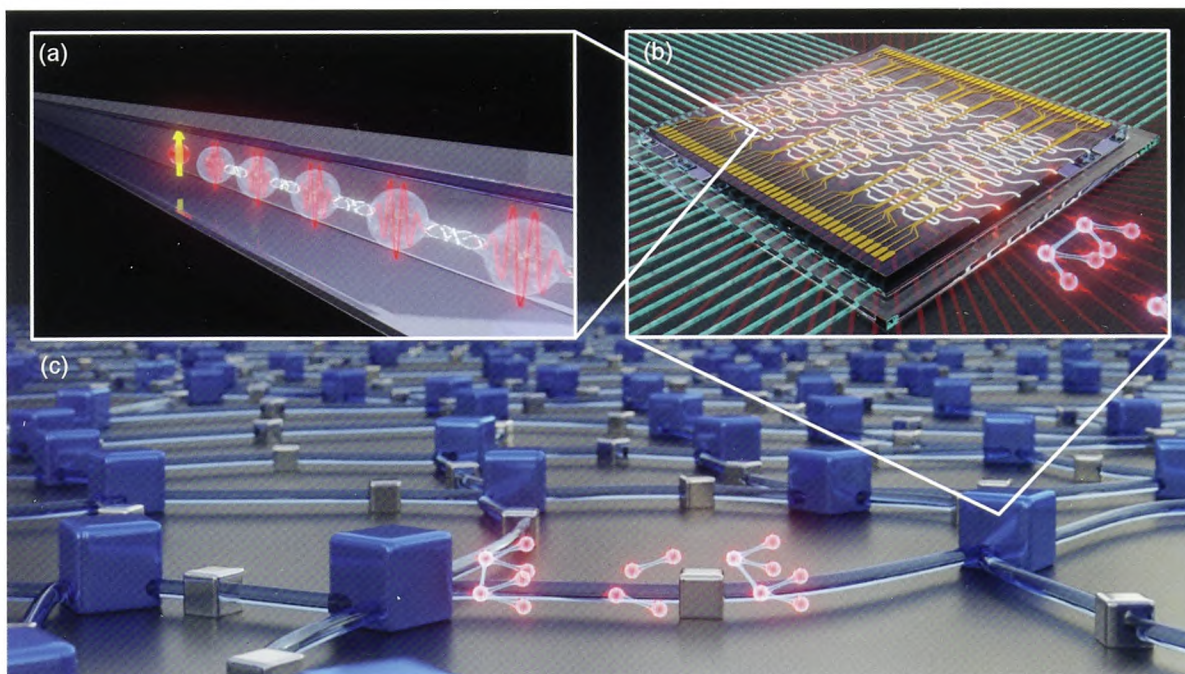
Hybride kvantesystemer

En af de mest lovende udviklinger sker ved at danne hybrider mellem forskellige kvantesystemer, og Hy-Q er førende indenfor denne tilgang.

Centret er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond og har som ultimativt mål at gøre et kvanteinternet muligt. De forskellige teknologiske platforme har alle fordele og ulemper, men ved at koble dem og danne hybrider kan vi udnytte det bedste fra hver. Eller så at sige opnå det bedste fra hver verden. Blandt de forskellige kvanteplatforme, Hy-Q forsker i, er fotoner (lyskvanter), atomer og fononer (mekaniske lydkvanter), og det er allerede nu muligt at koble disse systemer.

Samarbejde med industri om transformative kvanteteknologier

De kvanteteknologier, der udvikles netop nu, beror på det samme fysiske grundlag, nemlig kvantemekanisk



Figur 1. (a) Illustration af en deterministisk en-foton-kilde udviklet i Hy-Q: En-foton-bølgepakker sendes ud fra et atom og bevæger sig i en nano-lysleder. (b) En-foton-kilde indlejret i en komponent som led i opskaleringen til at generere sammenfiltrede fotoner. (c) Illustration af et komplekst kvantenetværk, hvor information udveksles via sammenfiltrede fotontilstande. Figur fra [2].

sammenfiltrering, men udnytter mulighederne forskelligt. Karakteristisk for udviklingen er, at den i høj grad sker i samarbejde mellem universiteter og industri. For hvis vi skal realisere eksempelvis et kvanteinternet, der gør det muligt at kommunikere verden rundt via sammenfiltrede kvantetilstande, så kræver det både massive investeringer og øje for, hvordan den nye teknologi kan modnes og implementeres.

Vi kan på universitetet skabe fundamentet for en ny teknologi og vise dennes muligheder. De næste skridt med at opskalere teknologien kræver et større samarbejde mellem akademiske og industrielle partnere. Vi arbejder derfor aktivt på at etablere et internationalt konsortium, der kan bringe universiteter og industri tættere sammen.

Nye talenter og opgradering af eksisterende

For at Danmark kan få mest muligt udbytte af den kommende kvanterevolution, er det afgørende, at der er tilstrækkeligt mange veluddannede unge talenter, der har den fornødne indsigt til at udvikle og arbejde med de nye kvanteteknologier; eller med andre ord, at vi har en kvanteklar arbejdsstyrke.

Danmark er (i forhold til vores størrelse) verdensmestre i at uddanne kandidater med stærke kompetencer inden for kvantemekanik [1]. Det er i høj grad disse nye talenter, der driver udviklingen fremad i deres dedikerede arbejde i forskningslaboratorierne. Men med de mange muligheder, som nye kvanteteknologier åbner, er det ikke tilstrækkeligt at uddanne en lille gruppe højt specialiserede studerende, der kan udvikle fundamentet for de nye kvanteteknologier. Der er samtidig et behov for at skabe en bred forståelse for de nye kvanteteknologiers muligheder, særligt i danske virksomheder, men også blandt kommende brugere.

Nedenfor giver vi eksempler på mulige tiltag gen-

nem uddannelsessystemet, fra gymnasiet over universitetet til efter- og videreuddannelse, som vi mener kan have afgørende betydning for, at Danmark får mest mulig nytte af den kommende kvanterevolution.

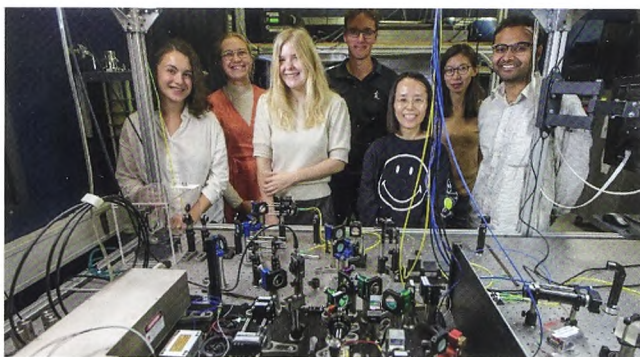
Gymnasiet

I gymnasiet er kvantefysik en central søjle i læreplanernes kernestof, både på A- og B-niveau i fysik [3]. Pensum dækker bredt fra atomers og atomkerners opbygning over fotoners energi, atomare systemers emission og absorption af stråling, til radioaktivitet. Selv partikelbølge-dualitet er inkluderet på A-niveau, så kvantefysik er solidt repræsenteret.

Det er her, at fundamentet for Danmarks verdensførende position inden for kvanteuddannelse skabes. For at sikre, at dette fundament er up to date, kunne man overveje at udvide kvantefysikkens omfang i gymnasiet eller at ændre fokus i læreplanerne. Kvanterevolutionen vil potentielt komme til at betyde lige så meget for vores hverdag, som kernefysikken gjorde under den kolde krig. Det er derfor oplagt at overveje, om det er muligt også at give eleverne indsigt i sammenfiltrede kvantetilstande.

Vi har meget positive erfaringer med at undervise i kvantemekanisk sammenfiltrering på gymnasiet niveau, og emnet vækker naturligt elevernes nysgerrighed og fascination. Det træner samtidigt elevernes forståelse af sandsynlighedsregning. Vores erfaring er, at det er lige så let for elever at lære at arbejde med to koblede spin-1/2-partikler og målepostulatet, som det er at lære at spille Uno.

Pointen er, at det på en vis måde er blevet simplere at undervise kvantemekanik nu, fordi vi nu arbejder med enkelte tilstande, og hvordan de interagerer med andre tilstande.



Figur 2. Den vigtigste ressource i kvanterevolutionen: De unge nye talenter. Billedet viser teamet, som har udviklet en verdensførende en-foton-lyskilde i Hy-Q på Niels Bohr Institutet. Foto: Ola J. Joensen.

Universitet

Udviklingen af frontforskningen i nye kvanteteknologier ligger i høj grad i krydsfeltet mellem fysik, matematik og datalogi. Derfor er det en stor fordel at have en god forståelse for, hvordan fysikere, matematikere og dataloger hver især bidrager i arbejdet med at udvikle nye kvanteteknologier.

For at sikre en "kvanteklar" arbejdsstyrke, der kan udnytte og udvide de muligheder, den nye teknologi giver for at skabe værdi i samfundet, arbejder Københavns Universitet og DTU netop nu på at etablere en ny kandidatuddannelse i Quantum Information Science. Uddannelsen er designet netop til at ligge i krydsfeltet mellem fysik, matematik og datalogi, og ambitionen er at tiltrække talenter, der vil arbejde tværfagligt og har øje for innovation.

En sådan uddannelse er afgørende, hvis Danmark skal være konkurrencedygtig i den internationale dyst om at udvikle og udnytte den teknologiske kvanterevolution.

Efter- og videreuddannelse

Den teknologiske kvanterevolution vil ikke blot øge efterspørgslen af talenter; den vil også kræve massiv efteruddannelse. Udviklingen går så hurtigt, at den teknologiske verden vil ændre sig flere gange i løbet af et arbejdsliv. Derfor har Niels Bohr Institutet og KPMG etableret et samarbejde om kurser i nye kvanteteknologier for erfarne teknologiekspertter. Kurserne giver indsigt i de nye muligheder, kvanteteknologier åbner, så deltagerne kan vurdere, hvilke af de nye teknologier, der er mest relevante for udviklingen af deres virksomheder.

Opsummering

Verden er på tærsklen til en ny kvanterevolution, og Danmark spiller en særdeles aktiv rolle heri. Vi har i Danmark bl.a. udviklet de redskaber, der gør det muligt at bygge en kvantesimulator, der kan udføre

beregninger, der er umulige på en klassisk computer eller at konstruere et kvanteinternet, hvor information kan sendes, uden det er muligt for andre at læse den. Disse gennembrud er det første skridt ind i en ukendt del af kvanteverdenen.¹

Litteratur

- [1] Economic impact of Quantum in The Netherlands, Quantum Delta, Nederland, 18. maj 2020 (opdateret 28. juli 2020).
- [2] R. Uppu, L. Midolo, X. Zhou, J. Carolan og P. Lodahl (2021) Single-photon quantum hardware: towards scalable photonic quantum technology with a quantum advantage, arXiv:2103.01110.
- [3] <https://www.uvm.dk/gymnasiale-uddannelser/fag-og-laereplaner/laereplaner-2017/stx-laereplaner-2017>



Peter Lodahl er professor i kvantefysik og -teknologi ved Niels Bohr Institutet. Han er direktør for Hy-Q og Novo Nordisk Fondens Center for Solid State Quantum Simulators. Han er ph.d. i kvantefysik (2000) fra Københavns Universitet og har været post.doc. ved Caltech og University of Twente.



Kim Splittorff er lektor på N. Zahles Gymnasieskole og på Niels Bohr Institutet. Han arbejder med teoretisk fysik og har været viceinstituttleder for undervisning på Niels Bohr Institutet. Netop nu er han ved at integrere IBMs eksisterende kvantecomputer i undervisningen på Niels Bohr Institutet.



Anders S. Sørensen er professor i teoretisk kvanteoptik. Han laver teorier for, hvorledes man kan realisere kvanteteknologier i praksis. Hans teorier bliver brugt i nogle af de mest avancerede kvantecomputere i verden. Desuden er han ansvarlig for Niels Bohr Institutets efteruddannelse i samarbejde med KPMG.

¹Det er en fornøjelse at takke alle kollegaer og studerende på universiteter og gymnasier for deres store interesse og entusiasme for kvanteteknologier. Det er i dag, som på Niels Bohrs tid, gennem diskussioner og forsøg på at svare på spørgsmål, at vi bedst kan forsøge at få indblik i kvantemekanikkens verden. Også tak til Niels Bohr Institutet og til Danmarks Grundforskningsfond for den store opbakning og støtte til udviklingen af nye kvanteteknologier i Centeret for Hybrid Quantum Networks.

Arven fra Niels Bohr

Thomas Grønlund Nielsen

I coronaåret 2020 lykkedes det de to københavnske atomkraftstartups, Copenhagen Atomics og Seaborg Technologies, at tiltrække sammenlagt et trecifret millionbeløb i private investeringer. Herved bliver de nu i stand til at etablere laboratorier til videre udvikling af en speciel type smeltet salt-reaktor, hvis sikkerhed mod radioaktivt udslip nærmest bliver givet ved naturlovene. Kan Niels Bohrs drøm om ufarlig atomenergi for folket endelig blive til virkelighed? Denne artikel ser nærmere på den nye virkelighed for udvikling af atomkraft i Danmark.

Jeg husker en studiekammerat på Ørsted Laboratoriet, på Københavns Universitet, som havde landets bedste studentereksamen målt på karaktergennemsnittet. På grund af interesse valgte han at studere fysik, selvom der her var adgang for alle. En del år efter at vi var færdiguddannede, ringede jeg til ham og spurgte, hvad han brugte sit talent til. Han fortalte mig, at han arbejdede for en investeringsbank med at sammensætte strukturerede investeringsprodukter – med andre ord “private banking” for velhavere. Jeg spurgte ham ikke om, hvor meget han tjente – ikke fordi jeg var bange for at blive misundelig, det virkede bare ikke rigtig relevant. Begejstret virkede han i hvert fald ikke, og samtalen efterlod mig temmelig desillusioneret på mit fags vegne.

For elitestudenten er bare toppen af isbjerget – flere andre af mine meget dygtige studiefæller arbejder i dag i finansbranchen. Men hvorfor sætter vi ikke vore bedste hjerner til at skabe løsninger, der kommer de mange og ikke blot de få til gode? Hvorfor ikke sætte dem til at udvikle næste generation af atomkraft sikret mod Fukushima-lignende ulykker? Hvad ville være mere naturligt, hvis vi for alvor bekymrer os om den globale opvarmning? Sådan spurgte jeg for et par år siden i en kronik [1], og siden er mine spørgsmål blevet imødekommet og for ganske nylig også efterlysningerne.

Med Bestsellerejeren Anders Holch Povlsens investering i Seaborg Technologies [2], er Danmarks rigeste mand gået ind i atomkraft, og hermed er Niels Bohrs drøm genoplivet efter lang tids dvale i Danmark. Det er desværre gået lidt i glemmebogen, at Niels Bohr efter 2. verdenskrig og atombomben var en utrættelig forkæmper og fortaler for atomkraft, dvs. den fredelige brug af atomkerneenergien. Han modtog som den første “Atoms for Peace”-prisen i 1957, som med tilskud fra Ford Motor Company var blevet oprettet af daværende præsident Eisenhower. Når byggeriet samme år begyndte på Risø-atomforsøgsstation, skyldtes det også Niels Bohr og “Atoms for Peace”-ånden. Det blev med tydelig dansk islæt. For hvad enten Niels Bohr opbygger sit “Institut for Teoretisk Fysik” og danner rammen for “Der Kopenhagener Geist”, eller han på samme institut arbejder med anvendt fysik og sammen med George de Hevesy grundlægger begrebet nuklearmedicin, så personificerer han de danske dyder: Uhøjtidelighed, pragmatisme og jordbundethed. Da Risøstationen indvies med sine skinnende reaktortårne,

skal det ikke blot fremme forskning inden for anvendt atomfysik på energi- og medicinområdet. Også dansk landbrugsteknologi i form af fx strålebehandling af mad skal fremmes – Bohr er ikke for ophøjet til at erkende sit lands ophav som bondesamfund. Men navnlig er det hans ønske, at Risø kan blive hjemsted for nye kreative fysikere og ingeniører, der både kan bruge hoved og hænder, og ikke er tynget af at skulle være noget specielt andet end til menneskehedens fremme.

De nye danske atomiværksættere ved Seaborg Technologies og Copenhagen Atomics [3,4] har nu fået en chance for at bygge videre på Niels Bohrs pionerarbejde. Det var sådan en chance, som Risø Atomforsøgsstation fik i 1960’erne, og selvom man gjorde store videnskabelige landvindinger, nåede man ikke i mål med at realisere Bohrs drøm om at skaffe danskerne billig og stabil energi gennem atomkraft. Det var der flere grunde til, at de ikke gjorde, og den endegyldige var den politiske og folkelige modstand, der op gennem 1970’erne blev en overmægtig modstander. Men man må nok også indrømme, at forsøgsstationen i de gode 1960’ere (hvor det føltes som om, at der var masser af tid) ikke fik eksekveret hurtigt nok. Måske manglede den offentlige institution den beslutsomhed og “sense of urgency” mod industrialisering af atomkraft, som man så på den anden side af Øresund. Svenskerne havde ikke nogen, der kom i nærheden af Niels Bohr inden for atomfysik. Men de havde til gengæld en energihungrig sværindustri og fremfor alt nogle folk, der kunne eksekvere på at få store ting til at ske i industrien. Således blev det trods alle gode forudsætninger ikke Niels Bohrs fædreland, der fik bygget atomkraftværker, men Sverige. Risøs svenske pendant, Studsvik, er i dag en børsnoteret virksomhed, som er førende i verden inden for behandling af radioaktivt affald.

Med tanke på at få mere til at ske med hensyn til atomkraft i Danmark, er det derfor også en god nyhed, at Seaborg har fået Bestsellerejeren ombord. Han ved noget om storstilet produktion og faldgruberne her. Med ham rykker dansk reaktordesign tættere på containeren. Nu skal pengene sættes i at få et stort laboratorium op at køre. Der skal laves kemiske test i stor skala og under høje temperaturer. Der skal laves stålkonstruktioner, som skal testes for korrosion og elektromekaniske egenskaber. Over 50 specialister inden for området skal hyres og indarbejdes. Men der er naturligvis langt til målet endnu. For at vurdere, hvad der sker på feltet i Danmark lige nu, og hvad der

skal komme til at ske for at komme i mål, vil vi først gå mere i dybden med, hvordan en atomkernereaktor fungerer og de udviklingstrin (generationer), den har været igennem.

Safety-by-physics

Safety-by-physics er et afgørende nyt princip, der går ud på, at man opnår en sikkerhed mod radioaktive udslip, som ikke afhænger af menneskelig indgriben. Det vil sige, at der ikke kræves elektriske pumper, afkøling osv., og dermed kræves der ikke elektricitet for at opretholde sikkerheden. Sikkerheden ligger i de fysiske og kemiske love, der aldrig svigter – tyngdekrafter, smeltepunkter, kemiske reaktioner etc. behøver ikke menneskelig indgriben for at virke. Det kaldes passive sikkerhedssystemer eller “safety-by-physics” modsat aktive sikkerhedssystemer eller “safety-by-engineering”. Da første generation- og anden generation-(2G)-reaktorerne blev designet i 1950’erne og 1960’erne, var sikkerhed i reaktorer ikke det altoverskyggende tema, som det har været siden Tremileulykken i 1979. Efter denne kom aktive sikkerhedssystemer på som en slags overbygning på det gamle design, hvilket var og blev en lappeløsning. Med tredje generation-reaktorer (der bygges i dag) forsøger man så vidt muligt at få “safety-by-physics” ind ved at gøre brug af konvektion og tyngdekraft, så der ikke behøves pumper til at undgå nedsmeltning. Men først med fjerde generation-(4G)-reaktorer (der udvikles i dag, bl.a. i Danmark) er den passive sikkerhed tænkt ind helt fra start. Først i det seneste årti, hvor atomkraft igen er ved at erobre scenen, har man visket tavlen helt ren og erkendt, at man må starte med helt nyt reaktordesign for at sætte den udbredte atomkraftskræk på plads en gang for alle.

Mendelejevs mosaik

Den spaltning af en uranatomkerne, der sker i en atomreaktor, kan optræde i et væld af forskellige varianter. De har dog alle det til fælles, at man får netop to mindre atomkerner ud af spaltningen, som aldrig er lige store. Modsat ved kløvning af et stykke brænde, er kløvningen således altid asymmetrisk – den giver et større og et mindre stykke. Det store stykke er typisk $\frac{1}{2}$ gang større end det lille, dvs. $\frac{3}{5}$ af det oprindelige stykke, hvor det lille er $\frac{2}{5}$. Årsagen til dette ligger i kvantemekanikken, og det rækker for vidt at komme ind på her. Når man ser på de mange forskellige varianter, altså de mange forskellige atomkerner (isotoper), der kan komme ud af en kløvning af en urankerne, er der således to toppe. Det vil sige, at når man ordner dem efter størrelse angivet i det antal partikler (nukleoner), som kernen består af, ligger langt de fleste i to klynger, nemlig med enten 90–100 nukleoner eller 130–145 nukleoner (spalteligt uran består af 235 nukleoner). Større og mindre kerner kan også forekomme, men jo længere væk fra disse intervaller, des sjældnere. Det er altså meget usandsynligt, at kløvningen munder ud i, at det store stykke er to eller tre gange større end det lille.

De mange varianter giver en uhyre mangfoldig mosaik af nye kunstige isotoper i fysikkens verden

– langt mere mangfoldig end Mendelejevs periodiske system i kemiens verden. Særlig mange af disse nye atomkerner er højst gavnlige til brug i navnlig hospitalsvæsenet. Da de er radioaktive, kan de bruges til alskens diagnoser og til kræft- og strålebehandling. Atter andre kan bruges industrielt i detektorer og sensorer og i rumfart og -forskning osv. Man kunne skrive en hel bog om epokegørende anvendelser for radioisotoper. Men det hører unægtelig også med til historien, at enkelte af disse radioisotoper er ret farlige for os, hvis de slipper ud i gadebilledet i større mængder. Heri ligger kilden til den delvist berettigede frygt for ulykker på et atomkraftværk. Men heldigvis er det ingeniøret et uløseligt problem.

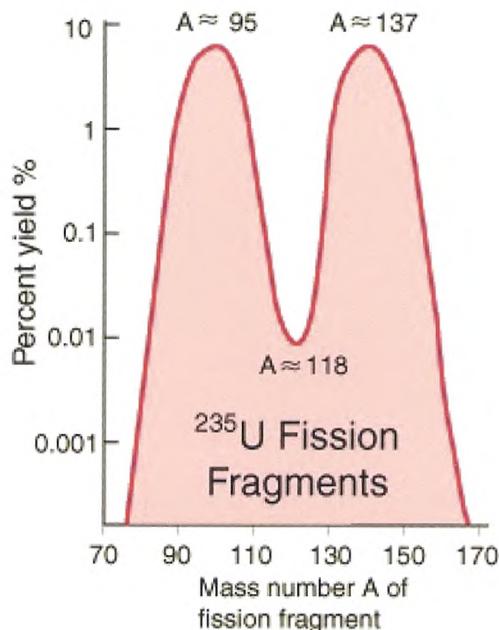


Figure 1. Fordelingen af fragmenter efter spaltning af uran-235.

Saltet binder det radioaktive affald

Tilfældet har nemlig villet det, at de mest udbredte og problematiske fissionsprodukter fra en atomreaktor (det som populært kaldes “affaldet”), nemlig jod, cæsium og strontium, også ligger i hovedgruppe 1, 2 og 7 i Mendelejevs periodiske system. Disse grupper dækker over stoffer, som er kemisk meget reaktive. Tag for eksempel almindeligt salt, som har den kemiske betegnelse natriumklorid, fordi det er sammensat af grundstofferne natrium og klor, der ligger henholdsvis i hovedgruppe 1 og 7. Salt er som bekendt både meget opløseligt i vand og meget aggressivt med hensyn til at få metaller til at ruste osv. – kort sagt, meget kemisk aktivt. Forskellige former for flydende salt er et af de foretrukne materialer i 4G-reaktorer (der er også en del 4G-designs, der baserer sig på flydende metal). Det er helt forskelligt fra konventionelle 2G- og 3G-reaktorer, der bruger vand og metaller i fast form.

Da saltet har højt kogepunkt, har de, modsat vand, ikke tendens til at fordampe ved den høje temperatur, der er i en reaktor. Der behøves altså ikke overtryk inde i reaktoren for at undgå fordampning. Det er en stor fordel i tilfælde af en ulykke, hvor reaktoren springer

læk, for da vil et overtryk derinde presse radioaktive gasser ud i omgivelserne. Det kan meget bedre undgås med en flydende saltreaktor. Men det virkeligt springende punkt med saltet her er, at det nemt binder sig kemisk til andre stoffer i hovedgruppe 1,2 og 7 – altså til de problematiske fissionsprodukter, der således bliver bundet i saltet, og derved holder sig inde i reaktoren, eller under en ulykke løber ned i underjordiske “dump tanks”, hvor det med tiden afkøles og størkner.

Metal / Hovedgruppe 7	Fluorid	Klorid	Jodid
Brint	O	O	O
Litium	so	O	O
Natrium	O	O	O
Cæsium	O	O	O
Strontium	so	O	O
Barium	so	O	O
Sølv	O	I	I

Tabel 1. “O” står for opløselig, “I” for ikke-opløselig og “so” for svært opløselig. Kilde: National Institute of Standards and Technology.

Valg af 4G-reaktormaterialer

Selvom salte som nævnt generelt er meget opløselige i vand, er der gradsforskelle. I tabel 1 ses en oversigt over forskellige saltes opløselighed i vand. De tre søjler er hver af ikke-metallerne i hovedgruppe 7, dvs. grundstofferne fluor, klor og jod. Hver række angiver altså for et metal i hovedgruppe 1 eller 2, hvor opløseligt det salt er, som består af metallet i en ionbinding med hhv. fluor, klor og jod. Et salt binder naturligvis bedre, jo mindre opløseligt i vand det er. Som beskrevet af Aslak Stubsgaard [5], er fluoridsalte bedst egnede til en flydende brændselsreaktor, i hvert fald for en som bruger termiske (langsomme) neutroner. Som det fremgår af tabellen, har netop fluoridsalte også de bedste egenskaber mht. til opløselighed, specielt for litium, strontium og barium. Netop strontium og barium er typiske fissionsprodukter og kritiske ved en reaktorylücke, så det er en fordel at få bundet dem i saltet. Også litium er et udbredt stof i saltsmeltereaktorer. Af tabellen ses desuden, at det allermest kritiske radioaktive stof ved en ulykke, nemlig jod, kan bindes uopløseligt til sølv, som også er et hyppigt fissionsprodukt. Jod er specielt kritisk, fordi det i en konventionel reaktor er på gasform og derfor ved en ulykke let kan slippe ud til omgivelserne. Her optages det af mennesker i skjoldbruskkirtlen, hvor den højt radioaktive isotop jod-131 derefter har frit spil til at beskadige væv. Men den proces kan altså bremses i en saltsmeltereaktor, som kan binde joden kemisk, så den har svært ved at undslippe reaktoren.

Ved udvælgelse af hvilke salte, der skal være i reaktoren, er deres smelte- og kogepunkter også vigtige at tage i betragtning. En atomreaktor opererer som regel ved temperaturer mellem 400 og 700 °C, saltsmeltereaktorer i den høje ende. Så det rette salts smeltepunkt skal ligge betydeligt under 6-700 °C, og dets kogepunkt betydeligt over 6-700 °C. Fluoridsalte med tungmetaller som uran, plutonium eller thorium

(som jo er brændslerne i en reaktor) har for høje smeltepunkter, men i en saltblanding med litiumfluorid og berylliumfluorid kan dette sænkes. På samme måde kan man med de rette saltblandinger opnå optimale egenskaber mht. lille vandopløselighed, lille korrosion og høj optagelse af (dvs. høj opløselighed mht.) farlige radioaktive stoffer som jod, cæsium og strontium. Dette er en vigtig del af det, som udviklingsarbejdet hos Seaborg Technologies og Copenhagen Atomics drejer sig om.

Moderatoren

Seaborg har taget patent på sin egen moderator, der også er et salt, nemlig natriumhydroxid. I normale vandreaktorer bruges kølevandet også som moderator. En moderator skal bremse neutronerne inde i en reaktor. Dette er nødvendigt for, at neutronen bliver indfanget af en stor, tung kerne (uran eller plutonium), som den herefter kan spalte. Kædereaktionens princip er jo netop, at de to eller tre neutroner, som der kommer ud af en spaltet urankerne, hver især skal kunne spalte en ny urankerne. På grund af den enorme energi, der frigøres ved spaltning, kommer disse neutroner også ud med en enorm fart – i størrelsesordenen 1/10 af lysets hastighed. Men denne hastighed reduceres, efterhånden som neutronerne støder ind i andre atomkerner. Dette skal helst ske så hurtigt som muligt, for at neutronen kan blive klar til at spalte en ny urankerne. Til dette formål er det væsentligt, at neutronen støder ind i de rigtige atomkerner, så den effektivt kan komme af med sin energi. Pga. lovene om impuls- og energibevarelse sker dette bedst, når den støder ind i et atom med omtrent samme masse som sin egen, nemlig en proton eller brintkerne. Derfor er vandmolekyler (der består af to brintatomer) en god moderator, natriumhydroxid (med et brintatom) ligeså. Kunne man så ikke bare bruge ren brint som moderator? Her er ulempen, at dette er en gas (også ved højt tryk) med for lang afstand mellem atomerne, så neutronerne ville have for lille sandsynlighed for at ramme dem.

I det hele taget er gasser sjældent særlige heldige ingredienser i en reaktor. Så det duer heller ikke at bruge ædelgasen helium (nr. 2 = næst-letteste atomkerne) som moderator. Vand er egentlig heller ikke optimalt, fordi det også skal være under højt tryk i en reaktor for ikke at fordampe. Det er netop her, at saltet med det meget højere kogepunkt kommer ind. Det føromtalt beryllium kan også bruges som moderator, da det er et lille atom (nr. 4 i det periodiske system) med en masse sammenlignelig med en neutron. Beryllium er dog både et sjældent, dyrt og giftigt stof. Som moderator kan man derimod ikke bruge litium og bor (nr. 3 og 5 i det periodiske system), da begge har stærk tendens til at absorbere neutroner, hvilket jo bremser eller stopper kædereaktionen. Det næste stof i rækken, kulstof, er derimod meget effektivt som moderator, da det netop har meget lille tendens til at absorbere neutronen. Derfor anvendes normalt grafit som moderator i 4G-reaktorer, hvor vand er bandlyst.

Grafit har dog flere ulemper, nemlig at det er brændbart (hvilke var skæbnesvangert for Tjernobylulykken),

og at det degraderer, når det længe udsættes for stærk stråling. Tabel 2 herunder viser for de vigtigste grundstoffer i en reaktor, sandsynligheden for absorption af en langsom neutron. Som det fremgår, bruges isotoper med højt absorptionstværsnit i kontrolstænger, der jo er bremserne i en reaktor og netop skal absorbere neutroner, så antal fissioner sænkes. Fissionsproduktet xenon-135 har ekstremt høj tendens til at "sluge" neutroner og er derfor gift for en reaktor. (Xenonforgiftning var en medvirkende faktor til Tjernobylulykken. Da reaktoren blev sat til at yde en lavere effekt, forårsagede en kombination af operatørfejl og xenonforgiftning, at reaktorens termiske effekt næsten blev reduceret til nedlukningsniveauet. Bestræbelserne på at genoprette elproduktionen resulterende i, at reaktoren blev sat i en meget usikker konfiguration.)

	Isotop	Absorptionstværsnit (barn)
Moderator	H-1	0,2
	H-2	0,0003
	C-12	0,002
	Na-23	0,53
	O-16	0,0002
Kontrolstav	B-10	200
	Cd-113	30.000
	Xe-135	2.000.000
Brændsel	Th-232	7
	U-235	99
	U-238	2
	Pu-239	269

Tabel 2. 1 barn = 10^{-28} m² er en enhed for areal i atomernes mikroskopiske verden. Kilde: JEFF-3.1.1 library.

Som det fremgår af tabel 2, har både brint og ilt (og dermed vand) og natrium lavt tværsnit. De københavnske atomiværksættere er derfor landet på natriumhydroxid som moderator, og går altså hele vejen med saltet som både brændsel, kølemiddel og moderator i reaktoren. Herved går man efter kompromisløs sikkerhed mod radioaktive udslip. Sikkerhed gennem kemiske bindinger og undertryk i reaktoren – faktorer som ikke behøver menneskelig indgriben for at virke.

At få den menneskelige faktor med i atomkraft

4G-reaktorer handler altså om brugervenlighed og ikke om ydeevne. De handler om at komme angsten for atomkraft til livs. For det er atomkraftens største problem: at folk er så bange for den. Her har Danmark en vigtig rolle at spille i at kunne skabe små, fleksible atomkraftværker, som folk ikke behøver at være bange for. At få den menneskelige faktor taget med i design af atomkraft – det ville være kronen på værket, og den rette forvaltning af arven fra Niels Bohr.

Litteratur

- [1] T.G. Nielsen (2019) Atomkraft, ja tak, *Dagbladet Information*, kronik, 16. februar.
- [2] M. Kristensen og J. Olesen (2020) Bestseller-ejer satser på atomkraft: Kan komme til »at skrive historie«, *Finans.dk*, 25. november.
- [3] Seaborg Technologies, <https://www.seaborg.co/>
- [4] Copenhagen Atomics, <https://www.copenhagenatoms.com/>
- [5] A. Stubsgaard (2017) "Thorium eller: Hvordan jeg lærte at holde op med at bekymre mig og at elske saltsmeltereaktorer, *Kvant*, bind 28, nr. 2, side 7-12.



Thomas Grønlund Nielsen er cand.scient. i fysik fra Niels Bohr Institutet. Forfatter til bøgerne "Niels Bohr må vende sig i sin grav – om fornægtelsen af kernekraften" (2013) og "Den Grønne Atomkraft – Opgør med de farveblinde miljøforkæmpere" (2018).

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

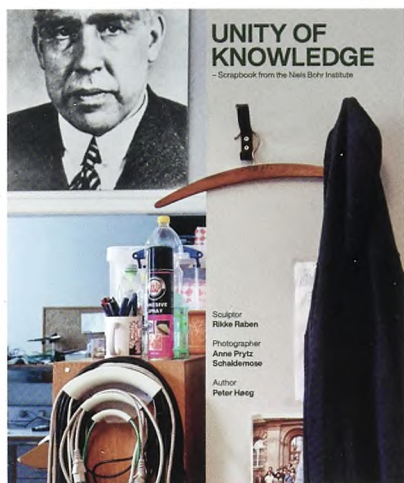
Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design



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

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, *Kvant*



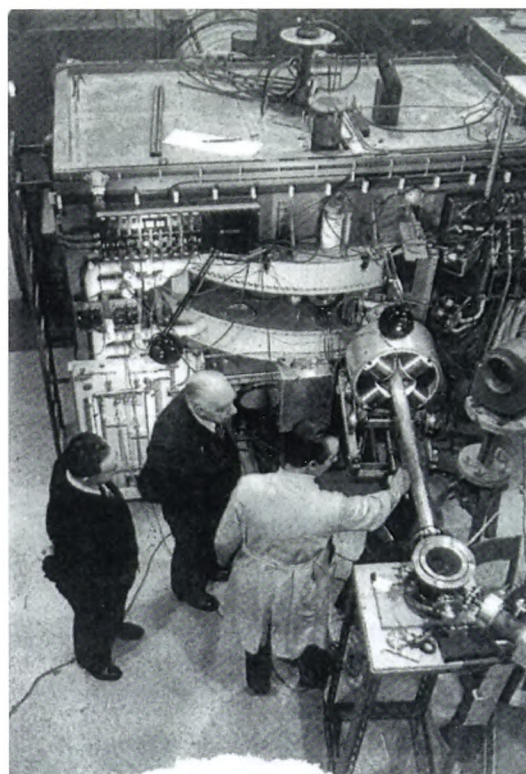
Rikke Raaben, Anne Prytz Schaldemose og Peter Høeg, "Unity of Knowledge – Scrapbook from the Niels Bohr Institute", 2020, The Niels Bohr Institute og Strandberg Publishing, 228 sider, 350 kr.

Denne scrapbog udkom i 2020 som led i markeringen af 100-året for Niels Bohr Institutet, som blev indviet i 1921, og som en kreativ billedokumentation af miljøet på instituttet før forskningen flytter til den nye Niels Bohr Bygning på Jagtvej.

Ideen opstod hos billedhuggeren Rikke Raaben, der er tilknyttet Niels Bohr Institutet som en huskunstner, og hun har blandt andet lavet det billedrelief, som findes ved indgangen til instituttet (gengivet på side 227). Sammen med instituttets ledelse inviterede hun fotografen Anne Prytz Schaldemose og forfatteren Peter Høeg til at beskrive instituttets miljø i billeder og ord. De tre kunstnere fik frie hænder til at gå rundt på instituttet og mærke stemningen og fotografere laboratorier, kontorer, tavler med formler og meget andet. De har også fundet masser af sort-hvide fotografier i Niels Bohr Arkivets samling af Niels Bohr og kolleger. Der er flere kollager af sort-hvide fotografier, hvor man fx ser Bohr sammen med Louis Armstrong. Billederne af laboratorier fyldt med ledninger, køletanke eller lasere, og med forskere, der forsøger at få eksperimenterne til at virke, giver en god fornemmelse af forskningsmiljøet.

Fotograferne har haft blik for sjove detaljer, som fx en tøjhund, der står på et måleapparat eller en forsker, der bider negle (side 54–55). Billederne gengives uden tekster, og nogle gange er der en overraskende sammenstilling fx af laboratorier fra fortiden og i dag (side 58–59). Meget har forandret sig, især forskernes tøj og apparaturet, men det er dybest set de samme aktiviteter, der udføres. Mange af de nye fotos afslører, at fotografen ikke har villet forstyrre personerne på billedet, og det er mindre interessant at se en person bagfra ind igennem en dør, hvis man ikke kan se, hvad personen laver (side 62). Der er heldigvis også billeder af folk med rodede skriveborde, hvor der står en kæmpe flaske champagne (side 75). Der er billeder fra

gangene, biblioteket, Niels Bohrs kontor, som nu bruges til mødelokale, Holger Bech Nielsens kontor, Bohr på motorcykel, madbuffet i kantinen, Bohr på frimærker og en 500-kroneseddel, og Bohr med familie i Carlsbergs Æresbolig.



Som den eneste bidragsyder har Peter Høeg skrevet et interessant essay på ni sider, der beskriver Niels Bohr Institutets betydning for samfundet og kvantefysikkens bidrag til vores beskrivelse af virkeligheden. Her nævnes den internationale dialog, der altid har været, også på tværs af jerntæppet under den kolde krig. Bohr var kendt for at hente dygtige unge forskere til instituttet og hjælpe dem til stillinger i udlandet bagefter. I 1920'erne under udviklingen af kvantemekanikken beskrives forskningsmiljøet på Bohrs institut som kreativt og ofte legende. Forskerne spillede blandt andet bordtennis, og brugte gerne bøgerne i biblioteket som bat, og der blev opført skuespil til ære for Niels Bohr på hans runde fødselsdage – en forløber for vore dages FysikRevy™. Bogen viser tegninger fra et af de festskrifter, der blev lavet i den anledning, hvor Bohr blev afbildet som Mickey Mouse (side 42–43). Dette uformelle, kreative miljø, der var præget af nysgerrighed og åbenhed findes stadig på instituttet, selv om det i dag er en hierarkisk styret professionel virksomhedskultur med et årligt budget på omkring 400 millioner kr., hvor cirka 70 % af midlerne skaffes fra fonde. Der skal med andre ord forskes, skrives artikler og fondsansøgninger.

Peter Høegs essay er bragt på både dansk og engelsk. Alt i alt er det en inspirerende bog, som dog er noget dyr.

Benzinforbrug og covidsmitte

– breddeopgave 91 og 92 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 forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var:

Breddeopgave 91 og 92. Benzinforbrug og covidsmitte

Hvordan afhænger benzinforbruget og CO₂-udledningen ved bilkørsel per kørt kilometer af hastigheden, der køres med? Begrund svaret.

I lukkede rum er der fare for at blive smittet med coronavirus, selvom der holdes afstand, hvis ikke der luftes ud. Det skyldes, at mikrodråber (aerosoler) af virussen hænger i længere tid i luften, og derfor kan bevæges længere rundt, end de større dråber, som undgås ved at holde afstand. Hvordan afhænger den tid, som mikrodråberne hænger i luften, af deres størrelse? Begrund svaret.

Løsning

91. Energien fra forbrænding af benzin i en bils benzinmotor går til spildvarme og arbejde, som motoren udfører på bilens hjul. Benzinforbruget og CO₂-udledningen per kørt kilometer afhænger af det leverede arbejde af bilens motor per kørt kilometer. Når bilen har kørt et stykke vej, er dette arbejde det samme som gnidningskraften fra vejen på bilens dæk gange længden af stykket. Antager vi, at benzinmotorens nyttevirkning er uafhængig af bilens hastighed, er benzinforbruget og CO₂-udledningen per kørt kilometer derfor proportional med størrelsen af gnidningskraften mellem vej og dæk.

Ved almindelig bilkørsel med konstant hastighed på vandret vej er gnidningskraften fra vejen på bilens dæk og luftmodstanden imod bilens bevægelse modsatrettede og lige store. På grund af størrelsen af biler og størrelsen af typiske kørehastigheder vil vi antage, at energioverførslen til luften omkring en bil via luftmodstanden umiddelbart sker i form af et hvirvlende kølvand i luften, altså at arbejdet leveret af bilens motor omsættes til makroskopisk kinetisk energi i luften. I så tilfælde spiller luftens viskositet kun en rolle for, hvor hurtigt hvirvlerne, efter de er dannet, siden nedbrydes til varme, og ikke for størrelsen af energien i luften og derved luftmodstanden. Udover af bilens størrelse r og dens hastighed v afhænger luftmodstanden da kun af luftens massefylde ρ . Af dimensionsgrunde er

luftmodstanden, og dermed gnidningskraften mellem vej og dæk, så givet ved en talfaktor gange $\rho r^2 v^2$. Gnidningskraften mellem vej og dæk, og dermed benzinforbruget og CO₂-udledningen per kørt kilometer, er derfor proportionale med kørehastigheden kvadreret.

92. Ser vi på et lodret fald af en dråbe, vil dens hastighed stige, indtil luftmodstanden imod dråbens bevægelse er vokset til at være lige så stor som den modsatrettede tyngdekraft på dråben. For en mikrodråbe sker det hurtigt, hvorefter dråben vil bevæge sig med en konstant hastighed bestemt af, at luftmodstand og tyngdekraft ophæver hinanden. Da dråben er meget lille, antager vi, at luftmodstanden imod dens fald hænger sammen med, at dens gradvise tab af potentiel energi går til varmeudvikling i laminar strømning omkring den. Luftmodstanden skyldes gnidning i luften. Det makroskopiske strømningsmønster omkring dråben er konstant det samme. Vi antager derfor, at luftmodstanden udover af dråbens størrelse r og dens faldhastighed v er bestemt af luftens viskositet η og ikke afhænger af luftens massefylde. Af dimensionsgrunde er luftmodstanden da givet ved en talfaktor gange $\eta r v$. Med talfaktoren 6π (i overensstemmelse med Stokes' lov for en kugleformet dråbe), m for en dråbes masse, og g for tyngdefeltstyrken, er balanceligningen mellem luftmodstanden og tyngdekraften på en dråbe da:

$$6\pi\eta r v = mg. \quad (1)$$

Mikrodråberne består i det væsentlige af vand med massefylden ρ_v , således at $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v$. Altså har vi

$$v = \frac{2}{9} r^2 \rho_v \frac{g}{\eta} \quad (2)$$

for en dråbes faldhastighed. Tiden τ , som dråben er om at falde højden h , er derfor:

$$\tau = \frac{9\eta h}{2r^2 \rho_v g} \quad (3)$$

Svaret på opgaven er altså, at tiden, som det tager mikrodråber at falde til jorden, er omvendt proportional med dråbernes størrelse kvadreret.

Kommentar

På RUC er halvdelen af studietiden optaget af projektarbejde. Mængden af obligatorisk kursuspensum er begrænset. Fx er der ikke på fysikuddannelsen afsat tid til

et kursus specielt i hydrodynamik/aerodynamik. Emnet behandles, hvis ikke det tages op i et projektarbejde eller et tilvalgskursus, alene som en mindre del af de to kurser i fysisk problemløsning (breddekurset). I alt med sammenlagt 8 skematimer. Vi giver ikke nogen matematikbåren introduktion svarende til traditionen. I stedet introducerer vi mere kvalitativt til emnet med fokus på ved dimensionsanalyse at løse problemer, som de to ovenstående [1].

Om luften strømmer jævnt og laminart eller hvirvlende og turbulent omkring en genstand i en luftstrøm må i almindelighed afhænge af luftens massefylde ρ , luftens viskositet η , genstandens størrelse r , genstandens form, og den relative hastighed v imellem genstanden og luftstrømmen. Luftmodstanden må således umiddelbart være en funktion af de 4 størrelser ρ, η, r og v , udover dimensionsløse størrelser til karakterisering af genstandens form. Imidlertid viser dimensionsanalyse, at strømningsmåden kan karakteriseres alene ved genstandens form og værdien af det dimensionsløse *Reynoldstal*:

$$Re = \rho r v / \eta. \quad (4)$$

For en given form behøver man derfor ikke måle luftmodstanden som funktion af ρ, η, r og v efter tur og i en uoverskuelig mængde indbyrdes kombinationer. I stedet kan man nøjes med at måle luftmodstanden for forskelligt formede genstande som funktion alene af Reynoldstallet. Erfaringen viser da, at luften strømmer jævnt og laminart omkring en kugle, hvis størrelsesordenen af Reynoldstallet er mindre end 1. Og helt hvirvlende og turbulent omkring ikke specielt strømlignede genstande, hvis størrelsesordenen af Reynoldstal er større end 10^6 . Stemmer disse erfaringer med de to forskellige antagelser om strømningsmønstre ved løsningen af de to opgaver?

Med værdierne $0,66 \cdot 10^5 \text{ s/m}^2$ for ρ/η af luft ved stuetemperatur, $r = 1 \text{ m}$ og $v = 100 \text{ km/time} = 28 \text{ m/s}$, fås $Re = 2 \cdot 10^6$ vedrørende opgaven om benzinforbrug og CO_2 -udledning ved bilkørsel. Altså en retfærdiggørelse af antagelsen om, at luftmodstanden imod bilen skyldes, at arbejdet, bilmotoren udfører, hænger sammen med den skabte energi i et hvirvlende og turbulent kølvand i luften efter bilen frem for umiddelbar gnidningsopvarmning af luften.

Indsættes værdierne $r = 0,005 \text{ mm}$, $\rho_v = 1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, og $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ for viskositeten af luft ved stuetemperatur, i formel (2), fås $v = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ for faldhastigheden i luft af en $0,005 \text{ mm}$ stor mikrodråbe. Det betyder, at et fald på 2 m tager $\tau \approx 10$ minutter. Medens en 5 gange mindre dråbe, jævnfør ligning (3), vil holde sig svævende 25 gange længere tid, dvs. omkring 4 timer. Hvorimod en 5 gange større dråbe vil holde sig svævende omkring et halvt minut. Til sammenligning er $\tau = \sqrt{2h/g} = \sqrt{2 \cdot 2/10} \text{ s} = 0,6 \text{ s}$ for faldtiden ved store dråbers frie fald. Den traditionelle skæring for, hvad der regnes for mikrodråber, er $r < 0,005 \text{ mm}$. Altså svarende til, at dråberne hænger i luften i længere tid end netop 10 minutter.

Med værdierne $0,66 \cdot 10^5 \text{ s/m}^2$ for ρ/η af luft ved stuetemperatur, $r = 0,005 \text{ mm}$, og den fundne

faldhastighed $v = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, fås $Re = 10^{-3}$ vedrørende covidsmitte-opgaven. Antagelsen om, at luftstrømningen omkring en mikrodråbe er laminar, svarende til, at luftmodstanden hænger sammen med den gradvise overførsel af dråbens potentielle energi til gnidningsvarme i luften, og ikke til makroskopisk kinetisk energi i luften, kan altså også godtages.

Da de studerende, ud over papir og kuglepen, til eksamen som hjælpemiddel kun må medbringe et A4-ark beskrevet på begge sider efter eget valg, havde de ikke ved eksamen mulighed for at foretage disse kontroller af rimeligheden af grundantagelserne om strømningsmønstrene i de to tilfælde. De har måttet bero mere intuitivt på erfaringer fra lignende problemløsninger, og de blev bedømt herefter.

Hvordan skal man angribe problemer med Reynoldstal, der ikke er i ydergrænserne $Re < 1$ og $Re > 10^6$? Det er et emne, der beskæftiger mange, da det er vanskeligt at overskue, fordi den grundlæggende differentiaalligning er ulineær. Men det bør ikke skygge for, at mange situationer kan forstås simpelt, når Reynoldstallet befinder sig i en af ydergrænserne.

Ved små Reynoldstal kan der undertiden gennemføres matematisk analytiske beregninger, som fx udregningen af Stokes' lov for modstanden imod bevægelsen af en kugle, jf. ligning (1). I almindelighed er matematisk analytiske beregninger af luftmodstand komplicerede for genstande med andre former. Dimensionsanalyse viser da under alle omstændigheder, at luftmodstanden er givet ved en ukendt talfaktor gange $\eta \rho r$. Heraf følger fx opgavesvaret, at faldtiden for mikrodråberne er omvendt proportional med deres størrelse i anden potens. Men den ukendte talfaktor skal kendes, hvis udfordringen er at finde en nøjagtig kvantitativ værdi af faldtiden for en dråbe. Dog kan dimensionsanalytisk udledte resultater være til hjælp ved vurdering af størrelsesordener, da de ukendte talfaktorer i fysiske formler størrelsesordensmæssigt normalt ligger i intervallet mellem 10^{-1} og 10 . En afvigelse af mikrodråbernes form fra at være kugleformede svarende til talfaktoren 6π i ligning (1) ændrer ikke afgørende ved den ovenstående vurdering af den størrelsesordensmæssige konsistens mellem laminar strømning og størrelsen af Reynoldstallet.

Der er ikke tradition i lærebogslitteraturen for ingeniører og fysikere for at begrunde hastighedskvadratisk luftmodstand ved store Reynoldstal ved hjælp af dimensionsanalyse. I betragtning af, at hastighedskvadratisk luftmodstand i praksis er hyppigt forekommende, kunne det ellers være på sin plads. Luftmodstanden anskues traditionelt som funktion af Reynoldstallet, hvori både ρ og η indgår. Hvordan da antage, at luftmodstanden er uafhængig af η som udgangspunkt for dimensionsanalysen ved store Reynoldstal? Hvis der ingen gnidning var i luften, svarende til $\eta = 0$, er der slet ingen luftmodstand ifølge d'Alemberts paradoks. Hvordan da sætte η lig med nul ved en dimensionsanalyseudregning af luftmodstanden ved store Reynoldstal? Svaret er, at det er nødvendigt at regne med gnidning i luften i grænselag ved overflader, som luften bevæger sig i forhold til. Det er gnidningen her, der skaber hvirvlerne

i det turbulente kølvand efter en bevæget genstand. Men ved tilstrækkeligt store Reynoldstal er det ikke størrelsen af luftens viskositet, der afgør kølvandets udseende. Viskositetens betydning er analog til den statiske gnidningskoefficient ved ren rulning. Den statiske gnidningskoefficient skal ikke have nogen bestemt værdi, værdien skal blot være stor nok til, at ren rulning kan lade sig gøre. Størrelsen af den statiske gnidningskoefficient indgår ikke i formler for den rent rullende bevægelse, så længe bevægelsen forbliver rent rullende. Tilsvarende skal viskositeten ikke have nogen bestemt værdi for dannelsen af det hvirvlende kølvand, værdien skal blot være stor nok til, at det dannes. Kølvandet er ved store Reynoldstal for ikke for strøm-linede genstande bestemt af genstandens størrelse og form, uafhængigt af størrelsen af η . Og da afhænger kølvandets makroskopiske kinetiske energi ikke af både η og ρ , men kun af ρ .

Breddeopgave 93. Bølgemodstand

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave til breddekurset på RUC (fra eksamen februar 2020, nr. 93 i rækken her i Kvant):

Et overfladeskib, der sejler med jævn hastighed på dybt vand, danner bølger. Den del af modstanden imod skibets bevægelse, der skyldes bølgedannelsen, kaldes bølgemodstanden. For at finde bølgemodstanden ved modelforsøg i en prøvetank skal det såkaldte Froudetal være det samme ved modelforsøget, som ved den modellerede sejlads. Hvad er formelen for Froudetallet? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] J. H. Jensen (2013) "Introducing fluid dynamics using dimensional analysis", *Am. J. Phys.*, bind **81**, side 688-694.

Nyt fra foreningerne



Ny formand for Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab holdt lørdag den 17. april 2021 virtuel generalforsamling over zoom, hvor Christina Toldbo blev valgt som ny formand. Der blev rettet en tak til Andreas Kjær Dideriksen for hans indsats som formand. Andreas fortsætter i bestyrelsen som menigt medlem, og den øvrige bestyrelse forblev uændret fra sidste år. Bestyrelsen har konstitueret sig (se mere på www.astronomisk.dk).



SNU
SELSKABET FOR NATURLÆRENS UDBREDELSE
STIFTET 1824 AF H.C. ØRSTED

Generalforsamling i SNU

SNU har holdt generalforsamlingen via zoom den 26. april 2021. I sin beretning fortalte SNUs præsident, Dorte Olesen, at sommeren 2020 bød på åbning af den store vandrestilling "H.C. Ørsted på ny – skønheden i naturen" i Rundetaarn. I løbet af udstillingsperioden 1.7.-27.9. var der 6 aftenforedrag i Rundetaarn, og alt i alt blev udstillingen besøgt af 102.752 besøgende. Derefter flyttede udstillingen videre til Syddansk Universitetsbibliotek i Odense, hvor den var åben fra 10.10.-6.12. og blev besøgt af 24.351 personer.

Årets foredragsrække over temaet "Ørsted i jubilæumsåret" var velbesøgt, men ikke alle kunne gen-

nemføres på grund af COVID-19-nedlukningen. Carlsbergfondet finansierede videooptagelser af foredragene, som er blevet set af mange. Den planlagte uddeling af H.C. Ørstedmedaljer til to inspirerende grundskolelærere inden for naturvidenskab og teknik, sponsoreret af firmaet Haldor Topsøe A/S, måtte udskydes fra april til september 2020.

En særlig begivenhed var foredraget af modtageren af H.C. Ørstedguldmedaljen i fysik, professor Charles M. Marcus fra Niels Bohr Institutet. Udover det velbesøgte faglige foredrag, var der et egentligt overrækkelsesarrangement med Hendes Majestæt Dronningen på Glyptoteket.

Dorte Olesen rettede en speciel tak til SNUs frivillige projektleder for den store vandrestilling, fhv. direktør, ph.d. Gregers Mogensen, og de mange andre frivillige, der har ydet en stor indsats for at gøre udstillingen til en succes, samt de mange fonde, der hjalp SNU til at kunne afholde en så utrolig udstilling. Det drejer sig om Otto Mønstedts Fond, Industriens Fond, William Demant Fonden, COWIfonden, Thomas B. Thriges Fond og Povl M. Assenss Fond.

Det har også været en særlig fornøjelse igen at tage mere aktivt ejerskab til Selskabets fine H.C. Ørstedssamling, som siden midten af 1980'erne er blevet opbevaret på Teknisk Museum i Helsingør. Selskabet havde også påtaget sig at lave en H.C. Ørsted-jubilæumspublikation på engelsk, og koordinere sin foredragsserie i 2020 med Videnskabernes Selskabs offentlige foredrag i anledning af HCØ2020-fejringen, og begge disse aktiviteter blev også gennemført trods de undertiden vanskelige vilkår grundet COVID-19-pandemien.

Afslutningsvis blev det nævnt, at SNU planlægger at engagere sig aktivt i Videnskabsåret 2022, og dette kræver en temmelig stor forberedelsesindsats her i 2021.

Nyt fra Mars: Ingenuity-helikopteren begejstrer

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

I februar landede roveren Perseverance succesfuldt på Mars. Med om bord havde den en lille specialbygget letvægtshelikopter kaldet Ingenuity. For første gang ville NASA forsøge at flyve en helikopter på en anden planet. Ingenuity er kompakt bygget med batteri, opladningssolceller, orienteringskamera, varmeelement til elektronikken og styresystemer. Ingenuity vejer kun 1,8 kg, men på Mars er dens vægt endnu mindre nemlig 0,7 kg pga. den svagere tyngdekraft. Kort efter landingen på Mars begyndte Ingenuity at lade dens seks lithium-ion-batterier op ved hjælp af solceller. Efter opladningen sprængte Perseverance det skjold, der beskyttede Ingenuity, af, og helikopteren kunne folde sine ben ud og sættes ned på overfladen. Herefter kørte Perseverance et stykke væk, og Ingenuity var klar til at flyve.



Ingenuity har faktisk været ude at flyve, inden den kom til Mars. Den blev testet i en speciel vindtunnel i laboratoriet i JPL (NASAs Jet Propulsion Laboratory). Mars har en svagere tyngdekraft end Jordens og et meget lavere lufttryk (ca 1 % af Jordens), så det skulle testtunnellen tage højde for. Det lave lufttryk kræver, at helikopterens blade roterer med 2.400 rpm (40 Hz) for at holde den stabilt oppe, hvilket er næsten fem gange hastigheden krævet på Jorden. Det var dog svært for forskerne at vurdere vindhastighederne, som helikopteren kunne møde på Mars.

I april startede prøveflyvningerne. Den 19. april viste Ingenuity, at den kunne flyve og sende data tilbage til Jorden. Ingenuity fløj 3 m op over overfladen, hvor den svævede i kort tid, vendte rundt og landede igen. Ingenuity har siden da fløjet flere ture, som hele tiden blev højere og længere. Ingenuitys batterier kan klare flyveture på op til 90 s.

Men under den sjette flyvetur i maj måned skete der noget mærkeligt. Ingenuity begyndte at tilte ca. 20 grader frem og tilbage i en højde af 10 m pga. en fejl i dens analyseringsalgoritme. Algoritmen analyserer billeder taget af Ingenuitys kamera, men under flyveturen blev et enkelt billede ikke registreret, hvilket skabte en fejl i tidssekvensen og en forvirring i styresystemet om,

hvor helikopteren befandt sig. Heldigvis har Ingenuity et system, der opretter stabiliteten, og det lykkedes helikopteren at lande 5 m fra det planlagte landingssted.



Bortset fra den sjette flyvetur har Ingenuity klaret sig rigtig flot, og missionen er derfor blevet forlænget. Forskerne forventede dog ikke, at Ingenuity kunne overleve så længe på Mars. Faktisk var den kun designet til at overleve ca. en måned. Særligt da nætterne på Mars er meget kolde (-90°C), kan det ødelægge elektronikken. Ingenuity har et varmeelement med, der oplades med sollys, men denne oplader var kun designet til at overleve i en måned, og det er uvist, hvor mange nedkølinger den endnu kan klare.

Forskerne håber på at få billeder af de områder på Mars, hvor Perseverance ikke kan køre og også for at se, hvor det vil være interessant, at Perseverance kører hen og indsamler prøver. Lige nu er Perseverance i nærheden af Ingenuity, så de udforsker Mars sammen, og Perseverance har filmet Ingenuity og optaget lyden fra Ingenuity, når den flyver. Ingenuity fungerer lidt som en rutevejleder for Perseverance.

Ingenuitys formål var at demonstrere, at helikopterflyvning var muligt på Mars i den tynde atmosfære. Det har Ingenuity vist, og dens mission er gået over alt forventning. NASA har planer om at bruge lignende helikoptere som rutevejledere i kommende missioner, bl.a. til Saturns måne Titan.

Roveren Perseverance er også begyndt at udforske Mars. Perseverance var ude at køre første gang den 4. marts hvor den kørte i alt 6,5 m. Den første køretur var 4 m frem, hvorefter den drejede 150 grader og bakkede 2,5 m. Det forventes, at Perseverance kommer til at køre ca. 200 m pr. tur. Perseverance er landet i Jezerokrateret, hvor den skal undersøge geologien og studere Jezerokraterets udvikling fra sø til udtørret krater. Det vil hjælpe forskerne med at datere prøver fra klipperne. Formålet med Perseverance er at lede efter tegn på mirkobakterielt liv. Perseverance skal opsamle prøver fra klipper, som det er planen, at fremtidige missioner skal tage med tilbage til Jorden. Derudover

skal Perseverance undersøge forskellige teknologier, bl.a. MOXIE for at hjælpe mennesket til i fremtiden at kunne rejse til og opholde sig på Mars.



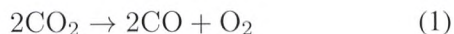
Perseverance har en robotarm, som med kameret WATSON har taget detaljerede billeder af landskabet. På Perseverances hoved sidder kamerasystemet Mastcam-Z, som også har taget flere billeder af området, og endelig har SuperCam-laserkameraet studeret kemien i klipperne. (Se Kvant nr. 1, 2021, for uddybende beskrivelser af instrumentpakkerne).

Forskerne ønsker at undersøge om klipperne i Jezerokrateret er sedimentære eller magmatiske, dvs. om de er som sandsten eller dannet af lava. Sedimentære klippetyper kan være bedre til at bevare tegn på liv, mens magmatiske klippestykker er bedre til at fortælle en tidslinje, altså hvornår de blev dannet.

Perseverances robotarm kan slibe klippens overflade ned, og de to spektrometre på armen, PIXL og SHERLOCK, kan bruges til at bestemme klippens mineralogi og til at detektere organiske forbindelser med.

Dagen efter, at Ingenuity viste, at den kunne flyve, lykkedes det Perseverance at producere ilt (oxygen) fra kuldioxid i Mars' atmosfære, hvilket er første gang, at det er forsøgt på en anden planet.

MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment) er et eksperiment designet på MIT, der skal producere oxygen fra atmosfæren på Mars, hvilket er vigtigt, hvis mennesker i fremtiden skal rejse til Mars. Atmosfæren på Mars består af 96% CO₂. MOXIE opsamler, komprimerer og opvarmer CO₂ fra atmosfæren. Herefter splittes CO₂ til O₂ og CO ved elektrokemisk omdannelse. Oxygen O₂ gemmes, mens restproduktet carbonmonoxid (CO) sendes tilbage til atmosfæren. Processen kræver en temperatur på 800 °C og en "solid oxide electrolyzer cell (SOEC)", der bruger elektricitet til at lave elektrolyse af CO₂. CO₂ diffunderer gennem en katode, hvor et oxygenatom bliver frigjort og tager 2 elektroner med sig, og det påførte potentiale får ionen til at bevæge sig til anoden, hvor ladningen overføres og to oxygenatomer kombinerer og danner O₂, som diffunderer ud. Reaktionen er:



MOXIE har i første forsøg produceret 5 g oxygen, hvilket svarer til, hvad en astronaut i normal aktivitet kan indånde på 10 min. MOXIE er designet til at generere op til 10 g oxygen i timen. Det er planen, at MOXIE skal

producere oxygen, så fremtidige astronauter på Mars kan leve der, men NASA drømmer om en opskaleret version af MOXIE, der ville kunne producere og opbevare oxygen nok til at bruge som brændstof på rejsen tilbage til Jorden, hvilket ville spare meget på vægten af det brændstof, der skal med ombord på en fremtidig mission.

Kilde: NASA og ing.dk

Amelia Earhart Fellowship

Rumfartsforsker og formand for Astronomisk Selskab, Christina Toldbo, har fået Zonta Internationals Amelia Earhart Fellowship, der tildeles unge, kvindelige forskere inden for flyve- og rumforskning. Det er kun anden gang i over 30 år, at prisen gives til en dansk forsker. Senest blev den i 2014, efter et interval på 25 år, givet til læge Lonnie Grove Pedersen, der forsker i rummedicin.



Christina blev kandidat i fysik fra Københavns Universitet i 2016 og har siden 2019 været ph.d.-studerende på DTU Space. Hendes ph.d.-projekt handler om udvikling af de nødvendige metoder, teknikker og instrumenter, for at menneskeheden kan tage de næste skridt i undersøgelsen af og senere udnyttelsen af rummet. Hendes forskning forventes at bidrage væsentligt til udviklingen af ubemandede og bemandede rejser til Månen og Mars i det kommende årti.

Før hun kastede sig ud i det nuværende forskningsprojekt, har Christina under udlandsophold i Tyskland og Holland beskæftiget sig med menneskets muligheder i rummet, bl.a. ved den europæiske rumforskningsorganisation ESA. Ud over sine akademiske arbejder, har Christina også været en meget aktiv formidler. Hun har bl.a. afholdt serier af foredrag og oplæg specielt rettet mod børn, og hun er en eftertragtet formidler/ekspert for TV og radio. I forbindelse med 50-året i 2019 for den første bemandede månelanding gjorde hun en stor indsats for den meget velbesøgte udstilling i Rundetaarn om Apollo 11's månelanding – en kæmpestor, helt frivillig indsats for feltet, hvor de besøgende også ved hjælp af deres mobiltelefon havde mulighed for at visualisere Saturn V-raketten ved siden af Rundetaarn og dermed få en realistisk fornemmelse af raketten størrelse.

Legatet på 10.000 USD skal bruges til et eksternt studieophold.

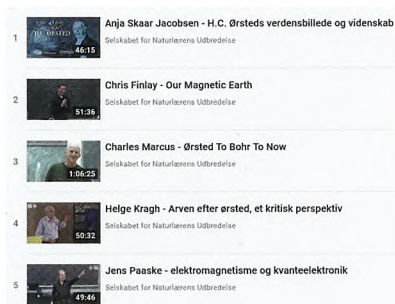
Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep 2021				
8/9	18.15	Kæmpelyn set fra rummet (rumobservatoriet ASIM)	Torsten Neubert	AS (Kbh)
8/9	19.45	Stjernernes sang og planeternes dans (asteroseismologi og exoplaneter)	Hans Kjeldsen	AS (Aarh)
13/9	19.00	Ørsted, Faraday & Tesla – om den teknologiske udnyttelse af elektromagnetismen Efter foredraget er der uddeling af H.C. Ørsted Gymnasielærermedaljen 2020	Hans Buhl	SNU
15/9	18.15	Titan – et tidsforskuet billede af Jordens oprindelse og udvikling	Jens Olaf Pepke Pedersen	AS (Kbh)
15/9	19.45	Kæmpelyn set fra rummet (rumobservatoriet ASIM)	Torsten Neubert	AS (Aarh)
22/9	18.15	Det tidligste billede af Universet	Thomas Tram	AS (Kbh)
22/9	19.45	Gammaglimt: Universets sankthansorme	Johan Peter Uldall Fynbo	AS (Aarh)
27/9	19.00	The Phenomenon of Superspreading and its role as an Achilles Heel for Coronavirus Efter foredraget er der uddeling af H.C. Ørsted Grundskolelærermedaljen 2021	Kim Sneppen og Lone Simonsen	SNU
29/9	18.15	Gammaglimt: Universets sankthansorme	Johan Peter Uldall Fynbo	AS (Kbh)
29/9	19.45	Det tidligste billede af Universet	Thomas Tram	AS (Aarh)
Okt 2021				
6/10	18.15	Stjernernes sang og planeternes dans (asteroseismologi og exoplaneter)	Hans Kjeldsen	AS (Kbh)
6/10	19.45	Titan – et tidsforskuet billede af Jordens oprindelse og udvikling	Jens Olaf Pepke Pedersen	AS (Aarh)
25/10	19.30	Uddeling af en H.C. Ørsted Sølvmedalje og foredrag af modtageren		SNU
Nov 2021				
15/11	19.30	Molecular modelling – fra pæne billeder til videnskab	Flemming Steen Jørgensen	SNU
Dec 2021				
6/12	19.00	Udvikling og forskning i vacciner i COVID-19-æraen Efter foredraget er der uddeling af H.C. Ørsted Gymnasielærermedaljen 2021	Camilla Foged	SNU

AS (Kbh): Astronomisk Selskab, CSS, Gammeltoftsgade 15, 1353 København K (bygning 35, kælderen), (astronomisk.dk).
AS (Aarh): Astronomisk Selskab, Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, 8000 Aarhus C (bygning 1530, auditorium F).
SNU: Aud. 1, H. C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlæren.dk, facebook.com/SNU1824).

Foredrag på Youtube

Hvis du er gået glip af et foredrag, så kan du på Youtube se eller gense mange af foredragene, som er arrangeret af SNU. Find link via hjemmesiden www.naturlæren.dk. Samlingen omfatter indtil videre 33 foredrag, så der er underholdende oplysning til mange timer.



Wieth-Knudsen Observatoriet



Wieth-Knudsen Observatoriet i Tisvilde har åbent hus med gratis adgang to gange om måneden. Herudover kan skoleklasser og andre grupper aftale besøg mod betaling.

Observatoriet ligger et kvarter gang fra Godhavn Station i Tisvilde. Se mere på wko.astronomisk.dk

Ørstedmedaljer til to lærere

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) tildelte i december 2020 Ørstedmedaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab i gymnasiet til lektor Lasse Seidelin Bendtsen, Borupgaard Gymnasium i Ballerup.



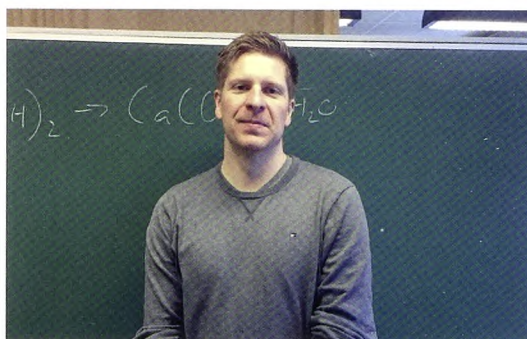
Figur 1. Lasse Seidelin Bendtsen.

Lasse Seidelin Bendtsen har siden 2003 været ansat på Borupgaard Gymnasium, hvor han underviser i fagene fysik og astronomi. Hans undervisning er kendetegnet ved et ekstraordinært engagement, et højt fagligt niveau og en stor didaktisk indsigt, og hans kreative ideer fremmer elevernes nysgerrighed, refleksion og interesse for naturvidenskab. Han har udviklet begrebet oplevelsesbaseret undervisning som en ny tilgang til naturvidenskabsundervisning, og det er med til at løfte såvel svage som stærke elever. Undervisningen bliver bygget op ud fra oplevelser, der åbner for nysgerrighed, interesse og engagement hos eleverne. Hans store indsats har løftet den faglige formidling og interessen for naturvidenskab, for hans undervisningsprincipper har vundet indpas som hele skolens officielle pædagogiske indsats.

I mange sammenhænge har Lasse formidlet naturvidenskab til en større målgruppe gennem hjemmesider, artikler, bøger, på museer og på film. Således bliver hans YouTube-kanal set flittigt af elever inden og uden for gymnasiet. Han har også været videnskabelig konsulent på Louisiana, medarbejder på hjemmesiden hos DTU Space, og har skrevet en bog om fysikfaglige skriveøvelser.

Lasse har også skabt et samarbejde med de lokale folkeskoler om at udbyde astronomi på gymnasieniveau som valgfag i folkeskolen og har lavet talrige arrangementer, hvor gymnasieelever har formidlet naturvidenskab til folkeskoleelever på nye og kreative måder.

Ørstedmedaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab i grundskolen for 2021 er tildelt lærer Hans Emil Sølyst Hjerl, som er indstillet af Gribskolen i Græsted, for hans gennemgribende udvikling af hele naturfagsområdet fra indskoling til udskoling både fagligt og kulturelt.



Figur 2. Hans Emil Sølyst Hjerl.

Mottoet for Emils undervisning er, at "Undervisningen skal være en oplevelse, hvor elevens egen undren driver læringen!" Emil skaber interesse og motivation for naturvidenskab og teknologi blandt børn og unge ved at koble eksperimenter og undersøgelser til fagbegreber og teori. På Gribskolen har Emil udviklet naturfagslokalerne og fået etableret et Robosciencelokale, hvor eleverne kan arbejde med programmering af Legomindstorms – og uge 39 er nu hvert år, på Emils initiativ, blevet en naturfagsprojektuge for skolens elever.

Hans undervisning tilgodeser både de svage elever og skaber interesse hos denne elevgruppe samtidig med, at de dygtigste elever bliver udfordret ved refleksive spørgsmål. Elevernes engagement giver sig bl.a. udslag i, at de tilmelder sig konkurrencer som DM i biologi, Nordisk Matematikkonkurrence og Unge Forskere, ligesom flere elever bagefter vælger en uddannelse med naturvidenskabeligt indhold.

Elevernes kompetencer fremmes også ved udvikling af autentiske undervisningsforløb, som også deles med kolleger både fra skolen og andre lærere i kommunen. Emils egne undervisningsmaterialer tager udgangspunkt i nærområdet, som bliver brugt flittigt til eks-kursioner.

Med begge medaljer følger et rejselegat på 25.000 kr. samt midler til et projekt på skolerne. Legaterne er sponseret af energiselskabet Ørsted og firmaet Haldor Topsøe.