

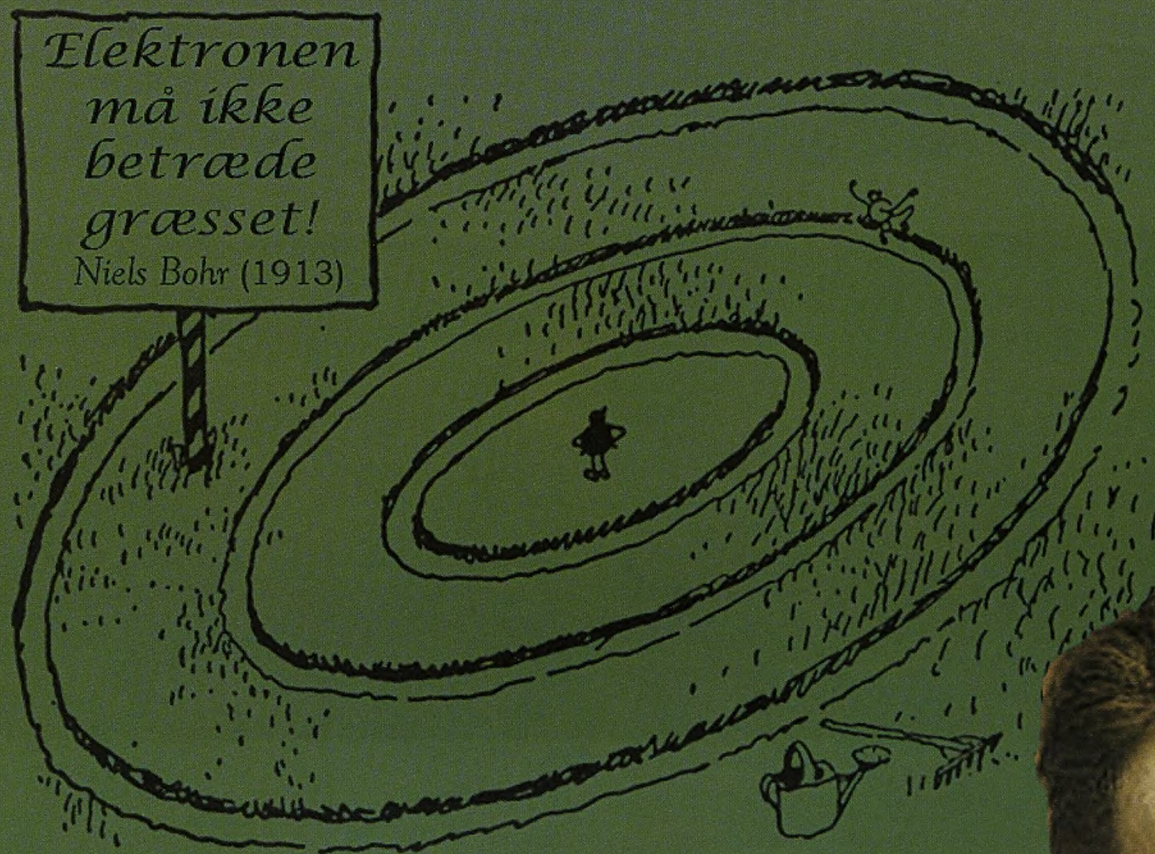
---

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 24. årgang

---

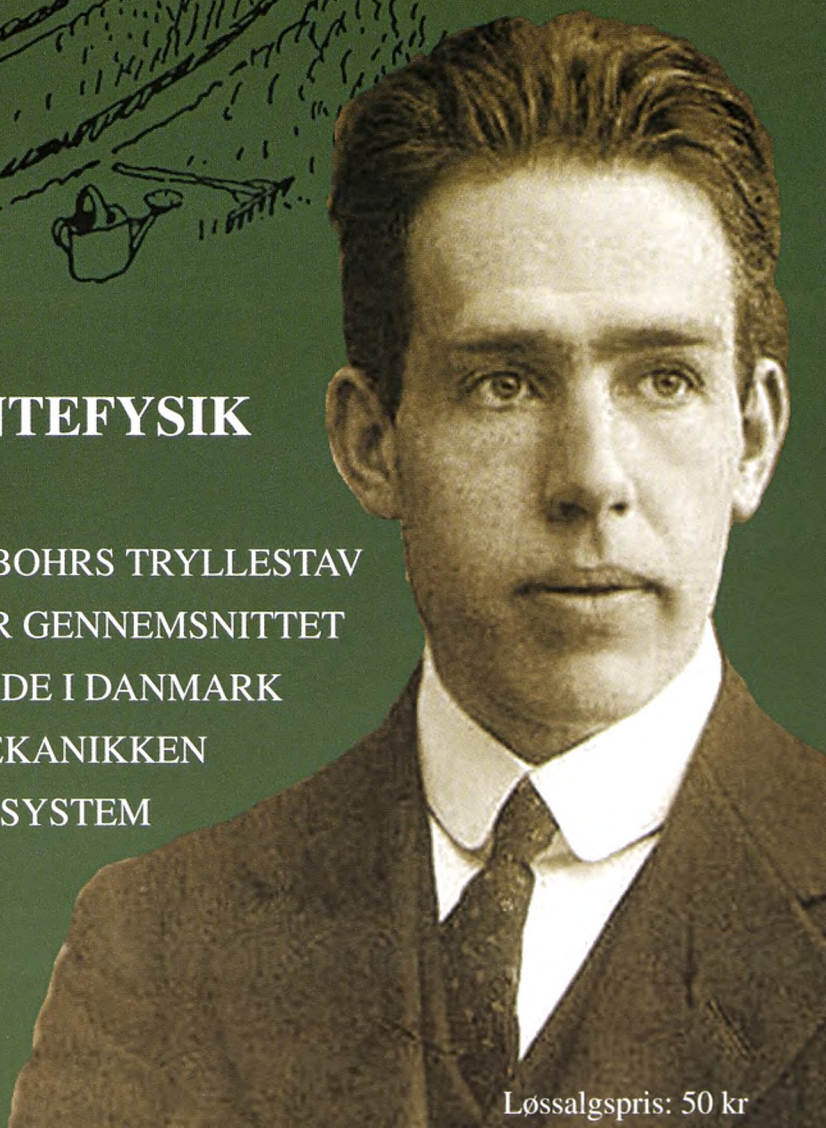
*Elektronen  
må ikke  
betræde  
græsset!*

Niels Bohr (1913)



## TEMA: BOHR OG KVANTEFYSIK

- KVANTEMEKANIKKENS FØDSEL
- KORRESPONDENSPRINCIPPET – BOHR'S TRYLLESTAV
- NOBELPRISEN FOR FYSIK UNDER GENNEMSNITTET
- INTERNATIONAL FYSIKOLYMPIADE I DANMARK
- FORTOLKNINGER AF KVANTEMEKANIKKEN
- ØLLEN SOM KVANTEMEKANISK SYSTEM
- NORDISK FYSIKMØDE I LUND
- KOMET PÅ MARTSHIMLEN
- TAURUS OBSERVATORIET
- KVANT-NYHEDER



Løssalgspris: 50 kr



# KVANT

## Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

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

### Udgives af

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

### Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),  
Christianshavns Gymnasium  
Natalia Golubeva,  
Aarhus Universitet  
Mogens Esrom Larsen,  
Institut for Matematiske Fag, KU  
Steen Lærke ([astro@kvant.dk](mailto:astro@kvant.dk)),  
Astronomisk Selskab  
Sven Munk (nyhedsredaktør)  
John Rosendal Nielsen,  
Aurehøj Gymnasium  
Jens Olaf Pepke Pedersen,  
DTU Space  
Finn Berg Rasmussen,  
Ørsted Lab, Københavns Universitet  
Svend Erik Rugh  
Torben Westerberg (korrektur)

### Foreningsrepræsentanter

Torben Lund Skovhus (SNU),  
Teknologisk Institut

**Abonnementspris** : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.  
Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 ([koerner@kvant.dk](mailto:koerner@kvant.dk)).

### Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr  
1/4 side: 1600 kr.

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

### Tryk

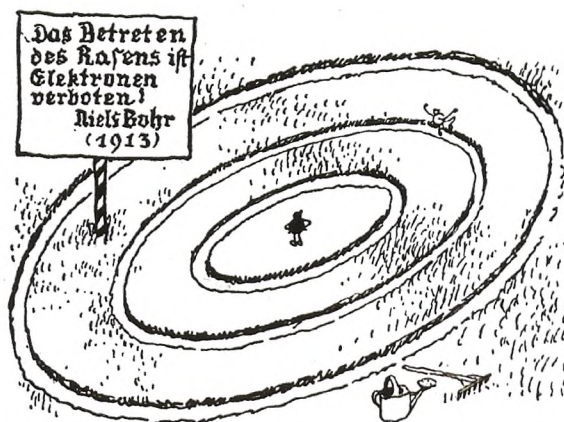
HCB Tryk ApS, Brønderslev.  
Oplag: 5500.

### Produktionsplan

Nr. 2-13 udkommer ca. 15. maj  
Nr. 3-13 udkommer ca. 15. september  
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

## Indhold:

|                                                                                                                        |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Temanummer om Bohr og kvantefysik . . . . .                                                                            | 3        |
| Korrespondensprincippet – Bohrs tryllestav<br><i>Helge Kragh</i> . . . . .                                             | 4        |
| Kvantemekanikkens fødsel<br><i>Per Hedegård</i> . . . . .                                                              | 8        |
| Den Internationale Fysikolympiade i Danmark juli 2013<br><i>Henrik Bruus og Niels Hartling</i> . . . . .               | 12       |
| Hundrede år efter Bohr: Nobelprisen for fysik under gennemsnittet<br><i>Brian Juelsgaard og Klaus Mølmer</i> . . . . . | 14       |
| Foreningsnyt – foredrag i foråret . . . . .                                                                            | 19       |
| KVANT-nyheder<br><i>Sven Munk</i> . . . . .                                                                            | 20       |
| Kulde og temperatur – breddeopgave 53 med didaktisk kommentar<br><i>Jens Højgaard Jensen</i> . . . . .                 | 22       |
| Nordisk fysikmøde i Lund den 12.-14. juni<br><i>Jørgen Schou</i> . . . . .                                             | 23       |
| Øllen som kvantemekanisk system<br><i>Kaj Ove Roland</i> . . . . .                                                     | 24       |
| Bohr vs. Einstein: Fortolkninger af kvantemekanikken<br><i>Christian K. Andersen og Andrew C.J. Wade</i> . . . . .     | 27       |
| Komet på martshimlen<br><i>Michael Quaade</i> . . . . .                                                                | 32       |
| Taurus Observatoriet i Horsens<br><i>Knud Erik Sørensen</i> . . . . .                                                  | 34       |
| Tildeling af H.C. Ørsted Medaljen til rektor Jannik Johansen, Frederiksberg Gymnasium<br><i>Dorte Olesen</i> . . . . . | Bagsiden |



**Billedet på forsiden** viser Niels Bohr med en populær tegning (udført af Wilhelm Petersen i 1934) af hans atommodel fra 1913. I dette nummer fejrer vi 100-året for Bohrs atommodel, der var et vigtigt skridt på vejen mod kvantefysikken.

KVANT udsendes gratis til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Fysik og DTU Nanotech.

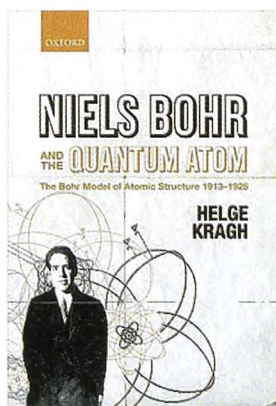


# Temanummer om *Bohr og kvantefysik*

I år er det 100 år siden, at Niels Bohr fremsatte sin atommodel. Det bliver fejret igennem året på forskellig vis med bl.a. foredrag, undervisning, bogudgivelser, konferencer og andet (se fx bagsiden af sidste nummer af KVANT). KVANT markerer – i første omgang – begivenheden med dette temanummer, med en samling artikler om “Bohr og kvantefysik”. Der vil komme flere artikler indenfor dette tema i senere numre af KVANT.

*Helge Kragh*, professor i videnskabshistorie ved Aarhus Universitet, lægger for med artiklen **Korrespondensprincippet – Bohrs tryllestav**. For Bohr og hans elever var korrespondensprincippet en ledetråd i udviklingen af den tidlige kvanteteori. Princippet blev imidlertid aldrig defineret præcist og for mange af samtidens fysikere virkede Bohrs brug af princippet lidt som trylleri.

Helge Kragh udgav allerede i efteråret 2012 en bog om Bohrs atommodel. Den vil blive anmeldt i et kommende nummer af KVANT.



*Per Hedegård*, professor i teoretisk fysik ved Niels Bohr Institutet i København, fortæller den spændende historie om **Kvantemekanikkens fødsel**. Det er en proces der tog omkring 30 år, fra elektronen blev opdaget og til de kemiske bindinger var forstået. Bohrs atommodel fra 1913 spillede en væsentlig rolle i denne udvikling.

*Henrik Bruus*, professor i teoretisk fysik ved Danmarks Tekniske Universitet, og *Niels Hartling*, lektor ved Birkerød Gymnasium fortæller om den **Internationale Fysikolympiade, IPHO**, hvor Danmark er vært for den afsluttende finale med ca. 450 af verdens dygtigste gymnasieelever. Det er en hård konkurrence, hvor eleverne bliver udfordret med stof på universitetsniveau.

*Brian Julsgaard* og *Klaus Mølmer*, henholdsvis lektor og professor i fysik ved Aarhus Universitet fortæller om sidste års **nobelpreis i fysik**. Den blev givet for at måle egenskaber af enkelte og isolerede kvantesystemer, der normalt ellers kun kan måles som gennemsnit. Hvis man vil læse mere om kvantemekanik kan Klaus Mølmers bog “Kvantemekanik – Atomernes vilde verden” anbefales som supplerende læsning.

*Kaj Ove Roland*, fysiklærer på Rødovre Gymnasium, skrev i 1986 en ganske underholdende artikel i GAMMA om **Øllen som kvantemekanisk system**. Her anvendes kvantemekanikkens begrebsapparat for første

gang på en *øl* med overraskende resultater. Få bl.a. svaret på hvad manden med flasken herunder foretager sig. Man kan også lære noget om *bra-* og *ket-*notationen og superponerede kvantetilstande.



*Christian Kraglund Andersen* og *Andrew C.J. Wade*, begge ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet, fortæller om diskussionerne om **Fortolkningen af kvantemekanikken**, hvor Bohr og Einstein var meget uenige.

Udover disse kvante-artikler, er der mange andre spændende indlæg. *Michael Quaade*, astronom og formand for Astronomisk Selskab, skriver om en komet, der er synlig på forårshimlen. *Knud Erik Sørensen*, skriver om Taurus Observatoriet i Horsens, som han bestyrer.

*Dansk Fysik Selskab* holder sit årsmøde fælles med de nordiske lande i Lund, Sverige, den 12.-14. juni. Der er flere foredrag på programmet i foråret fra *Astronomisk Selskab* og *Selskabet for Naturlærers Udbredelse*. Sidstnævnte forening har uddelt den første af en ny række Ørsted-medaljer til en gymnasielærer (se bagsiden). Som vanligt bringer vi en breddeopgave og nyheder fra fysikkens verden. God læselyst!

*Michael Cramer Andersen*  
Redaktør

## Abonner på KVANT

Dette nummer udsendes ekstraordinært gratis til fysikstuderende på landets universiteter. Vi håber, at nye læsere derved får lyst til at læse bladet fast. Et ordinært abonnement koster 180 kr. *Studerende* kan få KVANT som medlem af en forening væsentligt billigere:

- **Dansk Geofysisk Forening** (75 kr.)  
[www.geofysiskforening.dk](http://www.geofysiskforening.dk)
- **Selskabet for Naturlærers Udbredelse** (100 kr.)  
[www.naturvidenskab.net](http://www.naturvidenskab.net) og [www.facebook.com/SNU1824](http://www.facebook.com/SNU1824)
- **Dansk Fysisk Selskab** (150 kr.)  
[www.dfs.nbi.dk](http://www.dfs.nbi.dk)
- **Astronomisk Selskab** (150 kr.)  
[www.astronomisk.dk](http://www.astronomisk.dk)
- **KVANT** på nettet: [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk) og [www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift](http://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)



# Korrespondensprincippet – Bohrs tryllestav

Af Helge Kragh, Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet

I Niels Bohrs udvikling af kvante- og atomteorien spillede generelle principper en vigtig rolle. Fra omkring 1918 var korrespondensprincippet ledestjernen for den videre udvikling. Dette berømte princip, der var Bohrs i en næsten personlig forstand, kan forstås på flere måder. Uanset dets nuværende status, så er dets historiske betydning uomtvistelig.

## Et mangesidigt princip

Det analogi- eller korrespondensprincip som Bohr i udfoldet form indførte i 1918, men hvis rødder allerede kan findes i hans arbejder fra 1913, har været genstand for megen diskussion. Hvor originalt var det egentligt? Var der tale om et alment filosofisk princip eller et teknisk værktøj til at løse problemer i kvanteteorien? Flere filosoffer har foreslået generaliserede versioner af princippet i forbindelse med udviklingen af teorier. Man kan i den videnskabsteoretiske litteratur finde korrespondensprincippet omtalt som et krav om, at når en ny teori  $T_2$  afløser en tidligere teori  $T_1$ , da må  $T_2$  indeholde de bekræftede resultater af  $T_1$  som særtilfælde.

Einsteins specielle relativitetsteori opfylder dette krav i relation til den klassiske mekanik, idet formelne for sidstnævnte ( $T_1$ ) svarer til relativitetsteoriens ( $T_2$ ) for små hastigheder:  $T_2 \rightarrow T_1$  for  $v/c \rightarrow 0$ . Tilsvarende var det, allerede før Bohr, klart, at kvanteteorien resultater må konvergere mod den klassiske elektrodynamiks resultater i grænsen  $h \rightarrow 0$ , sådan at Plancks strålingslov giver den klassiske Rayleigh-Jeans lov for små værdier af  $h\nu/kT$ . Hvis der ikke er andet i korrespondensprincippet end en korrespondens eller konvergens af denne art, da kan Bohrs formalisering og navngivning af princippet synes at være ret trivial. Det er endda blevet hævdet, at man kan finde en form for korrespondensprincip helt tilbage til Newton, og at det siden da har optrådt regelmæssigt i fysikhistorien [1].

Bohrs korrespondensprincip var dog af en ganske anden og mere sofistikeret art. Der var ikke tale om en generel metodologisk regel, men om et heuristisk princip netop knyttet til forholdet mellem kvanteteori og klassisk fysik. Ud fra dette princip kunne den klassiske fysik vejlede udviklingen af den nye kvanteteori uden derved at formindske den uundgåelige kontrast der ifølge Bohr måtte være mellem kvanteverdenen og den klassiske verden [2].

## Det begrænsede korrespondensprincip

Man kan finde de første spirer til korrespondensprincippet for frekvenser i Bohrs monumentale afhandling "On the Constitution of Atoms and Molecules" fra 1913. Han argumenterede heri, at for at sikre stabiliteten af Rutherford's kerneatom måtte man antage to postulater, der begge stred mod den etablerede fysik [3]. Det første var postulatet om stationære tilstande

eller elektronbaner, hvori de accelererede elektroner var fredet fra elektrodynamikkens krav om at afgive stråling, mens det andet var postulatet om diskrete kvantespring. En elektron i en anslået energitilstand  $E'$  ville spontant overgå til en lavere tilstand  $E''$  under udsendelse af en lysbølge (ikke en foton!) med frekvens  $\nu = (E' - E'')/h$ . Det var et centralt såvel som provokerende element i Bohrs teori, at lysets frekvens  $\nu$  ikke svarede til den omkredsende elektrons mekaniske frekvens, sådan som det ellers måtte være ifølge den klassiske fysik.

I sin store afhandling fra 1913 udledte Bohr energien for et brintatom på hele tre måder, hvoraf den ene gjorde brug af den korrespondens, der måtte være til den klassiske strålingsteori for store værdier af kvantetallet  $n$ . I et foredrag i København for Fysisk Forening af 20. december 1913 gjorde han tilsvarende brug af korrespondensargumenter i udledningen af Rydbergs spektroskopiske konstant  $R$ . Det væsentlige i Bohrs argument var at betragte kvanteovergange fra tilstand  $n'$  til tilstand  $n''$ , hvor frekvensen af den udsendte stråling kan udtrykkes som:

$$\nu = Rc \left( \frac{1}{n''^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (1)$$

Ved at betragte tilfældet  $n' - n'' \ll n'$  og sammenholde  $\nu$  med den mekaniske omløbsfrekvens kunne han på simpel vis udlede det udtryk for Rydbergs konstant  $R$ , som han på anden vis var nået frem til i sin afhandling. I moderne enheder (SI) skrives Rydbergkonstanten:

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 c \epsilon_0^2} \quad (2)$$

Se forklaring på symboler i boksen på næste side.

Bohr viste i sin afhandling, at i samme tilnærmelse ville man finde, at  $\nu$  var et helt multiplum af omløbsfrekvensen, om hvilket han kommenterede:

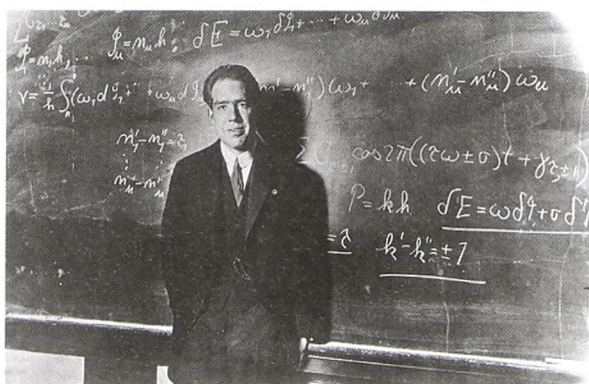
Muligheden for udsendelse af stråling med en sådan frekvens kan også fortolkes i analogi med den almindelige elektrodynamik, da en elektron, der kredser omkring kernen i en elliptisk bane, vil udsende stråling, der ifølge Fouriers sætning kan opløses i homogene komponenter, hvis frekvenser er  $n\omega$ , hvis  $\omega$  er elektronens omløbsfrekvens.



I sit foredrag i Fysisk Forening udtrykte han tilsvarende, at “udsendelsen af *langsomme* (lavfrekvente) elektromagnetiske svingninger kan beregnes i overensstemmelse med den klassiske elektrodynamik” [4]. I denne første og begrænsede version vedrørte korrespondensen kun frekvenser og havde derfor ikke konsekvenser, der gik ud over den elementære teori selv.

### Symboler

$v$  – hastighed i det betragtede inertialsystem  
 $c$  – lyshastigheden  
 $h$  – Plancks konstant  
 $\nu$  – lysfrekvens  
 $k$  – Boltzmanns konstant  
 $T$  – temperatur (den absolutte)  
 $E'$  – energi i den stationære tilstand  $n'$   
 $n$  – (hoved)kvantetal. Heltal  
 $R$  – Rydberg-konstanten  
 $e$  – elektronladningen  
 $m_e$  – elektronens masse  
 $\epsilon_0$  – vakuumpermittiviteten  
 $a_i$  – Fourierkoefficienter  
 $\omega$  – vinkelfrekvens. I Bohr-citatet på foregående side betyder  $\omega$  dog omløbsfrekvens.  
 $t$  – tid  
 $\Delta X$  – usikkerhed i størrelsen  $X$ . Tilvækst i  $X$   
 $k$  – kvantetal for baneimpulsmoment.

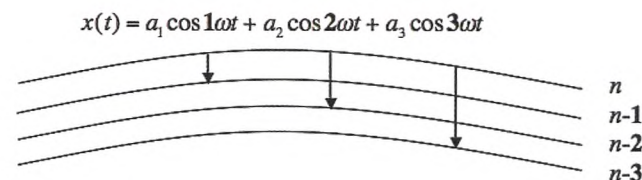


**Figur 1.** Bohr forelæser over korrespondensprincippet ved Yale University i 1923.

### Om linjespektres kvanteteori

I starten af 1918 færdiggjorde Bohr en stor og svært læselig afhandling med titlen “On the Quantum Theory of Line-Spectra”, der udkom i skriftrækken fra Videnskabernes Selskab. I denne afhandling gav han en ny fremstilling af kvanteteoriens grundlag baseret på en udvidet version af korrespondensprincippet, om end han endnu ikke benyttede dette navn [5]. Det skete først i foråret 1920, da han var inviteret til Berlin af det tyske fysiske selskab for at give en højt profileret forelæsnings. Ved denne lejlighed traf han mange af de ledende tyske fysikere, herunder Alfred Landé, Max Planck og Max Born. Af særlig betydning for ham var mødet med Einstein, som han her traf for første gang.

I afhandlingen fra 1918 talte Bohr om “analogien mellem kvanteteorien og den sædvanlige strålingsteori”, som han nu brugte til at skaffe indblik i intensiteten for det lys, atomer udsender. Denne udvidelse var afgørende, for hvis ikke intensiteten kunne bestemmes teoretisk, var der kun ringe mulighed for at sammenligne teorien med spektroskopiske eksperimenter.



**Figur 2.** En klassisk baneurve opløst i Fourierkomponenter [2]. Ifølge korrespondensprincippet svarer enhver tilladt overgang mellem stationære baner til en af den klassiske bevægelses harmoniske komponenter.

Elektronens banebevægelse kan, set “fra kanten”, betragtes som en éndimensional bevægelse med Fourieropløsningen

$$x(t) = a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots \quad (3)$$

Systemet vil udsende spektrallinjer svarende til grundtonen  $\omega$  og overtonerne  $2\omega$ ,  $3\omega$ , osv., og det vil ske med en intensitet proportional med kvadratet på amplituderne. Den kvanteteoretiske mekanisme er ganske vist helt anderledes, men ifølge Bohr var der for store kvantetal  $n$  alligevel en nær analogi. “Vi må forvente,” skrev han, “at for store værdier af  $n$  vil disse koefficienter  $[a_1, a_2, \dots]$  efter kvanteteoriens bestemme sandsynligheden for en spontan overgang fra en bestemt stationær tilstand  $n = n'$  til en nabotilstand.”

Bohrs nye indsigt var, at en elektron i sin bane vil have en vis sandsynlighed for at overgå til en anden stationær tilstand, og at denne sandsynlighed kunne udtrykkes ved de koefficienter, Einstein et par år tidligere havde indført i sin strålingsteori. Ifølge Bohr kunne Einsteins koefficienter skrives i form af de klassiske Fourierkoefficienter  $a_i$ , hvilket gjorde det muligt at estimere intensiteten for en spektrallinje hidrørende fra en bestemt kvanteovergang. Selv om Bohrs korrespondensprincip således stod i kritisk gæld til Einsteins probabilistiske strålingsteori, så var der stor forskel mellem de to fysikers opfattelse af strålingsprocessen. Einstein så sin teori som et stærkt argument for den endnu uortodokse hypotese om fotoner, mens Bohr ganske afviste denne fortolkning. Når han så hårdnakket holdt fast ved lysets bølgenatur, så skyldtes det især, at han opfattede fotoner som værende i modstrid med korrespondensprincippet.

I nærmest en bisætning brugte Bohr sit korrespondensprincip til at argumentere for, at en anslået stationær bane i et atom ikke kan være skarpt defineret; men energien må være “udtværet” over et lille interval  $\Delta E$  omkring  $E$ . Som han viste i sit foredrag i Berlin, så følger begrebet om en “naturlig linjebredde” heraf, idet alle spektrallinjer må have en udtværing selv

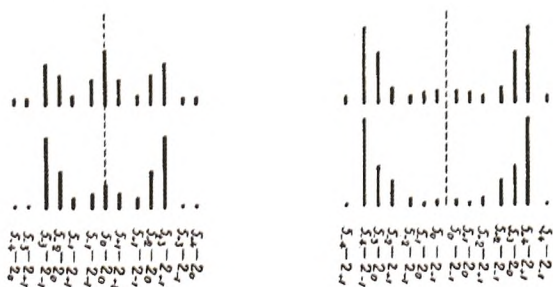


under optimale fysiske omstændigheder. Der kan ikke findes absolut monokromatisk stråling. Umuligheden heraf fulgte senere af Heisenbergs ubestemthedsprincip  $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ , men omtrent samme konklusion blev altså allerede draget på grundlag af den gamle kvante-teori.

## Udvalgsregler

I årene efter 1918 formulerede Bohr korrespondensprincippet på flere forskellige måder, der ikke alle var lige klare eller indbyrdes konsistente. Ved nogle lejligheder betegnede han princippet som en "lov" der var gyldig for alle kvanteovergange, også selv om de involverede kvantetal var små. I en mere praktisk forstand fremhævede han den heuristiske værdi af princippet, som en vejledning i fysikernes forsøg på at forstå spektrene. En af korrespondensprincippet's vigtigste funktioner var at levere udvalgsregler for kvanteovergange. Man var klar over, at langt fra alle mulige overgange mellem stationære tilstande var aktive og gav anledning til spektrallinjer. Nogle overgange var tilsyneladende forbudte, men hvorfor? Dette var især et problem for de angulære eller azimutale kvantetal  $k$ , der angav værdien for elektronens impulsmoment.

Det første forsøg på at begrunde en udvalgsregel for  $k$  fremkom i 1918, da den polsk-tyske fysiker Adalbert Rubinowicz, nåede frem til udvalgsreglen  $\Delta k = \pm 1$  og  $\Delta k = 0$  for tilladte overgange. Bohr angreb det samme problem med korrespondensprincippet som våben, og hans resultat var  $\Delta k = \pm 1$ , således at overgange med uændret  $k$  altså var forbudte. Det viste sig snart, at Bohrs resultat stemte bedre med spektroskopiske data end Rubinowiczs, hvilket forståeligt nok styrkede korrespondensprincippet's status som et effektivt kvanteværktøj.



**Figur 3.** Starkeffekten for brint ( $H_\gamma$ ) som Bohr præsenterede den i sin Nobelforelæsning [7]. De øverste linjer viser eksperimentelle data, mens de nederste er de af Kramers beregnede.

Denne status blev yderligere underbygget af de detaljerede beregninger af brintspektret som Hendrik Kramers, Bohrs unge hollandske assistent, udførte i forbindelse med sin doktordisputats fra 1919. Ved en snedig anvendelse af korrespondensprincippet lykkedes det Kramers at beregne intensiteten af brints finstrukturlinjer og også af de linjer, den elektriske Starkeffekt gav anledning til [6]. Kramers' meget omfattende beregninger resulterede i relative intensiteter for komponenterne i Starkspektret der næsten stemte perfekt overens med

de målte. Ikke blot kunne han redegøre for alle kendte data, han kunne også forudsige nye. Således beregnede han den elektriske opsplitning af den svage brintlinje  $H_\epsilon$ , der svarer til en overgang fra  $n = 7$  til  $n = 2$ . Starkeffekten for denne linje var ikke kendt i 1919, men nogle år senere bekræftede eksperimenter de beregnede intensiteter.

I starten af 1920'erne var korrespondensprincippet anerkendt som en vigtig del af kvanteteorien. Det var en væsentlig årsag til at Bohr blev tildelt Nobelprisen i 1922, og i sin Nobelforelæsning lagde han da også stor vægt på korrespondensprincippet og dets mangesidige anvendelser [7]. Ikke alle fysikere var lige så begejstrede for princippet, som man var i København, men der var generel enighed om dets værdi til at forstå atomets hemmeligheder. Så at sige alle de lærebøger og sammenfatninger af atom- og kvanteteorien, der blev udgivet mellem 1920 og 1925, indeholdt omhyggelige beskrivelser af korrespondensprincippet.

## En københavnsk tryllestav

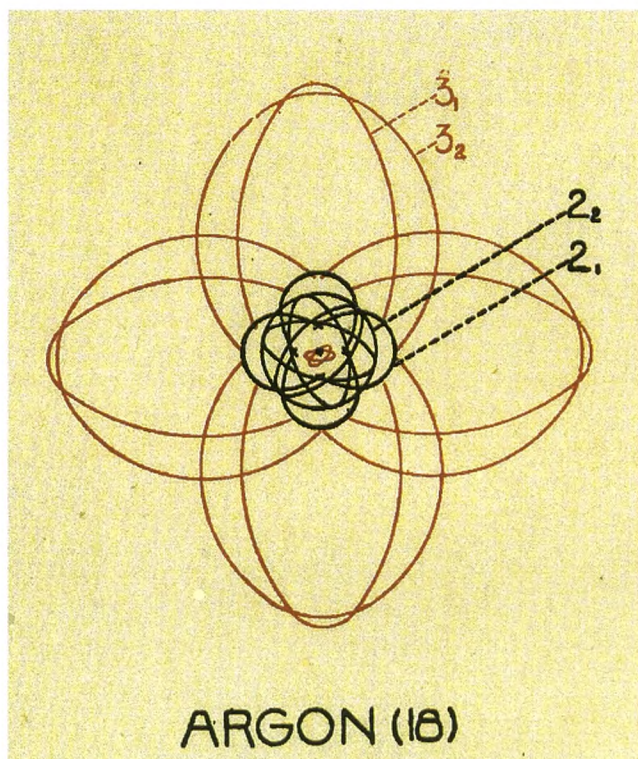
Den måde Bohr og hans nærmeste kolleger brugte korrespondensprincippet på, vakte af og til undren blandt udenlandske fysikere. Princippet blev opfattet som "en noget mystisk tryllestav, der ikke virkede uden for København," som Kramers senere udtrykte det [8]. Man havde en fornemmelse af, at kun Bohr og dem, der var indviet i mesterens magi, kunne gøre brug af tryllestaven. Når Einstein beskrev Bohrs fysik som "intuitiv" og "emotional," havde han især korrespondensprincippet i tankerne. Han skrev om Bohrs teori for atomernes struktur, at den var et "mirakel" og udtryk for "den højeste form for musikalitet i tankernes verden."

Denne musikalitet nåede sit crescendo i den reviderede atomteori, Bohr foreslog i starten af 1920'erne og som omfattede strukturen af samtlige grundstoffer i det periodiske system. I den nye teori var elektronernes elliptiske bevægelser styret af to kvantetal, hovedkvantetallet  $n$  og det azimutale kvantetal  $k$ , og de ydre elektroner ville af og til dykke ind i de indre elektronstrukturer. Bohrs metode til at bestemme atomernes arkitektur var udpræget eklektisk, idet den byggede på en blanding af generelle kvanteprincipper og empirisk viden om grundstoffernes fysisk-kemiske egenskaber. Blandt de generelle principper spillede korrespondensprincippet en afgørende men også noget tåget rolle. Bohr selv antydede, at hans teori var vejledt af overvejelser baseret på korrespondensprincippet, men uden klart at redegøre for disse overvejelser. Alligevel lykkedes det ham ved hjælp af denne eklektiske metode at angive elektronstrukturen for samtlige grundstoffer og på denne måde at rekonstruere det periodiske system.

Bohrs nye teori blev entusiastisk modtaget af de fleste fysikere, der var fascinerede af den magi, der stammede fra troldmanden fra Blegdamsvej. Men de undrede sig også over teoriens logiske opbygning og især over den rolle, korrespondensprincippet spillede. I et brev fra Cambridge skrev Rutherford: "Alle her brænder efter at vide, om du kan fastsætte 'elektron-



ringene' ud fra korrespondensprincippet eller om du er nødt til at forlade dig på kemiske data for at gøre det" [5]. Den unge Wolfgang Pauli indså, at de kemiske data spillede en større rolle end korrespondensprincippet, der efter hans mening slet ikke kunne bruges til at forstå atomernes struktur. Man vidste at antallet af grundstoffer i perioderne var givet ved formelen  $2n^2$  (2, 8, 18, ...), men hvad var forklaringen herpå? Ifølge Pauli var korrespondensprincippet ikke til nogen hjælp i dette spørgsmål, der måtte besvares på anden vis. I Paulis berømte teori for det periodiske system fra foråret 1925, hvori udelukkelsesprincippet først optræder (før elektronens spin var kendt!), spillede korrespondensprincippet ingen rolle.



**Figur 4.** Det smukt symmetriske argonatom som Bohr opfattede det i 1922.

### Fra kvanteteori til kvantemekanik

Den gamle kvanteteori, baseret på forestillingen om elektroner i baner omkring atomkernen, viste sig at være uholdbar. Bohrs teori var forkert, men ikke mere forkert end at den i 1925 kunne omformes til den nye kvantemekanik, hvori banebegrebet var opgivet. I den komplicerede proces, der førte til Heisenbergs nye og abstrakte teori, spillede korrespondensprincippet – der ikke afhænger af banebegrebet – en afgørende rolle. Det var en central del af den dispersionsteori som Kramers og Heisenberg formulerede i foråret 1925 og som var den umiddelbare forløber for kvantemekanikken. Overgangen fra den gamle til den nye teori var af radikal natur, men den var ikke revolutionær i ordets stærke betydning. Blandt de elementer fra den gamle kvanteteori,

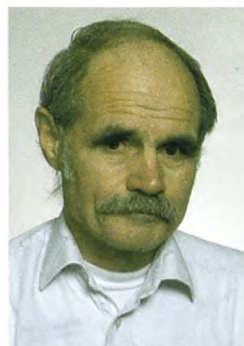
der forårsagede overgangen og levede videre i den nye teori, var korrespondensprincippet. I det mindste var det sådan, mange af samtidens fysikere opfattede det.

I en metodologisk forstand byggede kvantemekanikken i væsentlig grad på korrespondensprincippet, der så at sige blev løftet op på et højere plan. I sin banebrydende artikel fra sommeren 1925 gik Heisenberg så vidt, at han omtalte sin teori som "en matematisk generalisering af Bohrs korrespondensprincip." Ifølge Bohr selv gjorde kvantemekanikken på ingen måde korrespondensprincippet overflødigt, det udgjorde tværtimod en kontinuitet i udviklingen fra den gamle til den nye teori. I en artikel fra slutningen af 1925, hvori Bohr så tilbage på den stormende udvikling i kvantefysikken, skrev han [9]:

Korrespondensprincippet udtrykker tendensen til at bruge ethvert træk i de klassiske teorier i den systematiske udvikling af kvanteteorien, for derved at give en rationel transskription der passer med den grundlæggende modsætning der er mellem kvantepostulaterne og de klassiske teorier. ... Hele kvantemekanikkens apparat kan ses som en præcis formulering af de tendenser, der er indeholdt i korrespondensprincippet.

### Litteratur

- [1] W. Fadner (1985), The generalized correspondence principle, *American Journal of Physics* **53**, 829-838.
- [2] A. Bokulich (2010), <http://plato.stanford.edu/entries/bohr-correspondence>.
- [3] H. Kragh (1973), *Atomteoriens Historie*. Gyldendal København.
- [4] N. Bohr (1914), Om brintspektret, *Fysisk Tidsskrift* **12**, 97-110.
- [5] H. Kragh (2012), *Niels Bohr and the Quantum Atom*. Oxford University Press.
- [6] M. Dresden (1987), *H.A. Kramers: Between Tradition and Revolution*. Springer Berlin.
- [7] N. Bohr (1923), *Om Atomernes Bygning*, Jul. Gjellerup, København.
- [8] H. Kramers (1935), Atom- og kvanteteoriens udvikling i årene 1913-1925, *Fysisk Tidsskrift* **33**, 82-96.
- [9] N. Bohr (1925), Atomic theory and mechanics, *Nature* **116**, 845-852.



Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie. I forbindelse med 100-året for Bohrs atommodel har han udgivet bogen "Niels Bohr and the Quantum Atom" [5].



# Kvantemekanikkens fødsel

Af Per Hedegård, Niels Bohr Institutet og Nano Science Center, Københavns Universitet

Kvantemekanikken bliver hverken undfanget eller født i løbet af 9 måneder. Man kan med nogen ret sige, at det derimod skete i løbet af en lang udvikling, der startede med Thomsons opdagelse af elektronen i 1897 og sluttede med Diracs ligning og Paulings beskrivelse af den kemiske binding omkring 1930. Præcist midt i denne periode ligger Niels Bohr's afgørende kvante-baserede beskrivelse af brintatomet.

I denne artikel vil jeg kort beskrive, hvordan de forskellige afgørende elementer i den samlede naturbeskrivelse vi kalder kvantemekanikken kom til verden. Kvanteteoriens grundelementer lå færdige i 1930 og siden er det område af fysikken, hvor teorien finder anvendelse — fra sorte huller over superledere og makromolekyler til Higgs-partikler og superstrenger — udvidet enormt. Men de grundlæggende principper har ingen for alvor været i stand til at stille spørgsmåltegn ved.

## Lys, atomer og elektroner

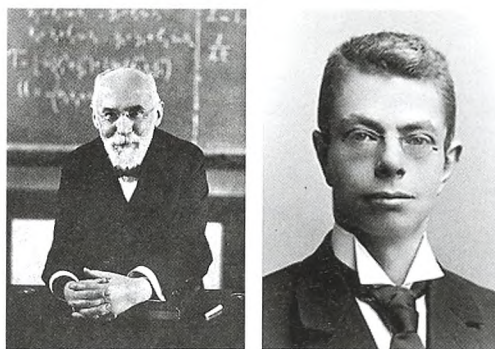
Før den revolutionerende udvikling for alvor kunne tage fart, var det nødvendigt at hovedrolleindehaverne i den tidlige kvanteverden — elektroner og fotoner — var erkendte fysiske realiteter. Hele historien om kvantemekanikken er en blanding af problemer med at finde ud af på den ene side, hvad vores verden er opbygget af (atomer, elektroner, lys, osv), og på den anden side, hvilke naturlove der bestemmer stoffets opførsel. Det sker med J.J. Thomsons opdagelse af elektronen i 1897. Før da havde mange vidst, at der var noget galt med den klassiske beskrivelse af verden. Fx var Maxwell i 1870'erne meget bekymret over varmfylden af visse gasser, og varmestrålingen fra opvarmede legemer passer heller ikke med den klassiske termodynamik og elektromagnetisme. Også før Thomsons forsøg tydede flere ting på eksistensen af en negativt ladet elektrisk partikel.



Figur 1. J.C. Maxwell (1831-1879) og J.J. Thomson (1856-1940).

I 1896 opdagede Zeeman effekten opkaldt efter ham. Ifølge den vil det udsendte lysspektrum fra forskellige atomer kunne ændres, hvis atomet bliver udsat for et magnetfelt. En spektrallinie splitter i mange tilfælde op

i tre linier (med en adskillelse, der er proportional med magnetfeltet). Denne effekt passede fint med en teori, som den store hollandske teoretiske fysiker Lorentz nogle få år før havde fremført. Ifølge Lorentz består stoffet bl.a. af nogle små ladede partikler, elektroner, som kan udføre svingninger omkring ligevægtspunkter og derved påvirke lys, der løber igennem stoffet. Ved at benytte den af ham indførte Lorentz-kraft, kunne Lorentz også vise, at disse små oscillatorer (eller "antennner" om man vil) vil få bevægelser med tre forskellige frekvenser når de bliver udsat for et stærkt magnetfelt. Endvidere ville disse frekvenser afhænge af forholdet mellem elektronernes ladning og deres masse,  $e/m$ . Lorentz og Zeeman fik Nobelprisen i 1902 (den anden uddelte overhovedet). Der var dog såkaldte 'anormale' Zeeman-effekter, hvor en spektrallinie kun opdeles i to linier når stoffet udsættes for et magnetfelt. Dette kunne Lorentz teori ikke forklare. I Thomsons eksperimenter fra 1897 lykkedes det Thomson at løsrive elektroner fra stoffet og måle fx deres  $e/m$  direkte. Han finder en værdi, der passer med den Lorentz og Zeeman finder, og det vel og mærke en værdi, der er meget stor, hvilket tyder på, at elektroner er flere tusinde gange lettere end atomet.



Figur 2. H.A. Lorentz (1853-1928) og P. Zeeman (1865-1943).

Næste kapitel i kvantehistorien er Planck's forklaring fra år 1900 på varmestrålingens spektrum. Ud fra en klassisk betragtning vil mængden af stråling udsendt fra et varmt legeme vokse med frekvensen i 4. potens. Dette havde lord Rayleigh vist samme år. Planck finder først en simpel interpolationsformel mellem Rayleighs klassiske og en empirisk formel for tidligere målinger (der af tekniske grunde kun gælder for høje frekvenser).



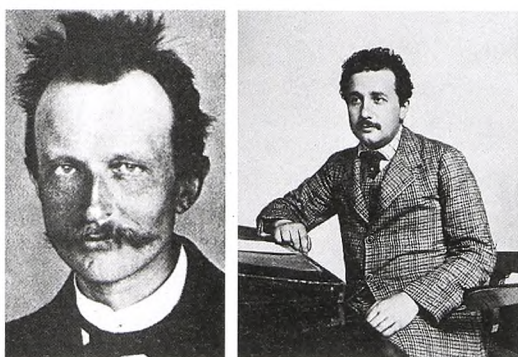
Plancks formel siger at strålingsintensiteten er proportional med:

$$B(\nu) = \frac{2h\nu^3/c^2}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1)$$

Her er  $\nu$  strålingens frekvens,  $T$  er legemets temperatur og  $h$  er en ny konstant, som Planck indfører. Planck benytter den simple matematiske formel:

$$\frac{1}{1 - e^{h\nu/kT}} = 1 + e^{-1 \cdot h\nu/kT} + e^{-2 \cdot h\nu/kT} + \dots, \quad (2)$$

til at slutte, at energien er kvantiseret i enheder af  $h\nu$ . Faktisk er det lidt uklart hvilken energi, der er kvantiseret. Planck synes at mene, at det er energien af de uspecificerede oscillatorer som udsender lys med den givne frekvens, der er kvantiseret. Hvorom alting er, Planck's konstant har set dagens lys, og den 1. november 1900 sættes ofte som kvantemekanikkens fødselsdag.

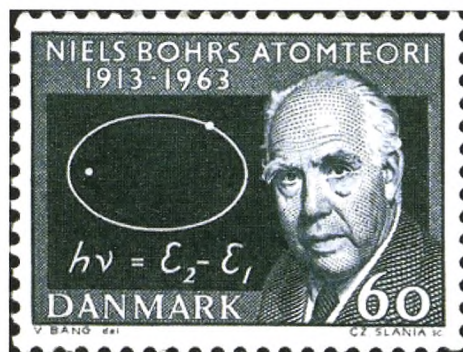


Figur 3. M. Planck (1858-1947) og A. Einstein (1879-1955).

### Einstein og Bohr, energikvanter

Herefter sker der ikke meget på kvantefronten. Man ved ikke rigtigt, hvordan Planck's nye konstant manifesterer sig konkret. Det er først Einstein, der med to arbejder — et i 1905 om fotoelektrisk effekt, og et i 1907 om stoffernes varmfylde — bringer historien videre. I begge tilfælde opererer Einstein med energikvanter. Hertz havde i 1887 iagttaget at lys, der rammer et stykke materiale resulterer i, at der udsendes elektroner fra materialet, og elektronerne har en energi, der er direkte relateret til frekvensen af lyset, og ikke lysets intensitet, som man måske kunne forestille sig. Det skyldes, siger Einstein, at lyset består af korpuskler, hvis energi er direkte proportional med lysets frekvens:  $E = h\nu$ , og det med Plancks konstant som faktor. Einstein genopliver dermed Newtons gamle ide om, at lys er partikler, men benytter dog lysets frekvens — et begreb, der knytter sig til lysets bølgenatur — til at beskrive partiklerne. Meget mystisk! Einstein gentager tryllesnummeret et par år senere, hvor han forklarer, hvorfor varmfylden for visse faste stoffer, som fx diamant, ikke opfylder den klassiske lov, der siger, at varmfylden af et stof er direkte proportional med, hvor mange mol stof der er. Varmen i et stof består af svingninger af atomerne, og Einstein antager, at disse svingningers energi er kvantiseret, og kun kan antage værdier, der er et helt

antal gange  $h\nu$ , hvor  $\nu$  er frekvensen af svingningerne. Denne antagelse fører til en simpel formel, som passer meget bedre med de på den tid nyeste målinger af varmfylden, og det især ved lave temperaturer.



Figur 4. N. Bohr (1885-1962).

Det næste store bidrag til kvantemekanikken kommer med Niels Bohr i 1913. Her skal vi ikke gå i detalje med Bohrs ide, det sker fyldigt andre steder i dette nummer af Kvant. Blot skal nævnes, at Bohr i sin ph.d.-afhandling fra 1911 i høj grad var klar over de mange problemer, der var med at beskrive stofferne, og især metallerne, ud fra antagelsen om, at deres egenskaber var styret af de mange elektroner, som man nu vidste var en vigtig bestanddel af atomerne. Fx konkluderer Bohr i sin sidste sætning i afhandlingen, at magnetisme er helt uforståelig fra et klassisk synspunkt: "Det synes ikke muligt, på Elektrontheoriens nuværende Standpunkt, ud fra denne Theori at forklare Legemernes magnetiske Egenskaber". Bohrs model og ide om stationære baner — orbitaler — tages hurtigt op andre steder i Europa. Især Arnold Sommerfeld i München, som laver en generel formel, der sammen med Bohrs  $h\nu = E_1 - E_2$ , skal blive den gamle kvanteoris hovedresultat. Formlen siger, at kun de klassiske baner er tilladte, som opfylder

$$\oint \mathbf{p} \cdot d\mathbf{r} = nh \quad (3)$$

hvor  $\mathbf{p}$  er elektronens impuls og integralet er langs banen.  $n$  er et helt tal. Der er nu åbnet for muligheden af mere systematisk at beregne diverse spektre af mange atomer. Fx lykkes det Sommerfeld at forklare den såkaldte finstruktur ved at generalisere den klassiske Newtonske bevægelsesligning med Einsteins relativitetsteori og kombinere det med sin kvantiseringsbetingelse.



Figur 5. A. Sommerfeld (1868-1951) og L. de Broglie (1892-1987).



## Partikler og bølger, Heisenberg og Schrödinger

Alt er dog ikke godt. Man har stadig problemet, som Einsteins arbejde understreger: Er lys bølger eller partikler? Snart skal det også vise sig, at det samme spørgsmål kan stilles når det drejer sig om elektronerne — er de bølger eller partikler? I Frankrig postulerer de Broglie, at elektroner er bølger, og sammenhængen mellem deres impuls og bølgelængden er givet ved  $p = h/\lambda$ . Hvis det er korrekt, så kan Bohr-Sommerfeld kvantiseringsbetingelsen fortolkes på den måde, at i et atom må elektronen danne en stående bølge, der har et helt antal bølgelængder rundt i atomet.



Figur 6. W. Heisenberg (1901-1976) og E. Schrödinger (1887-1961).

Det egentlige gennembrud kommer i høj grad fra den næste generation af fysikere. Det er unge mennesker midt i tyverne (med Schrödinger som en undtagelse — han er knap 40 år, da han skriver sin ligning). Werner Heisenberg og Erwin Schrödinger formulerer i 1925 hver sin version af en egentlig kvanteteori, som ender med at afklare partikel-bølge problematikken. Heisenberg er mest revolutionær. Han opgiver ethvert klassisk fysisk billede af den atomare virkelighed. Begreber som *sted* og *hastighed* er ikke direkte anvendelige for elektroner. I teorien bliver de til komplekse matricer i et uendelig dimensionalt vektorrum. Matricer, som opfylder betingelsen

$$xp - px = i\hbar. \quad (4)$$

Schrödinger er lidt mere “venlig”. Han formulerer sin — komplekse — bølgeligning, som fuldender de Broglies idé om at elektroner også er bølger. Det skal dog snart vise sig, at de to teorier er helt ækvivalente. Det viser Schrödinger faktisk selv i 1926.

## Spin og statistik

Kvanteteorien er dog ikke komplet med Schrödinger og Heisenberg. Der er stadig problemer med den anormale Zeeman-effekt, og man har ikke nogen egentlig forklaring på, hvordan elektronerne opfører sig i atomer med mange elektroner. En af de manglende ingredienser er *spin*. To meget unge fysikere, Goudsmit og Uhlenbeck, postulerer, at elektronen har en indre frihedsgrad — den spinner om sin egen akse. Og dette spin kan beskrives med et impulsmoment, hvis værdi er præcis  $\frac{1}{2}\hbar$ . På

trods af en oprindelig skepsis — farten på elektronens “ækvator” lader til at være større end lysets hastighed — tager Wolfgang Pauli ideen op. Pauli er Heisenbergs jævnaldrende studiekammerat fra München, hvor de studerede hos Sommerfeld. Han ser to konsekvenser af spinnets. Dels kan det forklare den anormale Zeeman effekt, dels kan det benyttes til at forklare atomernes opbygning med flere atomer. Spinnets bidrager til Zeeman-effekten, idet en ladet snurrende partikel vil skifte frekvens når den udsættes for et magnetfelt. Vigtigst, så formulerer Pauli sit princip: Der kan højst være en elektron i hver kvantetilstand. Spinnets er afgørende når det drejer sig om atomernes opbygning: en kvantetilstand inkluderer en beskrivelse af spinnets tilstand. Indtil da havde man baggrunden for fx det periodiske system været meget dunkel, hvilket Pauli levende beskriver i sin Nobelforelæsning fra 1945.



Figur 7. S. Goudsmit (1902-1978), G.E. Uhlenbeck (1900-1988) og W. Pauli (1900-1958).

Paulis idé har mange meget vidtrækkende konsekvenser. Heisenberg og den ligeledes unge engelske fysiker Paul Dirac giver en præcis matematisk version af Paulis princip: Den komplette kvantetilstand for flere elektroner skal skifte fortegn, hvis man bytter om på to af elektronerne! Denne version af princippet er meget generelt. Det lader sig nemlig også anvende i situationer, hvor elektronernes indbyrdes vekselvirkning er betydningsfuld og Paulis simple princip ikke kan bruges. Dernæst er den af afgørende betydning for hele faststoffysikken. Det havde nemlig længe været en gåde, hvorfor elektronerne ikke bidrager til varmfyllden i fx metallerne. I Italien sidder en ung studerende, Enrico Fermi, og han har læst Paulis arbejde, og bliver inspireret til at benytte Pauli-princippet i beskrivelsen af en gas af elektroner, som man må forestille sig den i et metal. Han viser, at der kommer en helt naturlig forklaring på den manglende varmfylde, og desuden viser det sig, at selv ved lave temperaturer vil en elektrongas have et meget stort tryk. Den såkaldte Fermi-Dirac statistik er født.



Figur 8. E. Fermi (1901-1954), P.A.M. Dirac (1902-1984) og S.N. Bose (1894-1974).



Alle disse udviklinger drejer sig om elektroner. På lysfronten er der tilsvarende problemer. Her afklares problemerne med et bidrag fra en uventet side: Den unge indiske fysiker, Satyendra Nath Bose, skriver et brev til Einstein i 1924. Heri beder han Einstein om at kigge på en artikel, som Bose har skrevet igennem, og om muligt sørge for at den bliver publiceret. Einstein er meget begejstret for Boses ide. Bose forestiller sig nemlig, at lys er en gas af identiske partikler. Den statistiske beskrivelse af disse partikler er dog anderledes end den, som man benytter for klassiske partikler. Det postuleres, at to tilstande for gassen af lyspartikler, som blot afviger ved, at to af partiklerne er byttet om, skal opfattes som én tilstand. Med denne simple antagelse kan Bose fx let udlede Plancks formel for varmestråling. Den såkaldte Bose-Einstein statistik er født.

Siden 1929 har vi klassificeret elementarpartikler alt efter om de opfylder Fermi-Dirac eller Bose-Einstein statistik. Partikler, der opfylder Fermi-Dirac statistik (eller om man vil, Pauli princippet) klassificeres som *fermioner*, mens partikler, der opfylder Bose-Einstein statistik, er *bosoner*.

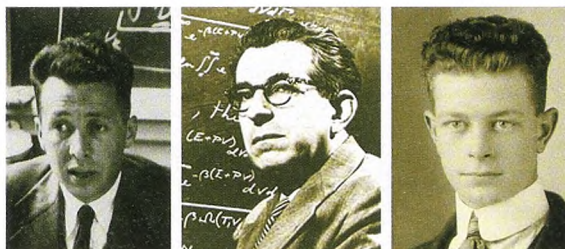
### Exchange og Magnetisme

Kombinationen af spin og Pauli-princip skal i slutningen af 1920'erne vise sig at være nøglen til forståelsen af to meget store gåder: Hvorfor er stofferne magnetiske, og hvorfor binder atomer sig sammen i molekyler? Hvis en elektron spinner, så kan den opfattes som en lille strømførende spole, og en sådan har man vidst siden Ampere og Ørsted i 1820'erne vil opføre sig som en magnet med nordpol og sydpol. Men i en rigtig magnet lader det til, at de små elektroniske magneter har deres nordpoler pegende i samme retning. Klassisk set er det helt umuligt, det vil koste for meget energi. Heisenberg opdager imidlertid, at det kan være energetisk favorabelt for elektroner at have spin pegende i samme retning. I så fald er elektronerne nemlig identiske, og må ifølge Pauli princippet ikke være i samme tilstand, hvilket i praksis for visse atomer kan betyde, at elektroner må undgå at komme tæt på hinanden. Men da elektroner i forvejen frastøder hinanden, da de er negativt ladede, så er der herved opstået en måde at "spare" elektrisk energi ved at lade spinnene pege i samme retning. Heisenberg kaldte denne subtile vekselvirkning mellem spin for *exchange*. Exchange forklarer altså eksistensen af makroskopiske ferromagneter. Tankegangen har imidlertid meget omfattende konsekvenser. Store dele af kernefysikken er domineret af exchange.

### Exchange og kemiske bindinger

Men mest vigtigt er det ganske givet, at også forklaringen på den kemiske binding skyldes en form for exchange-vekselvirkning. To — naturligvis unge — tyske fysikere, Walter Heitler og Frits London, studerer i 1928 det simpleste molekyle,  $H_2$ . Ved at benytte Heisenberg og Paulis principper lykkes det dem at vise, at de to brintatomer foretrækker at binde sig til hinanden, og denne gang som følge af en exchange vekselvirkning, hvor molekylets to elektroners spin

vinder energi ved at pege modsat hinanden. Denne ide påvirker den amerikanske kemiker Linus Pauling, som på denne tid i slutningen af 20'erne er postdoc på forskellige europæiske fysikinstitutter, bl.a. i København hos Bohr. Her lærer han den nye kvanteteori direkte fra dens "fædre", og han bliver så begejstret for Heitler og Londons ide, at han udvikler den til en meget omfattende teori for meget store klasser af molekyler. Mange af kemiens empiriske håndregler, om elektronpar, oktetreglen osv. finder med et slag en kvantefysisk forklaring.



Figur 9. W. Heitler (1904-1981), F. London (1900-1954) og L. Pauling (1901-1994).

### Dirac: Spin og antipartikler

Det sidste afgørende bidrag til kvanteteorien giver Paul Dirac i 1929. Han sætter sig for at kombinere Einsteins relativitetsteori med kvanteteorien. Resultatet bliver en simpel ligning, Dirac-ligningen, der beskriver en enkelt relativistisk elektron. Den simple ligning har meget dybe konsekvenser: Elektronens spin "opstår" i ligningen og behøver ikke længere postuleres, det er en konsekvens af relativitetsteorien. Dernæst viser det sig, at ideen om *anti-partikler* følger naturligt fra ligningen. Det viser sig nemlig, at ligningen har løsninger med negativ energi. Dirac foreslår, at disse løsninger i almindelighed (altså i vakuum) er fyldt med elektroner (i stil med den Fermi-gas af elektroner, som Fermi beskrev for elektronerne i et metal). Skulle en af tilstandene ikke være fyldt, opstår et — positivt ladet — hul. Dette hul er elektronens anti-partikel, positronen.

### Konklusion

I 1930 er alle de nævnte elementer i kvanteteorien på plads, og der har faktisk ikke siden været tilføjet noget. Al kvantefysik har siden drejet sig om at anvende disse principper og forklare alskens fysiske fænomener. Til dato er det lykkedes over al forventning, og der kendes stadig ingen fænomener, hvor man må formode, at kvanteteorien kommer til kort.



Per Hedegård, professor, Niels Bohr Institutet og Nano Science Center, KU. Per Hedegård er teoretisk faststoffysiker og beskæftiger sig fx med molekylær nanoelektronik. Nærværende artikel er baseret på et foredrag givet i anledningen af Niels Bohr-året.



# Den Internationale Fysikolympiade i Danmark juli 2013

Af Henrik Bruus, Danmarks Tekniske Universitet og Niels Hartling, Birkerød Gymnasium

Mandag morgen den 8. juli 2013 kl. 9:30 samles omkring 450 gymnasieelever fra mere end 80 lande i den store festsal på Danmarks Tekniske Universitet for sammen med et par hundrede af deres medrejsende lærere og et mindst lige så stort antal danske værter, organisatorer, honoratiores og assistenter at fejre åbningen af den ugelange 44. International Physics Olympiad (44th IPhO). Eleverne har et særligt talent for og kunnen i faget fysik, og gennem det sidste halve til hele år har de været gennem en række hårde udvælgelsesprøver og træningssessioner i deres respektive hjemlande, og nu gælder det den skrappe internationale konkurrence om guld-, sølv- og bronzemedaljer i teoretisk og eksperimentel fysik.

IPhO afholdes hver sommer på skift mellem deltagerlandene, som melder sig til via deres respektive undervisningsministerier. IPhO blev afholdt første gang i 1967 i Polen, og i de første år var der tale om et Øst-europæisk initiativ med mindre end 10 deltagerlande. Efterhånden er flere og flere lande kommet med, fx Sverige fra 1976, Norge fra 1984 og USA fra 1986. Danmark deltog første gang i 1996 og har været med hvert år siden da. Hvert land, uanset størrelse, sender 5 deltagere. Deltagerne må være højst 20 år gamle, og de må ikke have påbegyndt et universitetsstudium. I Danmark betyder det, at deltagerne i reglen er nybagte studenter, men i nogle tilfælde har også 2.g-elever kvalificeret sig til landsholdet. De lande, som deltager, forpligter sig til at påtage sig værtskabet på et tidspunkt. Det blev allerede i 1998 fastlagt, at Danmark skulle have værtskabet i 2013, og daværende undervisningsminister Margrethe Vestager udsendte en officiel invitation i 1999. Året 2013 blev valgt, så IPhO ville være i Danmark på 100-året for Niels Bohrs epokegørende teori for brintatomet.



**Copenhagen Denmark 7-15 July 2013**

Det var ellers ikke så let at få Danmark med i IPhO. For 25-30 år siden var det ikke "comme il faut" at gøre noget for de allerbedste i skolen, og der var faktisk en del modstand mod dansk deltagelse. Indstillingen var, at dette projekt ikke var i tråd med dansk undervisningstradition. Det var et eliteprojekt præget af gold konkurrence. Det er jo om denne tid – lidt overdrevet – blevet sagt, at det, som ikke alle kunne lære skulle ingen

lære. Og den indstilling var så meget mere forunderlig, som at alle samtidigt syntes, at det var helt i orden, at man dyrkede eliten, når det fx gjaldt fodbold, musik eller ballet. Situationen har helt ændret sig, og man mærker på skolerne, at der er nu er en respekt og interesse omkring konkurrencerne, ikke bare i fysik, men også i andre matematisk-naturvidenskabelige fag. Mange elever deltager, og de går op i det med liv og sjæl. De elever som udtages, ofrer weekend efter weekend på at dygtiggøre sig, og klassekammeraterne ser det ikke som elite og gold konkurrence, de er tværtimod positive og stolte, hvis en fra klassen klarer sig flot. Og vi, som er med til at træne eleverne, har hvert år oplevet, at der ikke er tale om kedelige nørder, men om højtbegavede unge mennesker med mange alsidige interesser og kompetencer. Det er vores erfaring at fysikolympiadedeltagerne gennem arbejdet med faget og gennem den anerkendelse, de får, i langt de fleste tilfælde fortsætter en videreuddannelse indenfor fysik eller ingeniørvidenskab, til glæde for dem selv og for Danmark.

Men ikke bare i gymnasieskolen mærker man en stigende forståelse for at der skal være plads til denne type konkurrencer, hvor de dygtigste bliver udfordret. Man mærker generelt en stigende accept af, at man for at få en stor og god bredde også må tilgodegode den såkaldte elite. Det har man ganske vist været klar over i årevis inden for sportsverdenen, men det er også nu blevet forstået inden for gymnasieverdenen. Og hvis nogle lidt bekymret spørger, om det nu ikke er meget konkurrencepræget, så er svaret: Jo! Det er hård konkurrence, og sådan skal det være. Og for vores allerbedste er det måske også sundt at opdage, at selvom de er de bedste i Danmark, kan de være meget langt fra at være de bedste i verden. Ved IPhO hædres de bedste studenter med henholdsvis guld-, sølv-, bronzemedaljer, samt hædrende omtale efter følgende fordelingsnøgle: De bedste 8 % af deltagerne (ca. 35) tildeles guld, de næste 17 % (ca. 75) tildeles sølv, de næste 25 % tildeles (ca. 110) tildeles bronze, og endelig får de næste 27 % (ca. 120) hædrende omtale. Således får 2/3 af deltagerne en præmie med hjem. De internationale fysikolympiader omgives i mange lande



med meget stor prestige og stor mediebevågenhed. For deltagerne i flere lande betyder en medalje ved en sådan konkurrence et tilbud om at komme på de bedste universiteter. Dette er nok ikke helt i overensstemmelse med mentaliteten i Vesteuropa og da slet ikke i Norden. At konkurrencen er knaldhård illustreres af, at Danmark efter 15 års deltagelse aldrig har vundet hverken guld eller sølvmedaljer. Sammenlignet med vore nabolande, har vi dog alligevel formået at hævde os pænt.

I Danmark begynder udvælgelsen af landsholdet til IPhO hvert år sidst i oktober måned med en første teoprøve afholdt rundt om i landets gymnasie- og HTX-klasser. Hver lærer sender de bedste besvarelser fra den lokale prøve til Den Danske Fysikolympiade Komité, som blandt de indsendte ca. 150 besvarelser finder de bedste 35. Disse 35 elever inviteres til en landsprøve på Niels Bohr Institutet sidst i november måned. De bedste 12 elever ved landsprøven modtager som præmie den 1600 sider tykke lærebog "University Physics", som de skal gennemgå i løbet af fem træningsweekender fra januar til april ved Danmarks Tekniske Universitet, Birkerød Gymnasium, Århus Universitet, og Københavns Universitet. Ved den femte og sidste træningsweekend udvælges det endelige 5-personers landshold efter en teoretisk og en eksperimentel prøve. Vinderne af alle de danske gymnasieolympiader fejres sidst i april på Carlsberg Museet ved et arrangement afholdt af olympiadernes hovedsponsor, Carlsbergs Mindelegat, med deltagelse af undervisningsministeren, og derefter går træningen ind i den sidste fase inden afrejsen til IPhO og de øvrige olympiader midt på sommeren.



**Figur 1.** Det danske hold, som deltog i IPhO43 i Estland i 2012 – alle fem fra Jylland. Fra venstre mod højre ses: Kasper Tolborg (Brønderslev Gymnasium), Molte Emil Strange Andersen (HTX Tradium, Randers), Jakob Lass (Hasseri Gymnasium), Christian Aamand Witting (HTX Esbjerg) og Nikolaj Theodor Thams (Haderslev Katedralskole). Kasper, Molte og Nikolaj opnåede hædrende omtale.

Nu er det blevet Danmarks tur til at være vært for IPhO, og mandag den 8. juli begynder IPhO 2013 med HKH Kronprins Frederik som protektor. Eleverne skal dyste i teoretisk og eksperimentel fysik i en række opgaver på første års universitetsniveau, som Den Danske Fysikolympiadekomité i skrivende stund er ved at udarbejde, og som deltagerlandenes ledere skal godkende og

oversætte til deres respektive sprog umiddelbart inden det går løs. Værtskabet er en meget stor opgave, som har været forberedt gennem flere år, og som vel nærmest svarer til en ugelang, stor international conference med omkring i alt 700 gæster (fem elever fra hvert land, to ledere samt observatører og øvrige gæster) og ca. 300 lokale værter (organisatorer, guider og assistenter mm.). Dertil kommer, at deltagerlandene i følge IPhO's regler kun betaler egne rejseudgifter samt et frivilligt deltagergebyr på 3500 EUR, mens værtslandet dækker alle øvrige udgifter, så en ikke uvæsentlig del af Fysikolympiadekomitéens arbejde har været at rejse de ca. 15 MDKK, som arrangementet koster, og her har Undervisningsministeriet, en række private fonde, samt Danmarks Tekniske Universitet og Københavns Universitet været meget imødekommende og bidraget med de nødvendige økonomiske og logistiske midler.

IPhO 2013 arrangeres af Fysikolympiadekomitéen i samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet og Københavns Universitet. Fysikolympiadekomiteen består af en række personer primært inden for gymnasie- og universitetsverdenen og den ledes af lektor Niels Hartling, professor Henrik Bruus og direktør Christian Thune Jacobsen. IPhO 2013 finder sted den 7.-15. juli 2013 med åbningsceremoni mandag den 8. juli og afslutningsceremoni søndag den 14. juli. Læs mere om IPhO 2013 på hjemmesiden, [www.ipho2013.dk](http://www.ipho2013.dk), hvor man også kan se den velkomstvideo, som Den Danske Fysikolympiadekomité præsenterede ved IPhO 2012 sidste sommer i Estland. Er du interesseret i at bidrage til afviklingen af IPhO 2013, så henvend dig til en af forfatterne.

## Litteratur

- [1] [www.ipho2013.dk](http://www.ipho2013.dk)



*Henrik Bruus* er professor i teoretisk fysik Ved Danmarks Tekniske Universitet. E-mail: [bruus@fysik.dtu.dk](mailto:bruus@fysik.dtu.dk).



*Niels Hartling* er lektor på Birkerød Gymnasium. E-mail: [Niels.Hartling@skolekom.dk](mailto:Niels.Hartling@skolekom.dk).



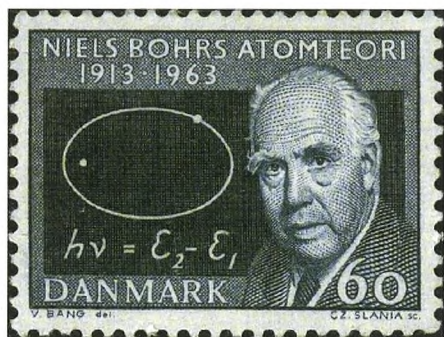
# Hundrede år efter Bohr: Nobelprisen for fysik under gennemsnittet

Af Brian Julsgaard og Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

I 2012 blev nobelprisen i fysik givet for eksperimenter på enkelte atomer og fotoner. Eksperimenterne har bekræftet kvantemekanikkens helt basale forudsigelser om, hvad der sker, når man f.eks. måler på et kvantesystem. I denne artikel beskriver vi nogle af disse eksperimenter, som Niels Bohr og kredsen af fysikere bag den kvantemekaniske revolution i perioden 1900-1930 kun kunne have drømt om.

## Bohrs atommodel

I 1913 publicerede den danske fysiker Niels Bohr sin berømte model for sammensætningen af stoffets mindste bestanddele: Atomer består af elektroner, der kredser om en atomkerne ligesom planeterne bevæger sig om Solen. I 1900 havde den tyske fysiker Max Planck foreslået, at lys med frekvens  $\nu$  kun kan udsendes i pakker, eller kvanter, med energi  $\mathcal{E} = h\nu$ , hvor  $h$  er Plancks konstant, og Bohrs bedrift var at forklare, hvorfor sammensætningen af lys fra atomare gasser ikke rummer alle farver men kun består af bestemte spektrallinjer. Til det formål postulerede Bohr, at (i) kun helt bestemte baner med dertil hørende energier er tilladte og (ii) absorption eller udsendelse af lys finder sted, når elektronerne foretager et *kvantespring* mellem to baner. Bevarelse af den samlede energi i atomet og i lyset giver nu en formel, der er så simpel, at den kan stå på et frimærke (og som er så vigtig, at den gør det):



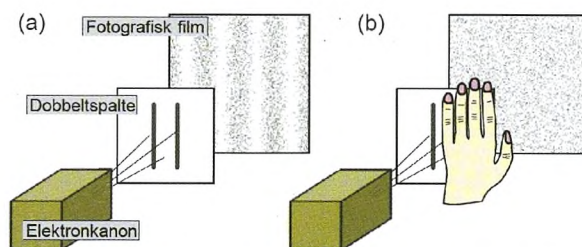
(1)

hvor  $\mathcal{E}_1$  og  $\mathcal{E}_2$  er energierne hørende til to forskellige baner, og  $\nu$  er frekvensen af det udsendte lys. Modellen forklarer frekvensspektret (dvs. farvesammensætningen) af lyset, og Niels Bohr fik i 1922 Nobelprisen i fysik for *sit bidrag i undersøgelsen af atomers struktur og lyset udsendt fra dem*.

## Kvantemekanikken bliver til

Niels Bohr gav et argument for præcist hvilke baneenergier, der er tilladte i brintatomet. Hans argument holdt dog ikke for mere komplicerede atomer, så derfor måtte en mere komplet teori udvikles. I 1926 fremsatte den østrigske fysiker Erwin Schrödinger en sådan teori, der erstatter elektronernes bevægelse i klassiske baner med

matematiske bølger, der svinger i rum og tid. Denne teori, for hvilken Schrödinger fik Nobelprisen i fysik i 1933 (sammen med Paul A.M. Dirac, der videreudviklede Schrödingers teori), kendes i dag som kvantemekanikken, og Schrödingers ligning danner det matematiske fundament for bølgebeskrivelsen. Løsninger til Schrödingers ligning, de såkaldte *bølgefunktioner*, svarer til f.eks. svingningerne af en guitarstreng eller af luften i en orgelpibe, hvor kun helt bestemte frekvenser er tilladte og bestemmer instrumentets toner. Tilsvarende giver Schrödingers ligning de tilladte energier for f.eks. mere komplicerede atomer eller molekyler, og Bohrs formel (1) giver de tilladte frekvenser af deres udsendte lys. Schrödingers mikroskopiske bølgebeskrivelse udfordrer vor dagligdags opfattelse af den fysiske verden: Hvor er elektronerne i virkeligheden henne, hvis de beskrives som bølger? Den tyske fysiker Max Born gav i 1926 svaret på dette spørgsmål: "Det ved vi ikke, men kvadratet på de stedafhængige bølgefunktioner angiver *sandsynligheden* for at finde en elektron forskellige steder i rummet, *når* målingen foretages". Denne forklaring, som belønnedes med Nobelprisen i fysik i 1954, sammenkobler den matematiske teori med målinger, som vi kan foretage i laboratoriet. Et glimrende eksempel herpå er dobbeltspalteeksperimentet, se figur 1, hvor enkelte elektroner beskyder en skærm med to spalter. Så længe vi ikke måler, om elektronen passerer den ene eller den anden spalte, vil bølgefunktionens bidrag fra de to spalter interferere, og måleresultaterne vil udgøre et stribet mønster.



**Figur 1.** Dobbeltspalteeksperimentet. (a) Elektroner beskyder en skærm med to spalter, og bølgebeskrivelsen af elektronbevægelsen giver anledning til et interferensmønster på en fotografisk film. Hvis en af spalterne blokeres, som vist i (b), ved man, hvilken rute elektronerne følger, og interferensmønsteret forsvinder.



I de fleste anvendelser af kvantemekanikken studeres meget store antal partikler, og vi observerer fordelinger af måleresultaterne som i figur 1 forudsagt af bølgeteorien. I 1952 skrev Schrödinger i en artikel: "Vi eksperimenterer ikke med enkelte partikler ligesom vi ikke opdrætter Ichtyosaurusser i zoologisk have", underforstået at det tilfældige element af den enkelte måling er et filosofisk paradoks, men ikke et praktisk problem for fysikken. Inden for de seneste tre årtier har kvantemekanikken imidlertid bevæget sig ind i en ny tidsalder, hvor enkelt-partikel eksperimenter er blevet mulige. I 2012, næsten hundrede år efter Bohrs atommodel, blev Nobelprisen i fysik således givet til den amerikanske fysiker David Wineland og den franske fysiker Serge Haroche for deres *banebrydende eksperimentelle metoder, der muliggør måling og manipulation af enkelte kvantesystemer*. Vi vil i det følgende beskrive disse to forskeres arbejde, som har stærke rødder helt tilbage til Bohrs atommodel.



**Figur 2.** Alfred Nobel (i midten) flankeret af Serge Haroche (tv) og David Wineland (th).

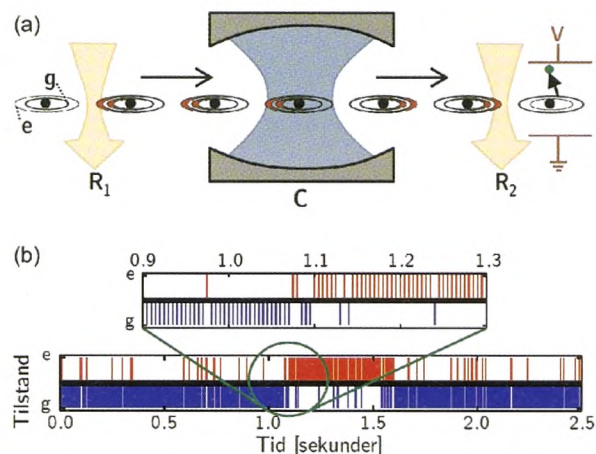
### Eksperimenter med enkelte lyskvanter

Vi vil i det følgende bruge Bohrs betegnelse – baner – om de forskellige fysiske tilstande af elektronen, og så selvom de beskrives matematisk med Schrödingers bølgefunktioner, der beskriver sandsynligheden for at finde elektronen forskellige steder omkring atomkernen. Bohrs atommodel siger, at lyskvanter, eller fotoner som de også kaldes, enten kan udsendes ved at en elektron skifter til en bane (bølgefunktion) med lavere energi eller absorberes, når en elektron skifter til en højere liggende bane. Disse processer er normalt svage, og en enkelt foton skal passere mange atomer, inden det er sandsynligt, at et af dem absorberer fotonen. Serge Haroche har derfor forfinet sine eksperimenter på tre afgørende punkter:

- Han kan præcist kontrollere atomernes bevægelse, et ad gangen, gennem forsøgsopstillingen,
- Han forbereder atomerne i en bestemt bane med (mest sandsynlig) afstand 0,13 mikrometer til atomkernen, hvilket er 2.500 gange mere end banen med lavest energi i brint,
- Den centrale del af forsøgsopstillingen er omkranset af en meget højt-reflekterende kavitet, dvs. to spejle, hvorimellem lys kan rejse frem og tilbage ca. en milliard gange uden at gå tabt.

Atomets ekstreme størrelse bevirker, at chancen for at indfange eller udsende en foton er drastisk forøget, og

kaviteten bevirker, at fotoner får rigtig mange chancer for at vekselvirke med det samme atom. Det gør koblingen så stærk, at Serge Haroche i 1996 kunne observere et enkelt atom udsende og indfange én og samme foton op til flere gange efter hinanden. Herefter blev atomernes rolle i eksperimenterne typisk at manipulere eller detektere lyset mellem de to spejle, se eksemplet i figur 3, der viser en ftons fødsel, levned og død [1].



**Figur 3.** (a) Skitse af Serge Haroches fotonmålinger. Atomer flyver gennem forsøgsopstillingen fra venstre mod højre. Først initialiseres atomerne i elektronbanen g, og med stråling  $R_1$  flyttes elektronen til en planet-agtig banebevægelse i et særligt samspil mellem elektronbanerne g og e, en såkaldt superposition af de to tilstandes bølgefunktioner. Elektronens bevægelse er meget følsom over for tilstedeværelse af selv enkelte lyskvanter i kaviteten og eksperimentet kan justeres således, at hvis et atom passerer kaviteten C indeholdende blot en enkelt foton, vil elektronen cirkulere en ekstra halv omgang om kernen i forhold til tilfældet med en tom kavitet. Når atomet har forladt kaviteten, bruges strålingen  $R_2$  til at overføre elektronen til banen e (eller til g, hvis kaviteten var tom og elektronen ikke tog den ekstra halve runde). Tilstanden e kan detekteres, fordi elektronen kun er svagt bundet, og atomet kan ioniseres med et elektrisk felt. (b) Skitse af signalet fra ionisationsdetektoren som funktion af tiden, dvs. tilstanden af hvert enkelt udgående atom. Bortset fra enkelte isolerede fejlmålinger viser signalet gennem lang tid, at der ikke er en foton i kaviteten, men omkring  $t = 1,1$  s opstår en foton i C (fra ekstern varmestråling), og den forsvinder igen (pga. tab i kaviteten) omkring  $t = 1,6$  s.

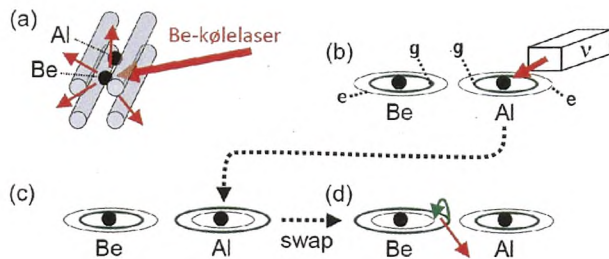
### Eksperimenter med enkelte ioner

David Wineland udfører forsøg med ioner, dvs. atomer, der mangler en elektron, og som indfanges og fastholdes i en ionfælde vha. elektriske felter fra særligt designede elektroder. Gennem en årrække er disse forsøg blevet forfinet på følgende punkter:

- Det er muligt at påvirke ionerne med laserlys, så de kommer til at ligge helt stille (således at ikke blot elektronernes opførsel, men hele atomets bevægelse i fælden beskrives af bølger),
- Det kan kontrolleres og måles med stor nøjagtighed, hvilken Bohr-bane elektronen i en enkelt ion befinder sig i,
- Hvis der er flere ioner i fælden, kan de, pga. deres elektriske frastødning, skubbe til hinanden, og vha. laserteknikker kan man få ionernes indre tilstande til at kommunikere med hinanden.



I modsætning til Serge Haroche benytter David Wineland altså lys til at styre og detektere de atomare partikler, og udviklingen og brugen af lasere med stor frekvensstabilitet har haft afgørende betydning for hans forskning.



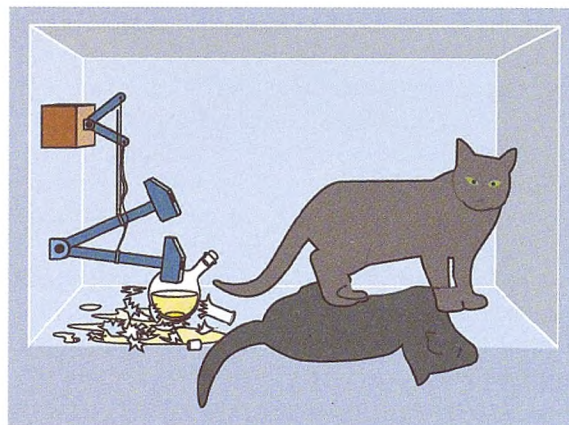
**Figur 4.** Skitse af David Winelands atomur. (a) En Al- og Be-ion er fanget mellem elektroder i en ionfælde, og Be-ionsens bevægelse nedkøles med en laser. Pga. ionernes elektriske frastødning fjernes bevægelsesenergien (varmen) fra *begge* ioner, og også Al-ionen kommer til at ligge stille. Vi ønsker at kontrollere, om laserlys med frekvensen  $\nu$  opfylder  $\nu = \nu_0$ , og dette lys sendes nu ind på Al-ionen (b), som får sin elektron eksiteret til banen  $e$  som vist i (c). Hvis laserlyset er svagt vil denne proces være meget langtvarende og chancen for, at Al-ionen skifter elektronbane, bliver ultra-følsom over for frekvensbetingelsen  $\nu = \nu_0$ . Med særlige laserteknikker, udføres nu en swap operation, dvs. Be-ionen bliver eksiteret, betinget af at Al-ionen var eksiteret. Den eksiterede Be-ion i (d) kan effektivt udføre kvantespring og udsende lys, som kan detekteres.

Et af David Winelands forskningsområder handler om ultra-præcise atomure, der kan bruges som referencer for tids- og frekvensmålinger, og hvor det er vigtigt, at to forskellige ure, evt. placeret vidt forskellige steder i verden, går helt ens. Bohrs atommodel kan benyttes til at opfylde denne betingelse: En standardiseret frekvens  $\nu_0$  kan vælges således, at den iflg. formel (1) netop passer til energien mellem to elektronbaner i et valgt atom. Frekvensen  $\nu$  af lyskilder kan overalt i verden sammenlignes med  $\nu_0$  ved at undersøge, om man kan tilføre energi til den valgte type atom. David Wineland benytter sig af elektronbaner, hvor de styrende kræfter overvejende kommer fra atomets indre elektriske felter og ikke fra ydre ukontrollerbare påvirkninger, så to forskellige atomure vil være helt enige om frekvensen. For at opnå en meget høj præcision er det afgørende at registrere mange svingninger. Det tager lang tid, og en enkelt isoleret ion i en fælde er velegnet til formålet. En langvarig måling er dog kun mulig på en ion, hvis den ikke alt for hurtigt vil skifte elektronbane og udsende lys af sig selv. David Wineland har i sine seneste forsøg brugt en aluminium-ion,  $^{27}\text{Al}^+$ , hvor en særligt langlevende elektrontilstand kun udsender lys i gennemsnit hvert tyvende sekund. Tilstandens lange levetid bevirker imidlertid, at ionen ikke kan bringes til hvile ved hjælp af laserlys, og det kan kun vanskeligt detekteres, hvilken tilstand elektronen befinder sig i. Wineland har udviklet en snedig løsning ved at indsætte en beryllium-ion,  $^9\text{Be}^+$ , i den samme fælde.  $^9\text{Be}^+$ -ionen kan bringes til hvile med laserlys, og trækker dermed også energien ud af  $^{27}\text{Al}^+$ -ionen. Hvis vi tænker på de to ioner som et enkelt samlet fysisk system,

kan vi ændre deres samlede tilstand, hvis vi tilfører eller fjerner den nødvendige mængde strålingsenergi. Er for eksempel  $^{27}\text{Al}^+$ -ionen i tilstanden med den høje energi  $\mathcal{E}_2^{\text{Al}}$ , mens  $^9\text{Be}^+$ -ionen har sin laveste energi  $\mathcal{E}_1^{\text{Be}}$ , er den samlede energi  $\mathcal{E}_2^{\text{Al}} + \mathcal{E}_1^{\text{Be}}$ , og vi skal tilføre energien  $(\mathcal{E}_2^{\text{Be}} - \mathcal{E}_1^{\text{Be}}) - (\mathcal{E}_2^{\text{Al}} - \mathcal{E}_1^{\text{Al}})$  for at begge ioner skifter tilstand. Således vil  $^9\text{Be}^+$ -ionen ende i tilstanden med den høje energi, og ved et kvantespring vil denne hurtigt henfalde og udsende lys, som dermed indirekte afslører  $^{27}\text{Al}^+$ -ionens tilstand. Den nødvendige energi kan tilføres til de to ioner ved at lyse på dem med to laserstråler, hvis frekvenser netop er afstemt, så der efter ligning (1) bliver energibevarelse, men kun hvis begge ioner skifter tilstand. Præcisionen af dette atomur er  $\delta\nu/\nu \approx 10^{-17}$ , svarende til en tidsforskel på få sekunder over hele universets alder. Nøjagtige tidsmålinger har betydning for kommunikation og navigation, f.eks. gennem GPS systemet, og inden for grundforskningen kan man bl.a. teste, om naturkonstanterne faktisk er konstante eller undersøge korrektheden af Einsteins generelle relativitetsteori. Sidstnævnte siger, at tiden går langsommere i et tyngdepotentiale, og ved at sammenligne to atomure og hæve det ene med blot 33 cm, kunne David Wineland i 2010 påvise en målbar forskel i overensstemmelse med relativitetsteorien [2].

### Schrödingers kat har fået killinger

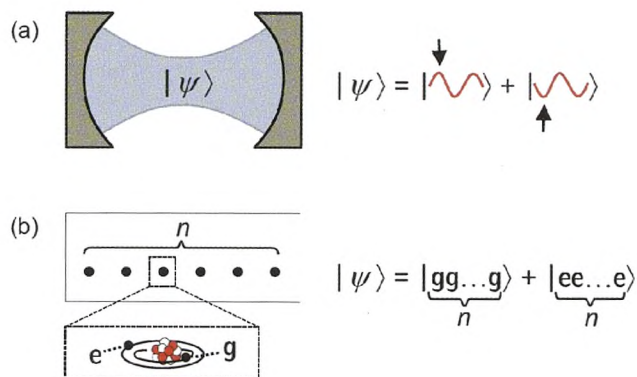
Erwin Schrödinger fandt selv kvantemekanikkens beskrivelse af naturen utilfredsstillende, og han udtrykte i 1935 med det såkaldte katteparadoks sin bekymring for opdelingen af fysikken i en mikroskopisk verden med bølger og en makroskopisk verden med tilfældige målinger, se figur 5.



**Figur 5.** I en lukket kasse er en Geigertæller placeret nær en så lille mængde radioaktivt materiale, at sandsynligheden for et udslag i løbet af en time er 50 %. Hvis et radioaktivt henfald registreres, udløses en hammer, der smadrer en flaske med blåsyre, der vil dræbe en kat, som således har en fifty-fifty chance for at overleve efter en time. Schrödinger fandt det absurd, at en bølgeteori skulle kunne redegøre for, hvad der foregår i kassen, for i sådan en teori ville katten efter en time (inden kassen åbnes), være beskrevet som *både* levende *og* død, og dens skæbne ville først afgøres tilfældigt, idet kassen åbnes. Paradokset stiller spørgsmålet: Hvor går grænsen mellem bølgefunktionens "både-og" og måleresultaternes "enten-eller"?



Mange år senere har både Serge Haroche og David Wineland ladet sig inspirere af dette katteparadoks og forsøgt at skabe kvantetilstande med mikroskopiske kvantemekaniske partikler i kontakt med lidt større fysiske systemer. De store systemer er endnu ikke så store som katten i figur 5, og vi kalder derfor de opnåede tilstande for Schrödingers killinger, se figur 6.



**Figur 6.** (a) Serge Haroches Schrödinger-killing: Lyset i en kavititet svinger som en helt almindelig sinusbølge, dog i en kvantetilstand, så der bestemte steder i bølgen (f.eks. markeret med pilene) er *både* en bølgetop og en bølgedal på samme tid. Notationen til højre er fysikerens måde at udtrykke denne såkaldte superposition. (b) David Winelands Schrödinger-killing: Et antal af  $n$  ioner er placeret i en ionfælde og kan hver især have sin elektron i en af to elektronbaner,  $g$  eller  $e$ . I forsøget laves en tilstand, hvor alle ioners elektron er i den samme tilstand, men de er alle i banen  $g$  og samtidigt i banen  $e$ .

Lysbølger er svingende elektriske og magnetiske felter, og Serge Haroche skabte i 1996 lysfelter i sin kavititet, hvor feltet svingede *både* til den ene *og* den anden side på samme tid. Når han efterfølgende lod et atom vekselvirke med den skabte killinge-tilstand, kunne han iagttage feltets “både-og”-karakter som en interferens mellem de to tilstande, atomet ville have været i, hvis felt-tilstanden havde haft “enten-eller”-karakter [3]. David Wineland kunne i 2000 skabe en tilstand i sin ionfælde, hvor elektronerne i fire ioner *både* er i banen  $e$  og i banen  $g$  samtidigt (i 2005 lykkedes det med seks ioner [4]). Hvis  $n$  angiver antallet af ioner, kunne han bevise “både-og”-karakteren, ved at ionerne altid opførte sig som et enkelt system med to fysiske tilstande, separeret af energien  $n\hbar\nu$ , og ikke som  $n$  ioner, som hver især har tilstande separeret af energien  $\hbar\nu$ . Serge Haroches forsøg viste klart, at jo kraftigere hans “både-og”-svingninger var, des hurtigere ville tab af selv ganske lidt lys få interferensen mellem de to tilstande til at forsvinde, og en klassisk “enten-eller”-beskrivelse ville være tilstrækkelig til at forklare målingerne. På samme måde, skal man i David Winelands tilfælde blot forstyrre eller måle tilstanden af en enkelt ion, for at de resterende  $n - 1$  ioner mister deres “både-og”-karakter. Jo flere ioner, der er i Winelands Schrödinger- katsystem, des mere sandsynligt er det, at blot en af dem på et tidspunkt forstyrres. I både Serge Haroches og David Winelands forsøg gælder det altså at jo mere makroskopisk vi gør kvantesystemet,

jo hurtigere henfalder “både-og”-bølgebeskrivelsen til en statistisk “enten-eller”-beskrivelse. Det er en vigtig del af forklaringen på, hvorfor vi ikke observerer rigtige (levende og døde) Schrödingers- katte i hverdagen: Schrödingers killing bliver til en klassisk kat, når den bliver stor!

## Fysik under gennemsnittet

Serge Haroches og David Winelands eksperimenter på enkelte og isolerede systemer har et helt særligt kvantemekanisk perspektiv. Deres observationer demonstrerer, hvordan den gennemsnitlige opførsel af et kvantesystem skyldes den underliggende tilfældige dynamik – de viser os “fysikken under gennemsnittet”. David Winelands atomur er en konkurrent til en mere traditionel version, hvor en gas af mange cæsiumatomer bruges som reference for en standardfrekvens  $\nu_0$ . Cæsiumatomerne er selv gode til at udsende lys, og den endelige udlæsning af de mange cæsiumatomer giver et kontinuerligt varierende signal, når lysfrekvensen  $\nu$  justeres omkring  $\nu_0$ . Ved at registrere mængden af udsendte lyskvanter fra mange atomer og dividere med antallet af atomer måler vi atomernes *gennemsnitlige* opførsel — eller med andre ord det enkelte atoms sandsynlighed for denne lysudsendelse. I David Winelands Al-baserede atomur har ionen en varierende sandsynlighed for at være i de to tilstande  $g$  og  $e$ , når frekvensen  $\nu$  justeres omkring  $\nu_0$ . Når tilstanden måles ved hjælp af laserlys og Be-ionen, sker der fra forsøg til forsøg et valg, om den overhovedet vil udsende lys eller ej. Ifølge Max Borns fortolkning er udfaldet af dette valg helt tilfældigt, som når man slår plat eller krone; kvantemekanikken forudsiger sandsynlighederne for hvert enkelt valg og dermed også, hvad man skal få i *gennemsnit*. David Wineland er således nødt til at gentage sit forsøg mange gange, inden han kan afgøre om  $\nu = \nu_0$  ligesom man også skal bruge mange møntkast på at afgøre præcist, om en mønt er fair (dvs. fifty-fifty chance for plat eller krone) eller om der af en eller anden grund er en oversandsynlighed for f.eks. krone.

Plancks teori for lyskvanter forudsiger, at der ved en given temperatur vil være et bestemt gennemsnitligt antal kvanter ved forskellige frekvenser (farver). Plancks teori blev faktisk udformet som en forklaring på at gløderne i en kakkellovn skifter farve fra hvidglødende til rødglødende, når de bliver koldere. Serge Haroche laver sine forsøg ved en lav temperatur, hvor der iflg. Planck skal være mindre end en enkelt foton i gennemsnit imellem spejlene, og eksperimentet i figur 3(b) er et eksempel på fysikken der ligger til grund for dette gennemsnit. Figuren viser, at der *enten* er stor sandsynlighed for at finde det udgående atom med sin elektron i banen  $g$  *eller* i banen  $e$ , svarende til at der henholdsvis er nul eller én foton i kaviteten. Der findes ikke halve fotoner, og der er på intet tidspunkt f.eks. fifty-fifty chance for  $g$  eller  $e$ . Hvis forsøget havde været konstrueret med mange fotoner i kaviteten, eller i frit rum hvor der kan være både 0 og 1 foton ved mange



forskellige frekvenser, ville de ovennævnte egenskaber fortabe sig som kontinuerlige gennemsnitseffekter.

Wineland og Haroches eksperimenter foretages på enkelte systemer, en enkelt ion eller en enkelt reflekteret lysstråle, og de viser, at de enkelte målinger er i fuld overensstemmelse med kvantemekanikkens forudsigelser om tilfældige resultater. Den tilfældige natur af de enkelte målinger optog kvantemekanikkens skabere dybt, og dobbeltspalte-eksperimentet i figur 1 og katteparadokset i figur 5 er eksempler fra de meget intense diskussioner, hvor Einstein og Schrödinger kritiserede teoriens mystiske egenskaber. Winelands og Haroches eksperimenter er vigtige og en Nobelpris værd, fordi de tillader os at trænge et skridt dybere ned i diskussionen af målinger i kvantemekanikken: I modsætning til dobbeltspalteeksperimentet, hvor elektronen rammer en fotografisk film, og vi ser striberne, når vi fremkalder filmen, *overlever* den fangede ion i fælden efter at have udsendt lys, og der er stadig et felt i spejlkaviteten, efter atomet er fløjet ud.

Det betyder, at man eksperimentelt kan undersøge, ikke blot resultaterne af målingerne, men også deres konsekvenser for det mikroskopiske kvantesystem, der måles på. I de seneste eksperimenter i Serge Haroches laboratorium udnyttes det, at vi gennem kvantemekanikken faktisk kender disse konsekvenser, og man indtager nu de tilfældige måleresultater fra tidligere atomer til at optimere, hvilke atomare tilstande de følgende atomer skal præpareres i, så man kan styre dynamikken af det fangede strålingsfelt. En sådan kontrol er vigtig, hvis vi vil udnytte kvantemekanikken teknologisk, f. eks. i endnu bedre atomure og i nye strategier for kvantecomputere.

## Opsummering

Vi indledte artiklen med Planck og Bohrs teori for kvanter og atomer, som udgør de elementære byggesten i vekselvirkningen mellem lys og stof. Bohrs frekvensbetingelse i formel (1) er, med 100 år på bagen, stadig en helt central ligning, som udtrykker energiens bevarelse, og som derfor har generel anvendelighed langt ud over den oprindelige anvendelse på brintatomet. Bohrs atommodel blev i 1920'erne erstattet af kvantemekanikken, men frekvensbetingelsen holder stadig. Haroches observation i figur 3 af spring mellem tilstande med 0 og 1 foton i kaviteten er også i fin overensstemmelse med Bohrs oprindelige idé om kvantespring.

Efter fremkomsten af den nye kvantemekanik blev

Niels Bohr en af de mest aktive deltagere i arbejdet med at fortolke den. Hans idéer om måleprocessens centrale betydning, og om hvorledes forskellige beskrivelser og begreber kan være i modstrid med hinanden, men samtidigt er nødvendige for fuldstændigt at redegøre for et fysisk systems opførsel, udgør en hjørnesteen i den såkaldte Københavnerfortolkning. Der har siden Bohrs arbejder været flere eksperimentelle og teoretiske milepæle i udforskningen af kvantemekanikkens grundlag, og Wineland og Haroche har med deres nærmest ultimative kontrol sat scenen for næste akt, hvor vi ikke bare vil iagttage, men også selv styre og udnytte kvantemekanikkens mere spidsfindige konsekvenser.

## Litteratur

- [1] S. Gleyzes, et al., *Nature* **446**, 297 (2007). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0612031>.
- [2] Se NIST pressemeddelelse fra 28. september 2010, Dit hoved er ældre end dine fødder, <http://www.nist.gov/pml/news.cfm>.
- [3] M. Brune, et al., *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4887 (1996). Frit tilgængelig på <http://prl.aps.org>.
- [4] Se NIST pressemeddelelse fra 30. november 2005, Fysikere lokker 6 atomer i en "kvante-kat" tilstand.



Brian Julsgaard er lektor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvantefysik samt optiske egenskaber af halvleder-nanostrukturer i siliciumbaserede materialer.



Klaus Mølmer er professor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvanteoptik, teori for målinger i kvantemekanikken og kvantecomputere.



# Foreningsnyt – foredrag i foråret

| Dato        | Tid   | Foredragstitel                                                                         | Foredragsholder        | Forening   |
|-------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|
| <b>Mar.</b> |       |                                                                                        |                        |            |
| 18/3        | 17.15 | Molekyler i rummet                                                                     | Jes Jørgensen          | AS (Aarh)  |
| 18/3        | 19.15 | Stjerner, kerner og hjerner                                                            | Hans Fynbo             | AS (Kbh)   |
| <b>Apr.</b> |       |                                                                                        |                        |            |
| 6/4         | 13.00 | Generalforsamling, Astronomisk Selskab                                                 |                        | Geol. Mus. |
| 8/4         | 17.15 | Stjerner, kerner og hjerner                                                            | Hans Fynbo             | AS (Aarh)  |
| 8/4         | 19.30 | Risø som ramme og motor for forskning i Danmark og generalforsamling                   | Jørgen K. Kjems        | SNU        |
| 9/4         | 17.00 | The equation to the secular inequalities in planetary theory from Lagrange to Poincaré | Frédéric Brechenmacher | VHS        |
| 15/4        | 19.15 | Higgs-partiklen                                                                        | Stefania Xella         | AS (Kbh)   |
| <b>Maj</b>  |       |                                                                                        |                        |            |
| 6/5         | 19.15 | Mørkt stof og mørk energi                                                              | Ole Bjælde             | AS (Kbh)   |
| 6/5         | 19.30 | Medicinske anvendelser af Bohrs atommodel                                              | Liselotte Højgaard     | SNU        |
| 13/5        | 17.15 | Mørkt stof og mørk energi                                                              | Ole Bjælde             | AS (Aarh)  |

**AS (Kbh):** Astron. Selskab (København), Auditorium 4, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø ([www.astronomisk.dk](http://www.astronomisk.dk)).

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

**SNU:** Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K ([www.naturvidenskab.net](http://www.naturvidenskab.net)).

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

## Kontingentindbetaling for 2013 til Astronomisk Selskab

Tidligere blev årskontingentet opkrævet via et girokort vedhæftet Knudepunktet. Denne mulighed eksisterer ikke mere.

Grundet forskellige vanskeligheder ved udgivelsen af Kvant i december 2012 blev medlemmerne desværre ikke orienteret om kontingentindbetaling for 2013. Mange af Jer har allerede betalt – tak for det – men der er også medlemmer, der endnu ikke har betalt. Disse opfordres hermed til at betale kontingentet **senest fredag d. 29 marts**. Kontingentsatserne for 2013, der i øvrigt er uforandrede i forhold til sidste år, er:

- **Almindeligt medlemskab: 350 kr**
- **Ungdomsmedlemskab (under 26 år): 150 kr**

Det relevante kontingentbeløb bedes indbetalt på Astronomisk Selskabs girokonto:

**Danske Bank reg. 1551, konto 8001081.**

Betaler du dit kontingent via netbank så **husk** at oplyse navn(e) og adresse(r) i kommentarfeltet, ellers kan kassereren ikke se hvem der er betalt for. Betaler du dit kontingent på posthus eller i pengeinstitut skal du oplyse foreningens adresse som er:

**Astronomisk Selskab  
c/o Steen Traberg-Borup  
Nørrebrogade 7A, 3tv  
DK-2200 København N**

Venlig hilsen, Steen Traberg-Borup ([steen@traberg-borup.dk](mailto:steen@traberg-borup.dk))

## Astronomisk Selskab

Foredragenes tema er *Universets bestanddele*. Hvad består Universet af? I denne foredragsrække sætter vi fokus på de forskellige bestanddele, som findes i Universet. Nogle kan observeres direkte, hvorimod andre kun ses indirekte. Fælles for dem alle er dog, at de er afgørende for Universets opbygning og udvikling i fortiden, nutiden og fremtiden. Foredragene afholdes i samarbejde med Folkeuniversitetet og er tilrettelagt af Johan Fynbo, Ole Bjælde og Michael Quaade.

## Generalforsamling i Astronomisk Selskab Lørdag den 6. april 2013 kl. 13-16

(annonceret i KVANT nr. 4, 2012 og astronomisk.dk)

Vedrørende punkt 8-10 foreslår bestyrelsen følgende:

8. Valg af to bestyrelsesmedlemmer for tre år. Michael Quaade og Steen Traberg-Borup er på valg. Michael Quaade ønsker ikke genvalg, men Steen genopstiller. Bestyrelsen foreslår genvalg af Steen Traberg-Borup og nyvalg af Julie Søgaard.
9. Valg af en første og en anden suppleant til bestyrelsen for ét år. Bestyrelsen foreslår nyvalg af henholdsvis Ole Berg Nielsen og Anne Mette Frejsel.
10. Valg af formand for ét år. Bestyrelsen foreslår Henry Nørgaard.

## Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Foredragsrække på Geologisk Museum med udgangspunkt i 100-året for Niels Bohrs atommodel.

## Generalforsamling i Selskabet for Naturlærens Udbredelse

SNU holder generalforsamling mandag den 8. april på Geologisk Museum efter aftenens foredrag af Jørgen Kjems.

Dagsorden:

1. Beretning for året 2012
2. Forelæggelse af regnskab for 2012
3. Forelæggelse af budget for 2013
4. Fastlæggelse af kontingent for 2014
5. Direktionens medlemmer, jf. vedtægterne
6. Valg af revisor
7. Evt.



# KVANT-nyheder

Af Sven Munk, KVANT

## Forvokset sort hul

**ASTRONOMI.** I stjernebilledet Perseus 220 mill. lysår borte finder man galaksen NGC 1277, som rummer et supermassivt sort hul. Helt usædvanligt rummer dette sorte hul 59 % af massen i den fortættede del af galaksen. Omregnet til solmasser bliver det til 17 mia. Selv for astronomer er dette et meget stort tal, så en teoretisk forklaring på fænomenet efterlyses. Måske kunne det være et resultat af sammensmeltning af flere galakser, som hver bidrager med et sort hul.



Billedet viser galaksehoben Perseus med NGC 1277 i midten. Denne er en såkaldt linseformet galakse – en overgangsform mellem spiral- og elliptisk galakse. Ud fra galaksens udseende var astronomernes forventning, at det sorte hul i centrum ville have en masse på 30 mio. gange Solens masse.

Kilder: An over-massive black hole in the compact lenticular galaxy NGC 1277, Remco C.E. van den Bosch et al., *Nature* **491**, 729-731 2012.

## Hemmelighedsfuld Uranforbindelse

**KERNEFYSIK.** I mere end 25 år har en sjælden forbindelse af uran, ruthenium og silicium drillet fysikere. Når stoffet afkøles til 18 K viser det typiske tegn på en faseovergang, men hverken krystalstruktur eller atomernes placering i krystallet forandres.



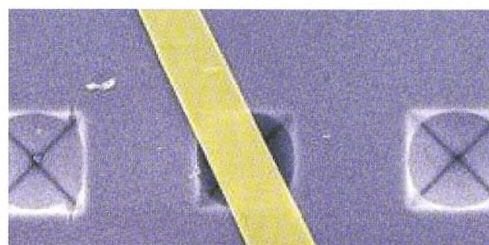
Siden 1985, hvor fysikere første gang mødte de uforklarlige magnetiske og superledende egenskaber i uran-ruthenium-silicid ved lav temperatur, har der været fremsat mange teorier. Den nyeste fremsat af Piers Coleman er baseret på en mulig kobling mellem uran-ioner og relativt frie og mobile elektroner i yderste orbital. Dette kan matematisk behandles som spinorer. Ved faseovergangen bliver de magnetiske spin således orienterede som i antiferromagnetiske materialer.

Forskerne antyder, at denne spinor-model måske kan være inspiration, når man vil behandle højtemperatur-superledere teoretisk.

Kilder: Hstatic order in the heavy-fermion compound URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, Premala Chandra et al., *Nature* **493** (7434) 2013. Center for Materials Theory, Rutgers University, Piscataway.

## Halvleder afkøles med laserlys

**FASTSTOFFYSIK.** Det valgte halvledermateriale er cadmiumsulfid (CdS), der belyses med grønne lypulser (532 nm) fra en laser. Lyset absorberes af halvledermaterialet hvorved elektroner exciteres. Dette beskriver fysikere med begreber som excitoner og fononer, som efter meget kort tid udsender luminiscens-lys. Dette kræver dog en større energi end fotonenergien i laserslyset, så fotonerne i luminiscens-lyset “stjæler” energi (varme) fra halvledermaterialet, hvorved dette afkøles. Ved forsøg udført med halvlederen ved stuetemperatur kunne temperaturen sænkes med 40 K.



Den gule stribe på billedet skulle være CdS med mikroskopiske dimensioner (nano) og det blå beskrives som et struktureret silicium-underlag. Hvorvidt dette silicium blot er tilfældigt valgt eller om strukturen har betydning for forsøget fremgår ikke klart.

Kilder: Laser cooling of a semiconductor by 40 kelvin, Jun Zhang et al., *Nature* **493**, 504-508 2013. Nanyang Technological University.

## Vulkanisme på Venus?

**ASTRONOMI.** Langtidsvariationer i koncentrationen af svovldioxid i Venus øvre atmosfære kan tolkes som udtryk for vulkanisme på planeten. Da den europæiske rumsonde “Venus Express” ankom i 2006 blev koncentrationen af svovldioxid målt til at være 10 gange større end forventet. Herefter er koncentrationen faldet til 1/10 af det i 2006 målte.

I den øvre atmosfære nedbryder sollyset svovldioxid i løbet af et par dage. At koncentrationen af svovldioxid overhovedet er steget viser, at en eller anden mekanisme må have transporteret dette stof opad. Den nedre del af atmosfæren indeholder svovl i meget store mængder. Dette tolker forskerne som et klart vidnesbyrd om, at vulkanisme er forekommet, men om der fortsat er aktive vulkaner er ikke endelig afklaret. “Venus Express” har ved tidligere målinger konstateret at svovldioxid-koncentrationen kunne variere inden for et par dage.

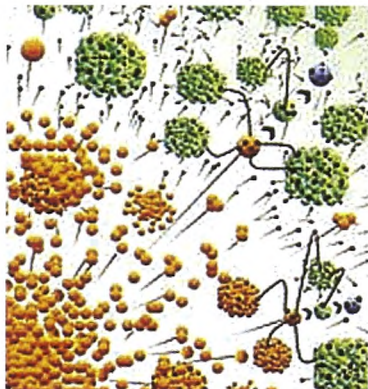
Kilder: Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus’s dynamic atmosphere, Emmanuel Marcq et al., *Nature Geoscience* **6**, 25-28 (2013). LATMOS; Venus Express.

## Neutrale atomer med høj hastighed

**ATOMFYSIK.** En ny metode gør det muligt at tilføre neutrale atomer en kinetisk energi på op til 1 MeV, hvilket er ret usædvanligt. At det nødvendige udstyr kan være på et skrivebord er ikke mindre bemærkelsesværdigt. Neutrale atomer påvirkes ikke af elektriske og magnetiske felter, hvilket betyder at de kan skydes langt ind i materialer.



Accelerationsprocessen består af tre trin, som er søgt illustreret med billedet.



Trin 1. En ultrakort intensiv laserpuls sendes mod en nano-cluster af neutrale argon-atomer. Disse atomer bliver derved effektivt ioniseret – hvilket betyder, at der kan frigøres op til 12 elektroner fra hvert atom.

Trin 2. Elektronerne flyver ind i "kolde" nano-clusterne, som befinder sig tæt på. Dette medfører, at disse argon-atomer bringes i Rydberg-tilstande (elektroner løftes op i et højt energiniveau uden at blive frigjort fra atomerne). Elektronerne er med andre ord svagt bundne og kan derfor let flytte sig over til andre atomer.

Trin 3. Nogle nanosekunder efter laser-pulsen følger, de noget langsommere ioner, efter elektronerne. Den elektriske frastødning, som skyldes de positive ioner, får nano-clusterne til at eksplodere. Samtidig er argon-ionerne tilført en kinetisk energi på op til 1 MeV. På den få mm lange færd gennem kolde nano-clusterne vekselvirker de med de argon-atomer, som befinder sig i Rydberg-tilstande. Under passagen "stjæler" clusterne de exciterede elektroner. De positivt ladede argon-ioner er herved blevet elektrisk neutrale, men har samtidig bevaret den store kinetiske energi.

Forskerne har gentaget forsøget med kuldioxid (gas) og kunne konstatere, at det var vellykket.

Som potentielle anvendelser nævner forskerne: Lithografi (mikro- og nanostrukturer) og Tokamak-fusionsreaktorer.

Kilder: A compact laser-driven plasma accelerator for megaelectronvolt-energy neutral atoms, R. Rajeev et al., *Nature Physics* **9**, 185-190 (2013). Ultrashort Pulse High Intensity Laser Laboratory at Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai.

## Fisk anvender optisk kamuflage

**OPTIK.** Spejlende overflader vil i større eller mindre grad polarisere det lys som reflekteres. Sølvfarvede fisk som sild, sardin og brisling har dog spejlende overflader, som reducerer en sådan polarisationseffekt. Derved bliver det sværere for rovfisk (delfiner og tunfisk) at opdage dem i vandet.

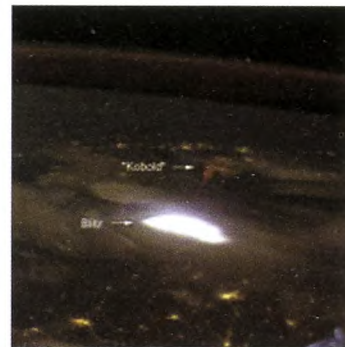


Huden på de nævnte fiskearter består af en flerlagsstruktur af såkaldte guaninkrystaller. Hidtil har man antaget, at lyset ved refleksion blev stærkt polariseret, men forskerne har nu fundet, at der i fiskenes hud er to forskellige former for guaninkrystaller. De to typer har forskellige optiske egenskaber og dermed også i forskellig grad polariserer det reflekterede lys. Slutresultatet er, at fiskene ikke afsløres af stærkt polariseret reflekteret lys.

Kilder: Non-polarizing broadband multilayer reflectors in fish, T. Jordan et al., *Nature Photonics* okt. 2012; DOI: 10.1038/nphoton.2012.260. School of Biological Sciences Bristol.

## Sprites set fra ISS

**RUMFYSIK.** Sprites er elektriske udladninger (som lyn) i den øverste del af atmosfæren. Dette er dokumenteret med fotografiske optagelser fra Jorden (se fx KVANT nr. 3, 2012). Optagelser fra rummet giver et bedre overblik, fordi udladningerne sker over skylaget. På figuren ses lyn og en sprite (rød).

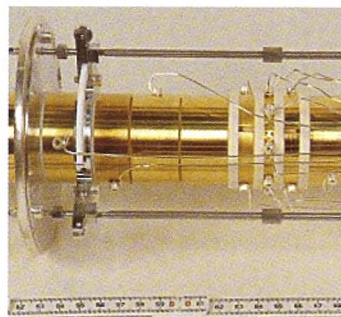


Besætningen på rumstationen ISS har nu lavet optagelser af tordenvejr. Ved at gennemse 20 timers video lykkedes det at finde 15 udladninger. Varigheden af en sprite-udladning er nogle millisekunder, så videoen skulle analyseres billede for billede. Som ekstra gevist blev der opdaget 50 meteoror og tusindvis af almindelige lyn.

Kilder: Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station, Augustin Jehl et al., *Jour. Geophys. Res.*, 2013; DOI: 10.1029/2012JA018144. NASA Crew Earth Observations (CEO).

## Tungeste atomer på vægten

**KERNEFYSIK.** Det har nærmest været et permanent problem at bestemme masse af de kunstige radioaktive kerner, som er tungere end uran. Generelt er der to problemer: små stofmængder og korte levetider (halveringstid). Her kan tilføjes, at fysikerne også gerne vil vide noget om en kernes stabilitet. Hvis proton- og neutrontallet er et af de magiske tal: 2, 8, 20, 28, 50 eller 82 vil kernen være mest stabil. For de transurane atomer har der været nogen usikkerhed om, hvorvidt det magiske tal er 152.



Massen bestemmes v.h.a. en "vægt", som i virkeligheden er en ion-fælde (Penning-type). Elektriske og magnetiske felter kan holde på ioner medens de roterer med cyklotronfrekvensen. Denne frekvens er bestemt af magnetfeltets styrke og atomets masse.

Ved at måle grundstofferne nobelium (102 protoner) og lawrencium (103 protoner) med fokus på neutrontallet 152. De to nævnte grundstoffer blev fremstillet ved at beskyde Pb-hhv Bi-film med energirige Ca-atomer. Fremstillingsmetoden indebar, at der blev dannet atomkerner med 150 og op til 153 neutroner. Med halveringstider på mellem 2 og 100 sek. var der tid nok til at bestemme masserne.

De udførte målinger tyder på, at 152 er et magisk tal.

I det videre perspektiv skal målingerne ses som et skridt i den rigtige retning mod at få besvaret spørgsmålet: Findes der en "ø" af stabilitet for nuklider med 120 protoner og 184 neutroner?

Kilde: Direct Mapping of Nuclear Shell Effects in the Heaviest Elements, E. Minaya Ramirez et al., *Science* **337**, s. 1207-1210 (2012).



# Kulde og temperatur – breddeopgave 53 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra KVANT nr. 4, 2012, samt en ny opgave. Opgaven var denne breddeopgave (nr. 53 i rækken her i KVANT):

## Breddeopgave 53. Kulde og temperatur

*Når det blæser, fryser man mere i kulden, end når det er vindstille. Hvorfor påvirker blæsten ikke udendørstermometerets visning? Begrund svaret.*

### Løsning

Et termometer måler temperaturen, som ikke afhænger af om det blæser eller ej, medmindre termometeret er fugtigt. Helt anderledes er det med spørgsmålet om at fryse eller ej. Det afhænger af varmestrømmen bort fra ens krop. Hvis den omgivende luft har samme temperatur som ens krop er varmestrømmen nul. Så varmestrømmen afhænger af, hvor koldt det er. Men varmestrømmen afhænger også af, hvor hurtigt den opvarmede luft i nærheden af ens krop ombyttes med kold luft, altså af hvor meget det blæser. For et tørt termometer er der ingen varmestrøm mellem det og den omgivende luft, da termometeret og luften har samme temperatur.

### Kommentar

Den forrige artikel i rækken her handlede om en breddeopgave om kræftvækst. I den sammenhæng pointerede jeg, at den ikke eksperimentelle fysik udover at kunne karakteriseres ved fysikkens række af teoribygninger og fysikforskningens emneområder også kan karakteriseres ved fysikerens måde at tænke og løse problemer på. Og at opgaven om kræftvækst derfor er relevant som fysikeropgave, selvom det ikke er en fysikopgave.

Fysikerens træning i at modellere fænomener ved at indfange deres væsenstræk i så enkel matematik som muligt, giver dem en kompetence, som er anvendelig udover i fysikken selv. Det er oftest denne kompetence, mere end specifikke fysikforståelser, der gør fysikere anvendelige i andre faglige sammenhænge end fysik. Kurserne på RUC, der er bygget op omkring breddeopgaverne, sigter i høj grad på at udvikle fysikerens karakteristiske matematiske modelleringskompetence hos de studerende. Man kan så spørge, om kurserne overhovedet behøver at inddrage fysik, hvis modelleringskompetencen er deres afgørende formål? Kunne de ikke lige så godt basere sig på opgaver tilsvarende den om kræftvækst?

Min pointe med at bringe opgaven om kulde og temperatur i artiklen her som modsætning til opgaven om kræftvækst er at tydeliggøre, at kurserne trods alt er en del af en fysikuddannelse, og at fysik selvfølgelig har potentialer udover at være øvelsesterræn for matematisk modellering. Opgaven om kulde og temperatur er således rensat for matematisk modellering. Den handler alene om at udrede begreberne temperatur og varmetransport fra hinanden. Altså noget grundlæggende fysisk begrebsforståelse.

Til min lettelse havde de studerende styr på begreberne ved eksamen. Men det var jeg ikke sikker på på forhånd. Hos ikke fysikere hersker der oftest begrebsforvirring angående temperatur og varmestrøm. Det oplevede jeg f.eks., da vi i min ejerlejlighedsforening fik lovpligtige varmemålere på vores radiatorer. Min og min kones varmeregning var pludselig meget højere end varmeregningerne for både de, der boede over os, og de, der boede under os, i lejligheder magen til vores og med samme ydermursisoleringer. Hvis den højere varmeregning skulle være retvisende måtte vi være nogle større varmesvin, end vi kunne forestille os. I de lag af varmemålerfirmaerne, som jeg var i stand til at komme i forbindelse med, og hvor der ikke skelnedes imellem begreberne varme og temperatur, var der ikke nogen hjælp at hente til en forklaring. Den forklaring på vores "overforbrug", jeg selv kunne nå frem til var, at det der måles og det man betaler for ikke er varme tappet af radiatorerne, men en temperaturforskel gange tid gange radiatorareal. I vores lejlighed sidder radiatorerne i mindre grad under vinduerne og var i højere grad dækket af marmorplader og indhegnet af trærammer end i lejlighederne ovenover og nedenunder os. Det førte til høj radiatortemperatur uden tilsvarende varmforsyning. Efter at have frilagt radiatorerne, således at der af sig selv cirkulerer mere luft omkring dem, faldt vores varmeregning. Formentlig vil man med de nuværende "varmemålere" spare penge ved at sætte blæsere på radiatorerne. Formentlig fungerer lovgivningen om obligatoriske "varmemålere" som energibesparelses incitament i kraft af den manglende skelnen mellem temperatur og varme hos de fleste.

Fysisk begrebsforståelse (eller manglende begrebsforståelse) kan således have praktisk betydning uden at være koblet til matematisk modellering. Men det ændrer ikke ved, at fysik som øvelsesterræn for modelleringskompetence kan tillægges afgørende betydning i forhold til samfundsanvendeligheden af fysikuddannelser. Kunne øvelsesterrænet ikke lige så godt findes i andre fag? Jo i den udstrækning deres udøvere har kompetencen. F.eks. er det på HTX i høj grad ingeniører, der leverer varen. Men i det almene gymnasium er det først og fremmest fysiklærerne, der inkarnerer modelleringskulturen.

## Breddeopgave 54. Rekyl

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra sygeeksamen september 1987, 2011, nr. 54 i rækken her i KVANT):

*Rekylvirkningen på de anslåede atomer i en lysende gas ved lysudsendelse medfører en svag afvigelse af frekvensen af det udsendte lys i forhold til den frekvens, der svarer til forskellen mellem atomernes hvileenergi før og efter lysudsendelse. Hvor stor en afvigelse er der tale om? Begrund svaret.*

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.



# Nordisk fysikmøde i Lund den 12.-14. juni

Af Jørgen Schou

## Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: [www.dfs.nbi.dk](http://www.dfs.nbi.dk)  
Jørgen Schou (formand)  
DTU Fotonik, Risø Campus, Danmarks Tekniske  
Universitet 4000 Roskilde  
E-mail: [josc@fotonik.dtu.dk](mailto:josc@fotonik.dtu.dk)  
Tlf. 4677 4755 / Fax 4677 4565

Ian Bearden (næstformand) ([bearden@nbi.dk](mailto:bearden@nbi.dk))  
Johannes Andersen ([ja@astro.ku.dk](mailto:ja@astro.ku.dk))  
Helge Knudsen (kasserer) ([hk@phys.au.dk](mailto:hk@phys.au.dk))  
Mette Grage ([mmlg@dmu.dk](mailto:mmlg@dmu.dk))  
Kim Lefmann ([lefmann@fys.ku.dk](mailto:lefmann@fys.ku.dk))  
Ulrik Uggerhøj ([ulrik@phys.au.dk](mailto:ulrik@phys.au.dk))  
Jørgen Beck Hansen ([beck@nbi.dk](mailto:beck@nbi.dk))  
Peter Uhd Jepsen ([puje@fotonik.dtu.dk](mailto:puje@fotonik.dtu.dk))  
Pil Maria Saugmann ([psaugmann@gmail.com](mailto:psaugmann@gmail.com))

Betal venligst dit kontingent til DFS til tiden enten via PBS eller det udsendte girokort. Selskabet har hvert år et stort arbejde med at sende rykkerskrivelser ud.

## Mødet i Lund 2013

Dansk Fysisk Selskabs medlemsregister bliver løbende opdateret. *Send din e-mailadresse* til Dansk Fysisk Selskab til [Andresen@fys.ku.dk](mailto:Andresen@fys.ku.dk). Et stigende antal meddelelser fra selskabet bliver sendt som e-mail.

Det svenske fysiske selskab arrangerer i år det Nordiske Møde den 12.-14. juni i Lund, Sverige. Alle nordiske selskaber vil deltage i arrangementet, som bliver det tredje af sin slags. Det er en stor chance for at etablere et nordisk netværk for alle, og vi håber, at mange danske fysikere og studerende vil benytte lejligheden til at møde kolleger fra de andre nordiske lande. Et nordisk møde betyder også, at vi kan tiltrække internationale foredragsholdere, som vi ved et rent nationalt møde ville have svært ved at få til Danmark. Mødet starter ved frokosttid om onsdagen og slutter ved frokosttid om fredagen. Det Nordiske Møde vil indeholde plenarforedrag af

- **Dimitri Argyriou**, Videnskabelig direktør i ESS (European Spallation Source) i Lund
- **Jocelyn Bell Burnell**, Oxford, UK, opdagede de første pulsarer
- **Sergio Bertolucci**, Direktør for Forskning and Scientific Computing ved CERN
- **Phil Bucksbaum**, Stanford Linear Accelerator, Direktør for SLAC (ultrafast science)

- **Paul Doherty**, San Francisco Explorations Inst., underviser, forfatter og klatrer
- **Carlos S. Frenk**, Durham, Direktør for Computational Cosmology Institute, Universets struktur

Se nærmere på <http://www.fysik.lu.se/npd2013/program/>

Der vil være parallel sessioner i Astronomi og astrofysik, Atom- og molekylfysik, Biofysik-soft matter, Uddannelse, Kernefysik, Elementarpartikelfysik, Faststof- og nanofysik, Kvinder i Fysik og Fysik og samfund. Der vil ligeledes være en poster session.



**Figur 1.** Postersessionen ved det nordiske fysikmøde afholdt på DTU 2009.

Dansk Fysisk Selskab uddeler stipendier for yngre medlemmer med conference-fee betalt, til master studerende der præsenterer en poster. Ansøgningsfristen er udløbet (21. februar), men i tilfælde af ledige stipendier, kan man stadig komme i betragtning. Se nærmere på [www.dfs.nbi.dk](http://www.dfs.nbi.dk).

Der vil endvidere være en fælles Atomfysik- og Uddannelsession med "2013: Hundred-året for Bohr's fantastiske år 1913" som tema.

## Deadlines:

Abstract submission: 15. marts  
Konference afgift: 12. maj (2500 SKK, Studerende incl. ph.d.-stud, gymnasielærere 1562 SKK).

See endvidere <http://www.fysik.lu.se/npd2013/program/>



# Øllen som kvantemekanisk system

Af Kaj Ove Roland

Selv om kvantemekanikken har eksisteret i mere end 60 år, er det først for ganske nylig, at nogen har tænkt på at anvende dens begrebsapparat på en øl. Det epokegørende fremskridt skete under *The Second Annual Seminar on Beer*, i Rågeleje, den 29. november 1985. Vi vil i denne artikel for første<sup>1</sup> gang offentliggøre de tanker, der dengang aftegnede sig i vore omtågede hjerner.

Betragt vort fysiske system, en simpel øl (figur 1a). En øl synes umiddelbart at besidde mange egenskaber, der vanskeligt lader sig omfatte af kvantesproget. Vår første opgave bliver da også – i overensstemmelse med god fysisk tradition – at abstrahere en smule. Vi vil *idealiser* vort fysiske system. Flaskens farve, form og rumindhold, øl-mærkatet og bryggeriet er alle detaljer, der er irrelevante for den følgende diskussion. Betragt en sådan idealiseret øl, en *kvante-øl* (figur 1b).



FIG. 1.a.:  
EN SIMPEL  
KØBMANDS-  
ØL (CARLS-  
BERG HOF).



FIG. 1.b.:  
DEN IDEALISEREDE  
ØL, KVANTE-  
ØLLEN.

Kvanteøllen har to fundamentale frihedsgrader: Den kan være åben eller lukket. Og den kan være fuld eller tom. Den er således beskrevet ved blot to fysiske variable: *Åbningsgraden*,  $\hat{a}$ , der angiver om kapslen er fjernet eller ej. Og *fyldningsgraden*,  $\hat{f}$ , der angiver, hvorvidt øllen er fuld eller tom.

Begge variable kan opfattes som diskrete, med blot de to værdier, 0 og 1. Vi kan derfor nøjes med at introducere følgende fire øl-tilstande:

|                          |           |                   |
|--------------------------|-----------|-------------------|
| $ \text{lukket} \rangle$ | lukket øl | ( $\hat{a} = 0$ ) |
| $ \text{åben} \rangle$   | åben øl   | ( $\hat{a} = 1$ ) |
| $ \text{tom} \rangle$    | tom øl    | ( $\hat{f} = 0$ ) |
| $ \text{fuld} \rangle$   | fuld øl   | ( $\hat{f} = 1$ ) |

Man kan indvende, at en øl gives andre muligheder end blot de to: At være fuld eller tom. Hvordan passer en halvtom øl ind i formalismen? Hertil må siges, at for en ægte øldrikker er begrebet "en halvtom øl" ikke rigtig veldefineret. Han drikker nemlig sin øl i ét drag. Og flasken vil derfor i praksis altid være fuld eller (snarere) tom. Problemet er således ret akademisk. Men man kan, hvis man insisterer, fremstille en halvfuld øl som en kvantemekanisk superposition:

$$|\text{halvfuld} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{fuld} \rangle + |\text{tom} \rangle) \quad (1)$$

Når øllen *forekommer* halvtom, skyldes det, at øjet ikke kan følge med i de hastige oscillationer (den halvtomme øl udgør ikke en stationær tilstand).

Svarende til de to fysiske observable,  $\hat{f}$  og  $\hat{a}$ , har vi to kvantemekaniske operatoren, *drikke-operatoren*  $\hat{D}$  og *åbnings-operatoren*  $\hat{A}$ , hvormed vi kan virke på kvanteøllen.

Disse operatoren svarer til de to mulige fysiske påvirkninger af kvanteøllen: Vi kan drikke den og vi kan åbne den. Den fundamentale pointe er nu følgende: *Operatorerne*  $\hat{D}$  og  $\hat{A}$  *kommutterer ikke!!* Dette kan let eksperimentelt verificeres: Fat om en tillukket øl, frisk fra købmanden. Virk først med åbningsoperatoren! Du har da en åben øl. Drik den! Du har da en tom øl (figur 2a). Omvendt: Start med at påvirke den tilkapslede øl med drikke-operatoren. Intet sker (den tilkapslede øl-tilstand er *egen-øl* for  $\hat{D}$ !). Prøv dernæst at åbne den. Du har da en åben, ikke-tom øl (figur 2b).

Skrevet i kvantesprogets kompakte notation, koger de ovenstående overvejelser ned til følgende:

$$[\hat{D}, \hat{A}] \neq 0. \quad (2)$$

Det er nu et velkendt træk ved kvantesproget, at ikke-kommutativitet mellem to kvanteoperatorer medfører en komplementaritet mellem de tilhørende fysiske observable, altså i dette tilfælde mellem fyldningsgraden  $\hat{f}$  og åbningsgraden  $\hat{a}$ .

Med andre ord: Har vi en øl med en bestemt værdi for  $\hat{a}$ , dvs en øl, der er *enten* helt lukket *eller* helt åben, ja, så er mængden af øl i flasken *fuldstændig ubestemt*!

Omvendt, betragtes et øl-system, der med sikkerhed vides at være fyldt, er vi fuldstændig afskåret fra at udtale os om, hvorvidt kapslen sidder på eller ej. (Ligledes med en øl, der vides at være tom).

<sup>1</sup>Oprindeligt publiceret i GAMMA nr. 65, 1986 [1].





### IKKE-KOMMUTATIVITETEN AF FLASKEÅBNING OG ØLDRINKNING.

FIG. 2a. (ØVERST): ÅBN FØRST OG DRIK DERNÆST !

FIG. 2b. (NEDERST): RESULTATET AF AT DRINKKE FØR MAN HAR ÅBNET. (IKKE ANBEFAELSESVERDIGT...)

Vi ser, hvorledes kvantesproget giver anledning til uventede makroskopiske fænomener. De hidtidige betragtninger kan muligvis forekomme abstrakte og uvan- te. Imidlertid er det formalismens triumf, at den er i stand til at redegøre for et fænomen, der er uhyre vel- kendt, ikke blot blandt øldrikkere, men i langt bredere kredse. Dette vil vi i det følgende gøre rede for:

Indfør en ny operator, *fyldnings-operatoren* **F**, der virker ved at fylde øl på en flaske. Betragt en fuld øl! Virk på den med driknings-operatoren **D**! Man får da en tom øl, altså en  $f = 0$  tilstand,

$$|\text{glæde}\rangle$$

(3)

Prøv da at fylde denne tomme ølflaske op igen, dvs virk nu på systemet med fyldnings-operatoren **F**! Her må vi huske på, at da operatorerne **D** og **Å** ikke kommuterer, har de ikke fælles egentilstande. Den tomme øl er følgelig en superposition af de to forskellige *å*-tilstande:

$$|\text{glæde}\rangle = \gamma_1 |\text{glæde}\rangle + \gamma_2 |\text{glæde}\rangle \quad (4)$$

Lad os virke med **F** på højresiden, led for led! Forsøger man at fylde en flaske uden kapsel, går det let og smertefrit, vi får en fuld flaske ud af det. Så langt så godt.

Forsøger vi imidlertid nu at fylde en flaske *med* kapsel, er det klart, at al den påfyldte øl vil rende ved siden af. Vi har derefter en tilstand sammensat *dels* af en tilkapslet ølflaske, *dels* af en masse øl hældt ud over gulvet. (Bemærk, at vi for at definere denne tilstand er nødt til at introducere nye begreber i formalismen ("øl udenfor flaske", "gulv"). Matematisk sker der det, at **F** drejer os ud af vort hidtidige Hilbert-rum, en detalje for feinschmeckere.)

Det er muligt, at  $\gamma_2$  er meget lille i forhold til  $\gamma_1$ , sådan at kun en meget lille del af den øl, vi søger at

påfylde, vil havne på gulvet. Men *netop* fordi **D** og **Å** ikke kommuterer, ved vi, at  $\gamma_2$  fundamentalt er  $\neq 0$ . Og at der derfor altid vil havne en ikke-forsvindende væskemængde på gulvet.

Vi står her overfor et velkendt empirisk fænomen: At det er umuligt at fylde øl på en ølflaske uden at spilde. Men *hvad vi ser er, at dette forhold kan føres tilbage til fundamentale kvantemekaniske principper, at det er et dybt resultat, affødt af ikke-kommutativiteten af **D** og **Å**!*

Dette var, hvad der blev opdaget ved ølseminaret i Rågeleje i 1985.

Selv om kvante-øl-dynamikken (QBD) således hav- de fejret sine første triumfer, stod der stadig væsentlige spørgsmål ubesvarede tilbage. F.eks.: Hvad er de ek- sakte værdier af  $\gamma_1$  og  $\gamma_2$  Dette spørgsmål blev taget op under *The Third Annual Seminar on Beer*, der fandt sted i Gilleleje fra den 3. til den 5. oktober 1986. Her forsøgte vi at foretage en empirisk bestemmelse: For vi ser jo, at har man en tom øl, er sandsynligheden for at finde den med kapsel lig med  $|\gamma_2|^2$  og sandsynligheden for at finde den uden er  $|\gamma_1|^2 = 1 - |\gamma_2|^2$ .

$\gamma_1$  og  $\gamma_2$  kan således bestemmes statistisk ved at tømme en utrolig masse øl og optælle antallet af tilfæl- de, hvor flasken derefter fremtræder *med* kapsel. Dette er præcis, hvad vi forsøgte at gøre.

I perioden fra 17:30 fredag til 11:15 søndag blev der af i alt ni personer nedsvælget 115 øl. Og der blev registreret *to* tilfælde af tilkapslede øl efter tømningen.

Den første blev opdaget af Steen Varsted sent fredag aften. Som manden, der for første gang målte denne effekt, er hans navn indskrevet i historien på linje med Galilei, Rømer, Michelson, Rutherford, Ørsted, Faraday og andre.

Vi har

$$|\gamma_2|^2 = \frac{2}{115} = 0,017. \quad (5)$$



Indenfor et 70-procents konfidensinterval er

$$0,0085 \leq |\gamma_2|^2 \leq 0,035 \quad (6)$$

Ved påfyldning af en flaske vil altså mindst  $\sim 1,7\%$  havne ved siden af, som følge af den fundamentale kvantemekaniske begrænsning. En eksperimentel test af denne kvantitative forudsigelse bør være næste opgave.

En særlig tak må rettes til alle de øvrige deltagere i øl-seminarerne i 1985 og '86, uden hvilke QBD aldrig ville have set dagens lys: Henrik "Havskum" Bruus, "Haarde" Kaare Danielsen, Nils "Pils" Gjørup, Michael "Canyon" Hansen, Per "Humlehyll" Hyldgaard, Anders "Jensen" Jensen, Claus "C.J." Jeppesen, Henrik "Mesteren" Gliese, Ann Berit "Sovedyr" Saust og Steen Varsted, manden der opdagede den første kvanteøl.

#### Litteratur

- [1] Kaj Ove Roland (1986), Øllen som kvantemekanisk system, GAMMA nr. 65, 1986.



Kaj Ove Roland drak sin første Hof i 1985, men opnåede aldrig rang af ølmester. Ph.d. i partikelfysik 1991. Siden 1999 ansat på Rødovre Gymnasium.

**PFEIFFER VACUUM**

## ACP Dry Pump



**Olie- og partikelfri  
Flertrins Roots teknologi**

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850  
[Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk](mailto:Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk)  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

### Bliv redaktør!

KVANT søger unge redaktører med friske idéer til hvad der kan komme i bladet og til at være med til at udvikle den nye gruppe på facebook:

[www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift](http://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)

Skriv til [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk) og hør nærmere.

### Kvant er svært – men også sjovt!

Hvis du efter at have læst Kaj Rolands artikel om kvanteøllen – eller nogle af de andre kvante-artikler i dette nummer af KVANT – ikke forstår kvantefysikken, er du ikke alene! Niels Bohr skulle have sagt, at "hvis du tror, at du kan tale om kvanteteori uden at blive svimmel, har du ikke forstået noget af den". Fysikstuderende er ingen undtagelse og derfor har de næsten altid en sang med om kvantefysik i den traditionelle FysikRevy™ på Københavns Universitet.



For et par år siden var det en følelsesladet popballade over Alphavilles "Forever Young". Den kan ses på [www.fysikrevy.dk](http://www.fysikrevy.dk) og YouTube [1]. De første vers er:

#### Forever Kvant

Jeg er til revy, det er min første gang,  
tiden til Kvant-1, den virker pludselig lang.  
Jeg griner med, for jeg synes det' flovt,  
at jeg ik' forstår, at kvant er sjovt.

Jeg synger med på kvanter i måneskin,  
men egentlig, så fatter jeg ik' en pind.  
Ja, jeg kan hverken regne, ud eller ind,  
på energi og kvantespin.

Tænk at forstå, blot en enkelt sang,  
grine af en sketch, blot en enkelt gang.  
Vide hvem Per Hedegård egentlig er,  
de andre griner.

Men jeg – forstår det ik',  
før jeg får kvantemekanik.  
Alle andre griner højt omkring mig,  
men ik' mig  
men ik' mig  
Hva' en hæveoperator egentlig?

...  
jeg ved det ik'.

[1] YouTube: "FysikRevy 2011: Forever Kvant",  
<http://www.youtube.com/watch?v=94E710v6wEM>



# Bohr vs. Einstein: Fortolkning af kvantemekanikken

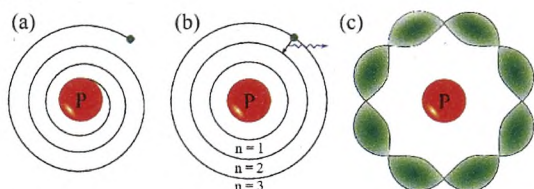
Af Christian Kraglund Andersen og Andrew C.J. Wade, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Siden 1913, da Bohr fremlagde sin kvantemekaniske model for atomet, har fysikere diskuteret, hvordan kvantemekanikken skal fortolkes. Specielt aktive i denne diskussion var Bohr og Einstein, som havde modstridende opfattelser af, hvordan kvantemekanikken skulle forstås. Kan katte være både levende og døde på samme tid? Kan vi teleportere partikler mellem Månen og Jorden? Disse spørgsmål, og mange flere, forsøgte Bohr og Einstein at besvare, og det vil vi ligeledes i denne artikel.

## Beskrivelsen af meget små ting

I starten af 1900-tallet beskæftigede en del fysikere sig med beskrivelsen af den atomare verden, det vil sige ting, der er på størrelse med et enkelt atom, ca. 0,000001 mm. Blandt disse fysikere var danske Niels Bohr, der i 1913 lavede en model for atomet, der bestod af en positivt elektrisk ladet kerne med negativt ladede elektroner kredsende herom.

Ideen byggede på en model lavet af newzealænderen Ernest Rutherford i 1909, som fik ideen til denne model fra målinger lavet af hans assistenter Geiger og Marsden [1]. Rutherford fastslog, at atomerne måtte have en positiv kerne, men ifølge klassisk elektromagnetisme ville denne form for atomer ikke kunne eksistere, da elektronerne ville falde ind i kernen. Bohr foreslog derfor, at elektronerne bevægede sig i baner med bestemte energier og kun kunne gå fra en bane til en anden ved udsendelse af en lysbølge med en veldefineret frekvens – det, der senere blev fortolket som et lyskvant, partikler af lys, som Einstein i 1905 havde brugt til at forklare den fotoelektriske effekt<sup>2</sup>. Dermed postulerede Bohr en model, hvor atomer er stabile, og han kunne samtidig forklare, ved hvilke bølgelængder lys blev absorberet af brint.



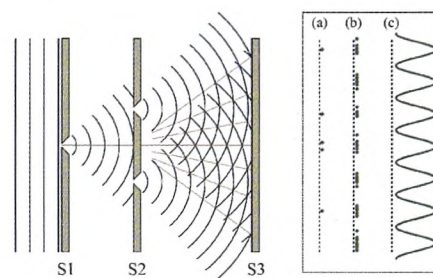
**Figur 1.** Modeller af atomet. I (a) ser vi, hvordan klassisk elektromagnetisme vil få atomet til at bryde sammen. I (b) ser vi hvordan Bohr rettede modellen, så den virkede, mens vi i (c) ser de Broglies fortolkning af Bohrs model.

Bohrs atommodel havde vidtrækkende konsekvenser. Einsteins oprindelige idé om, at lys kunne betragtes som partikler, selvom en bølgebeskrivelse af lys var velkendt på daværende tidspunkt, førte i 1924 franskmanden Louis de Broglie til at foreslå, at lys både kunne betragtes som bølger og partikler. Delvist inspireret af Bohrs model, foreslog de Broglie endvidere at alt, både lys og stof, kunne beskrives som værende både bølger og partikler. Vi ser dog ikke stof opføre sig som bølger til dagligt, da vi kun kan observere bølgeopførsel for enkelte partikler eller ved *meget* lav temperatur.

<sup>2</sup>Dette gav Einstein en Nobelpris i 1921.

<sup>3</sup>Ikke at forveksle med zombie-katte.

Ud fra denne hypotese fremlagde Erwin Schrödinger i 1926 en bølgeligning, som med præcision forudsiger, hvordan den atomare verden opfører sig. Men denne bølgebeskrivelse af stof førte straks til en større diskussion blandt datidens fysikere, specielt mellem Bohr og Einstein, om hvordan kvantemekanikken skulle fortolkes. Disse diskussioner danner selv i dag grundlaget for fortolkningen af kvantemekanikken. For hvis alting kan beskrives ved hjælp af bølger, kan man måske have katte, der både er døde og levende på samme tid<sup>3</sup>, og måske teleportere information mellem Jorden og Månen. Dette vil blive forklaret i denne artikel.



**Figur 2.** Illustration af dobbeltspalteeksperimentet som Bohr og Einstein diskuterede. En bølge bliver sendt ind og kun en lille del kommer igennem den første plade, S1. Ved den midterste plade, S2, ryger der en lille del gennem det øverste hul og en del gennem det nederste hul. Ved den sidste plade, S3, måler man intensiteten af bølgen. I (a-c) ser man, hvad der sker når enkeltpartikler sendes igennem, og vi ser ikke nogen bølgeegenskaber (interferens). Når vi sender flere partikler igennem, (b), så begynder der at komme et mønster, som tilsidst giver bølgemønstret i (c), svarende til at vi har sendt rigtig mange partikler igennem. Mønstret i (c) vil ikke fremkomme, hvis partiklerne ikke har bølgeegenskaber.

## Dobbeltspalte-eksperimenter

En af de første slagmarker for fortolkningen af denne nye teori var det velkendte dobbeltspalteeksperiment. Dette eksperiment kommer oprindeligt fra klassisk bølgemekanik, men på grund af Bohr og Einsteins debat vedrørende dette eksperiment, er det selv i dag et grundlag for diskussioner om kvantemekanikken. Ved hjælp af Schrödingers bølgemekanik kunne fysikere forudsige præcist, hvordan bølger af lys eller stof ville opføre sig, når de blev sendt gennem de to spalter, men hvad



ville der ske, hvis man kun sendte én partikel igennem? Svaret blev givet, kort tid efter Schrödinger fremlagde sin ligning, af tyskeren Max Born, der postulerede en statistisk fortolkning af Schrödingers bølgemekanik.

Når man løser Schrödingers ligning, får man en bølgefunktion,  $\psi(x, t)$ , der afhænger af position  $x$  og tid  $t$ . Born foreslog, at når man lavede forsøg med enkelte partikler, vil normkvadratet på bølgefunktionen være sandsynligheden for at finde partiklen, dvs:

$$|\psi(x, t)|^2 = \text{Sandsynlighed i } x \text{ til tiden } t. \quad (1)$$

Nu skulle man tro, at alle var glade, da man havde svaret på, hvad der ville ske, hvis man sendte én partikel igennem de to spalter. Først ville partiklen opføre sig som en bølge og bevæge sig gennem begge spalter, og efterfølgende kan man måle den som en enkeltpartikel ved en tilfældig position  $x$ , hvor sandsynligheden for at finde partiklen her er givet ud fra  $|\psi|^2$ . Vi kalder  $|\psi|^2$  for sandsynlighedstætheden, og dette giver et bølgelignende interferensmønster – dette mønster ville kun fremkomme, hvis stof opførte sig som bølger, når det gik gennem de to spalter.

Borns forslag blev selvfølgelig testet og man så, at hvis man sendte enkelte partikler igennem de to spalter én af gangen, så ville de til sidst skabe et mønster svarende til, at man sendte en bølge gennem de to spalter. Alt giver med andre ord mening. Næsten...

Albert Einstein var en mand med stærke holdninger, og han kunne ikke lide forklaringen givet af Born. Først og fremmest kunne han ikke lide, at det var "tilfældigt", hvor partiklen dukkede op. For det andet kunne han ikke lide, at partiklen først var en bølge og derefter en partikel.

Niels Bohr kunne dog godt lide denne fortolkning af kvantemekanikken og mente, at bølgefunktionen var en fin beskrivelse af kvantemekaniske fænomener. Målinger derimod skulle beskrives ved hjælp af klassiske begreber som bølger og partikler, og i en enkelt måling ville man ikke kunne se både bølge- og partikelopførsel. I 1927 skrev Bohr bl.a. følgende til Einstein<sup>4</sup>:

... Denne vigtige pointe medfører, at det er umuligt at skelne skarpt mellem atomare objekter og deres vekselvirkning med et instrument, der søger at definere de betingelser, hvorunder fænomenet finder sted. Konsekvensen heraf er, at målinger opnået under forskellige betingelser ikke kan forstås inden for et enkelt forsøg, men skal betragtes *komplementært* i den forstand, at kun summen af hele fænomenet giver den mulige information af objektet.

Bohrs idé var med andre ord, at ville man opnå den fulde information om f.eks. en elektron<sup>5</sup>, så skulle man gennemføre komplementære, det vil sige indbyrdes forskellige og hinanden udelukkende, forsøg. Derfor er

et lyskvant en partikel, når vi laver et eksperiment, der kigger på den som en partikel, og en bølge, når vi laver eksperimenter, der måler på den som en bølge.

Matematisk følger dette af tyskeren Werner Heisenbergs usikkerhedsprincip, der siger, at der i et enkelt eksperiment er en grænse for, hvor godt vi kan kende både en partikels sted og impuls (eller bevægelsesmængde). Mere kvantitativt viste Heisenberg, at hvis  $\Delta x$  er usikkerheden i position og  $\Delta p$  er usikkerheden i impuls, har vi:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2)$$

hvor  $\hbar$  kaldes Plancks konstant, og er en meget lille størrelse, der dog er stor nok til at have betydning for meget små objekter.

Einstein foreslog, i et forsøg på at modbevise dette, at man lavede et eksperiment som vist i figur 2. Når en partikel kommer gennem den første plade, vil denne plade flytte sig en lille smule, da der *skal* være bevarelse af impuls. Hvis man måler denne flytning ultra-præcist, så argumenterede Einstein for, at man herudfra ville vide om partiklen gik opad eller nedad, og herfra kan man bestemme hvilken spalte, ens partikel gik igennem, hvilket vil medføre partikelopførsel. Einstein argumenterede dernæst, at dette ikke vil ændre på, hvordan partiklen rammer den sidste skærm. Gentages forsøget derfor mange gange, vil man, for hvert forsøg kunne se hvilken vej, partiklen tog, og efterfølgende ende med det mønster, som Bohr før forklarede med, at partiklen gik igennem begge spalter som en bølge.

Bohr lod sig dog ikke snyde og argumenterede straks, at hvis man kendte impulsen af den første skærm perfekt, så kan man ikke kende dens position. Dette betyder, at der for hver mulig position vil blive dannet et bølgemønster, så vi får en masse bølgemønstre oven i hinanden, hvilket blot giver resultater, som var det enkelte partikler uden bølgeegenskaber, vi sendte igennem. Dette argument beviser, at kvantemekanikken giver konsistente resultater, og Bohr vandt derfor denne første runde af kampen mellem Bohr og Einstein. Ét lille men er dog, at man i dag ved hjælp af såkaldte "svage målinger"<sup>6</sup> rent faktisk godt kan bestemme, hvor partiklen *sandsynligvis* var mellem dobbeltspalten og den endelige skærm. Dette ændrer dog ikke ved, at Einstein tog fejl, men om Bohrs fortolkning er korrekt eller ej, er et helt andet spørgsmål, og er selv i dag til debat.

### Kaster Gud med terninger?

Så Bohr vandt, men Einstein nægtede at give op. Efter sit nederlag ved dobbeltspalteeksperimentet forsøgte Einstein adskillige mere og mere sofistikerede og brilante tankeeksperimenter (se f.eks. figur 3 fra 1930) i håbet om at finde en modstrid i Bohrs fortolkning af kvantemekanikken. Selvom Bohr til tider måtte arbejde hårdt for at modbevise Einstein, så endte Bohr med at vinde hver gang.

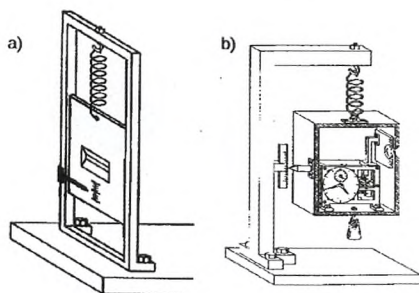
<sup>4</sup>Oversat af forfatterne.

<sup>5</sup>Her menes forskellige, men identisk fremstillede, elektroner.

<sup>6</sup>Begrebet "svage målinger" stammer fra Y. Aharonov i 1988 [5].



Einstein accepterede derfor, at Bohr nok havde ret – til en vis grad. Einstein gjorde et stort nummer ud af at understrege at, ja, der var et usikkerhedsprincip, men dette princip var kun af praktisk betydning og ikke den fulde sandhed. Borns statistiske fortolkning gjorde stadig Einstein utryg, og Einstein insisterede på, at kvantemekaniske sandsynligheder var et spørgsmål om viden og ikke et spørgsmål om grundlæggende ”sandhed” i naturen. Det vil sige, at usikkerheder og sandsynligheder kun kommer fra praktiske forsøg. Teoretisk set vil der ikke være usikkerheder og sandsynligheder på et fundamentalt niveau – ”Gud kaster *ikke* med terninger”<sup>7</sup>. Derfor mente Einstein, at kvantemekanikken nødvendigvis måtte være en utilstrækkelig beskrivelse af virkeligheden.



**Figur 3.** a) Forsøgsopstilling der kan måle, hvilken vej en plade bevæger sig. Det, at man kan måle bevægelsen af pladen medfører, at pladen ikke har en veldefineret position, hvilket ødelægger bølgemønstret fra figur 2.

b) Tegning der viser Einsteins boks, anvendt af Niels Bohr i 1930. Einstein forsøgte her at argumentere for, at når lys blev sendt ud af kassen, så kunne man veje kassen og dermed finde ud af energien af partiklen, samtidig med man kunne måle, hvornår den blev udsendt. Dette burde være forbudt, ifølge kvantemekanikken, og ud fra figuren overbeviste Bohr resten af verdens fysikere om, at sådan var det også.

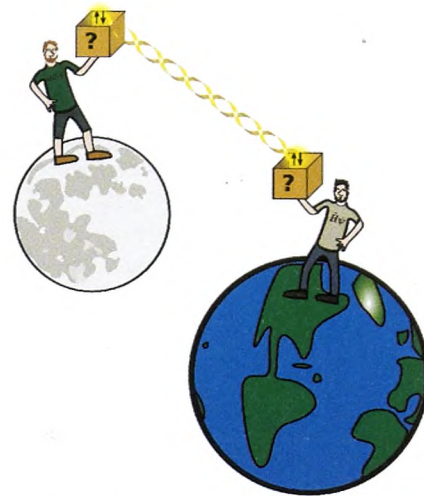
Med udgangspunkt i dette synspunkt formulerede Einstein grundlaget for det, der i dag kaldes ”skjulte variable”, det vil sige, at en partikel *har* både veldefineret position og impuls, selvom vi ikke kan se, hvad de er. Konsekvenserne af dette rækker ret vidt. Sandsynligvis også mere vidtrækkende end Einstein oprindeligt havde forestillet sig. Vi ved f.eks. i dag, at under bestemte betingelser vil de ”skjulte variable” i en ”skjult variabel”-teori nødvendigvis afhænge af, hvad man måler på systemet — med andre ord, så svarer det til, at nogle ting kunne være enten grønne eller røde, afhængig af om vi kigger på dem fra højre eller venstre [2]. Et andet eksempel vil blive gennemgået i næste afsnit.

### Sammenfiltring

Det næste springende punkt i debatten mellem Bohr og Einstein kom i 1935. Her fremlagde Einstein et paradoks sammen med russeren Boris Podolsky og den amerikansk-israelske Nathan Rosen, der i daglig tale blot kaldes EPR-paradokset.

<sup>7</sup>Citat af Einstein fra 1926 i et brev til Born.

<sup>8</sup>Følgende version er en omformulering af EPRs oprindelige forslag lavet af D.J. Bohm og Y. Aharonov i 1957.



**Figur 4.** Vi har et EPR-par (to partikler i en EPR tilstand). Den ene partikel er på Jorden og den anden på Månen. Man kan ved at måle på partiklen på Jorden vide, hvilken vej partiklen på Månen peger, så hvis vi målte en af partiklerne til at pege op, vil den anden pege ned. Ifølge Einstein vil målingen på den første partikel have ændret på den anden partikel. Bohr mente dog, at før vi målte, kunne vi ikke sige om partiklen pegede op eller ned, så derfor ændrede vi ikke på den anden partikel.

Dette paradoks bygger på to antagelser. For det første antog Einstein, Podolsky og Rosen (EPR), at der findes ”elementer af fysisk virkelighed”, hvilket blot betyder, at hvis vi ser noget pege til højre, så vil det pege til højre både lige før, mens og lige efter, at vi kiggede på det. Det vil sige, at der eksisterer fysiske egenskaber uafhængig af målingen. Den anden antagelse bygger på princippet om lokalitet. Det vil sige, at hvis vi ændrer på et system, vi har i hånden, så vil det ikke med det samme ændre de fysiske egenskaber af et system på Månen (eller nogle andre steder).

Begge disse antagelser lyder meget tilforladelige, men EPR viste, at, givet et bestemt fysisk system, gav kvantemekanikken forudsigelser, der ikke stemte overens med disse antagelser. Resultatet blev publiceret i en artikel under overskriften ”Kan en kvantemekanisk beskrivelse af den fysiske virkelighed betragtes som fuldstændig?” [3], og i artiklen argumenterede EPR for, at svaret på dette spørgsmål er ”nej”. Vi vil nu gennemgå EPRs argument<sup>8</sup>.

Før vi forklarer mere, bliver vi dog nødt til at introducere begrebet *superposition*, der kort fortalt betyder, at partikler kan være i to forskellige tilstande på én gang. Det betyder f.eks., at vi har en mønt der både er plad og krone på én og samme tid. Det er i virkeligheden ikke så mærkeligt, som det lyder, for det er præcis det samme, der gør sig gældende i dobbeltspalteeksperimentet, når partiklen tog begge veje på én og samme tid.

Forestil dig nu to partikler, der hver kan være i to tilstande, op ( $|\uparrow\rangle$ ) og ned ( $|\downarrow\rangle$ ). Det svarer igen til f.eks. en mønt, der kan være plad eller krone. De to partikler beskrives nu i den kvantemekaniske tilstand:

$$|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2. \quad (3)$$



Vi vælger her at have enten den ene partikel til at pege op og den anden til at pege ned eller også det modsatte. Tricket er nu, at vi vælger vores partikler til at være en superposition af disse to muligheder, så vi har begge på samme tid.

I dobbeltspalteforsøget havde vi som sagt en superposition af en partikel, der bevægede sig gennem begge spalter, men efterfølgende kunne man kun måle partiklen ét sted. Det samme princip gør sig gældende i EPR-forsøget. Hvis vi måler på den ene partikel, så vil vi finde den til enten at pege op eller ned. Men på grund af den specielle tilstand, vi har, så ved vi, at hvis den første partikel peger op, så må den anden partikel pege ned. Det samme gør sig gældende den anden vej rundt. Ifølge Born og Bohrs fortolkning så vil en måling på den ene partikel give enten op eller ned, og derfor ved vi *med det samme* hvilken vej den anden partikel peger, så vi har her ændret på *den kvantemekaniske tilstand* af partiklerne. Vi siger, at partiklerne er sammenfiltret. EPR antog nu, at den ene partikel var på Månen og den anden partikel her på Jorden. Ved at måle på partiklen her på Jorden mente EPR derfor, at de rent faktisk ændrede på *de fysiske egenskaber* af partiklen på Månen, hvilket strider imod antagelsen om lokalitet. Det vil sige, at vi ifølge Bohrs kvantemekanik kan bryde EPRs antagelser, ergo ifølge EPR må kvantemekanikken være forkert.

Modsvaret fra Bohr kom fem måneder senere i en artikel i samme tidsskrift med samme navn. Her angreb Bohr specielt EPRs antagelse om, at der måtte være elementer af fysisk virkelighed, men selve antagelsen om lokalitet åbnede Bohr op for måske ikke var gyldig. Dette førte Bohr til at konkludere, at EPRs argumenter "ikke retfærdiggør deres konklusion om, at en kvantemekanisk beskrivelse nødvendigvis fører til ufuldstændighed". Desuden skriver Bohr også, at nøglen til problemet ligger i EPRs behandling af måleprocessen, og i dag bliver målingsproblemet betragtet som et nøglepunkt i debatten om fortolkningen af kvantemekanikken.

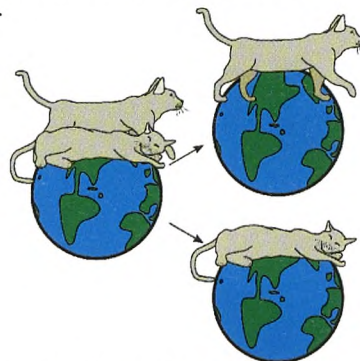
Efter Bohrs svar stagnerede debatten mellem Bohr og Einstein, og den generelle opfattelse var, at Bohr havde vundet, men ikke alle var tilfredse. En af de fysikere, der ikke var tilfreds, var den irske fysiker John Bell, der i 1964 fremlagde en simpel ulighed på baggrund af EPRs antagelse. Hvis man kan lave et forsøg, der brød Bells ulighed, så må mindst én af EPRs antagelser være forkerte. Er dette lykkedes? Ja! Første gang, et eksperiment påviste brud på Bells ulighed var i 1972 og så igen 1981 og siden mange gange. Uheldigvis var både Einstein og Bohr døde i 1972, så hvordan de ville reagere på dette, er også et åbent spørgsmål.

En af konsekvenserne er derfor nu, at man ikke kan have både lokalitet og elementer af fysisk virkelighed. Bohrs svar var som sagt primært, at vi ikke har en fysisk virkelighed. Vi kan med andre ord spørge "Hvilken vej pegede partiklen før vi målte?". Til dette vil Bohr svare at den pegede ikke nogen vej, hvilket for nogen

er et højst utilfredsstillende svar. Problemet er, at hvis man gerne vil have elementer af fysisk realitet, så vil det, at vi ændrer på partiklen her på Jorden, ændre på partiklen på Månen, hvilket for mange vil være meget mere uacceptabelt.

## Målinger

Selvom mange anså Einsteins argumenter som skudt ned af Bohr, så formåede Bohr aldrig at svare fyldestgørende på spørgsmålet om målingers betydning i kvantemekanikken. Ifølge Bohr skulle kvantemekanikken kun bruges, når en kvantemekanisk beskrivelse var passende, hvilket vil sige for meget små systemer. Målinger skulle, ifølge Bohr, kun bruges til at oversætte kvantemekanik til klassiske begreber, som vi kan forholde os til.



**Figur 5.** Hvad sker der med en kat, der er i en superposition af at være død og levende? Ifølge Københavnerfortolkningen vil en måling tilfældigt vælge enten en verden med en død kat eller en verden med en levende kat. I mangeverdensfortolkningen sker begge dele, så vi har to verdener.

Denne forklaring er dog på mange måder ikke tilfredsstillende, for hvor går grænsen for, hvornår noget er småt, og hvornår noget er stort? Et af de mest illustrative eksempler på denne problemstilling blev fremlagt af Schrödinger i 1935. Schrödinger foreslog, at man tog en kasse. Inde i denne kasse placerede man så en kat, og et radioaktivt atom, og en Geigertæller, og så noget blåsyre<sup>9</sup>. Herefter kan man lave et system, så en måling af et radioaktivt henfald vil udsende blåsyren i kassen. Efter et kort stykke tid vil det radioaktive atom være i en superposition mellem at have udsendt radioaktiv stråling eller ej. Det betyder, at Geigertælleren efterfølgende vil være i en superposition af at have målt et radioaktivt henfald eller ej. Nu vil blåsyren så være i en superposition af at være udsendt eller ej. Til sidst vil katten så enten indånde gassen eller ej, dvs vi har en kat i en superposition mellem at være levende og død:

$$|\text{Kat}\rangle = |\text{Levende}\rangle + |\text{Død}\rangle. \quad (4)$$

Rent faktisk vil det hele være en superposition af, at enten er det hele sket, eller også er intet sket. Katten ville derfor være både levende og død på én og samme tid, på samme måde som en partikel i dobbeltspalteeksperimentet tog begge veje på én og samme tid. Dette kaldte Schrödinger selv for en latterlig tanke.

Bohr anså, som nævnt, denne problematik for mindre relevant. En kat er et stort system og derfor skal

<sup>9</sup>En meget lille mængde blåsyre kan dræbe en kat på ganske få minutter.



det ikke beskrives ved hjælp af kvantemekanik. Bohrs fortolkning, kendt som Københavnerfortolkningen, postulerer at når vi går fra små systemer til store systemer, så vil det store system måle på det mindre og så skal vi kollapse bølgefunktionen, dvs. vi skal tilfældigt finde ud af, om katten er død eller levende. For Bohr var en Geigertæller et stort nok system til at kollapse bølgefunktionen. Andre variationer af Bohrs fortolkning siger dog, at katten rent faktisk er både levende og død, men når kassen åbnes, så kollapse bølgefunktionen, og vi ser enten en død eller levende kat.

Man kan også gradbøje Bohrs fortolkning, så kollapse sker som en naturlig proces og ikke som en tilfældig begivenhed, når et stort system måler på et mindre. Dette kan udtrykkes som, at katten måler på sig selv. Dette kaldes for objektiv kollapsesteori, men selvom ideen kan lyde tiltalende, så er der ingen eksperimentel indikation af, at denne form for proces skulle finde sted, ligesom der heller ikke er noget, der taler imod det.

Endelig vil nogle foreslå det, der populært kaldes for mange-verdensfortolkningen. Denne fortolkning går i sin enkelthed ud på, at man ignorerer spørgsmålet om, hvornår man måler. Målinger finder med andre ord ikke sted. I stedet sker der det, at når en person kigger ind i kassen, så vil han enten se en død eller levende kat, og efterfølgende vil personen være i en superposition af at have set en død kat og af at have set en levende kat. Fortsætter man denne kæde af observatører, vil man til slut ende med hele universet i en superposition af at indeholde en død kat og indeholde en levende kat. Med andre ord har vi nu to universer.

Denne fortolkning er meget kontroversiel, men det kan ses som den mest "naturlige" udvidelse af den kvantematiske formalisme. Mange fysikere holder sig derfor til Bohrs fortolkning, men den efterlader selvfølgelig det åbne spørgsmål om, hvornår man laver målinger, og hvornår man laver nye kvantemekaniske superpositioner? Et spørgsmål vi selv ikke i dag kan svare på, men der er folk, der aktivt prøver på det.

### Fra dengang til nu

Det er som sagt muligt at fortolke kvantemekanikken på mange måder, men Bohrs Københavnerfortolkning er traditionelt set den mest populære fortolkning<sup>10</sup>, hvilket betyder, at målinger, dvs. kollapse af bølgefunktionen, spiller en essentiel rolle for nutidens kvantefysikere. Det betyder også, at fysikere har fundet på mange spændende måder at udnytte målinger på.

Et af de mest spændende forsøg, der udnytter målingens natur i kvantemekanikken, er såkaldt kvanteteleportation. Her udnytter man et EPR-lignende system ikke bare til at vide, om den anden person har en partikel, der peger op eller ned, men i stedet til at teleportere præcis den kvantemekaniske information af sted man har lyst til. Det kan lyde som science-fiction, men det er faktisk lykkedes at lave kvanteteleportation

i virkeligheden [4]. Så vi kan have en partikel, som vi måler på. Dette kollapse som bekendt bølgefunktionen for partiklen, dvs. vi har ødelagt vores kvantetilstand, men under de rigtige EPR-lignende betingelser kan man gøre således, at partiklens information dukker op et andet sted. Vi har med andre ord effektivt teleporteret partiklen! Betyder det så, at man kan sende ting hurtigere end lysets hastighed? Nej, desværre ikke. Kvanteteleportation virker kun, hvis man foruden sit EPR-system sender et helt normalt elektrisk signal ved siden af, der som bekendt ikke bevæger sig hurtigere end lyset.

Andre forsøg, der prøver at udfordre vores fortolkning af kvantemekanikken, går efter at lave så store Schrödingers kat-tilstande som muligt<sup>11</sup>. Indtil videre er det ikke lykkedes folk at finde en veldefineret grænse mellem kvantemekanik og klassisk mekanik, men alle eksperimenter kan alligevel nemt forstås inden for Bohrs fortolkning, mens Einsteins ideer ikke holder i længden. Derfor kan man slutte, at Bohr var vinderen af kampen mellem Bohr og Einstein.

### Litteratur

- [1] Helge Kragh (2011), Opdagelsen af atomkernen: Et 100-årsjubileum. KVANT nr. 2, april 2011.
- [2] N. David Mermin (1993), Hidden variables and the two theorems of John Bell. *Rev. Mod. Phys.* **65**, 803-815.
- [3] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen (1935), Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**, 777-780
- [4] Spooky action and beyond. Interview med Anton Zeilinger, [www.signandsight.com/features/614.html](http://www.signandsight.com/features/614.html)
- [5] Y. Aharonov, D.Z. Albert, L. Vaidman (1988), How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. *Physical Review Letters* **60**, 1351-1354.



Andrew C.J. Wade er fra New Zealand og er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet og forsker i teoretisk kvantemekanik med kolde gasser.



Christian Kraglund Andersen er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med teoretisk kvantemekanik implementeret i faststofsyste-mer.

<sup>10</sup>Murray Gell-Mann hævder, at Mangeverdenfortolkningen er mere populær i USA, blandt kosmologer og kvantefeltteoretikere.

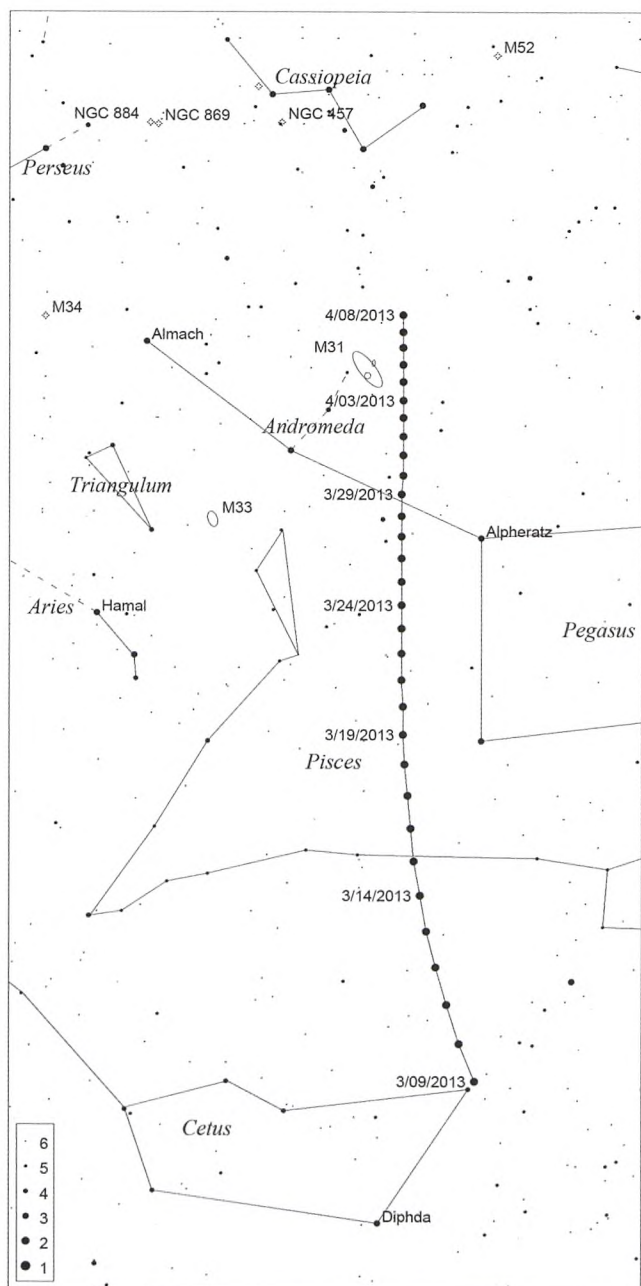
<sup>11</sup>Læs artiklen af Brian Julsgaard og Klaus Mølmer i nærværende blad for flere detaljer om dette emne.



# Komet på martshimlen

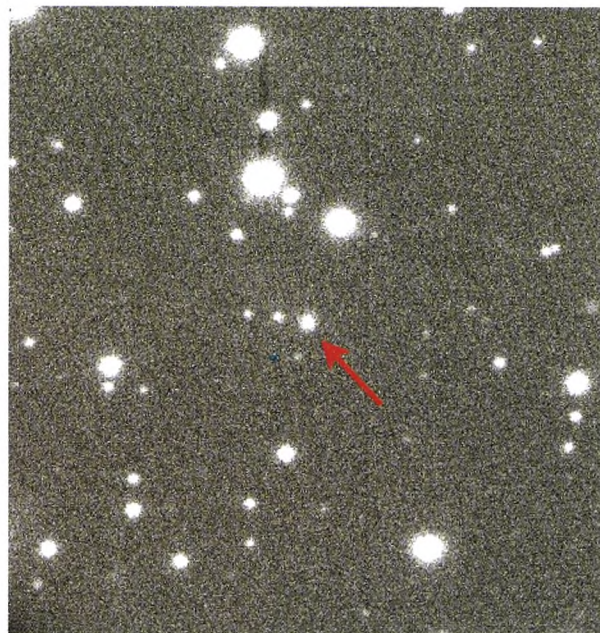
Af Michael Quaade

I sidste halvdel af marts vil kometen PanSTARRS (C/2011 L4) være synlig på vesthimlen lige efter solnedgang. Den vil i alt fald være på himlen, men det kan sagtens være nødvendigt med en håndkikkert for at få øje på den. Det er straks et helt andet spørgsmål om det bliver et iøjnefaldende fænomen på aftenhimlen ligesom f.eks. komet Holmes i 2007 og de to meget klare kometer Hale-Bopp og Hyakutake i 1996 og 1997. Det var det ikke muligt at forudsige noget om i skrivende stund, midt i februar.



**Figur 1.** Stjerne kort, der viser kometens bane i marts-april 2013. Kortet er fremstillet med XEphem programmet.

Kometen forventes at være klarest den 9. marts, men den dag går den ned kort efter kl. 19 mens det stadig er temmelig lyst. Senere på måneden står den højere og højere på himlen og går derfor senere ned, men den bliver også svagere. 4. april passerer den et par grader til højre for Andromedagalaksen. På det tidspunkt er den markant svagere, men kan stadig ses i kikkert.



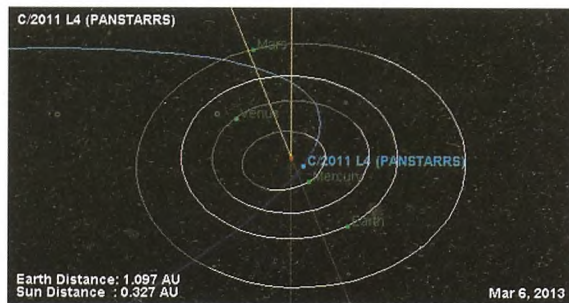
**Figur 2.** Den optagelse hvor komet C/2011 L4 PanSTARRS blev opdaget 6. juni 2011 med PanSTARRS PS1 teleskopet. Dengang var den længere væk end Jupiter og havde en størrelsesklasse på 19, mere end 150 000 gange svagere end de svageste stjerner, vi kan se med det blotte øje. Foto: Henry Hsieh, PS1SC.

Navnet stammer fra, at den i 2011 blev opdaget af Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, forkortet PanSTARRS. Det er et system af automatiske teleskoper hvoraf foreløbig kun et, PS1 på Hawaii, er i drift. Hovedspejlets diameter er 1,8 m. Det er ikke så imponerende efter vore dages standard, men det har verdens største CCD-kamera med 1,4 gigapixel [1]. Hvert billede fylder et par gigabyte og på en god nat kan der sagtens komme adskillige terabyte i kassen. Det er ikke realistisk at gemme alle disse data, så billederne analyseres automatisk af algoritmer, der søger efter objekter, der varierer i lysstyrke, flytter sig eller på anden måde ændres fra billede til billede. Et af PanSTARRS projektets væsentligste formål er at holde øje med objekter, der kommer så tæt på Jorden at der er risiko for et sammenstød.

Kometer består af støv og is. De minder om store beskudte snebolde, typisk med en størrelse på nogle kilometer. Kometerne stammer fra den ydre del af



solsystemet og de er som regel for langt væk til at vi kan se dem.



**Figur 3.** Kometens bane gemmen den inderste del af Solsystemet.

Når en komet nærmer sig solen begynder det ydre lag is at fordampe, og det løsrevne materiale danner en stor sky på flere hundrede tusinde kilometer. Det er først og fremmest denne sky – kometens hoved eller koma – der kan ses på himlen. Kernen er for lille til at kunne ses.

Solvinden består af elektrisk ladede partikler, elektroner og protoner, der strømmer ud fra Solen. Den “blæser” materialet fra hovedet væk i en retning bort fra Solen og danner på den måde kometens hale. Der er faktisk to haler, en blålig gas- eller ionhale og en hvidgullig støvhale.



**Figur 4.** Komet Hale-Bopp som den så ud 30. marts 1997. Bemærk den blå ionhale og den hvidgule støvhale der vender i hver sin retning. Foto: Loke Kun Tan.

Ionhalen består af ioniseret gas fra kometens hoved. Ionerne er elektrisk ladede og følger derfor med solvinden. Resultatet bliver at ionhalen altid peger altid lige væk fra Solen. Ionhalens blå lys dannes når de ioniserede gasatomer indfanger elektroner, der henfalder og udsender lys, der svarer til energiovergangene i atomerne.

Støvhalen er dannet af støv fra komethovedet. Støvpartiklerne påvirkes meget mere end de lette gasmolekyler af Solens tyngdekraft. De er dog blæst længere væk fra Solen og har derfor en lidt større bane end kometen. Den større bane bevirker at støvet får en mindre banehastighed, så støvkornene kommer “bagefter” i forhold til kometen. Det viser sig ved at støvhalen ikke peger lige væk fra Solen, men krummer bagud i

forhold til kometen. Den lyser med reflekteret sollys og ser derfor hvidgullig ud.



**Figur 5.** Med noget held kommer komet C/2011 L4 (PanSTARRS) til at tage sig ud nogenlunde som komet Hyakutake på dette billede fra den 25. marts 1996. Stjerneerne er trukket ud fordi kameraet fulgte kometen under optagelsen. Foto: E. Kolmhofer og H. Raab.

Der er allerede optaget mange imponerende billeder af komet PanSTARRS, se fx Roger Grooms imponerende samling af billeder [2], hvoraf ét er vist i figur 6.

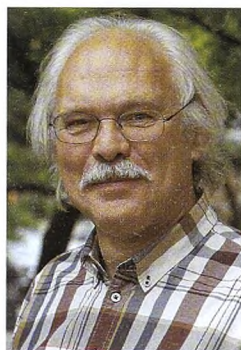


**Figur 6.** Den australske astrofotograf Roger Grooms optagelse af komet C/2011 L4 (PanSTARRS) fra den 15. februar 2013 [2].

Skulle det glippe kommer der en chance for at se en komet på himlen til efteråret. Til den tid vil det være kometen ISON, opkaldt efter International Scientific Optical Network. Der er bl.a. den fordel ved dens bane at den passerer tæt forbi himlens nordpol så den vil være synlig hele natten og ikke kun lige efter solnedgang.

## Litteratur

- [1] <http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu>
- [2] Astrofotograf Roger Grooms billeder af kometer, herunder C/2011 L4 (PanSTARRS), <http://rogergroom.com/astro-photography/comet-photography/>



Michael Quaade er uddannet astronom fra Københavns Universitet og er i dag formand for Astronomisk Selskab. Han er hovedansvarlig for driften af Wieth-Knudsen Observatoriet i Tisvilde. Siden 2012 har han arbejdet i kommunikationsafdelingen på Niels Bohr Institutet, primært med at udvikle et webbaseret fysikleksikon. Foto: Ola Jakup Joensen.



# Taurus Observatoriet i Horsens

Af Knud Erik Sørensen, Taurus Observatoriet

Taurus Observatoriet er en del af Horsens Statsskole på Studentervænget i Horsens. Observatoriet er kendt langt ud over lokalområdet for dets mange Åbent Observatorium-arrangementer med årlige besøgstal på 500 til 700 personer.



**Figur 1.** Observatoriet er smukt placeret på taget af Horsens Statsskole, der ligger i byens udkant. Fra tagets platform er der ikke blot en fantastisk udsigt over byen, men også mod himmelrummet, og her har mange i tidens løb lært markante stjernebilleder at kende. I billedets forgrund ses Aristoteles og Platon. Foto: K.E. Sørensen.



**Figur 2.** Fra platformen foran observatoriet er der plads til mange personer, som på samme tid kan lære at orientere sig på stjernehimlen. I etagen under observatoriet findes et auditorium, der bruges ved Åbent Observatorium. Foto: K.E. Sørensen.

Taurus Observatoriet er udstyret med en CPC 800 fra Celestron, altså et 8 tommer Schmidt-Cassegrain teleskop, der er monteret i en fast, stabil opstilling ovenpå en metertyk betonsøjle i en alt-azimut opstilling.

Kikkerten kan manipuleres med en håndkontrol med display og tastatur og GOTO computerstyring med automatisk slewing til 40.000 objekter i håndkontrollens database, eller den kan styres fra en PC.

Teleskopet er placeret under en metalkuppel, hvor motorerne, der styrer åbningslemmen og drejningen af kuplen, kan betjenes via trykknapper fra den platform, som observationerne foregår fra. Kikkerten – samt en del ekstra udstyr som f.eks. et 60 mm Lunt protuberans-teleskop, en computer og et kamera – er i 2008 efter ansøgning doneret af *Energi Horsens Fonden*.

Observatoriet er en del af Horsens Statsskole, byens ældste gymnasium, men med hjælp fra Horsens Astronomiske Forening har offentligheden adgang til observatoriet.

Observatoriets historie tager sin begyndelse midt i 1930'erne, hvor Møller Nikolajsen, Sirius Observatoriet i Vejle (se KVANT nr. 3, okt. 2012), havde en lille kikkert til salg. Lektor Orla Rasmussen forhandlede uden resultat om et køb af denne. I stedet lykkedes det ham at få 12 Horsensborgere til hver at donere 500 kr.,



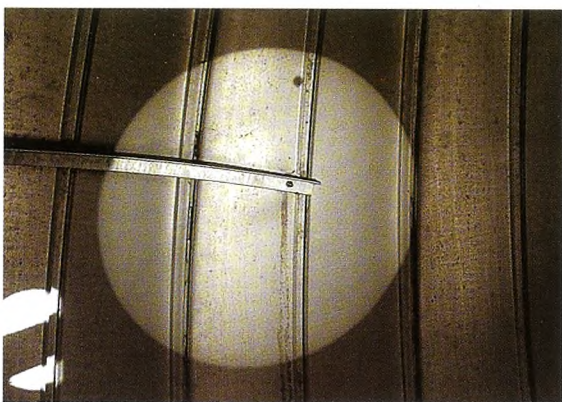
så der var midler til køb af en 13 cm refraktor hos en optiker Musholdt på Købmagergade i København.



**Figur 3.** Kikkerten og den solide observationsplatform hviler på et massivt betonfundament. Foto: K.E. Sørensen.

I 1940 blev Horsens Statsskoles nye bygninger på Studentervænget indviet. På taget skulle der være plads til observationer, og der blev opsat et rækværk, som i første omgang blev til glæde for tyskerne, for kort tid efter indvielsen blev skolen besat. Tyskerne rykkede dog snart ud igen, og kikkerten blev stillet på en repos på skolen, hvor den stod indtil august 1943. På det tidspunkt overtog tyskerne igen skolens bygninger – først midlertidigt, men fra juletid endeligt. Kikkerten blev gemt under taget på byens daværende statsfængsel, medens skolen holdt til i bygninger inde i byen.

Efter krigen kom kikkerten tilbage til skolen, men grundet pengemangel blev den stående på reposen indtil 1969, hvor kuppelbygningen på skolens tag blev rejst. Kuplen blev hjemskaffet fra Canada, og i øvrigt gik den først afsendte kuppel ned med skibet og en ny måtte sendes.



**Figur 4.** Venuspassagen 8. juni 2004 blev ikke blot set gennem et solfilter, men også projiceret op på kuplen til glæde for de mange fremmødte. Foto: K.E. Sørensen.

Ironisk nok fjernede den lille gymnasiereform fra 1971 astronomi som selvstændigt fag, netop som observatoriet skulle tages i brug i undervisningen, hvorfor observatoriet kun blev brugt lidt i de følgende år. Kikkerten havde oprindeligt et urværk, drevet af lodder, men i forbindelse med en renovering i 1989 fik den et motordrev, og tilbehøret blev kraftigt udvidet.

Desværre måtte vi sige farvel til refraktoren i 1995, idet der var trængt fugt ind mellem objektivets samle- og spredelinse. Objektivets mål var ikke standard, og frem for sær fremstilling var det billigere at anskaffe en 8" SC, som også var mere publikumsvenlig – og allerede på det tidspunkt blomstrede *Åbent Observatorium*-ordningen. Denne kikkert blev så i 2008 erstattet af den nuværende.

Horsens Astronomiske Forening, HAF, er en lille, men meget aktiv forening. Medlemmer fra foreningen har siden midt i 1980'erne deltaget i *Åbent Observatorium*-ordningen i samarbejde med Horsens Statsskole. Det går ud på, at observatoriet holder åbent hus på en række datoer fra efterår til forår med fri og gratis adgang for alle. Disse aftener suppleres med specialtilrettelagte bestillingsaftener for grupper: spejdere, skoleklasser med forældre, personaleforeninger, etc., etc., og ofte kommer gæsterne langvejsfra! Der er altid åbent, uanset vejret. Gennem de seneste 17 år har der i gennemsnit været 577 besøgende pr. sæson fordelt over 26 arrangementer i snit pr. år – og besøgstallene er stadig voksende! Mange unge har deres første møde med Horsens Statsskole i Taurus Observatoriet.



En typisk aften forløber sådan, at alle naturligvis kommer i observatoriet, og hvis vejret tillader det, observeres der, men altid bliver der fortalt om kikkerten og dens brug. En anden fast ingrediens er en virtuel rejse fra Solen ud til Virgohoben, hvor jeg med modeller, ord, billeder og animationsprogrammer som f.eks. *Starry Night* og internetsider får præsenteret – i intens dialog med tilhørerne – en masse astronomiske fænomener, som de ses fra Jorden eller ved rejser ud i rummet. Indholdet varierer efter årstid, aktualitet og tilhørernes ønsker og stikord.

Som tidligere ansat på Horsens Statsskole gennem 37 år som fysik- og astronomilærer har jeg stadig det privilegium at have fri adgang til skolen og dens faciliteter, samtidig med at jeg som HAF-medlem står for alle *Åbent Observatorium*-arrangementer. Til gengæld bruger HAF skolen som klubhus.

Læs mere om Taurus Observatoriet og Horsens Astronomiske Forening på nedenstående web-adresser.

#### Litteratur

- [1] Taurus Observatoriet, [www.taurus-observatoriet.dk](http://www.taurus-observatoriet.dk)
- [2] Horsens Astronomiske Forening, [www.haf-astronomi.dk](http://www.haf-astronomi.dk).



## Tildeling af H.C. Ørsted Medaljen til rektor Jannik Johansen, Frederiksberg Gymnasium

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) har nu sat fokus på den vigtige formidling i gymnasiet og vil i de kommende år uddele H.C. Ørsted Medaljer til inspirerende gymnasielærere indenfor SNU's fagkreds.

Som optakt til denne serie "gymnasielærer-medaljer" blev der den 7. december 2012 uddelt en H.C. Ørsted Medalje til en kendt gymnasielærer, rektor Jannik Johansen fra Frederiksberg Gymnasium, der dog får medaljen også for mange andre formidlings-initiativer.

"Rektor Jannik Johansen får medaljen for sin mangeårige idérige indsats for naturvidenskabelig formidling både i og uden for skolen" sagde præsidenten for SNU, professor, dr.scient. Dorte Olesen ved uddelingen. "Jannik Johansen har spillet en helt unik rolle for naturvidenskabsformidling til børn og unge – han var for godt 30 år siden idémanden bag Experimentarium og har nu i 26 år været dets bestyrelsesformand. Han var også en af de helt centrale igangsættere af Forskerspire-ordningen, der er for unge talenter indenfor alle fagområder. På læremiddelfronten har han været en drivkraft bag tidlige digitale undervisningsmidler indenfor mange

fag og i naturvidenskab bag større sammenhængende udgivelser med både bøger og digitale elementer. Dertil kommer, at han med stor gennemslagskraft har virket i 35 år i gymnasieskolen, fra han begyndte som ung fysiklærer på Gentofte Statsskole i 1977. Det er således en helt enestående indsats, vi i Selskabet for Naturlærens Udbredelse nu hædrer med en H.C. Ørsted Medalje."

Overrækkelsen af H.C. Ørsted Medaljen til rektor Jannik Johansen skete den 7. december i forbindelse med Finalen for Forskerspirer konkurrencen, der foretog i Festsalen på Københavns Universitet. Det blev en meget festlig uddeling med omkring 200 deltagere, heriblandt rektor for Københavns Universitet Ralf Hemmingsen, de to relevante fagministre, Morten Østergaard og Christine Antorini, mange unge lovende forskerspirer og deres lærere fra hele landet.

Der er nu nedsat et udvalg, der skal formulere kriterierne for de kommende års uddelinger af medaljen til inspirerende gymnasielærere i fysik, kemi og matematik. Udvalget består af fhv. rektor Hans Lindemann, rektor Steen Hoffmann, fagkonsulent Jette Rygaard Poulsen og studielektor Per Dal Jensen.



Præsident for SNU, Dorte Olesen, overrækker H.C. Ørsted-medaljen til Jannik Johansen.