

# Kvantemekanikken

*Den klassiske fysik og vores hverdagserfaringer siger, at årsag og virkning altid følges ad. I kvantefysikken er det derimod aldrig muligt at finde årsagerne til en begivenhed – og det skyldes ikke manglende indsigt, men afspejler en dybtliggende tilfældighed i naturen.*

Af Benny Lautrup

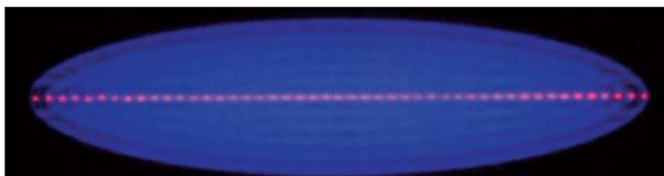
■ Erkendelsen af at naturen på det dybeste plan beskrives ved en teori der er meget forskellig fra den makroskopiske, klassiske beskrivelse, er kun cirka 100 år gammel. Denne teori, som i dag er kendt som *kvantemekanikken*, har udviklet sig fra en teori for atomernes struktur til en generel teori for hele den mikroskopiske verden, og tilmed for nogle helt makroskopiske fænomener, for eksempel superledning og superflydning.

Med minituariseringen af især den elektroniske teknologi har kvantemekanikken i dag stor betydning for de fleste af de apparater og maskiner, vi til hverdag benytter med selvfølgelighed. Mange forbløffende kvanteeptiske fænomener har set dagens lys i de senere år. Kvantekryptering er allerede en realitet. Kvantemekanikkens løfter om en helt ny type computerteknologi er i disse år under intens udforskning.

Selvom vi således hjemmenvant forsøger at udnytte de muligheder, kvantemekanikken stiller i udsigt, foruroliger de besynderlige konsekvenser af denne teori stadig de fleste, der beskæftiger sig med den.

## Teoriens utilgængelighed

Gennem fysikkens udvikling har de fundamentale teorier langsomt fjernet sig fra hver-



*En streng af ioner i et stort ionkristal: En mulig prototype på et kvanteregister til brug i en fremtidig kvantecomputer.* Foto: QUANTOP

dagens intuitive forestillinger. Konklusionen er, at det fysiske univers hverken i det store eller i det små er sammenligneligt med de forestillinger, vi har tilegnet os gennem vores opvækst og livslange omgang med den nære materielle verden.

Galileis lov om inert, Newtons love for bevægelse og tyngdekraft, Maxwells ligninger for elektromagnetisme, og Einsteins relativitetsteori indeholder alle formelle og matematiske abstraktioner, der ikke umiddelbart er tilgængelige for vores intuition. Beherskelsen af det matematiske apparat er i dag en forudsætning for at benytte disse klassiske teorier professionelt.

De har også alle gennem matematiske analyser vist sig at indeholde overraskende elementer, der af og til med stor fordel kan udnyttes industrielt. Selv relativitetsteorien, som de fleste anser for dagligdagen uvedkommende, er afgørende

for præcisionen af det satellitbaserede navigationssystem (GPS), som enhver hyrevogn i dag betjener sig af.

## Den statistiske virkelighed

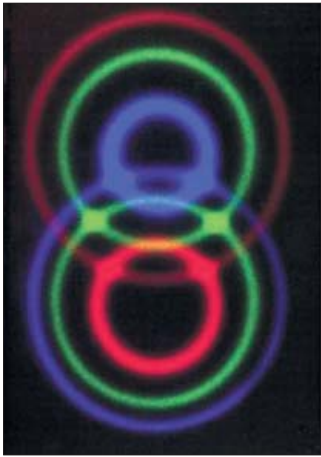
Kvantemekanikkens egentlige og rationelle fundament udgøres også af den matematiske formalisme. Men i modsætning til den deterministiske klassiske mekanik, er den kvantemekaniske beskrivelse af fysiske systemer som udgangspunkt statistisk. Eksperimenter har vist, at det ikke er muligt at betragte statistikken som et udtryk for manglende viden. I vores klassiske dagligdag er det velkendt, at enhver statistisk usikkerhed skyldes uvidenhed om for eksempel fejlkilder. Normalt kan vi ikke forudsige, om et møntkast fører til plat eller krone, fordi vi ikke kan kontrollere kastet. Hvis blot vi kendte møntens præcise starttilstand og omgivelsernes beskaffenhed, kunne vi præcist beregne dens

bane og dermed forudsige, om det bliver plat eller krone.

Forfinede analyser og eksperimenter har vist, at kvantemekanikkens statistiske beskrivelse ikke dækker over uvidenhed eller uformåenhed, men er en primær egenskab ved denne teori. Det er gennem de sidste hundrede år utallige gange eftervist, at det ikke er muligt at opnå en så fuldstændig viden om et fysisk system, at dets fremtid kan forudsiges deterministisk – altså med ubegrænset præcision. Kvantemekanikken er i bund og grund indeterministisk, og den afspejler en dybtliggende tilfældighed i naturen, som er i direkte modsætning til de klassiske forestillinger, der alle er deterministiske og dermed kausale. Mens den klassiske fysik kan karakteriseres ved, at enhver begivenhed følger kausalt af tidligere begivenheder, er det aldrig muligt at finde årsagerne til en begivenhed i kvantefysikken. Uanset hvor præcist man forsøger at sende en elektron ind mod en atomkerne, er det ikke muligt at forudsige med bestemthed, i hvilken retning den spredes.

## Overvejning af muligheder

Kvantemekanikken giver os også hovedbrud i en anden sammenhæng. Hvis der i vores



Et moderne eksempel på kvanteinterferens.

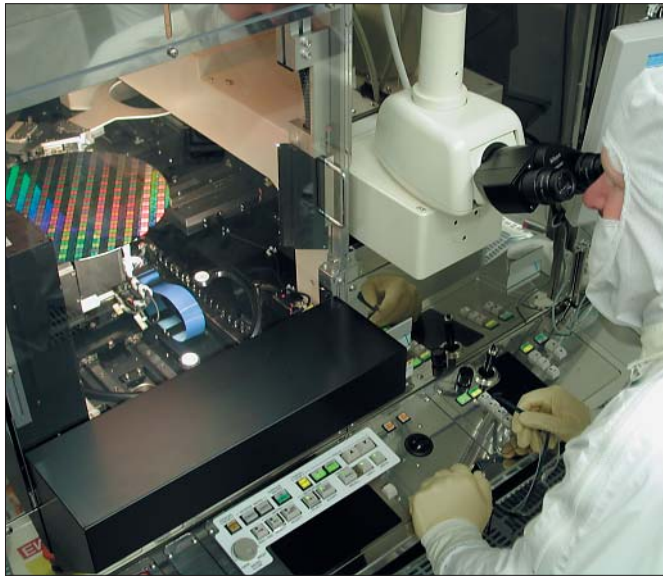


Foto: Intel Corporation

Virkemåden af megen avanceret teknologi kun kan forstås på grundlag af kvantemekanikken. Her ses et billede fra produktionen af moderne processorer fra Intel.

dagligdag er flere mulige veje at tage mellem to punkter, vil kun en af disse blive udvalgt af en given person, og bagefter kan vedkommende fortælle, hvilken vej der blev valgt. Det kan en elektron ikke!

Vi kunne naturligvis opsætte noget eksperimentelt udstyr, som tillod at bestemme, hvilken vej elektronen tog, for eksempel gennem observation af dens elektriske ladning.

Men lad os i stedet forestille os, at der ikke findes nogen måde eksperimentelt at afgøre, hvilken vej en elektron tager gennem et apparat, sådan at begge veje er fuldstændig ligeværdige åbne muligheder. Da fortæller kvantemekanikken os, at vi skal betragte en matematisk "overlejring" eller *superposition* af de to muligheder.

I kvantemekanikken beskrives eksperimentet matematisk ved hjælp af en bølge, hvis kvadrat udtrykker sandsynligheden for at finde elektronen på et givet sted. Bølgen er altså abstrakt og ikke materiel, som en vandbølge, men har dog de samme egenskaber som andre bølger. Specielt vil de to dele af bølgen, der svarer til de mulige veje i apparatet, kunne interferere med hinanden, og enten forstærke eller udslukke den samlede bølge. Men her hører lighe-

den også op. Kvantainterferensen har at gøre med elektronens mulige veje gennem et apparat. Interferensen kan ikke bestemmes af en enkelt elektron, men kun i den statistiske fordeling af myriader af elektroner, der passerer gennem apparatet. Det er ikke en vekselvirkning mellem de mange elektroner, der fremkalder interferensen. Der behøver for eksempel kun gå en elektron igennem apparatet hvert år for efter en årrække at kunne observere fænomenet.

Nogle vil sige, at elektronen samtidig tager begge veje, men et sådant udsagn har ingen mening, så længe det ikke kan afgøres eksperimentelt, og det var jo forudsætningen, at det ikke var muligt. Et eksperiment, hvori det kan afgøres, hvilken vej elektronen vælger, er en helt ny situation, der ikke fører til en superposition af vejene, og heller ikke til den samme fysik.

### Fjernt fra hverdagsforestillinger

Det er dybt forunderligt og foruroligende, at den mest fundamentale teori for stofets egenskaber ikke lader sig indfange i de normale forestillinger, vi bærer på om verdens indretning. Elementær tilfældighed og superposition

af muligheder er så radikalt anderledes end noget, vi kender fra hverdagen. Der findes tilsyneladende ikke et enkelt og intuitivt tilfredsstillende svar på spørgsmålet om, hvad den virkelighed, vi selv er en del af, egentlig består af. ■

### Om forfatteren:;



Benny Laustrup er professor ved Niels Bohr Institutet Københavns Universitet  
Tlf.: 35 32 53 58  
E-mail: lastrup@nbi.dk

### Videre læsning:

*Kvanteteorien - en livlig 100-årig, Aktuel Naturvidenskab 2000, nr 2.*

*Den kvantemekaniske computer, Aktuel Naturvidenskab 2000, nr 2.*

*Sammenfiltrering og kvanteinformation, Aktuel Naturvidenskab 2001, nr 5.*

*Debatartikel: Kvanteteoriens budskab, Aktuel Naturvidenskab 2004, nr 6.*

## Historiske højdepunkter

1900: Den tyske fysiker Max Planck (1858-1947) foreslår, at lyset består af små "pakker" elektromagnetisk energi (kaldet kvanter). Denne ide opstod i et forsøg på at forklare den fordeling af bølglængder, man observerede udsendt fra såkaldte "sortlegemer" (også kaldet hulrumsstråling). De små energipakker (kvanterne) bliver senere kaldt fotoner.

1905: Albert Einstein (1879-1955) bruger Plancks kvanter til at forklare den fotoelektriske effekt – dvs. det fænomen, at der udsendes elektroner fra en overflade (typisk af metal), når den udsættes for lys.

1913: Niels Bohr (1885-1962) forklarer brintatomets struktur og spektrum ved hjælp af Plancks og Einsteins kvanter.

1925: Den tyske fysiker Werner Heisenberg (1901-1976) opstiller matrixmekanikken som en matematisk veldefineret kvanteformalisme.

1926: Den østrigske fysiker Erwin Schrödinger (1887-1961) opstiller bølgemekanikken som en alternativ matematisk kvanteformalisme.

1926: Den tyske fysiker Max Born (1882-1970) fremsætter sandsynlighedsfortolkningen af bølgemekanikken, som siger, at kvadratet på en partikels bølgefunktion på et givet sted angiver sandsynligheden for at finde partiklen netop der.

1926: Den engelske fysiker Paul Dirac (1902-1984) viser, at Heisenbergs og Schrödingers formuleringer af kvantemekanikken er ækvivalente, og opstiller den formalisme, der bruges mest i dag.