

Arven efter Niels Bohr – var der mere?

Claus Münchow

I år har vi fejret 100-året for Bohrs Nobelpris, som han fik for sit arbejde med atomernes struktur. Efter kvantemekanikkens totale succes som grundlag for beregninger mangler der stadig en forståelse af hvad kvantemekanikken overhovedet fortæller os om den verden, hvoraf vi selv er en del. Her så Bohr forløsende, men ikke inddraget som en del af kvantemekanikken, at komplementaritet er svaret. Herom siger Abraham Pais: “Hvordan kan det være at komplementariteten ... som Bohr selv anså for sit vigtigste bidrag, ikke nævnes i nogle af de bedste lærebøger i fysik...?” [1, side 29].

Kvantemekanikken virker, men fundamentalt forstår vi den ikke. Hør hvad Nobelpristager og en af de mest indflydelsesrige fysikere i det 20. århundrede med uvurderlige bidrag til teorien for kvanteelektrodynamik, Richard Feynman, siger:

Jeg mener jeg med sikkerhed kan sige, at der er ikke nogen der forstår kvantemekanik... Lad være med at blive ved med at sige til dig selv “Jamen hvordan kan det lade sig gøre?” for du bliver trukket ind i en blindgyde hvorfra ingen endnu er undsluppet. Ingen ved hvordan det kan lade sig gøre” [2].

Lad være med at spørge – en særpræget videnskabelig doktrin.

Men i begejstringen over, hvad kvantemekanikken kan præstere instrumentelt, har man levet med det, ja, ligefrem arbejdet efter devisen “hold kæft og regn!” Og således foregår der nu en rivende udvikling udnyttende særlige kvanteeffekter, kvantemekanisk sammenfiltring m.m., om hvilke man kan gentage “Ingen ved hvordan det kan lade sig gøre”.

Bohr skiller sig ud – og får medhold

At kvanteeffekter ikke kan forstås med den klassiske fysiks synsmåde, stod klart for Bohr straks ved kvantemekanikkens fødsel. Her udtænkte han komplementaritetsprincippet, som er blevet det filosofiske særkende for den nye tænke måde, som, videre udbygget, neutraliserer de ovenfor nævnte problemer.

Den legendariske strid mellem Bohr og Einstein handlede om netop dette. En delvis historisk gennemgang heraf vil kunne kaste lys over, hvad der adskiller kvantefysikkens erkendelsesvilkår fra den klassiske fysiks, samt Bohrs helt enestående intuitive tilgang til denne særlige indsigt.

Diskussionerne mellem dem startede ved Solvaykongressen i 1927 og varede livet ud. Mange tankeeksperimenter blev konstrueret som grundlag for diskussionerne. Men der manglede en mulighed for at afgøre sagen med et faktisk eksperiment. At et sådant kunne etableres blev i 1964, to år efter Bohrs død, opdaget af John Stewart Bell. Det var en virkelig inspirerende udfordring for dygtige eksperimentalfysikere. De er kommet på stribe, og tre af dem har delt dette års nobelpris i fysik, John F. Clauser (eksperimentet gennemført i 1972),

Alain Aspect (i 1982) og Anton Zeilinger (i 1997). Deres eksperimenter har alle vist, at klassiske mekanismer er uforenelige med den kvantemekanik, som faktisk virker! Det var voldsomt. Da Aspect præsenterede sit resultat, udtrykte han stærk forbløffelse, og Bell optræder på nettet med erkendelsen: “Jeg har igen og igen læst de steder i Bohrs tekster hvor jeg mener han forsøger at forklare udfaldet. Det er sort snak for mig.”

Hvor får Bohr sit på tværs af al forventning sejrende standpunkt fra?

Det kan vi belyse ved at vende tilbage til to perioder, hvor han i særlig grad fandt vej i et rent kaos.

Bohrs intuitive tilgang

Vi starter ved de såkaldte Bohr Festspiele i Göttingen i 1922. Det var år med stor forvirring og usikkerhed. Men der strømmede spændende rygter fra København om atomernes opbygning, og Bohr blev inviteret til at holde syv forelæsninger om de forunderlige fremskridt, der var opnået.

Her mødte Heisenberg Bohr første gang. Han beretter derfra:

For første gang forstod jeg, at Bohrs syn på hans egen teori var meget mere skeptisk end mange andre fysikers ... og at hans indsigt i teoriens struktur ikke var et resultat af en matematisk analyse af de grundlæggende antagelser, men snarere af en intens besættelse af de faktiske fænomener, således at det var muligt for ham at fornemme intuitivt i stedet for at udlede formelt. Således forstod jeg: viden om naturen er primært opnået på denne måde, og kun som det næste skridt kan man lykkes med at udtrykke sin viden på matematisk form, og dermed udsætte den for en rationel analyse. Bohr var primært en filosof, ikke fysiker ...” [3].

Det er meget betydningsfulde træk ved Bohrs tænkning den unge Heisenberg her oplevede og senere med stor træfsikkerhed sætter ord på. Og det er bemærkelsesværdige ord, for Heisenberg satte i andre sammenhænge Bohrs fysik meget højt. Heisenberg synes at udtrykke, at Bohr opnåede sine fysiske indsigter i samspil med en særlig intuition, som Heisenberg kalder filosofisk. Det er den, vi følger op på her.

I Göttingen præsenterede Bohr et korrespondensprincip, en metode som lader ny og gammel beskrivelse mødes i det ydre atom. Her grænser det kvantiserede atom op mod den kontinuerte klassiske beskrivelse. Derved kunne værdier i det kvantiserede atom ved grænseovergange bestemmes ud fra den etablerede klassiske beskrivelse. Det var et ad hoc princip, og det blev kaldt en tryllestav, som kun virkede i København. Men med staven i Bohrs hænder fremkom resultaterne. Foredragene efterlod en sindsoprevet flok fysikere. Der var rene refusanter, kritiske skeptikere, positivt nysgerrige og vakte begejstrede, stort set følgende aldersfordelingen fra de ældre til de yngre. Max Born fra midtergruppen, som senere blev en produktiv medarbejder, sagde: *“Det er alt sammen så dybt sært og utroligt, men denne danske fysiker ligner i den grad et originalt geni, at jeg ikke tør nægte at der kan være noget i det”* [1, side 176].

Det var også om det arbejde Einstein senere sagde: *“At dette usikre og modsigelsesfyldte grundlag var nok til at en mand af Bohrs enestående instinkt og takt kunne opdage de overordnede love ... forekom mig at være et mirakel, selv i dag [1949]. Dette er den højeste form for musikalitet i tankens sfære”* [1, side 196].

I disse år var vi midt i den utvivlsomt mest intense og fascinerende periode i naturvidenskabens historie. På helt bar bund skulle en ny fysik formuleres. Det var en tid med grænseløse udfordringer og uden forhåndsgivne grænser for idéerne og derfor også med mange vildskud. Men efterhånden fremstod en stor mængde eksperimentelle data med tilhørende teoretiske udlægninger. Og frem af tågerne trådte efterhånden ansatser til en samlende teoretisk beskrivelse.

I løbet af efteråret 1926 og de første måneder af 1927 fandt et gennembrud sted på Bohrs institut i København. Store forskelle og stor gensidig respekt var brændstoffet, der førte Bohr og Heisenberg stadig dybere ind i de helt nye udfordringer. Heisenberg, matematikeren, havde sin beskrivelse som var partikelbaseret, og den virkede. Den mente han derfor, de burde kunne enes om. Men det var Bohr slet ikke parat til. De havde netop haft besøg af Schrödinger, som havde en beskrivelse, som var bølgebaseret. Den virkede også! Bohr: *“Selv ikke den matematiske formalisme hjælper. Jeg må først forstå hvordan naturen undgår modsætninger”* [1, side 322]. Modsætningerne var, at naturens grundbestanddele kunne træde frem både som partikler og bølger. Den dualisme ville Heisenberg først afvise. Men Bohr mente, at den afslørede et afgørende vilkår for vores kontakt med den atomare verden. Udfordringerne og uoverensstemmelserne gik dem på i en grad, så der måtte ske noget drastisk. Så viste Bohrs særprægede arbejdsmetode(!) sig nok en gang: Han tog helt alene på fire ugers skitur i Norge, mens Heisenberg var glad for at blive ladet alene hjemme. For Bohr gjaldt det klar luft og højt til loftet. For Heisenberg var det papir og blyant. Men de månedlange intense diskussioner havde modnet to afgørende dele af løsningen hos dem. Med udgangspunkt i kvantemekanikken fandt Heisenberg sine ubestemthedsrelationer, og Bohr vendte hjem med den filosofiske ramme, komplementaritetsprincippet.

De supplerer hinanden perfekt.

Determinismen i den klassiske fysiks partikeldynamik kræver samtidig og præcis kendskab til en partikels position og impuls. Ubestemthedsrelationerne siger, at det ikke kan opnås. Jo nøjere kendskab man har til positionen, desto mere usikker er impulsen og omvendt.

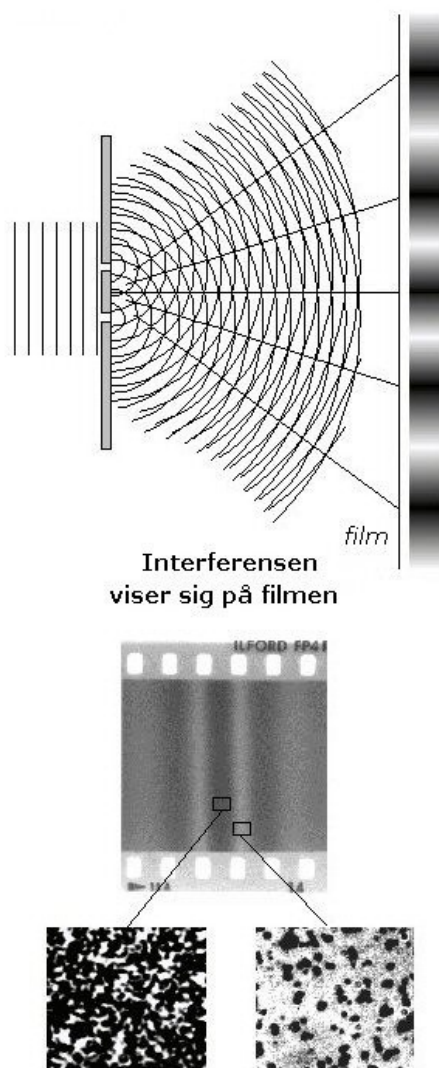
Ubestemthedsrelationerne var derfor den endelige afsked med determinismen og partikelopfattelsen af de atomare objekter.

Komplementaritetsprincippet var den filosofiske ramme inden for hvilken disse naturens nye træk kunne falde på plads.

Komplementaritetsprincippet

Komplementaritetsprincippet åbnede for en ny mulighed: Det er logisk uangribeligt at håndtere modstridende erfaringer, når blot de ikke kan forekomme samtidigt. Så er de nemlig kun *tilsyneladende* modstridende.

Dobbeltspalteeksperimentet er den eksemplariske forsøgsopstilling til behandling heraf, og det er også det eksperiment, som får Feynman til at advare mod at tænke [*sic*]. På figur 1 vises resultatet af et forsøg med fotoner udført af min søn, da han gik i 3.g.



Figur 1. Øverst ses dobbeltspalteeksperimentet udført med fotoner. I midten ses negativet af den fotografiske film og nederst to forstørrede udsnit. Eksperimentet er udført i 3.g. af Morten Münchow.

Det forløber fuldstændigt ens for fotoner og elektroner. (Teksten bruger elektroner, for det er mere udfordrende, for så kommer man til at tænke på selvstændige partikler – og så opstår Feynmans dilemma!)

En strøm af elektroner sendes fra venstre på figuren ind mod en dobbeltspalte. Om end de registreres punktvis, dvs. som partikler på en fotografisk plade (*film* på figuren, se nederste forstørrelse), illustreres de som bølger. For undervejs har de optrådt som sådanne. De lander nemlig som resultat af bølgeinterferens bag spalterne. Elektronerne kan afskydes enkeltvis, så den enkelte elektron må, helt absurd, hvis elektroner opfattes som partikler, have passeret gennem begge spalter, for den har tilsyneladende interfereret med sig selv inden den landede som partikel på den fotografiske plade.

Men: Hvis man prøver at spore elektronen ved spalterne, og det kan man, så finder man den som partikel passerende gennem kun den ene af spalterne, og samtidigt forsvinder bølgeadfærden, altså striberne. Vi kan ikke på én gang registrere elektronen som både partikel og bølge nogetsteds. Dermed modsiger naturen ikke sig selv. *Det er essensen i komplementaritetsprincippet, og det er en helt ny logisk mulighed.*

“Jamen hvordan kan det lade sig gøre?” Heisenbergs ubestemthedsrelationer er kvantemekanikkens teoretiske forklaring på denne situation. At registrere hvilken spalte elektronen opfattet som partikel går igennem på vej hen til sit nedslagspunkt, kræver en så nøjagtig bestemmelse af impulsoverførsel til spalten, at dens position bliver så unøjagtig, at grundlaget for interferens forsvinder. Dobbeltspalteforsøget er altså helt i overensstemmelse med kvantemekanikken.

En elektron er hverken en partikel eller en bølge. Hvad er den så?

Bohr siger det meget tydeligt i Atomfysik og menneskelig erkendelse [4, side 110]:

I kvantefysikken er ... en redegørelse for måleinstrumenternes funktioner uundværlig for definitionen af fænomenerne, og vi må så at sige drage skillelinjen mellem subjekt og objekt på en måde, der i hvert enkelt tilfælde sikrer den entydige anvendelse af de i meddelelserne benyttede elementære fysiske begreber. Langtfra at rumme en mod videnskabens ånd stridende mystik henviser betegnelsen komplementaritet blot til de med vor stilling ved beskrivelsen og sammenfatningen af erfaringerne på atomfysikkens område forbundne erkendelsesvilkår.

Bohrs snørklede udtryksfacon “*redegørelse for måleinstrumenternes funktioner [er] uundværlig for definitionen af fænomenerne,*” kan udlægges: I den udstrækning den atomare verden overhovedet træder frem for os, er vi selv via vores valg af måleopstilling afgørende for den viden, vi får.

Den nye grænse for vores forståelse

Efter 1938 [1, side 457] (skærpet i 1947) bruger Bohr begrebet fænomen som udtryk for den irreducibile helhed

af en makroskopisk opstilling, hvori der opstår et signal forårsaget af den atomare verden. Enhver forestilling om, hvad der egentlig foregår hinsides fænomenerne, går i opløsning, når vi selv indgår definerende. Vi kan ikke trænge længere ind i verdens atomare ontologi, men må standse ved den epistemologiske udfordring.

Det afgørende helt nye er, at der indgår en uundgåelig selvreference i den atomare verdens fremtræden for os. Et andet sted i samme bog redegør Bohr for den sproglige udfordring (“fænomen” har stadig ikke helt fortrængt “objekt”) [4, side 37]:

Vi stilles her overfor et erkendelsesproblem, der er helt nyt inden for naturvidenskaben, hvor al beskrivelse af erfaringer hidtil har hvilet på ... at det er muligt skarpt at skelne mellem objekternes opførsel og de midler, hvormed de kan iagttages; en forudsætning, der jo ikke alene er fuldt berettiget ved alle dagligdags foreteelser, men tillige danner hele grundlaget for den klassiske fysik, der netop gennem relativitetsteorien har fundet så vidunderlig en afrunding.

Så snart vi imidlertid har at gøre med fænomener som de individuelle atomprocesser ... tvinges vi derfor til nærmere at undersøge karakteren af de oplysninger om objekterne, som der overhovedet kan blive tale om at vinde, og hvorledes disse oplysninger lader sig sammenfatte.

Et par Bohrcitater: “*Det er forkert at tro, at det er fysikkens opgave at finde ud af, hvordan naturen er. Fysik handler om hvad vi kan sige om naturen.*” Og “*Vi er ophængt i sproget*” [1, side 450 og 474].

Før var skillelinjen mellem iagttageren og den af iagttagelsen uafhængige verden, som således kunne beskrives *set udefra som det den er i sig selv*. Nu er skillelinjen mellem *helhedsfænomenet hvoraf vi selv er en del*, og vores sproglige redegørelse for vores erfaringer.

Det var så det! Einstein afslutter (sat på plads med Bohrs fulde anerkendelse!) den klassiske fysik, hvor iagttageren står uden for alting og iagttager en verden hvor entydighed og kausalitet gælder. Et stort flertal af fysikere og filosoffer kan stadig slet ikke forestille sig denne position anfægtet. Men hvis man vil i kontakt med verden, må man træde ind i den, og iagttagelse af verden indebærer et uundgåeligt element af selvreference.

Selvreference

Som nysgerrigt selvreflekterende menneske var Bohr siden sin ungdom inde på erkendelsesteoretiske problemer. Han var meget optaget af Poul Martin Møllers “En dansk students eventyr”, hvor licentiaten drukner i selvrefleksioner. Når han vil iagttage sit “jeg”, opdager han, at det må være et andet “jeg”, der iagttager det første, og i samme øjeblik må der være et tredje “jeg”, som iagttager de to, osv.

Licentiatens problem berører også det for videnskaben centrale forhold mellem subjekt og objekt. Bohr anbefalede nye medarbejdere at læse den bog som

introduktion til instituttens særlige filosofiske tilgang til fysikkens problemstillinger.

Mærkeligt nok har jeg aldrig set Bohr anvende ordet "selvreference". Komplementaritetsprincippet er imidlertid en følge af de vilkår, som selvreferencen betinger, og Bohr refererer til dem begge under betegnelsen komplementaritet.

Så når vi spørger om, hvor Bohr fik sit på tværs af al forventning sejrende standpunkt fra, så er det i mine øjne fra hans intuitive forståelse af, at den uundgåelige selvreference er et grænsesættende vilkår, når vi "*iagttager den verden hvoraf vi selv er en del.*"

Det er imidlertid en indsigt som ikke lader sig kvantificere og udtrykke i formler. Jeg tror mange derfor blot opfatter dette diktum som en charmerende klische, som han vedvarende bare tilføjer sine skrifter.

Selv opfattede Bohr denne indsigt som sit vigtigste bidrag til eftertiden [1].

Den afventende anerkendelse

Om dobbeltspalteeksperimentet og kvanteeffekterne: "*Ingen ved hvordan det kan lade sig gøre.*" Nej! For dér har vi ingen adgang.

Bohrs forløsende indsigt på dette område venter stadig på at blive anerkendt.

Fysikere forsøger sig stadig med absurde forestillinger hinsides grænsen, mangeverdensfortolkningen, Bohms indfoldede orden, skjulte parametre m.m.

Det er mig dybt uforståeligt, ja, egentligt oprørende, at fysikere og filosoffer kan ignorere den totale afsløring af fejltænkning om os selv og verden som citatet af Feynman viser.

Dermed kaster jeg bolden videre, hvad angår komplementaritet i fysikken.

Men det standser ikke med fysikken.

Generel komplementaritet

Intet behøver at begrænse den komplementære logik til de kvantemekaniske udfordringer hvoraf den er udsprunget. Bohr opfattede komplementaritetsvilkåret som generelt gældende for os som iagttagere af den verden *hvoraf vi selv er en del* (ligesom Bohr synes jeg heller ikke, at det kan siges for tit). Det fremgår af adskillige forord til tekster og foredrag, hvor han udtrykker håb om, at forståelse af denne nye erkendelse kan finde anvendelse langt ud over den atomfysiske sammenhæng.

Atomfysik og menneskelig erkendelse [4] kan nævnes som et enkelt eksempel:

I forordet skriver Bohr:

Emnet for artiklerne er den erkendelsesteoretiske belæring, som atomfysikkens nyere udvikling har givet os og som kaster lys over vores stilling med hensyn til beskrivelse og sammenfatning på mange områder af menneskelig erkendelse.

og i indledningen skriver han

Den undersøgelse af forudsætningerne for entydig anvendelse af vores elementære

re begreber, som sammenfatningen af de atomare fænomener har nødvendiggjort, har derfor budt langt ud over den fysiske videnskabs egentlige område.

Han bidrog også med eksempler på områder, hvor vi nødvendigvis bruger komplementær tænkemåde, bl.a. retfærdighed/kærlighed, overvejelse/handling, oplevelse/analyse og – hvad mange tilhørere efter at have hørt Bohr nærme sig den endelige indsigt med fortvivlelse kunne skrive under på – klarhed/sandhed.

I mine øjne er der tale om mere eller mindre almindelige afvejninger, som *er* komplementære. De udnytter imidlertid ikke for alvor muligheden for at finde nye løsninger på gamle problemer.

Den komplementære logik kan som en ren åbenbaring udnyttes i diskussionen om den frie vilje. Den går på om mennesket har en fri vilje til selv at vælge sin tilværelse, og dermed være ansvarlig for sine valg, eller om vi i virkeligheden indgår viljesløst, og altså uden ansvar, i verdens generelle determinisme.

Oplevelsen af at have en fri vilje er indiskutabel. Naturens universelle determinisme ligeledes. Den frie viljes problem har derfor plaget filosofien siden antikken.

En nærmere analyse af problemet afslører, at vores bevidsthed faktisk retter opmærksomheden skarpt adskilt enten udad mod den materielle verden eller indad mod sig selv. En komplementær behandling ligger lige for.

Altså kan vi realisere Bohrs visioner ved at give den frie viljes problem en konsistent komplementær behandling. Den komplementære logik fjerner modsigelserne og løser således problemet [5].

Litteratur

- [1] A. Pais (1994) "Niels Bohr og hans tid", side 29, Spektrum.
- [2] R. Feynman (1985) "The Character of Physical Law", side 129, The M.I.T. Press.
- [3] K. Stolzenburg (red.) (1984) "Niels Bohr Collected Works", bind 5, "The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924–1926)", side 92.
- [4] N. Bohr (1957) "Atomfysik og menneskelig erkendelse", J. H. Schultz.
- [5] <http://claus.munchow.net/Libet.htm>



Claus Münchow er tidligere lærer på Sønderborg Statsskole i fysik og matematik. Sluttede med et toårigt forløb i samarbejde mellem filosofi og fysik.