

Einstein og virkeligheden

Benny Laustrup, Niels Bohr Institutet

De fleste fysikere spekulerer ikke meget over virkeligheden i deres daglige arbejde. Tværtimod betragter de spørgsmålet som temmelig irrelevant, og nogle ser det endda som en værre gang filosofisk ævl¹. Spørger man dem, hvad fysikken går ud på, hører man ofte svaret, at den udelukkende drejer sig om at frembringe modeller og sammenligne dem med eksperimenter. Men går man dem lidt mere på klingen og spørger om, hvad det egentlig er, modellerne angår, og hvad der eksperimenteres på, så viser det sig, at de fleste alligevel bærer på en forestilling om noget 'derude', en virkelighed som eksisterer i kraft af sig selv og ikke i afhængighed af deres egen personlige eksistens.

I modsætning til, hvad filosofiske skoler hævder, bekender den arbejdende fysiker sig normalt ikke til blot det seneste paradigme for virkeligheden, men opererer på samme tid med en række teoretiske modeller med overlappende gyldighedsområder. Fysikeren anvender således den klassiske mekanik og dens forestillinger om virkeligheden, når det drejer sig om at forstå dagligdagens mekanik, men vælger den relativistiske beskrivelse, når hastighederne bliver store, eller den kvantiske når objekterne bliver små. Alle modellerne betragtes som 'sande' beskrivelser inden for deres gyldighedsområder. Næsten da. Bevidstheden om dybereliggende begreber og små korrektioner fra mere omfattende teorier er aldrig helt fraværende. Hemmeligheden bag det 'at blive fysiker' består til dels i, at man skal tilegne sig denne oftest tavse infrastruktur bag sammensuriet af teoretiske modeller.

Albert Einstein adskiller sig i grunden ikke fra denne type fysiker, men på grund af hans skarpe intellekt og de kolossale bidrag, han har givet til fysikken, er der god grund til at lægge større vægt på hans tanker om virkeligheden. Allerede gennem sine tre grundlæggende arbejder fra foråret 1905 kom Einstein faktisk i berøring med tre centrale aspekter: den deterministiske beskrivelse af den specielle relativitetsteori, den statistiske analyse af Brownske bevægelser, og den kvantiske behandling af den fotoelektriske effekt.

¹Mange fysikere har en indgroet skepsis over for filosofi. Selv Einstein udtrykte engang, at kritiske overvejelser over virkelighedens beskaffenhed ikke udelukkende kan overlades til filosoferne [1].

²I bredere forstand kan determinisme karakteriseres ved at fremtiden er bestemt af fortiden. I Newtons og Einsteins mekaniske fysik er der imidlertid ingen afhængighed af forhistorien, men kun af det uendeligt snævre øjeblik, vi kalder *nuet*. Til gengæld bliver fortiden lige så beregnelig som fremtiden ud fra mekanikkens ligninger, som har en besynderlig symmetri mellem fortid og fremtid i strid med al dagligdags erfaring. I den moderne kosmologi anses den velkendte asymmetri mellem fortid og fremtid (og dermed mellem årsag og virkning) at være en følge af, at universet begyndte i en højt ordnet tilstand [8].

³Tyngdebølger er dog endnu ikke blevet direkte observeret, men det forventes at ske med næste generation af eksperimenter. Indirekte er tyngdebølger observeret i binære neutronstjernesystemer.

Determinisme

Einstein var først og fremmest et barn af den klassiske mekanik, grundlagt af Newton i det 17. århundrede. Centralt i Newtons mekanik ligger *determinismen*, nemlig at al fremtid er fuldstændig bestemt af nutiden. Nutiden kan derfor betragtes som *årsag* til fremtiden, og samtidig er den selv forårsaget af fortiden².

Selv om Einstein i relativitetsteorien blandede rum og tid sammen, bevarede han dog determinismen. Ja, faktisk skærpede han den. En konsekvens af relativitetsteorien er nemlig, at lyshastigheden udgør den øverste grænse for udbredelsen af et signal. Dette betyder, at en nutidig begivenhed højst kan være årsag til de fremtidige begivenheder, der kan modtage et lyssignal fra den.

I den Newtonske mekanik er der derimod ingen øvre grænse for signalhastigheden, og en nutidig begivenhed kan principielt være årsag til alle fremtidige begivenheder. Mest dramatisk kommer dette til udtryk gennem tyngdekraftens øjeblikkelige udbredelse gennem rummet, hvilket altid har været en filosofisk anstødssten for forståelsen af den Newtonske virkelighed. Med relativitetsteorien forsvandt dette problem, men det bør tilføjes, at for tyngdekraftens vedkommende blev det først fuldt afklaret gennem Einsteins almene relativitetsteori fra 1915.

Ifølge relativitetsteorien udbreder virkningen af en begivenhed sig altså som ringe i vandet, maksimalt med lyshastighed³. Efter, for eksempel, et nanosekund kan en bestemt begivenhed kun være årsag til andre begivenheder inden for en radius af 30 centimeter. Denne *lokalitet* er sidenhen blevet anvendt som et ufravigeligt princip for opstillingen af de kvantefeltteorier, som i dag ligger bag alle eksperimentelt bekræftede modeller for stof og stråling.

Statistik

Den mikroskopiske struktur af ethvert makroskopisk legeme er så kompleks, at det ligger uden for enhver praktisk mulighed at beskrive den i alle detaljer. Atomernes beliggenheder og hastigheder varierer så hurtigt, at det kun er muligt at beskrive et stort an-

tal atomers opførsel med statistiske metoder. I sidste halvdel af det nittende århundrede opstilledes derfor den *statistiske mekanik* som det mikroskopiske underlag for den makroskopiske termodynamik, der havde nået sin endelige form omkring 1850. I sin analyse af Brownske bevægelser i 1905 anvendte Einstein sådanne statistiske betragtninger til at kæde små partiklers tilfældige bevægelser sammen med molekylernes masser, en metode der i årene efter 1908 blev brugt til en præcis bestemmelse af Avogadros konstant.

Den klassiske statistiske mekanik er baseret på, at man i praksis ikke har kendskab til, hvor alle molekylerne befinder sig, og hvor hurtigt de bevæger sig. I princippet kunne man dog opnå denne viden, og den klassiske statistiske beskrivelse kan derfor ses som et 'trick' til at komme uden om vores uvidenhed. Bag det mikroskopiske kaos ligger der stadig en deterministisk (og lokal) virkelighed. Hvis man blot målte de ukendte størrelser præcist, ville fremtiden blive lige så forudsigelig som i den rene mekanik. I princippet kunne man ligesom ved flyveulykker få en 'havarirapport', som forklarede hele tidsforløbet i molekylernes myriader af individuelle sammenstød i ethvert makroskopisk legeme.

Den statistiske mekanik beskæftiger sig imidlertid ikke blot med middelværdier og varianser af målelige størrelser, men også med *korrelationer*. Hvis to målelige størrelser tenderer til at følges ad, således at de forøges eller formindskes i takt med hinanden, er korrelationen positiv. Korrelationen er negativ, hvis den ene størrelse forøges medens den anden formindskes (og omvendt).

Ekspérimentelt bestemmer man korrelationen gennem en række *samtidige* målinger på de to størrelser. Da samtidige værdier af målelige størrelser ifølge relativitetsteorien ikke kan være årsag til hinanden, kommer der gennem korrelationerne et vist element af ikke-lokalitet ind i fysikken. Variationerne i værdierne af to målelige størrelser kan sagtens være statistisk korrelerede med hinanden uden at være kausalt forbundne, altså uden at kunne forbindes med et lyssignal. Oftest skyldes korrelationen simpelthen, at der findes en tidligere fælles årsag til variationerne i de to størrelser. Megen lægevidenskabelige forskning går faktisk ud på at afdække den underliggende årsag til statistisk korrelerede symptomer.

For at tydeliggøre begrebet kan man forestille sig den situation, at to danske børn, en dreng og en pige, hver skal besøge en af deres forældre, som bor henholdsvis i New York og i Moskva. Tanten i København skal sende dem af sted med hver sin flyvemaskine, og da der ikke foreligger nogen aftale om, hvem der skal hvorhen, vælger hun at afgøre det ved at slå plat og krone. For hver af forældrene er der altså lige stor chance for at modtage drengen eller pigen. Men hvis drengen ankommer i New York, så vil pigen med sikkerhed ankomme i Moskva, og omvendt. De to tilfældige begivenheder er derfor fuldstændig korrelerede,

og tantens (tilfældige) afsendelse af børnene udgør den fælles tidligere årsag.

Kvantemekanik

Dette var situationen før kvantemekanikkens konceptuelle gennembrud i 1925. Selv om Einstein havde anvendt kvantebetragtninger på den fotoelektriske effekt i 1905, et arbejde han modtog Nobelprisen for i 1922, så var den almindelige opfattelse på dette tidspunkt nok, at den atomare virkelighed var underkastet en eller anden form for deterministisk beskrivelse. Men med Heisenbergs matrix-mekanik og Schrödingers ækvivalente bølgemekanik kunne dette synspunkt ikke længere opretholdes. Især ikke efter at Born havde fremsat den fortolkning af kvantemekanikken, der senere kom til at gå under navnet *København-
fortolkningen* [11].

Ifølge København-
fortolkningen skal Schrödingers bølger ikke forstås på samme måde som vandbølger eller elektromagnetiske bølger. Bølgefunktionen for en partikel adlyder godt nok en deterministisk ligning, ligesom 'normale' bølger, men den repræsenterer ikke værdien af en målelig fysisk størrelse på et givet tid og sted. I stedet fortolkes (kvadratet på) bølgefunktionen som sandsynligheden for ved en måling på det givne tidspunkt at finde partiklen på det givne sted.

Denne fortolkning udgør et radikalt brud med den klassiske mekanik. Sandsynlighed (og dermed statistik) er ikke længere en overbygning på en deterministisk mekanik, men indbygget i selve kvantemekanikkens grundlag. Og hvis kvantemekanikken i almindelighed kun kan levere statistiske forudsigelser, falder determinismen til jorden. *Nutiden er altså ikke længere den unikke årsag til fremtiden!* Eller sagt på en anden måde: det er endog ikke principielt muligt at fremskaffe kvantemekaniske 'havarirapporter' for atomare sammenstød.

Desuden følger det af kvantemekanikkens formalisme, at ikke alle fysiske størrelser kan bestemmes samtidig med vilkårlig præcision. Sådanne størrelser, for eksempel en partikels sted og impuls, blev af Bohr kaldt *komplementære*, og Heisenbergs ubestemthedsrelationer sætter en nedre grænse for produktet af deres måleusikkerheder. Bohr fortolkede komplementariteten derhen, at det ikke er muligt i samme eksperiment at bestemme både stedet og impulsen for en partikel med vilkårlig præcision. Sted og impuls kan dog begge måles præcist, men det kræver to forskellige eksperimenter, hvis konstruktion gensidigt udelukker hinanden. Bohr lagde altid vægt på, at det var den samlede eksperimentelle opstilling, som definerede hvilke variable, der kunne måles med præcision.

Einstein, Podolsky og Rosen

Einstein var ikke glad for denne udvikling, og i en række berømte diskussioner med Bohr forsøgte han at 'skyde hul' i kvantemekanikken. Bohrs svar tilbageviste

i alle tilfælde hans indvendinger gennem sindrige tankeeksperimenter, men selv om Einstein således 'tabte', har hans indvendinger vist sig af stor betydning for forståelsen af kvantemekanikken.

Et afgørende punkt i diskussionen fremkom i 1935 i en kort artikel af Einstein og hans to yngre medarbejdere, Podolsky og Rosen (EPR) [2]. I artiklen indførtes en indirekte målemetode, som (i det mindste i et tankeeksperiment) tillod at bestemme en partikels egenskaber uden at komme i nærheden af den. Metoden gik primært ud på at konstruere en to-partikel bølgefunktion, der både indebar perfekt korrelation mellem de to partiklers impulser og mellem deres steder. En præcis måling af den ene partikels impuls ville derfor kunne bruges til at forudsige den anden partikels impuls, og en præcis måling af den ene partikels sted ville kunne bruges til at forudsige den anden partikels sted. EPR medgav, at dette ikke stred mod komplementariteten mellem sted og impuls, som jo blot forbød samtidig præcis bestemmelse af disse størrelser.

EPR gjorde nu den grundlæggende antagelse, at hvis man uden på nogen måde at forstyrre et system i princippet kan bestemme dets egenskaber, så har systemet i virkeligheden disse egenskaber, uanset om målingen faktisk bliver udført eller ej. Dette var netop situationen i deres tankeeksperiment, hvor måling af sted eller impuls på den ene partikel bestemte den anden partikels sted eller impuls. Ud fra denne antagelse om, hvad der kan siges at være virkelige egenskaber, konkluderede EPR derfor, at en partikel samtidig måtte besidde både et præcist sted og en præcis impuls, selv om disse størrelser ifølge kvantemekanikken ikke kan måles samtidig med vilkårlig præcision (men det var, så at sige, kvantemekanikkens problem). Da alle aspekter af virkeligheden ifølge EPR bør indeholdes i en fuldstændig teori, kunne kvantemekanikken derfor ikke være fuldstændig. Der måtte findes en mere omfattende beskrivelse, i hvilken alle fysiske størrelser havde bestemte værdier.

Bohr publicerede kort tid efter EPR sin udlægning af deres tankeeksperiment [3]⁴. Ifølge Københavnerfortolkningen kan de korrelerede partikler ikke anses for at være separate dele af systemet. De danner et samlet udeleligt hele, hvis præcist målelige egenskaber er fastlagt gennem hele den faktiske eksperimentelle opstilling, der tilbereder bølgefunktionen. I EPR's bølgefunktion er det kun summen af de to partiklers impulser og forskellen i deres positioner, der er præcist definerede. Det er derfor ikke meningsfyldt at tillægge nogen af partiklerne præcise værdier for sted og impuls, uanset at man ved måling på den første partikel kan bestemme enten sted eller impuls for den anden partikel uden at komme 'i berøring med' den. Bohr konkluderede, at EPR's virkelighedskriterium er

⁴I Bohrs analyse 'realiseres' EPR's abstrakte bølgefunktion gennem en version af hans berømte dobbelt-spalte tankeeksperiment. Senere viste Bohm og Aharanov [4], at langt simple og realiserbare eksperimenter kunne udføres på partikler med korrelerede spin.

⁵Da denne abrupte ændring af kvantetilstanden fører til tab af viden om systemet, taler man også om bølgefunktionens kollaps under en måling.

tvetydigt med hensyn til meningen med "ikke på nogen måde at forstyrre systemet".

Oftest fortolkes Bohrs forfinede konklusion derhen, at systemets egenskaber først fastlægges gennem en måling. Før målingen er partiklernes sted eller impuls ubestemte. En måling af enten stedet eller impulsen af den ene partikel ændrer abrupt systemets kvantetilstand, således at enten stedet eller impulsen for begge partiklerne derefter har præcise værdier⁵ (der findes ingen måling, hvorved begge størrelser kan bestemmes præcist).

Børn med ubestemt køn

Lad os illustrere ovenstående gennem eksemplet med drengen og pigen, der skal til New York eller Moskva. Ifølge den klassiske mekanik vil børnenes køn være præcist defineret lige fra det øjeblik, tanten anbringer dem i flyvemaskinerne i København. Hvis drengen anbringes i flyvemaskinen til New York, vil pigen være i flyvemaskinen til Moskva, hele vejen (og omvendt).

Kvantemekanisk følger det derimod af Københavnerfortolkningen, at børnenes køn ikke kan tillægges en bestemt værdi i nogen af flyvemaskinerne. Selv om kønnene er fuldt korrelerede med hinanden, fastslås det først, at drengen må være i flyvemaskinen til New York, når pigen observeres i Moskva (eller omvendt). Hvis kvantetanten derimod havde noteret sig, hvilket barn der tog med hvilken maskine, ville børnenes køn have været præcist bestemt på hele turen, ligesom i det klassiske tilfælde. Men så ville der jo også være tale om et helt andet eksperiment, som definerede helt andre præcist bestemte egenskaber.

Tidligere indså vi, at korrelationer sagtens kan være ikke-lokale, men med Københavnerfortolkningen tager ikke-lokaliteten en ny drejning. Hvis det ene barns køn først fastlægges i det øjeblik, det andet barns køn observeres, ser det jo ud, som om der løber et signal mellem de to flyvemaskiner med en hastighed større end lysets. Denne –med Einsteins ord – *spøgelsesagtige fjernvirkning* kan imidlertid ikke bruges til at kommunikere med, fordi det aldrig er muligt at forudbestemme hvilket køn, der kommer ud af den første måling. Resultatet 'dreng' eller 'pige' optræder nemlig lige ofte og fuldstændig tilfældigt i New York eller Moskva. Ikke-lokaliteten strider derfor ikke mod den Einsteinske kausalitet.

Bell og Aspect

Selv om kvantemekanikken blev regnet for veletableret i årene efter EPR, anså mange nok diskussionen som ikke helt afgjort. I 1964 påviste den irske fysiker John Bell imidlertid, at det var muligt eksperimentelt at afgøre, hvem der havde ret [5].

I stedet for sted og impuls benyttede han partikler med korrelerede spin [4]. En partikels spinprojektioner på forskellige retninger er også komplementære, således at en præcis måling af spinnets i en retning gør enhver måling på det i en anden retning fuldstændig ubestemt. Overført til denne situation, ville EPR's argument betyde, at spinnets alligevel hele tiden har en veldefineret ('virkelig') værdi i enhver retning, medens Københavnerfortolkningen siger, at spinnets værdi i en given retning først bliver fastlagt gennem en måling. Bell viste, at EPR's fortolkning fører til en ulighed, som *ikke* opfyldes af den sædvanlige kvantemekanik. Bell pegede desuden selv på, at denne ulighed faktisk kunne efterprøves eksperimentelt.

En række eksperimenter på spin blev da også udført i årene efter, især af franskmændene Alain Aspect, som frembragte polarisations-korrelerede foton-tilstande med afstande på mange meter mellem de to fotoner [6]. Hans konstruktion umuliggjorde desuden kommunikation med lyssignaler mellem partiklerne, så at de målte polarisationer ikke kunne være kausalt forbundne. Eksperimenterne viste entydigt, at Bells ulighed ikke er opfyldt, men at kvantemekanikkens forudsigelser til gengæld holder stik. I nyere eksperimenter er afstanden mellem de korrelerede spin blevet forøget til mange kilometer [7].

De fleste anser disse resultater som en stærk bekræftelse af Københavnerfortolkningen og en afvisning af EPR's invendinger mod denne. Oftest ses eksperimenterne som en bekræftelse på den spøgelsesagtige ikke-lokale forbindelse, der gennem kvantemekanikken etableres mellem ellers tilsyneladende adskilte systemer. EPR's kriterium for, hvorledes elementer af den fysiske beskrivelse kan betragtes som virkelige, kan derfor ikke opretholdes.

Alternativer

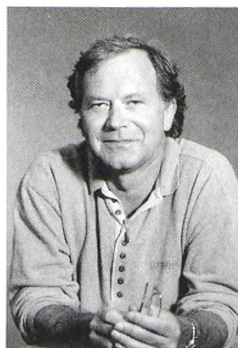
Københavnerfortolkningen af virkeligheden er i bund og grund så mystisk og besynderlig, at nogle taler om 'quantum weirdness'. Den forekommer så fremmed for den 'sunde fornuft', at adskillige alternative fortolkninger gennem tiden er blevet bragt til torvs [8, 9]. Disse fortolkninger er ganske opfindsomme, men alle udfordrer den sunde fornuft mindst lige så meget som Københavnerfortolkningen.

Blandt de mest berømte er nok Bohms ikke-lokale partikelfortolkning af bølgefunktionen og specielt Everetts mangeverdens-fortolkning, som mange moderne fysikere hælder imod [11]. I de allerseneste år er Københavnerfortolkningen af en gruppe fra Niels Bohr Institutet [10] videreført til, hvad man nok kan kalde dens ekstreme grænse. Her bortfalder selve forestillingen om partikler som årsag til de fuldstændigt tilfældige 'klik', der registreres ved målinger. Det skal dog bemærkes, at ingen af disse alternative fortolkninger endnu har ført til forslag til eksperimenter, der kan give resultater, som adskiller sig fra Københavnerfortolkningens.

Der er ingen tvivl om, at opklaringen af EPR paradokset ville have berørt Einstein dybt. Han forsøgte så langt som det kunne lade sig gøre at bevare et billede af virkeligheden, der ikke stred mod en mere dagligdags, såkaldt *lokalt-realistisk* opfattelse. At et sådant synspunkt ikke kan opretholdes, blev først klart længe efter hans død, gennem Bells teorem og Aspects eksperimenter. Einstein ville uden tvivl have haft en del skarpe kommentarer til både denne udvikling og til de alternative fortolkninger.

Litteratur

- [1] Einsteins (tidlige) synspunkter på virkeligheden i fysikken: Albert Einstein, *Physics and Reality*, Journal of the Franklin Institute **221**, 349-382 (1936)
- [2] Den berømte EPR artikel: A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete*, Phys. Rev. **47**, 777-780 (1935)
- [3] Niels Bohrs svar til EPR: N. Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete*, Phys. Rev. **48**, 696-702 (1935)
- [4] Bohms udvidelse af EPR til spin: D. Bohm and Y. Aharonov, *Discussion of Experimental Proof of the Paradox of Einstein, Rosen and Podolski*, Phys. Rev. **108**, 1070-1076 (1957)
- [5] En samling af Bells artikler om kvantemekanikken: J. S. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press (1987 og senere)
- [6] Aspects vigtigste artikel: A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, *Experimental Test of Bells Inequalities Using Time-Varying Analyzers*, Phys. Rev. Lett. **49**, 1804 (1982)
- [7] En diskussion af både Bells teorem og den eksperimentelle situation: A. Aspect, *Bells theorem: The naive view of an experimentalist*, Udgivet i: *Quantum [Un]speakables – From Bell to Quantum Information*, R. A. Bertlmann and A. Zeilinger (eds.), Springer (2002)
- [8] En omfattende semipopulær gennemgang af moderne fysik, inklusive fortolkningerne af kvantemekanikken: Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos*, Allen Lane (2004)
- [9] En samling artikler af førende fortolkere af kvantemekanikken udgivet i anledning af J. A. Wheelers 90-års fødselsdag: J. D. Barrow, P. C. W. Davies, and C. L. Harper, jr, *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*, Cambridge University Press (2004).
- [10] Københavnerfortolkningen in ekstremis: A. Bohr, B. R. Mottelson, and O. Ulfbeck (2004), *The Principle Underlying Quantum Mechanics*, Foundations of Physics **34**, 405-417.
- [11] Se for eksempel dokumentarfilmen af Lars Becker-Larsen: *Københavnerfortolkningen*, Produceret af Arentoft Film ApS med støtte fra Det Danske Filminstitut, Danmarks Radio, Undervisningsministeriet og Videnskabsministeriet (2005). Se <http://www.dfi.dk>



Benny Lautrup begyndte sin forskning inden for højenergifysik, men skiftede i midten af 1980'erne til neurale netværk og var i en årrække leder af Center for Kunstige Neurale Netværk. I de senere år har hans forskning mest angået fluid mekanik og komplekse systemer.