

Fysikfilosofi

Henrik Zinkernagel
Afdeling for Filosofi, Granada Universitet
zink@ugr.es

Publiceret i Lars Aagaard og Steen Brock (red.): *Videnskabens Ansigter*. Århus: Forlaget Philosophia (2004), s. 214-231.

Introduktion

Overskriften på dette essay kan forekomme mystisk ved første øjekast. For hvad har fysik med filosofi at gøre? På trods af en populær opfattelse af fysik som håndfast naturvidenskab, og filosofi som noget mere abstrakt og lænestolsagtigt, hænger de to discipliner tæt sammen. Formålet med dette essay er dels at påvise sammenhængen mellem fysik og filosofi, og dels at pege på nogle af de vigtige spørgsmål omkring vores virkelighedsopfattelse som er opstået i mødet mellem de to. I forbindelse med nærværende antologi skal vi desuden se, at dette formål naturligt involverer spørgsmål vedrørende fysikkens selvopfattelse.

Fysik og filosofi udspringer af samme søgen efter forståelse. For de gamle grækere var fysik, eller forståelse af naturen (*physis*), en del af filosofi (af græsk: kærlighed til visdom), og dermed blev der ikke trukket noget skarpt skel mellem dem. I samme ånd kaldte Newton sit berømte værk fra 1687 – hjørnestenen i den klassiske fysik – for ‘Naturfilosofiens matematiske principper’. Men det tætte forhold mellem fysik og filosofi er ikke kun et historisk faktum. Dels har udviklingen i specielt det 20. århundredes fysik ført til nye indsigter i traditionelle filosofiske problemstillinger, og dels var de nye landvindinger, og den stadige diskussion af betydningen af disse, selv præget af filosofiske forudsætninger og udfordringer. I det følgende skal vi mest fokusere på kvanteteoriens forhold til filosofien, men det må understreges, at filosofiske betragtninger også er nødvendige for at forstå udviklingen og til dels indholdet af fysikkens øvrige hoveddiscipliner – ikke mindst relativitetsteorien.

Fysikkens formål

En måde at belyse forholdet mellem fysik og filosofi på er ved at kigge nærmere på en udbredt forståelse af fysikkens formål. Ifølge denne forståelse søger fysikken simpelthen at beskrive og forstå verden omkring os. Et sådant formål leder naturligt til spørgsmålet om, hvad forholdet er mellem den fysiske beskrivelse og verden. Fx. kunne man tænke sig et korrespondensforhold, således at de strukturer og genstande der indgår i de fysiske teorier svarer direkte til hvordan verden faktisk er indrettet. Ifølge denne opfattelse – der som regel indgår i det der betegnes *videnskabelig realisme* – giver de fysiske teorier et korrekt billede af den fysiske virkelighed. Som vi skal se nedenfor er korrespondenstanken i den videnskabelige realisme problematisk. Men allerede i formuleringen af denne opfattelse kan vi se hvorfor filosofien er relevant for fysik. For spørgsmålet om forholdet mellem fysik beskrivelse og fysisk virkelighed er en del af det mere generelle filosofiske spørgsmål

om forholdet mellem sprog og virkelighed. Dermed bliver det klart, at selv en simpel karakteristik af formålet med fysik må forstås i en filosofisk sammenhæng. I løbet af dette essay vil det fremgå, at denne konklusion også gælder for andre formuleringer af fysikkens 'formålsparagraf'.

Formålet med i hvert fald en del af den moderne fysik er også blevet formuleret som beskrivelsen og forståelsen af de mest fundamentale niveauer af naturen. Når trykket ligges på 'mest fundamentale niveauer' får vi endnu et bindeled mellem fysik og filosofi. Ideen med denne formulering af fysikkens formål er, at der ligger noget bag den verden som vi umiddelbart kan se. Når vi fx. ser et bord, så fortæller atomfysikken, at bordet i virkeligheden blot er en samling atomer. Kernefysikken fortæller, at atomerne i virkeligheden blot er en samling protoner, neutroner og elektroner. Partikelfysikken fortæller, at atomerne i virkeligheden blot er en samling kvarker og elektroner. Og strengteorien – stadig under udarbejdelse – fortæller, at kvarker og elektroner i virkeligheden måske blot er forskellige svingningstilstande af uendeligt små strenge. Den her skitserede kæde er et udtryk for den opfattelse der kaldes *reduktionisme*. Som vi skal uddybe nedenfor, så spiller forskellige opfattelser af reduktionismen en central rolle i diskussioner af fysikkens formål, og af hvor omfattende fysiske teorier kan blive. Yderligere skal vi se, at fysikernes opfattelse af reduktionismes rækkevidde i høj grad også er et filosofisk anliggende.

Fysikfilosofi og videnskabsteori

Som disciplin er fysikfilosofi en gren af videnskabsfilosofi – på dansk også kaldet videnskabsteori. Det betyder, at mange af de filosofiske problemstillinger i fysik også kan findes i andre videnskaber. Således er fx. spørgsmålene om reduktionisme og videnskabelig realisme ikke noget specielt fysikfilosofisk. Alligevel er det ofte i forbindelse med fysik, at denne type af videnskabsfilosofiske spørgsmål træder klarest frem. Det skyldes især tre forhold.

For det første kan fysikken, som antydnet ovenfor, ses som en søgen efter altomfattende teorier der i princippet gælder for alting. En sådan ambition er særlig interessant i videnskabsteoretisk sammenhæng, fordi reduktionismen her bliver sat på spidsen. Således vil den hårdkogte reduktionist insistere på, at selv nok så subtile aspekter af liv og bevidsthed til syvende og sidst ikke er andet end manifestationer af atomernes, og det der er mindres, indbyrdes vekselvirkninger. På trods af denne ambition må det understreges, at reduktionismediskussionen på ingen måde kun er relevant i fysik endsige i naturvidenskab. Af andre områder hvor spørgsmålet om reduktionisme både historisk og aktuelt har spillet/spiller en stor rolle kan netop nævnes forholdet mellem det mentale og det fysiologiske (bevidsthed og krop), samt forholdet mellem den 'levende biologi' og den 'døde kemi' (se fx. diskussionen i Claus Emmeches bidrag til denne antologi). I det følgende skal vi dog holde os til reduktionismediskussionen internt i fysikken, dvs. imellem fysikkens egne discipliner.

Det andet forhold der gør fysikfilosofi speciel i videnskabsfilosofiske diskussioner, ikke mindst i realismespørgsmålet, er, at fysikken ofte beskæftiger sig med objekter der ligger meget langt fra vores daglige horisont. Dels er visse objekter, fx. elektroner, vanskelige overhovedet at forestille sig billedligt, og dels er mange objekter fra den fysiske

zoologiske have på grænsen af, eller endda udenfor, hvad der kan testes eksperimentelt eller observeres (fx. sorte huller eller strenge).

Tæt forbundet hermed kan man for det tredje pege på, at fysikkens teorier ofte synes at være i modstrid med vores umiddelbare erfaringer og intuitioner. Et oplagt eksempel er påstanden om, at solen ikke bevæger sig rundt om jorden, og afstanden mellem vores intuitioner og de fysiske teories påstande bliver kun større i moderne fysik. Uoverensstemmelser af denne art stiller naturligt spørgsmålstejn ved, i hvilken grad de fysiske teorier kan siges at give en korrekt beskrivelse af virkeligheden.

Kvanteteori og realisme

En af den moderne fysiks største triumfer er den såkaldte kvanteteori, der især handler om stoffets mikroskopiske egenskaber. Med kvanteteorien, hvis begyndelse blev taget med Max Plancks arbejde i år 1900, kan fysikere beregne atomers og subatomare partiklers egenskaber i stor detalje. Desuden er de teoretiske beregninger i imponerende overensstemmelse med alle eksperimentelle resultater. Alle er enige om formalismen – dvs. ingen fysikere er i tvivl om, hvordan man fx. skal beregne farvene (bølgelængderne) af det lys, som en varm brintgas udsender (de såkaldte spektrallinier). Og alle er enige om, at teorien har betydet en radikal ændring af vores opfattelse af naturen. Denne ændring består ikke mindst i, at den klassiske fysiks begreb om determinisme – det at man altid kan forudsige hvad der vil ske med et system til et senere tidspunkt, hvis man kender systemet til et tidligere tidspunkt – forkastes i kvanteteorien.

Alligevel er der, selv efter 70 års diskussion, stor uenighed om hvad kvanteteorien faktisk betyder for vores opfattelse af verden. Her er det vigtigt, at skelne mellem kvanteteoriens *formalisme* og dens *fortolkning*. Formalismen er det matematiske værktøj, der bruges i beregningen af eksperimentelle forudsigelser, mens fortolkningen er det, der bl.a. specificerer hvad vi mere konkret kan sige om realiteten af de objekter (atomer, elektroner mv.), som teorien omhandler. For at se hvorfor kvanteteoriens fortolkning har været genstand for så meget diskussion, er det nyttigt at starte med en kort historisk skitse.

På baggrund af detaljerede eksperimenter foreslår Ernest Rutherford i 1911, at atomerne er som små kopier af solsystemet, hvor elektronerne som små planeter kredser rundt om en større kerne i midten. Hurtigt bliver det dog klart, at det ikke kan være det rigtige billede. For elektronerne er ladede partikler, og det vides fra elektromagnetismen, at hvis sådanne partikler bevæger sig i cirkelbaner (accelererer), så vil de udsende stråling. Dermed ville elektronerne hurtigt tabe energi og falde ind mod kernen. Materien ville kollapse.

I 1913 ændrer Niels Bohr på Rutherfords billede ved at antage, at elektronerne godt nok bevæger sig som små planeter rundt om kernen, men at kun visse baner er mulige. Specielt er der en mindste bane, hvorfra elektronen ikke kan falde længere ind mod kernen. I Bohrs model udsender elektronerne kun stråling, når de skifter bane, men af uforklarelige årsager ikke mens de er i deres banebevægelse. Med denne 'kvantisering' af elektronernes baner, kan man ifølge Bohr ikke sige noget om, hvordan overgangene mellem banerne ser ud. Bohr kunne med sin model korrekt beregne spektrallinierne for atomare systemer med en enkelt elektron (fx. brint og ioniseret helium). Til gengæld gik det galt for Bohrmodellen, så snart den blev anvendt på systemer bestående af flere elektroner. Her

kunne modellen ikke korrekt forudsige, hvordan spektrallinierne ligger i forhold til hinanden.

Resultatet af Bohrmodellens begrænsninger blev den såkaldte kvantemekanik udviklet af Werner Heisenberg i 1925. Ifølge Heisenberg og Bohr betød den nye kvantemekanik, at vi slet ikke kan billedliggøre elektronerne som små kugler i bevægelse – bl.a. fordi elektronerne må overholde det såkaldte ubestemthedsprincip. Ifølge dette princip kan man *enten* sige hvor en elektron er, *eller* hvor hurtigt den bevæger sig, men ikke begge dele på en gang.¹ Princippet står i skarp kontrast til hvordan vi normalt tænker på små kugler eller andre dagligdags ting.

En anden besynderlighed ved kvantemekaniske objekter som elektroner er, at de i visse eksperimentelle situationer opfører sig som partikler og i andre som bølger. Både ubestemthedsprincippet og partikel-bølge dualiteten er udtryk for det, som Bohr i 1927 kaldte *komplementaritet* – det forhold at tilskrivningen af visse egenskaber til kvantemekaniske objekter kun kan finde sted i eksperimentelle situationer, der er indbyrdes uforenelige. Således kan fx. et eksperiment, der kan bestemme en elektrons position ikke også bruges til at bestemme dens hastighed (impuls). Komplementære egenskaber, såsom hastighed og position, eller partikel og bølge, er begge nødvendige for en fuld forståelse af objektet, men objektet kan umuligt have begge egenskaber på en gang.

Denne korte historiske skitse antyder, hvordan udviklingen af kvantemekanikken gradvist underminerede ideen om, at fysiske teorier giver en korrekt afbildning af virkeligheden. Ikke fordi kvanteteorien giver en forkert afbildning. Men fordi det slet ikke er muligt, at lave en præcis billedliggørelse af hvad teorien siger om fx. elektronen – der altså på en måde både er en partikel og en bølge, men ikke er det samtidigt. Teorien kan kun give ufuldstændige billeder af kvanteobjekterne i sammenhæng med konkrete eksperimentelle opstillinger. Dermed satte kvantemekanikken spørgsmålstegn ved (i hvert fald dele af) den videnskabelige realisme. For hvis man ikke kan billedliggøre de teoretiske objekter, hvad kan man så mene med at disse objekter korresponderer til noget i virkeligheden, uafhængigt af hvilke eksperimenter vi udfører? Bohrs svar synes at være, at atomer, elektroner mm. ganske vist eksisterer uafhængigt af en eksperimentel kontekst – fx. kan vi uden problemer tale om ladningen af en elektron – men at deres *komplementære egenskaber*, såsom hastighed og position, ikke gør det (se Bohr 1957a, s.54).

Utilfredshed med kvantemekanikken

Mange fysikere var, og er, utilfredse med kvantemekanikkens udfordring til realismen. Allerede i 1926 havde Erwin Schrödinger, inspireret af Louis de Broglies ide om elektronen som en bølge, formuleret en anden version af kvanteteorien kaldet bølgemekanikken. Det viste sig hurtigt, at Schrödingers og Heisenbergs formuleringer af kvanteteorien var matematisk ækvivalente. Men Schrödinger mente til at starte med, at hans teori i modsætning til Heisenbergs, kunne gives en realistisk visualiserbar fortolkning. Ifølge Schrödinger skulle elektronen beskrives vha. en såkaldt bølgefunktion og opfattes som en lille bølgepakke indeni atomet. Desværre for den traditionelle korrespondensopfattelse i realismen var der dog flere problemer med Schrödingers idé. Dels optræder der imaginære tal i ligningen for bølgefunktionen, og dels 'befinder' en

¹ Mere korrekt siger ubestemthedsprincippet, at jo bedre en partikels position er bestemt, desto dårligere er dens impuls (som i klassisk fysik er lig med masse gange hastighed) bestemt, og vice versa. Specielt udelukker princippet, at en partikel samtidigt kan have bestemte værdier af position og impuls.

bølgefunktion for systemer bestående af flere elektroner sig i et matematisk rum med mere end de sædvanlige tre dimensioner. Desuden er det vanskeligt at forklare hvordan elektronen, som bølgepakke, kan holde sammen på sig selv, eftersom man normalt vil forvente, at bølgepakker med tiden spredes ud i rummet.

Også Einstein, som selv var en central figur i udviklingen af kvanteteorien, var stærkt imod teoriens ikke-realistiske og ikke-deterministiske aspekter.² Ifølge ham måtte der findes et niveau bag ubestemthedsrelationerne, således at elektronerne faktisk har en bestemt position og en bestemt hastighed (impuls) på samme tidspunkt – uafhængigt af den eksperimentelle kontekst, og altså uafhængigt af om vi måler på elektronen eller ej. Einsteins synspunkt har haft stor indflydelse på den videre diskussion om kvantemekanikkens fortolkning, selvom udviklingen har vist, at Einsteins håb om at genfinde et klassisk niveau bagved ubestemthedsrelationerne principielt er umuligt (jvf. John Bells uligheder der udelukker de såkaldte lokal-realistiske teorier). Vi skal senere vende tilbage til, hvorfor nogle fysikere og filosoffer alligevel er uenige med Bohr.

Bohrs filosofiske baggrund

Udarbejdelsen af Bohrs opfattelse af kvantemekanikken foregik ikke i et filosofisk vacuum. Der er således næppe tvivl om, at Immanuel Kant i hvert fald indirekte var en inspirationskilde for Bohr. Ganske vist er det uklart om Bohr selv læste Kant, men Bohr har utvivlsomt kendt til ham bl.a. gennem sit livslange venskab med filosofen Harald Høffding, der også var Bohrs lærer på filosofikum. Vi kan ikke her gå i detalje med de Kantianske overtoner i Bohrs tankegang, men forbindelsen kan illustreres ved kort at kigge på et par centrale punkter i Kants filosofi.

Kant hævdede, at vi for at kunne erfare objekter nødvendigvis må opfatte og beskrive disse som objekter i rum og tid, og som værende underlagt kausalitetsprincippet (hvilket indebærer at enhver ændring i et objekts bevægelsestilstand må have en årsag). Dette svarer til, at objekter nødvendigvis må beskrives vha. den klassiske fysik, og dermed må kunne tilskrives både sted og hastighed (impuls) til samme tidspunkt. Kant mente at denne klassiske fysiks begrebsramme er 'a priori' nødvendig for enhver erfaring, og at dens gyldighedsområde i denne forstand er ubegrænset.

Bohr så ganske vist kvantemekanikken som en afvisning af, at den klassiske fysiks begrebsramme har et ubegrænset gyldighedsområde. Til gengæld fastholdt Bohr ideen om, at vi nødvendigvis må anvende den klassiske fysiks begreber i kvantemekanikken, hvis vi vil udtrykke os entydigt og kommunikere meningsfuldt. Blot må vi acceptere, at visse af den klassiske fysiks begreber (fx. position og impuls) kun kan tilskrives kvanteobjekter i konkrete eksperimentelle situationer – på den komplementære måde.

Bohr er også citeret for, at formålet med fysik ikke er at finde ud af hvordan naturen er, men hvad vi kan *sige* om den. Dette udlægges ofte som om Bohr skelnede mellem verden-som-vi-oplever-den, og verden-som-den-er-i-sig-selv. En sådan skelnen er et andet centralt punkt i Kants filosofi. Selv tror jeg, at Bohr i citatet mere sigtede til at fremhæve *sprogets* rolle i fysikken: Det drejer sig først og fremmest om at beskrive (fx. vores

² Her og i det følgende bruges betegnelsen kvantemekanik om den teori, som Heisenberg udviklede (der som nævnt er formalistisk ækvivalent med Schrödingers bølgemekanik). Kvanteteori bruges mere bredt som en fællesbetegnelse for alle teorier hvor Plancks konstant, som angiver en mindsteenhed for fx. energi, indgår (fx. Bohr's oprindelige atommodel samt den udvidelse af kvantemekanikken der kendes som kvantefeltteorien).

erfaringer) entydigt, og det er derfor centralt at fokusere på vilkårene for en sådan entydig beskrivelse. Vilkaere for beskrivelse i fysik omfatter begreber og sammenhænge fra den klassiske fysik, som Bohr så som en præcisering af begreber og sammenhænge vi allerede bruger i dagligsproget.³

Under alle omstændigheder står det fast, at Bohrs arbejde med kvantemekanikken var af både filosofisk og fysisk art. Noget tilsvarende kan siges om Einsteins udvikling af relativitetsteorien, se fx. Sklar (1992). Sammenholdt med den foregående diskussion, har vi dermed antydnet, at filosofi er påkrævet ikke blot for at forstå formuleringen af formålet med fysik, men også for at forstå baggrunden og indholdet af den moderne fysiks ændringer i vores verdensbillede. I det følgende vil denne konklusion blive styrket.

Enhedsvidenskab og reduktionisme

Ideen om sammenhæng mellem de forskellige naturfænomener, og teorierne der beskriver dem, har været en ledetråd i fysikken i hvert fald siden Galileis tid. Således udlægges fysikkens 'successhistorie' ofte som en historie om foreninger, hvor standardeksemplerne inkluderer Newton's forening af himmelske og jordiske fænomener (den universelle tyngdelov beskriver både planetbaner og æblers fald), samt Ørsted, Faraday og Maxwells forening af elektriske og magnetiske kræfter (elektricitet og magnetisme er to sider af samme sag beskrevet ved Maxwells ligninger). Et mere moderne eksempel er Glashow, Salam og Weinbergs elektrosvage teori i partikelfysikken – en teori der forener de elektromagnetiske kræfter med de såkaldte svage kernekræfter (som bl.a. er ansvarlige for visse former for radioaktivitet).

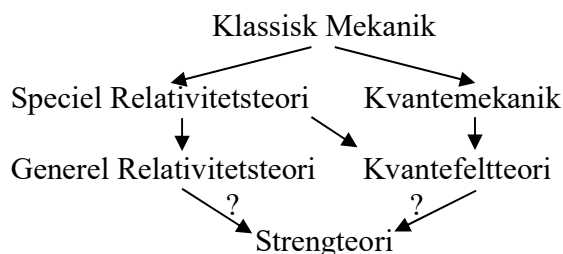
At forskellige naturfænomener hænger sammen er et veletableret faktum. Desuden er det lykkedes at beskrive mange af disse sammenhænge i forenede, og stadig mere omfattende, teorier. Men betyder det at alle naturfænomener, i det mindste de rent fysiske, før eller siden kan 'samles under en hat', og altså beskrives ved en forenet teori om alting? Eller kunne sammenhængen mellem teorierne være af en anden art? Dette er åbne og i høj grad også filosofiske spørgsmål. Lad os først kigge på hvad en teori om alting overhovedet betyder i fysikken.

Kvantefeltteori og den generelle relativitetsteori er to af det 20. århundredes store teoretiske landvindinger i fysikken.⁴ Både kvantefeltteori og relativitetsteori er allerede forenede i den forstand at de samler forskellige tidligere teorier under et. Således kan den specielle relativitetsteori, der bl.a. siger at lyshastigheden er endelig, ses som en kombination af elektromagnetismen og den ikke-gravitationelle del af klassisk mekanik. Den generelle relativitetsteori er en generalisering af den specielle teori, i hvilken der også tages hensyn til gravitationen (det er også indenfor den generelle relativitetsteoris rammer, at vi finder beskrivelser af universet som helhed, fx. Big Bang teorien). Heroverfor står

³ Vi skal senere uddybe denne kortfattede fremstilling af Bohrs position en smule. For en detaljeret diskussion af Bohrs filosofi, se fx. Favrholdt (1994). P. Zinkernagel (1988) angiver en generel teori for beskrivelsesvilkår i logisk-praktisk sprogbrug (herunder fysik), der til dels kan ses som en udbygning af Bohrs tanker.

⁴ Kvantefeltteori bruges her og i det følgende som fællesbetegnelse for teorien om lys og elektroner som felter (kvanteelektrodynamikken), teorien om de svage kernekræfter, og teorien om kvarker – der tilsammen beskriver atomets indre struktur vha. såkaldte kvantefelter. Denne kombination kendes også som Standardmodellen i partikelfysikken.

kvantefeltteorien, der er en forening af den specielle relativitetsteori og kvantemekanikken. Schematisk kan situationen fremstilles således:⁵



Pilene i skemaet illustrerer retningen mod 'dybere' eller mere generelle lag i naturbeskrivelsen (se nedenfor). Som det antydes i skemaet, er forbindelse fra kvantesiden (højre side af skemaet) og den generelle relativitetsteori endnu kun på teoretikernes tegnebord. Men for mange teoretiske fysikere er sammenhængen mellem Einsteins generelle relativitetsteori og kvanteteorien (her kvantemekanik + kvantefeltteori) fysikkens helt store, og stadig åbne, spørgsmål. Det mest ambitiøse forslag for en sådan sammenhæng er strengteorien.⁶

Reduktionisme og rekonstruktion

Det ovenstående skema er på flere måder et udtryk for reduktionisme. Dels indikerer pileretningen i skemaet retningen mod noget mere mindre – indeni et bord er der atomer, og indeni et atom er der kvarker (højre side). Og dels viser pileretningen mod noget mere generelt – jo længere ned i skemaet vi kommer, des mere omfattende bliver teorierne (både venstre og højre side). Strengteorien sammenfatter de to tendenser ved både at beskrive noget mindre og noget mere generelt. I den form vi her er interesserede i, betyder reduktionismen netop, at fænomener og matematiske udtryk på et højere niveau, kan reduceres til fænomener og udtryk på et dybere niveau.

I overensstemmelse med den reduktionistiske tankegang, tænkes de højere niveauer ofte blot som nyttige specialtilfælde af de dybere niveauer. Kvantitativt, eller formalistisk, giver dette sig til kende ved at, i hvert fald nogle af, de matematiske udtryk i teorierne på de dybere niveauer, i visse grænsetilfælde er identiske med udtryk i teorierne på de højere niveauer. På denne måde indeholder den reduktionistiske tanke også muligheden for rekonstruktion af de højere niveauer ud fra de dybere. En central tanke bag strengteorien er netop drømmen om, at kunne vende alle pilene i skemaet om, således at al kendt fysik vil kunne udledes på baggrund af nogle få fundamentale principper. Denne tankegang er i overensstemmelse med den 'formålsparagraf' som Einstein udstak for fysikken allerede i 1918:

⁵ For simpelhedens skyld er kun en del af fysikkens teorier medtaget i skemaet.

⁶ Det er ikke kun protoversioner af strengteorien (og udvidelser af denne) der kandiderer til at være forbindelsesled mellem general relativitetsteori og kvanteteori. En anden forskningsretning er den såkaldte kanoniske kvantegravitation. Dette program forsøger – i modsætning til strengteorien – ikke at indkorporere alle kendte naturkræfter. Både strengteori og kanonisk kvantegravitation er hæmmet af, at de karakteristiske energier som teorierne omhandler er langt større end de energiområder der idag, og i en overskuelig fremtid, kan efterprøves eksperimentelt. Forståelsen af sammenhængen mellem generel relativitetsteori og kvanteteori er desuden vanskeliggjort af det såkaldte kosmologiske konstant problem, se fx. Rugh og Zinkernagel (2002)

“The supreme task of the physicist is to arrive at those universal laws from which the cosmos can be built up by pure deduction”.⁷

Som nævnt tidligere var Einstein imod kvanteteoriens ikke-deterministiske og ikke-realistiske aspekter, og faktisk arbejdede han de sidste mange år af sit liv på en klassisk (dvs. ikke-quantisk) forenet teori for elektromagnetismen og gravitationen. Eftersom strengteorien er en kvanteteori, er *typen* af den endelige teori man søger idag altså anderledes end hvad Einstein forestillede sig. Men det ændrer ikke ved, at Einsteins formålsparagraf harmonerer med strengteoretikernes bestræbelser.

Den ‘Einsteinske ambition’ er ikke blot en *reduktion* til mere fundamentale teorier – dvs. enten at skille genstande ad i mindre og mindre dele, eller at vise at højere-niveaus teorier er specialtilfælde af dybere-niveaus teorier (begge dele i strengteoriens tilfælde). Der er også, og mere eksplicit i Einsteincitatet, tale om en *rekonstruktion* af universet fra bunden af. Dvs. at hvis vi har de universelle love, beskrevet i de fundamentale teorier, og/eller de fundamentale bestanddele af materien, så kan vi fra disse love og bestanddele udlede alle fænomener i universet.⁸

Tvivel om reduktionismen – del 1

Ambitionen om reduktionisme og rekonstruktion rejser to centrale spørgsmål indenfor fysikkens egne rammer. Det første spørgsmål, som har været genstand for stor debat blandt fysikere og filosoffer, er naturligvis, hvorvidt alle fænomener på de højere niveauer virkelig kan udledes fra de dybere niveauer. Eller om visse fænomener på de højere niveauer kunne være *emergente*, i den forstand at de ikke kan forklares alene ud fra de dybere niveauer. Fx. har Philip Anderson (1972) forsvaret, at visse komplekse fænomener (fx. egenskaber ved et ammoniakmolekyle) meget vanskeligt, eller måske slet ikke, vil kunne udledes fra en dybere beskrivelse (kvantemekanikken) uden at inddrage observationel information fra højere niveauer (information om ammoniaks kemiske egenskaber). Omvendt har fx. Steven Weinberg (1992) fremført, at ethvert højere-niveaus fænomen i princippet vil kunne udledes, dvs. beregnes, fra et dybere niveau, hvis bare vi har (computer-) tid nok.⁹

Uanset Anderson og Weinbergs forskellige opfattelser af hvad der i princippet kan beregnes, så er de dog enige om at fænomenerne, og de teorier der beskriver disse, i hvert fald kan reduceres. Tanken om mindre og mindre dele – atomer, kvarker, strenge – antyder, at universets ultimative byggesten er som en slags legoklodser. Weinberg, Anderson, og mange andre fysikers diskussion går således mest på, om vi ud fra et fundamentalt niveau kan forudsige alt, hvad der faktisk kan bygges ud af disse klodser.

Men her overses det, at strengene, eller kvantefelterne for den sags skyld, absolut ikke er ligesom anskuelige legoklodser. De er tværtimod kvanteobjekter med komplementære egenskaber der, ifølge Bohr, kun eksisterer relativt til bestemte eksperimentelle opstillinger. Dette leder os til det andet, mere subtile og mindre diskuterende spørgsmål, i forbindelse med reduktionismen.

⁷ Citatet er fra en tale med titlen ‘Principles of research’ som Einstein gav i Berlin i anledning af Max Plancks 60 års fødselsdag.

⁸ Et udtryk for en så ambitiøs reduktionisme/rekonstruktionisme kan findes i Tegmark og Wheeler (2001). De har et meget mere omfattende skema end det ovenstående, i hvilket emner som kemi, biologi, psykologi og sociologi er indsat som afledte af fysikkens niveauer.

⁹ Se Cat (1998) for en detaljeret diskussion af reduktionisme og emergens i moderne fysik.

Tvivel om reduktionismen – del 2

Spørgsmålet er om teorierne på de dybere niveauer, og de fænomener disse beskriver, overhovedet kan *forstås* uafhængigt af de højere niveauer. Hvis ikke, så er både tesen om reduktion og rekonstruktion i vanskeligheder. Spørgsmålet er først og fremmest relevant for forholdet mellem klassisk mekanik og kvantemekanik. Her fremhævede Bohr

“...nødvendigheden af at beskrive måleinstrumenternes funktioner med rent klassiske begreber, hvorved enhver hensyntagen til virkningskvantet [Plancks konstant] principielt udelukkes.”

og desuden at

“Den utvetydige beskrivelse af egentlige kvantefænomener må derfor i princippet indeholde en redegørelse for alle relevante træk ved forsøgsopstillingen.” (Bohr 1964, s.14)

Bohrs påstand er altså, at vi slet ikke forstår de kvantemekaniske fænomener og objekter, med mindre vi henviser til den eksperimentelle situation, i hvilken måleapparaterne nødvendigvis (principielt) skal beskrives vha. den klassiske fysiks begreber. Som begrundelse herfor angiver Bohr, at vi ved et eksperiment kun kan forstå noget, hvorved vi entydigt kan forklare, hvad vi har gjort og hvad vi har lært. Konsekvensen af dette er dog ikke nem at forstå. På den ene side mente Bohr formodentlig, at alle materielle objekter, inklusive måleapparater, består af atomer og det der er mindre. På den anden side antydede han, at fx. et atoms position – og dermed ideen om at atomet er lokaliseret ‘indeni’ et materielt objekt – kun eksisterer i eksperimentelle opstillinger hvor måleapparaterne nødvendigvis må beskrives som klassiske, og ikke kvantiske, objekter.¹⁰

Det synes under alle omstændigheder klart, at Bohr, i modsætning til Einstein og strengteoretikerne, mente at både den klassiske og den kvantiske fysik er nødvendige i naturbeskrivelsen. Formodentlig indebar dette for Bohr, at hverken klassisk eller kvantisk fysik er reducerbar til den anden. Dermed var Bohr bestemt ikke imod ideen om enhed og sammenhæng mellem naturfænomenerne og de teorier der beskriver dem (se fx. Bohr 1957b) – blot var der ikke tale om en reduktionistisk enhedstanke.

Alternative fortolkninger af kvantemekanikken

Det at noget, måleapparatet, skal beskrives vha. klassisk fysik, mens kvanteobjekterne skal beskrives vha. kvantemekanikken, er en vigtig grund til, at en del fysikere og filosoffer er utilfredse med Bohrs opfattelse. Desuden kan mange ikke forlige sig med

¹⁰ Bohr var næppe selv helt afklaret på dette punkt. Dels fremhævede han, at måleapparatet *kan* behandles klassisk, fordi det er makroskopisk, og at kvanteeffekter, symboliseret ved Plancks konstant, derfor kan ignoreres i en pragmatisk forstand (hvilket minder lidt om dekohærenstanken, se nedenfor). Og dels understregede han, at apparatet principielt *skal* behandles klassisk for overhovedet at definere kvantefænomenerne. Situationen er yderligere kompliceret af, at grænsen mellem det kvantiske og det klassiske er flydende. Således kan man ifølge Bohr godt behandle måleapparatet kvantisk, men så mister man til gengæld muligheden for at bruge dette til sit oprindelige formål – fx. at bestemme positionen af en elektron. Hvis Bohr hermed mente, som antydet i Howard (1994), at alting alligevel dybest set (i-sig-selv) er kvantisk, og at det altså kun er på beskrivelsesniveauet, at de klassiske begreber er påkrævet, så tror jeg han var på galt spor. For det ville være i modstrid med Bohrs egen, og i mine øjne korrekte, pointe om forholdet mellem sprog og virkelighed (se nedenfor).

Bohrs relaterede afvisning af korrespondenstanken i realismen. Disse forhold har dannet udgangspunkt for en række alternative forslag til fortolkninger af kvantemekanikken, der alle er karakteriseret ved, at de ikke (eller i det væsentlige ikke) ændrer ved formalismen.

Det mest kendte alternativ til Bohrs opfattelse af kvanteteorien er Hugh Everetts mangeverdensfortolkning.¹¹ Denne fortolkning er, i overensstemmelse med den reduktionistiske ånd, motiveret af ideen om, at anvende den kvantemekaniske formalisme på alt i universet, inklusive det måleapparat der ifølge Bohr skulle beskrives klassisk. Det umiddelbare problem ved ideen er, at systemer ifølge kvantemekanikken kan befinde sig i såkaldte superpositioner. Fx. kan man indenfor kvantemekanikken i en vis forstand sige, at en elektron kan være to steder på en gang, kald dem position A og position B. Når vi måler en elektrons position vha. et positions-målings-apparat, så finder vi den enten i position A eller i position B. Men hvis måleapparatet også beskrives kvantisk, så skulle vi ifølge teorien kunne finde måleapparatet i en superposition mellem at vise 'elektronen er i position A' og 'elektronen er i position B', fx. derved at en viser på måleapparatet står to steder på en gang.

Dette er selvfølgelig absolut ikke hvad vi ser. Almindelige ting, fx. en viser på et måleapparat, kan kun være et sted af gangen. Everett foreslog så, at når vi ikke ser de andre 'komponenter' af superpositionen, så er det fordi verden spaltes op, hver gang vi måler eller observerer noget. Fx. vil målingen af en elektrons position give anledning til to nye verdener, en i hvilken observatøren ser elektronen i position A, og en anden i hvilken observatøren ser elektronen i position B. Desuden vil observatøren i den ene verden ikke være klar over, at der findes en kopi af ham i en anden verden der har set noget andet.

Vi skal ikke her gå nærmere ind på detaljerne i Everetts utrolige historie, og de problemer den naturligt rejser – herunder spørgsmålet om hvor alle disse postulerede verdener skulle befinde sig.¹² Det interessante fra dette essays perspektiv er i første omgang, at Bohr og Everetts fortolkninger dels giver vidt forskellige bud på hvad vi kan sige om den fysiske verden, og dels at deres udformning er motiveret ikke bare af fysiske men også af filosofiske overvejelser.

Givet den vedholdende diskussion om kvantemekanikkens fortolkning er det ofte blevet fremhævet, at man burde holde sig til en instrumentalistisk synsvinkel. Ifølge dette synspunkt, skal teorien blot ses som et instrument til at udlede eksperimentelle forudsigelser og brugbar teknologi, herunder den moderne elektronik der omgiver os til daglig. Richard Feynman foreslog ligefrem en 'shut up and calculate' fortolkning af kvantemekanikken, hvor pointen netop var, at man burde nøjes med at se på teoriens

¹¹ Se Faye (1996) for en filosofisk diskussion af mangeverdensfortolkningen, og andre såkaldt realistiske fortolkninger af kvantemekanikken. For en filosofisk orienteret general introduktion til kvantemekanikken og dens mange fortolkningsforsøg, se fx. Sklar (1992).

¹² Dog skal det nævnes, at der findes mindre vilde versioner af Everetts oprindelige ide om kvantemekanik som gyldig for alting. I disse versioner dæmpes talen om parallelle verdener ned til fordel for begrebet om dekohærens. Dekohærensteoretikerne forsøger at forklare fraværet af superpositioner i måleresultaterne med henvisning til måleapparatets størrelse, samt det forhold at apparatet ikke kan holdes isoleret fra omgivelserne. Et mikroobjekt (som en elektron) kan være i en superposition (en kohærent tilstand), mens enhver superposition af et makroobjekt som et måleapparat hurtigt vil udviskes (dekohæres) pga. vekselvirkningen med omgivelserne. De teoretiske og eksperimentelle studier af dekohærens har ført til en bedre forståelse af forholdet mellem kvantiske og klassiske systemer. Men der er udbredt enighed om, at dekohærens i sig selv ikke er nok til at redegøre for fremkomsten af den 'klassiske' verden uden superpositioner, som vi ser omkring os (dekohærens løser dermed ikke det såkaldte måleproblem i kvantemekanikken, se fx. Anastopoulos (2002) og referencer deri).

(formalismens) konsekvenser. Men udover at instrumentalismen i sig selv er en filosofisk position, og at man derfor ikke slipper for filosofi ved at erklære sig for instrumentalist, så er instrumentalismen ingen nem udvej. Man er stadig svar skyldig, når man bliver spurgt, hvorfor kvanteteorien virker så godt, hvis den ikke har noget med virkeligheden at gøre.

Hvem har ret – filosofisk set?

Debatten om kvantemekanikkens fortolkning har i vid udstrækning været en debat imellem forskellige filosofiske opfattelser. Det står klart, at formalismen og eksperimenterne ikke alene kan afgøre sagen. Denne situation har fået mange fysikere og filosoffer til at mene, at kvantemekanikkens fortolkning er en smagssag, der mest af alt afhænger af den enkelte forskers filosofiske præferencer.

Men at kvantemekanikkens fortolkning ikke dikteres af formalismen og de eksperimentelle resultater, betyder ikke nødvendigvis, at det er umuligt at svare på, hvilken (om nogen) fortolkning af kvantemekanikken der er korrekt. Uden her at kunne behandle spørgsmålet i detalje, skal jeg kort antyde, hvorfor jeg mener, at svaret må gå i retning af Bohrs opfattelse.

For det første, så synes det ikke muligt at redegøre for fremkomsten af veldefinerede måleresultater uden superpositioner, ud fra en ren kvantemekanisk behandling af måleapparatet (jvf. ovenstående fodnote om dekohærens). For det andet, så synes kvanteformalismen at hvile på visse klassiske begreber, der er bundet uløseligt sammen med klassisk fysik. Jeg tænker især på, at kvanteformalismen benytter sig af et klassisk tidsbegreb, der er tæt forbundet med klassiske ure.¹³ Den klassiske fysik er på denne måde 'bygget ind' i kvantemekanikken på forhånd, og det giver derfor ikke megen mening at forestille sig, at klassisk fysik kan reduceres til kvantefysik. Som Bohr antydede, så tror jeg for det tredje, at vi ikke altid kan holde sprog og virkelighed op imod hinanden som to adskilte størrelser, sådan som fx. korrespondenstanken i realismen implicerer. Det er forholdsvis uproblematisk at undersøge, hvorvidt en påstand om at månen befinder sig et bestemt sted på himlen over Rundetårn på et givet tidspunkt, nu også korresponderer med de faktiske forhold. Men hvis det ikke giver mening, udenfor en eksperimentel kontekst, at sige hvor en elektron er, så giver det heller ikke mening at antage, at den dog i virkeligheden må være et sted alligevel.¹⁴

¹³ Pointen er, at tid og klassiske ure er logisk relaterede i den forstand, at de ikke meningsfuldt kan defineres uafhængigt af hinanden. Et klassisk ur er groft set et system der opfylder Newtons to første love, og selv atomare ure kan i en vis forstand siges at opfylde disse. Se H. Zinkernagel (2003) for en nærmere diskussion.

¹⁴ Bohr er også citeret for, at man ikke uproblematisk kan antage, at virkelighed er mere fundamentalt end sprog. Opgaven er her at styre udenom både sproglig idealisme (sproget konstituerer virkeligheden) og ideen om sproget som noget sekundært i forhold til virkeligheden. Et sådant projekt er skitseret i P. Zinkernagel (1988). Det centrale i P. Zinkernagels analyse er de såkaldte logiske relationer (eller vilkår for beskrivelse), der bl.a. omfatter kontradiktionsloven – det at man ikke må modsige sig selv. I hvert fald nogle af de logiske relationer går forud for skellet mellem sprog og virkelighed, idet de er forudsat i dette skel (fx. går det ikke at antage, *både* at sprog er forskelligt fra virkelighed *og* at sprog ikke er forskelligt fra virkelighed). At jorden eksisterede længe før menneskene og sproget betyder desuden ikke, at vi kan etablere og diskutere dette faktum uafhængigt af de logiske relationer. Fx. giver det ingen mening at antage at jorden eksisterede *før* os, hvis ikke vi forudsætter et meningsfuldt tidsbegreb. Som antydet i sidste fodnote, mener jeg at dette kræver en logisk relation mellem tid og klassiske ure.

Afslutning

Givet den imponerende udvikling af fysikken de sidste 400 år, er det ikke overraskende, at fysikken på mange områder har påvirket og ændret på diskussioner, der traditionelt har tilhørt filosofiens domæne. Således vil det i dag være utænkeligt, at foretage grundige filosofiske analyser af emner som fx. kausalitet, stoffets natur, eller universets oprindelse uden at inddrage de relevante dele af den moderne fysik. Men dette betyder, som vi har set, langt fra at der er tale om envejsskommunikation fra fysik til filosofi.

I dette essay har vi kun kunnet behandle en del af det område hvor filosofi og fysik mødes. Specielt har vi stort set måtte lade Einsteins relativitetsteorier ligge. Derfor er det måske passende til slut at minde om at Einstein, ligesom Bohr, var opmærksom på filosofiens nødvendighed i videnskaben:

The reciprocal relationship of epistemology and science is of noteworthy kind. They are dependent upon each other. Epistemology without contact with science becomes an empty scheme. Science without epistemology is – insofar as it is thinkable at all – primitive and muddled. Einstein (1949, s.683).

Både Bohr og Einsteins bidrag til ændringerne og udvidelserne af vores verdensbillede var også et resultat af deres kritiske filosofiske undersøgelser af den daværende fysik. Dette viser i sig selv, at en forståelse af centrale dele af det 20. århundredes fysiske verdensbillede ikke er mulig uden filosofisk (og historisk) indsigt.

At filosofiske overvejelser er en integreret del af fysikken, er imidlertid ikke blot et faktum, der er nyttigt i historiske analyser. Således er fx. diskussionen om reduktionisme og kvantemekanikkens fortolkning i vore dage på en måde mere relevant end nogensinde før. Dels er den nyeste fundamentalfysik, strengteorien og dens videreudviklinger, meget langt fra at kunne afprøves eksperimentelt, hvilket gør spørgsmålet om teoriernes forhold til virkeligheden endnu sværere, end tilfældet er fx. i atomfysikken. Og dels forsøger de nyeste udviklinger i kosmologien at beskrive det meget tidlige univers, og sågar selve begyndelsen – hvis der var en sådan – på et kvantemekanisk grundlag. Hypotesen om at universet som helhed er et kvantemekanisk system, er den ultimative udfordring til ideen om en principiel nødvendighed af klassisk fysik. Et svar på om hypotesen holder, må nødvendigvis involvere grundige fysikfilosofiske overvejelser.¹⁵

Referencer:

- Anastopoulos, C. (2002), 'Frequently asked questions about decoherence' *International Journal of Physics* **41**, s.1573-1590 (<http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0011123>)
- Anderson, P. (1972), 'More is different', *Science*, **177**, s.393-396
- Bohr, N. (1957a) "Diskussion med Einstein om erkendelsesteoretiske Problemer i Atomfysikken, 1949" i *Atomfysik og menneskelig erkendelse* (J.H. Schultz Forlag, København), s.45-82. Genoptrykt i Bohr, N. (1985) *Naturbeskrivelse og menneskelig erkendelse: Udvalgte artikler og foredrag fra årene 1927-1962*, udgivet af Kalckar, J. og Rüdinger, E. (Rhodos, København), s.50-95, teksthenviisning s.61

¹⁵ Tak til Svend E. Rugh for mange gode kommentarer og ændringsforslag til manuskriptet. Også tak til Finn Aaserud for gode kommentarer og hjælp til en mere korrekt fremstilling af Bohrs synspunkter.

- Bohr, N. (1957b) “Kundskabernes enhed, 1954” i *Atomfysik og menneskelig erkendelse*, s.83-99. Genoptrykt i Bohr, N. (1985)
- Bohr, N. (1964), “Kvantefysik og filosofi – Kausalitet og komplementaritet, 1958” i *Atomfysik og menneskelig erkendelse II* (J.H. Schultz Forlag, København), s.11-18. Genoptrykt i Bohr, N. (1985), s.40-49, citater s.43-44
- Cat, J. (1998), ‘The physicists' debates on unification in physics at the end of the 20th century’ *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, **28**, s. 253-299
- Einstein, A. (1949), ‘Einstein's Reply to Criticisms’ in Schilpp P. (red.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, (Cambridge University Press)
- Favrholt, D. (1994), *Fysik, Bevidsthed, Liv – Studier i Niels Bohrs filosofi*, (Odense Universitetsforlag)
- Faye, J. (1996), ‘Moderne realistiske fortolkninger af kvantemekanikken’, *Filosofiske Studier* **16**, s.6-22
- Howard, D. (1994) ‘What makes a classical concept classical? Toward a reconstruction of Niels Bohr’s philosophy of physics’, i Faye, J. og Folse, H. (1994) *Niels Bohr and Contemporary philosophy*, (Dordrecht: Kluwer), s.33-55
- Rugh, S.E. og Zinkernagel, H. (2002) ‘The quantum vacuum and the cosmological constant problem’, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **33**, s.663-705 (<http://xxx.lanl.gov/abs/hep-th/0012253>)
- Sklar, L (1992) *Philosophy of Physics*, (Boulder: Westview Press)
- Tegmark, M. and Wheeler, J.A. (2001) ‘100 years of the quantum’ *Scientific American*, s.68-75 (<http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0101077>)
- Weinberg, S. (1992) *Dreams of a final theory* (New York: Pantheon Books)
- Zinkernagel, H. (2003) ‘Hume’s problem of induction with respect to causality – a flawed basis for the philosophy of science?’, under udarbejdelse
- Zinkernagel, P. (1988) *Virkelighed* (København: Munksgaard)