

Filosofien i Københavnerfortolkningen

Emil Charlie Lind-Thomsen, Niels Bohr Institutet

Fysik og filosofi er intimt forbundet i deres søgen efter svar på de helt store spørgsmål. Det bliver især tydeligt, når man dykker ned i kvantefysikken. I dette grænseland imellem fysik og filosofi fandt Bohrs og Einsteins berømte dialoger sted, og her befinder man sig selv, hvis man prøver at forstå, hvad kvantemekanikken egentlig betyder. Vi må overveje, hvad forholdet er imellem vores iagttagelser af verden og virkelighedens substans, og om vi er i stand til at erfare og beskrive virkeligheden objektivt.

Videnskabsrealisme og klassisk fysik

Bag enhver fysisk teori ligger nogle grundlæggende antagelser om, hvordan denne teori henholder sig til virkeligheden. Inden for videnskabsteori er særligt to begreber vigtige:

Ontologi, det filosofiske område, som beskæftiger sig med spørgsmål om, hvad verden grundlæggende består af.

Epistemologi, det filosofiske område, som beskæftiger sig med, hvordan vi kan erkende verden omkring os, og hvad denne erkendelse gør os i stand til at vide om verden.

Den klassiske fysik er den fysik, som er blevet ført i langt størstedelen af fysikkens historie, og som havde sit grundlag i de gamle grækeres overvejelser og begyndende eksperimenter om naturens og virkelighedens beskaffenhed.

På den baggrund er den klassiske fysik bygget på vores dagligdags observationer af naturen og disses forhold til virkeligheden. Her antager man tre grundlæggende typer af realisme; *ontologisk realisme*, der betyder, at de ting, vi observerer, er faktisk eksisterende, *epistemisk realisme*, ifølge hvilken vi kan opnå objektive sande påstande om virkeligheden, og *semantisk realisme*, der siger, at kendsgerningen eksisterer før ytringen og dermed er sand, ligegyldigt om den bliver sagt eller ej. Videnskabeligt betyder det eksempelvis, at naturlovene eksisterer ligegyldigt, om de bliver formuleret af nogle organiske væsner på en lille H₂O-rig planet i Mælkevejen eller ej. Foreningen af disse tre realismer i forbindelse med forståelsen af videnskabelige teorier giver os klassisk videnskabsrealisme [1].

Den klassiske videnskabsrealisme

Klassisk videnskabsrealisme hviler altså kort sagt på, at virkeligheden er, som vi observerer den, består af de ting, som vi observerer, og at sandhedsværdien af disse ting er uafhængig af vores observation af og bevidsthed om dem. Dette videnskabsrealistiske erkendelsesgrundlag fører desuden frem til fire ontologiske principper;

Værdibestemthedsprincippet betyder, at værdien af et systems egenskaber ikke er overladt til tilfældighederne, men er en egenskab ved selve systemet. Det betyder fx, at massen af et legeme ikke ændrer sig imellem målinger, hvis ikke der er blevet ændret på legemet.

Kontinuitetsprincippet siger, at et systems tilstandsændring er kontinuert. Når et legeme ændrer sig fra tilstand *A* til *B*, så vil det have gennemløbet alle tilstande

imellem *A* og *B*.

Årsagsprincippet betyder, at alle virkninger har en årsag og ikke sker spontant, uden grund.

Determinismeprincippet siger, at alle fremtidige tilstande af et system er komplet bestemt på baggrund af systemets tidligere tilstand.

Det er determinismeprincippet, som ligger til grund for idéen blandt fysikere om, at man i princippet vil kunne bestemme både fremtidige og fortidige tilstande af universet, hvis man blot kan beskrive dets nuværende tilstand eksakt. Her bemærkes også forskellen på forudsigelighed og determinisme: Determinisme omhandler selve systemets opførsel, mens forudsigelighed omhandler vores mulighed for at beskrive systemet. Et system kan godt være deterministisk, men uforudsigeligt, fordi det er principielt umuligt – eller bare meget svært – for os at beskrive systemet eksakt til ét tidspunkt. Det er netop tilfældet ved kaotiske systemer, som vejret.

Alle disse principper stammer fra den grundlæggende antagelse, som den klassiske fysik hvilede på, at vores mulighed for at iagttage verden gør os i stand til at lave en objektiv beskrivelse af virkeligheden. En objektiv beskrivelse af virkeligheden kræver, at man iagttager verden, som den er i sig selv, og derfor kun på kontrolleret vis påvirker den virkelighed, man undersøger, hvilket man mente var tilfældet i den klassiske fysik [2].

Alle disse principper virker intuitivt rigtige, og i lang tid havde man heller ikke grund til at sætte spørgsmålstegn ved dem. Denne historie skulle hurtigt blive en anden, da Bohr i 1913 introducerede sin atommodel for hydrogenatomet.

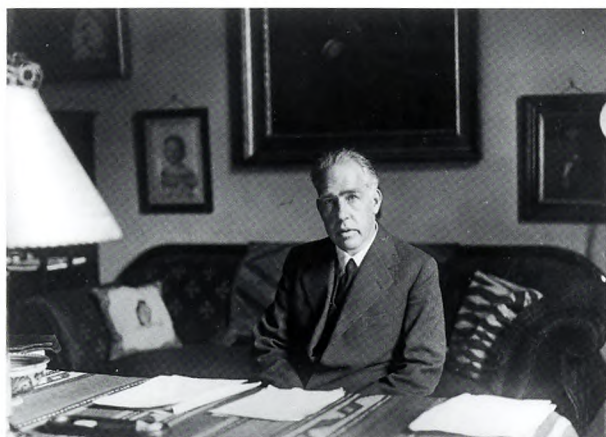
Kvantefysikkens brud med det klassiske

Allerede Bohrs semiklassiske atommodel brød nemlig med tre af de fire ontologiske principper. Det er tydeligt, at kvantefysikken giver et markant andet grundlag for vores erkendelse og dets forhold til virkeligheden end den klassiske fysik gjorde.

Selve kvantepostulatet – det ene af to postulater, som modellen hvilede på – bryder med kontinuitetsprincippet. Postulatet siger, at en bunden elektron kun kan være i ganske bestemte stationære tilstande, hvorfor det ikke er muligt for elektronen at lave en kontinuert tilstandsændring, men *kun* en diskret ændring. Desuden kan en elektron spontant ændre energitilstand, og dermed bryde med årsagsprincippet. Også determinismeprincippet må vige, da det ikke er

muligt at forudsige hvilken energitilstand, en elektron vil ændre sig til på baggrund af tidligere tilstande – vi kan kun sige noget om sandsynligheden for, at elektronen vil ændre sig til forskellige, mulige tilstande. Her er endda blot tale om en semiklassisk teori! Den endelige formulering af kvantemekanikken bryder med værdibestemthedsprincippet, da man ikke kan være sikker på at få det samme måleresultat, når den samme egenskab måles på et system, som det fx er tilfældet med lysets polarisering eller en elektrons spin.

Særligt bruddet med determinismeprincippet er et hårdt slag for den klassiske fysiker, som har svært ved at forlige sig med, at virkeligheden ikke skulle være ordnet og styret efter deterministiske processer.



Figur 1. Niels Bohr i 1935.

Bohrs komplementaritet og superposition

Denne udlægning af Bohrs model for hydrogenatomet læner sig op ad Københavnerfortolkningen, som i høj grad præger vores forståelse af kvantemekanikken i dag. Et af de vigtigste elementer i Bohrs Københavnerfortolkning er *komplementaritetsprincippet*. Dette princip fortæller os, at der i naturen er en *komplementær* forbindelse imellem en kausal- og rum-tidslig beskrivelse af et system. Her omtaler en kausalbeskrivelse et systems impuls og energi, da disse er forbundet med bevarelssætninger, imens en rum-tidslig beskrivelse indeholder de tidslige- og rumlige koordinater. Dette komplementære forhold beskrives ved Heisenbergs ubestemthedsprincip.

Hvis vi tager udgangspunkt i et systems bevægelsesmængde og rumlige koordinater, så betyder det komplementære forhold, at systemets samtidige placering og bevægelsesmængde er gensidigt udelukkende, men samtidig gensidigt udtømmende. Det er udelukkende, fordi vi, når vi vælger den ene beskrivelse, udelukker at kunne bruge den anden beskrivelse. Det er udtømmende, fordi vi er afhængige af muligheden for at *kunne* benytte begge beskrivelser til fuldstændigt at beskrive de fænomener, et system kan udvise. Man kan sige, at vi i den enkelte situation, altid er begrænsede til en enten kausal- eller rum-tidslig beskrivelse, men at den enkelte beskrivelse aldrig vil kunne redegøre fuldstændigt for et systems fænomener. Det komplementære forhold imellem et systems bevægelsesmængde og rumlige koordinater hænger intimt sammen med

partikel-bølge-dualitet. En partikel besidder netop en veldefineret rumlig beskrivelse, imens en bølge besidder en veldefineret bevægelsesmængde eller energi.

Bohr forstod dette komplementære forhold som *ontologisk* – ikke epistemisk. Det betyder, at den begrænsede viden vi kan få om et systems samtidige kausale og rum-tidslige egenskaber ikke bundes i en klodsethed i vores apparatur – en form for mindste forstyrrelse, som vi giver systemet, når vi måler på det. Nej, det er fordi selve systemet ikke er nærmere defineret, end det beskrives af ubestemthedsprincippet; der er altså tale om en ubestemthed ved selve naturen! Det betyder, at når fysikeren foretager en måling, er han tvunget til at *vælge*, om han ønsker en veldefineret kausal eller rum-tidslig beskrivelse.

Også forståelsen af superposition er vigtig for Bohr. Han forstod superpositionen som den mest komplette beskrivelse af et systems tilstand. Hvis en foton polariseres beskrives som værende i en superposition, mente Bohr, at *før* der er foretaget en måling, er det meningsløst at snakke mere specifikt om fotonens polarisation – der er ikke nogen klassisk veldefineret polarisationstilstand at kende. Først *efter*, at der er foretaget en måling, er fotonens polarisation i en entydigt veldefineret tilstand i klassisk forstand. Den polarisation, vi måler af fotonen, er altså ikke udtryk for egenskaber hos fotonen, som den er i sig selv, men udelukkende som den opfører sig i kontekst af vores forsøgsopsætning. Der er altså tale om en kontekstuel egenskab, ikke en objektiv [3].



Figur 2. Werner Heisenberg og Niels Bohr i 1934.

Dette er vigtigt for at forstå de filosofiske konsekvenser, Københavnerfortolkningen har. Bohrs forståelse af komplementaritet og superposition betyder nemlig, at når vi undersøger naturen, kan vi ikke undgå at påvirke den. Når vi måler et system, påvirker vi hvordan det komplementære forhold imellem kausal og rum-tidslige egenskaber ved systemet skal "forskydes", og ligeledes "tvinger" vi en partikel i superposition til at antage en klassisk veldefineret tilstand. De egenskaber, vi måler hos systemer og partikler, er derfor ikke indlejrede, objektive egenskaber, men blot "svar" på de spørgsmål, vi stiller dem. Ifølge Bohrs Københavnerfortolkning må man derfor konkludere, at vores iagttagelsessituation ikke gør os i stand til at lave en objektiv beskrivelse af verden.

I den forbindelse skal det kort bemærkes, at Bohr aldrig talte om et kollaps af bølgefunktionen, som andre tilhængere af Københavnerfortolkningen gjorde, fx Heisenberg. Bohr mente ikke, at der lå en fysisk realitet bagved bølgefunktionen, og derfor heller ikke bagved noget kollaps af denne. Han mente, at bølgefunktionen skulle forstås rent symbolsk, i modsætningen til andre fysikere, som har været præget af en stærk *matematisk realisme* i deres fortolkning af bølgefunktionen.

Alternative fortolkninger

Den filosofiske konsekvens af Bohrs Københavnerfortolkning var en stor mundfuld at sluge for de klassiske fysikere på Bohrs tid – og det er det stadig for mange fysikere i dag. Der er derfor gjort flere forsøg på alternative fortolkninger. Her vil vi komme ind på filosofien i to af disse fortolkninger: skjultvariabel-fortolkningen og mange-verden-fortolkningen. Fysikken i disse fortolkninger er blevet behandlet i tidligere udgaver af Kvant [4].

Disse alternative fortolkninger (som det også er tilfældet med langt de fleste af dem, som ikke dækkes her), søger helt eller delvist at genfinde den klassiske videnskabsrealisme og dets principper i den kvantemekaniske formalisme.

Skjultvariabel-fortolkningen søger særligt at genfinde determinismeprincippet i sin fortolkning. Den antager, at kvantemekaniske systemer blot fremstår probabilistiske, fordi de er styret af nogle, for os ukendte, variable. Hvis vi kendte disse, ville vi kunne forudsige det kvantemekaniske systems fremtidige tilstande på samme måde, som vi kan med det klassiske. Der vil derfor heller ikke være grund til at betvivle, at vores iagttagelsessituation skulle gøre os i stand til at beskrive virkeligheden objektivt. Det interessante ved skjultvariabel-fortolkningen er, at John Stuart Bell i 1964 faktisk fandt ud af, at deterministiske og probabilistiske systemer grundlæggende har forskellige sandsynlighedsfordelinger. Derfor giver skjultvariabel-fortolkningen en anden empirisk forudsigelse end en Københavnerfortolkning, hvilket kan testes. Her kommer Bells ulighed ind i billedet, som omtalt i en tidligere udgave af Kvant [5].

Mange-verden-fortolkningen derimod, hviler først og fremmest på en høj grad af matematisk realisme. Når den matematiske formalismes probabilisme falder sammen i mødet med det konkrete måleresultat, så fortolkes dette "kollaps af bølgefunktionen", som en helt reel fysisk proces, hvori vores univers spaltes og alle de mulige måleresultater realiseres i hvert sit parallelle univers. Mange-verden-fortolkningen er et forsøg på en stærk semantisk realisme, da et legemes tilstand som superpositioneret forstås helt konkret, og desuden en realistisk ontologi, da alle legemer ses som faktisk eksisterende. Her mangler vi dog en realistisk epistemologi, da vi ikke er i stand til at detektere disse mange andre verdener. Filosofiske betænkkeligheder ved denne fortolkning kan læses mere om i [2, side 124–132]. Desuden et fysisk perspektiv på den i [4].



Figur 3. Indgangen til Heisenberg-Gymnasium i Hamborg.

Københavnerfortolkningen og videnskabsrealisme

En anden interessant ting at undre sig over er, om Københavnerfortolkningen kan anerkende en anden form for videnskabsrealisme end den klassiske.

Vi kan undersøge dette spørgsmål ved at overveje Københavnerfortolkningens forhold til de forskellige grene af realisme. Epistemisk realisme bliver afvist, da Københavnerfortolkningen netop modsætter sig, at vi er i stand til at få begrundet sand, objektiv viden om verden. Semantisk realisme afvises også, da udsagn ikke altid vil være sande eller falske, da de begreber, vi benytter til at beskrive legemer, ikke udtrykker egenskaber ved selve legemet, men blot som vi sprogligt kan beskrive legemet. Der er derfor ikke en objektiv sandhedsværdi knyttet til udsagnet, før det er sagt og givet mening af os.

Hvad med ontologisk realisme? Det bryder Københavnerfortolkningen faktisk ikke umiddelbart med. Københavnerfortolkningen nægter ikke, at elektroner, fotoner og protoner eksisterer, tværtimod så viser den teoretiske og eksperimentelle succes af atomteorien i højeste grad, at atomer faktisk eksisterer. Københavnerfortolkningen kan altså godt acceptere visse realistiske principper.

Hvilken videnskabsrealisme kan dette give os? Et bud er en pragmatisk videnskabsrealisme. Her møder ontologisk realisme den pragmatiske skole. En pragmatisk videnskabssteori henholder sig til, at videnskabens opgave udelukkende er at give en *præcis beskrivelse af de direkte observerbare dele af verden*. En teori som opfylder dette siges så at være *empirisk adækvat*, hvilket betyder, at teorien i tilfredsstillende grad kan beskrive hele empirien indenfor dens domæne. En pragmatisk videnskabssteori alene er dog ikke realistisk, da den ikke mener, at spørgsmålet om ikke-direkte observerbare entiteters eksistens, fx elektroner og fotoner, er inden for videnskabens domæne eller interesse [1]. Her bidrager den ontologiske realisme med at anerkende eksistensen af disse. Den pragmatiske videnskabsrealisme mener således ikke, at tingene i virkeligheden eksisterer, fordi den videnskabelige teori forudsiger det, men *fordi vi kan bruge dem* [2]. Atomer eksisterer, fordi de giver en præcis og brugbar beskrivelse af, hvordan den mikroskopiske verden hænger sammen. Vi bruger atomer til at opfinde nye materialer og kreere altødelæggende

våben med, derfor har vi ingen grund til at betvivle deres eksistens. Det er dét, som videnskabelige teorier beskriver ifølge en pragmatisk realist; den virkelighed, som fungerer. Vi kan også spore denne tilgang til videnskaben i Bohrs egne udtalelser:

at der ved naturbeskrivelsen ikke er tale om at afdække fænomenernes egentlige væsen, men kun om i størst muligt omfang at efterspore sammenhæng i vore erfaringers mangfoldighed [3].

Denne måde at tænke videnskabens rolle er de senere år blevet mere og mere dominerende, særligt inden for andre videnskabelige discipliner end fysik. Det er nok også mest for den klassiske fysiker, at denne videnskabsrealisme kan forekomme reducerende og mangelfuld – og mon ikke vi alle går rundt med en lille klassisk fysiker i maven?

Hvad kan fysikeren bruge filosofien til?

Historien om kvantemekanikkens udvikling viser fysikeren, hvordan man aktivt kan bruge filosofiske overvejelser og principper i sit videnskabelige virke. Når fysikeren overvejer det epistemiske og ontologiske grundlag for sit videnskabelige virke, kan han både adskille de filosofiske antagelser fra sit empiriske og teoretiske grundlag, men han kan også aktivt bruge disse overvejelser til at nå endnu dybere ned i forståelsen af de forudsigelser og resultater, han får. Det var netop det Bell gjorde, da han udledte sin ulighed; Bell transformerede en filosofisk antagelse til en empirisk forudsigelse.

På den måde kan fysikeren se filosofien som et metodisk værktøj, der gør ham i stand til at undersøge sine videnskabsteoretiske antagelser, og bruge dette til at komme endnu dybere ned i virkeligheden.

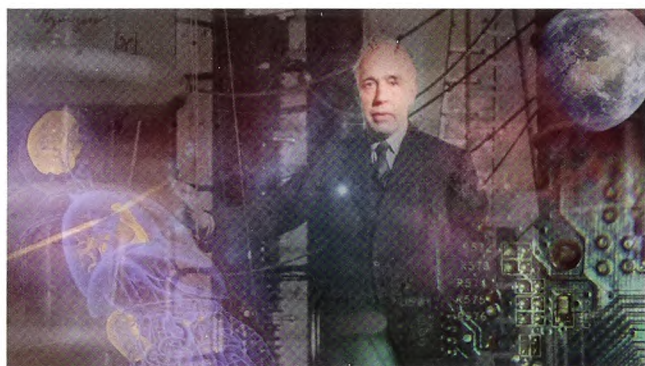
Litteratur

- [1] P. Godfrey-Smith (2003) "Theory and Reality" side 174, The University of Chicago Press.
- [2] J. Faye (2010) "Kvantefilosofi", Aarhus Universitetsforlag.
- [3] N. Bohr (2013) "Niels Bohr: Filosofiske Skrifter", bind 1, Forlaget Philosophia.
- [4] K. Mølmer (2021) "Kvantemekanikkens fortolkninger", *Kvant*, bind 32, nr. 2, side 21–25.
- [5] J. Myrheim (2021) "Kvantemekanisk sammenfiltrering – Bells uligheder", *Kvant*, bind 32, nr. 4, side 22.–26.



Emil Charlie Lind-Thomsen er fysikstuderende på Niels Bohr Institutet. Han har været på et to ugers studieophold på CERN og kvalificeret sig til den Internationale Fysikolympiade 2022. Han er særligt interesseret i kvantemekanik fra en kombineret fysisk og filosofisk vinkel. Denne artikel er baseret på hans SRP i fysik og filosofi.

På skuldrene af Bohr – ny videnskabsserie



Kvants læsere har ikke kunnet undgå at bemærke, at det i år er 100 år siden, at Niels Bohr modtog Nobelprisen i fysik. Niels Bohr var i øvrigt præsident for Videnskaberne Selskab i en årrække, og nu afslutter Videnskaberne Selskab Bohr-fejringen med en filmserie, der samler trådene mellem videnskabsmanden Niels Bohr, hans forskning og ikke mindst forskningslandskabet i dag, 100 år senere.

Serien havde premiere på DR2 den 18. november og består af i alt seks afsnit på hver ca. 15 minutter. Serien er produceret af produktionsselskabet Booms-hanka Productions, der har mere end 20 års erfaring med tilrettelæggelse og produktion af videnskabeligt tv, og den kan ses på https://www.dr.dk/drtv/serie/paa-skuldrene-af-bohr_336797

Seriens emner har alle berøring med de tanker, Niels Bohr gjorde sig. Den første af filmene ser således på begrebet tid. For hvad er tid i virkeligheden? Er tiden overhovedet til, eller er den bare noget, vi bilder os ind? Det næste afsnit handler om, hvordan vi bruger stråling og radioaktivitet til at redde liv, og det tredje afsnit handler om, at universet ikke er uendeligt – men hvad er der så på den anden side? De sidste dele beskæftiger sig med supercomputere, teleportation og Higgsfeltet.

Serien om Bohr er en fortsættelse af en tidligere serie "På skuldrene af Ørsted", som blev produceret i anledning af 200-året for Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820.