

Fysikk og virkelighetsoppfatning

Arnt Inge Vistnes, Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

“Det er mye viktigere enn du tror at du ser deg selv i speilet på badet hver morgen. Når alt kommer til alt, mener noen fysikere at fundamentale aspekter i universet ikke eksisterer før de blir observert. Hele din eksistens avhenger av at du står opp, stabber deg av gårde til badet og *betrakter speilbildet ditt* hver dag.

Dette er absurd, selvfølgelig. Men er det mer absurd enn forståelsen av kvante-teorien, den mest suksessfulle teorien som beskriver den mikroskopiske verden av atomer og deres byggesteiner? Etter hvert har alle underlige sider av teorien blitt akseptert, selv der man innfører merkelige ideer om hvordan realitetene opptrer i naturen - alt etter hvorvidt og hvordan vi måler dem.”»

Omtrent slik starter Marcus Chown en artikkel kalt «Quantum rebel» i New Scientist 24. juli 2004. Og Chown har et poeng. Innen moderne fysikk er det oppdaget lovmessigheter i naturen som virker helt merkelige, men som vi sakte, men sikkert har akseptert, selv om de virker helt uforenlige med våre dagligdagse erfaringer.

I dette kapitlet har jeg valgt ut noen nokså lett forståelige fysiske fenomener og eksperimenter som går til kjernen i denne saken, og jeg vil fortelle hvordan vi fysikere har laget oss en forståelse av fenomenene, eller hvordan vi *interpreterer teorien* som vi også sier det. Du vil da se at de grunnlagsproblemene i fysikken som vi tar opp, griper inn i filosofien og vår egen oppfatning av verden, også hos dem som ikke er spesielt opptatt av fysikk i sin alminnelighet.

Aller først må vi likevel innom en kort historisk gjennomgang av hvordan fysikken har utviklet seg, og vi må si litt om hva som driver fram nye teorier. En slik gjennomgang kan være nyttig når vi siden skal se på de merkelige oppfatningene som finnes i kvantefysikken og forsøke å danne oss et bilde av hvor alvorlig vi bør ta disse oppfatningene når vi selv danner oss et bilde av vår virkelighet.

1. BYGGESTEINER I NATUREN

Hva er den materielle verden laget av? Hvilke byggesteiner har vi? Mange ulike oppfatninger har eksistert - men har vi nå svaret?

Mennesker har i årtusener spekulert på hva den materielle verden er sammensatt av. Når vi betrakter en menneskekropp, en stein, et trestykke, skyer, en stearinlysflamme eller en brennmanet, er det nesten ufattelig at det kan være noe enkelt som binder alle disse fenomenene sammen. Empedokles (ca. 450 f.Kr.) mente at alle disse varianter av materielle enheter er satt sammen av jord, vann, ild og luft. Gjennom Aristoteles (se et eget kapittel om ham) fikk denne læren stor utbredelse. Demokrit (ca. 420 f.Kr.) hevdet imidlertid at det eneste som eksisterer uavhengig av sitt forhold til andre ting, er atomene og det tomme rom. Han mente at atomene er udelelige og massive (uten tomrom), og at det er uendelig mange typer av dem, både med hensyn til størrelse og form, og at de beveger seg uten friksjon i det tomme rom. Demokrits lære ble nesten glemt, men kom litt i vinden igjen på 1600-tallet.

I 1807 la John Dalton fram en noe mer moderne atomteori. I 1897 ble elektronet oppdaget av J. J. Thompson, og året etter oppdaget K. W. Wien positivt ladde partikler (kalt protoner av Rutherford mange år senere). I 1911 konkluderte Ernest Rutherford etter omfattende eksperimenter der han bombarderte atomer med partikler, at atomene må bestå av en tung kjerne omgitt av lette elektroner. Niels Bohr modifiserte atommodellen i 1913 ved å hevde at bare noen helt bestemte «elektronbaner» kan forekomme. Nøytronet, den elektrisk nøytrale partikkelen i atomene, ble oppdaget først i 1932. En rekke kjemiske lovmessigheter, som Meyer og Mendelevjev uavhengig av hverandre hadde

systematisert i det periodiske system for grunnstoffene i 1868 og 1869, ble “forklart” ut fra atomteorien i første halvdel av 1900-tallet.

Det bildet folk flest har av et atom i dag, er en massiv sentral kjerne av protoner og nøytroner med elektroner svirrende rundt kjernen som en slags sky. Det antas å være om lag like mange av de tre nevnte byggesteinene. Langt på vei brukes dette bildet også innen fysikken, men det finnes flere byggesteiner i naturen enn denne enkle atommodellen tilsier.

I siste halvpart av 1900-tallet ble en rekke såkalte elementærpartikler oppdaget gjennom høy-energetiske eksperimenter i laboratorier ved CERN, Brookhaven, Stanford, Stony Brook og flere andre steder. En elementærpartikkel er en byggestein av materie som ikke kan deles i mindre enheter, for eksempel er elektronet en elementærpartikkel. Vi kjenner nå til 24 elementærpartikler, eller rettere sagt 12 elementærpartikler og deres antipartikler. (En partikkel og dens antipartikkel kan “oppheve” hverandre, og man ender opp med bare ren energi i form av fotoner.) Protonet og nøytronet regnes ikke lenger som elementærpartikler, siden vi nå tenker oss at disse partiklene er sammensatt av kvar-ker. Atomet som en udelelig enhet, slik grekerne så for seg det hele, er altså erstattet med et sett av enda mindre ulike partikler.

Videre er det i løpet av de siste tiår vokst fram en såkalt strengteori. Utviklingen av denne teorien startet med en antakelse om at alle elementærpartiklene har samme grunnstruktur, en såkalt streng, og at de ulike partiklene bare kan skilles fra hverandre ved for eksempel strengens svingemønstre. Dette skal vi komme tilbake til nedenfor. I de senere år har man imidlertid måttet innføre andre objekter enn strenger for å kunne beskrive materien. I den såkalte M-teorien er strengene erstattet av membraner. Vi vet ennå ikke om strengteorien eller M-teorien vil overleve som fruktbare teorier. Strengene er, dersom de i det hele tatt eksisterer, så små at det er umulig å gjøre direkte observasjoner av dem for å kartlegge detaljerte egenskaper.

2. TEORIER INNEN DAGENS FYSIKK

Så langt har vi bare ramset opp en del oppfatninger om, eller, om du vil, bilder av hvilke byggesteiner naturen er konstruert ut fra. Men fysikken omfatter også de lovene som beskriver hvordan disse byggesteinene oppfører seg, hvilke egenskaper de har og hvordan mange partikler til sammen kan danne de gjenstandene som vi møter i hverdagen, med de egenskapene vi da observerer. Teoriene har vært mange, og vi må igjen nøye oss med en kort oppsummering; men underveis skal vi ta noen sidesprang som forhåpentligvis har en verdi i seg selv.

2A. Newtons mekanikk

På Isaac Newtons tid var fysikken langt på vei blitt en vitenskap. I 1687 publiserte han sitt hovedverk *Principia*, hvor han gir fire lover som siden har vært grunnlaget for alle beregninger i mekanikk: Newtons tre lover og gravitasjonsloven. Newton formulerte lovene matematisk, og han videreutviklet også en del av matematikken for å få alt sammen til å fungere. Og lovene fungerer! Det er Newtons lover vi bruker når vi beregner bremselengder på en bil - eller når vi skal beregne Saturns posisjon på himmelen ved Astrofestivalen som arrangeres i november hvert år ved Universitetet i Oslo.

Selv om Newtons lover er svært nyttige innen fysikken, kan lovene oppfattes temmelig forskjellig i en filosofisk sammenheng. Når et eple faller til jorden, kan vi si som så: Eplet faller *fordi* det virker en gravitasjonskraft på det. Vi snakker da om en *årsak* og en *virkning*. Vi tror at gravitasjonskraften er noe virkelig, en kausal kraft som eksisterer uavhengig av våre tanker og modeller, selv om vi aldri kan observere kraften *direkte*. Vi kan bare observere *virkingen* av kraften. Dette er et ståsted vi kaller *realisme*.

En annen måte å skildre eplets fall på, kunne være å si at Newtons lover gir oss et *verktøy til å beskrive og forutsi eplets bevegelse*. Begrepet «kraft» er da bare et abstrakt ord som vi bruker når vi gjennomfører beregningene, men vi betrakter ikke kraften som sådan som noe virkelig. Ofte er denne

tenkemåten et uttrykk for en bakenforliggende pragmatisk holdning - at man strengt tatt ikke behøver å si noe om hvorvidt kraften eksisterer eller ikke. Det holder å bruke loven som et verktøy, som et instrument for å kunne beregne hvor eplet til enhver tid vil befinne seg under fallet. Eplets posisjon er, i motsetning til kraften som får det til å falle, noe vi kan observere direkte, og den har derfor en realitet. Et slikt ståsted kaller vi *instrumentalisme*.

De nevnte grunnleggende tankene om hvordan en fysisk lov oppfattes, finner vi igjen i alle deler av fysikken. Vi skal diskutere disse synspunktene i mer detalj når vi behandler kvantemekanikken senere i dette kapitlet, men la oss først ta for oss en annen fysisk lov som har en enorm innflytelse på utviklingen av vår teknologiske hverdag.

2B. Maxwells elektromagnetisme

I naturen finner vi mange ulike elektriske og magnetiske fenomener. Disse ble utforsket i stor stil i første halvpart av 1800-tallet, men forskningen førte til at det etter hvert ble mange ulike lover å forholde seg til. James Clerk Maxwell klarte i 1865 å samle disse lovene innenfor en og samme ramme. I dag kjenner vi lovene som Maxwells likninger, og i dagens mest vanlige skrivemåte angis de i form av fire likninger der elektriske og magnetiske felt er nøkkelbegreper. Det er Maxwells likninger vi bruker når vi for eksempel skal finne ut hvordan feltene fra en mobiltelefon trenger inn i hjernen vår når vi taler inn i telefonen.

2C. Einsteins relativitetsteori

I 1905 lanserte Albert Einstein sin spesielle relativitetsteori, hvor han viser at våre dagligdagse oppfatninger av tid og rom ikke kan brukes når vi har å gjøre med gjenstander som beveger seg svært raskt, det vil si bortimot så raskt som lyset (300 000 km pr. sekund). Han viser at oppfatningen av “nå” er noe vi kan ha hver for oss, men at det ikke finnes noe begrep “nå” som har mening for alle i hele verden.

På dette punktet kan et lite sidesprang være på sin plass. Hvorfor i all verden mener Einstein at begrepet “nå” ikke kan brukes universelt? Hans syn er stikk i strid med våre vanlige oppfatninger. Problemet er at det dagligdagse begrepet “nå” er temmelig upresist når det kommer til stykket, og vi har ingen konkrete regler for hvordan vi skal etterprøve en påstand om at et universelt “nå” eksisterer. Einstein analyserte problemet svært presist, og han fokuserte på et nytt begrep: “samtidighet”. Han krevde at vi må konstruere presise regler for hvordan vi skal måle og teste utsagn om tid, så snart tid faktisk inngår i vitenskapen. Einstein valgte å ta utgangspunkt i lysets hastighet i vakuum, fordi både Maxwells likninger og praktiske forsøk forutsa at denne hastigheten er konstant, også når vi selv eller lyskilden er i bevegelse. Det er når vi bruker begrepet ‘tid’ i en slik presis sammenheng at det viser seg at et universelt “nå” ikke har noen mening.

Her er det kanskje på sin plass med enda en digresjon. Einsteins arbeid med tidsbegrepet illustrerer et viktig poeng. Et typisk trekk ved vitenskapen er nettopp at vi der konkretiserer, presiserer og tester ut. Dette står i motsetning til mange av våre ikke-vitenskapelige praksiser (for eksempel deler av den “alternative medisinen”). Så lenge vi har upresise oppfatninger som ikke er formulert slik at de kan testes på en presis måte, kan vi innbille oss mye rart, og vi kan opprettholde slike oppfatninger og innbilninger gjennom et helt liv. Ikke-vitenskapelige oppfatninger opprettholdes gjerne i århundrer i temmelig uforandret form, fordi de som viderefører disse oppfatningene, ikke formulerer tester på en tilstrekkelig presis måte. Prisen man må betale for dette er et temmelig statisk og upresist tankegods. Når det for eksempel gjelder bruk av ønskekvist og den slags, er oppfatningene i dag nesten identiske med de som fantes på 1600-tallet. Vitenskapen står som en motsetning til dette; der har presisering og testing av teorier ført til at vi stadig finner ut nye detaljer om hvordan verden er bygd opp og arter seg. Innen en hvilken som helst gren av fysikken er vår kunnskap i dag enormt mye større enn den var på 1600-tallet! Men nå tilbake til Einsteins arbeider.

I 1915 lanserte Einstein sin generelle relativitetsteori, hvor han gjennom en merkelig, men elegant matematisk formalisme knyttet til et såkalt «krumt rom» viste at gravitasjon kan påvirke tid og lys, noe som til da var ukjent. Det betyr blant annet at tiden går med ulik takt på Galdhøpiggen i forhold til for eksempel i Egersund (hvor jeg vokste opp). Hvis noen hadde bodd på månen og sammenliknet forholdene der med dem på jorden, ville forskjellen på hvordan tiden går faktisk ha blitt enda større. Tiden, som vi oppfatter som noe som flyter av gårde svært så trofast og universelt, synes faktisk ikke å være så universell som vi vanligvis oppfatter den som.

Vi kan imidlertid spørre: «Hvilken tid snakker vi om?» Jo, det er tid slik den presist er definert gjennom Einsteins arbeider. Denne tiden er på den andre siden ikke bare en teoretisk størrelse; den har også en viktig betydning ved målinger på fysiske system. For hvordan måles tid? Alle våre klokker er basert på fysiske system: Et pendelur, elektroniske kretser, sand som flyter i et timeglass osv. Også de atomære prosessene i kroppen vår som er ansvarlige for at vi blir eldre, er fysiske prosesser. Einsteins tid er så langt vi vet fullt ut i samsvar med tiden slik vi måler den med klokkene våre. Det betyr at dersom tiden i einsteinsk forstand går saktere på ett sted sammenliknet med et annet, så går faktisk alle de fysiske prosessene saktere på dette første stedet. Det betyr igjen at dersom en av to tvillingbrødre bodde hele sitt liv i Egersund og den andre på Galdhøpiggen, ville de ha bitte litt forskjellig alder dersom de kom sammen på sin felles 80-årsdag. Det er vanskelig å forstå disse forholdene fullt ut fordi argumentasjonen er uvant og man har lett for å gå i ring. Effekten er likevel så reell at vi faktisk må ta hensyn til den for å få GPS (Global Position System) til å fungere i praksis.... Men la oss igjen vende tilbake til utviklingen av nye teorier innen fysikken.

2D. Kvantemekanikken

På begynnelsen av 1900-tallet ble også kvantefysikken utviklet, denne merkelige teorien som så mange stusser over, men som har vært utrolig nyttig for å forklare og forutsi fenomener på mikroskopisk nivå. Det var mange som medvirket til utviklingen av kvantefysikken, blant andre Planck, Einstein og Compton for å få fram selve begrepet “kvant”, og Bohr, Heisenberg, Schrödinger, von Neumann og Dirac for å utvikle det teoretiske formelapparatet. Hensikten med kvantefysikken var å kunne beskrive fenomener som foregår på atomært nivå. Newtons gravitasjonslov og Maxwells likninger for elektromagnetiske felt duger ikke her, men kvantefysikken gjør nytten. Vi skal komme tilbake til kvantefysikken i større detalj senere i dette kapitlet.

I løpet av 1950-tallet ble det utviklet en spesiell teori som kombinerer kvantefysikken og elektromagnetismen. Denne teorien kalles kvanteelektrodynamikk, og Richard Feynmann var blant dem som utarbeidet den. Feynmann er meget berømt fordi han var svært flink til å popularisere fysikken, altså å forklare den slik at folk uten noen langvarig utdannelse innen fysikk kan forstå den. Han skrev en rekke små bøker om ulike fysiske teorier og emner, og du kan få kjøpt dem for en rimelig penge (på engelsk) fordi opplagene er store.

Kvanteelektrodynamikken er for øvrig den mest nøyaktige teorien som finnes fram til dags dato. Den forutsier at en bestemt størrelse som angir et elektrons magnetiske egenskaper er 2.00231930476 med en usikkerhet på ± 0.00000000052 . Meget nøyaktige målinger gir verdien 2.00231930482 med en usikkerhet på ± 0.00000000040 . Feynmann har selv sammenliknet denne nøyaktigheten med at man skulle kjenne avstanden mellom Los Angeles og New York med en nøyaktighet av tykkelsen på et menneskehår! Det er bemerkelsesverdig både at man kan gjøre så nøyaktige forutsigelser og så nøyaktige målinger! Et skår i gleden er at kvanteelektrodynamikken er så arbeidskrevende at den bare brukes når de enklere teoriene ikke er nøyaktige nok for å løse en konkret oppgave.

For øvrig er det i siste halvpart av 1900-tallet utviklet teorier som er knyttet til kreftene som holder atomkjernene sammen (såkalte svake og sterke kjernekrefter), men disse vil vi ikke gå nærmere inn på her.

2E. Strengteorier

En del fysikere ønsket å kunne bruke kvantefysikk og generell relativitetsteori samtidig, men da

oppstod det problemer. Gravitasjonskreftene blir sterkere og sterkere jo tettere man kommer inn mot en partikkel med masse. Dersom partikkelen ikke har noen utstrekning, kan gravitasjonen gjøres vilkårlig stor ved å velge en tilsvarende liten avstand. Ifølge den generelle relativitetsteorien kan vi da forvente at rom og tid blir kraftig forvrengt tett ved den punktformige partikkelen. Forvrengningen i seg selv ville vi kanskje kunne leve med, men kombinerer vi den med kvantefysikk, blir det verre. Kvantefysikken tillater noe vi kaller vakuumfluktasjoner (som vi ikke skal gå nærmere inn på her). Poenget er at dersom vi kombinerer vakuumfluktasjonene i kvantefysikken med krumning av rommet fra den generelle relativitetsteorien, ender vi opp med et meningsløst “mess” tett ved den punktformige partikkelen. I dette området vil rommet bli helt forskrudd, og opp og ned og høyre og venstre mister helt sin mening: Noe slikt kan vi ikke leve med i en fysisk teori. Siden gravitasjon er den svakeste av alle kjente krefter, må vi svært tett opp til den punktformige partikkelen for at dette skal bli et problem. Vi må faktisk nærmere enn ca. 10^{-35} m, en nesten forsvinnende liten avstand som nå kalles Planck-lengden.

Siden om lag 1984 har en del fysikere forsøkt å utvikle en såkalt superstreng-teori, som vi for korthets skyld kaller en strengteori, blant annet for å unngå problemet nevnt ovenfor. Det gjør de ved å ikke tillate helt punktformige partikler. Alle partikler blir i strengteorien oppfattet som bitte små lukkede eller åpne strenger eller sløyfer av en uendelig tynn tråd. Størrelsen (lengden eller diameteren på de lukkede strengsløyfene) er svært liten, om lag en Planck-lengde, men likevel stor nok til å unngå de problemene vi nevnte ovenfor. Mange fysikere mener at det ved hjelp av strengteori er mulig å kombinere kvantefysikk og generell relativitetsteori og at strengteorien kan bli “The Theory of Everything” (TOE). Strengteorien skulle da ifølge optimistene være den “endelige teorien” som beskriver fysiske lovmessigheter en gang for alle.

3. DRIVKREFTER FOR DANNELSE AV NYE TEORIER

Vi har nå foretatt en rask gjennomgang av utviklingen av teorier innen fysikken, og vi skal om en liten stund dykke ned i en av teoriene, nemlig kvantefysikken, for å se på de underlige bildene som brukes der. Før vi gjør det, vil jeg gjerne si litt om bakgrunnen eller drivkreftene for at teoriene i det hele tatt lanseres og eventuelt forkastes. Det kan være nyttig for senere drøftelser.

3A. Enkelhetens prinsipp

La oss starte med en liten kommentar til strengteorien. Vil denne teorien overleve i det lange løp, eller vil den falle for de kriteriene som brukes for å ta stilling til om en teori er bedre enn en annen (når ingen av dem er direkte motbevist)? Et viktig kriterium i denne forbindelse er det såkalte enkelhetens prinsipp. La oss se litt nærmere på dette.

Strengene appellerer til mange forskere fordi de synes å gi en meget enkel forklaring av naturen. I stedet for et stort antall ulike elementærpartikler, kan vi i prinsippet innføre bare én type partikkel, en streng. Egenskapen til partikkelen, det vil si hvorvidt partikkelen opptrer som et elektron, som et foton, som et meson osv., avhenger bare av vibrasjonstilstanden og noen av de andre egenskapene til strengen.

Hva oppnår vi med en slik modell? Jo, vi aner at det er en systematisk matematisk lovmessighet mellom de ulike elementærpartiklene, og vi søker å finne denne lovmessigheten. Kan lovmessigheten likne på rekken av kvadrattall: 1, 4, 9, 16 osv., eller på en annen lovmessighet? For å finne svaret kan vi ta for oss ulike kjente systematiske lovmessigheter og se om en av dem kan passe med de observasjonene vi har av elementærpartiklene. Kanskje vil det da vise seg at den lovmessigheten vi vet gjelder for vibrerende strenger, også passer for elementærpartiklene? Uansett hva slags lovmessighet vi enn måtte finne, vil den kunne ha en forklaringskraft av den typen som Keplers tredje lov har. Loven foreligger som et matematisk uttrykk som på én og samme måte uttrykker årets lengde på samtlige av planetene. Slik blir årets lengde forklart av loven. Ofte kan vi ut fra et slikt matematisk uttrykk gjøre nye forutsigelser, og kanskje vil vi ut fra lovmessigheten også kunne forutsi at det finnes partikler som vi ennå ikke har observert. Men så kommer det store spørsmålet:

Er begrepet “streng” i betydningen en ytterst liten forvridd tråd et begrep som har livets rett? Vi kan, ut fra det vi vet i dag, aldri noen gang observere en slik særdeles liten struktur. Blir ikke bildet av denne forvridde tråden egentlig et bilde som mangler forklaringskraft, siden det ligger utenfor enhver mulighet for direkte observasjon og indirekte testing? Den matematiske lovmessigheten man kommer fram til, må stå sin prøve med hensyn til observasjoner og målinger, men altså ikke bildet av en bitte liten forvridd streng.

I vitenskapen bruker vi ofte et metodologisk enkelhets- eller økonomiprinsipp kalt Ockhams barberkniv (*Ockham's razor*). Den engelske filosofen William Ockham fremhevet på 1300-tallet at “man bør ikke innføre flere begreper og størrelser enn nødvendig for den sak det gjelder”. Kepler, for eksempel, nøyde seg med å legge fram den matematiske loven og trengte ikke noe modellbilde ved siden av. Det ville være overflødig. Jeg er ikke sikker på hvordan Ockham ville ha sett på begrepet “streng”, men selv har jeg en følelse av at dette begrepet og bildet egentlig er unødvendig.

Enkelhetsprinsippet brukes også i andre sammenhenger, for eksempel i situasjoner der to teorier forklarer de samme fenomenene. Da velger vi ofte den teorien som kan beskrive fenomenene på den enkleste måten. Vi kjenner vel alle til det ptolemeiske verdensbildet som var i bruk omkring år 1600, der man tenkte seg at planetene kretser rundt jorda i sirkelbaner koblet til nye sirkelbaner i mange ledd. Vi kaller denne modellen også for epicykel-modellen. Motstykket var det kopernikanske verdensbildet, der sola står i sentrum for planetbevegelsene. Av disse to er den sistnevnte teorien, når det tas hensyn til at planetene beveger seg i ellipser, langt enklere enn den første. Enkelhetsprinsippet kan i visse sammenhenger også uttrykkes i form av en påstand om at “naturen velger den enkleste vei”. Denne formuleringen røper en annen interessant detalj: Vi velger ikke den enkleste teorien, i dette tilfellet den kopernikanske, bare for å lette våre beregninger, vi har også en underbevisst oppfatning om at naturen selv likner den enkleste modellen mer enn den mer kompliserte. Det er her underforstått at begge modellene har like stor forklaringssevne.

3B. Systematisering av kunnskap

Hvilke andre drivkrefter finnes i utviklingen av nye teorier? Vi har sett at teorier ikke oppstår i et tomrom. Ofte er teoriene en slags «oppsummering» eller systematisering og generalisering av erfaringer fysikerne har fått for eksempel gjennom eksperimenter. Vi ser gjerne en bakenforliggende fellesnevner i flere typer eksperimenter og fenomener. Det var dette som var tilfellet da Maxwell la fram sine likninger.

3C. Fjerne logisk inkonsistens

Andre ganger vokser nye teorier fram fordi de som til da har eksistert, har klare svakheter. En mulig svakhet kan være at teorien ikke stemmer med eksperimentelle data, men svakhetene kan også være av mer logisk karakter. Einstein ble i sitt arbeid med den spesielle relativitetsteorien inspirert av en uoverensstemmelse mellom Newtons mekanikk og Maxwells elektromagnetisme. I utgangspunktet er dette to vidt forskjellige teorier som man ikke umiddelbart ser noen sammenheng mellom, men et felles punkt har de likevel.

Newton videreførte et symmetriprinsipp som Galilei hadde satt opp, nemlig at alle fysiske lover skal være identiske i to referansesystem som beveger seg med konstant hastighet i forhold til hverandre. Ut fra dette prinsippet viste Newton hvordan vi kan finne hastigheten til en gjenstand i to ulike referansesystem. Sitter vi for eksempel på et tog og ser på biler som kjører parallelt med oss på en nærliggende vei, vil en bil som kjører like fort som toget, synes å stå stille. Dette er helt naturlig innen Newtons mekanikk. Bruker vi imidlertid samme tankegang og tenker oss at noen reiser med samme hastighet som lyset, ville lyset synes å bli stående helt stille. Det ville være ok i Newtons mekanikk, men det er totalt i strid med Maxwells lover, som sier at lyset i vakuum har en og samme hastighet, uansett om vi selv eller lyskilden er i bevegelse eller ikke. Selv om ingen i praksis kan reise så raskt som lyset, så er det teoretisk sett en logisk brist i forholdet mellom teoriene.

Det var denne *logiske inkonsistensen* mellom Newtons og Maxwells likninger som førte til Einsteins nye teori. Einstein klarte som allerede nevnt å løse opp denne logiske konflikten ved å gi avkall på absolutt rom og absolutt tid, og han måtte sette opp spesielle og helt presise spilleregler for hvordan vi kan bruke ord som “avstand”, “tidsforskjell” og “samtidighet”.

På liknende måte var det en logisk inkonsistens mellom kvantefysikken og den generelle relativitetsteorien som førte til at strengteorien ble lagt fram. Løsningen ble i dette tilfellet å innføre strenger som har en viss utstrekning i rommet, for å unngå de problemene som følger dersom man antar at en partikkel ikke har noe som helst utstrekning (er et punkt). Om dette er en god løsning eller ikke, vil bare fremtiden vise.

3D. Å beskrive fenomener som tidligere ikke kunne beskrives tilfredsstillende

Når det gjelder dannelsen av kvantefysikken, var utgangspunktet mer flerfoldig og kaotisk, så det er kanskje ikke så rart at selve teorien har visse merkelige sider. Det hele startet rundt år 1900 med kartlegging av såkalt “sort stråling”. Sort stråling er nært knyttet til stråling fra for eksempel en metallbit som varmes opp til den gløder.

Sort stråling innbefatter både varmestråling og lys, begge er såkalt elektromagnetisk stråling. En jernbit som er “nokså varm”, gløder rødlig. Varmes biten ytterligere opp, vil den lyse mer gult og etter hvert hvitt. Fysikerne studerte spekteret fra slik stråling og forsøkte å formulere teorier som var i samsvar med observasjonene, men det var lettere sagt enn gjort. Planck klarte det til slutt, men for å få en teori som fungerte, brukte han en modell som innebærer at strålingen skjer ved utsending (eller absorpsjon) av helt bestemte energipakker som vi i dag kaller fotoner. Dette var nytt, for ifølge Maxwells likninger kan strålingen ha akkurat den styrken man måtte ønske, mens Planck altså måtte forutsette at strålingen bare kommer i småpakker, fotoner, og at energien til hvert foton er gitt ved den berømte likningen $E=h\nu$, der E er energien til fotonet, h er en konstant som nå kalles Plancks konstant, og ν er frekvensen til strålingen.

Plancks modell ble styrket da Einstein få år senere brukte samme tenkemåte for å forklare et fenomen som kalles den fotoelektriske effekt. Det dreier seg om at dersom vi sender lys inn mot et metall, kan vi under visse omstendigheter få sparket ut elektroner fra metallet. Lovmessigheten som ligger til grunn for denne effekten, kunne forklares når Einstein antok at lys består av små energipakker, fotoner, og at når et foton treffer metallet, gir det fra seg hele sin energi til bare ett elektron. Einstein fant at dette skjer bare dersom energien *per foton*, $E=h\nu$, er stor nok til å sparke ut elektronet. Er energien *per foton* for liten, det vil si at fotonfrekvensen er for liten, blir ingen elektroner sparket ut. Denne lovmessigheten gjelder, antok han, uansett hvor mye energi som finnes i den *samlede* lysstrålen. Dette var stikk i strid med hva alle forventet.

Siste velkjente oppdagelse som styrker fotonbegrepet, er den såkalte Compton-effekten. Compton viste, litt løst sagt, at når lys treffer et elektron som allerede er nokså fritt, oppfører det seg som en ball som kolliderer med elektronet, noe som igjen indikerer at lys foreligger som små pakker, altså som fotoner.

Den nye oppfatningen, at energi blir utvekslet i helt bestemte energipakker eller fotoner (som kan betraktes som partikler), ble på en måte lurt inn bakveien. Fysikerne tok ikke i starten stilling til om fotoner “eksisterer” eller ikke, men konstaterte bare at dersom man bruker et slikt bilde, kan man beskrive teoretisk det som observeres eksperimentelt. Det kunne selvsagt være slik at man kunne ha forklart eksperimentene også på en annen måte enn ved å bruke disse begrepene, men denne modellen var den beste man hadde, og den fungerte! Når man så hadde et bilde som fungerte, vokste etter hvert også troen på at fotoner slik de nå var beskrevet, faktisk var *den* riktige beskrivelsen. Dette gjaldt både for realistiske og instrumentalistiske fysikere, men for den siste gruppen kanskje mer ubevisst enn for den første.

4. LYS – BØLGE ELLER PARTIKKEL?

Hensikten med dette kapitlet er ikke å gå inn i mange fysiske detaljer knyttet til sort stråling, fotoelektrisk effekt og Compton-stråling, men snarere å fokusere på et mer grunnleggende problem som kan være av interesse for svært mange av oss, uansett om vi studerer fysikk eller ikke. Det umiddelbare spørsmålet er: Hva er lys? Spørsmålet oppfattes rimeligvis som et fysisk spørsmål, men svaret har faktisk mer vidtrekkende konsekvenser for vår virkelighetsoppfatning enn mange først er klar over. La oss starte litt historisk for å sette det hele i et passende perspektiv.

Lys er spesielt. Vi kjenner til at lys har en sentral betydning i flere religioner. Lys knyttes ofte til en spesiell kraft. Vi vet at lys og varme fra sola er helt nødvendig for å opprettholde livet på jorda. Men lyset er spesielt også fordi det ikke er en gjenstand vi kan ta tak i på samme måte som en stein eller en trebit. Hvordan kan lyset strømme fra sola til jorda? Hvordan er lyset egentlig?

På 1600-tallet hadde man en god del erfaringer med lys. Optikerne laget linser og kikkerter og fysikerne kjente til at hvitt lys kan splittes til et fargespektrum. Det hersket to ulike syn på hva lys er. Nederlenderen Huygens hadde sett likheter mellom noen lysfenomener og fenomener han hadde observert ved hjelp av bølger, for eksempel vannbølger. Huygens mente at lyset er bølger. Newton hadde en annen oppfatning, han mente at lys er små partikler. Videre antok han at det er tre typer av slike partikler: røde, grønne og blå. Ved å blande disse i passe mengder, mente Newton, kan man lage alle de andre fargene (på samme måte som man bygger opp et fargebilde på en TV-skjerm). Newton hadde en stor innflytelse på grunn av alt det andre han hadde fått til, og partikkeloppfatningen av lyset ble den som «vant» innen den etablerte vitenskap.

På begynnelsen av 1800-tallet brakte Thomas Young igjen fram bølgeteorien for lys, og i 1807 lanserte han et eksperiment som har fått en særstilling innen fysikken - det går under navnet “Youngs dobbeltspalteeksperiment”. Sender vi lys mot en “dobbeltspalte” (to meget smale, tettliggende, parallelle spalter i en skjerm), vil vi ikke få to striper når vi samler opp lyset på en skjerm bakenfor dette igjen. I stedet finner vi en rekke striper med omtrent samme avstand mellom hverandre, men avstanden mellom stripene er mye større enn avstanden mellom de to opprinnelige spaltene. Vi kaller mønsteret på skjermen for et interferensmønster.

Thomas Young mente at dette eksperimentet viste at lys opptrer som bølger, og ikke som partikler. Han fikk massiv motstand i starten, men ytterligere eksperimenter utført av den franske fysikeren Augustin Fresnel og matematiske beregninger av Siméon Poisson, førte til at fysikerne motstrebende godtok at lys nok var bølger likevel. Newton måtte ha tatt feil på akkurat dette punktet. Når Maxwell i 1865 ved nydelige matematiske uttrykk kunne beskrive lys som elektromagnetiske bølger, var det ikke lenger noen tvil. Lys er bølger! (I avsnitt 6C vil vi drøfte denne type utsagn litt mer inngående.)

Dette var bakteppet da Planck, Einstein og Compton på begynnelsen av 1900-tallet måtte gå tilbake til å betrakte lys som partikler for å kunne forklare de effektene vi allerede har nevnt. Forvirringen ble nå større enn noensinne, og det skulle bli enda verre! Den franske fysikeren Louis de Broglie (uttales *dø broy*) merket seg at lys på én måte er partikler og på en annen måte bølger. Men hva da med de andre partiklene? Et elektron, for eksempel, betrakter vi helt klart som en liten kule med masse og ladning og det hele. Kunne det likevel tenkes at elektronet også kunne betraktes som en bølge? De Broglie brukte en relasjon fra Einsteins relativitetsteori og Plancks likning og beregnet ut fra disse en bølgelengde for elektronet. Bølgelengden avhang av hvor fort elektronet beveget seg.

De Broglies relasjon var rent matematisk og ble publisert i 1923, men allerede i 1925 ble det gjort eksperimenter som var i overensstemmelse med de Broglies forutsigelser. Med andre ord: Elektronet, som ble antatt å være en partikkel, syntes faktisk også å oppføre seg som en bølge. Man kunne bli schizofren av mindre!

Hva gjør man når man har gode grunner til å tro at lys, og dessuten elektroner og andre elementærpartikler, er bølger så vel som partikler? Fysikerne på begynnelsen av 1900-tallet valgte å si at da er de vel begge deler! Vi omtaler dette som “bølge-partikkel-dualismen”. Fysikerne observerte likevel at de aldri klarte å vise begge disse karakteristikene *samtidig*. Niels Bohr omtalte dette som “kom-

plementaritetsprinsippet”, altså at bølgeaspektet ble ansett som komplementært til partikkelaspektet, og bare én av disse fremtredelsesformene kunne komme til syne ved et gitt eksperiment. Partikkelaspektet kom fram i forsøk basert på fotoelektrisk effekt, mens bølgeaspektet viste seg i dobbeltspalteeksperimenter. Men det å løse problemet på denne måten, hadde i sin tur en høy pris som vi snart skal gå nærmere inn på. For å forstå dette må vi først se litt på hvordan kvantefysikken nå ble konstruert.

5. FORMELL BASIS FOR KVANTEFYSIKKEN

Vi har tidligere nevnt at Newton satte opp matematiske lover for å kunne forklare og forutsi hvordan ulike legemer beveger seg. Maxwells matematiske likninger viste hvordan elektromagnetiske felt og bølger bredte seg utover. Den «nye» fysikken måtte også få sitt formelverk.

Det ble faktisk utviklet to helt ulike formelverk; Heisenberg la i 1925 fram en formalisme basert på matriser (en slags matematiske tabeller, forenklet sagt), mens Schrödinger i 1926 utviklet en formalisme basert på det vi i matematikken kaller differensiallikninger, det vil si en formalisme lik den som Newton og Maxwell hadde brukt. Det er senere vist at de to beskrivelsene matematisk sett gir samme resultat, og begge formalismene er fortsatt i bruk. Den matematiske siden vil vi ikke gå stort nærmere inn på, men litt må vi nevne for å belyse vesentlige sider av kvantefysikken.

Schrödingerlikningen, som vi kaller den, er en form for bølgelikning. Når likningen løses – det vil si når vi finner en helt konkret beskrivelse av lys i et gitt tilfelle, og beskrivelsen stemmer med likningen, tegnes et bilde av bølger som forflytter seg i rommet slik vi ofte kan se bølger forflytter seg på en vannoverflate. Men hva så? Dersom vi lar likningen beskrive et elektron i bevegelse inne i en TV-skjerm, vil bølgen langsomt, men sikkert spre seg ut i rommet og stadig fylle et større volum. Når denne “bølgepakken” treffer innsiden på TV-fronten, vil en liten flekk med fluorescerende maling lyse rødt, grønt eller blått. Det som skjer, er på en måte en overgang fra en ganske utstrakt bølgepakke til en meget lokal (liten av utstrekning) respons på TV-skjermen. Hvordan er da elektronet underveis? Er elektronet rett og slett den utstrakte “bølgepakken”, eller er det en bitte liten partikkel som finnes innenfor bølgepakken?

Schrödinger mente først at elektronet faktisk var bølgen, men fikk problemer med denne oppfatningen, blant annet på grunn av at “bølgepakken” i hans likning måtte beskrives ved hjelp av det vi kaller “komplekse tall”. Det lot seg ikke gjøre å bruke vanlige tall, som vi ellers bruker for virkelige fysiske størrelser.

Det var også vanskelig å godta at et elektron kunne bre seg nesten grenseløst utover i rommet, siden den vanligste forestillingen om et elektron var (og er) at det er en liten partikkel.

Max Born mente allerede kort tid etter at Schrödinger lanserte sin likning at “bølgepakken” måtte oppfattes *statistisk*. Elektronet kan man kanskje tenke seg som en partikkel, men nøyaktig *hvor* i rommet denne partikkelen befinner seg til enhver tid, det kan vi ikke få kjennskap til før vi eventuelt gjør en *måling*. Det eneste vi kan ha kjennskap til underveis, er hvor elektronet *sannsynligvis* befinner seg. Schrödingerlikningen omhandler sannsynligheter, og ikke mer enn som så, mente Born.

Niels Bohr delte Borns syn, men gikk enda lenger. Han mente at “bølgefunksjonen” som vi kan regne på ved hjelp av for eksempel Schrödingerlikningen, inneholder *alt* som er *mulig å få kjennskap til* om elektronet under dets flukt. Videre, siden vi har eksperimenter der elektronet oppfører seg som en bølge, men også eksperimenter der elektronet oppfører seg som en partikkel, mente Bohr at det er umulig å tilegne elektronet noen som helst *realitet* før vi gjør en måling på det i et eksperiment. Før vi gjør dette, har elektronet *muligheten i seg* til å opptre som en bølge eller til å opptre som en partikkel, men det *er* ingen av delene før målingen. Det er først *da* at egenskapene til elektronet blir en reell fysisk virkelighet.

Når vi gjennomfører målingen, *blir* på sett og vis elektronet enten en bølge eller en partikkel. Det mister da sin *mulighet* til å bli det motsatte. La oss se for oss en bølgepakke som er spredt utover i rommet før måling. Når vi gjør en måling av hvor elektronet er, vil hele denne bølgepakken øyeblik-

kelig (ikke begrenset av lyshastigheten) samle seg i ett punkt, der elektronets posisjon bestemmes. Elektronet *blir* en partikkel (får en bestemt posisjon) der og da. Bohr og hans medarbeidere kalte dette for en ”kollaps av bølgefunksjonen”.

Schrödingerlikningen beskriver ingen kollaps av bølgefunksjonen. Kollapsen er en ekstra konstruksjon, og Schrödinger og Einstein likte ikke denne måten å tenke på. De ville heller ha en beskrivelse som var mer i tråd med Newtons mekanikk. Newtons likninger er deterministiske. Dersom vi for eksempel kjenner til hastigheten og posisjonen til en ball når vi kaster den, kan vi regne oss til hvordan den vil bevege seg i rommet helt til den treffer bakken. Schrödingerlikningen gir på samme måte en deterministisk beskrivelse av hvordan et elektron vil bevege seg (i alle fall dersom vi anser elektronet som identisk med bølgefunksjonen). Så snart vi trekker inn kollaps av bølgefunksjonen, og forestillingen om at bølgefunksjonen bare er en sannsynlighetsfordeling, mister vi langt på vei et deterministisk verdensbilde. Einstein mislikte dette så sterkt at han skrev i et brev til Born i 1926:

“Quantum mechanics is very impressive. But an inner voice tells me that it is not yet the real thing. The theory produces a good deal but hardly brings us closer to the secret of the Old One. I am at all events convinced that He does not play dice.”

Gud, mente Einstein, spiller ikke med terning i sin håndtering av naturen. Da Bohr hørte om uttalelsen, skal han angivelig ha svart: “But still, it cannot be for us to tell God, how he is to run the world”.

Schrödinger lanserte et tankeeksperiment som vi nå kaller “Schrödingers katt” for å vise hvor meningsløs han mente oppfatningen om kollaps av bølgefunksjonen var. Jeg vil gjengi dette tankeeksperimentet i en litt forenklet form. Tenk deg at vi har en katt i en eske sammen med en giftflaske og en anordning som kan knuse flasken dersom det sendes ut stråling fra en radioaktiv atomkjerne like ved. Hvorvidt det kommer stråling eller ikke i løpet av en bestemt tid, er rent statistisk bestemt. Vi tenker oss at katten vil dø når/dersom giften slippes ut av flasken. Ifølge Bohrs tolkning av kvantefysikken ville katten bare ha en mulighet for å være død eller levende, og den vil ikke være det ene eller det andre før noen faktisk gjorde en måling, det vi si åpnet lokket. Ikke nok med det, det ble i fullt alvor hevdet at før bølgefunksjonen faktisk kunne kollapse og bli til en av flere valgmuligheter, måtte et eller annet levende vesen først bli seg *bevisst* hvilket resultat eksperimentet hadde. Dersom du nå raskt blar tilbake til første siden i dette kapitlet, ser du hvordan en kan spinne videre på en slik oppfatning. Schrödinger mente at dette tankeeksperimentet demonstrerer at Bohrs tolkning av kvantefysikken ledet oss ut i meningsløse konklusjoner, for katten må jo være enten død eller levende uavhengig av om vi observerer den eller ikke!

Kollaps av bølgefunksjonen er nå satt inn som et postulat (som ikke behøver å begrunnes) i den formelle fremstillingen av kvantefysikken som von Neumann gjennomførte på 1930-tallet. Majoriteten blant fysikere godtar dette bildet, gjerne av pragmatiske grunner: “Når kvantefysikken tross alt gir forutsigelser som stemmer så utrolig godt med det vi observerer, da er det vel greit nok?” En god del fysikere er likevel ikke fornøyd med dette bildet. Et ekstremt utslag av misnøye finner vi i en alternativ teori som Hugh Everett og andre fremsatte i 1950- og i 1970-årene. De mener at det ikke finnes noe kollaps av bølgefunksjonen, men at alle mulighetene som ligger i bølgefunksjonen faktisk blir realisert, bare i hver sin verden. Hver gang det foretas en måling eller et kvantefysisk valg, splitter verden seg. Vi selv eksisterer i en mengde verdener samtidig, uten å merke det. Selv synes jeg “parallelle-verdener-hypotesen” er et grotesk utslag av hvor abstrakt noen kan tenke seg virkeligheten og likevel være fornøyd med sin tenkning. Hypotesen er på den andre siden en god indikasjon på hvor misfornøyd mange er med den rådende hypotesen om “kollaps-av-bølgefunksjonen”.

Jeg vil likevel minne om at kollaps av bølgefunksjonen er det bildet de aller fleste fysikere i dag arbeider med. Vi har i dette kapitlet brukt denne tankegangen i forbindelse med det “valget” et elektron eller et foton har mellom å opptre som bølge eller som partikkel. Dette er nok et litt kunstig eksempel. Prinsippet gjelder likevel, mener majoriteten av dagens fysikere, stort sett for alle typer målinger innen den mikroskopiske verdenen, det vil si når vi måler på atomære system og liknende.

6. FILOSOFISKE KONSEKVENSER

Nå har vi meget kort presentert deler av det formelle grunnlaget for kvantefysikken og nevnt grunnleggende problemer knyttet til hvordan de matematiske formuleringene skal tolkes fysisk. Vi vil nå ta opp de filosofiske konsekvensene litt mer systematisk.

6A. Farvel til determinismen?

Er kvantefysikken deterministisk eller ikke-deterministisk? Dette er et omdiskutert tema. Det er vanskelig å bli enige om dette, både fordi folk bruker begrepet «deterministisk» på ulikt vis og fordi det finnes flere mulige tolkninger av kvantefysikken. La oss gå litt i detalj.

Websters webleksikon sier (sept. 2004) at determinisme er den filosofiske oppfatningen at alle fysiske hendelser, også menneskelige tanker og handlinger, er kausalt bestemt ved en ubrutt rekke av tidligere hendelser. En prinsipiell konsekvens av denne oppfatningen er at en fri vilje er en illusjon, og at utfallet av alle fremtidige hendelser allerede er bestemt.

Fysikken som vitenskapelig disiplin tar ikke opp spørsmålet om fri vilje, så la oss holde det problemet utenfor. Spørsmålet innen fysikken blir snarere: Er naturlovene deterministiske?

Dersom vi inntar et realistisk utgangspunkt (se 2A), kan vi snakke om kausal årsak og virkning. I så fall har Websters definisjon av determinisme mening. Det er imidlertid verre for instrumentalistene. I boka *A Brief History of Time* refererer Stephen Hawking til Laplace, og definerer begrepet “naturvitenskapelig determinisme” mer i retning av det å kunne *forutsi* (predikere) ting som vil hende i fremtiden (innledning til 4. kapittel, referanse til boka er gitt i litteraturlisten). Denne definisjonen passer for instrumentalistene. Vi skal ikke fokusere videre på forskjellene mellom instrumentalisme og realisme i dette underavsnittet, men forsøke å gi en beskrivelse som dekker begge deler.

Tar vi utgangspunkt i Newtons lover, kan det se ut som om naturlovene er deterministiske. Vi kan beregne hvordan en ball eller en biljardkule vil bevege seg i fremtiden dersom vi har kunnskap om ballens eller kulas bevegelsestilstand i øyeblikket. Men dette kan lett være en illusjon basert på at slike tilfeller effektivt representerer det vi kaller et to-legeme-problem (for eksempel en ball i jordas gravitasjonsfelt), og denne type problemer kan løses temmelig eksakt. Når tre eller flere omtrent likeverdige system vekselvirker samtidig, blir situasjonen umulig å løse eksakt, selv med Newtons mekanikk. Iblant treffer vi på systemer med kaotisk oppførsel, det vil si at vi ikke kan regne oss til hvordan systemet vil utvikle seg mer enn en karakteristisk tid framover.

Værvarsling er et eksempel. Noen tror at dersom vi bare hadde hatt nøyaktige nok observasjoner av vind, lufttrykk osv. en masse steder, ville vi kunne forutsi hvordan været ville bli i flere måneder framover, kanskje år. Det synes ikke å være tilfelle, for værssystemene er kaotiske. Uansett hvor nøyaktig vi kunne gjøre observasjonene, ville beregningene ikke duge ut over en karakteristisk tid av i størrelsesorden en uke eller to.

La oss ta et eksempel til: Mange anser planetbevegelser som noe av det mest deterministiske som finnes. Vi tror at vi kan beregne planetenes posisjoner ved Kristi fødsel for å se hva som ble oppfattet som “Betlehemsstjerna”. Kanskje er det mulig å beregne dette isolert sett, men i de senere år har det vist seg at vi ikke en gang er i stand til å beregne banen til noen av månene rundt Saturn og Uranus lenger enn noen få år fremover. Også disse systemene er kaotiske.

Vi kan nå spørre: Kan ikke disse systemene likevel være deterministiske, til tross for at vi ikke kan beregne hvordan utfallet blir? Er problemet bare av ren praktisk art, at vi ikke klarer å samle tilstrekkelig mye data til at vi får full kontroll ved beregningene? Ligger begrensningen kanskje i at teoriene våre ikke er gode nok? Eller kan det være slik at problemet er av en mer fundamental art? Slike spørsmål er nesten umulige å svare entydig på, og det blir ofte en grunnleggende tro eller overbevisning som avgjør hva hver enkelt av oss mener. Likevel er det enkelte elementer av mer objektiv art som bør nevnes.

I Newtons mekanikk må vi for eksempel kjenne *både* posisjonen og hastigheten til en ball ved et gitt tidspunkt for å kunne beregne banen videre. En av prediksjonene vi får fra kvantefysikken, er at det er umulig å kjenne nøyaktig posisjon og nøyaktig hastighet til for eksempel et elektron *samtidig*. Denne umuligheten er beskrevet i en av de kjente “Heisenbergs uskarphetsrelasjoner”. På Heisenbergs tid trodde man at begrensingen var av eksperimentell karakter (se originalartikkel skrevet av Heisenberg i Bind 1). I dag mener imidlertid de fleste fysikere at denne relasjonen ikke er begrenset til praktiske problemer med å måle posisjon og hastighet samtidig, men at relasjonen forteller om en innebygget egenskap ved naturen. Og dersom naturen *er* slik at det er *innebygget* en gjensidig usikkerhet i posisjon og hastighet, blir det *prinsipielt* umulig å kunne forutsi hva som kommer til å skje med et kaotisk system på lang sikt. I så fall kan vi godt si at vi har en kausal sammenheng fra minutt til minutt, fra time til time, men at det er umulig å finne noen kausal sammenheng mellom tilstanden i øyeblikket og tilstanden om fem uker (for eksempel for værsystemer).

Kvantefysikken byr også på en annen utfordring i og med at den gir svar i form av sannsynligheter. Dersom vi regner oss fram til bølgefunksjonen til et elektron i for eksempel en halvleder, inneholder bølgefunksjonen ifølge Bohr alt vi kan vite om elektronet. Men bølgefunksjonen kan strekke seg for eksempel over hele transistoren vi regner på. Vi kan da ikke si *hvor* elektronet befinner seg til enhver tid, men bare angi en *sannsynlighet* for å finne elektronet på ulike steder. (Merk: Argumentasjonen i de siste par setningene er basert på at vi uvilkaarlig tenker at elektronet er en lokalisert partikkel, selv om dette på sikt kan vise seg å være et uheldig bilde.)

Et annet eksempel illustrerer denne type usikkerhet i en litt annen sammenheng. Et atom kan eksistere i det vi kaller flere ulike energitilstander. Et eksempel er at et elektron kan gå i ulike “baner” omkring kjernen i et hydrogenatom. Dersom elektronet skifter sted fra én bane til en annen, lavere bane, vil det bli sendt ut et lysglimt, et foton. Hovedpoenget i denne sammenheng er at vi aldri kan bestemme *når* fotonet blir sendt ut. Vi kan bare regne oss fram til *sannsynligheten per tid* for at et foton skal bli sendt ut. Den usikkerheten vi her snakker om, er ikke primært relatert til usikkerhet om *hvor* ting er i rommet, men til energi, og til ufullstendig kjennskap til nøyaktig *hvilken tilstand* atomet er i til enhver tid.

I de to siste tilfellene kan man igjen spørre seg om usikkerheten egentlig skyldes at vi ikke har tilstrekkelig kunnskap om alle delene som systemet består av. Man kan i så fall tenke seg at begrensingen er av praktisk og ikke prinsipiell art. Enkelte eksperimenter utført de siste vel 20 årene tolkes imidlertid som om det er umulig å tilordne bestemte egenskaper til delsystemene i et sammensatt system, og dette indikerer at begrensningen er prinsipiell snarere enn praktisk. Vi kommer tilbake til dette når vi omtaler EPR-paradokset og Aspect-eksperimentet nedenfor.

Vi har sett at spørsmålet om hvorvidt naturlovene er deterministiske ikke kan besvares entydig. Svaret avhenger av *tolkninger* av for eksempel kvantefysikken. Man kan da lure på om det i fremtiden vil bli mulig å beskrive naturen på en annen måte enn i dag, slik at vi kan redde determinismen. Dette blir på den andre siden en ren spekulasjon. Det kan likevel være nyttig å bli minnet om at når vi former våre forestillinger om naturen, er vi i høy grad låst til de begrepene og det språket vi til enhver tid har tilgjengelig for å forme våre tanker. Stephen Hawking skriver for eksempel i det siste kapitlet i sin bok (Hawking, midt i kapittel 12):

“These quantum theories are deterministic in the sense that they give laws for the evolution of the wave with time. Thus if one knows the wave at one time, one can calculate it at any other time. The unpredictable, random element comes in only when we try to interpret the wave in terms of the positions and velocities of particles. But maybe this is our mistake: maybe there are no positions and velocities, but only waves. It is just that we try to fit the waves to our preconceived ideas of positions and velocities. The resulting mismatch is the cause of the apparent unpredictability.”

Forestillinger som nå virker umulige, kan altså tenkes å være akseptable i en annen ramme. Vi må derfor være forsiktige med bombastiske påstander om hvordan naturen faktisk er.

6B. Striden mellom Bohr og Einstein, realisme versus instrumentalisme

Dersom det er vanskelig å vite hvordan naturen faktisk er, er det da noen vits i å spekulere på slikt i det hele tatt? En rekke filosofer i Wien rundt 1920 mente at alle utsagn om naturen som ikke kan verifiseres eksperimentelt, må forkastes som ikke-vitenskapelige. Vi bør i stedet konsentrere oss om størrelser som kan observeres og bygge teoriene våre på disse. En slik filosofisk innstilling kalles positivisme. Den såkalte Wien-kretsen av filosofer var meget sterk og hadde en klar innflytelse på utviklingen av kvantefysikken slik Bohr og Heisenberg og de fleste fysikere den dag i dag tolker den.

Positivismen innen kvantefysikken ble raskt knyttet opp mot instrumentalisme (se 2A), og ennå finner vi både positivistiske og instrumentalistiske oppfatninger side om side innen den mest vanlige tolkningen av kvantefysikken. Det er heller ikke enkelt å skille dem helt fra hverandre!

Einstein og til dels Schrödinger var av en annen oppfatning. De mente at for eksempel et elektron *har* en bestemt posisjon i rommet og en bestemt hastighet til enhver tid, selv om vi ikke måler dem. De inntok dermed et realistisk standpunkt. Videre mente de at kvantefysikken ikke kan være en fullstendig beskrivelse av mikrokosmos, nettopp fordi den ikke gir en fullgod beskrivelse av posisjon og hastighet samtidig. Dette ble et meget hett diskusjonsemne, spesielt mellom Bohr og Einstein.

I 1935 publiserte Einstein, Podolsky og Rosen en meget berømt artikkel i tidsskriftet *Physical Review*. Artikkelen tittel var: “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”. Den fire siders artikkelen presenterer blant annet det vi nå kaller “EPR-paradokset”, et tankeeksperiment som på den tiden ikke lot seg gjennomføre i praksis, men som likevel betydde mye tankemessig: La oss tenke oss at vi genererer to fotoner (lyskvanter) omtrent samtidig og på en slik måte at de har en samlet egenskap (de er nær *korrelerte*, som vi sier). Dersom disse fotonene beveger seg fra hverandre, kan vi gjøre forsøk på hver enkelt del. Einstein mente derfor at det må være mulig å bestemme egenskapene til ett foton helt uavhengig av det andre fotonet, så fremt målingene blir gjennomført på en slik måte at det ikke er mulig å sende noe signal fra det ene til det andre mellom målingene (husk at det ifølge Einsteins relativitetsteori ikke er mulig å sende signaler med større hastighet enn lysets). Følgelig mente Einstein at de egenskapene man da måler, må si noe om fotonets egenskaper like før målingen, og at man derved kan bestemme egenskapene til hver enkelt del (hvert foton) uavhengig av den andre.

Kvantefysikken gir en annen prediksjon. Den sier at når vi gjør en måling på det ene fotonet, vil foton nummer to øyeblikkelig få en egenskap som svarer til den målingen vi nettopp gjorde av foton en. På en måte kan dette oppfattes som et brudd på relativitetsteorien.

Legg merke til at Einsteins realistiske syn danner bakgrunnen for at han snakker om en egenskap hvert enkelt foton *har*, selv før det er gjort målinger av denne egenskapen (for eksempel polarisering av lys). Hans syn karakteriseres som en “lokal, skjult variabel hypotese”; *lokal* fordi egenskapen følger hvert enkelt foton hver for seg, og *skjult variabel* fordi egenskapen ennå ikke er målt på, og derfor er å betrakte som noe som teorien ikke beskriver (teorien beskriver jo bare sannsynligheter for hva vi kan måle gjennom en måling).

Einstein, Podolsky og Rosen uttrykte for øvrig sitt realistiske syn på følgende måte (ofte kalt Einstein-realisme):

“In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system.” [EPR artikkelen starter med disse ordene, se referanselisten bak.]

Historien sier at Bohr ble ganske ute av seg da EPR-artikkelen ble publisert, og at han jobbet intenst for å tilbakevise Einsteins kritikk. Da Bohrs svar kom, var det egentlig et svar som traff litt ved siden av Einsteins kritikk. Mange mente likevel at Bohr og kvantefysikken hadde rett og at Einsteins oppfatning var feil, men ingen kunne på den tiden avgjøre disputten direkte gjennom eksperimenter.

I 1964, om lag 30 år etter EPR-artikkelen, tok John Bell tak i dette tankeeksperimentet igjen. Han utformet en tilsynelatende generell modell basert på skjult-variabel-hypotesen og fant ved hjelp av

enkel sannsynlighetsregning en relasjon vi nå kaller Bells ulikhet. Denne relasjonen sier noe om hva slags *sammenheng* vi vil vente å finne mellom målinger av en bestemt egenskap hos fotonene i et EPR-foton-par dersom vi måler den gitte egenskapen hos *hvert foton for seg*. Dersom målinger viser en sammenheng slik som Bells ulikhet predikerer, kan man si at da *er* det mulig å finne en lokal, skjult variabel-forklaring på det som skjer. I så fall ville Einstein bli fornøyd. Men dersom sammenhengen mellom målingene for de to del-fotonene *ikke* er slik Bells ulikhet forutsier, mener Bell og de fleste med ham at da har man bevist at det *ikke er mulig* å finne *noen* lokal, skjult variabel-forklaring på det vi observerer. I så fall ville Bohr bli fornøyd.

Merk at Bells ulikhet av de fleste antas å være så generell at man kan trekke en absolutt og generell konklusjonen i tilfelle Bells ulikhet blir brutt. *Ingen tenkelig* lokal, skjult variabel-teori vil duge, ikke noensinne. Dette er en ganske markant påstand!

På 1970- og 80-tallet ble det gjennomført en rekke eksperimenter hvor man kunne teste hvem som hadde rett, enten Bohr eller Einstein, og resultatene synes entydig å gå i Bohrs favør. De kan ikke forklares ved hjelp av en lokal, skjult variabel-tankegang slik EPR-artikkelen la opp til. Noen av de mest kjente forsøkene ble gjennomført av franskmannen Alain Aspect, og eksperimentene er ganske slående og svært utfordrende for vår oppfatning av naturen. (Det henvises til litteraturlisten bak for de som vil gå dypere inn i disse fenomenene.)

Om man nå ikke kan støtte seg til teorien om bakenforliggende variable, ser det ut til at vi står overfor fenomener som bryter med årsaksprinsippet. Det vi normalt ville peke ut som årsaken, har faktisk ingen skjult forbindelse med virkningen. Det ble foreslått å tolke eksperimentene som tilsier dette til hen at de to fotonene som går hver sin vei, på en måte *ikke har selvstendig eksistens*. De eksisterer bare som en enhet. Vi kaller slike fotoner for *sammenfiltrede fotoner* (*entangled photons* på engelsk). Når vi gjør en måling på det ene delsystemet (som kan identifiseres fordi det finnes på et helt annet *sted* enn det andre delsystemet), synes målingen øyeblikkelig å føre til at det andre delsystemet får en egenskap bestemt ut fra hvilken måling som gjøres på det første delsystemet. Dersom ting skjer “samtidig” i einsteinsk forstand, da kan vel ikke den ene hendelsen være årsak til den andre? Dersom vi imidlertid holder fast ved at sammenfiltrede fotoner opptre som en enhet, slipper vi å snakke om hvert foton for seg, og på denne måten kan vi kanskje redde årsaksprinsippet.

6C. Min personlige oppfatning

Personlig er jeg ikke sikker på om den tolkningen vi i dag har av sammenfiltrede fotoner, vil overleve i det lange løp. Det er dristig å si noe slikt, for ingen har hittil klart å finne noen direkte feil i den rekken av resonnementer som ender opp med konklusjonen om at det er umulig å lage en lokal, skjult-variabel-teori som kan forklare eksperimentene vi har omtalt. Det er imidlertid interessant å merke seg at i resonnementtrekken inngår, så vidt jeg vet, bestandig Bells ulikhet eller tilsvarende tankegang. Da tenker jeg som så: En kjede er ikke sterkere enn sitt svakeste ledd. Dersom det skulle vise seg at det er en logisk svikt i Bells resonnementer, kan det tenkes at vi om noen år vil velge å beskrive eksperimenter med sammenfiltrede fotoner på en helt annen måte enn vi gjør i dag. Dersom det viser seg at det likevel er mulig å bruke en lokal, skjult-variabel-beskrivelse, vil vi da kanskje kunne si at fotonene *har* en bestemt polarisasjonsretning selv *før* vi gjør målinger på dem. I så fall ville vi være tilbake ved en beskrivelse av naturen som er mer i tråd med den vi er vant med fra våre observasjoner i dagligdagse sammenhenger. Kvantefysikken ville da ikke gi oss så spektakulære forestillinger om naturen som den nå gjør. Einstein ville i så fall bli glad, dersom vi skal si det på den måten.

Er det noe som tyder på at Bells resonnement kan ha svakheter? Selv mener jeg det, men jeg kjenner ingen andre som betviler Bells analyse. Likevel har jeg tatt med denne digresjonen for å poengtere at de forestillingene vi har om egenskaper i naturen, i høy grad hviler på bilder, tolkninger eller deler av teorier som er skjøre og på ingen måte så “sikre” som vi ofte innbiller oss. Jeg synes det er bemerkelsesverdig at vi har et matematisk formelapparat som kan benyttes til å forutsi sannsynligheten for ulike utfall av et eksperiment med en høy grad av nøyaktighet, men at vi samtidig har store problemer med å si noe sikkert om hva dette innebærer *ut over* selve måleresultatet. Det er kanskje ikke så

rant at mange fysikere er instrumentalister? Eller er de det?

Blant fysikere i dag finner vi både instrumentalister og realister, og kanskje de aller fleste slutter seg til en kombinasjon av disse oppfatningene. Teoretisk sett mener kanskje mange å være instrumenta- lister, men i deres daglige praktiske arbeid med fysikken bruker de likevel ofte forestillinger som kan karakteriseres som realistiske. Den sterkeste kritikken som kan rettes mot positivismen/ instrumen- talismen, er for øvrig at dersom man etterlevde idealet om å ikke ta utgangspunkt i noe annet enn det som kan observeres direkte, ville det føre til et vakuum i forestillingsverdenen vår. Dersom vi bare skal snakke om hva som *helt konkret* kan observeres i et eksperiment, blir omtalen temmelig me- ningsløs.

Dette er for så vidt et velkjent forhold, nemlig at man skiller mellom observasjonsdata og teoretiske termer som går ut over det observerte. I kvantefysikken er det bølgefunksjonen og egenskaper som spinn, polarisering osv. som er de teoretiske termene, og disse inngår i teorien. Disse termene er svært nyttige og har en forklaringsstyrke ut over det å forklare det observerte. Men i kvantefysikken bærer vi *i tillegg* med oss ofte ganske ubevisste bilder som *ikke* er en del av teorien, for eksempel at et foton er en partikkel. Disse bildene kan i høy grad prege vår tolkning av fenomenene, men de lever et usikkert liv utenfor de etablerte faste teoriene.

Utfordringen for oss fysikere består etter min mening i å være oss bevisste hvilke bilder vi bruker og være åpne for at disse bildene kan være ganske uheldige, i den forstand at ett bilde kanskje ikke er så gunstig for videre resonnementer som et annet bilde kunne ha vært. For eksempel, dersom vi sitter fast i bildet av et elektron som en partikkel, kan det muligvis hindre oss i å se større sammenhenger i fysikken enn vi gjør i dag? Kan forestillingen om at elektronet er en punktformig partikkel (ingen utstrekning i rommet) allerede ha ledet oss på blindspor, og føre til at strengteorien ikke vil over- leve på lang sikt? Kanskje det ville ha vært mer fruktbart å starte med en helt annen forestilling? På sett og vis er det riktignok det som ble gjort i strengteorien (man forestiller seg partiklene som små strenger som har utstrekning), men denne teorien er likevel langt på vei en videreføring av tanken om en punktpartikkel, den redder stumpene der bildet om en punktpartikkel helt feiler. Kanskje man heller skulle forsøke et mer dramatisk forskjellig bilde, og kanskje et slikt bilde ville kunne føre til en enklere forklaring av de fenomenene vi observerer? Jeg tror det kan være nyttig å dvele ved slike tanker innimellom for å gi rom for nye tanker og forestillinger. Samtidig kan en slik ettertanke minne oss om det stadig tilbakevendende erkjennelsesproblem: Kløften mellom naturens egen lovmessighet og våre forestillinger.

6D. Sammenfiltrede fotoner i teknikk og i religion

Sammenfiltrede fotoner (entangled photons) har vært et hett tema i flere leire ut over den rene fy- sikk. En grunn til dette er at man tror “entanglement” kan utnyttes både innen moderne kryptografi og innen såkalte kvantedatamaskiner, datamaskiner som man håper kan bli mye mer effektive enn dagens datamaskiner, i alle fall for enkelte typer oppgaver. Det er altså ikke bare de filosofiske aspek- tene og den rene fysikk som er fremtredende i denne forskningen, men også muligheten for kommer- siell profitt.

Siden sammenfiltrede fotoner er et merkelig fenomen, blir det som andre merkelige deler av fysikken også benyttet i mange ulike livsanskuelser, for eksempel innen New Age-bevegelsen. I sammenfil- trede fotoner har man alt man trenger for å snakke om at noe er i ett med noe annet (slik guddomme- lige opplevelser iblant kan arte seg). Man kan også trekke inn sammenfiltrede fotoner for å “forklare” (eller i det minste rimeliggjøre) tankeoverføringer osv. Selv vil jeg ikke utelukke verken guddommer eller tankeoverføringer, men forsøkene på å bruke sammenfiltrede fotoner for å forklare disse feno- menene, har jeg likevel svært lite til overs for. Det er kanskje ikke så lett for utenforstående å forstå min “vrangvilje” på dette området, men det har sammenheng med at jeg vet at for det første må det svært spesielle betingelser til for å skape sammenfiltrede fotoner (i de fleste lyskilder er fotonene ikke sammenfiltrede) og for det annet må man holde påvirkninger fra utenverdenen borte for at ikke hele effekten skal forsvinne. Når disse eksperimentelle detaljene tas med, får jeg assosiasjoner til histo-

rien om kona som kokte suppe på en spiker, når jeg leser forklaringer av påstått guddommelighet og tankeoverføringer ved hjelp av sammenfiltrede fotoner.

Likevel er det noe fascinerende med sammenfiltrede fotoner. Dersom tolkningene vi nå har, overlever tidens tann, kan det nemlig bety at vi igjen, for alvor, må gi slipp på noen av våre dagligdagse erfaringer knyttet til hvordan ting opptrer i tid og rom. Kan det hende at naturen faktisk er enda mer merkelig enn vi hittil har oppfattet den som? Ingen vet!

7. SLUTT-TANKER

Fysikken har vært en meget “vellykket” vitenskap på den måten at den muliggjør svært presise prediksjoner om hvordan et fysisk system vil oppføre seg under gitte betingelser, i alle fall så lenge vi har å gjøre med systemer som ikke er kaotiske. Noen mener at vi stort sett har avslørt alle naturens lover for ikke-levende systemer, og at fysikken på en måte er ferdig. Kvantefysikken er etter deres mening et godt eksempel på at vi praktisk talt er ved veis ende.

En slik selvtilfredshet har fysikere hatt mange ganger opp gjennom historien. Og likevel har vi sett gang på gang at de har tatt feil. Vi har for eksempel opp gjennom historien betraktet lys som bølger, som partikler, som bølger igjen, til slutt som en merkelig både-og sak. Jeg har ingen tro på at dette bildet vil holde seg så mye lenger. På begynnelsen av 1800-tallet kom eksperimentene som ble oppsummert i Maxwells likninger. På begynnelsen av 1900-tallet kom eksperimentene som dannet utgangspunktet for kvantefysikken, og dens lover ble utformet av Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Dirac, von Neumann og mange flere. Nå er vi på begynnelsen av 2000-tallet, og mitt stalltips er at vi ikke går ut av dette århundret før “bølge-partikkel-dualismen” og “kollaps av bølgefunksjonen” begge vil være erstattet av modeller som vi kan være mer fornøyde med.

Det som da likevel ikke er klart, er hvorvidt de nye beskrivelsene vil tegne et enda merkeligere, for ikke å si mer irrealistisk bilde av hvordan naturen utfolder seg, enn det bildet kvantefysikken gir oss i dag, eller om vi kan komme tilbake henimot mer realisme og kanskje en annerledes oppfatning av determinisme.

Nye teorier vokser ikke fram uten motstand. Dersom du for eksempel leser litt mer detaljerte beskrivelser om hvordan kvantefysikken vokste fram, vil du se at det iblant gikk temmelig hardt for seg. Flere av de berømte fysikerne vi har nevnt, ble drevet til tårer av motstanderne. Og minst ett av postulatene i kvantefysikken har dessuten karakter av en religiøs trosartikkel av typen “Vi har den hele og fulle sannhet. Amen!”. Det er vanskelig å forholde seg til slike påstander som vitenskapelige.

Positivistenes oppfatning om at det er mindreverdige eller uvitenskapelige å tenke i metafysiske termer, er også ganske slem. Denne holdningen har jeg faktisk selv fått merke gjennom diskusjoner med eldre norske fysikere som selv kjente Niels Bohr. Vitenskapelig utvikling er ikke bare logiske argumenter og eksperimentelle oppdagelser, men også en god porsjon sosiologi!

I sin spennende og velskrevne bok: *Beyond Measure. Modern physics, philosophy and the meaning of quantum theory* (2004) skriver Jim Baggott følgende i sluttordet:

“The new generation of physicists and cosmologists struggle with quantum concepts no less than their predecessors and regularly find themselves going down innumerable blind alleys, or even ‘down the drain’. But, despite everything, they appear more determined than ever to understand just how it can be like that. The schism in physics remains, as evidenced by the realism versus the anti-realism But the debate is now much more open, and there is greater tolerance of theoretical speculations that are more metaphysical in nature. The proponents for a more metaphysical outlook are not [any longer] (paraphrasing Ayer) branded as criminals, nor even as patients, but as advocates of legitimate theoretical constructions that deserve to be taken seriously and put to the test wherever and whenever this is possible.”
(Baggott, s. 287)

Baggot er også overbevist om at det vil komme nye teorier som er bedre enn de vi har i dag, men han tror at filosofiske spørsmål, for eksempel de knyttet til realisme og instrumentalisme, vil bestå.

Selv synes jeg det er ganske rart at fysikken som vitenskap faktisk har vært og fortsatt er så vellykket når det gjelder å beskrive og forutsi fenomener i naturen, til tross for at det lurte grunnleggende uavklarte spørsmål bak praktisk talt alle de gjeldende teoriene. Jeg håper du har latt deg fascinere litt av disse spørsmålene. Ønsker du å gå dypere i materien, anbefaler jeg at du tar tak i en eller flere av de populærvitenskapelige bøkene som er nevnt nedenfor.

Lykke til!

8. LITTERATURLISTE

Populærvitenskapelig litteratur som dekker store deler av stoffet i dette kapittelet, men som går litt mer i dybden enn det vi kunne få plass til:

Jim Baggott: *Beyond Measure. Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory.* Oxford University Press, 2004.

Paul Davies: *About Time. Einstein's Unfinished Revolution.* Penguin, 1995.

Thomas Walther, Herbert Walther: *Was ist Licht? Von der klassischen Optik zur Quantenoptik.* Verlag C.H.Beck, 1999.

Richard Feynman: *The Character of Physical Law.* Penguin Books, 1965/1992.

John Gribbin: *Schrödinger's Kitten and the Search for Reality.* Phoenix, 1995.

Shimon Malin: *Nature Loves to Hide. Quantum Physics and the Nature of Reality, a Western Perspective.* Oxford University Press, 2001.

Ian Stewart: *Does God play Dice? The New Mathematics of Chaos.* 2.ed., Penguin, 1997.

Brian Greene: *The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory.* Vintage Books, 1999.

Stephen Hawking: *A Brief History of Time.* Bantam Press, 1998.

A. Einstein, B. Podolsky og N. Rosen: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" *Physical Review* 47 1935, s. 777-780.