

6 Drømmen om enhed

Omkring år 1900 bestod fysikken af tre teoridannelser: den klassiske mekanik, sådan som den havde udviklet sig siden Isaac Newton (1642-1727), den elektromagnetiske teori, som James Clerk Maxwell (1831-79) havde formuleret, og termodynamikken, der blandt andre var formuleret af Rudolph Clausius (1822-88) og Lord Kelvin (1824-1907). Det var lykkedes Heinrich Hertz (1857-94) i 1888 kunstigt at frembringe elektromagnetiske svingninger, hvilket var begyndelsen til radio og tv. Wilhelm Röntgen (1845-1923) havde i 1896 opdaget de efter ham opkaldte stråler – der på engelsk kaldes “X-rays”, idet de var mystiske og svære at forstå – og Henri Becquerel (1852-1908) havde i 1896 opdaget radioaktiv stråling, som senere skulle vise sig at være yderst kompleks og bestå af tre forskellige typer. I 1897 havde fysikeren Joseph J. Thomson (1856-1940) opdaget og bestemt væsentlige egenskaber ved elektronen og dermed påpeget, at hvis der fandtes atomer – hvilket mange fysikere stadig tvivlede på – så var selv de ikke stoffets mindste dele. Verden var væsentligt mere kompleks end nogensinde før antaget.

For at kunne forklare eksistensen af elektromagnetiske svingninger, lys,

◀ For at fejre Hubble Space Telescopes 17-års fødselsdag offentliggjorde NASA og ESA dette billede af Carina-tågen i 2007. Det er en gigantisk gløden sky af gas, støv, energi og stjerner 7500 lysår borte. De enorme energiudladninger i Carina-tågen startede for tre millioner år siden, da en række nyfødte stjerner smeltede sammen og antændte en sky af kolde brintmolekyler. Nederst i midten (markeret med stiplede linjer) kan man se en lysende sky af energi og partikler efter en supernova-lignende eruption fra dobbeltstjernen Eta Carinae i 1843. NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley) og The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

radiobølger og røntgenstråler og reddegøre for deres egenskaber mente man, at universet ud over partikler og kræfterne imellem dem også måtte bestå af et stort medium, i hvilket elektromagnetiske svingninger kunne udbrede sig. Med andre ord måtte det tomme rum bestå af noget, der kunne svinge.

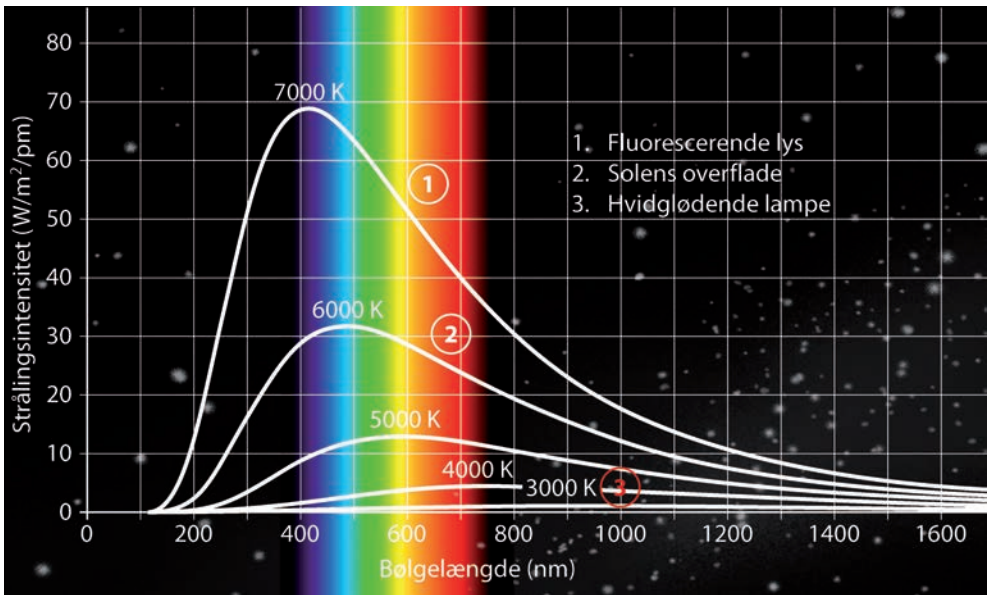
Helt almindelige erfaringer viser, at der må være en sammenhæng mel-

lem fysiske egenskaber såsom en genstands temperatur og elektromagnetisk stråling. Således kan man f.eks. sidde bag et vindue i frostvejr og blive varmet af Solens lys. Og hvis man opvarmer et legeme tilstrækkeligt, så udsender det lys – man taler om, at jernet er blevet rød- eller endda hvidglødende. Lyset i en elektrisk pære kommer netop fra en lille tråd, der først bliver meget varm og dernæst stærkt lysende, når der går strøm igennem den.

Hvis man opvarmer et legeme, f.eks. en stor klods af jern, og inde i denne har et lille hulrum, hvor der ikke kommer forstyrrende lys til, kan man undersøge jernets varmestråling. Mærkeligt nok spiller det ikke nogen rolle, om der er tale om jern, sten eller glas, alene strålingens bølgelængde og de involverede temperaturer spiller en rolle for forståelsen af varmestrålingen. Til gengæld er dens opførsel yderst kompleks, og det var vanskeligt at forstå fordelingen af strålingens frekvenser og sammenhængen med temperaturen. Den tyske fysiker Max Planck (1858-1947) studerede stråling fra såkaldte sorte legemer, dvs. legemer, der ikke udsendte lys, og i året 1900 publicerede han en fortolkning af sine resultater, der bl.a. involverede, at energi kunne optræde i bestemte mængder, i såkaldte kvanter. Det var en radikal påstand, der klart stred imod den forståelse, man ellers havde af energi, nemlig at et givet materiale selvfølgelig kunne have en vilkårlig mængde energi. Energi var ifølge den klassiske fysik noget kontinuert. Nu hævdede Planck det modsatte.

Flere fysikere havde været utilfredse med tingenes tilstand i den klassiske fysik. F.eks. var Lord Kelvin og flere andre stærkt bekymrede over, at visse målinger viste, at stoffers varmfylde var afhængig af deres temperatur, hvilket absolut var utænkeligt ud fra en klassisk fysisk forståelse, hvor man antog, at stof bestod af ens atomer, der var stoffets mindste dele. Planck viste nu, at hvis man antog, at elektromagnetisk energi kunne forekomme i kvanter, så kunne man faktisk forklare fordelingen af frekvenser i strålingen og dens afhængighed af temperaturen. Planck mente, at den eneste måde, man kunne forklare de observerede data på, hvis man i øvrigt skulle bevare helt fundamentale fysiske indsigter, var at acceptere, at energi kunne findes i kvanter.

Mange har hævdet, at publiceringen af Plancks resultater var den egentlige fødsel for den moderne fysik og det moderne verdensbillede. Planck selv var bestemt ikke begejstret for sit resultat, der stred imod alt, hvad han i øvrigt troede på – men han kunne ikke fornægte eller fortolke de

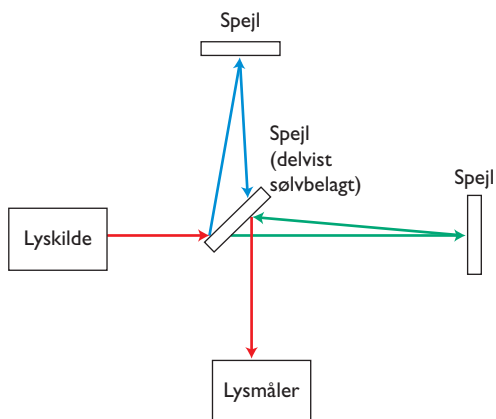


data anderledes, han havde opnået ved sine eksperimenter. Dermed startede en lang periode i videnskaben, hvor eksperimentelle og empiriske opdagelser hele tiden forekom at påtvinge nye og overraskende teorier. Disse teorier kunne man formulere matematisk, og man kunne vise, at de passede med observationer. Derfor kunne man også foretage meget vellykkede forudsigelser. Det, man ikke kunne, var at give en fortolkning af, hvad det egentlig var for en fysisk virkelighed, der gemte sig bag formlerne – hvordan verden egentlig var. Det kom dertil, hvor man måtte begynde at overveje, hvad det grundlæggende vil sige at have en teori om virkeligheden. I det 20. århundrede rejste udviklinger i fysik, matematik og logik konstant dybe filosofiske spørgsmål, spørgsmål som filosofferne havde svært ved at forholde sig til, og som også ofte gjorde naturvidenskabsmænd til en slags alternative filosoffer med brændende ønsker om at bidrage til en samlet enhedsforståelse af naturens mangeartede fænomener.

Max Plancks opdagelse af varmestrålingen har haft afgørende betydning for fysikken. I denne graf af det elektromagnetiske spektrum ses sammenhængen mellem lysets bølgelængde (x-aksen) og varmestrålingen (y-aksen) af et legeme. Man kan se, at forskellige legemer stråler forskelligt, alt efter deres temperatur, og kun en lille del af strålingen kan ses af det menneskelige øje, mens resten er “usynligt lys”. Til venstre for det synlige bånd findes det ultraviolette lys og til højre det infrarøde lys, og de kan kun observeres ved hjælp af hjælpemidler som f.eks. geigertællere for gammastråling, fotografisk film for uv-lys og røntgenstråling, termokromatiske farver for infrarødt lys og antenner for radiobølger.

Året 1905

Selvom den elektromagnetiske bølgeteori hurtigt fik teknologisk anvendelse, var der fundamentale problemer med sammenhængen mellem en mekanisk forståelse af disse fænomener og forståelsen af dem, som den forelå i James Clerk Maxwells teori (s. 181-183). Forsøg på at påvise eksistensen af en æter, der kunne bære bølgerne, var ikke lykkedes. Flere gange i 1880'erne forsøgte man at måle, om lysets hastighed på langs og tværs af Jordens bevægelse igennem rummet var forskellig – hvad den burde være, hvis Jorden bevægede sig igennem en æter, der skulle være basis for eksistensen af lysbølger. Men målingerne viste ikke nogen forskel. Lysets hastighed var den samme, hvordan man end målte den.



Den amerikanske fysiker Albert Michelson (1852-1931) byggede et såkaldt interferometer til at måle æteren, som man i det meste af 1800-tallet mente eksisterede som det medium, hvori lysbølger udbredte sig. Interferometeret sender en lysstråle mod et spejl, som er delvist belagt med et sølvlag, således at lysstrålen deles i to. De to lysstråler bevæger sig væk fra hinanden i to arme, bliver så reflekteret af spejle og samles igen. En lysmåler måler den opståede interferens i den kombinerede lysstråle, der er et resultat af de varierende afstande på de to arme. Enhver lille ændring i den tid, en lysstråle bruger på vejen, vil derfor kunne ses som et skift i positionen på interferensstriberne. Hvis æteren var ens i forhold til hele solsystemet, ville jordens egen bevægelse rundt om Solen skabe en brydning i forhold til æteren – og dermed mønstret, nærmere beregnet til ca. $\frac{1}{3}$ af en enkel interferensstribe. I teorien altså. Resultatet var dog, at man ikke kunne se nogen som helst forskel, heller ikke efter Michelson byggede bedre instrumenter sammen med fysikeren Edward Morley (1838-1923). Michelson-Morley-eksperimentet anses derfor som det første bevis på, at lysets hastighed altid er den samme, og at der ikke eksisterer nogen æter.

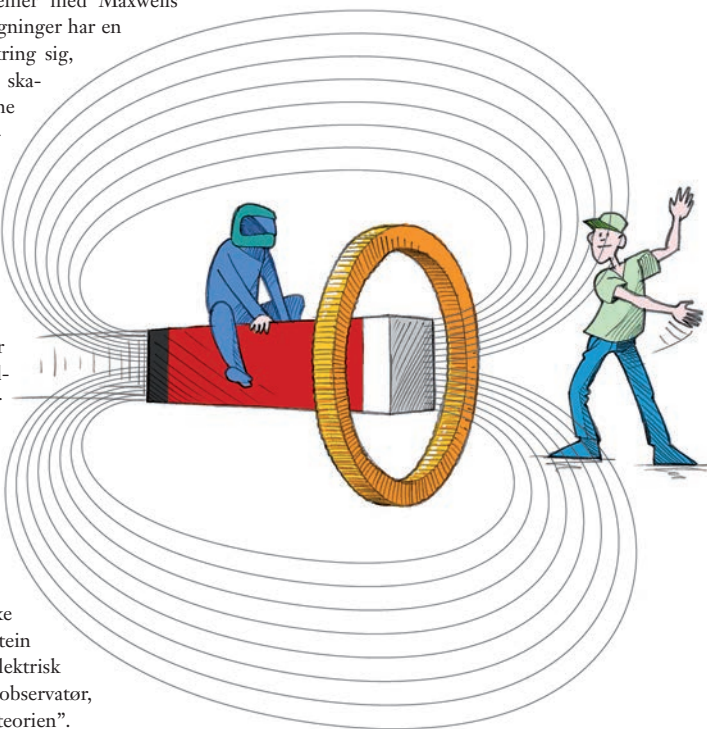
Normalt antager vi, at vi iagttager et fænomen fra et bestemt sted på et bestemt tidspunkt, og at det, vi iagttager, sker samtidigt med, at vi ser det ske. Vi antager også, at beskrivelsen af et fænomen kan ske fra et andet sted eller fra et andet synspunkt, uden at det influerer på, hvad der rent faktisk foregår. De fundamentale lovmæssigheder må være de samme. Et væsentligt fænomen er, at der er symmetri mellem perspektiverne. Om vi beskriver en bil som kørende hen over vejen, eller vejen som forsvindende væk under bilen, er ud fra en hastighedsbetragtning det samme. En bil kører hen over vejen med 100 km/t og overhales af en anden med 110 km/t, alt sammen set i forhold til vejen – men i forhold til bilen kører den overhalende 10 km/t og vejen 100 km/t. Vi kan beskrive disse forhold på

mange måder, men antager, at de faktiske forhold er, som de er, uafhængigt af vores beskrivelse.

Den tyske fysiker Albert Einstein (1879-1955) forbavsede i 1905 verden med en række banebrydende artikler. I en af disse starter Einstein med at konstatere, at det er et afgørende problem i forståelsen af elektromagnetiske fænomener, sådan som Maxwell havde beskrevet dem, at det foreliggende fysiske fænomen var afhængigt af hvilken beskrivelse, man gav. Hvis man bevægede en induktionsspole i forhold til en magnet, opstod der strøm set ud fra spolens beskrivelsesramme, men hvis man derimod beskrev selv samme situation fra magnetens beskrivelsesramme, opstod der ikke strøm. Det kunne ikke være rigtigt. Der burde være strøm eller ikke strøm, uafhængigt af om man beskrev forholdet ud fra magnetfeltets eller spolens synspunkt. Den fysiske virkelighed burde være som den var, lige meget hvilket udgangspunkt man beskrev den fra – alle beskrivelsessystemer burde give de samme resultater.

Einstein overvejede også betingelserne for, at vi overhovedet kunne give beskrivelser af begivenheder og dermed lokalisere dem i tid og rum. Sådanne

Einstein havde produktive problemer med Maxwells elektrodynamik. Ifølge Maxwells ligninger har en magnet i hvile et magnetfelt omkring sig, men hvis magneten er i bevægelse, skabes tilmed et elektrisk felt. Nu kunne man jo tro, at man blot kunne måle på magneten med en lille rund induktionsspole og se, om der er strøm, og dermed om magneten bevæger sig i æteren eller ej. Men det virker ikke, fordi en anden del af Maxwells teori siger, at induktionsspolen i bevægelse sammen med magneten selv skaber en elektrisk strøm, som præcis modsvare magnetens. Man kan derfor ikke finde ud af, om der er strøm i spolen, fordi der i den situation ikke findes nogen måde at finde ud af, om magneten er i bevægelse eller i hvile. En person, som står og "hviler i æteren", ville kunne måle en strøm, men en person, som ridder på magneten, ville ikke kunne måle nogen strøm. For Einstein var ideen om, at eksistensen af en elektrisk strøm var relativ i forhold til en observatør, "årsagen til at postulere relativitetsteorien".

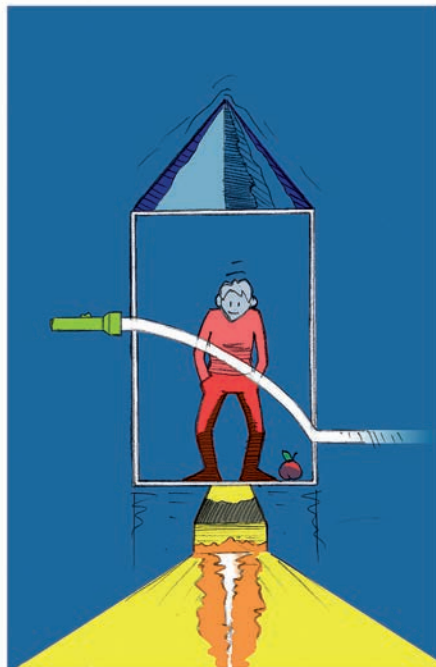




beskrivelser forudsatte – og var faktisk selv begivenheder i – tid og rum. Når man f.eks. hævdede, at en kugle faldt ned fra et bord kl. 23:05:15, så var det faktisk en påstand om, at to begivenheder var samtidige, nemlig kuglens fald og urets visen 23:05:15. Men sådan en påstand forudsatte jo, at både signalet fra uret til vores øje, signalet fra kuglen til øjet og øjets signal til bevidstheden var samtidigt foregående fysiske begivenheder. De to første var imidlertid signaler, der sendtes som lys, og som sådan underlagt lovmæssighederne for lysets bevægelse. Hvis kuglens fald skete langt væk, og uret var tæt på, ville det tage længere tid for lyset af komme fra kuglen til øjet end fra uret til øjet. Kuglens fald ville således blive registreret som foregående senere, end det faktisk foregik. Kunne man overhovedet finde ud af, hvornår det faktisk foregik? Det ville forudsætte, at der fandtes en anden måde at fastsætte tidspunktet for faldet på, og en sådan ville løbe ind i akkurat de samme problemer. Man kunne evt. kompensere for afstandsforskellen eller kræve, at afstanden til kugle og ur skulle være den samme. Men hvordan fastsætter man afstand? Det gør man ved måling, der også involverer opfattelse af signaler, der er fysiske begivenheder og dermed underkastet fysikkens love.

Siden Ole Rømers (1644-1710) tid havde man vidst, at lysets hastighed var endelig, hvorfor erkendelsen af en begivenhed aldrig kunne ske nøjagtig

Einsteins invariansprincip siger, at der ikke findes noget eksperiment, som en person kan udføre i et lille aflukket rum, hvor man ville kunne kende forskel mellem et tyngdefelt og en ækvivalent uniform acceleration. Konsekvensen af dette er, at hvis en elevator er i frit fald i et tyngdefelt, ville en person i denne elevator føle den samme vægtløshed, som hvis elevatoren var i det lufttomme rum langt væk fra stjerner og planeter (modstående side). Hvis der står en person udenfor og sender en lysstråle igennem elevatoren, vil lysstrålen afbøjes modsat den retning, som accelerationen er (til højre). Men da invariansprincippet siger, at der ikke er forskel på en accelererende elevator i det frie rum og en elevator i frit fald i et tyngdefelt, må lysstrålen også afbøjes i et tyngdefelt.



samtidig med begivenheden selv. Einstein gik også ud fra, at lysets hastighed var den samme, uanset hvorfra den blev beskrevet eller målt. Det havde han visse grunde til rent empirisk, men også mere teoretisk. For hvordan skulle man egentlig konstatere, at lyset bevægede sig med forskellig hastighed? Man måtte f.eks. tænke sig, at man i et rumskib bevægede sig med halvdelen af lysets hastighed, og derfra udsendte et lyssignal. Man skulle så regne med, at det bevægede sig med $1\frac{1}{2}$ gang lysets hastighed i forhold til det referencesystem, der gjorde det muligt at sige, at rumskibet bevægede sig med lysets hastighed. Men igen: hvordan konstatere det, når al måling ville forudsætte brug af lyssignaler?

Einstein gik ud fra, at lyshastigheden altid var den samme, ligegyldigt hvordan man målte den, og at alle fysiske love var strengt objektive i den forstand, at de var de samme i alle referencesystemer. Strengt taget antog han i 1905 alene, at dette var korrekt for referencesystemer, der bevægede sig ikke-accelereret i forhold til hinanden. Senere udvidede han sine betragtninger til at gælde forholdet mellem alle referencesystemer.

Princippet om, at naturlovene måtte være invariante over for, hvilket beskrivelsessystem man anvendte, kaldte Einstein for relativitetsprincippet. Relativitetsprincippet – eller invariansprincippet – og tesen om, at lysets hastighed i alle sådanne beskrivelsessystemer er den samme, er grundlaget for hans relativitetsteori. Ud fra disse antagelser var det muligt at vise, at man kunne ændre på de klassiske ligninger for bevægelse og acceleration, således

at der var symmetri. Antagelserne viste også, at det ville være umuligt at påvise en forskel i lyshastigheden på langs og tværs af Jordens bevægelse i en æter. Faktisk var der slet ingen grund til at antage eksistensen af en æter, for om den var der eller ej, ville hverken gøre fra eller til.

I en anden artikel fra 1905 overvejede Einstein forholdet mellem fysiske genstandes masse, tyngdekraften og den stråling, som findes imellem dem, og som gør, at vi overhovedet kan se dem. Einstein benægtede, at der kunne være et objektivt rum, i hvilket genstande som f.eks. Jorden og Solen og de andre stjerner befandt sig, og i hvilket hver fysisk genstand havde en masse uafhængigt af de andre. For hvordan skulle man konstatere en sådan masse? Enhver måling ville være en fysisk handling i det faktiske foreliggende univers, og som sådan underlagt påvirkninger fra totaliteten af genstande. Kun i et tankeeksperiment i et tomt, abstrakt univers kunne man tænke sig at måle massen af f.eks. Jorden i sig selv, ved at påvirke den med en kendt kraft og så måle dens acceleration, dvs. anvende Newtons anden lov (der siger, at kraft er lig masse gange acceleration). Men hvordan påvirke Jorden med en kraft og foretage målinger, hvis Jorden var den eneste genstand? Einstein var således skeptisk over for ideen om, at genstande i sig selv har masse, men selvfølgelig ikke skeptisk over for gyldigheden af de lovmæssigheder, der gælder for masse – for de var jo empirisk konstaterbare. Hans relativitetsteori satte mekaniske processer, som f.eks. acceleration af en genstand, og elektromagnetiske processer, som f.eks. udsendelse af lys, i samme teoretiske ramme, og ud fra den kunne han nu vise, at der var en sammenhæng mellem udsendelse af stråling, der jo var et energifænomen, og en genstands masse. En genstand, der udsendte stråling og dermed tabte energi, måtte også tabe masse. Man kunne også sige det sådan, at f.eks. lys som strålingsenergi selv måtte besidde masse.

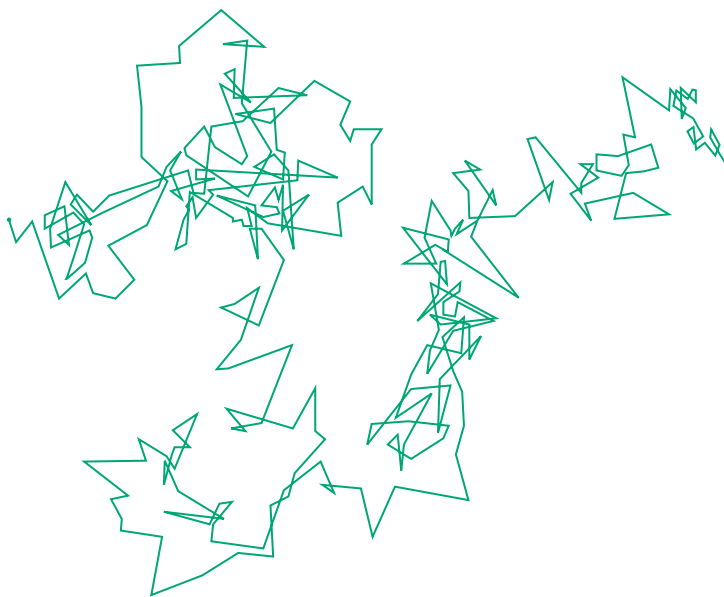
Den sammenhæng, han formulerede, fik formen $E = mc^2$, der siger, at den energi, der udsendes fra et legeme i form f.eks. af stråling, svarer til en given mængde stof, hvor forholdet imellem de to bestemmes af lysets hastighed i anden potens. Hvis man altså kunne omdanne stof helt til energi i form af varme eller anden type stråling, så ville der i 1 kg stof være en utrolig mængde energi. Man kan forestille sig virkningen af en sten på 1 kg, der falder fra et par meters højde – den kinetiske energi er ganske stor. Einstein viste nu, at det potentielle energiindhold i en sådan sten var 10.000.000.000.000.000 (dvs. ti millioner milliarder) gange større. Hvis bare

en rimelig stor del af et stofs masse kunne omdannes til stråling, måtte man derfor kunne opnå processer med enormt energiindhold. Atombomberne i 1945 står som skræmmende beviser på Einsteins forudsigelser. Solens stråling medfører ud fra samme teori et massetab på 4,4 millioner tons i sekundet. Så der udstråles ekstreme mængder energi, hvoraf en meget lille del rammer Jorden og muliggør livet – og at læse denne tekst.

Ud over sin relativitetsteori publicerede Einstein i 1905 også to andre teorier. Den ene handlede om de såkaldte brownske bevægelser, der forekom, når man så på meget små partikler nedsænket i væske.

De bevægede sig hid og did på tilsyneladende tilfældig vis. Einstein fremlagde den hypotese, at disse bevægelser skyldtes et bombardement af molekyler i væsken, der også bevægede sig tilfældigt rundt. Man havde teorier om molekylernes bevægelse, men ikke nogen forståelse af de brownske bevægelseres egenskaber, f.eks. gennemsnitslængden i bevægelserne mellem retningsskift. Einstein var i stand til at give en præcis teori om disse forhold, der senere muliggjorde, at den franske fysiker Jean Baptiste Perrin (1870-1942) kunne foretage en række målinger og udregninger, der gav tal for molekylernes og dermed atomernes størrelse. Perrin kunne også regne sig frem til en værdi for Avogadros tal, et tal, der sagde noget om antallet af molekyler i en given mængde af en luftart, og dermed antallet af molekyler

Robert Brown (1773-1858) opdagede de såkaldte brownske bevægelser i 1827, da han gennem et mikroskop observerede pollenpartikler, der hvirvlede rundt i vand. Einstein viste, at de brownske bevægelser også findes i væskerne selv, hvor de forårsager termodynamiske effekter som tryk og temperatur. Einstein fandt dermed en fysisk begrundelse for den statistiske termodynamik à la Boltzmann og Maxwell (s. 164, 177-179 og 277-279), som virkede meget mere acceptabel end den klassiske termodynamik, som benyttede sig af målbare, men ubegrundede begreber som energi, temperatur, tryk, masse og rumfang.



i et mol. Den italienske kemiker Amedeo Avogadro (1776-1856) havde allerede i begyndelsen af 1800-tallet formuleret den hypotese, at antallet af molekyler i en given mængde af to luftarter sat i forhold til den enkelte luftarts atomvægt var det samme. Men hvor mange? Kunne man finde tallet, ville man også kunne sige noget om atomernes størrelse og vægt. Kemikere havde længe troet på atomer, fysikere var mere skeptiske, og mange mente, at atomer var en rent hypotetisk antagelse, som forklarede nogle ting, men som man ikke havde egentlig empirisk evidens for faktisk fandtes. Einstein og Perrin fremlagde en sådan evidens, og fra omkring 1910 var der stort set ingen, der reelt tvivlede på eksistensen af atomer.

En anden teori, Einstein publicerede i 1905, drejede sig om stråling. Planck havde som nævnt hævdet, at energi – og dermed stråling – kunne forekomme i visse afmålte størrelser, kvanter. Men Planck havde kun undersøgt strålingen fra legemer, der ikke udsendte lys. Einstein formulerede nu en teori om stråling i almindelighed, som ligeledes byggede på en antagelse om, at stråling kun forekommer i små klumper, altså i kvantiseret form. I forbindelse med lys kaldte han disse for fotoner og påviste, at de kunne opfattes som en art partikler. Herudfra kunne han forklare den fotoelektriske effekt, der ellers var forekommet uforståelig. I dag kender man den fra fotoelektriske relæer, der styrer bl.a. åbning og lukning af døre i forretninger og elevatorer – lys påvirker noget metal, og der opstår strøm. Men hvordan kunne denne interaktion mellem stråling og stof finde sted? Ud fra antagelsen om, at lys i virkeligheden var partikler, kunne Einstein forklare fænomenet og give formler for sammenhængen. Formlerne muliggjorde målinger, som dermed kunne af- eller bekræfte teorien. Eksperimenterne viste sig at støtte Einstein, og det var for denne teori, at han i 1921 modtog nobelprisen.

En omvendning af alle begreber og forestillinger

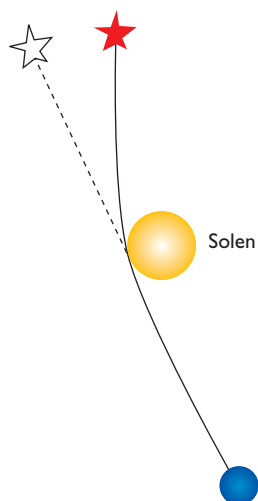
Det blev hurtigt klart, at Einsteins relativitetsteori ændrede begreberne om rum og tid, og om masse og energi. Lys havde pludselig masse og måtte være underlagt tyngdekraften, så forestillingen om, at lyset bevægede sig i rette linjer, måtte strengt taget være forkert.

Men selve fænomenet, at en genstand har masse, måtte også revurderes. Hvis den har masse, fordi den påvirkes af alle andre masser i universet, og de har det samme, så er det egentlig uklart, hvad det vil sige at have masse.

For helheden forudsætter jo delene, de enkelte genstande, men deres masse forudsætter igen helheden, resten af universet. Vi kan uden tvivl veje en genstand og underkaste den acceleration og måle, hvad der sker. Men hvad er det egentlig for fænomener, vi har med at gøre? Ifølge Einsteins teori er samtidighed et relativt begreb. To begivenheder er muligvis samtidige i relation til en observatør, men ikke i forhold til en anden. Størrelsen af massen, længden og tidsrummet afhænger også af hastigheden, så ting og tid forkortes ved meget høje hastigheder, og masser forøges. Afstande kan bestemmes ved hjælp af tid, idet man måler den tid, lyset tager for at bevæge sig en given afstand. Lysets hastighed er konstant, men alle andre hastigheder er relative. Når man antager, at lyset har en endelig hastighed, så kan man kun observere meget fjerne fænomener på den måde, som de forekom tidligere – pga. lysets rejsetid vil synsindtrykket altid være “lidt bagefter”. Rum og tid begyndte for Einstein at hænge sammen på en ny måde, og i en række år søgte han efter en mere generel teori, der kunne beskrive de fysiske begivenheder.

I 1916 publicerede han så sin generelle relativitetsteori, der først og fremmest er en teori om sammenhængen mellem rum, tid og masse, dvs. tyngdekraften. Einstein gik ud fra den simple erfaring, som man f.eks. kender fra flyrejser, nemlig at ens vægt øges, når der accelereres kraftigt, ligesom den falder under kraftig opbremsning – man kan ligefrem opleve øjeblikke af vægtløshed, når flyet passerer igennem et lufthul. Hvor Newton havde påvist, at der skulle sondres mellem træg og tung masse – dvs. mellem den masse, som noget havde, således at det krævede en kraft, for at genstanden kunne accelereres, og så den masse, noget havde, fordi det befandt sig i et tyngdefelt – så mente Einstein, at en sådan distinktion i virkeligheden forudsatte nogle absolutter, som han med sit relativitetsprincip benægtede. Konsekvensen var, at både fænomenet kraft og fænomenet masse var en form for illusioner. Man kunne bruge sådanne begreber, men strengt taget kunne man ikke give dem egentligt empirisk indhold – forstået på den måde, at de egentlig ikke var nødvendige, når man skulle redegøre for de observerede fænomener.

Einstein søgte altså en teoridannelse, der kunne redegøre for det observerede, og som samtidig accepterede, at målinger og observationer var fysiske begivenheder. Han mente, at universet med dets masser og kræfter, som beskrevet med Newtons fysik, i virkeligheden var en struktur, hvor fordelingen af stof i rum og tid skabte de observerede fænomener. For det



Den røde stjerne er stjernens faktiske placering, men fordi vi er vant til at opfatte lysstråler som lige linjer, ses stjernen forskudt (den hvide stjerne).

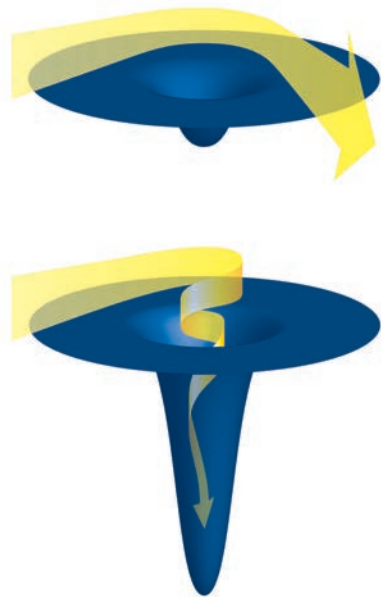
første kunne rum og tid ikke adskilles – det viste allerede hans analyser af samtidighed – og derudover var masse, som den konstateredes i og med, at legemer udøvede tiltrækning på hinanden, i virkeligheden udtryk for den totale struktur i helheden af rumtid og masse. Lyset bevægede sig i en vis forstand i rette linjer, blot var de rette linjer ikke rette i euklidisk forstand, da en “lyspartikels” bane altid ville være påvirket af strukturen i rumtiden, der igen var et resultat af stoffets fordeling i universet. Der var således “i virkeligheden” ingen tiltrækning mellem Solen og Jorden, på den måde at de gensidigt påvirkede hinanden. Den konstaterede bevægelse i forholdet mellem Sol og Jord skyldtes i stedet, at Jorden bevægede sig i en kortest mulig bane i rumtiden.

Det interessante ved Einsteins teori var nu, at han, med god matematisk hjælp, var i stand til at formulere den sådan, at han også kunne give nogle helt konkrete bud på empiriske konsekvenser. En af disse var, at plane-

ten Merkur, der var tættest på Solen, skulle ændre sin bane lidt hvert år. Det var en ændring, man faktisk havde konstateret, men som Newtons teori om planeternes bane absolut ikke kunne gøre rede for. En anden var, at lys skulle afbøjes i forbindelse med, at det passerede forbi store mængder stof. Det kunne testes ved solformørkelser. I forbindelse med en sådan i 1919 blev der gennemført flere målinger, der klart viste, at Einsteins teori førte til de korrekte forudsigelser, mens Newtons var ukorrekt. Ved et møde i den engelske videnskabelige sammenslutning The Royal Society den 6. november 1919 blev Einsteins teori diskuteret, og der blev gennemført tests. Opdageren af elektronen, Joseph J. Thomson, kaldte bekræftelsen af Einsteins teori, og dermed afkræftelsen af Newtons, for “en af de mest betydningsfulde, hvis ikke *den* mest betydningsfulde, begivenhed i den menneskelige tænknings historie.”

Newtons teori om tyngdekraften og hans forklaringer af solsystemets fænomener havde i næsten 250 år været det mest autoritative eksempel på videnskabelig erkendelse og indsats. Nu forelå der klar evidens for, at hans tanker ikke var korrekte. Newtons teori, som få forstod, men som mange kunne danne sig en forestilling om, var blevet erstattet af en matematisk avan-

Lys bevæger sig altid langs den korteste vej mellem to punkter i rumtiden. Dette kaldes også en "geodætisk vej". I euklidisk geometri er den en ret linje (se s. 163), men på overfladen af en kugle former den cirkelbaner. I sin generelle relativitetsteori beskriver Einstein tyngdekraften som resultatet af en afbøjet rumtid. Jo stærkere tyngdekraften er, jo mere krum er rumtiden, og nogle gange så meget, så lyset ikke kan slippe væk. Så er det et sort hul.

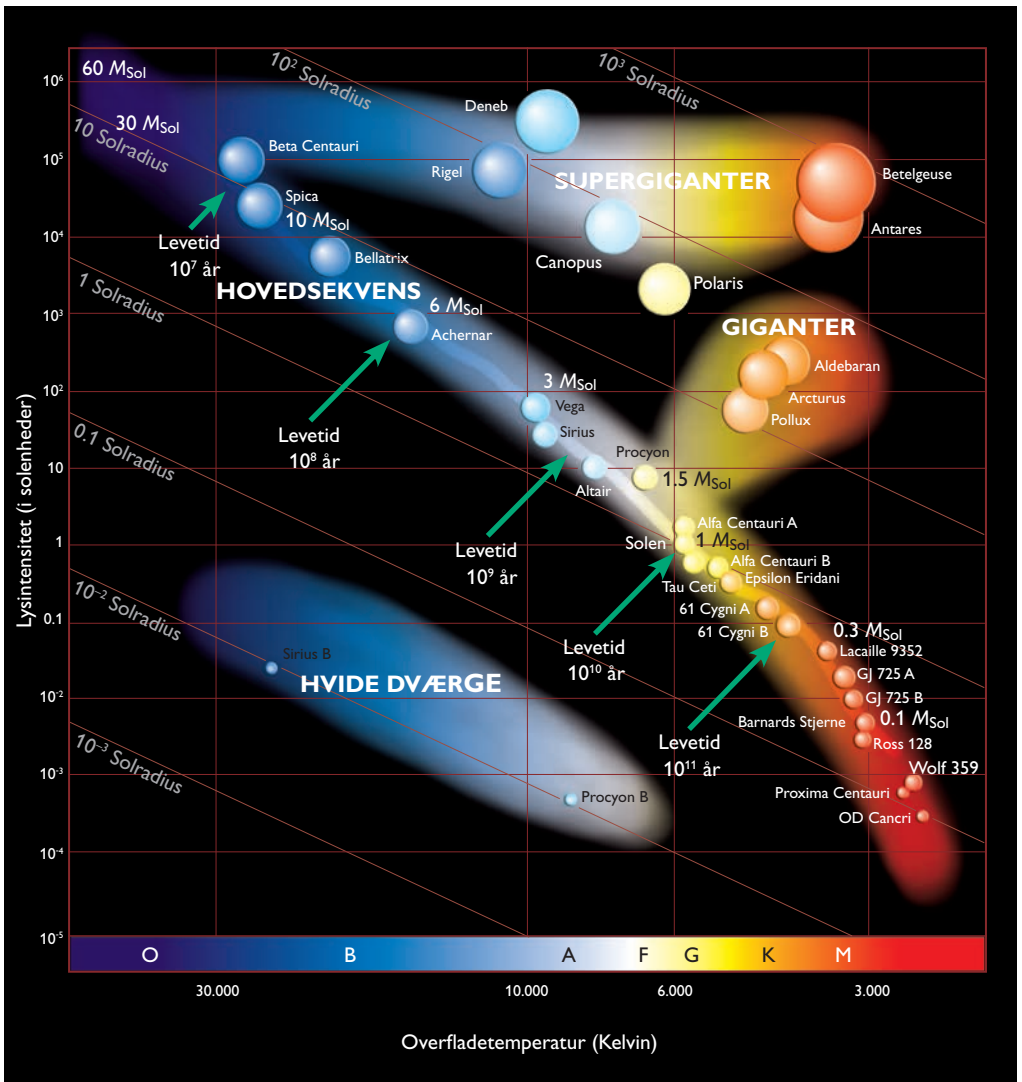


ceret teori, som meget få forstod, og som var utrolig svær at danne sig en forestilling om.

Men Einstein mente ikke kun at have frembragt en effektiv og succesrig matematisk formalisme, han mente også, at han havde fremlagt en teori om verden. Einstein søgte en sammenhængende fysisk teori, der var empirisk stringent – dvs. kunne redegøre for observationer og muliggøre korrekte forudsigelser – men som også havde fysisk mening, i den forstand at den gav os et billede af, hvordan verden rent faktisk var indrettet. Lys og masse opfører sig, som de gør, fordi verden har en bestemt struktur, en struktur som netop kan beskrives matematisk. Det kan – mærkeligt nok – ske med en matematisk teori, som mennesket, der selv er en del af verden, kan frembringe. Det var for Einstein et stort mysterium.

Vores plads i kosmos

Einsteins generelle relativitetsteori måtte have konsekvenser for forståelsen af universets opbygning. Einstein fremlagde allerede i 1917 den væsentlige konsekvens af sin teori, nemlig at universet ikke var uendeligt, men endeligt. Det var klart, at sammenhængen mellem rum og stof var en anden end den, Newton havde antaget. Rummet var ifølge Einstein ikke en beholder, som genstandene befinder sig i – dvs. en beholder, hvis egenskaber er uafhængige af genstandene. Rummets struktur var efter hans teori derimod struktureret ud fra fordelingen af de genstande, det indeholdt, lidt ligesom tunge kugler på en skummadras. Det er derfor, en lysstråle opfører sig, som den gør, når den bevæger sig igennem rummet. Newtons tyngdeteori måtte medføre, at alle genstande i rummet blev tiltrukket af hinanden og derfor måtte bevæge



En klassifikation af stjerner: x-aksen angiver temperaturen og y-aksen lysstyrken. Solen ligger trygt i midten som en meget hyppig klasse G-stjerne.

sig ind imod et fælles centrum. Hvis rummet derudover var uendeligt og indeholdt uendeligt meget stof, ville man ikke kunne konstatere et univers,

som det, man ser ud i, når man ser op på stjernehimlen en klar nat. For hvis alle legemer tiltrak hinanden, måtte universet være under konstant kollaps, og det ser man ikke. Der måtte være noget galt med Newtons tese, og Einsteins første bud var således, at universet var endeligt – en tanke, der var næsten lige så svær at fatte som den, at universet var uendeligt. Einstein mente ydermere, at universet som sådan var i bevægelse. Det var også i modstrid



med, hvad man hidtil havde ment, nemlig at de enkelte stjerner eller planeter kunne bevæge sig i forhold til hinanden, men at universet som sådan ikke bevægede sig.

Einsteins arbejde kunne også bruges til at forklare, hvorfor stjerner lyser, hvilket indtil da havde været en stor gåde. I 1920 foreslog Arthur Eddington (1882-1944), at der i en stjernes indre foregik en fusion af fire hydrogenatomer til ét heliumatom, hvorved den overskydende masse blev forvandlet til energi via Einsteins $E = mc^2$. Vores Sol var med andre ord en kæmpe hydrogenreaktor med tyngdekraften som eneste låg, og idet Solen består af 70 procent hydrogen, ville den have energi nok til at lyse i endnu ti tusind millioner år. I de følgende ca. 30 år kunne astrofysikere som Hans Bethe (1906-2005), Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-95) og Carl von Weizsäcker (1912-2007) også redegøre for, hvordan de andre elementer i det periodiske system kunne dannes via stjerners fusionsprocesser og dermed også forklare, hvordan så mærkelige himmellegemer som gule og røde giganter, supernovaer og hvide dværge blev dannet.

Kopernikus (1473-1543) havde i 1500-tallet fremlagt den tese, at Solen var universets centrum. Senere havde astronomer opdaget Mælkevejens mange stjerner, og man kunne give bud på afstanden til nogle af de nærmeste. Man kendte således nogle af størrelsesforholdene i vores del af universet og havde indset, at Solen ikke var centrum i galaksen, men lå yderligt på én af Mælkevejens spiralarme. Den amerikanske astronom Henrietta Leavitt (1868-1921) – der på grund af sit køn havde svært ved at få en fast stilling som astronom

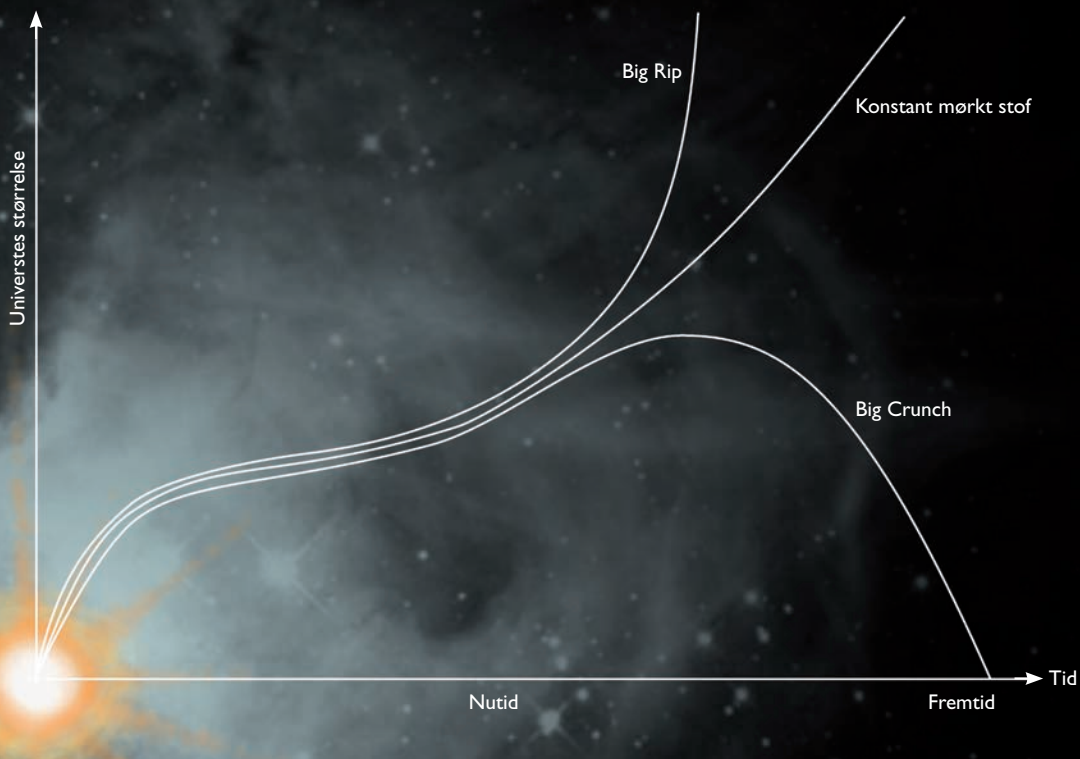
Andromeda-galaksen. Det var astronomen Edwin Hubbles opdagelse i 1924/25 af, at denne galakse ikke var en del af Mælkevejen, men i stedet var en galakse for sig selv, der for alvor startede spekulationerne om verdensrummets størrelse.

ved Harvards observatorium og i stedet blev ansat som “computer”, dvs. som “beregner” med opgaven at bestemme lysintensiteten af fjerne stjerner – havde i 1912 studeret nogle pulserende gule gigant-stjerner i den “magellanske sky”. Hun opdagede, at perioden, hvormed disse såkaldte cepheider blinkede, var proportional med deres reelle lysintensitet, hvilket hun så kunne bruge til at beregne afstanden til dem ved at sammenligne med lysintensiteten på fotografier taget fra Jorden. På baggrund af dette forarbejde lykkedes det den amerikanske astronom Edwin Hubble (1889-1953) i 1924/25 at bevise, at en af disse skyer, Andromeda-tågen, ikke var en del af Mælkevejen, men en stor samling af stjerner, der befandt sig længere ude i universet.

Ved at studere disse stjernetåger fremsatte Hubble og den belgiske præst og matematiker Georges Lemaître (1894-1966) den tese, at universet var endeligt, men i konstant ekspansion. Alle genstande i rummet fjernede sig konstant fra hinanden. Det var endda muligt at angive den hastighed, med hvilken det skete. Den var afhængig af afstanden fra Jorden og steg med afstanden. Ud fra sådanne beregninger og andre målinger antog Lemaître, at universet dels kom fra et enkelt punkt, og at det havde en endelig alder. Denne teori kaldes normalt teorien om “The Big Bang” – et navn, der faktisk oprindeligt var ment som en hån udtænkt af astronomen og science fiction-forfatteren Fred Hoyle (1915-2001), der selv var tilhænger af en “steady state”-teori, ifølge hvilken universet både udvidede sig og var evigt. Big Bang-betegnelsen holdt ved, og universet anses i dag for at være ca. 13-14 milliarder år gammelt.

Einsteins teorier viste sig at have god mening i forhold til Big Bang-teorien og det faktisk observerede. Universet var ikke statisk, men i konstant bevægelse. I 1965 opdagede de to amerikanske astronomer Arno Penzias (f. 1933) og Robert Woodrow Wilson (f. 1936), at der jævnt spredt i universet fandtes mikrobølgestråling. Denne “baggrundsstråling” med en temperatur på 2,7 Kelvin anså de fleste teoretikere som “rester” fra Big Bang og dermed som en bekræftelse af teorien.

I 1979 fremlagde den amerikanske fysiker Alan H. Guth (f. 1947) en teori om, at universet meget tidligt udvidede sig med eksponentiel hast. Denne såkaldte inflationsmodel kan forklare en del fænomener, som Big Bang-modellen ikke kan – f.eks. universets øjensynlige geometriske fladhed og relative homogenitet. Men den forudsætter, at der findes noget ekstra energi i form af mørkt stof et eller andet sted i universet, måske i vakuumet



mellem stjernerne, hvor man kunne forestille sig en konstant dannelse og ødelæggelse af partikler og anti-partikler. Einstein antog i sin generelle relativitetsteori, at der findes en sådan energi i vakuomet, som ikke ville ændre sig med tiden. Han kaldte den for den “kosmologiske konstant”, hvad han senere hen fortrød bitterligt og kaldte for sit livs “største fejltagelse”. Pointen er imidlertid, at ingen ved, hvor stor den kosmologiske konstant er, hvis den overhovedet eksisterer. Det er derfor ikke klart, hvor stort universet er, eller hvor meget stof, der er i det. Hvis der er mere end en bestemt masse i gennemsnit pr. kubikmeter, så vil universet stoppe med at udvide sig og i stedet trække sig sammen i et “Big Crunch”, og omvendt, hvis der er mindre end en bestemt kritisk masse, vil det fortsat blive større og større og ende i et “Big Rip”.

Man kunne måske tro, at Jorden, eller i hvert fald Mælkevejen, igen er kommet tilbage i centrum af universet, fordi alle iagttagere i et evigt ekspanderende univers nødvendigvis vil se sig selv i centrum af ekspansionen. Men det er kun et tilsyneladende centrum. Alle galakser og stjernetaager bevæger

Universets fremtid kender vi ikke. Måske ender det i et “Big Rip”, hvor al materie, lige fra galakser til atomer, rives fra hinanden i et stadigt mere ekspanderende univers, eller i et “Big Crunch”, hvor alt knuses sammen. Mange mener, at udfaldet afhænger af mængden af mørkt stof i det tomme rum.



Det såkaldte Hubble-flow betegner galaksernes bevægelse væk fra hinanden. Det skyldes universets evige ekspansion, der begyndte med det berømte Big Bang. Der findes ikke noget centrum, og alle ting bevæger sig væk fra hinanden, ligesom på overfladen af en voksende ballon. Her et kig ind i det dybeste univers, lidt nord for Karlvognen, observeret af Hubble Space Telescope i december 1995.

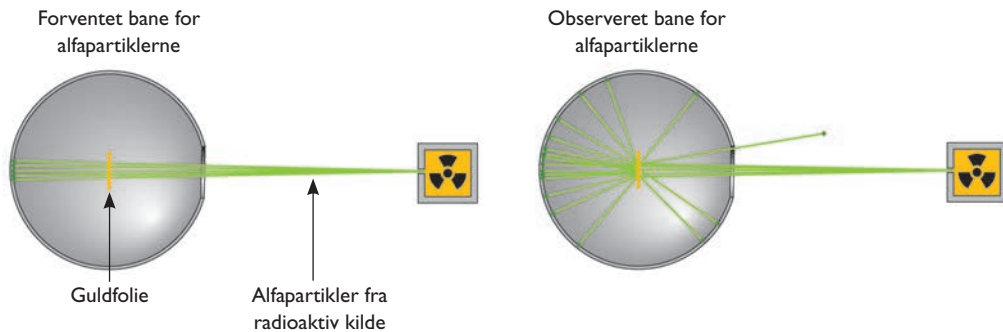
sig nemlig væk fra hinanden i en stor symmetrisk strøm, kaldet det store "Hubble-flow".

De galakser, som er længst borte fra os, vil bevæge sig væk med størst hastighed, ligesom de galakser, der er tættere på, vil be-

væge sig væk, blot langsommere. Det er konsekvensen af et ekspanderende univers, og det vil gælde for alle udsigtspositioner i universet. Horisonten af det synlige univers kan derfor defineres af de galakser, som bevæger sig væk fra os med lysets hastighed. Omvendt vil en beboer på en planet i en sådan galakse selvfølgelig se vores Mælkevej som den yderste kant af sit eget synlige univers. Dette kosmologiske princip siger, at alle udsigtspositioner principielt er lige gode. Der findes ikke noget unikt centrum. Alle punkter i universet, inklusive vores Mælkevej, tog del i Big Bang og bliver nu båret med det kosmiske Hubble-flow, efterhånden som universet udvider sig ligesom overfladen på en stadig større ballon.

Atomets struktur

Den engelske fysiker Ernest Rutherford (1871-1937) gennemførte omkring 1910 en række forsøg, der gav genlyd i hele fysikkens verden. Rutherford sagde om dem, at deres resultat var ligeså utroligt, som hvis man havde skudt nogle store granater ind mod et stykke tyndt papir, og de så var blevet reflekteret tilbage og havde ramt én selv. Han sendte stråler bestående af partikler imod en tynd metal-folie, og hans resultater tydede på, at atomer ikke i sig selv var partikler, men at de igen bestod af andre partikler og var organiseret med en ekstremt lille kerne af positiv ladning med elektroner rundt omkring, fordelt i sfæriske baner.

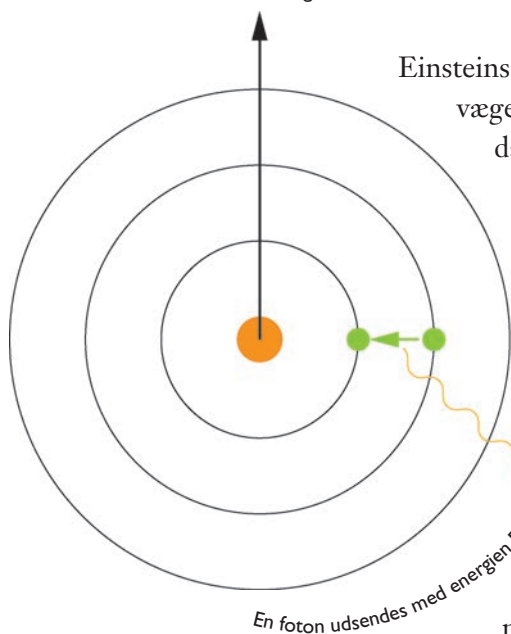


På baggrund af Rutherford's arbejde og andre studier af atomare fænomener, specielt det spektrum, der knyttede sig til grundstoffet brint, fremlagde danskeren Niels Bohr (1885-1962) en model af atomet, der på flere afgørende punkter brød radikalt med den klassiske fysik. Bohr forestillede sig atomet som et lille planetsystem. Elektronerne cirklede om atomkernen. Som henholdsvis positivt og negativt ladede tiltrak de hinanden, og i systemet var "lagret" en vis mængde energi. Elektronen kunne ifølge Bohr befinde sig i forskellige baner omkring kernen, og hvis den "sprang" fra en større til en mindre bane – dvs. kom tættere på kernen – blev der energi frigjort i form af stråling. Bohr præciserede på denne måde Rutherford's opfattelse af atomet, men han gjorde mere end det. Han inddrog også Planck's ide om, at energi kunne forefindes i bestemte størrelser, idet han viste, at der kunne være en sammenhæng imellem elektronens baner og den stråling, dvs. energi, der udsendtes fra atomet. Brints spektrum indeholdt en række træk, som hidtil havde været svære at forklare, og Bohr viste nu til stor overraskelse for alle, og sikkert ikke mindst for ham selv, at hans model kunne forklare disse fænomener.

Der var bare det ved modellen, at den på en række afgørende punkter var direkte i strid med, hvad man på det tidspunkt vidste om stoffets natur. For det første: hvis elektronen var elektrisk ladet og bevægede sig rundt om kernen i en sfærisk bane, så ville dens bevægelse være konstant accelereret, og dermed skulle den ifølge den klassiske elektromagnetiske teori konstant udsende stråling. Men det gjorde den netop efter Bohrs teori kun, når den "sprang" fra én bane til en anden. For det andet var disse "spring" ganske besynderlige. Elektronen bevægede sig fra én bane til en anden fra øjeblik til øjeblik og ikke via nogle punkter imellem de to baner. Ikke engang

Rutherford sendte alfa-partikler gennem et ekstremt tyndt stykke guldfolie (0,00004 cm). På baggrund af tidligere atommodeller regnede Rutherford med et resultat som til venstre. Det faktiske resultat (til højre) fik Rutherford til at antage eksistensen af en tung kerne, som måtte udgøre hovedbestanddelen af atomet. Det var disse tunge, positivt ladede kerner i guldfoliet, som strålingen undertiden kolliderede med. Derfor rikoletterede strålingen tilbage eller blev slået ud af kurs.

Voksende energiniveau



Einsteins teori tillod, at noget på den måde bevægede sig med uendelig stor hastighed, da lysets hastighed her var den største.

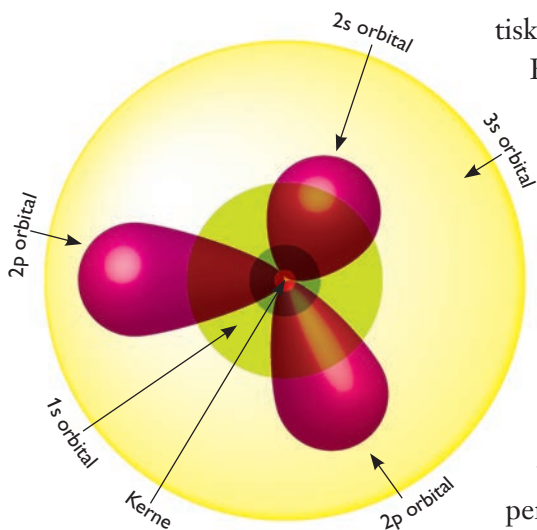
At noget momentant, altså i ét nu, skulle kunne bevæge sig fra et sted til et andet var ughørt. Yderligere problematisk var det, at hvis en negativt ladet elektron kredsede om en positivt ladet kerne, hvorved den burde udsende stråling, så ville den stadig skulle tabe energi og dermed bevæge sig ind imod kernen for endeligt at smelte sammen med denne. Atomet i Bohr-modellen burde være ustabil.

Men alle erfaringer viste, at stof faktisk er stabilt.

Bohr var fuldt ud klar over disse ting.

Men teoriens evne til at forklare og skabe orden var så stor, at den alligevel fik enorm indflydelse. Bohr selv anvendte den til at udvikle en teori om det periodiske system, der skabte stærkt forøget indsigt i kemiske fænomener og knyttede fundamentale fysiske og kemiske forhold teoretisk sammen. Der var således en meget lang række eksperimentelle og empiriske forhold, som fandt en naturlig forklaring ud fra Bohrs teorier, selvom teorierne forekom at indeholde helt afgørende problemer. Der måtte være tale om nye og hidtil uforståede processer.

Bohr arbejdede i årene mellem 1913 og 1924 med alle disse problemer. Han for-



Bohr fremsatte en atommodel, der ligner en planetmodel (øverst). Rundt om kernen kredser elektronerne i forskellige baner, alt efter hvilken energi de har. I den moderne kvantemekaniske repræsentation af atomet (nederst), udviklet af bl.a. Louis de Broglie og Erwin Schrödinger i 1920'erne, tegner man gerne elektronerne som energiskyer ("orbitaler") i forskellige udformninger, alt efter deres energi.

søgte både at udvikle teorien, så den kunne forklare flere og flere empirisk konstaterede fænomener, og at – måske allervigtigst – udlede forskellige logiske og erkendelsesteoretiske aspekter af den. Langsomt i årene 1918-22 formulerede han, hvad han på et tidspunkt kaldte “korrespondensprincipet”. Han formulerede det bl.a. sådan her: “Enhver beskrivelse af naturprocesser må basere sig på ideer, der er introduceret og defineret af den klassiske teori.” Ifølge Bohr må man beskrive de atomare fænomener ved hjælp af begreber, som giver mening, når de anvendes dem på “normale” genstande: sten, bolde, væsker, strøm i ledninger, lys osv. Men samtidig er der visse usædvanlige forhold, man må acceptere, f.eks. eksistensen af mindste størrelser af energi, dvs. Plancks energikvanter.

Beskrivelsen af verden på det mikroskopiske niveau må således ske med begreber, der får deres mening fra erfaringer på det makroskopiske niveau. Alligevel er beskrivelsen af det mikroskopiske niveau på visse områder i modstrid med de makroskopiske erfaringer, men denne modstrid forsvinder, når tilpas store mængder mikroskopiske fænomener forekommer og danner den makroskopiske verden. Senere eksperimenter og teoridannelser skulle dog komme til at udfordre Bohrs erkendelsesteoretiske synspunkter på væsentlige punkter.

Omkring 1923-24 var det klart, at atomare fænomener ikke kun kunne forstås ud fra en model med mikroskopiske elektrisk ladede partikler, der opførte sig efter lovmæssigheder, og som var kvantiserede, men i øvrigt klassiske. Der forelå en række eksperimenter, der viste, at man med rimelighed kunne forstå materien som bestående af partikler – men også at partikler kunne forstås som et bølgefænomen. Et afgørende eksperiment var Arthur Comptons (1892-1962) undersøgelser af forholdet imellem røntgenstråling og elektroner i faste stoffer. Når de kolliderede, skete der en forøgelse af strålingens frekvens. Det viste, at samspillet imellem partikler og stråling var mere komplekst end hidtil antaget. Fænomener, der havde partikelkarakter, kunne udvise strålingsegenskaber, og derfor kunne de også antage bølgekarakter. Det blev for alvor bekræftet i 1927, da man ved eksperimenter fandt ud af, at elektroner kunne opføre sig på måder, der normalt havde med stråling og bølgefænomener at gøre.

Franskmanden Louis de Broglie (1892-1987) tolkede i 1923 Bohrs atommodel sådan, at elektronen i stedet for at være en partikel, der cirkulerede om en kerne, var en art stående bølge, en materie-bølge. Selvfølgelig

var der ingen, der havde *set*, om elektronen var en partikel eller en bølge – det drejede sig derimod om at fremlægge sandsynlige modeller for, hvordan stoffets mikroorganisation var, ud fra en lang række teoretiske antagelser og eksperimenter, som gensidigt understøttede hinanden. Hvis man antager, at energi ikke kan eksistere i mindre enheder end lyskvanter, og elektricitet ikke i mindre mængde end den, som en elektron besidder, så må al erkendelse i form af observation eller eksperimenter nødvendigvis ske ved hjælp af disse enheder. Vil man studere lyskvanter, kan det kun ske via lyskvanter. Der er ingen anden måde at få kendskab til disse fænomener end ved at studere dem via den samme type fænomener. Det er for så vidt samme situation, som findes på det makroskopiske niveau, hvor man ikke kan studere kosmiske sammenhænge ved hjælp af signaler med hastigheder over lysets. Vi er fundamentalt begrænsede i vores erkendemuligheder af de fænomener, vi ønsker at studere. Målinger – kernen i ethvert forsøg på at få viden om verden – er selv fysiske begivenheder og dermed underlagt den fysiske verdens lovmæssigheder og begrænsninger. En af fysikkens mere problematiske opgaver er også at vinde indsigt i disse begrænsninger.

Usikkerhedsprincippet

I årene 1924-25 fremkom den unge tyske fysiker Werner Heisenberg (1901-76) med en ny teori om de atomare fænomener, der skulle vise sig at få vidtrækkende betydning. Heisenberg forsøgte at fremlægge en teori for atomare fænomener, der startede med alene at gå ud fra de observerbare fænomener. Det var først og fremmest en række tal, der angav frekvenser for visse linjer i brints spektrum. Heisenberg fremlagde nu en matematisk model, i hvilken man kunne beregne alle disse tal. Som input i modellen skulle anvendes de forskellige energitilstande, som en elektron kunne være i, og som output fik man så en række tal, der beskrev, hvad der kunne observeres. De energitilstande, et atom kan befinde sig i, er afhængige af de bohrske “spring”, og de forekommer med en vis sandsynlighed. Derfor må beskrivelsen af de atomare fænomener basalt set indeholde en lang række sandsynligheder for, at bestemte energiforandringer sker. Det var muligt for Heisenberg at redegøre for de observerede fænomener, og sågar at forudsige nye – men det var svært at give den rent matematiske model fysisk mening.

For yderligere at komplicere situationen fremkom næsten samtidig

et alternativ til Heisenberg, som baserede sig på en klar opfattelse af, at elektronen var et stofligt bølgefænomen. Teorien var en fortsættelse af de Broglies antagelser om, at elektroner både var partikler og bølger, og den blev fremsat af østrigeren Erwin Schrödinger (1887-1961). Det hele gik nu meget hurtigt. Det blev vist rent matematisk, at Schrödinger-ligningen og Heisenbergs ligninger var ækvivalente i den forstand, at de med samme input gav samme output. De var således lige gode til at redegøre for de faktisk observerede data. Men de var fundamentalt uenige, hvad angik den måde, de anskuede virkeligheden på. Schrödinger antog, at der fandtes en art materie-bølger, at stof basalt set var noget andet end en ansamling partikler.

Heisenbergs lærer Max Born (1882-1970) fortolkede nu kvadratet på Schrödinger-ligningen som sandsynlighederne for at finde en partikel et givet sted, og ikke som egenskaber ved en faktisk eksisterende bølge, og Heisenberg observerede to bemærkelsesværdige træk ved sin egen ligning. For det første brød visse dele af den med den grundlæggende regel for multiplikation, at faktorernes orden er ligegyldig, dvs. at $ab = ba$. For det andet indeholdt den det problem, at hvis man skulle tolke dens faktiske indhold, involverede den ikke kun det observerede, men også observatøren – forstået på den måde, at observationen skete via processer af samme slags som dem, der blev observeret. Det kom sig af, at Heisenberg antog, at påvisningen af en elektron måtte ske med lys. Men lys og elektronen ville fysisk interagere, og resultatet – det observerede – ville være påvirket af denne interaktion, dvs. man ville ikke observere objektet, men resultatet af interaktionen mellem objektet og det medium, med hvilket man observerede. Det skyldtes de forhold om interaktion mellem lys og partikler, som Compton havde påvist.

Heisenberg formulerede i 1926-27 sine konklusioner. De gik ud på, at det ikke var muligt nøjagtigt at bestemme en elektrons position og dens moment. Hvis man ville vide meget om den ene egenskab, ville det betyde mindre viden om den



Heisenbergs usikkerhedsprincip siger, at det ikke er muligt nøjagtigt at bestemme en partikels position og moment (som er et produkt af partiklens masse og hastighed). Usikkerhedsprincippet er et direkte resultat af partikel-bølge-dualiteten, som den f.eks. viser sig i fotoners skizofrene opførsel i dobbeltspalteeksperimentet (s. 250). Den nedre grænse for målingens nøjagtighed er givet ved $\hbar/2$, hvor \hbar er den reducerede Plancks konstant, der angiver størrelsen af en kvant, som er ca. 10^{-34} Js.

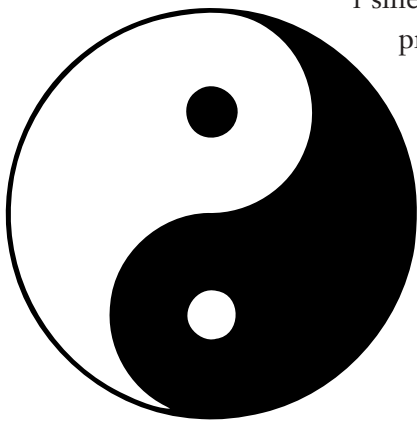
anden, og omvendt. Omfanget af denne usikkerhed var knyttet til Plancks konstant. Det forhold, at energi ikke kunne findes i vilkårligt små mængder andet end i frie fotoner, satte altså en grænse for, hvad man kunne vide om elementære størrelser som elektronen. Det betød, at enhver fundamental naturbeskrivelse måtte være baseret på *sandsynlighedsbeskrivelser* – og dermed blev den indeterministisk og delvist ikke-kausal.

Når Heisenberg hævdede, at elementarpartiklers sted og moment ikke kunne bestemmes vilkårligt, forudsatte han, at elektronen faktisk både havde et sted, hvor den var, og at den besad bestemte energi-egenskaber. Men hvad ville det så sige, at erkendelsen af den var udtrykt i sandsynlighed? Og hvad betød det, at den både teoretisk og eksperimentelt udviste bølgeegenskaber?

Komplementaritet fra København

Bohr opfattede ikke Heisenbergs teori som tilfredsstillende. Heisenberg havde en klar model, der involverede en observatør underlagt visse begrænsninger og en verden, som observatøren ikke kunne opnå fuld information om, selvom han godt kunne vide, hvad det var, han manglede information om. Bohr mente, at de erkendelsesteoretiske problemer var for store. Heisenberg gik ydermere ud fra, at det var uproblematisk at anvende begreber som f.eks. sted og hastighed på elektroner. Det havde Bohr selv gjort

i sine teorier fra 1913 til 1924. Men med en række problemer, paradokser og modsigelser til følge, hvorfor Bohr nu, i 1927, satte spørgsmålstegn ved fremgangsmåden. Ifølge Bohr var det ikke virkeligheden, der satte grænser for anvendelsen af vores begreber – det forholdt sig snarere omvendt: det var vores begreber, der satte grænser for vores erkendelse af virkeligheden. For på hvilken måde skulle man få mulighed for at præcisere begreberne “sted” og “hastighed”, hvordan skulle man nogensinde kunne vide, om man anvendte dem korrekt? Ikke desto mindre havde man intet andet valg end at forsøge at anvende de forhåndenværende begreber, der fik deres



Da Bohr i 1947 modtog Elefantordenen, brugte han det taoistiske yin og yang-symbol til at symbolisere komplementaritetsprincippet, fordi “det drejer sig ikke om modsigelser, men om komplementære opfattelser af fænomenerne.”

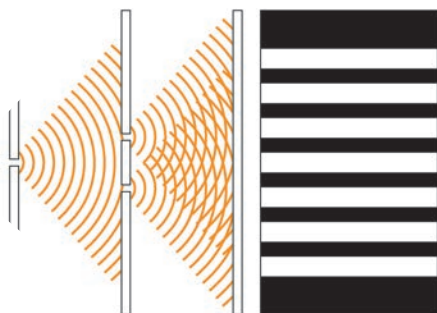
mening ud fra dagligdags erfaringer. Bohr supplerede dermed sit korrespondensprincip med et komplementaritetsprincip, der sagde, at vedrørende de atomare forhold var man nødt til at give flere hinanden udelukkende beskrivelser. At elektronen måtte beskrives med begreber, der tillagde den bølge-egenskaber, var ikke udtømmende, den kunne også beskrives som en partikel – men denne beskrivelse ville heller ikke være udtømmende. Der ville simpelthen ikke kunne gives en sammenhængende og modsigelsesfri beskrivelse af den atomare virkelighed.

Siden 1927 havde Bohr ment, at fysik ikke drejer sig om, hvordan virkeligheden er, men derimod om, hvad vi kan sige om den. Filosofisk set kan dette kaldes en epistemologisk position, det vil sige en position, som primært undersøger gyldigheden for viden. Ved et større fysikermøde i den italienske by Como introducerede Bohr sit begreb om komplementaritet. Ud fra det grundsynspunkt, at “vores tolkning af det eksperimentelle materiale hviler i alt væsentlig på klassiske begreber”, var han i stand til at redegøre for Heisenbergs påstande om ubestemthed, uden at tilslutte sig Heisenbergs og Max Borns forestillinger om, at virkeligheden var indeterministisk og ikke-kausal. Bohr sagde blandt andet: “En uafhængig virkelighed i sædvanlig (dvs. klassisk) fysisk forstand kan hverken tilskrives fænomenerne eller selve observationsmidlerne.” Heisenberg havde i 1927 hævdet, at “kvantemekanikken fastslår definitivt ugyldigheden af loven om kausalitet”, mens Bohr nu tolkede situationen sådan, at man på den ene side aldrig ville kunne undvære begrebet om kausalitet i beskrivelserne af naturen, men at man på den anden side måtte indse, at ingen beskrivelse af atomare fænomener nogensinde ville kunne give et fuldstændig sandfærdigt billede af virkeligheden. Det var imidlertid bestemt ikke det samme som at sige, at naturen ikke var underlagt kausalitet, sådan som Heisenberg gjorde det.

Den klassiske forståelse af eksperimentet var, at man stillede et spørgsmål, hvorpå der kom et klart udfald. Bohr forstod de nye betingelser således, at ved atomare eksperimenter havde spørgsmålet indflydelse på svaret. Det skulle forstås sådan, at dels var et svar aldrig udtømmende, og dels kunne der stilles et andet spørgsmål, der ville give et lige så godt svar – men et svar, der vel at mærke udelukkede det første.

Bohrs fortolkning, som også blev kaldt “Københavnertolkningen”, lavede i en vis forstand et billedforbud mod visse begreber og forståelser, fordi de ikke gav mening i forhold til de observerede kvantemekaniske fænomener.

•• Dobbeltpalteeksperimentet



Det var oprindeligt englænderen Thomas Young (1773-1829), der udførte det første dobbeltpalteeksperiment for at vise, at lys skulle forstås som bølger, og ikke som små partikler. Men efter at man i løbet af 1920'erne havde demonstreret, at lys vekselvirker med materie i form af diskrete, "kvantificerede" energipakker, kaldet fotoner, blev dobbeltpalteeksperimentet det ultimative eksempel på elementarpartiklers mærkelige partikel-bølge-dualitet.

I eksperimentet opsættes en plade med to spalter, hvorigennem fotoner (eller elektroner) kan passere og ramme en bagvedliggende fotoplade, på hvilken man kan se, hvor og hvornår fotonerne rammer. Hvis en af spalterne tildækkes, vil de efter hinanden følgende fotoner, der trænger igennem den anden spalte, langsomt opbygge et simpelt mønster med en top og kun lidt diffraktion, pænt i overensstemmelse med de heisenbergske usikkerheder, der er forbundet med en partikels position og moment. Men lige så snart begge spalter er åbne, vil det til at starte med se ud som om, at fotonerne rammer pladen tilfældigt, men efterhånden vil der opbygges et interferensmønster med et mønster af lyse og mørke striber.

Det er fristende at tro, at hver foton må

passere gennem enten den ene eller den anden spalte. Men hvis det var tilfældet, burde man kunne optage interferensmønsteret på film ved først at lukke den ene spalte i et stykke tid, og så åbne den igen og lukke den anden. Men det ved vi jo, ikke fungerer. Interferensmønsteret opstår kun, når begge spalter er åbne. Den enkelte foton er med andre ord ikke kun klar over, om der findes en anden spalte. Den ved også, om den er åben. Ifølge Københavnerfortolkningen bliver vi derfor nødt til at konkludere, at hver foton går gennem begge spalter, og at hver foton kun interferer med sig selv.

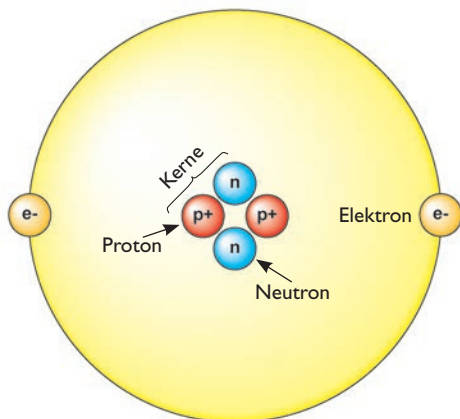
Hvis det lyder som nonsens, kan man glæde sig til det næste: i en lille variation af dobbeltpalteeksperimentet placeres små detektorer på hver af spalteåbningerne for at aflure, igennem hvilken fotonen går. Men det viser sig ikke at fungere. Blot en enkel detektor ødelægger interferensmønsteret. Det skyldes, at en måling med detektoren implicerer en fysisk interaktion med fotonen, og når det først er sket, vil fotonen fortsætte, som om der kun fandtes den ene spalte, hvor den blev målt. Fysikere har længe kæmpet med at fortolke sådanne kontraintuitive resultater. Ifølge den efterhånden mest anerkendte Københavnerfortolkning forestiller man sig, at der findes en bølgefunktion, som beskriver sandsynligheden for at finde en partikel i et givent punkt. Men indtil partiklen er registreret, antager man, at den eksisterer alle steder langs bølgefunktionen, dvs. alle steder på en gang. Hvis en partikel derfor *kan* passere gennem to steder på en gang, *vil* den også gøre det. Hvis partiklen registreres på vejen, vil bølgefunktionen "kollapse" og interferensmønsteret forsvinde.

Atomare fristelser

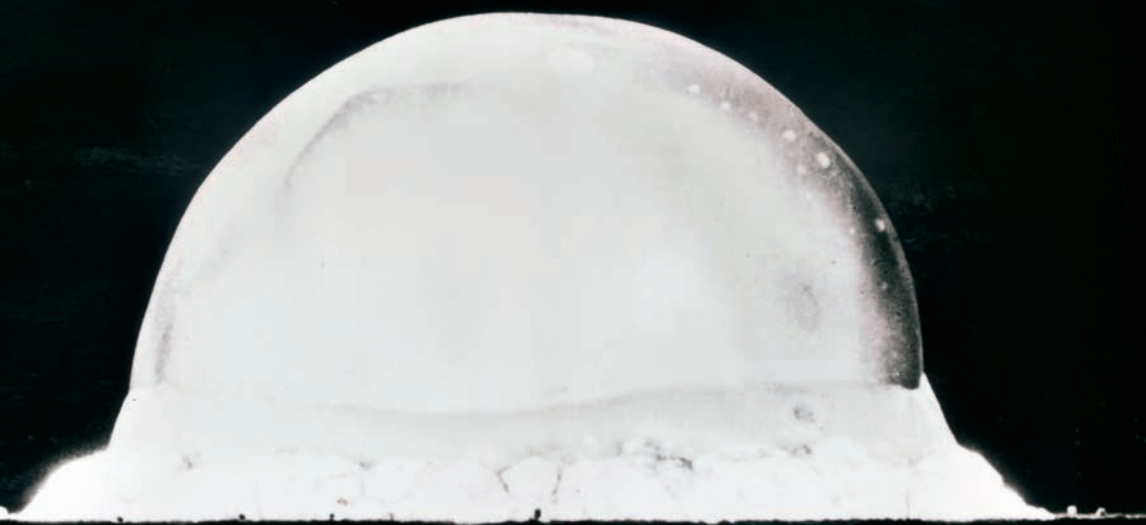
I slutningen af 1920'erne begyndte indholdet i den nye fysik om atomare fænomener at tegne sig klarere og klarere. Bohrs arbejde havde betydet mange principielle afklaringer, og der foregik en fortsat matematisk raffinering, først og fremmest via englænderen Paul Diracs (1902-84) arbejde, der inddrog betragtninger over elektronens bevægelse, når denne blev beskrevet ved hjælp af Einsteins relativitetsteori. Samtidig fandt mange nye og vanskeligt forståelige opdagelser sted. Dirac havde således teoretisk forudsagt eksistensen af positivt ladede elektroner, kaldet positroner, og de blev faktisk påvist i 1932. Samme år opdagede englænderen James Chadwick (1891-1974), at selv atomets kerne var sammensat af flere slags partikler, nemlig både positivt og neutralt ladede partikler.

Disse såkaldte neutroner kom til at spille en hovedrolle i forståelsen af visse typer atomare processer, der kunne føre til forandringer af grundstofferne og til energiprocesser med hidtil uhørt udløsning af energi. Det var disse "fissionsprocesser", der blev udnyttet i atombomber og atomreaktorer. I 1938 blev det almindelig kendt blandt atomfysikere og kvantemekanikere, at grundstoffet uran kunne spaltes. Det var tyskerne Otto Hahn (1879-1968) og Fritz Strassman (1902-80), som havde opdaget uranspaltningen, hvilket man senere kaldte for fission. Allerede kort tid efter opdagelsen fandt nogle franske fysikere ud af, at der under processen frigjordes nogle neutroner, som er de neutralt ladede partikler i en atomkerne. Spekulationerne om det var muligt at fremkalde en kædereaktion ved hjælp af disse neutroner, og dermed producere en atombombe, voksede hurtigt i det dengang antændte politiske klima. Bohr kunne i en kort note i fagbladet *The Physical Review* året efter gøre rede for, at det var den sjældne uran 235 isotop, som kunne udløse disse langsomme neutroner.

1. september 1939, dagen hvor Hitler gik ind i Polen, udkom en skelsættende artikel af Bohr og John Archibald Wheelers (f. 1911), som gjorde



James Chadwicks atommodel. Chadwick var den første, der opdagede, at atomets kerne også selv var sammensat af mindre partikler, nemlig henholdsvis protoner og neutroner.



0.025 SEC.

N

100 METERS

Da den italienske fysiker Enrico Fermi (1901-54) ved konstruktionen af den første atombombe under Manhattan-projektet blev konfronteret med muligheden for, at atombomben ikke kun ville eksplodere med en enorm kraft, men at den måske ville antænde hele atmosfæren og dermed udslutte menneskeheden, overvejede Fermi sagen et kort øjeblik og svarede: "Ja, der er en fare ... men det er så smukt et eksperiment!" Billedet viser den første atombombe, "Jumbo", der havde en plutoniumkerne ikke større end en tennisbold, blive prøvesprængt den 16. juli 1945 i New Mexico.

det klart for alle, at en tilstrækkelig mængde renfremstillet uran 235 kunne udløse en gigantisk mængde energi, som overgik enhver forestilling. Hvis man kunne fremstille en atombombe af uran 235, ville man dermed kunne sikre sig en sejr i Anden Verdenskrig. Både tyske og engelske fysikere spekulerede længe over, hvor meget denne "tilstrækkelig mængde" egentlig var. I et internt notat til

den britiske regering fra april 1940 (for nu var al forskning i atomenergi hemmeligstempet) konkluderede de tyske afhoppere Rudolf Peierls (1907-55) og Otto Frisch (1904-79), at et enkelt kilo renfremstillet uran 235 var nok til at starte en kædereaktion. Tyskerne havde derimod beregnet sig frem til, at det krævede flere hundrede eller flere tusind kilo. Resultatet var, at

englænderne satte et forskningsprojekt i gang for at bygge bomben, mens tyskerne ikke gjorde det. Først tre år senere, i 1943, fandt amerikanerne ud af, at den kritiske masse var ca. ti kilo. Det såkaldte Manhattan-projekt handlede om at bygge en atombombe, og “dagen, hvor Solen stod op to gange” for første gang var den 16. juli 1945, kl. 5:29:45 lokal tid, hvor en atomprøvesprængning tog sted i et upåagtet ørkenområde ved navn Alamogordoørkenen i midten af staten New Mexico. Kun 21 dage senere, den 6. august 1945, blev atombomben brugt for alvor og dræbte over 70.000 af Hiroshimas indbyggere med ét slag.

Disintegration eller enhed?

Efterhånden som undersøgelsesapparatet forbedredes i løbet af 1950'erne og 60'erne, blev forståelsen af de atomare fænomener tilsvarende mere kompleks. Mængden af elementarpartikler steg til flere hundrede, og der manglede totalt enhedsforståelse inden for området. Fysikerne arbejdede med en model, hvor al stof var underkastet i hvert fald fire fundamentale kræfter og en række partikler, der kunne være “bærere” af disse kræfter. Der var tyngdekraften, som Einstein havde udviklet en teori om, der var de elektromagnetiske kræfter, der viste sig i elektromagnetisk stråling og i kræfterne mellem elektron og proton i atomet, og to yderligere typer af kræfter i selve atomets kerne – de svage og stærke kernekrafter. Arbejdet for fysikerne drejede sig i stigende grad om at skabe overblik og forsimpning, f.eks. ved at finde fænomener, der kunne redegøre for de mange elementarpartikler, og teorier, der kunne redegøre for de forskellige kræfter i naturen – alt sammen ud fra en antagelse om, at der måtte findes ganske få fundamentale principper, og helst kun ét. Man søgte, hvad der blev kaldt en TOE – en “theory of everything”.

Det var heller ikke alle teoretikere, der fandt Bohrs fortolkning af kvantemekanikken acceptabel. Den satte grænser for erkendelsen, og den benægtede, at teorier om atomare forhold kunne eksistere uden også at involvere den teoretiserende person som observatør. Specielt Einstein var imod opgivelsen af forestillingen om, at fysikken skulle kunne give et objektivt billede af virkeligheden. Man kan sige, at Einstein kæmpede for fysikkens ontologiske status, dvs. den skulle kunne hjælpe til at begribe verden, som den “i virkeligheden er”, og ikke bare, som den kommer til syne for os.

Heisenberg og Bohr havde til gengæld – muligvis på hver deres måde

– opgivet forestillingen om en ontologisk funderet og deterministisk kausal beskrivelse af atomare processer. Brug af sandsynlighed som noget helt fundamentalt introducerede enten et subjektivt element i videnskaben eller, endnu værre for nogle, en form for indeterminisme i selve virkeligheden, hvor der lige pludselig ikke længere fandtes årsag og virkning. Einsteins relativitetsteori var en teori, der bevarede mulighederne for forudsigelse, fordi den tillod præcise beskrivelser og udledninger fra disse – men Bohr og Heisenberg benægtede, at der kunne foreligge sådanne præcise beskrivelser. Disse spørgsmål blev livligt diskuteret mange år frem, og modstandere af Bohrs fortolkning fremkom med tankeeksperimenter, der skulle vise, at han tog fejl. Han svarede på disse – typisk ved at vise, at de faktisk ikke gav de hævdede resultater, når de blev tænkt ordentligt igennem.

I løbet af 1950'erne og 60'erne fremkom alternative tolkninger af kvantemekanikken. Deres billede af den fysiske virkelighed var om muligt endnu mere komplekst, end hvad der syntes acceptabelt, hvis man skulle bevare klassiske forestillinger om simple sammenhænge i verden. F.eks. antog den amerikanske fysiker David Bohm (1917-92), at der bag kvantemekanikkens ligninger fandtes et stort antal skjulte variable, der aldrig ville kunne måles. I stedet for at forstå kvantemekanikkens ligninger som sandsynligheder, kunne Bohm således fortolke kvantemekanikken ontologisk, dvs. som reelle partikler og bølger bevægende sig på normal vis i et deterministisk univers. Andre alternativer bestod i at postulere, at der fandtes lige så mange verdener, som der fandtes mulige udfald af et kvantemekanisk eksperiment. For hvert lille kvante-udfald opstår der med andre ord uendelig mange paralleluniverser, som alle er identiske, men eksisterer i forskellige tilstande.

Den irske fysiker John Bell (1928-90) analyserede i 1960'erne situationen grundigt og påviste, at enten måtte man acceptere Bohr, eller også måtte man acceptere en model for verden, der involverede, at påvirkninger kunne ske øjeblikkeligt og over afstand, og altså dermed udbrede sig hurtigere end med lysets hastighed, hvilket ville være i strid med tanken om, at enhver overgang fra årsag til virkning må være kontinuert og ikke momentan – ligesom trækket fra et lokomotiv ikke går direkte til sidste vogn i togstammen, men bevæger sig via de mellemliggende vogne. Bells analyser var vigtige, fordi de ikke kun involverede tankeeksperimenter, men muliggjorde faktiske eksperimenter. Siden begyndelsen af 1970'erne har man gennemført sådanne. De har alle bekræftet Bells oprindelige resultater, og i dag anses Ein-

steins forestillinger om, at de atomare fænomener skulle kunne beskrives og forudsiges entydigt, og at de makroskopiske og mikroskopiske fænomener principielt skulle fungere ud fra samme principper, for at være forkerte.

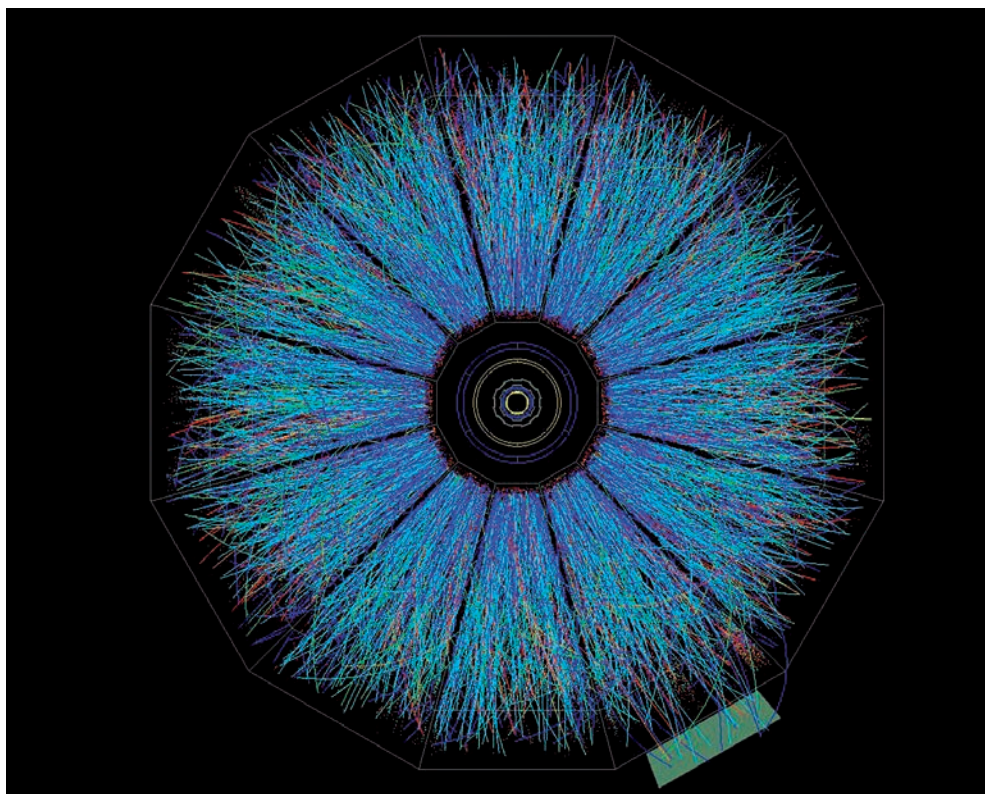
Enten er verden meget anderledes, end vi normalt tror, eller også må vi antage, at “virkeligheden” i sig selv – især når vi ved målinger vil opnå erkendelse om, hvad der sker på det atomare niveau – forhindrer os i at vide, hvad der egentlig foregår; og selve forestillingen om, at der foregår “noget egentligt”, er i denne sammenhæng uklar. Det er umuligt at skille viden om det observerede fra viden om samspillet mellem observatør og det observerede.

Den dag i dag strides fysikere og filosoffer om den rette fortolkning af kvantemekanikken. Der er mange bud og ingen “objektiv” grund til at tro mere på den ene forklaring end på den anden – undtagen hvis man mener, at forskelligheden i fortolkningerne af kvantemekanikken i sig selv kunne ses som et tegn på, at kvantetilstande er tilstande af utilstrækkelig viden snarere end tilstande af virkeligheden.

Hele udviklingen omkring relativitetsteorien og kvantemekanikken har haft afgørende konsekvenser for forståelsen af, hvad videnskab egentlig er. Man så på forholdsvis kort tid teorier, der havde været anset for helt fundamentale forudsætninger for al erkendelse, blive forkastede og erstattet med andre og meget vanskeligt forståelige ideer. Hvor man omkring år 1900 havde en forestilling om et sammenhængende verdensbillede, så medførte udviklingen af videnskaben, at dette fortonede sig fuldstændigt. Hvor det omkring år 1900 var muligt stadig at tage udtrykket “verdensbillede” bogstaveligt, så gik man i løbet af århundredet væk fra “billeder” og over til succesrige matematiske formalismer – formalismer, som kun meget få kunne forstå og forbinde noget med. Ikke desto mindre fik teorierne masser af praktiske konsekvenser og teknologiske anvendelser. Transistoren, laseren, atombomben, atomreaktoren, og dermed den politiske situation efter 1945, og vores dagligdags situation med cd-afspillere og computere, alt dette blev frembragt i kraft af de nye teorier.

Eksotiske tilstande

I jagten på atomers eksotiske tilstande har fysikere i løbet af 1900-tallet udviklet stadig større “super-colliderer” for at finde stadig mindre partikler. Ville man skrive en ultrakort europæisk idehistorie om, hvad der holder sammen



Tusinder af partikler eksploderer i kollisionspunktet for to guldatomer, som er blevet affyret mod hinanden i Brookhaven National Laboratorys partikelaccelerator, der har en styrke på 100 gigaelektronvolt. De elektrisk ladede partikler kan kendes ved deres afbøjede baner i måleinstrumentets magnetfelt.

på verden, kunne den formuleres omtrent sådan her: det hele begyndte med grækeren Thales. Han mente, at verden bestod af vand. Han var søfarer og en praktisk mand, der med sine teorier om verdens gang opmuntrede folk til at

overvinde mytologien og tænke selv. Efter Thales kom mange andre bud på verdens substans. Anaximenes talte om luft, Anaximander om en slags ild, og Demokrit var overbevist om, at alt i kosmos bestod af atomer og det tomme rum. I en lettere modificeret udgave har denne antagelse holdt stand helt op til det 20. århundrede. Så kom Niels Bohr og kvantemekanikken og lavede om på det hele igen. Atomer var slet ikke de mindste bestanddele, idet de selv bestod af elektroner og en kerne (af protoner og neutroner). Og ligesom Thales inspirerede sine elever til selv at arbejde videre, har fysikere efter Bohr forsøgt at flække atomkerner til endnu mindre dele. Siden har man opdaget et helt virvar af subatomare partikler: neutrinoer, positroner og et helt dusin af quarks med vidt forskellige egenskaber og masse.

Men historien slutter ikke her. Blandt de nyeste teorier finder man bl.a. “superstrengteorien”, som siger, at quarks består af noget endnu mindre. De består af en dansende lille trevl, en “superstreng”. Enhver partikel er ifølge superstrengteorien et udslag af en bestemt svingning af en vibrerende streng. Ligesom en violin kan skabe toner, kan superstrengen lave partikler og naturkræfter. Naturen er musik, spillet af en ukendt stryger. Man har ganske vist ikke eftervist superstrengteorien eksperimentelt. Det kan man ikke. Strengene er så små, at de ikke har nogen masse eller udstrækning, og de ligner derfor mest af alt en matematisk konstruktion. Til gengæld håber fysikerne, at superstrengteorien på et tidspunkt – når den vanvittigt komplicerede matematik en dag er regnet igennem – kan opklare alle verdens fysikkens problemer.

Den vil være en “enhedsteori”, som forener både Bohrs kvantemekanik (som omhandler de mindste dele som atomer og elektroner), Newtons fysik (som omhandler den dagligdags fysik, som vi kan se med det blotte øje) og Einsteins relativitetsteori (som omhandler de kæmpestore ting som stjerner og galakser). Den dag, det sker, vil superstrengen blive den basale tråd af forståelse, som binder hele verden sammen og gør den til et begribeligt sted. Det er i hvert fald drømmen.

Der er også en række andre teorier om universets mest elementære byggeklodser med kryptiske navne som “M-teori” og teorien om “loop quantum gravity”. Fælles for dem er dog, at de indtil videre er hinsides vores eksperimentelle formåen. Man kan simpelthen endnu ikke efterprøve dem og derfor heller ikke be- eller afkræfte deres rigtighed med normale videnskabelige metoder.