

DET fri tanke
ODELBARA

NIELS BOHR

OCH DEN MODERNA FYSIKENS
FÖDELSE

TOR NØRRETRANDERS

ÖVERSÄTTNING CLAES BERNES



FRI TANKE

Stockholm, 2025

www.fritanke.se | info@fritanke.se

FRI TANKE är en arena för vetenskap, filosofi och idédebatt.
Vi verkar för bildning och demokrati genom att lyfta fram viktiga
natur- och samhällsvetenskapliga frågor i upplysningens anda.

© Tor Nørretranders, 2022. All rights reserved.

© svensk utgåva Fri Tanke, Stockholm 2025

ISBN 978-91-89733-92-3

ORIGINALTITEL

Det udelelige – Niels Bohrs aktualitet i fysik, mystik og politik

ÖVERSÄTTNING © Claes Bernes

SAKGRANSKARE Bengt Gustafsson

FORMGIVNING OMSLAG Ateljé Grotesk

SÄTTNING Magnus Frederiksen

TYP SNITT Sabon Next

TRYCK Livonia Print, Riga, 2025



Översättningen har
utgivits med stöd av
Nordiska ministerrådet

INNEHÅLL

Författarens kommentar	9
Förord	II
 DEL I. FYSIK.....	19
1. Odelbart på grekiska.....	21
2. Språnget.....	33
3. Ut ur behållaren.....	49
4. Snurran.....	63
5. Vågfunktionen	75
6. Obestämdheten.....	93
7. Det tänkta experimentet.....	113
8. Dolda variabler	141
9. Aspects experiment	161
10. Efter Aspect.....	175
11. Bilmekanikernas resa	185
12. Ett förenat universum	195
 DEL II. MYSTIK.....	211
13. Paradoxer.....	213
14. Ett måleri med ord.....	231
15. Zirkeln	261
16. I verkligheten	285
17. Kvantholisterna	301
18. Helhetens nätverk.....	327
19. Vetenskapens nya former	349

DEL III. POLITIK.....	371
20. Kapplöpning	373
21. En öppen värld	389
22. Atomer för fred.....	401
 DEL IV. DET ODELBARA	 415
23. Blandade karameller.....	417
Efterord 2022. Nästa generation	437
 DEL V. LITTERATUR.....	 453
Noter.....	455
Bibliografi.....	484
Personregister	495

”

JAG TRÄFFADE OCKSÅ Niels Bohr. Det var intressant. Han kom dit, på den tiden kallade han sig Nicholas Baker och han kom tillsammans med Jim Baker, sin son, som egentligen heter Aage. De hade rest från Danmark, och de kom på besök, och som ni vet var de två väldigt kända fysiker. Även för höjdarna var han som en stor gud; de lyssnade på honom. Och han berättade om saker och ting. Vi var på ett möte och alla ville träffa den store Bohr. Det var massor av folk och jag stod i ett hörn någonstans och vi pratade om, diskuterade, problemen med bomben. Det var första gången. Han kom och han försvann och från hörnet där jag stod fick jag bara en skymt av honom mellan några personers huvuden. Nästa gång han skulle komma, på morgonen den dag han skulle komma, fick jag ett telefonsamtal.

»Hallå, är det mr Feynman?«

»Ja.«

»Det är Jim Baker«; det var hans son. »Min far och jag skulle vilja tala med er.«

»Med mig? Jag är Feynman, jag är bara ...«

»Det stämmer.«

Så klockan åtta på morgonen, innan folk hade vaknat, gick jag dit. Vi gick in på ett kontor på det tekniska området och han sa: »Vi har funderat på hur vi skulle kunna göra bomben effektivare och vi har kommit fram till den här idén.« Jag sa: »Nej, det kommer inte att fungera, det är inte effektivt, bla, bla, bla.« Då sa han: »Men om man gör så här i stället?« Jag sa: »Det låter lite bättre, men det finns en idiotisk tanke i alltihop.« Vi fortsatte på det sättet, fram och tillbaka. Det finns en sak jag alltid varit dålig på, jag har aldrig förstått vem jag talar med. Det enda som bekymrar mig är fysiken. Om idén verkar usel säger jag att den verkar usel. Om den verkar bra säger jag att den verkar bra. Klart och tydligt, jag har alltid betett mig på det sättet. Så vi höll på att diskutera massor av idéer i ungefär två timmar, och

tvistade och utväxlade argument. Den store Niels som alltid tände sin pipa, ständigt, den slocknade hela tiden. Och hans sätt att prata var obegripligt. Han sa: »Mummel, mummel«, jag förstod knappt vad han sa, men jag hade lättare att förstå hans son. Till slut tände han sin pipa och sa: »Ja, nu kan vi nog kalla in höjdarna.« Och så kallade de in alla de andra killarna och hade en diskussion med dem. Och efteråt berättade sonen vad som hade hänt – förra gången Niels var där hade han sagt till sin son: »Kommer du ihåg vad den där lille killen som stod längst bak där borta heter? Han är den ende som inte är rädd för mig och säger rent ut när jag kommer med en vansinnig idé. Så nästa gång vi ska diskutera idéer kan vi inte göra det med de här killarna som bara säger »javisst, dr Bohr«. Få tag på den killen först, vi pratar med honom först.«

Richard Feynman

ur *Lusten att upptäcka*, Vetenskapliga klassiker, Fri Tanke, 2020.

Författarens kommentar

NIELS BOHRS BETYDELSE har inte minskat under de 40 år som har gått sedan denna bok gavs ut första gången. Tvärtom. Bokens efterord beskriver kortfattat hur både Bohrs och Einsteins visioner sedan dess har utvecklats på dramatiska sätt som säkerligen skulle ha överraskat dem bägge.

Efter att den nya danska utgåvan hade publicerats på våren 2022 mottog Alain Aspect Nobelpriset i fysik i december samma år. Se mer om detta i bokens efterord på s. 421.

Enstaka rättelser har genomförts här och var i texten, särskilt av tidsangivelser. Den svenska utgåvan är lätt redigerad i förhållande till den danska från 2022.

Trevlig läsning!

T.N.

Förord

»Populärvetenskap« är en ny konstform med prägel av såväl lärobok och reportage som filosofisk essä och sociologisk profetia.«

Aldous Huxley¹

DETTA ÄR INTE en bok om Niels Bohr. Det är en bok om *Niels Bohrs betydelse*: En kritisk granskning av vad Niels Bohrs gärning inom fysik, filosofi och fredsfrågor innebär för människor som deltar i världens gång hundra år efter det att Bohr föddes.

Av det som följer ska man alltså inte förvänta sig en biografisk studie av Niels Bohrs liv, eller en traditionell historisk redogörelse för hans tänkande. Även sådana verk har getts ut i samband med hans 100-årsdag, som sig bör.

Syftet här är ett annat: att bakom Niels Bohrs uppburna gestalt söka efter den kärna av insikt om villkoren för mänskligt vetande som vägledde Bohrs verk och är anledningen till hans betydelse. Betraktar man Bohr med hans betydelse som utgångspunkt blir det helt uppenbart hur stor han var som tänkare och personlighet. En kritisk distans till Bohrs verk är en förutsättning för att detta verk i dag ska kunna tala så tydligt till oss som både det och vi själva förtjänar.

Under första hälften av 1900-talet upplevde en liten, internationell grupp av fysiker en mänsklig omvälvning som till att börja med gällde deras egen världsbild men sedan också fick avgörande följder för världsläget. Inom loppet av ett par decennier blev det klart för dem att de var tvungna att överge några av de mest grundläggande inslagen i den uppfattning om världen som vetenskapen i århundraden hade tagit för given. Det blev tydligt att man behövde överge rader av invanda föreställningar om det universum som människan bebor. Det blev inte minst tydligt att man helt måste omvärdera den roll som människan

spelar i detta universum. Och det blev tydligt att människan nu fick tekniska hjälpmedel i sin hand som totalt skulle förändra hennes situation på ett sätt som vi fortfarande knappt har förstått.

Det fysikaliska teoribygge som blev resultatet av denna omvälvning var *kvantmekaniken*. Det är en teori som skiljer sig i grunden från tidigare epokers fysikaliska teorier. Och därmed även i grunden från den bild av världen som vi använder oss av till vardags.

Hittills har kvantfysikens kunskapsteoretiska innebörd bara fått ytlig inverkan på det allmänna begreppet om tillståndet i kosmos. Det beror inte minst på att flertalet fysiker för länge sedan har slutat fundera över den nya världsbild som de utnyttjar under sina beräkningar. De har lärt sig kvantmekanik på universitetet, utan att där ha fått någon inblick i hur djupa existentiella och filosofiska kriser denna världsbild åstadkom hos fysikerna som utvecklade den. De filosofiska aspekterna av Bohrs fysik anses numera vara irrelevanta när studenterna ska lära sig fysik – så är det inte minst i Köpenhamn, och inte minst på det fysikaliska institut som är uppkallat efter Niels Bohr.

Kvantmekaniken *fungerar* helt enkelt enastående väl när man ska räkna på fysikaliska förhållanden, så varför bekymra sig över att teorin bygger på förutsättningar som på ett avgörande sätt bryter mot den gängse världsbilden. Förutsättningar som ingen förstår, men som fysikerna ändå har vant sig vid.

Den här fysiken utvecklades av en stor grupp människor, bland vilka Niels Bohr var den obestridde ledaren, både som fysiker och som filosof.

Ett utmärkande drag hos Bohrs begrepp om den nya fysiken är att det var *utpräglat* intuitivt. Bohrs tolkning av detta nya vägleddes inte bara av rationellt resonemang utan också av intuition. Och denna intuitiva insikt gällde inte bara fysiken som sådan utan också dess skräckinjagande filosofiska och politiska konsekvenser.

Kvantmekaniken har lett till en världsbild som påminner många om buddhismen. Och till en värld som har tvingats inse att denna kvantmekanik kan användas för tillverkning av bomber.

Niels Bohr engagerade sig som *person* i försöken att få grepp om alla dessa sidor av det genombrott som kvantmekaniken kom att betyda.

Hans insats berör fysiken, filosofin och freden i lika hög grad. Och hans budskap var en enda odelbar intuition som har att göra med alla dessa tre aspekter av människans tillvaro.

Men just för att Bohrs insikter i så hög grad präglades av intuition är det förklarligt att han inte alltid lyckades formulera sina idéer så tydligt att de blev lätta att förstå. Många var oeniga med honom. Bland fysiker fanns det många som aldrig kunde acceptera Bohrs fysik – till dem hörde i synnerhet Albert Einstein, som utmanade Bohr i en rad berömda debatter som spelar en huvudroll i den här boken. Bland filosofer blev Bohr knappast förstådd, i varje fall inte under sin levnad. Och på fredsfronten, som har fått förnyad aktualitet, är Bohrs insatser helt förbisedda.

Boken kommer inte att förtiga det faktum att Bohr själv var en av huvudorsakerna till att han inte blev förstådd. En kritisk granskning av Bohrs arbete visar tydligt att han i avgörande ögonblick var oförmögen att skilja mellan räckvidden hos sin intuition och räckvidden hos sina argument. Något som på sätt och vis är *skrämmande* med Bohr är att experimentella studier nu – femtio år efteråt – har gett honom rätt i en betydelsefull tvist från 1935, där hans argument – sådana han formulerade dem – framstod som svaga men hans insikter uppenbarligen i lika hög grad var tillförlitliga.

Bohrs sätt att arbeta och tänka kännetecknas av dialog, dialektik och komplementära synsätt. Därför är det omöjligt att förstå Bohr utan att förstå hans »motståndares» synsätt, framför allt Einsteins. Men den mytologiserade Bohr, den danske nationalhjälten, har inga värdiga motståndare i myterna. Den här bokens ståndpunkt är att om man inte förstår Einstein kan man inte förstå Bohr. Utan den kritiska analys som Bohrs lärjungar i sin hängivenhet inför läromästaren har försummat blir det bohrska bidraget till människans vetande över huvud taget inte begripligt.

Bokens redogörelse för Bohrs betydelse är indelad i tre ämnesområden: fysik, mystik och politik.

Inom fysiken har kvantmekanikens grundvalsproblem – som engagerade Bohr så mycket – de senaste åren återigen aktualiserats efter ett halvsekels stagnation, inte minst vållad av den fysikergeneration som

är uppfödd med kvantfysiken och därför knappt anar hur dramatiska dess grundvalsproblem faktiskt är. Debatten har återupplivats tack vare nyare experiment och teoretiska studier.

Inom filosofin och mystiken har kvantmekanikens budskap det senaste decenniet lagts till grund för en ny och sammanhängande världsåskådning. Man försöker tolka människans situation på ett nytt sätt som förenar huvuddrag i både västerländska och österländska kulturer. Denna nya världsbild har åtskilliga övertygande inslag, men lika många egenskaper som är mindre övertygande. Strävandena att med stöd av kvantmekaniken nå bortom det västerländska tänkandet ansluter sig i mer än ett avseende till avgörande uppfattningar hos Bohr, som definitivt inte är mindre radikala än dessa strävanden själva.

Inom fredsdebatten, som de senaste fem åren blossat upp på nytt, har Bohrs bidrag till förståelsen av kärnvapenfrågan förbisetts, och det har förbisetts med orätt. Hur naivt och ytligt hans bidrag än kan se ut vid första anblicken innehåller det ändå ett centralt budskap till våra dagars kärnvapendebatt – och väl att märka ett budskap som riktar sig till båda sidorna i denna debatt.

Arbetsmetoden bakom den här boken har varit *vetenskapsjournalistisk*: avsikten har varit att redogöra för pågående diskussioner: att lyfta fram motsättningarna och att höra båda parterns åsikter om frågorna. Det handlar alltså om ett reportage, en redovisning, som på ärligast möjliga sätt försöker förmedla synpunkter och insikter till människor som känner att frågorna är viktiga men som i övrigt har haft annat att göra än att sätta sig in i fysik och filosofi på vetenskaplig nivå.

Men texten innefattar också mina egna försök att förstå den omvälvning av världsbilden som utgör bokens ämne. Läsaren bör därför vara medveten om att det emellanåt (särskilt i Del II, III och IV) finns formuleringar som är präglade av mina värderingar. Förekomsten av det lilla ordet »jag« visar var jag bedömer att resonemanget inte har stöd av klokare personers utredningar.

Jag är mycket tacksam för de intervjuer och diskussioner som har ingått i arbetet med den här boken. Tack till fysikerna Alain Aspect, John Bell, David Bohm, Fritjof Capra, Peder Voetmann Christiansen, Bernard d'Espagnat, John Ellis, Bjørn Felsager, Philippe Grangier, 3 ×

Hansen vid UA2 på CERN, Benny Lautrup, Holger Bech Nielsen, D. Nanopoulos, Jim Peebles, Martin Rees, Dennis Sciama, Steven Weinberg och John Wheeler. Bland filosoferna ett särskilt tack till Søren Kjørup och Peter Zinkernagel. Bland fredsforskare Anders Boserup, bland holister Per Kjærgaard Rasmussen och flera andra.

Dessutom vill jag gärna framföra ett tack för praktisk hjälp till bl.a. Aage Bohr, Hilde Levi, Erik Rüdinger och Aage Winther, Niels Bohr-arkivet (Niels Bohr-institutet, Köpenhamn) och M. Moss, Niels Bohr Archive (American Institute of Physics, Washington). Därtill ett tack för hjälpen från H.H. Koch, Jørgen Lumbye och Jørgen Steen Nielsen.

Ingen av de nämnda har det ringaste ansvar för den här bokens många brister och eventuella fel. De flesta av dem har inte fått möjlighet att informera sig om bokens slutliga disposition, flera av dem inte ens om dess syfte. Läsaren bör därför inte uppfatta namnen ifråga som stöd för bokens ståndpunkter.

För kommentarer till den första versionen av manuskriptet tackar jag varmt Peder Voetmann Christiansen, Per Kjærgaard Rasmussen, Søren Kjørup, Anders Boserup, Bjørn Felsager, Peter Zinkernagel, Hanne Fokdal, Uffe Andreassen m.fl. De har inget ansvar för fel och brister i vare sig bokens disposition eller dess detaljer. Jag tackar särskilt för hänvisningar till filosofer som jag under manuskriptdiskussionen insåg hade varit värda att presentera närmare i anslutning till det som tas upp i boken. Till dem hör bl.a. Charles S. Peirce (Voetmann), Georg Wilhelm Friedrich Hegel (Boserup), Immanuel Kant och Ludwig Wittgenstein (Kjørup).

Litteraturen om bokens ämnen är enorm; den innefattar långt mer än vad som har gått att täcka med det här arbetet. Läsare som vill gå vidare kan hämta viss vägledning i bokens femte del. Här finns en översikt över den litteratur som ligger till grund för boken samt noter till huvudtexten. Noterna innehåller bara källhänvisningar eller spetsfundigheter på detaljnivå som inte bör störa läsningen. Man kan lugnt läsa vidare utan att se efter i noterna.

Jag önskar god läsning. Delar av det ämnesområde som presenteras här betraktas i allmänhet som svårbegripliga. Det finns sålunda avsnitt (särskilt i kapitlen 4, 7, 8 och 9) som kräver att man håller tungan rätt

i mun mer än vanligt. För att förstå dem behöver man dock ingenting annat än vanlig logik – och viljan att överge den. Jag beklagar om det från min sida har gjorts svårare än nödvändigt.

Skulle man misströsta bör man minnas Niels Bohrs ord:

»Men om någon säger att han kan tänka på kvantproblemen utan att bli vimmelkantig visar det bara att han inte har förstått det minsta av dem.«²

Skulle den här boken lyckas göra läsaren vimmelkantig har den inte skrivits förgäves.

Köpenhamn, maj 1985

T. N.

DEL I

Fysik

»Det evigt obegripliga med världen är dess begriplighet.«

Albert Einstein

»Det är fel att tro att fysikens uppgift är att ta reda på hurdan naturen *är*. Fysiken handlar om vad vi kan säga om naturen.«

Niels Bohr

»Gud spelar inte tärning.«

Albert Einstein

»Sluta upp med att tala om för Gud vad han ska göra.«

Niels Bohr*

* Se i noterna om källorna till dessa citat. Formuleringen av det fjärde citatet kan ifrågasättas.

Odelbart på grekiska

RICHARD P. FEYNMAN var en av USA:s mer färgstarka fysiker. Han gav mycket stora bidrag till vår förståelse av den märkliga kvantvärlden. År 1965 tilldelades han Nobelpriset för den insatsen. Men det han är mest känd för bland fysiker i allmänhet är snarare de introduktionsföreläsningar om fysik som han i början av 1960-talet höll på California Institute of Technology. De väckte så stor uppmärksamhet att de gavs ut i skriftlig form som *The Feynman lectures on physics* i tre stora band. Det var en anmärkningsvärd publikation, och detta inte bara för att författaren i bokens förord är avbildad med ett stort leende och en congatrumma.

Feynmans utläggningar om fysik har framför allt blivit kända genom att han är en av de fysiker som har lagt störst vikt vid ämnets åskådlighet. Hans förklaringar bygger hela tiden på att det ska gå att *förstå* den fysikaliska innebörden hos de teorier som beskrivs. De tre banden med fysikföreläsningar ger därför läsaren möjlighet att intuitivt ta till sig det viktiga i de fysikaliska teorierna.

Det här kan låta ganska självklart. Men en snabb titt i flertalet andra läroböcker i fysik på grundnivå kan genast övertyga en om att de flesta som undervisar i ämnet nöjer sig med en matematisk härledning av de teorier som ska läras ut. Faktum är att många fysiker, och kanske i synnerhet fysiklärare, är helt tillfreds med en beskrivning som är rent matematisk, oavsett om den är åskådlig eller ej.

Det handlar om ett slags stil eller temperament hos fysikerna. Några av dem betraktar de fysikaliska teorierna som rena matematiska abstraktioner, kännetecknade av sin egen skönhet. Matematiken måste naturligtvis stämma med experimentella fakta – det hör till spelets regler – men i övrigt saknar det betydelse om teorierna är begripliga eller åskådliga.

Det kan vara svårt att i ord beskriva vad det innebär att en förklaring av ett fysikaliskt fenomen är åskådlig, intuitivt förståelig. Och det är ingen slump. Orden kommer från vår vardag och räcker inte till när vi ska försöka begripa de besynnerliga kunskapsområden som fysiken har gett sig i kast med. Men det är kanske inte heller så viktigt att det går att sätta ord på dem. De flesta av oss har bilder inom oss: bilder som åskådliggör hur saker och ting fungerar.

Få av oss tänker på en matematisk formel när vi ska förklara varför människor inte ramlar av när jorden snurrar kring sin axel och dessutom susar fram runt solen. Vi har en bild av gravitationen inne i huvudet – en bild av en dragningskraft som utövas av osynliga, mullrande lavamassor som är mycket tunga. Men i grund och botten förstår vi inte vad gravitation är för något (och det gör för övrigt inga fysiker heller när det kommer till kritan).

De flesta av oss känner en viss tillfredsställelse över att ha sådana bilder i vårt inre, men en del fysiker anser att de är meningslösa eftersom vi egentligen ändå inte förstår dem. Formlerna däremot utgör en exakt och fullständig redovisning av hur man kan förklara det faktum att vi inte ramlar av från jorden när den snurrar och susar fram.

Det är inte svårt att avgöra i vilken av de två fysikergrupperna Richard Feynman bör placeras: han hör inte till dem som anser att formeln står för det enda riktiga sättet att beskriva fysik. Han menar tvärtom att det är helt avgörande att man kan *förstå* fysiken i form av bilder. Han åskådliggör.

Därför är hans föreläsningar så populära bland folk som gärna vill förstå fysik. (Medan andra anser att de är odemokratiska: antingen förstår man dem inte, och då är man chanslös, eller också – hävdar en del fysiklärare – skulle man under alla omständigheter ha förstätt vad det handlar om. Därför finns det fysiklärare vid universiteten som föredrar mer formella (formelfyllda) läroböcker än Feynmans. Där kan nämligen alla hänga med – de som inte förstår kan helt enkelt lära sig formeln utantill och räkna igenom alla övningarna!)

Feynman inleder i karaktäristisk stil de tre banden med föreläsningar med en fråga som är relevant för vårt ämne. Dumt och naivt undrar han:

Om all vetenskaplig kunskap skulle utplånas genom någon katastrof och bara en enda mening kunde vidarebefordras till efterkommande generationer av varelser, vilket påstående skulle kunna förmedla mest information med minsta antalet ord?

Det där är ju en konstig fråga, men svaret är mycket tydligt. Feynman fortsätter:

Jag anser att det är atomteorin: att allting består av atomer – små partiklar som befinner sig i evig rörelse och attraherar varandra när de är ett stycke bort från varandra men stöter ifrån varandra när de pressas samman.¹

Man skulle också kunna uttrycka det lite enklare, som Feynman säkert gjorde i de ursprungliga muntliga föreläsningarna: allt består av atomer – små kulor som hela tiden far omkring. De dras mot varandra, men när man försöker pressa ihop dem är de motståndskraftiga som biljardbollar.

Vad kan de kommande generationerna då lära av detta? Feynman föreslår att man ger sig in på ett närmare studium av vatten. Går man tillräckligt grundligt tillväga med hjälp av ett supermikroskop kan man se att vattnet består av små enheter som alla är likadana. Det här är vattenmolekyler, som är sammansatta av atomer. Varje molekyl, som liknar ett huvud med två öron, består av tre atomer, en av ett slag och två av ett annat slag. (Syre respektive väte.) Molekylerna är i ständig rörelse, inte prydligt och ordentligt utan i form av ett oordnat darrande eller fladdrande. Den enda ordning som råder tar sig uttryck i att molekylerna håller samman. De vibrerar var för sig men håller likafullt en viss kontakt. De dras i någon mån till varandra utan att för den skull vara fastlåsta.

Denna ständiga rörelse betecknar vi i dagligt tal som värme. Ju varmare vattnet är, desto snabbare rör sig atomerna. Värmer man upp vattnet ännu mer börjar de enskilda molekylerna skaka allt snabbare och kraftigare. Varje liten molekyl fladdrar så mycket att de tre sammankopplade atomerna börjar dansa på egen hand. Blir

temperaturen tillräckligt hög kommer molekylerna att fara omkring var för sig, helt utan samordning. Det tillståndet betecknas i dagligt tal som vattenånga.

Det som skiljer vatten i vätskeform från vatten i form av ånga är inte beståndsdelarna utan tillståndet: hastigheten är annorlunda, men inte det som rör sig. Vattenånga är en gas just för att vattenmolekylerna far fritt omkring och fyller upp hela det utrymme som står till deras förfogande. Vatten i flytande form håller sig däremot snällt på botten i den behållare där det befinner sig.

Om vi i stället sänker temperaturen vet vi att vattnet fryser till is. Vattnet blir ett fast ämne som behåller sin form oavsett hur behållaren ser ut. Isen består av samma slags molekyler i ett annat rörelsetillstånd. De enskilda molekylernas vibration har blivit så obetydlig att de bildar ett fast mönster där varje molekyl har en bestämd plats. De individuella rörelserna är så långsamma att den ordnade kristallstrukturen inte bryts sönder.

På det här sättet blir det begripligt hur vatten kan förekomma i tre olika tillstånd. Man förstår också förångningsprocessen: enskilda molekyler sliter sig loss från vätskans sammanhängande molekylsamling och far till väders som ånga. Det är inte svårt att inse att ju varmare det är, och ju snabbare vätskemolekylerna därmed vibrerar, desto fler blir de molekyler som sliter sig loss från det sammanhängande vattnet. På samma sätt kan vi intuitivt ana att den kvarvarande vätskan blir svalare när de snabbaste vattenmolekylerna ger sig av och blir till ånga.

Det viktiga i den här bilden är att ämnet består av likadana små kulor som inte förändras även om temperaturen förändras och isen smälter till vatten. Det är knappast någon nyhet att vatten kan förvandlas till is och ånga. Den gode gamle greken Thales från Miletos, som levde kring år 600 före vår tideräkning och betraktas som den förste västerländske filosofen/vetenskapsmannen, förklarade att »allt består av vatten«, en anspelning på insikten att moln och hav utgjordes av samma ämne.

Men det var inte Thales som kom på det där med atomerna, de små kulorna som rör sig med olika hastigheter. Det var en annan grek, Demokritos, som levde ett par hundra år senare. Demokritos

försökte lösa en långvarig konflikt inom den grekiska filosofin – en konflikt som går igen ännu i våra dagar. På ena sidan fanns en man vid namn Parmenides som ansåg sig kunna visa att världen var en enda stor, sammanhängande helhet som aldrig förändrade sig. På den andra sidan fanns en annan man, Herakleitos, som ansåg att allting hela tiden förändrades och att ingenting förblev konstant. Båda hade goda argument för sin sak.

Parmenides kunde peka på att om tingen inte hängde samman med varandra måste det finnas mellanrum mellan dem. Även dessa mellanrum måste vara en del av världen. Världen var alltså sammanhängande, för i annat fall var den uppdelad av något som inte var en del av världen. Herakleitos, som i likhet med Parmenides levde kring år 500 före vår tideräkning, kunde å sin sida peka på det ganska uppenbara faktum att saker och ting förändras och i själva verket inte alls hänger samman utan är skilda från varandra. Herakleitos uppfann dialektiken för att beskriva de inslag i världen som står i inbördes motsättning och förändringsskapande konflikt. Parmenides menade att iakttagbara förhållanden av det slaget utgörs av illusioner. Till sin hjälp hade han lärjungen Zenon, som logiskt bevisade att rörelse var en omöjlighet – något som vi ska återkomma till i den här boken.

Demokritos försökte medla i tvisten mellan Parmenides och Herakleitos genom att införa ett nytt begrepp: *atomos*. Det är ett grekiskt ord som betyder *odelbar*. Poängen var enkel: Parmenides fick sin oföränderliga enhetlighet i form av små kulor som rörde sig i tomrummet. Varje kula bar precis den prägel av cirkulär evighet som Parmenides ansåg att världen kännetecknades av. Var och en av dem utgjorde ett litet stycke oföränderlighet. Herakleitos å sin sida tilldelades rörligheten och föränderligheten, för de små kulorna kunde ju byta plats med varandra, och alltså kunde det hända saker. De inbördes kopplingarna mellan dessa odelbara atomer skulle kunna bestå av små krokar eller liknande anordningar.

Det avgörande var att man i det ena lägret hävdade att det inte kan råda förändring överallt, men att det samtidigt är uppenbart att förändringar förekommer. Någonstans måste den eviga förändringen upphöra, menade Demokritos, och det skedde alltså hos atomerna.

Men priset för detta medlingsförsök var föreställningen att det fanns tomrum mellan atomerna. Det här fick senare grekiska filosofer att överge idén om atomer, som fick ligga i träda under större delen av medeltiden eftersom tomrum ansågs vara nonsens.²

Ovannämnda bild av atomer ligger snubblande nära den moderna vetenskapliga uppfattningen om materiens struktur, sådan den tog form i början av 1900-talet. Under 1700- och 1800-talen hade det blivit tydligt att kemiska reaktioner uppvisade en påtaglig grad av likformighet, som var lättast att förklara om alla ämnen bestod av specifika beståndsdelar som gick att kombinera. Beståndsdelarna ifråga var grundämnena, av vilka det måste finnas åtskilliga dussin. Varje grundämne bestod av atomer som sinsemellan var precis likadana.

Atomer av olika grundämnena kunde kombineras till molekyler, som därmed utgjorde de minsta beståndsdelarna av ett kemiskt ämne. Det står intuitivt klart att man inte kan åstadkomma en mindre mängd vatten än en enskild vattenmolekyl, för om man delar den molekylen får man dess egna beståndsdelar, atomer av grundämnena väte och syre. Och då är det inte längre vatten.

Föreställningen om atomer, små byggstenar, kunde alltså utnyttjas inom kemin, liksom den utnyttjades inom fysiken för att förklara exempelvis värme. Så idén om atomkulorna vann spridning.

Men kulorna är mycket små. Vi kan inte se dem med blotta ögat och inte ens fotografera dem med mikroskop. Deras storlek kan räknas i miljondelar av en millimeter. Om ett äpple förstörades till hela jordens storlek skulle äpplets atomer bli av samma storlek som det ursprungliga äpplet.

Så i många år förblev det oklart om atomer bara var ett bekvämt sätt att beskriva världen eller om de faktiskt existerade. Var atomer ett användbart tankehjälpmedel, ett begrepp som var till nytta men inte nödvändigtvis avspeglade verkliga förhållanden? Eller var atomerna reella företeelser som fanns i verkligheten?

Det pågick mycket diskussion mellan anhängare av dessa båda synsätt, en diskussion som för övrigt upprepade ett tema som har återkommit under större delen av filosofins historia: är våra bilder av världen godtyckliga *benämningar* som vi själva hittar på, eller är det

verkliga företeelser vi iakttar? Det förstnämnda synsättet kallas ofta *nominalism*, det andra *realism*.

Det slutade med att realisterna vann: atomerna är verkliga företeelser, även om det skulle visa sig att de knappast är att betrakta som små biljardbollar. Ett av skälen till att man enades om att atomerna var verkliga var studiet av ett fenomen som kallas *brownska rörelser*. Något liknande kan man själv iaktta om man en solig dag sitter inne och tittar på dammet i luften. De små dammpartiklarna irrar omkring i luften, hit och dit, uppåt och nedåt. Det verkar inte finnas några tydliga regler för vart en dammpartikel beger sig nästa gång den flyttar sig. Den rör sig oftast nedåt – på grund av tyngdkraften – men inte alltid nedåt och ingalunda alltid åt höger.

Fenomenet upptäcktes år 1827 av den brittiske botanikern Robert Brown, som studerade små pollenkorns rörelser i vatten med hjälp av mikroskop. Brown ansåg att förklaringen till att partiklarna oupphörligt rörde på sig måste vara att de var vid liv. Det visade sig dock snabbt att den förklaringen inte höll: även småpartiklar av glas och granit hoppade omkring på liknande sätt.

Saken föreföll besynnerlig, och först år 1905 fick man en klar matematisk insikt om vad som försiggick. Albert Einstein, som samma år offentliggjorde den speciella relativitetsteorin, visade att man kunde räkna på partiklarnas rörelser. Man kunde betrakta dem som osystematiska förflyttningar, bestående av en rad små steg som vart och ett uteslutande avgjordes av slumpen. Varje steg togs i en riktning som var slumpmässig och oberoende av det föregående stegets riktning. På så sätt uppkommer en sicksackrörelse, eftersom en partikel mycket väl kan gå ett steg framåt och två åt vänster. En sådan rörelse följer likafullt vissa statistiska lagar, som inte säger något om precis vart en partikel förflyttar sig men däremot något om hur långt den når från utgångspunkten efter ett visst antal slumpmässiga steg. Tar partikeln plötsligt tre steg i samma riktning dröjer det mycket länge innan den får för sig att ta så många som tre steg i motsatt riktning. Med tiden får slumpen därigenom partikeln att röra sig bort från utgångspunkten.

Denna einsteinska beskrivning av de brownska rörelserna gjorde atomteorin ännu populärare än den hade varit dessförinnan. Den

matematiska teorin stämde nämligen precis med den bild man skulle få enligt en atomteori. Vattnet, där Robert Brown såg rörelser som skenbart berodde på liv, är fyllt med vattenmolekyler som Brown inte kunde se i sitt mikroskop. Dessa molekyler befinner sig i en ständig rörelse som hänger samman med temperaturen. Omärkligt knuffar molekylerna var för sig till det lilla stoftkornet. Då och då ger så pass många molekyler en knuff åt samma håll att stoftkornet flyttar sig en smula. Nästa gång sker förflyttningen åt andra hållet, eller åt höger. I mikroskopet kommer partikeln att uppvisa små, oregelbundna rörelser.

Därmed hade man tre olika sätt att beskriva små partiklars ryckiga rörelser i exempelvis vatten: Man kunde matematiskt beskriva hur de rörde sig och hur långt, i och med att man hade en tydlig statistisk modell. Man kunde dessutom föreställa sig vad som hände, eftersom man hade en bild av hur de små atompartiklarna knuffade till en stoftpartikel. Och om man hade en mycket stor räknemaskin och ännu större tålamod kunde man rentav beräkna precis vad som ägde rum. Man kunde hålla reda på varje enskild molekyl i vattnet och beräkna dess bana under kollisionerna med de många andra vattenmolekylerna för att se om den kom tillräckligt nära stoftpartikeln för att knuffa till den. Hade man på det sättet uppsikt över samtliga vattenmolekyler kunde man i princip räkna ut i vilken riktning stoftpartikeln skulle få nästa stöt.

Det finns alltså tre olika beskrivningar av denna brownska rörelse: en som är matematisk-statistisk, en som är bildlig och intuitiv och en som är fullständig och beräkningsbaserad. Man kan i praktiken välja det synsätt som är mest meningsfullt i den aktuella situationen.

Hela den del av fysiken som handlar om värmerelaterade fenomen – den så kallade *termodynamiken* – är av den här karaktären: det lättaste sättet att beskriva sådana fenomen är att tillämpa övergripande statistiska lagar som inte specificerar de enskilda smådelarnas rörelser utan bara anger rörelsemönstren i stort. Men man kan också använda en atomär beskrivning som i princip skulle kunna räknas igenom i detalj, så att man håller reda på varenda liten smådel.

Vi är vana vid att prata om temperatur och att vara med om blandning av exempelvis gaser med olika temperaturer. Om vi en kylig kväll

öppnar fönstret för att vädra vet vi att sval luft blandar sig med den varmare luften i rummet, så att temperaturen i rummet efter hand blir lägre, om än inte lika låg som i kvällsluften utanför.

Vi kan intuitivt förstå det här som att luftmolekyler med hög temperatur (och alltså hög hastighet) far ut i natten, medan kyligare luft, som innehåller partiklar med lägre hastighet, strömmar in i rummet. Där blir det lite mer fart på dem när de möter inomhusluftens snabbbrörliga molekyler. Resultatet av sådana sammanstötningar blir att de lite långsammare luftmolekylerna får ökad hastighet medan de snabbare förlorar fart. Temperaturen jämnas ut och sjunker under vädningen.

Man skulle i princip – om man inte hade något viktigare för sig – kunna räkna ut hur varenda luftmolekyl bar sig åt under denna vädning. Men det är enklare att utgå från att de övergripande statistiska lagarna gäller, även om vi då inte har uppsikt över varenda atom: blandar man varm och kall luft får man ljummen luft, vars temperatur bestäms av de ursprungliga luftvolymernas omfång och temperatur.

Man kan därutöver räkna ut mycket annat, även utan att redogöra för hur varenda luftmolekyl beter sig. Man kan dra slutsatser om vad som händer med tryck och temperatur, och man kan rentav på ett åskådligt sätt beräkna hur många molekyler det finns i luften, exempelvis genom att helt enkelt studera de browniska rörelserna. Antalet ifråga är för övrigt ganska stort. Skriver man upp antalet molekyler i ett gram vätgas blir det en trea följd av tjugotre andra siffror, normalt skrivna som nollor: 300 000 000 000 000 000 000 000 vätgasmolekyler per gram. För andra gaser gäller liknande siffror.³

Det är fysikaliska förklaringar av det här slaget som en person som Richard Feynman tycker om (i likhet med Einstein och de flesta andra). För här har vi för det första en noggrann statistisk teori om gasers beteenden som vi kan använda oss av i praktiska sammanhang. Och vi har för det andra en åskådlig bild av vad som händer, med vars hjälp vi känner oss säkra på att vi förstår det hela, även om vi inte målar upp vår bild i alla detaljer. Och slutligen har vi – i princip – möjlighet att följa förloppet exakt genom en mycket detaljerad beräkning som beskriver hur varenda atom beter sig. Men det ids vi bara inte.

Denna atomära förklaring av värmefenomen framstår som ett lysande exempel på skönheten hos fysikaliska teorier. Den fungerar; den är åskådlig, en uppsättning små beståndsdelar samverkar på ett regelmässigt sätt som vi kan beskriva på en övergripande och praktisk nivå. Världen är i princip förutsägbar. Vi behöver inte redogöra för fenomenen i detalj om vi bara är intresserade av att förstå övergripande egenskaper, såsom temperaturen efter vädring av uppvärmda lokaler. Men vi skulle kunna redogöra för dem i detalj om vi inte hade något annat att ta oss för.

Grunden för den här teorin utgörs av den atomära beskrivningen. Kring sekelskiftet 1900 var tillfredsställelsen stor över att atomteorin fungerade så bra. Den stämde visserligen inte helt med den gamla grekiska atomläran, eftersom det visade sig att atomerna inte var fullt så odelbara som Demokritos trodde. De kunde avge besynnerliga, energirika partiklar genom *radioaktivitet*. De bestod av flera delar, var och en med egen elektrisk laddning: *elektroner*, som var negativt laddade, och *protoner*, som var positiva.

Men det spelade ingen roll att de inte var odelbara, för allt behövde ju inte vara som Demokritos hade förutsagt. Det där med odelbarheten var ju något som han hade hittat på av hänsyn till Parmenides.

Värre var att atomerna nästan verkade bestå av tomma intet.

När engelsmannen J.J. Thomson på 1890-talet hade upptäckt elektronerna och konstaterat att de måste utgöra en beståndsdel i vanliga atomer drog han slutsatsen att de satt som russin i en russinbulle, där resten av atomen – med den positiva laddningen – utgjorde bulle. (Strängt taget menade han att det handlade om en *plumpudding*, men den liknelsen förstår man ju inte om man inte är britt, även om idén är densamma: en plumpudding är en pudding med finhackade plommon och annan frukt – som alltså motsvarar elektroner – utspridda i puddingblandningen, som till sist flamberas med konjak.)

Thomson kunde beräkna hur tunga elektronerna var. De måste ha lika stor elektrisk laddning som återstoden av atomen, för utifrån sett är atomerna elektriskt neutrala. Men elektronerna var mycket lättare än den positiva delen. I en väteatom, där det bara finns en enda elektron, väger denna elektron 1836 gånger mindre än den positiva

delen (som för övrigt också bara består av en enda partikel, en proton).

Bilden av russinens förhållande till bullen gick alltså an. Elektronerna var ganska små.

Men det skulle visa sig att bullen inte var så stor.

År 1911 inledde den brittiske fysikern Ernest Rutherfords två medarbetare Hans Geiger och Ernest Marsden ett enkelt experiment. De bombarderade en tunn metallfolie med atompartiklar av ett särskilt slag som man hade upptäckt. Rutherford hade föreslagit att de skulle undersöka hur metallfoliens atomer påverkade dessa mycket tunga och energirika partiklars rörelser. Man föreställde sig att metallfolien kunde påverka partiklarna en aning, så att deras banor länkades av lite grann. På det sättet kunde man kanske få reda på ett och annat om strukturen inne i russinbulle-atomerna.

Men oj! Några av partiklarna fick man tillbaka rakt i ansiktet igen. Att de återkastades av en metallfolie var ungefär lika överraskande som om man hade avfyrat en granat mot ett pappersark – och fått den i retur.

Rutherford drog slutsatsen att det måste finnas något mycket tungt och tätt inne i mitten av russinbullen. Det kunde inte vara elektronerna som länkade av partiklarna så kraftigt. De är för lätta för det. Det kunde bara vara den positiva delen av atomen som låg bakom. Rutherford föreställde sig att hela den positiva delen av atomen var samlad i en liten och mycket tät kärna. På det sättet kunde han förklara just den fördelning av spridningen och återkastandet som man hade iakttagit när man bombarderade metallfolien med partiklar. (Partiklarna, som fick beteckningen alfapartiklar, visade sig själva vara atomkärnor av grundämnet helium.)

Så bilden klarnade: det fanns russin, men inga bullar. Atomerna bestod av en mycket liten och mycket tät kärna, kring vilken mycket små och mycket lätta elektroner kretsade på stort avstånd. Ett slags solsystem i miniatyr.

Det mesta av atomen var tomrum. Det var inte ens luft, för luft består av atomer. Om man föreställer sig atomkärnan som ett föremål av ett äpples storlek hamnar elektronerna 5 kilometer därifrån!

Det verkade märkligt, men kanske inte märkligare än att månen, som är några få gånger mindre än jorden, kretsar kring jorden på ett avstånd som är ungefär 60 gånger jordens radie?

Men det *var* märkligt. Framför allt av en enda anledning: elektroner är laddade. Och laddade partiklar som rör sig sänder ut strålning. Det hade man upptäckt några decennier tidigare. Den skotske fysikern James Clerk Maxwell hade med en enastående elegant teori beskrivit ljus och annan elektromagnetisk strålning som yttringar av ett och samma slags fenomen.

När en TV-sändare skickar ut signaler till tittarna sker det genom att elektroner i sändaren sätts i rytmisk rörelse. Därigenom sänder de ut elektromagnetisk strålning som påverkar elektronerna i mottagarens antenn. Där bildar elektronrörelserna en svag elektrisk ström som kan utnyttjas för att få fram nyheterna på TV-skärmen.

Elektroner som kretsar som planeter kring en central kärna måste också sända ut sådan strålning. De fungerar som små sändare. Därmed förlorar de energi. Det måste betyda att de faller in mot kärnan i en spiralformad rörelse under det att de sänder ut sin energi.

Rutherfords atommodell var alltså inte stabil. Någonting var helt fel, för det är uppenbart att atomerna mest består av ingenting alls. Om elektronerna faller in till den centrala, tunga kärnan kommer deras laddning att uppvägas av kärnans laddning, så att resultatet blir ett mycket tätt, elektriskt neutralt stycke materia. Men det är för litet! Det blir för långt mellan atomerna för att vi ska kunna förklara luftens rörelser, temperaturerna, de brownska rörelserna, vattnets förångning – materiens stabilitet.

Marken skulle ge vika under fötterna på oss. Materien skulle falla samman till rena intet. Kollaps! Atomerna skulle försvinna och bara efterlämna sina tomrum.

Krisen var fundamental. Det gick inte ihop, vare sig matematiskt, intuitivt eller beräkningsmässigt. Den eleganta fysikaliska världsbild som hade byggts upp stod och vacklade. Den odelbara atomen var inte bara delbar, den visade sig försvinna i intet.

Men Rutherford gästades år 1912 av en utländsk fysiker som fick en idé.