

I

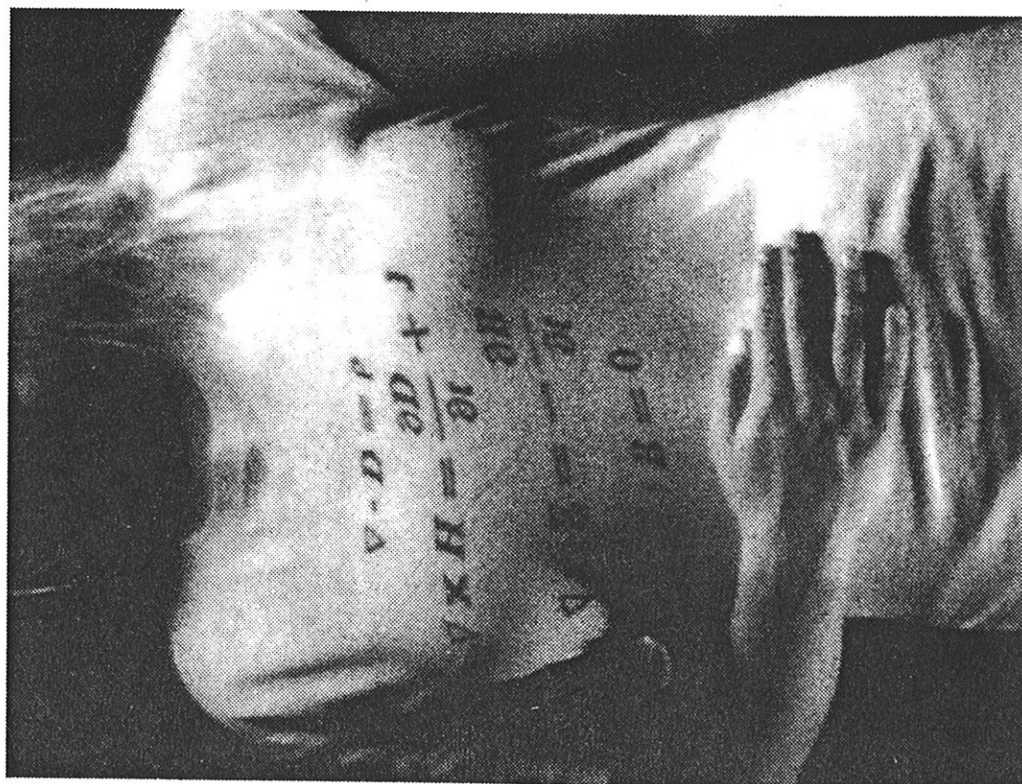
Maxwells demon

»Är det en gud som skrivit dessa tecken?«¹ frågade den österrikiske fysikern Ludwig Boltzmann med ett Goethecitat när han ville uttrycka sin hänförelse och förundran inför fyra korta matematiska ekvationer.

Hans förundran var befogad: På 1860-talet hade den skotske fysikern James Clerk Maxwell lyckats sammanfatta allt man då visste om elektricitet och magnetism i fyra korta ekvationer med lika stor estetisk elegans som teoretisk genomslagskraft. Men det allra märkligaste var att Maxwell dessutom hade lyckats förutsäga fenomen som inte troddes ha det minsta med elektricitet och magnetism att göra, till och med fenomen som inte upptäcktes förrän efter hans död 1879.

Hur var detta möjligt? frågade sig Ludwig Boltzmann, Maxwells samtida och yrkeskollega, som själv gjorde grundläggande teoretiska insatser inom flera av fysikens områden. Hur kan en rik och varierad fenomenvärld sammanfattas med så få och kraftfulla symboler som i de fyra berömda rader som kallas *Maxwells ekvationer*?

Det är i viss mening själva vetenskapens gåta – att den inte bara kan säga så mycket som möjligt med så få ord eller ekvationer som möjligt, inte bara kan rita en karta över terrängen som enkelt och klart sammanfattar allt väsentligt så att vi kan hitta vägen, utan att vi på en sådan karta också kan se detaljer i terrängen som inte var kända när kartan ritades!



Maxwells ekvationer rymmer en sådan skönhet att man på Stanforduniversitetet i Kalifornien säljer T-shirts med de berömda tecknen, som sammanfattar allt vi vet om elektricitet och magnetism. De visade sig rent av förutsäga fenomen som ännu inte var kända när Maxwell formulerade sina ekvationer på 1860-talet.

Fysiken grundlades som teoretisk vetenskap genom en sådan kartläggning, som med ett enkelt teoretiskt grepp förenade vitt skilda fenomen. Engelsmannen Isaac Newton lyckades 1687 genomföra den första stora föreningen av helt olika naturfenomen i en enda teoretisk bild, när han framlade sin gravitationsteori. Teorin hade i sig själv stor matematisk elegans, men den verkliga prestationen låg i att sammanfatta vetandet om två vitt skilda fenomenområden som redan var kända. Italienaren Galileo Galilei hade i början av 1600-talet grundlagt den moderna teorin om kroppars rörelse på jorden – fritt fall, acceleration, svängningar och mycket annat – och tysken Johannes Kepler hade under samma period formulerat en rad lagar för hur planeterna rör sig runt solen. Både Galilei och Kepler byggde sina teorier på iakttagelser – i Galileis fall egna undersökningar, för Keplers vidkommande den danske astronomen Tycho Brahes planetobservationer.

Isaac Newtons stora bedrift var att sammanfatta dessa teorier – Galileis om jorden och Keplers om himlen – i en enda teori, som omfattade både himmel och jord. Det var bara en enda princip som verkade: gravitationen. Fast gravitationen är det i gengäld fortfarande ingen som förstår.

Newtons teori blev modellen för all senare fysik (och därmed i realiteten för all annan vetenskap), där idealet blev sådana stora föreningar av teorier för vitt skilda områden.

Men det var först med James Clerk Maxwells berömda ekvationer från förra århundradet som man uppnådde den andra stora föreningen. Newton hade förenat himmel och jord, Maxwell förenade elektricitet och magnetism. Det låter kanske inte så märkvärdigt. Men det var det.

Hela den moderna vetenskapliga världsbilden bygger på förekomsten av några få *krafter* i naturen: gravitationen, elektriciteten, magnetismen och två andra krafter som verkar inne i atomernas värld. Dessa krafter beskriver hur materiella kroppar kan påverka varandra – och poängen är att det inte *finns* några

flera krafter än de nämnda. Allt vi vet kan beskrivas med hjälp av dessa krafter och deras verkningar.

Därför var det mycket betydelsefullt när man under förra århundradet blev på det klara med att det fanns ett samband mellan två av krafterna, elektriciteten och magnetismen. Det skedde när den danske naturforskaren H. C. Ørsted år 1820 upptäckte att en magnetnål gör utslag om en elektrisk ström passerar över den. Tidigare visste man inte att det fanns ett samband mellan de elektriska och magnetiska fenomenen man hade känt till sedan forntiden. År 1831 påvisade engelsmannen Michael Faraday den motsatta effekten: det bildas en elektrisk ström i en ledning som utsätts för ett varierande magnetfält, så kallad elektrisk *induktion*. När Faraday tillfrågades om vilken praktisk nytta upptäckten kunde få, svarade han: »Vad är det för nytta med ett nyfött barn?»

James Clerk Maxwell var bara några månader gammal när Faraday upptäckte induktionen. Trettio år senare lyckades Maxwell genomföra den andra stora föreningen i fysiken genom att i sina ekvationer sammanfatta Ørsteds, Faradays och många andras iakttagelser.

Maxwell arbetade mycket medvetet med *analogier*. Han teoretiserade om de elektriska och magnetiska fenomenen genom att tänka sig att det i rummet fanns *virvlar*, som fick representera de fält som gav upphov till de elektriska och magnetiska fenomenen. Det var en fullt medveten strategi att använda enkla bilder som man sedan kunde glömma bort igen när man hade förstått fenomenen så bra att man kunde beskriva dem matematiskt. Man måste börja med att »förenkla och reducera resultatet av tidigare undersökningar till en fattbar form«, skrev Maxwell.²

Genom att föreställa sig sådana virvlar (som sedan utvecklades till en tänkt modell med små kugghjul) kom Maxwell fram till att det krävdes några extra små virvlar (eller kugghjul) för

att den mekaniska analogin med elektricitet och magnetism skulle hänga ihop. Dessa små nya virvlar svarade inte mot något känt fenomen men var nödvändiga för att bilden skulle stämma. För att kartan skulle bli så bra som möjligt.

När Maxwell beräknade hur fort dessa små tänkta virvlar utbreddes sig i rummet upptäckte han att de spred sig med *ljusets* hastighet. Och det var märkligt, för ingen hade haft en tanke på att ljus kunde ha något med elektricitet och magnetism att göra. Maxwell upptäckte att ljus är elektromagnetisk strålning – varierande elektriska och magnetiska fält som i ständig växling förändras ut i världen vinkelrätt mot utbredningsriktningen. En överraskande bild förklarade ljusets natur, som hade diskuterats i hundratal år.

Maxwells ekvationer beskrev alltså inte bara det de var avsedda att beskriva, utan också – som en sorts övönsad bonus – ljuset. Och ljuset visade sig ganska snart ha en massa släktingar: radiovågor, röntgenstrålar, infraröd strålning, mikrovågor, gammastrålar och tv-vågor. De första av dem upptäcktes 1888 av tysken Heinrich Hertz, bara nio år efter Maxwells död.

Maxwells ekvationer fick alltså en enorm praktisk betydelse. Hur skulle vårt århundrade ha gestaltat sig utan radio, röntgen, tv och mikrovågor? Möjligen bättre, men alldeles säkert annorlunda.

Som Heinrich Hertz sade om Maxwells ekvationer: »Man kan inte frigöra sig från känslan av att dessa ekvationer har en egen existens och en egen intelligens, att de är klokare än vi och rent av klokare än sin upphovsman, att vi kan få ut mer av dem än det som ursprungligen lades in i dem.»³

Hur kunde Maxwell genom sina analogier tänka sig fram till någonting som över huvud taget inte hade upptäckts ännu? Det var i själva verket den frågan Ludwig Boltzmann ställde när han undrade om det var en gud som hade skrivit Maxwells ekvationer.

Sitt eget svar gav Maxwell i viss mening på dödsbädden, då

han under sin långa, tärande cancersjukdom fick besök av en kollega från tiden i Cambridge, professor F. J. A. Hort. Maxwell sade, säkert utan varje tanke på Boltzmann: »Det som görs av det som kallas jag, görs troligen av någonting i mig som är större än jag.»⁴

Det var inte första gången Maxwell hade pekat på att många vetenskapliga idéer uppstår någonstans utanför vårt medvetandes kontroll. Bland många andra små egenheter hade Maxwell också för vana att skriva dikter. Kort efter faderns död 1856 skrev Maxwell om »krafter och tankar inom oss, som vi känner först då de stiger / med det medvetna handlandets ström ur jagets hemliga rum.»⁵

Det var inte genom en medveten viljeakt som Maxwell fann ljuset i sina ekvationer, utan genom en mindre styrd form av tänkande: »När viljan och förnuftet är tysta, genom tankarna som kommer och går...»⁶

Sådana uttalanden är långt ifrån ovanliga bland stora naturforskare. Det är faktiskt snarare regel än undantag att stora fysikerpersonligheter anger sådana undermedvetna eller rent mystiska insikter som grund för sin vetenskap. I den meningen var det inte Maxwell som skrev Maxwells ekvationer. Det var någonting i honom som var större än han.

Senare har andra fysiker försökt upprepa Newtons och Maxwells konststycke att förena vitt skilda teorier för vitt skilda fenomen. Dock utan att lyckas helt och fullt.

I vårt eget århundrade har Albert Einstein visserligen utvidgat Newtons och Maxwells teorier till de underbart vackra relativitetsteorierna om rörelse och gravitation, men någon förening av naturkrafter var det inte fråga om i det sammanhanget.

Däremot har andra fysiker vid sidan av gravitationen och den elektromagnetiska kraften lyckats påvisa två nya krafter: den starka och den svaga. Båda två gör sig enbart gällande i atomernas värld.

Den svaga kraften verkar bara vid så kallat radioaktivt sönderfall. Den starka kraften verkar bara inne i atomernas kärnor. På 1960-talet lyckades pakistansaren Abdus Salam och amerikanen Steven Weinberg förena teorin för den svaga kraften med teorin för elektromagnetismen, så att de kan betraktas som en och samma kraft. Och på 1970-talet visade andra fysiker att även den starka kraften kan ses som en variant av denna nya »elektrosvaga kraft«. Ett visst mått av ordning lyckades fysikerna alltså åstadkomma, men det enda de gjorde var egentligen att koppla ihop två nyupptäckta krafter med våra välbekanta vardagskrafter. Man talar visserligen om stora föreningsteorier – *Grand Unification Theories* – men innan den avgörande föreningen är genomförd fattas det en viktig bit: gravitationen.

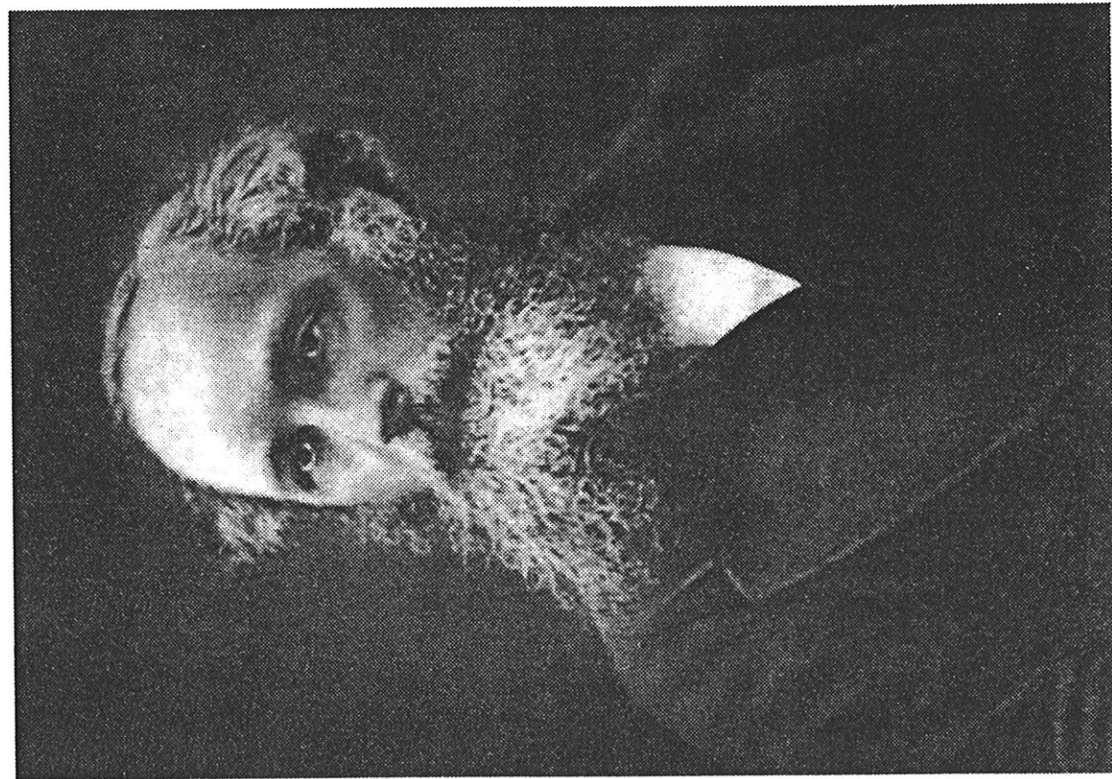
På 1980-talet väckte teorierna för så kallade *supersträngar* stort uppseende därför att de för första gången tycktes ge hopp om att man skulle kunna förena teorierna för gravitationen (Einsteins relativitetsteori) med teorierna för de elektromagnetiska, svaga och starka krafterna (atom- och partikelfysiken). Supersträngar är ett slags oerhört små, vibrerande strängar som antas vara »byggstenar« för all materia i världen. Nu, sju år efter supersträngsteoriernas genombrott 1984, har det dock visat sig att denna fysikens tredje stora förening är svårgenomförbar – och under alla omständigheter klart mindre intressant än de båda första stora föreningarna.

Isaac Newtons stora insats var och förblev att han förenade himmel och jord, Maxwells att han förenade vardagsfenomen som magnetism, elektricitet och ljus. Supersträngsteorin handlar däremot om extrema och underliga fenomen som ligger mycket långt från dem vi möter till vardags – och också mycket långt från de fenomen som fysikerna hoppas kunna undersöka experimentellt inom överskådlig framtid.

Fysiken befinner sig i dag i den situationen att man, trots enorma utgifter för vanvettigt komplicerad apparatur – till exempel det europeiska atomforskningscentret CERN utanför Ge-



Isaac Newton.



James Clerk Maxwell.

nëve – i realiteten inte tror på att man inom en förutsebar framtid kan nå fram till den tredje stora föreningen – föreningen av alla naturens krafter. Det talas visserligen mycket om en sådan förestående förening, men supersträngsteorierna har klargjort att den, även om den förverkligades, knappast skulle säga oss något om vår vardag som vi inte redan vet. Och då är det inte mycket till förening.

På 1980-talet har det emellertid inträffat en rad förbluffande och dramatiska genombrott, som har fått fysiken att ta en annan utvecklingsriktning än den som dominerat under vårt århundrade.

Fysiken har under större delen av 1900-talet avlägsnat sig mer och mer från vår vardag, från de fenomen vi kan iakta med egna ögon. Ständigt större acceleratorer och ständigt mer komplicerad apparatur har utvecklats för att studera bisarra effekter, som kunde tänkas kasta ljus över möjligheterna att förena gravitationen med teorierna om atomernas värld. Än så länge har det dock inte lyckats.

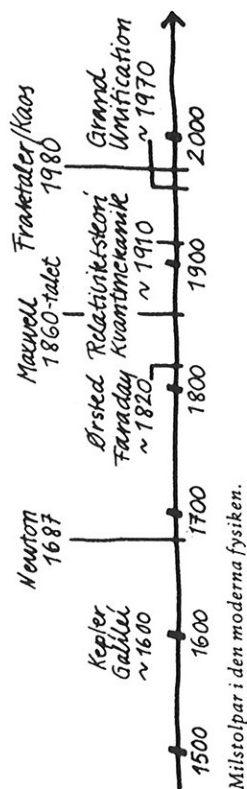
Men på 1980-talet har en rad nya teorier under rubriker som kaos, fraktaler, självorganisation och komplexitet på nytt ställt vardagen i fokus. Genom experiment i dyra försöksanläggningar har fysiken visserligen klarlagt många eleganta detaljer, men den har fortfarande mycket svårt att förklara vardagliga fenomen; vetenskapen har svårt att besvara de frågor som barn ställer. Frågor om naturens former: träd, moln, bergskedjor och blommor.

Teorierna om kaos och fraktaler har väckt stort allmänt intresse eftersom de innebär genuint nya insikter och har lett till utvecklingen av en helt ny form av estetisk tradition, särskilt med hjälp av datorgrafik.

I verkligheten är det dock knappast detta som är det intressantaste med de nya forskningsområdena. Det intressantaste är antagligen att de tillsammans inrymmer en rad dramatiska be-

greppsmässiga innovationer, som kan leda till den tredje stora föreningen inom fysiken. Inte en förening mellan gravitationen och atomteorin, utan snarare en förening mellan vetenskapen och vardagen. En teori som i samma andetag kan förklara världens uppkomst och vardagens medvetande; en teori som kan förklara hur begrepp som »mening« hänger samman med begrepp som »svarta hål«.

En sådan tredje stor förening kommer utan vidare att kunna mäta sig i betydelse med Newtons och Maxwells. Att den måste komma finns det många tecken på. Att den kommer före sekelskiftet är ingen helt orimlig gissning. Allt tack vare att man för tio år sedan lyckades lösa en gåta som hade framställts redan 1867: gåtan om Maxwells demon.



»Informationens spöke går genom vetenskaperna.«⁷ Med denna indirekta hänvisning till Marx' och Engels' kommunistiska manifest från 1848 kallade den polskfödde och i Polen utbildade fysikern Wojcieh Zurek, som i dag arbetar i USA, år 1988 till ett möte i staden Santa Fe i New Mexico i USA. Ett möte där 40 av världens ledande fysiker och några matematiker samlades för att diskutera »Entropi, komplexitet och informationens fysik«, som mötesrubriken löd.

Zurek pekar i kallelsen på en rad »djupa överensstämmelser« mellan vitt skilda delar av fysiken – och också mellan fysiken och vardagen: överensstämmelser mellan ångmaskiner och kommunikationsteori, mellan mätningar av atomära fenomen och

kunskapsteori, mellan svarta hål i universum och mängden av oordning i en tekopp, mellan datorberäkningar och matematikens grundvalsproblem, mellan de biologiska systemens komplexitet och universums utvidgning.

När fysikerna samlades till ett nytt möte två år senare hölls inledningsanförandet av den då 79-årige amerikanske fysikern John A. Wheeler, den man som utarbetade teorin för atomklyvning tillsammans med Niels Bohr 1939 och namngav det märkligaste fenomenet i Einsteins gravitationsteori: de svarta hålen. John Wheeler är *the grand old man* inom många av de grenar av fysiken som skulle diskuteras och uppträder gärna som profet.

Den lille runde mannen med det alltid vänliga och glada ansiktet kikade ut över den lilla, men *mycket* kvalificerade krets av forskare som måndagen den 16 april 1990 hade samlats i möteslokalen på det lilla Santa Fe Institute. Sedan sade han: »Det här är inte bara ett möte som *alla andra*. Före fredag eller lördag förväntar jag mig att vi vet hur universum är konstruerat.«⁸

Därefter övergick Wheeler till att ifrågasätta en rad av fysikens heliga kor. »Det finns inget rum och ingen tid«, förklarade han och gick sedan lös på föreställningen om *verkligheten*: »Det finns inget *där ute* där ute.«

»Föreställningen om ett enda universum är idiotisk: världen. Vi är alla deltagande observatörer i världen – det är ett under att var och en av oss kan göra sig samma bild av universum. Men när veckan är slut vet vi kanske hur vi kan förklara allt detta ur ingenting«, sade Wheeler till den lilla kretsen av toppforskare.

Alla var inte eniga – utom efteråt: det blev inte *den* veckan som ändrade världsbilden. Men känslan av att det är dags att börja om från början och tänka igenom alltihop igen spred sig. Den ena forskaren efter den andra satte i sina inlägg fysikens grundbegrepp under luppen.

»Jag tänker tala om allt det som *inte* står i läroböckerna«, förklarade en annan liten tjock amerikansk fysiker, Edwin T.

Jaynes, som på 1950-talet formulerade en ny teoretisk beskrivning av termodynamiken eller värmeläran, grunden för mötets centrala begrepp, entropi och information. »Jo, det står där kanske i den meningen att *formlerna* står där, men det står ingenting om vad de *betyder*«, sade Jaynes. »Den matematik jag nu tänker använda är mycket enklare än den vi alla kan. Men problemerna är inte matematiska; de är begreppsliga«, förklarade Jaynes.

I en paus utbrast matematikern Thomas Cover från Stanford-universitetet: »Är alla fysikermöten som det här? Det här är ju skitkul!«

Det var ett undantag. Möten med en sådan öppenhet hör till de extrema sällsyntheterna. Här kunde man höra samma frågor som retade galleber på lärarna i gymnasiet: Vad betyder det? Vad *menas* med det? Här kunde man höra *berömda vetenskapsmän* utbrista: »Men varför i hela världen skulle min bilmotor bry sig om hur min beskrivning ser ut?«

Fysiken var som pånyttfödd. Alltihop på grund av det första seriösa ämne som togs upp sedan Wheeler hade slagit an tonen: *Maxwells demon*.

Om det finns någonting vi människor är förtrogna med så är det *värme*: kroppsvärme, sommarvärme, värmeelement. Men fram till mitten av 1800-talet hade fysiken ingen vettig förklaring till vad värme är för något. Aristoteles, den gamle greken, betraktade elden och värmen som ett självständigt, oförklarligt element i världen, jämfällt med luften, jorden och vattnet.

Så sent som i början av förra seklet föreställde sig många fortfarande att värmen var ett särskilt, viktlost ämne som omgav alla kroppar. Men det hade börjat bli bråttom med att klargöra värmens verkliga natur. Engelsmannen James Watt hade nämligen genom sin uppfinning av en ny, effektiv ångmaskin 1769 inte bara förbättrat industrialiseringens möjlighet, utan också gett upphov till mycket omfattande diskussioner om möjlighe-

ten att konstruera en evighetsmaskin. Och när ångmaskinerna började dundra fram genom Europa var det hög tid för forskarna att få grepp om värmeläran, *termodynamiken*.

Den första viktiga insatsen gjordes 1824 av fransmannen Sadi Carnot. Snarare på grundval av fadern Lazare Carnots ingenjörsmässiga erfarenheter av värmemaskiner än fysikens teorier utarbetade han en beskrivning av ångmaskinen som flera årtionden senare kom att vidareutvecklas till värmelärans två grundlagar, *termodynamikens huvudsatser*.

Den första av de båda huvudsatserna handlar om mängden av energi i världen. Den är konstant. Det varken uppstår eller försvinner energi när man »förbrukar« energi. Man kan omvandla kol till varm ånga eller olja till rumsvärme, men det enda som då händer med energin är att den omvandlas från en form till en annan.

Men vardagspråket är ändå inte så dumt, för det är faktiskt någonting som förbrukas när man värmer upp sitt hus: man kan ju inte få tillbaka oljan. När huset en gång har blivit varmt kan man inte få pannan att gå baklänges och på så vis få tanken fylld igen.

Någonting sker alltså när man »förbrukar« energi, även om *termodynamikens första huvudsats* säger att energin i världen är konstant och omöjligt kan förbrukas. Energi kan nämligen brukas till någonting – och om detta någonting handlar *termodynamikens andra huvudsats*.

Den andra huvudsatsen säger att energi kan förekomma i mer eller mindre användbar form. En del energiformer är så beskaffade att man kan utföra en massa arbete med en maskin som har tillgång till dem. Man kan till exempel utföra det arbete det innebär att värma upp ett hus. Eller få ett tåg att rulla. Eller en elektrisk apparat att dammsuga.

Energi finns i många former – och även om energimängden är konstant så är energiformerna absolut inte likvärdiga. En del former av energi kan användas till att utföra många olika for-

mer av arbete – elektrisk energi är sålunda en av de nyttigaste. Andra energiformer kan inte användas till riktigt lika mycket: det tråkiga med värme är att den är svår att använda till mycket annat än uppvärmning.

Vilket inte hindrar att värme också kan användas för mer specifika ändamål – man kan till exempel driva ett lokomotiv med värme, ett ånglokomotiv. Kruket är bara att man inte får ut lika mycket om man driver loket med värme som om man driver det med elektrisk ström. Man måste tillföra mer energi om man kör på värme än om man kör på elektricitet. Energi förekommer nämligen i många olika kvaliteter, av vilka värme är den lägsta.

All energi är inte lika lätt att utnyttja. Värme är en form av energi som inte kan utnyttjas i samma utsträckning som elektrisk ström. Man måste omvandla mera värmeenergi för att få tåget att gå. Man förbrukar inte mer energi, eftersom energi omöjligt kan förbrukas. Men man förslösar mer energi när den uppträder i form av värme än när den uppträder i form av elektrisk ström. Man omvandlar mer, omsätter mer.

Termodynamikens andra huvudsats beskriver det mycket precist: Varje gång vi omvandlar energi (»förbrukar energi» som vi säger till vardags) blir energin mindre tillgänglig, mindre användbar: vi kan inte få ut lika mycket arbete av den. Och det går alltid åt det hållet, säger andra huvudsatsen: *varje* energiomvandling medför att energin blir mindre tillgänglig än förut. (Det finns mycket speciella fall där energi kan omvandlas *reversibelt*, men det förekommer mest i läroböcker, aldrig till vardags.)

Energien i världen är konstant, men den blir mindre och mindre värdefull ju mer vi använder den. Mindre och mindre tillgänglig.

Detta är termodynamikens två huvudsatser: energin är konstant men blir mindre och mindre tillgänglig. I slutet av 1800-talet ledde insikten om dessa båda sanningar till en nedslående syn på världens framtid: Ju mer energi vi omvandlar, desto mer

otillgänglig blir den. Och i slutänden omvandlas allrihop till värme, den minst tillgängliga energiformen. Universums värmedöd, kallade man det – sluttillståndet blir en enhetlig, ljum värme där det inte längre finns några skillnader som gör att värme trots allt kan användas till att utföra arbete med.

Erfarenheterna av ångmaskinerna visade nämligen klart att värme kan fås att utföra arbete bara om det finns en *skillnad*: en skillnad mellan två temperaturer. Det är bara för att ångpannan är mycket varmare än omgivningen som den kan få tåget att gå. Man kan bara få ut arbete av värme om man kan kyla av värmen.

Men om man koler av någonting varmt till omgivningens temperatur kan man inte få det varmt igen utan att tillföra mer energi. När kaffet väl har kallnat (sedan den elektriska strömmen i spisen har värmt upp det), blir det aldrig varmt igen (om vi inte slår på strömmen på nytt). Skillnader i värme utplånas oåterkalleligt.

Därför säger termodynamikens andra huvudsats skenbart att vi lever i en värld där allt går mot ljumhet, utjämnning, enhetlighet och grått i grått. Universums värmedöd.

Om det *inte* var på det viset skulle det vara lätt att vara ingenjör. För energi finns det ju gott om i världen, och den försvinner inte. Då kunde vi helt enkelt »förbruka» samma energi om och om igen. Vi kunde utan vidare tillverka evighetsmaskiner. Men det går alltså inte. Säger den andra huvudsatsen.

År 1859 gav den preussiske fysikern Rudolf Clausius detta förhållande ett namn: *entropi*. Det är ett mått på energins otillgänglighet: ju större entropin är, desto mindre kan energin användas till. De båda huvudsatserna kunde då formuleras om så att den första säger att energin är konstant och den andra att entropin alltid växer. Varje gång man omvandlar energi växer entropin i det system där energin omvandlas.

Detta förklarar dock inte vad värme är för något, även om det

kanske ger ett begrepp om varför värme är en så speciell form av energi: det finns en massa entropi i värme, mycket mer än i elektricitet.

Men man kom ganska snabbt underfund med vad värme är. För den främsta insatsen svarade bland andra James Clerk Maxwell och Ludwig Boltzmann. De insåg att en gammal idé kunde formuleras precis: idén att värme är en form av rörelse i materien. Utgångspunkten är teorin om atomer, föreställningen att materia består av en massa små likadana enheter i rörelse.

Atomteorin var inte allmänt accepterad i slutet av 1800-talet, men i dag står det klart att all materia består av atomer i rörelse. Atomerna ingår i små enheter som kallas molekyler, och varje slag av materia, varje ämne, består av en bestämd sorts molekyler, som var och en är sammansatt av ett antal av de 92 slags atomer som finns. Men det finns olika former av rörelse. Fasta ämnen behåller sin form trots molekylernas rörelser. Vätskor är mer flytande och formar sig efter botten av den behållare de befinner sig i, medan gas är helt lättflytlig och fyller upp hela behållaren. Dessa former är de tre aggregationsstillstånd eller faserna som materia kan uppträda i: den *fasta*, den *flytande* och den *gasformiga* fasen. (Det finns också en fjärde fas, *plasma*, där atomerna är sönderslagna; ett vardagligt exempel är eld.)

Skillnaden mellan de tre formerna är inte så stor som man kunde tro. Det vardagliga ämnet H_2O (som består av en atom syre [O] och två atomer väte [H] per molekyl) uppträder omväxlande i de tre tillstånden is, vatten och vattenånga. Vid låga temperaturer rör sig molekylerna mycket långsamt. Strukturen kan upprätthållas. Om temperaturen blir litet högre rör sig molekylerna något snabbare och kan byta plats med varandra men håller fortfarande ihop. Först vid temperaturer över $100^\circ C$ skils alla molekylerna åt och rör sig fritt i form av ånga. Övergångarna mellan de tre tillstånden eller faserna kallas *fasövergångar*. Gemensamt för alla dessa värmerörelser är att molekylerna rör sig fullkomligt kaotiskt. Molekylernas värmerörelser

har ingen bestämd riktning: de far bara omkring hur som helst.

Men värme är inte den enda formen av rörelse i materien. Även elektrisk ström är uttryck för en rörelse i materien. I det fallet rusar molekylerna dock inte omkring huller om buller. I en elektrisk ström är det vissa delar av molekylernas atomer – de negativt laddade elektronerna – som strömmar i en bestämd riktning. Det är mer ordning på en elektrisk ström än på en kaotisk värmerörelse. På motsvarande sätt skiljer sig en vind i atmosfären från värme: en massa molekyler i luften strömmar åt ett bestämt håll i stället för att fara runt utan ordning. Det är därför som det är klokt att producera ström med vindkraftverk, medan olje- och kärnkraftverk är mindre eleganta, eftersom de använder bränsle till att värma vatten med för att på så vis kunna driva en turbin. Omvägen över det varma vattnet är ett högt pris för ingenjörens leksaker.

Många egenskaper hos materien blir alltså begripliga om man tänker sig att den består av små likadana delar med en viss rörelse. Rörelsen innebär en viss energi, antingen den är ordnad som i vind eller oordnad som i värme. Vind är fördelaktigare än värme när man skall producera elektrisk ström, just därför att rörelsen har en bestämd riktning. Men det finns mycket energi i värme också; problemet är bara att den är svår att utvinna därför att den är bunden i en så oordnad rörelse.

Temperatur är uttryck för den karakteristiska hastighet som molekylerna rör sig med. Det vi menar med värme och mäter med temperatur är *oordnad rörelse*.

Innebär detta då att alla molekyler i en gas rör sig precis lika fort? Och hur kan de hålla takten när man sätter på värmen?

Det var precis det förhållandet som Maxwell förklarade. Han införde för första gången statistiska begrepp i fysiken. Alla molekylerna rör sig inte lika fort. En del har oerhört hög hastighet, andra mycket mindre. Men deras hastigheter har en karakteristisk fördelning, den så kallade *Maxwell-Boltzmann-fördelning*.

en. Den innebär att molekylnas hastigheter har ett visst medelvärde men varierar kring detta. Om medelvärdet är högt är temperaturen hög, om medelvärdet är lågt är temperaturen låg.

Men i ett ämne med en given temperatur finner vi molekyler med många olika hastigheter. De flestas hastigheter ligger nära medelvärdet. Vi finner flera med stor hastighet i varm materia än i kall. Men vi finner också snabba molekyler i den kalla materien och mycket långsamma i den varma.

Därmed kan vi till exempel förstå hur det går till när en vätska avdunstar. Ju högre temperaturen är, desto fler molekyler med höga hastigheter finns det i vätskan. Och om vi då föreställer oss de avdunstande molekylna som rymdraketer som far till väders, inser vi att flera molekyler kan frigöra sig ju varmare vätskan är.

Denna statistiska hastighetsfördelning får den intressanta konsekvensen att vi inte kan se på den enskilda molekylens vilken temperatur den ingår i. Eller antropomorf uttryckt: den enskilda molekylens har ingen aning om vilken temperatur den bidrar till.

Temperaturbegreppet är meningsfullt bara om man har många molekyler. Det är nonsens att fråga en enskild molekyl hur hög temperatur den har. Det vet den inte. Den känner bara till en enda hastighet: sin egen.

Men ändå... Efter en tid har ju molekylerna kolliderat med andra molekyler och på så sätt skaffat sig en viss »kunskap« om de andra molekylnas hastigheter. Det är just därför man får en jämn temperatur – molekylna stöter hela tiden emot varandra och påverkar varandras hastigheter, så att det uppnås en jämvikt. Om man vill värma upp någonting kan man ju mycket väl göra det underifrån. Den stora hastigheten sprider sig snabbt till alla molekylna.

Maxwells stora insats var att grundlägga studiet av lagarna för detta beteende. De små molekylnas rörelser och sammanstötningar kan vackert beskrivas med hjälp av Newtons gamla

lagar för kolliderande biljardbollar. Det visar sig då att när vi har tillräckligt många bollar (och det finns *många* molekyler i luft – i runda tal 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 [10²⁷] molekyler i luften här i rummet), så kan vi ur Newtons lagar härleda de statistiska reglerna för de ämnen vi känner till: regler om temperatur, tryck och volym och om värmeenergins minskande tillgänglighet.

Men det är något underligt med denna bild. Newtons lagar för biljardbollar och andra mekaniska fenomen är vackra, enkla lagar. De beskriver fenomen som är reversibla, det vill säga omvändbara i tiden. I Newtons värld kunde tiden gå baklänges utan att vi såg någon skillnad. Men i värmelärans värld leder bollarnas beteende till sådana konstigheter som termodinamikens andra huvudsats: om man blandar något varmt och något kallt med varandra kan man inte skilja dem åt igen. När kaffet en gång har kallnat har det skett något oåterkalleligt.

En samling molekyler med hög medelhastighet blandas med en samling med lägre medelhastighet. Bollarna kolliderar och uppnår en gemensam medelhastighet. Därmed är skillnaden borta. Nu kan man inte längre skilja de molekyler som tidigare var snabba från dem som var långsamma. För den enskilda molekylens har ju ingen aning om vilken temperatur den ingår i – i varje fall inte i ett givet ögonblick.

När de molekyllära korten väl har blandats kan man inte skilja dem åt igen.

Det blev Ludwig Boltzmann som vid tiden för Maxwells död 1879 gav dessa förhållanden en precis formulering: Det är inte särskilt sannolikt att Newtons lagar resulterar i att alla molekylna plötsligt får den hastighet de hade var för sig innan de blandades. Det är faktiskt ganska osannolikt.

Med tiden blir blandningar mer och mer blandade. Kyla och värme utjämnas till ljumhet.

Det är därför som entropin växer. Entropin är uttryck för en energis otillgänglighet. Om energin uppträder i form av värme –

mätt som temperatur – kan den bara utnyttjas genom att man blandar något varmt med något kallt (till exempel varm ånga och kall luft från omgivningen via en ångmaskin). Men när man väl har blandat dem kan man inte skilja dem åt igen och få ut mer arbete.

Det är utjämnningen som är orsaken. Och utjämnningen är oåterkallelig eller *irreversibel*, som det heter på fint språk. Där för växer entropin – oåterkalleligt.

Med Boltzmanns formulering hade man fått ett begrepp om vad värme är och om den naturlag som snabbt kom att räknas som världens mest fundamentala: den andra huvudsatsen. Och i viss mening också en beskrivning av vad det innebär att tiden går: Molekylerna påverkar varandras hastigheter, deras rörelse utjämns. De uppnår ett medelvärde, en jämvikt. Det är skillnad på förr och nu, det går från mångfald till enhetlighet.

Många av samtidens fysiker kritiserade dock Boltzmanns uppfattning. De menade att man omöjligt kan härleda termodynamikens oåterkalleliga och irreversibla lagar ur Newtons lagar om kroppars rörelse och växelverkan, biljardbollarnas fysik. Det majestätiska i Newtons bild ligger ju just i reversibiliteten: Alla ekvationer kan gå baklänges i tiden. Alla processer förlöper på samma sätt både framlänges och baklänges.

Vi andra vet av i stort sett alla våra vardagliga erfarenheter att allting här i världen *är* irreversibelt. När något går i tusen bitar blir det inte helt igen av sig självt. Värme avdunstar och ordning blir bara värre. Tiden går och allting förgår. Ingen har någonsin sett en sönderslagen tallrik återuppstå ur skärvorna.

Detta intresserade dock inte Boltzmanns kritiker. Newtons teorier betraktades nämligen som oantastliga, och därför var det befängd att försöka härleda något oåterkalleligt ur det återkalleliga, det irreversibla ur det reversibla. Boltzmann hade missförestått *tiden*, menade hans samtid.

Teorin att materien består av atomer var ännu inte allmänt



Ludwig Boltzmann.

accepterad. Den teoretiska grunden för alla Maxwells och Boltzmanns idéer om värme som ett statistiskt fenomen i stora molekylsamlingar utsattes för våldsamt beskjutning. Det var först under 1900-talets första årtionden som fysiker som Einstein och Bohr klagade atomernas existens.

År 1898 skrev Boltzmann i ett förord till en bok om teorin för molekylernas rörelse i en gas att han var »övertygad om att dessa angrepp enbart bygger på missförstånd» och att han »bara var en enskild människa som kämpade mot tidens strömning».⁹

Boltzmann var ingen firad hjälte trots sina enorma bidrag till fysikens utveckling. Han plågades av depressioner och föreläsningsskräck. Vid 62 års ålder, 1906, tvingades han avsäga sig sin professur i Wien och se sin vetenskapliga ensamhet i ögonen.

Året innan hade han skrivit i en populär bok: »Jag skulle kunna säga att jag är den ende som finns kvar av dem som omfattade de gamla teorierna av hela sitt hjärta, eller åtminstone den ende som fortfarande kämpar för dem med all min kraft.»¹⁰

Men kraften ebade ut. Under en semestervistelse utanför Trieste tog Ludwig Boltzmann den 6 september 1906 sitt eget liv.¹¹

Han hade inte lyckats förena reversibiliteten i Newtons upphöjda ekvationer med vardagsverklighetens irreversibilitet – just det problem som Maxwell hade pekat på när han 1867 uppfann den retfulla demon som under mer än hundra års vetenskapliga diskussioner skulle belysa och lösa den svårighet som blev oåterkallelig för Ludwig Boltzmann.

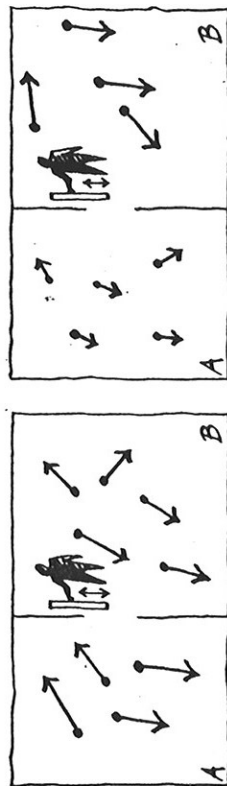
»Maxwells demon lever ännu. Efter mer än 120 års osäker tillvaro och minst två dödförklaringar ter sig denna förunderliga varelse vitalare än någonsin», skrev de amerikanska fysikerna Harvey Leff och Andrew Rex när de 1990 gav ut en bok med historiska källor till belysning av berättelsen om Maxwells demon, som de båda författarna finner vara ett försummat kapitel

i den moderna vetenskapens historia. »Maxwells demon är bara en enkel idé. Ändå har den utmanat en rad av vetenskapens bästa hjärnor, och den omfattande litteraturen om den rör allt från termodynamik, statistisk fysik, informationsteori, cybernetik, beräkningsteori och biologi till vetenskapens filosofi och historia.»¹²

År 1867 skrev fysikern Peter Guthrie Tait till sin nära vän och studentkamrat James Clerk Maxwell och frågade om han ville kasta ett öga på ett manuskript om termodynamikens historia som Tait stod i begrepp att ge ut. Tait ville gärna ta del av Maxwells kritiska kommentarer innan det offentliggjordes. Maxwell svarade att han inte kände termodynamikens historia i detalj men kanske ändå kunde peka på en eller annan brist i framställningen – varefter han genast satte fingret på en tänkbar ofullkomlighet i det manuskript han ännu inte hade sett, en ofullkomlighet i termodynamikens andra huvudsats.

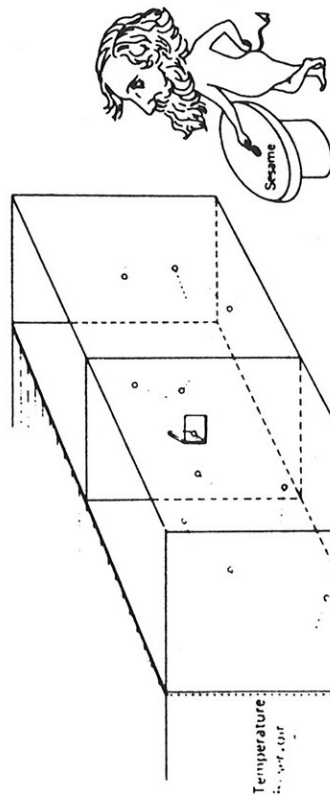
Maxwells idé var enkel. En gas är innesluten i en behållare med två kamrar, A och B. I väggen mellan de båda kamrarna finns det en liten lucka som kan öppnas och stängas utan att det kostar något arbete – alltså någon sorts väldigt bra skjutdörr.

»Föreställ dig nu en liten varelse som kan iaktra alla molekylernas banor och hastigheter men i övrigt inte kan göra något an-



Maxwells demon i en tvådelad kammar med skjutdörr. Molekylerna har samma hastighet i bägge kamrarna.

Maxwells demon efter sortering av molekylerna: de snabba till höger, de långsamma till vänster.



Maxwells demon som man såg honom 1967.

nat än att öppna och stänga den lilla luckan», skrev Maxwell till Tait¹³ och beskrev sedan hur den lilla varelsen öppnar luckan varje gång en snabb molekyl i den vänstra kammaren kommer farande. När en långsam molekyl i vänstra kammaren närmar sig luckan hålls den däremot stängd. Följden blir att bara de snabba molekylerna tar sig över från den vänstra kammaren till den högra. Omvänt släpps bara de långsamma molekylerna in från den högra kammaren till den vänstra.

Resultatet blir att de snabba molekylerna samlas till höger och de långsamma till vänster. Antalet molekyler är konstant i båda kamrarna, men medelhastigheten förändras: i den högra kammaren stiger den, i den vänstra sjunker den. En skillnad har skapats. »Och ändå har inget arbete utförts», skriver Maxwell. »Det enda som har varit i arbete är en mycket skarpsynt och fingerfärdig liten varelses intelligens.»¹⁴

Maxwell hade till synes funnit en brist i termodynamikens andra huvudsats: en liten intelligent krabat kan skapa värme av ljunghet utan att utföra något arbete. Maxwell skrev: »Om vårme är rörelser i materiens beståndsdelar och om vi med lämpliga redskap kunde hantera dessa beståndsdelar var för sig, kunde vi

kort sagt dra fördel av de olika beståndsdelarnas olika rörelser, så att ett system med enhetlig värme delades upp i olika temperaturer. Kruket är bara att vi inte är tillräckligt smarta.»¹⁵

Vi är för stora och klumpiga för att kunna kringgå termodynamikens andra huvudsats. Om vi bara var litet mera fingerfärdiga och skarpsynta skulle vi kunna dela upp molekylerna i köksluften till ett kylskåp och en ugn utan att det syntes på elräkningen.

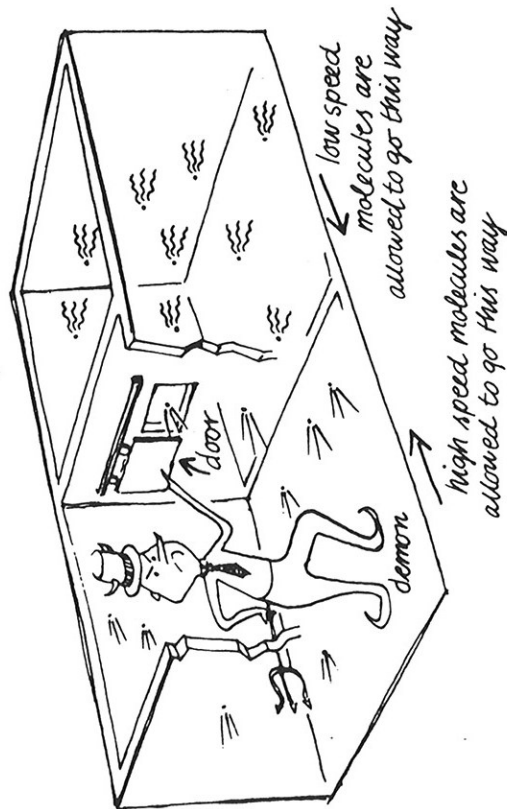
Tre år senare skrev Maxwell till fysikern lord Rayleigh: »Sensmoralen är att termodynamikens andra huvudsats har samma grad av sanning som påståendet att man aldrig kan få upp samma hink vatten igen om man tömmer en hink vatten i havet.»¹⁶

Maxwell ville visa att den andra huvudsatsen bara har statistisk giltighet. Den är en lag som gäller på *vår nivå*, men inte för små varelser med stor intelligens. När vi beskriver den värld vi känner i form av mycket stora samlingar av molekyler, gäller lagen om entropins ökning och energins växande otillgänglighet. Men om vi bara var litet klipskare skulle vi kunna hämta värme ur kyla genom att helt enkelt öppna fönstret när snabba molekyler kom farande utifrån nattfrosten (även om de är sällsynta där) eller när långsamma molekyler var på väg ut ur rummet.

En evighetsmaskin baserad på intelligent iakttagelse.

Maxwell offentliggjorde idén om den lilla varelsen i en bok om värmeteori 1871, och tre år senare gav fysikern William Thomson krabaten ett namn, *Maxwells demon*, varmed han inte åsyftade något ondskefullt utan »ett intelligent väsen som är utrustat med fri vilja och tillräckligt fin känsel och iakttagelseförmåga för att kunna observera och påverka individuella molekyler i ämnet».¹⁷

Maxwells demon har ett retfullt budskap: Det är inte världen, utan vi själva, som är orsaken till att vi måste arbeta för att få



Maxwells demon som man såg honom 1970.

det varmt om vintern. Om allting går mot oordning så beror det bara på att vi är för stora och klumpiga för att hantera materiens enskilda beståndsdelar.

Därmed pekade Maxwell på den skillnad som några decennier senare skulle bli Boltzmanns död: skillnaden mellan de upphöjda newtonska ekvationernas beskrivning av kringfarande enskilda molekyler och termodynamikens beskrivning av stora molekylsamlingar.

Termodynamiken är en statistisk teori som berättar om en värld vi kan uppfatta men inte nå. Bara för att vi inte är tillräckligt smarta. I verkligheten är det inte alls någon skillnad mellan olika energiformer, i verkligheten är de alla lika tillgängliga – för dem som förstår sig på dem.

Att energin blir mer och mer otillgänglig hänger alltså ihop med vår beskrivning och de ingrepp i världen den ger oss möjlighet att företa.

I den nionde upplagan av *Encyclopædia Britannica*, som är

från 1878, skrev Maxwell om energins ökande otillgänglighet, dess spridning eller *dissipation*, den växande entropin.

Han pekade på en underlighet: Om man har två behållare med var sin gas kan man göra en vinst genom att låta dem blanda sig med varandra. Olika utplåning genom blandning kan ge tillgång till ett visst arbete. Om gaserna från början är likadana får man däremot inget utbyte av att blanda dem – vilket intuitivt förefaller helt riktigt. Men detta får en märklig konsekvens. Maxwell skriver: »När vi nu säger att de båda gaserna är lika, så betyder det att vi inte kan skilja dem från varandra genom någon känd reaktion. Det är inte särskilt sannolikt, men möjligt, att två gasmängder som härrör från var sin källa men hittills har betraktats som lika, vid en senare tidpunkt visar sig vara olika, och att man kommer på en metod att skilja dem åt.» Vi kan alltså bli klokare med tiden och upptäcka skillnader som vi inte kunde se förut. Och detta innebär att det plötsligt finns tillgänglig energi där det inte fanns någon tidigare. Energidissipationen är alltså inte given utan kännedom om vår förmåga att beskriva – skilja mellan – tingen. Och den förmågan är ju inte konstant! Maxwell konstaterar:

»Av detta följer att idén om energins dissipation är beroende av vidden av vår kunskap. Tillgänglig energi är energi som vi kan leda i en önskad riktning. Dissiperad energi är energi som vi inte kan få tag i och dirigera efter önskan, exempelvis den energi som finns i det oroliga virrvarr av molekyler vi kallar värme. Men nu är virrvarr, liksom det beslätade begreppet ordning, inte en egenskap hos tingen själva utan bara i förhållande till det subjekt som uppfattar dem.» Och Maxwell fortsätter:

»En anteckningsbok med prydliga anteckningar ter sig inte virrig för en analfabet eller för ägaren, som förstår den fullständigt. Men för varje annan person som kan läsa framstår den som hopplöst förvirrad. På motsvarande vis skulle föreställningen om energins dissipation inte uppstå hos en varelse som är helt oförmögen att utnyttja naturens energier till sin egen fördel

eller hos den som kan följa varenda molekyls rörelse och gripa tag i den i rätta ögonblicket. Det är bara för en varelse på mellannivån, som kan ta fatt på vissa former av energi, medan andra undandrar sig hans grepp, som energin obönhörligt tycks röra sig från det tillgängliga tillståndet till det dissiperade.»¹⁸

Maxwells demon skrattar oss rakt i ansiktet. Vi skulle kunna kringgå termodynamikens andra huvudsats om vi bara var tillräckligt smarta. Men det är vi inte.

Utdrivningen av demonen blev ett huvudtema i 1900-talets vetenskapliga världsbild. För om det inte är något galet med Maxwells demonidé så är det bara vår dumhet som hindrar oss från att uppfinna evighetsmaskinen. Bara för att vi dödliga inte är klipska nog måste vi arbeta i vårt anletes svett.

Om det nu inte *kostar* något att vara så klok som den där demonen?