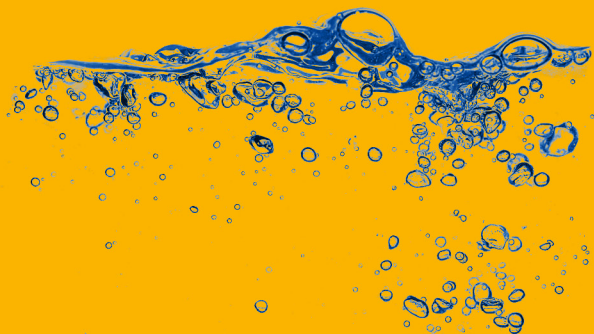




VÄRT
ATT
VETA



Oscar Henriksson

BUBBLOR

A portrait of Oscar Henriksson, a man with dark hair and a light beard, wearing a dark blue suit jacket over a light blue shirt. He is looking slightly to the right of the camera with a neutral expression. The background is a textured, light blue wall.

OSCAR HENRIKSSON är universitetslektor i fysik vid Åbo Akademi. Han doktorerade vid University of Colorado Boulder 2017 och är docent i högenergi- och gravitationsfysik vid Åbo Akademi samt gästforskare vid Forskningsinstitutet för fysik i Helsingfors. Han forskar om allt från svarta hål till fasövergångar och tycker om att förklara hur fysikens lagar binder ihop det vardagliga med det kosmiska.

Foto: Antti Rintala

Oscar Henriksson

BUBBLOR

*Svenska litteratursällskapet i Finland, Helsingfors
Appell Förlag, Stockholm
2026*

Innehåll

VARFÖR BUBBLOR?	3
FRÅN ATOMER TILL FASER	7
FRÅN MIKRO TILL MAKRO – SANNOLIKHET OCH ENTROPI	11
OMGIVNINGENS PÅVERKAN OCH FRI ENERGI	18
BUBBLOR – PÅ TRÖSKELN TILL DET NYA	27
BLANDNINGAR OCH BUBBLANDE DRYCKER	34
NÄR UNIVERSUM KOKAR – KOSMOLOGISKA BUBBLOR	40
DEN SISTA BUBBLAN	50
EPILOG – VARFÖR FYSIK?	54
Litteratur	57

*Till Olivia och Amélia,
som får mig att bubbla.*

VARFÖR BUBBLOR?

Betrakta en kastrull som värms upp på en spis. Först händer ingenting – vattnet är stilla och verkar inte märka av värmen som flödar in. Men skenet bedrar. På skalor som är alltför små för att synas med blotta ögat pågår en våldsam dans. Myriader av molekyler virvlar runt och kolliderar med varandra med hastigheter på flera hundra meter per sekund – snabbare och snabbare ju mer värme som tillförs. Detta kan fortgå länge, men till slut händer något. Molekylernas till synes slumpmässiga rörelser har skapat ett litet hålrum i vätskan – en bubbla har bildats.

Den här boken handlar om bubblor som denna. De uppstår när materia byter skepnad, i dramatiska transformationer som kallas *fasövergångar*. Bubblorna fungerar som frön ur vilka det nya tillståndet kan börja gro. De kan anta många olika former, och i vissa fall skulle du kanske tveka att kalla dem bubblor över huvud taget. Men vare sig de är gasfyllda klot, vätskedroppar som kondenserat ur luften, små kristaller av fastfrusna molekyler eller något ännu mer exotiskt, fyller de samma funktion: de för oss över tröskeln till det nya.

Fasövergångar kan uppstå i alla substanser – och som vi ska se, till och med i tomma rymden.

Men vatten är ett viktigt exempel eftersom vi enkelt kan observera två av dess transformationer: mellan is och vätska samt mellan vätska och ånga. En fasövergång är en spektakulär reaktion på förändrade förhållanden. När flytande vatten värms upp från rumstemperatur minskar dess densitet sakta men säkert, men när det vid 100 °C övergår i ånga faller densiteten plötsligt tusenfalt.

Mitt mål är att reda ut vad som ger upphov till dessa fasövergångar, och varför de ofta börjar med någon form av bubblor. Även om jag kommer att ge flera konkreta exempel, kan diskussionen säkert tidvis kännas abstrakt. Men det är just denna abstraktion som fysiker älskar, eftersom den är så kraftfull. Med dess hjälp kan vi se att bubblorna i kastrullen bara är ett exempel på ett universellt fenomen. Bubblor kan förekomma i alla hörn av vår värld och under alla epoker i vårt universum.

Så varför en bok om fasövergångar och bubblor? För att dessa fenomen förenar fysik på många nivåer: från det mikroskopiska till det kosmologiska, och från det vardagliga och bekanta till det matematiska och överraskande. Bubblor tar substanser från ett tillstånd till ett annat – men de kan också bygga broar mellan vardagslivet och universums djupaste mysterier.

Fysiken är full av dessa kraftfulla koncept. Den här boken hade kunnat heta *Fält*, eller *Vågor*, eller *Partiklar* – alla vardagliga ord som fysiker har laddat med nya, djupare betydelser. Kanske är det här naturvetenskapens kärna: att förklara så många olika fenomen som möjligt med så få och så omfattande begrepp som möjligt. I sitt arbete gör forskare detta till stor del med hjälp av matematik, men bakom varje ekvation finns alltid en berättelse – en förståelse för hur variablerna passar in i världen omkring oss. Det är några av dessa berättelser jag vill dela här.

Detta är en kort men ambitiös bok. Vår resa börjar i det mikroskopiska, med oräkneliga atomer fastlåsta i en komplex koreografi. I samband med det introduceras begrepp som entropi och fri energi, som hjälper oss ta språnget från det mikroskopiska till mer bekanta skalor. Med dessa verktyg kan vi beskriva summan av atomernas kaotiska rörelser som abstrakta landskap, där kullar och dalar berättar om materiens faser. Vi lär oss sedan att övergångar mellan faser inte kan ske hur som helst, utan måste börja med små frön, skapade av slumpen. Äntligen – bubblor! Slutligen tittar vi närmare på några exempel på bubblor både i vardagen och i kosmos.

Mitt mål är inte att förklara alla detaljer – det skulle kräva en mycket längre bok. I stället vill jag

ge en inblick i hur fysiker betraktar olika fenomen och förmedla en djupare förståelse för hur världen omkring oss hänger ihop. Jag hoppas förstås locka en del att läsa vidare på egen hand – några förslag finns i litteraturförteckningen.

Populärvetenskapliga böcker inom fysik kastar sig ofta över det mest banbrytande och extrema, som kvantmekanik, svarta hål och strängteori. Och visst är det spännande – det var dessa böcker som väckte mitt intresse för ämnet, och min forskning har rört liknande områden. Men det finns så mycket annan fysik – mer vardaglig, men likväl fascinerande – som också förtjänar att lyftas fram.

Här plockar jag det bästa av de båda ytterligheterna. Jag kommer inte att undvika banbrytande fysik – tvärtom. Innan den sista sidan kommer vi att ha avhandlat ett saftigt stycke kosmologi, inklusive teorier om materiens och universums uppkomst och slut. Men mitt mål är att förankra detta i vardagliga fenomen och väletablerad fysik.

Häri ligger fysikens storhet: den kopplar samman det stora med det lilla, det fantastiska med det familjära. Den låter oss, likt William Blake, se världen i ett sandkorn. Eller i vårt fall – i en kastrull med kokande vatten.

FRÅN ATOMER TILL FASER

Om vi vill förstå faser, fasövergångar och bubblor måste vi först påminna oss om hur allt omkring oss är uppbyggt. I sina publicerade föreläsningssanteckningar frågar sig fysikern Richard Feynman (1918–1988) vilken enskild mening som skulle föra vidare den största mängden vetenskaplig kunskap till nästa generation om allt annat gick förlorat. Hans förslag var atomhypotesen: ”att allting är uppbyggt av atomer – små partiklar som ständigt rör sig, som dras till varandra när de är på lagom avstånd, men stöter bort varandra när de pressas ihop”.

I dag tar vi denna atomhypotes för givet. Så sent som i början av 1900-talet var den ändå omstridd, eftersom många fysiker trodde att materien i själva verket är kontinuerlig. Problemet var att atomer är så väldigt små. Den typiska atomstorleken är ungefär en tiondels nanometer, alltså en tiomiljarddel meter. Ett gram vatten, jord eller luft innehåller ungefär 10^{23} atomer – en etta följd av 23 nollor. Antalet atomer i ett enda sandkorn är större än antalet sandkorn på en hel strand.

Vi känner till drygt hundra olika sorters atomer, varav flera dock är instabila och sällsynta i naturen. För att förstå dem i detalj krävs kvantmekanik – ett fascinerande ämne som jag bara

snuddar vid här. Jag nöjer mig med att sammanfatta enligt Feynman: atomer attraherar varandra på längre avstånd, men stöter bort varandra när de pressas ihop. De tenderar alltså att hålla sig på "lagom" avstånd från varandra, och kan på så sätt kan de bygga upp mer komplicerade strukturer.

En sådan struktur är *molekyler*. Syre- och kväveatomerna i luften vi andas gillar att para ihop sig två och två. På samma sätt bildar två väteatomer en vätemolekyl, med beteckningen H_2 . Lägg till en syreatom så får vi den välkända vattenmolekylen H_2O . Detta är bara början; en enorm mångfald av molekyler är möjlig. Än mer komplicerade processer, finslipade av evolutionen, kan leda till kolossala makromolekyler som proteiner och DNA – livets byggstenar.

En annan struktur är *kristaller*. Många atomer ordnar sig i regelbundna gitter, till exempel kristaller av kisel som ligger till grund för nästan all digital teknik. Även molekyler kan bilda kristaller, som när vattenmolekyler fryser till is. Dessa binds ofta svagare än rena atomkristaller, och därför smälter de lättare.

Jag kommer att kalla en godtycklig uppsättning av atomer för ett (*fysikaliskt*) system. I ett visst system kan atomerna ofta ordna sig på flera olika sätt. De olika arrangemangen kan delas upp i tre kategorier: fast, flytande och gas. I en gas är

atomerna eller molekylerna nästan helt frigjorda från varandra. De flyger runt fritt och fyller hela det utrymme de får, som luften i ett rum. I flytande form formar sig substansen efter behållaren, men molekylerna attraheras starkare till varandra och håller ihop, vilket bland annat ger vätskan dess ytspänning. I fast form kan atomer och molekyler bilda regelbundna kristallgitter, som i metaller och is, eller oordnade "amorfa" strukturer, som i glas och plast.

Den här uppdelningen i tre kategorier är väldigt grov och missar många detaljer. Ett mer noggrant begrepp är *faser*. Is, till exempel, är ju vatten i fast form, men det finns många olika faser av is – upp till 21 faser har observerats i skrivande stund. Det här beror på att det finns många olika gitterformationer som molekylerna kan låsas fast i, beroende på tryck och temperatur.

Man kan ofta åtskilja faser utifrån deras elektriska och magnetiska egenskaper. Till exempel övergår många metaller vid riktigt låga temperaturer till en *supraledande* fas, och leder då elektricitet helt utan motstånd. Så kallade *ferromagnetiska* ämnen, såsom järn, attraheras starkt till en magnet, men om temperaturer höjs tillräckligt blir de *paramagnetiska* och attraktionen blir mycket svag.

För att två tillstånd ska kallas olika faser måste

det finnas en tydlig skillnad mellan dem. Ett ämnes egenskaper förändras alltid en aning när förhållandena förändras, men en fasövergång är något mer dramatiskt. Under lång tid trodde man till och med att en substans förvandlades till en annan i en fasövergång, men i dag vet vi att det inte stämmer. När vatten fryser eller kokar är de elementära byggklossarna – vattenmolekylerna – oförändrade. På båda sidorna om fasövergången består materien av samma molekyler, som växelverkar med samma krafter. Det som förändras är deras kollektiva beteende, vilket i sin tur ger upphov till ett språng, en diskontinuitet, i ämnets egenskaper. Det som jag vill förklara här är vad som orsakar dessa förändringar, och varför de leder till bubblor.

Fasövergångar är ett exempel på det fysiker kallar *emergens*: egenskaper hos ett större system som inte enkelt kan förklaras utifrån de enskilda beståndsdelarna. Precis som ett samhälle är svårt att förstå genom att bara studera isolerade individer, är vattnets faser svåra att förstå utifrån en enskild molekyl. Vi behöver förstå något om hur 10^{23} molekyler beter sig tillsammans, och dessutom, hur de påverkas av sin omgivning. Detta faktum – att enkla byggstenar ger upphov till nya, överraskande helheter – är vad som gör fasövergångar och bubblor så fascinerande.

FRÅN MIKRO TILL MAKRO – SANNOLIKHET OCH ENTROPI

Det grundläggande problemet när vi vill beskriva materia är den oerhörda mängden beståndsdelar. Varje molekyl har en position, en hastighet och olika interna egenskaper, till exempel hur den är sammansatt och vibrerar. Att hålla reda på allt detta i en uträkning är fullständigt hopplöst, även för skickliga fysiker med kraftfulla datorer. Att mäta den 297 972 194 837 110 036 838 113:e molekylens hastighet i ett experiment är lika omöjligt. Lyckligtvis behöver vi inte känna till alla detaljer. De egenskaper som vi bryr oss om beror sällan på en enskild partikel. Det räcker ofta med att förstå hur den genomsnittliga atomen beter sig – och då kommer statistik och sannolikhet till vår räddning.

Det första vi måste göra är att bestämma exakt vad det är vi bryr oss om. Vilka av systemets egenskaper är det som vi kan mäta och kontrollera, och därför vill kunna förklara? Denna lista är ofta ganska kort; vanliga exempel är systemets energi, volym, tryck, temperatur och antalet partiklar. När det här är gjort har vi två olika sätt att beskriva systemet. Den fullständiga informationen om varje partikels rörelse – information som vi i praktiken aldrig har tillgång till – beskriver

systemets *mikrotillstånd*. Om vi i stället nöjer oss med ett mindre antal relevanta storheter beskriver vi ett *makrotillstånd*: en grov sammanfattning av de egenskaper som är viktiga för oss.

En hjälpsam analogi är ett kast med många tärningar. Det exakta resultatet – vilken siffra varje tärning visar – motsvarar ett mikrotillstånd. Men om vi bara bryr oss om summan av alla tärningarna beskriver vi ett makrotillstånd. Samma summa kan uppstå på många olika sätt: med fem tärningar fås summan 18 från $6 + 6 + 4 + 1 + 1$, från $5 + 5 + 3 + 3 + 2$ och från många andra kombinationer. På samma sätt motsvarar ett makrotillstånd i fysiken – beskrivet av till exempel en viss volym och total energi – ett stort antal möjliga mikrotillstånd.

När vi har med atomer att göra blir antalen mikrotillstånd snabbt ofattbara. Jag nämnde tidigare att ett gram av någon substans kan innehålla runt 10^{23} atomer. Det är redan ett astronomiskt stort tal, ungefär lika stort som antalet stjärnor i det observerbara universum. Men antalet möjliga mikrotillstånd för ett sådant system är ännu mer svindlande – ofta i storleksordningen $10^{10^{23}}$, en etta följt av 10^{23} nollor. Här räcker ord som ”astronomiskt” inte längre till.

Hur kan vi hoppas på att koppla ihop dessa två perspektiv – det mikroskopiska och det makro-

skopiska – när skillnaden i skala är så enorm?

Vi vet att en gas tenderar att sprida ut sig jämnt i en behållare. Ingen har någonsin andats i ett rum där luften spontant samlats i ett hörn. På samma sätt tenderar energi att fördela sig någorlunda jämnt. Det verkar alltså finnas en princip i naturen som väljer ut tillstånd där vissa storheter, som energi och antal partiklar, sprids ut på ett visst sätt. Denna princip är *termodynamikens andra huvudsats*.

Till skillnad från många andra fysikaliska lagar bygger den andra huvudsatsen på sannolikheter. Den kan uttryckas som en ganska självklar observation: det mest sannolika makrotillståndet är det som troligtvis kommer att inträffa. Men hur avgör vi vad som är sannolikt? Jo, vi kan anta att alla möjliga mikrotillstånd är ungefär lika sannolika. Då bestäms sannolikheten för ett visst makrotillstånd av hur många mikrotillstånd som motsvarar det. Att beräkna sannolikheten reduceras alltså till att räkna alla sätt som makrotillståndet kan uppstå på.

Här hjälper återigen analogin med tärningskast. Sannolikheten för en viss summa bestäms av hur många sätt det finns för tärningarna att addera upp till rätt tal. Om vi kastar tio tärningar och vill att summan ska bli 10 finns bara ett sätt: alla tärningar måste visa 1. För att summan ska bli

11 finns det fler möjligheter: en tärning måste visa 2 och de andra 1, men det spelar ingen roll vilken som visar 2, så vi har tio möjligheter. Makrotillståndet "11" är alltså mer sannolikt än "10".

Ett annat exempel är en pokerhand. Det finns miljoner olika kombinationer av de fem korten. Om vi inte bryr oss om den exakta handen utan bara hur många röda kort vi får, kan detta definiera ett slags makrotillstånd. Makrotillståndet "inga röda kort" motsvarar 65 780 olika mikrotillstånd (alltså pokerhänder). För tillståndet "två röda kort" är motsvarande antal 845 000. Det senare är alltså nästan 13 gånger mer sannolikt.

Låt oss nu återvända till luften i rummet. Givet ett visst antal molekyler, hur kommer de att sprida ut sig? Den andra huvudsatsen säger att de fördelar sig jämnt, helt enkelt eftersom det finns många fler sätt för molekylerna att vara jämnt utspridda än att vara hopträngda i ett hörn. På samma sätt fördelar sig energin mellan molekylerna, eftersom det finns fler möjliga mikrotillstånd där energin är utspridd än där den är samlad hos ett fåtal partiklar.

I stället för att gång på gång upprepa "antalet mikrotillstånd som motsvarar ett visst makrotillstånd" kan man använda begreppet *entropi*. Om vi känner till antalet mikrotillstånd finns det en enkel formel som ger entropin. Ju fler mikrotill-

stånd, desto högre är makrotillståndets entropi, och desto mer sannolikt att det inträffar. Den andra huvudsatsen säger alltså att system utvecklas mot tillstånd med så hög entropi som möjligt.

Entropi beskrivs ofta som ett mått på oordning. I ett städat rum finns bara några få sätt att placera alla föremål så att ordningen är ”perfekt”, men det finns enormt många sätt att skapa oreda. Om någon går in och flyttar runt saker helt slumpmässigt, blir rummet troligtvis allt stökigare tills det når ”maximal oordning”, alltså maximal entropi.

Eftersom den andra huvudsatsen är baserad på sannolikheter är den inte absolut. Det finns alltid en (ytterst liten) chans att entropin tillfälligt minskar. Det är möjligt att slumpmässiga handlingar tillfälligt råkar städa en del av rummet. Det är möjligt att luftmolekylerna tillfälligt samlas i ett hörn, med vakuum i resten av rummet. Men när vi handskas med så stora tal – en etta följd av 10^{23} nollor – blir dessa sannolikheter ofattbart små. Vi skulle troligtvis behöva vänta längre än universums livstid för att lyckas se alla luftmolekyler samlade i ett och samma hörn. I sådana fall kan vi med gott samvete säga att entropin alltid ökar.

Det finns vanligtvis fler möjliga mikrotillstånd ju mer energi systemet har. Entropin ökar alltså

när systemets energi ökar, och minskar när energin minskar. Men om energin hålls konstant finns det en övre gräns för entropin. Om entropin når denna gräns upphör den att förändras. Systemet är då i jämvikt. Atomer och molekyler fortsätter rusa omkring, men de makroskopiska egenskaperna är konstanta. Alla processer är balanse-
rade; till exempel tillförs energi till en viss del av systemet lika ofta som den lämnar samma del.

Det finns ett nära samband mellan entropi och ett mer bekant begrepp: *temperatur*. Vi vet intuitivt att värme (energi) spontant flödar från varmt till kallt. En kopp kaffe svalnar, men blir aldrig varm av sig själv. Så fortsätter det tills jämvikt nås och temperaturen är densamma överallt. Varför? Därför att denna rörelse ökar entropin.

Ett kallt föremål är helt enkelt mer mottagligt för energi än ett varmt. När en isbit får lite värme öppnas många nya möjligheter: molekyler som varit fastlåsta börjar vibrera mer och kan till och med frigöras från gittret. Samma energimängd gör långt mindre skillnad i ett ljummet glas vatten, där molekylerna redan rör sig ganska fritt. Därför flyter värmen från vattnet till isbiten. Temperatur kan ses som ett mått på hur "tacksamt" ett system tar emot energi – kall materia ger rik utdelning i entropi, varm betydligt mindre.

På ett liknande sätt kan vi förstå begreppet *tryck*. Tänk dig en rörlig vägg som delar ett system i två delar. Om trycket är lägre på ena sidan kommer väggen att drivas åt det hållet, tills trycket jämnat ut sig. När väggen rör sig så här minskar volymen, och därmed också entropin, på sidan med lägre tryck. Enligt andra huvudsatsen måste då entropin öka ännu mer på sidan med högre tryck. Trycket i varje del av ett system kan därför ses som ett mått på hur entropin förändras när dess volym ändras. Att trycket jämnar ut sig är också det en direkt följd av att den totala entropin maximeras.

Sammanfattningsvis har vi alltså sett att sannolikheten för ett makrotillstånd bestämmer dess entropi. Entropi ger oss samtidigt en ny förståelse för vardagliga begrepp som temperatur, tryck och jämvikt. System strävar mot jämvikt – samma temperatur och tryck överallt – eftersom detta maximerar entropin. På så vis ser vi hur den andra huvudsatsen väljer ut vilka tillstånd som faktiskt uppstår i naturen.

Det är värt att understryka hur enkel idén bakom den andra huvudsatsen är: det som sker är det som är mest sannolikt. Den enda förutsättningen är att systemen vi studerar består av ett stort antal komponenter, resten är ren sannolikhetslära. Detta gör den andra huvud-

satsen oerhört robust. Fysikern Arthur Eddington (1882–1944) uttryckte det kraftfullt: ”Om din teori visar sig strida mot termodynamikens andra huvudsats kan jag inte ge dig något hopp; då återstår ingenting annat än att sjunka ihop i djupaste förnedring.”

Nästa steg är att se hur den andra huvudsatsen kan hjälpa oss att förstå fasövergångar och bubblor. Under vissa förhållanden kan ett system nämligen försöka maximera entropin på två olika sätt – dessa motsvarar två olika faser, till exempel flytande vatten och ånga. Vilken fas som förverkligas beror då inte bara på systemet, utan också på dess omgivning.

OMGIVNINGENS PÅVERKAN OCH FRI ENERGI

Den andra huvudsatsen har en begränsning: den gäller bara för system som är fullständigt isolerade, så att de varken påverkar eller påverkas av sin omgivning. I vardagslivet är detta mycket ovanligt. Vattnet i vår kastrull bombarderas konstant av luftmolekyler från omgivningen. Vattnets energi, volym och antalet molekyler kan alla förändras genom denna växelverkan.

Den andra huvudsatsen säger att den totala entropin ökar. Men om vattnet bara är en del av ett större system kan förändringar som minskar

vattnets entropi vara tillåtna om de samtidigt ökar omgivningens entropi ännu mer. Ett enkelt exempel är om vattnets temperatur är högre än omgivningens. Då kommer värme att flöda från vattnet till omgivningen, ända tills de har samma temperatur. Vattnets entropi minskar, men den totala entropin ökar.

För att den andra huvudsatsen ska gälla måste vi förstora vårt system så att det inkluderar allt som på något sätt kan påverka vattnet, till exempel luften i rummet och kastrullen. Det här är inte särskilt praktiskt, och vi riskerar att tappa fokus på det som vi egentligen ville förstå. Vi tvingas dra slutsatsen att entropi inte är det lämpligaste verktyget för system som växelverkar med sin omgivning. Vad kan vi använda i stället?

Svaret kallas *fri energi*. Fri energi säger oss hur mycket ett visst makrotillstånd ”kostar”, om vi tar omgivningen i beaktande. För att förklara detta tar jag hjälp av ett underhållande exempel från Daniel V. Schroeders bok *An Introduction to Thermal Physics* (2000). Föreställ dig en magiker som vill trolla fram en kanin ur intet. Hur mycket energi behöver hen för att lyckas? För ett isolerat system skulle svaret helt enkelt vara ”summan av energierna i kaninens alla beståndsdelar” – låt oss kalla denna energi för E . Men det förutsätter att magikern skapar kaninen i vakuum (vil-

ket inte skulle sluta väl). Om omgivningen i stället är full av luft måste magikern först göra plats för kaninen genom att tränga undan en del av luftmolekylerna. Den energi som krävs för detta visar sig vara produkten $P \times V$, där V är kaninens volym och P är det omgivande lufttrycket.

Men omgivningen kan också underlätta skapandet. Värme flödar spontant från varmt till kallt, så det räcker för magikern att trolla fram en ”kall” kanin, vilket kräver mindre energi, och sedan låta omgivningen värma upp den. Den energi som omgivningen kan bidra med på detta sätt är lika med produkten $T \times S$, där T är omgivningens temperatur och S är kaninens entropi. Magikern får alltså denna mängd energi gratis.

Den totala energi som magikern själv måste stå för är därför $E + P \times V - T \times S$. Den här kombinationen kallas systemets (i det här exemplet kaninens) fria energi. Den kallas så eftersom detta också är energin som kan frigöras om magikern i stället trollar bort kaninen – men det är ett mindre trevligt exempel.

Nu kommer den viktiga slutklämmen: om ett system är i kontakt med en omgivning så är det dess fria energi som styr utvecklingen. Med lite matematik kan man nämligen visa att den totala entropin, för systemet och omgivningen, är som störst exakt när systemets fria energi är

som minst. Den andra huvudsatsen innebär då att systemets fria energi tenderar att minimeras.

Nu kan vi korrigera en vanlig missuppfattning kring den andra huvudsatsen: Om världen alltid rör sig mot oordning (högre entropi), varför ser vi hela tiden ordning uppstå runt omkring oss? Svaret är återigen att de flesta system inte är isolerade. När till exempel vatten fryser till is ordnas molekylerna i ett regelbundet gitter, vilket leder till att vattnets entropi minskar. Detta strider inte mot den andra huvudsatsen, eftersom omgivningens entropi ökar ännu mer.

För vattnet självt är det i stället dess fria energi som är avgörande. I ekvationen för fri energi ser vi att entropin multipliceras med temperaturen. Det betyder att entropin spelar mindre roll ju lägre (närmare absoluta nollpunkten) temperaturen är, och det är då viktigare att minimera de andra termerna i ekvationen, till exempel den (vanliga) energin E . Det är precis vad som sker när vatten fryser till is.

Med fri energi kan vi alltså beskriva hur ett visst system, till exempel vattnet i kastrullen, beter sig om omgivningen håller det vid en viss temperatur och ett visst tryck. Det är givande att föreställa sig detta som ett abstrakt landskap – systemets *fria energilandskap*.

I detta landskap symboliserar de två riktning-

arna, nord-syd och öst-väst, i stället två av makrotillståndets egenskaper, till exempel dess energi och volym. Vi kan alltså beskriva ett makrotillstånd genom att ge dessa ”koordinater” i landskapet. Den tredje dimensionen i landskapet, höjden, motsvarar den fria energin.

Ofta har makrotillstånd fler än två egenskaper, och det här landskapet har då ännu fler dimensioner. Rent matematiskt är detta inget problem, men här håller vi oss till två för att det ska vara lättare att visualisera.

Precis som vanliga landskap kan fria energilandskap rymma både kullar och dalar. Ett system kan ”vandra runt” i sitt landskap genom att utbyta till exempel energi och volym med sin omgivning, och likt en kula som rullar neråt dras det på så vis mot minsta möjliga fria energi.

Botten av en dal i detta landskap motsvarar det vi kallar en fas: ett *stabilt tillstånd* för systemet. Om vi (omgivningen) stör systemet lite, exempelvis genom att tillföra lite energi, så flyttas det en bit uppför sluttningen, men återvänder snart till dalbotten. Sådana små störningar, eller *fluktuationer*, orsakas hela tiden av kollisioner med partiklar från omgivningen. Vanligtvis leder de alltså inte till stora förändringar – med ett viktigt undantag, som jag kommer till snart.

Ofta finns det mer än en dal i detta landskap

– flera faser kan alltså vara möjliga. Om systemet är en viss mängd vatten finns det en dal som motsvarar vätska, en som motsvarar ånga och en som motsvarar is. Och som redan nämnts finns det i själva verket många olika sorters is och därför också många ”isdalar”.

Det fria energilandskapet beror dessutom på omgivningen, till exempel dess tryck och temperatur, vilket vi ju kan se i ekvationen för fri energi. När dessa förändras ändrar landskapet form. För det ljumna vattnet i vår kastrull är dalen som motsvarar flytande vatten djupast. När vi sätter på spisen stiger omgivningens temperatur, och denna dal rör sig långsamt uppåt mot högre energier och volymer. Samtidigt öppnar sig en annan avlägsen dal, den som representerar gasfasen, alltmer. När de två dalarna blivit lika djupa kan en fasövergång ske: vattnet blir till ånga.

Nu börjar vi ana hur abrupta fasövergångar kan uppstå. Runt vattnets kokpunkt är vätskedalen och ångdalen ungefär lika djupa. Deras fria energier, enligt ekvationen $E + P \times V - T \times S$, är ungefär lika. Men avståndet mellan dalarna är stort: för en given mängd vatten är ångdalens volym över tusen gånger större. Termerna E och $P \times V$ är mycket större för ångdalen, men dess fria energi kan ändå hållas låg tack vare entropin S . Ånga, där vattenmolekylerna fritt surrar runt

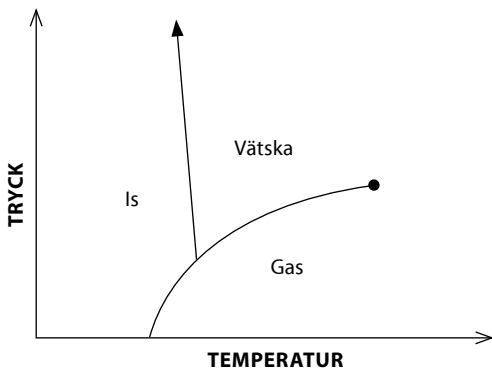
och krokar i varandra, är ett mindre ordnat tillstånd än flytande vatten, där molekylerna dansar tätt intill varandra (is är som sagt ännu mer ordnat). När temperaturen ökar blir entropin alltmer avgörande för den fria energin. En liten ökning i temperaturen, strax under till strax över 100 °C, är till slut tillräckligt för att ångdalen ska bli den djupare, och därmed sätta igång en dramatisk transformation.

Många fasövergångar uppstår så här, genom en dragkamp mellan energikrävande men entropirika tillstånd som gaser och mer ordnade och energiskt sparsamma tillstånd som vätskor.

Om vi känner till det fria energilandskapet för vårt system, och hur det beror på de yttre förhållandena, är det lätt att lista ut när fasövergångar kommer att ske; vi letar bara efter förhållanden när två dalar är lika djupa. Vi kan sedan rita ett fasdiagram som för varje temperatur och tryck berättar i vilket tillstånd systemet är – vilken dal som är djupast.

Bilden här intill illustrerar fasdiagrammet för vatten. Linjerna visar gränserna mellan faserna. Vi ser att för låga temperaturer (till vänster i diagrammet) är vattnet i fast form (de många olika isfaserna visas inte). För högre temperaturer (till höger) kan vi ha en vätska eller en gas, beroende på trycket. Vid normala lufttryck och vid rums-

temperatur befinner vi oss i vätskedelen av diagrammet, strax ovanför linjen mot gasfasen. När temperaturen ökar rör vi oss högerut, tills vi korsar linjen. Vid ännu högre temperaturer har gasfasen lägst fri energi, och tar över.



Lutningen på linjen mellan gas och vätska visar att kokpunkten minskar vid lägre tryck. Det här betyder att det kan ta länge att tillreda pasta uppe på Mount Everest. Vid så låga lufttryck kokar vatten redan vid 70°C , och den lägre temperaturen gör att pastan tillagas långsammare.

Vid riktigt höga temperaturer ser vi något intressant: linjen mellan vätska och gas tar plötsligt slut. Det är inget misstag – vid temperaturer över cirka 374°C suddas den skarpa skillnaden

mellan vätska och gas ut. Slutet på linjen kallas den *kritiska punkten*. Om vi börjar med flytande vatten och, genom att ändra temperatur och tryck, går runt denna punkt utan att korsar linjen så övergår vattnet till ånga utan att någonsin koka. Det finns då inget tydligt ögonblick när vätskan blir till gas. Man kan därför hävda att flytande form och gas egentligen hör till samma fas, trots att de vid vardagliga förhållanden ser så olika ut.

Ett mått på hur tydlig fasgränsen är – hur stor skillnaden är mellan faserna – är hur mycket energi som måste tillföras eller tas bort när systemet byter fas. I det fria energilandskapet motsvarar det här ett slags avstånd mellan de två dalarna. För vatten som kokar under vanligt lufttryck handlar det om en ganska stor mängd energi, men den blir mindre vid högre tryck och försvinner helt vid den kritiska punkten.

Eftersom energi inte kan överföras hur snabbt som helst fungerar detta som en slags bromskloss. Det tar tid att koka bort allt vatten i en kast-rull, och under själva kokningen går all tillförd energi åt till att omvandla vattnet till ånga. Därför stannar temperaturen vanligtvis nära 100 °C tills allt vatten har kokat bort, något som man lätt kan kontrollera själv med en lämplig termometer.

Ett annat sätt att visa hur temperaturen hålls konstant under en fasövergång är att koka vatten

i en pappersmugg över en öppen låga. Utan vatten skulle pappret snabbt antändas när dess temperatur når drygt 200 °C (runt 451 Fahrenheit, vilket gav upphov till titeln på Ray Bradburys dystopiska roman från 1953). Men så länge vattnet kokar hålls både det och det tätt omslutande pappret runt 100 °C, och då börjar pappret inte brinna.

Vi har nu sett hur fasövergångar kan förstås som en dragkamp mellan de olika termerna som påverkar den fria energin, och hur vi kan föreställa oss detta som ett landskap med en dal för varje fas. Men en viktig fråga återstår: Hur går själva fasövergången till? I praktiken sker den ju inte som ett enda plötsligt hopp. I stället bildas och växer små frön av den nya fasen, såsom bubblorna av ånga i kokande vatten. Vi ska nu se närmare på hur detta går till.

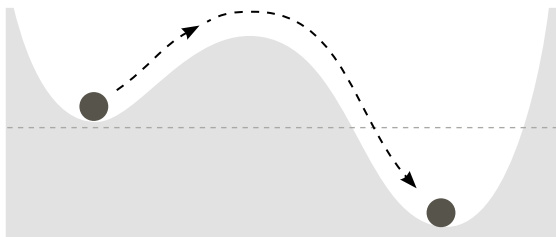
BUBBLOR - PÅ TRÖSKELN TILL DET NYA

Det fria energilandskapet har alltså vanligtvis flera dalar, men en är djupast (utom precis vid en fasövergång). Enligt den andra huvudsatsen dras systemet mot den här djupaste dalen, som utgör en helt stabil fas.

Men systemet kan trots det fastna i de andra dalarna, åtminstone tillfälligt. Även dessa dalar är ju stabila mot små störningar, eller fluktua-

tioner. Det här förklarar varför exempelvis vatten kan *underkylas*, det vill säga fortsätta existera i flytande form under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, och *överhettas*, existera i flytande form över $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den flytande fasen försvinner alltså inte när den kritiska temperaturen korsas; vätskedalen finns fortfarande där. Faser som på detta sätt existerar utan att de har lägst fri energi är ”nästan stabila”, eller *metastabila*.

Bilden nedan visar ett tvärsnitt av ett landskap med två dalar. Systemet, som symboliseras av en boll, sitter till en början fast i den vänstra dalen, trots att den högra har lägre fri energi – tillståndet är metastabilt. Den ”entropiska kraften” letar konstant efter sätt att föra systemet till den djupare dalen. Men då måste energibarriären först övervinnas – för att den fria energin ska minska måste den först öka.



Detta är möjligt tack vare fluktuationer. Kom ihåg att ett system kan utforska sitt fria energilandskap genom växelverkan med omgivningen. På så vis kan systemet röra sig en bit uppför dalgången. Men detta kan inte ske överallt samtidigt. För system av vardaglig storlek krävs en stor mängd energi för att ta hela systemet upp till krönet. Fluktuationerna som sker i fysikaliska system är vanligtvis mikroskopiska. Sannolikheten för en viss fluktuation blir snabbt mindre ju mer energi den kostar. Att hela systemet skulle övergå till den nya fasen på samma gång är oerhört osannolikt.

Det är däremot möjligt för en liten del av systemet. Systemet självt står ju aldrig stilla; dess atomer vibrerar och kolliderar med varandra, och dess energi rör sig därmed hit och dit. Om tillräckligt mycket energi råkar hamna på samma plats, kan det vara tillräckligt för att ta den lilla delen av systemet över krönet mellan dalarna. Det här är en bubbla.

Innan vi fortsätter vill jag betona hur universellt detta är. Det gäller inte bara vattenbubblor, även om det är ett bra exempel. Alla fysikaliska system som genomgår abrupta fasövergångar gör det vanligtvis genom att skapa någon form av bubblor. Tänk på gaserna i luften runt dig – kväve, syre eller koldioxid. Om vi separerar dem

och kyler ner dem (eller höjer trycket) kommer de förr eller senare att övergå till flytande eller fast form, och övergångarna börjar med att små droppar eller kristaller av den nya fasen bildas – en sorts bubblor. Ta ett ämne som till vardags är solitt, till exempel järn, och hett upp det tills det börjar smälta. Även denna övergång sker genom att små bubblor av flytande järn bildas.

På utsidan av en bubbla är systemet fortfarande i den gamla fasen. På insidan, däremot, sträcker sig systemet över krönet mot det nya tillståndet – från vätska till gas, om vi talar om vatten som kokar. Men vad händer efter att en bubbla bildats, slumpmässigt och spontant? Det beror på hur stor bubblan är. Alla bubblor utsätts nämligen för en dragkamp mellan två effekter. Den ena av dessa leder till expansion, och den andra till kollaps.

Den första effekten beror på skillnaden i fri energi mellan de två faserna. Exakt vid temperaturen för fasövergången är ju skillnaden noll. Men så fort vi överhettar eller underkyler den gamla fasen något, har den nya fasen en lägre fri energi än den gamla. Kom ihåg: fri energi minimeras för att entropi maximeras, och entropi maximeras för att det är det mest sannolika som kan ske. En skillnad i fri energi leder därför till ett slags ”sannolikhetstryck” som vill utvidga områ-

den med den nya fasen. (I vissa fall är detta sannolikhetstryck exakt samma sak som det vi vanligtvis kallar tryck.) Ju mer vi överhettar eller underkyler, desto större blir detta tryck, och desto lättare blir det för en bubbla att växa.

Men den andra effekten försöker krympa bubblan. Orsaken är att bubblans yttre rand måste sträcka sig över den fria energibarriären för att dess mittpunkt ska kunna närma sig den lägre dalen. Randen, bubblans yta, har alltså en hög fri energi, som leder till en kraft som drar ihop bubblan. Vi kallar detta bubblans *ytspänning*.

Huruvida en viss bubbla krymper eller expanderar beror på förhållandet mellan dessa effekter. Den krympande kraften, ytspänningen, beror på ytans storlek, dess area. Den expanderande kraften beror däremot på bubblans volym, vilken avgör hur mycket av den nya fasen som ryms inuti. För små bubblor är ytans area stor jämfört med volymen, och ytspänningen vinner. Bubblan kollapsar och systemet halkar tillbaka till den metastabila dalen.

Om bubblan är tillräckligt stor vinner i stället tryckskillnaden. Bubblan kan då växa sig stor och bidra till att fasövergången genomförs. En ångbubbla i kokande vatten är samtidigt lättare än vätskan och flyter snabbt upp till ytan där ångan

avdunstar, men i andra fasövergångar kan bubblan i stället stå stilla medan den växer sig större.

En bubbla måste alltså vara tillräckligt stor för att kunna växa. Samtidigt är det osannolikt att väldigt stora bubblor bildas spontant. De viktigaste bubblorna är då de som är precis så stora att de kan börja växa, men inte större. De ligger på gränsen mellan kollaps och expansion.

En konsekvens av det här är att fasövergångar alltid kräver en liten underkylning eller överhettning. Annars finns inget sannolikhetstryck som kan få bubblor att växa, och de kommer i stället att kollapsa på grund av ytspänningen.

Det här kan låta som en motsägelse. Vi är ju vana vid att vatten börjar koka vid ganska exakt 100 °C, utan någon större överhettning. Men sannolikheten att en tillräckligt stor bubbla ska bildas på egen hand är faktiskt väldigt liten så länge inte vattnet överhettas avsevärt. Om detta var slutet på historien skulle vattenkokning vara ett farligt experiment i stället för en vardagsrutin – vatten som är ordentligt överhettat kokar nämligen explosivt när den första bubblan väl bildas.

Lösningen är att systemets omgivning ofta underlättar bildandet av bubblor. Det är som sagt bubblans ytspänning, som beror på ytans area, som kostar fri energi. Om det fanns något sätt att minska arean skulle det bli enklare att

bilda bubblor. Det här är möjligt om omgivningen kan bidra med färdiga ytor som inte kostar lika mycket fri energi. Bubblor som rör dessa ytor kan vara mindre utan att kollapsa, och det är därför mycket mer sannolikt att de bildas.

Det här är orsaken till att bubblor i drycker alltid bildas på glasets sidor eller botten. Bubblorna utnyttjar ytan som redan finns mellan glas och vätska för att lättare smyga över energibarriären. Pappersmuggar eller väl använda glas har skrovligare ytor, vilket leder till att mikroskopiska fickor av gas kan bildas. Dessa ger bubblorna en ännu lättare start i livet och kan leda till stora mängder skum.

Diverse andra partiklar och orenheter kan också bidra med lämpliga ytor för bubblor att växa på. Detta ger bland annat upphov till objekt av himmelska proportioner – nämligen moln. Dessa bildas när vattenånga stiger i atmosfären. När den stiger kyls den också ner och blir till slut metastabil (eller *övermättad*). På dessa höjder finns inga glasytor för vattnet att kondensera på, men i stället finns stora mängder luftburna partiklar – allt från havssalt till sot. När dessa droppar blir tillräckligt stora kan de sedan falla ner till marken som regn.

Om vattnet kyls ner ytterligare kan det bildas is och leda till snöfall. Men det visar sig vara svå-

rare att hitta lämpliga partiklar för frön av iskristaller att bildas på. Moln i atmosfären kan därför bära på stora mängder kraftigt underkyllt vatten, vars egenskaper är viktiga för jordens klimat.

Man kan själv skapa underkyllt vatten hemma i frysen. Det enda som behövs är tillräckligt rent vatten i en slät plastflaska. Placera flaskan i frysen och låt den ligga där tills den är ordentligt nedkyld. Om experimentet lyckas kan du försiktigt ta ut flaskan och se att vattnet fortfarande är flytande trots den låga temperaturen. En lätt stöt mot flaskan kan vara tillräckligt för att skapa en liten kristallbubbla, som sedan snabbt expanderar tills hela vätskan stelnat.

BLANDNINGAR OCH BUBBLANDE DRYCKER

När vi nu har lärt oss hur fasövergångar och bubblor uppstår är det dags att slappna av och fira – och vad passar då bättre än en bubblande dryck? Det är naturligt att undra om de små bubblorna i ett glas champagne har något gemensamt med bubblorna i en kastrull med kokande vatten. Alkoholdrycker, läsk och kolsyrat vatten får ju sina bubblor tack vare att de innehåller gaser som koldioxid. De är alltså exempel på blandningar av olika substanser.

Vi ska nu titta närmare på några sådana bland-

ningar och deras fasövergångar. I slutet av kapitlet återkommer vi till de bubblande dryckerna, och ser att de har förvånansvärt mycket gemensamt med kokande vatten och andra fasövergångar.

Låt oss börja med ett lätt exempel – luft. Luft innehåller små mängder vattenånga, vilket orsakar luftfuktigheten. Men hur är detta möjligt? Vid rumstemperatur och vanligt lufttryck borde ju vatten bara förekomma i vätskeform.

Det viktiga är att det fysikaliska systemet inte bara består av vattenånga. Luft består till största delen av andra gaser, främst kväve och syre. Tänk dig en flaska fylld med lite flytande vatten och resten luft. Vattenmolekylerna studsar runt, krockar och utbyter energi på sitt vanliga, kaotiska sätt. Ibland får en molekyl en tillräckligt hård stöt för att bryta sig loss från de andra.

När separationen skett fortsätter vattenmolekylen att krocka med luftmolekyler och kastas runt. Efter en lång och förvirrad färd kanske den återvänder till vattenytan. Men under tiden har andra vattenmolekyler hunnit kastas ut, eller *avdunsta*. Resultatet blir att det alltid finns en viss mängd vatten uppblandat med luften. Om andelen luft är mycket större än andelen vatten (som är fallet med ett vattenglas som du lämnar i ett torrt rum) kommer allt vatten till slut att avdunsta.

För system med flera komponenter, som luft och vatten, kan jämvikt alltså innebära att två faser samexisterar – en del som vätska och resten som gas, till exempel. För rent vatten kan vätska och gas bara vara i jämvikt vid exakt 100 °C. Men i blandningar sträcker sig denna jämvikt över ett helt intervall av temperaturer.

Vi kan också förklara det här med hjälp av fri energi. För blandade system finns en ny ”koordinat” i det fria energilandskapet: koncentrationen av de olika komponenterna. I luft-vatten-systemet kan vi variera vattenkoncentrationen från 0 (bara luft) till 100 procent (bara vatten). Precis som tidigare har landskapet en vätskedal, där hela systemet är i flytande form, och en gasdal, där hela systemet är en gas. Men om koncentrationen hålls konstant kan systemet för vissa temperaturer ”sitta fast” mellan gas- och vätskedalen. För att minimera den fria energin krävs då en kompromiss: en del av systemet (främst luftmolekylerna) existerar i gasform, och resten (främst vattnet) i vätskeform. En sådan samexistens av två faser minimerar den fria energin så långt det går utan att ändra på koncentrationerna.

Blandningar av olika substanser kan vara användbara om vi vill styra när en fasövergång sker. På vintern strör man ofta salt på vägarna för att förhindra isbildning. På egen hand smälter

salt vid mycket höga temperaturer, men vattenmolekylerna kan bryta upp det starka saltgittret även i kalla förhållanden. När saltet väl lösts upp i vattnet gör saltjonerna det svårare för vattnet att frysa, eftersom de stör vattenmolekylerna när de försöker bilda ett ordnat kristallgitter.

Om saltet och vattnet i stället hölls åtskilda, med allt salt samlat på ett ställe, skulle vattnet kunna frysa i fred. Men en sådan separation skulle öka ordningen i systemet, och därmed minska entropin. Kom ihåg att ekvationen för fri energi innehåller termen $-T \times S$, så entropin speglar en mindre roll vid låga temperaturer. För en saltblandning måste man därför gå ner till ännu lägre temperaturer än för rent vatten för att den frusna fasen ska vinna.

Salt påverkar även kokpunkten. När vattnet vill bli ånga runt 100 °C hänger inte saltet med. För att vattnet ska kunna förångas krävs återigen en separation av salt och vatten, vilket sänker entropin och kostar fri energi. Resultatet blir att salt både sänker fryspunkten och höjer kokpunkten, så att blandningen håller sig flytande över ett större temperaturintervall.

Om vi i stället blandar vårt vatten med ämnen som kokar vid lägre temperatur sänks kokpunkten. Ett exempel är alkohol. Etanol kokar vid cirka 78 °C, och alkoholdrycker, som innehåller

vatten och etanol (och annat som är viktigt för smaken men inte för vår diskussion), kokar därför under 100 °C.

Låt oss säga att vi på julaften vill värma en glögg som börjar koka vid 90 °C (lite beroende på alkoholhalten). Gasbubblorna som bildas vid denna temperatur består främst av etanol med en liten del vatten. När glöggen kokar börjar alkoholhalten sjunka – men det är en långsam process. Precis som det tar tid att koka bort rent vatten tar det också tid att koka bort etanolen ur glöggen. Detta kräver ju att omgivningen hinner tillföra tillräckligt med energi. Det finns alltså ingen orsak till panik om ett par bubblor dyker upp i glöggkastrullen.

Även om glöggen börjar koka vid 90 °C, kokar inte all vätska bort vid den temperaturen. Vid till exempel 92 °C finns en vätska kvar som består av vatten med en liten mängd etanol. Fortsätter vi höja temperaturen kokar vätskan bort helt en bit under 100 °C. Detta skiljer sig från rent vatten, som håller sig vid 100 °C tills allt har förångats.

Precis som för luft och vatten kan vi beskriva glöggens beteende med hjälp av fri energi. Inom ett litet temperaturintervall strax över 90 °C sitter glöggsystemet fast mellan två dalar i det fria energilandskapet. Då minimeras den fria energin genom en kombination av vätska (till största

delen vatten) och gas (främst etanol). När glögg ligger i detta temperaturintervall och vi tillför värme övergår mer och mer av vätskan till gasform – glöggen kokar.

Nu till kolsyrat vatten. Koldioxid (CO_2) förekommer naturligt i atmosfären. Vid normala tryck existerar det som gas ända ner till -78°C , och övergår då direkt till fast form (torris). Under extremt högt tryck – cirka 56 gånger vanligt lufttryck – hittar vi däremot en vätskefas. En blandning av vatten och koldioxid under sådana gigantiska tryck skulle alltså vara helt i vätskeform, utan gasbubblor.

Om trycket sen sänks får detta samma effekt som när vi värmer upp glögg. Vätskan blir metastabil, och gasbubblor kommer så småningom att börja bildas. Liksom för etanolen i glögg kommer inte all koldioxid i vattnet att bubbla bort direkt. Vid fem gånger vanligt lufttryck (liknande förhållandena i en champagneflaska) finns en del CO_2 i gasform, tillsammans med lite vattenånga. Den återstående vätskan innehåller fortfarande en ansevärd mängd koldioxid.

När trycket inte längre förändras upphör bubblandet, och vätska och gas är i jämvikt. Detta motsvarar en champagneflaska med sluten kork. När korken sedan öppnas sjunker trycket ner till vanligt lufttryck. Då är systemet inte längre i jäm-

vikt och bubblandet startar igen tills nästan all CO_2 har lämnat vätskan.

Bubblorna i kolsyrat vatten och champagne orsakas alltså av en fasövergång, mycket lik den som sker i kokande glögg. (Även glöggen skulle kunna fås att koka genom att sänka trycket i stället för att höja temperaturen, men det kräver mycket låga tryck.) Detta förklarar varför koldioxiden stannar kvar i vätskan en ganska lång tid efter att en flaska öppnats. Man kunde annars tro att den borde pysa ut lika snabbt som den kan sprutas in med en kolsyremaskin. Men vätskefasen är metastabil, vilket garanterar att det tar tid innan koldioxiden ”kokar bort”, precis som det tar tid att koka bort alkoholen ur glögg.

Testa gärna att berätta för en fysiker eller en kemist att champagne eller läsk kokar – det brukar leda till en livlig diskussion. Det här är förstas till viss del en semantisk fråga, så du får själv välja vilka ord du använder för dessa festliga bubblor.

NÄR UNIVERSUM KOKAR – KOSMOLOGISKA BUBBLOR

Låt oss nu zooma ut och rikta blicken mot vårt universum och dess (möjliga) fasövergångar. Här kanske någon protesterar – hur kan universum genomgå en fasövergång? Hittills har vi ju disku-

terat olika substanser som byter fas, men universum är till stor del tomrum. Det finns väl inget ute i världsrymden som kan byta fas?

Enligt modern fysik finns det faktiskt fundamentala substanser som genomsyrar varje hörn av vårt universum. Dessa substanser kallas *fält*. Precis som med "bubblor" används "fält" här inte i sin vardagliga betydelse. För en fysiker är ett fält i stället en storhet som antar ett visst värde på varje plats, varje punkt, i rummet. Ett enkelt exempel är temperatur. På varje plats omkring dig kan du placera en termometer; resultatet av alla dessa mätningar kan beskrivas som ett "temperaturfält". Föreställ dig detta som massor av siffror, jämnt utspridda omkring dig, som berättar vad temperaturen är överallt. Om du sitter i ett rum kanske siffrorna är lite större närmare taket, eftersom värmen stiger uppåt. Om du kokar vatten på spisen är siffrorna mycket stora nära kastrullen.

Ett annat exempel är vind. Vindhastigheten har en storlek och en riktning överallt där det finns luft. Vi kan beskriva detta som ett "vindfält". Tänk dig det här fältet som en samling av pilar överallt i din omgivning. De pekar i vindens riktning och deras storlek indikerar vindstyrkan. Även om du sitter i ett rum där luften står helt stilla finns vindfältet ändå där – pilarna råkar

bara ha storleken noll. Det som våra öron uppfattar som ljud är i själva verket små tryckförändringar i luften omkring oss. Dessa kan beskrivas som *ljudvågor* som färdas genom vindfältet med – såklart – ljudets hastighet.

Vindfältet existerar ju bara där det finns luft som kan röra på sig. Men det finns också fält som verkar existera överallt i vårt universum. Ett exempel är det *elektromagnetiska fältet*. Detta fält förmedlar elektriska och magnetiska krafter, såsom de mellan elektriska laddningar och magneter. Under 1800-talet insåg fysiker att allt vi kallar ljus, inklusive infrarött och ultraviolett ljus samt röntgenstrålning, i själva verket är vågor i det elektromagnetiska fältet. Till en början tänkte man sig att det måste finnas något slags medium som ljusvågorna färdas i, liksom ljudvågor vars medium är luft. Det föll på Albert Einstein (1879–1955) att förklara att ett sådant medium inte behövs. En mer elegant beskrivning av verkligheten är att vissa fält, som det elektromagnetiska, är fundamentala objekt som finns överallt i universum. När en ljusvåg färdas genom rymdens vakuum sätts det elektromagnetiska fältet i rörelse, men när vågen har passerat finns fältet fortfarande kvar.

Dessa fundamentala fält lyder kvantmekanikens föga intuitiva lagar. En märklig konsekvens

av detta är att små vågor i de så kallade kvantfälten beter sig som partiklar. När fysiker löst talar om *elementarpartiklar*, såsom elektroner och fotoner (ljuspartiklar), menar de alltså i själva verket vågor i olika fundamentala fält. För varje typ av elementarpartikel finns ett motsvarande fält som existerar överallt och hela tiden i universum. Man kan intuitivt tänka sig att ett sådant fält bär på möjligheten att den motsvarande partikeln kan existera var som helst. Även långt ute i världsrymden, där inga partikelvågor råkar röra sig, är dessa fält ständigt närvarande.

Ett speciellt viktigt fält för kosmologiska fasövergångar är det så kallade Higgsfältet, vars partikelvåg observerades för första gången 2012. Higgsfältet är viktigt eftersom det bestämmer massan hos andra elementarpartiklar, till exempel elektronen. Lite förenklat kan man säga att när fältets värde är noll är dessa partiklars massa noll, och ju större värde Higgsfältet antar, desto större blir deras massor. En sannerligen tung roll att bära!

Nu kommer vi till insikten som leder oss tillbaka mot fasövergångar. Vi kan tänka oss Higgsfältets värde som en sorts koordinat i universums fria energilandskap. Precis som tidigare antar fältet det värde som minimerar den fria energin. Och precis som tidigare beror detta på diverse omständigheter, exempelvis temperaturen. Vid

de temperaturer som förekommer i dagens universum sitter fältet stadigt vid ett ”lagom” stort värde, som ger elektronen den massa vi känner så väl. Men vid tillräckligt höga temperaturer sker en förändring.

Sådana enorma temperaturer förekom tidigt i universums historia. Enligt den väletablerade big bang-teorin var hela universum för ungefär 13,8 miljarder år sen fyllt av ett plasma – en het ”ursoppa” av diverse partiklar. Sedan dess har universum expanderat och svalnat, och plasmat har kollapsat till galaxer, stjärnor och planeter. Men under de tidigaste ögonblicken nådde temperaturen flera biljarder grader, tillräckligt för att rubba Higgsfältets värde.

Beräkningar visar att Higgsfältet vid höga temperaturer närmar sig värdet noll. Det betyder att alla elektroner och liknande elementarpartiklar i vårt universum var helt masslösa under några tidiga ögonblick, för att sedan få sina nuvarande massor. Detta var en viktig händelse i vårt universums utveckling. Den naturliga följdfrågan blir: Var det en fasövergång?

Låt oss för tillfället anta att svaret är ja. Man kan då beskriva övergången på ett mycket liknande sätt som för vatten och champagne. Det här är vår belöning för den abstrakta diskussionen tidigare.

Precis som tidigare tänker vi oss att universums fria energilandskap hade två dalar, en där Higgsfältets värde är noll och en där det är större än noll. Vid höga temperaturer ligger "nolldalen" lägst, men vid låga temperaturer är det tvärtom. Och vid en viss kritisk temperatur är de lika djupa. När universum svalnar förbi denna temperatur kan bubblor börja bildas. I mycket små regioner av universum hoppar Higgsfältets värde, tack vare slumpmässiga fluktuationer, över "energibarriären". Dessa små områden börjar sedan expandera, precis som bubblor i kokande vatten eller vattendroppar som kondenserar ur ånga. Till slut har hela universum övergått till den nya fasen.

Skulle en sådan fasövergång i det tidiga universum ha lämnat några spår? En rimlig gissning är ja. Dessa övergångar är våldsamma processer, och bubblornas expansion frigör kolossala mängder energi. Men universums tillstånd var så extremt under big bang att de flesta spår snabbt suddades ut. Fysiker har ändå föreslagit två tänkbara undantag. Fasövergången kan skapa signaler som kan färdas obehindrat genom det heta plasmat, eller så kan den skapa något som inte ens dessa extrema förhållanden kan sudda ut.

Till det första alternativet duger inte ljussignaler som vi vanligtvis använder för att studera

universum. Det tidiga universum var nämligen inte så transparent som det är i dag, och ljuspartiklar absorberades snabbt av andra partiklar i plasmat. Men det finns en sorts signaler som kan resa fritt genom den heta ursoppan: *gravitationsvågor*.

Enligt Einsteins allmänna relativitetsteori orsakas gravitation av ett slags gravitationsfält. Liksom för vindfältet och det elektromagnetiska fältet kan en sorts vågor färdas genom detta fält. Dessa gravitationsvågor är i allmänhet mycket svaga och färdas genom materia nästan obehindrat. Detta gör dem till goda budbärare eftersom till och med det täta plasmat i big bang var så gott som transparent för dem. Men det gör också att de är svåra att observera. På senare år har fysiker ändå lyckats uppmäta gravitationsvågor från kollisioner av svarta hål och kompakta stjärnor. För tillfället planeras flera nya och kraftfulla detektorer, och man hoppas då kunna upptäcka signaler från kosmologiska fasövergångar. Detta skulle ge oss viktiga insikter om både universums tidigaste epoker och om materians innersta väsen.

Gravitationsvågor är alltså något vi måste anstränga oss för att observera. Det andra spåret som en fasövergång kan ha lämnat efter sig är något vi omöjligt kan missa: all materia i universum.

Det är inte självklart att universum ska vara fullt av elementarpartiklar som kan bilda atomer, molekyler, stjärnor och galaxer. Vi vet nämligen att det för varje typ av partikel i våra atomer finns en motsvarande *antipartikel*, med samma massa som den vanliga partikeln men med motsatt elektrisk laddning. Elektronens antipartikel *positronen* upptäcktes redan 1932. Även här spelade bubblor en roll; positronen upptäcktes i en så kallad Wilsonkammare, där laddade partiklar orsakar spår av små bubblor i en metastabil vätska. I vardagslivet stöter vi dock aldrig på större mängder av antipartiklar, och tur är det. Om en vanlig partikel kommer för nära den motsvarande antipartikeln förintas nämligen båda, och kvar finns vanligtvis bara ljus.

Om det tidigt i universum fanns exakt lika stora mängder partiklar och antipartiklar skulle de snabbt ha förintat varandra helt. Resultatet hade blivit ett universum utan atomer, stjärnor eller liv – det vill säga en avsevärt tråkigare plats. Någon gång i universums barndom måste det alltså ha bildats ett litet överskott av ”vanliga” partiklar. Vad som gav upphov till detta synnerligen viktiga överskott är en av kosmologins stora frågor.

Ett möjligt svar är bubblor. För att ett sådant överskott ska kunna bildas kan universum nämli-

gen inte befinna sig i jämvikt. Jämvikt innebär att alla processer är balanserade: om det finns någon process som kan konvertera antipartiklar till partiklar, måste det även finnas en motsatt process som tar partiklar till antipartiklar. I jämvikt tar dessa ut varandra.

Jämvikt betyder också, som vi diskuterade tidigare, att entropin är maximerad eller att den fria energin är minimerad. Men i en fasövergång sitter universum tillfälligt fast i ”fel dal”. Den fria energin minimeras först när bubblor har bildats och hunnit expandera. En fasövergång skulle alltså kunna vara just den avvikelse från jämvikt som vi har att tacka för all materia i universum.

I praktiken skulle materieöverskottet kunna bildas när de kosmiska bubblorna expanderar. Den energi som frigörs värmer upp det redan heta plasmat runt bubblorna. Olika typer av partiklar växelverkar med och reflekteras mot bubblornas väggar på olika sätt, och i kombination med de extrema energierna kan detta skapa ett litet överskott av materia. Denna materia passerar sedan genom bubblornas väggar till den andra fasen, där Higgsfältet har ett högre värde. I denna nya omgivning kan materia och antimateria inte omvandlas till varandra lika effektivt, och materiaöverskottet ”fryser fast”.

Innan vi blir alltför tagna av dessa teoretiska funderingar måste vi dock återvända till frågan: Har en sådan fasövergång verkligen skett? Här stöter vi till att börja med på tråkiga nyheter. Imponerande beräkningar har visat att *standardmodellen*, teorin för de fundamentala fält vi känner till, endast genomgår mjuka förändringar när universum svalnar, utan bubblor.

Samtidigt vet vi att denna teori inte är det sista ordet. Den finns diverse teoretiska problem och experimentella resultat – kanske främst av allt gällande den mystiska *mörka materien* – som gör att de flesta fysiker förväntar sig att standardmodellen behöver kompletteras. I många fall leder små ändringar till en skarp fasövergång. Gravitationsvågor som finns kvar sen universums tidigaste ögonblick kan i så fall skvallra om detta.

I skrivande stund är det här ett aktivt forskningsområde. Vi vet inte om Higgsfältet (eller något ännu okänt fält) har genomgått en skarp fasövergång, och om detta i så fall gav upphov till gravitationsvågor eller överskottet på materia. Men det är en fascinerande möjlighet, väl värd att undersöka närmare. Kanske har vi bubblor att tacka för alla stjärnor och planeter, inklusive vår egen. Något att fundera på nästa gång du avnjuter ett glas champagne.

DEN SISTA BUBBLAN

Vi kan alltså ha en fasövergång att tacka för vårt överlag ganska trevliga universum. Men bubblor kan inte bara skapa – de kan också förgöra. Det är inte svårt att tänka sig att problem skulle uppstå om en liknande kosmisk fasövergång skulle ske i dagens universum. Fysikerna Sidney Coleman och Frank De Luccia har beskrivit denna oroväckande möjlighet som ”den ultimata ekologiska katastrofen; i [en ny fas] finns nya naturkonstanter; efter [en fasövergång] är inte bara livet som vi känner det omöjligt, utan även kemin som vi känner den”.

Det här låter skrämmande, så låt oss försiktigt värma upp med en påhittad apokalyptisk fasövergång. Vi har tidigare nämnt att forskare känner till många olika faser av is. Det här gav inspiration till författaren Kurt Vonnegut (1922–2007), vars bror Bernard forskade i bland annat isbildning. I Vonneguts roman *Cat's Cradle* (1963) får läsaren stifta bekantskap med en excentrisk vetenskapsman som upptäckt en ny isfas, kallad ”is-nio”. Denna märkliga fas har en smältpunkt på 45,8 °C. Enligt terminologin jag använt betyder detta att flytande vatten vid rumstemperatur skulle vara metastabilt. Den enda anledningen till att det inte direkt fryser till is-nio är

att energibarriären som behöver bestigas är så stor att det aldrig sker spontant. Men om ett litet frö bestående av den nya isfasen kom i kontakt med ett vattendrag, skulle det snabbt växa tills alla världens hav hade stelnat.

Kan vi vara säkra på att ingen is-nio existerar på riktigt? Det finns faktiskt fortfarande vissa mysterier i vattnets fasdiagram. Att ett superstabil gitter som is-nio skulle kunna existera är dock osannolikt. (Det finns visserligen en fas som kallas "is IX", men den har inga av de märkliga egenskaper som Vonnegut föreställde sig.) Trots det illustrerar is-nio en viktig poäng: vi kan inte ta för givet att tillstånd som verkar stabila – såsom flytande vatten vid rumstemperatur – faktiskt är det.

Låt oss nu återvända till Higgsfältet. Tidigt i universums historia ändrades dess värde från noll till det vi observerar i dagsläget, kompatibelt med "livet som vi känner det". Men kan vi vara säkra på att det nuvarande tillståndet är stabilt, och inte bara metastabilt? Kan det finnas en djupare dal i det fria energilandskapet?

Svaret på den här frågan är komplicerat. Det beror på diverse antaganden, som exakt hur Higgsfältet växelverkar med andra kända och okända fundamentala fält. Men våra i dagsläget bästa beräkningar pekar åt ett oroväckande håll. Tillräckligt långt ut i det fria energilandskapet,

för mycket höga fältvärden, planar dalväggen ut, blir ett krön, och störtar sedan neråt. Vårt universum tycks inte vara stabilt.

Här måste vi stanna upp och fundera på hur en sådan fasövergång skulle gå till. De bubblor vi hittills diskuterat uppstår tack vare fluktuationer som orsakas av växelverkan med en varm omgivning. Men i dagens kalla universum är denna typ av fluktuationer alltför små för att sätta igång en övergång i Higgsfältet. Vi behöver en annan mekanism.

Här kommer kvantmekaniken till vår räddning (eller snarare till vårt fördärv). Kvantmekaniken tillåter nämligen ett fenomen kallat *tunneling*, alla energibarriärers ultimata fiende. I detta fenomen övervinns barriärer inte genom vanliga fluktuationer som tar systemet över tröskeln, utan genom kvantmekaniska fluktuationer som låter systemet tunnla igenom den.

Ett klassiskt exempel är radioaktiva sönderfall. Vissa tunga atomer kan sänka sin fria energi genom att en mindre del (en så kallad alfapartikel) lösgör sig från resten av atomkärnan. Om man bara ser på de inblandade energierna verkar det omöjligt: kraften som håller ihop atomkärnan skapar en stor energibarriär. Men som jag nämnde tidigare säger kvantmekaniken att det vi kallar partiklar ofta beter sig mer som ett

slags vågor. Dessa kvantvågor kan aldrig helt inneslutas av barriärer – en liten del kommer att ”läcka ut” på andra sidan. Detta leder till att det finns en viss sannolikhet att alfapartikeln lyckas frigöra sig, och atomkärnan sönderfaller.

Det är inte bara mikroskopiska atomer som kan tunnla. När jag skriver detta har Nobelpriset i fysik för 2025 just tillkännagivits. Pristagarna lyckades på 1980-talet observera tunnling genom barriärer i speciella elektriska kretsar. Detta visade att även relativt stora och komplexa system följer kvantmekanikens spelregler.

Fundamentala fält kan även de tunnla genom barriärer i energilandskapet. Precis som tidigare kan inte kvantfluktuationer ta fältet igenom barriären överallt på samma gång, då sannolikheten för detta är noll. Men en liten del av systemet kan tunnla igenom. Resultatet är återigen en bubbla som kan expandera tills hela systemet – hela universum – omvandlats till den nya fasen.

Om jag vid det här laget lyckats skrämma upp dig är det dags för de goda nyheterna: även om vårt universum kan vara metastabilt så är den beräknade livslängden, den tid vi väntar oss att det tar innan en bubbla bildas, enorm – långt större än tiden som gått sedan big bang. Den sista stjärnan kommer med all sannolikhet att ha slocknat långt före Higgsbarriären rämnar.

Som tidigare nämnts kan detta dock bero på ännu oupptäckta fält och deras egenskaper – en lika god anledning som någon att fortsätta studera fundamental fysik.

När vi nu lugnat oss lite, kan det vara intressant att fråga sig hur en sådan övergång skulle se ut, om någon varelse trots allt fanns kvar för att beskåda den. Inte så intressant, visar det sig. Bublorna i Higgsfältet skulle nämligen expandera med ungefär ljusets hastighet. (I det tidiga universum bromsades liknande bubblor upp något av det täta plasmat, men i dagens och framtidens glesa rymd kan de accelerera obehindrat.) Vi skulle inte hinna se en bubbla som närmade sig oss eller hinna känna något när den forsar igenom oss – ett ganska lindrigt slut alltså.

EPILOG – VARFÖR FYSIK?

Det är dags att sammanfatta. Under de gångna sidorna har jag berört ämnen som var för sig kan fylla hela universitetskurser i fysik. Jag har försökt visa hur fasövergångar uppstår, och att bubblorna i ett champagneglas har mycket gemensamt med bubblorna i kokande vatten. Vi zoomade sedan ut och samtidigt in – ut mot kosmos och in mot materiens (så vitt vi vet) mest fundamentala strukturer: fält. Dessa fält, som

existerar överallt och alltid, kan även de genomgå fasövergångar likt vatten som kondenserar eller förångas. Konsekvenserna av sådana spekulativa transformationer är dramatiska – de kan leda till allt från materiens skapelse, tidigt i universums ursoppa, till dess slutgiltiga upplösning, eoner efter att de sista stjärnorna slocknat.

Allt detta kan förstås inom ett gemensamt ramverk: naturens strävan att maximera entropin eller minimera den fria energin, som i sin tur är en konsekvens av hur sannolikheter beter sig i system med många komponenter (till exempel atomer). Vi kan beskriva det som rörelser i ett abstrakt landskap vars berg, dalar och krön kartlägger de möjliga (makro)tillstånden och deras tendens att inträffa.

Jag har hela tiden fokuserat på vad olika fasövergångar och bubblor har gemensamt. De kan alla förklaras med samma abstrakta principer. De finns förstås olikheter; ingen fasövergång är den andra helt lik. Men det som fascinerar mig med naturvetenskap är dess förmåga att förena till synes vitt skilda fenomen inom samma ramverk, samma berättelse. Vanligtvis innehåller den här berättelsen fler ekvationer. Här har jag, med några undantag, hållit mig till ord. Jag har försökt göra det förståeligt och korrekt, ”så enkelt som möjligt, men inte enklare”.

Fysiken förenar och kopplar samman. Den leder oss till överraskande och fascinerande idéer och lär oss använda dessa för att förstå, och förhoppningsvis förbättra, vår värld. Med dess hjälp har vi avslöjat en del av materiens innersta essens, och knutit detta till kosmologiska frågor om universums ursprung och framtid. Som vi har sett kan svaren på enkla frågor, som varför vatten kokar, hjälpa oss förstå något större.

På så sätt fångas samband mellan olika skalor och aspekter av vår värld. Samband som, för att åter citera Richard Feynman, ”visar att vetenskaplig kunskap bara ökar spänningen och mysteriet och vördnaden för en blomma”. Eller i vårt fall – en bubbla.

LITTERATUR

- Carroll, Sean, *From Eternity to Here. The Quest for the Ultimate Theory of Time*, New York: Dutton 2010.
- Carroll, Sean, *The Biggest Ideas in the Universe. Vol. 1: Space, Time and Motion*, New York: Dutton 2022.
- Carroll, Sean, *The Biggest Ideas in the Universe. Vol. 2: Quanta and Fields*, New York: Dutton 2024.
- Coleman, Sidney & Frank De Luccia, "Gravitational effects on and of vacuum decay", *Physical Review D* 21, 1980:12, s. 3305–3315.
- Czerski, Helen, *Bubbles*, London: Michael Joseph Ltd 2018.
- Czerski, Helen, *Storm in a Teacup. The Physics of Everyday Life*, New York: W. W. Norton & Company 2017.
- Danielsson, Ulf, *Stjärnor och äpplen som faller. En bok om upptäckter och märkvärdigheter i universum*, Stockholm: Albert Bonniers Förlag 2003.
- Debenedetti, Pablo G., *Metastable Liquids. Concepts and Principles*, Princeton: Princeton University Press 1996.
- Eddington, Arthur S., *The Nature of the Physical World*, New York: The Macmillan Company 1928.
- Feynman, Richard P., Robert B. Leighton & Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, The New Millenium Edition, New York: Basic Books 2011.

Goldstein, Martin & Inge F. Goldstein, *The Refrigerator and the Universe. Understanding the Laws of Energy*, Cambridge: Harvard University Press 1993.

Goodwin, Alan, "Are Fizzing Drinks Boiling? A Chemical Insight from Chemistry Education Research", *Journal of Chemical Education* 78, 2001:3, s. 385–387.

Mack, Katie, *The End of Everything (Astrophysically Speaking)*, New York: Scribner 2021.

Schroeder, Daniel V., *An Introduction to Thermal Physics*, Oxford: Oxford University Press 2021.

Strassler, Matt, *Waves in an Impossible Sea. How Everyday Life Emerges from the Cosmic Ocean*, New York: Basic Books 2024.

Vehkamäki, Hanna, *Classical Nucleation Theory in Multicomponent Systems*, Heidelberg: Springer Berlin 2006.



Boken utges med stöd av Ingrid, Margit och Henrik Höijers donationsfond I inom Svenska litteratursällskapet i Finland.

Denna bok är nummer 9 i serien Värt att veta och utges gemensamt av Svenska litteratursällskapet i Finland och Appell Förlag.

SLS publikationssamling ingår i Unescos världsmminnesregister.

© Författaren och Svenska litteratursällskapet i Finland 2026. Detta verk är licensierat under [Creative Commons Erkännande-Ickekommersiell-IngaBearbetningar 4.0 Internationell](#) (CC BY-NC-ND 4.0).

Omslag och grafisk form: Antti Pokela
Typsnitt: Vinyl, Chronicle

Pdf-utgåva.

ISBN 978-951-583-707-3 (tryckt utgåva, Finland)

ISBN 978-91-989866-1-7 (tryckt utgåva, Sverige)

ISBN 978-951-583-725-7 (epub),

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-583-725-7>

ISBN 978-951-583-726-4 (pdf),

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-583-726-4>

Värt att veta 9

ISSN 2984-0899 (tryckt)

ISSN 2984-1933 (digital)

UDK 53