

## De fann dolda mönster i klimatet och i andra komplexa fenomen

Tre pristagare delar Nobelpriset i fysik i år för att ha lyckats bemästra komplexa och slumpartade fenomen. **Syukuro Manabe** och **Klaus Hasselmann** har lagt grunden till våra kunskaper om jordens klimat och hur mänskliga utsläpp av koldioxid bidrar till dess förändringar. **Giorgio Parisi** belönas för sina banbrytande bidrag till teorin om oordnade och slumpmässiga fenomen.

Alla komplexa system består av många olika delar som samverkar med varandra. Komplexa system har varit föremål för fysiken i ett par sekler, och de kan vara svåra att beskriva matematiskt – de kanske består av ett enormt antal komponenter, eller så styrs de av slumpen. De kan också vara kaotiska, som väder, då små skillnader vid startpunkten leder till stora skillnader i ett senare skede. Årets pristagare har alla bidragit till att vi numera har djupare kännedom om sådana system och deras långsiktiga utveckling.

Klimatet på jorden är ett av flera exempel på komplexa system. Manabe och Hasselmann prisas för sina pionjärinsatser för utveckling av klimatmodeller. Parisi tilldelas priset för hans teoretiska lösningar till ett stort antal problem inom teorin för komplexa system.

**Syukuro Manabe** visade hur ökad koldioxidhalt i atmosfären ger upphov till högre temperatur på jordytan. Under 1960-talet ledde han utvecklingen av fysikaliska modeller för jordens klimat och var först med att utforska samspelet mellan strålningsbalansen och den vertikala transporten av luftmassor genom konvektion, där han även tog hänsyn till den latent värmen som vattnets kretslopp bidrar med. Hans arbeten utgör grunden för den moderna klimatforskningen.

Ett tiotal år senare skapade **Klaus Hasselmann** en modell där han kopplade samman väder och klimat, och därmed besvarade frågan om varför klimatmodeller kan vara pålitliga trots att vädret är omväxlande och kaotiskt. Han utvecklade även metoder för att identifiera specifika signaler, fingeravtryck, som både naturliga fenomen och mänskliga aktiviteter lämnar på klimatet. Hans metoder har använts för att påvisa att temperaturökningen i atmosfären beror på mänskliga utsläpp av koldioxid.

Omkring 1980 upptäckte **Giorgio Parisi** dolda mönster i oordnade komplexa material. Hans upptäckter hör till de viktigaste bidragen inom teorin för komplexa system. De gör det möjligt att på ett matematiskt precist sätt förstå och beskriva många olika, och till synes helt slumpmässiga, komplexa material och fenomen, inte bara inom fysiken utan också inom andra vitt skilda områden, som matematik, biologi, neurovetenskap och maskininlärning.



## Växthuseffekten avgörande för livet

För 200 år sedan studerade den franske fysikern Joseph Fourier energibalansen mellan solens strålar mot marken och markens utstrålning. Han förstod atmosfärens roll för denna balans då den infallande solstrålningen omvandlas vid marken till utgående strålning – ”mörk värme” – som absorberas i atmosfären och värmer upp den. Denna atmosfärens skyddande roll kallas i dag växthuseffekten. Namnet härrör från liknelsen med växthusets glasfönster som släpper igenom solens strålar men stänger värmen inne. Strålningsprocesserna i atmosfären är dock långt mer invecklade än så.

Uppgiften är fortfarande densamma som den Fourier företog sig – att undersöka balansen mellan den mot vår planet inkommande kortvågiga solstrålningen och jordens långvågiga, infraröda utstrålning. Detaljerna fyllde många klimatforskare i under de följande 200 åren. Dagens klimatmodeller är de mest kraftfulla verktygen för att förstå inte bara klimatet utan även den globala uppvärmning som vi människor står bakom.

Modellerna är baserade på fysikens lagar och har utvecklats från modeller som används för att förutsäga väder. Väder beskrivs med meteorologiska storheter som temperatur, nederbörd, vind eller moln och påverkas även av vad som händer i havet och på land. Klimatmodeller utgår från vädrets beräknade statistiska egenskaper, som medelvärden, standardavvikelser eller högsta och lägsta uppmätta värden. Klimatmodellerna kan alltså inte tala om för oss exakt vad det blir för väder i Stockholm den 10 december nästa år, men vi kan få en uppfattning om vilken temperatur eller hur mycket regn vi i medeltal kan förvänta oss i december i Stockholm.

## Koldioxidens roll fastlagd

Växthuseffekten är en förutsättning för livet på jorden. Den styr temperaturen hos oss genom att växthusgaserna i atmosfären – koldioxid, metan, vattenånga och andra – först absorberar jordens infraröda utstrålning för att sedan frigöra den absorberade energin och värma upp luften runtomkring och marken under.

I själva verket utgör växthusgaserna en väldigt liten andel av jordens torra atmosfär som till allra största delen, 99 procent av volymen, består av kväve och syre. Koldioxiden upptar bara 0,04 procent. Den kraftfullaste växthusgasen är vattenånga, men vi kan inte påverka halten vattenånga i atmosfären. Koldioxid är däremot en växthusgas som vi kan kontrollera.

Hur mycket vattenånga atmosfären innehåller är starkt beroende av temperaturen, vilket leder till en återkopplingsmekanism. Med mer koldioxid blir luften varmare och kan innehålla mer vattenånga, vilket ökar växthuseffekten och atmosfären blir ännu varmare. Om koldioxidhalten minskar, kondenserar en del av vattenångan och temperaturen sjunker igen.

En viktig första pusselbit till förståelsen för hur koldioxiden påverkar oss kom från den svenske forskaren och Nobelpristagaren Svante Arrhenius. Det var för övrigt hans kollega, meteorologen Nils Ekholm som 1901 var först med att använda ordet växthus när han beskrev atmosfärens lagring och återstrålning av värme.

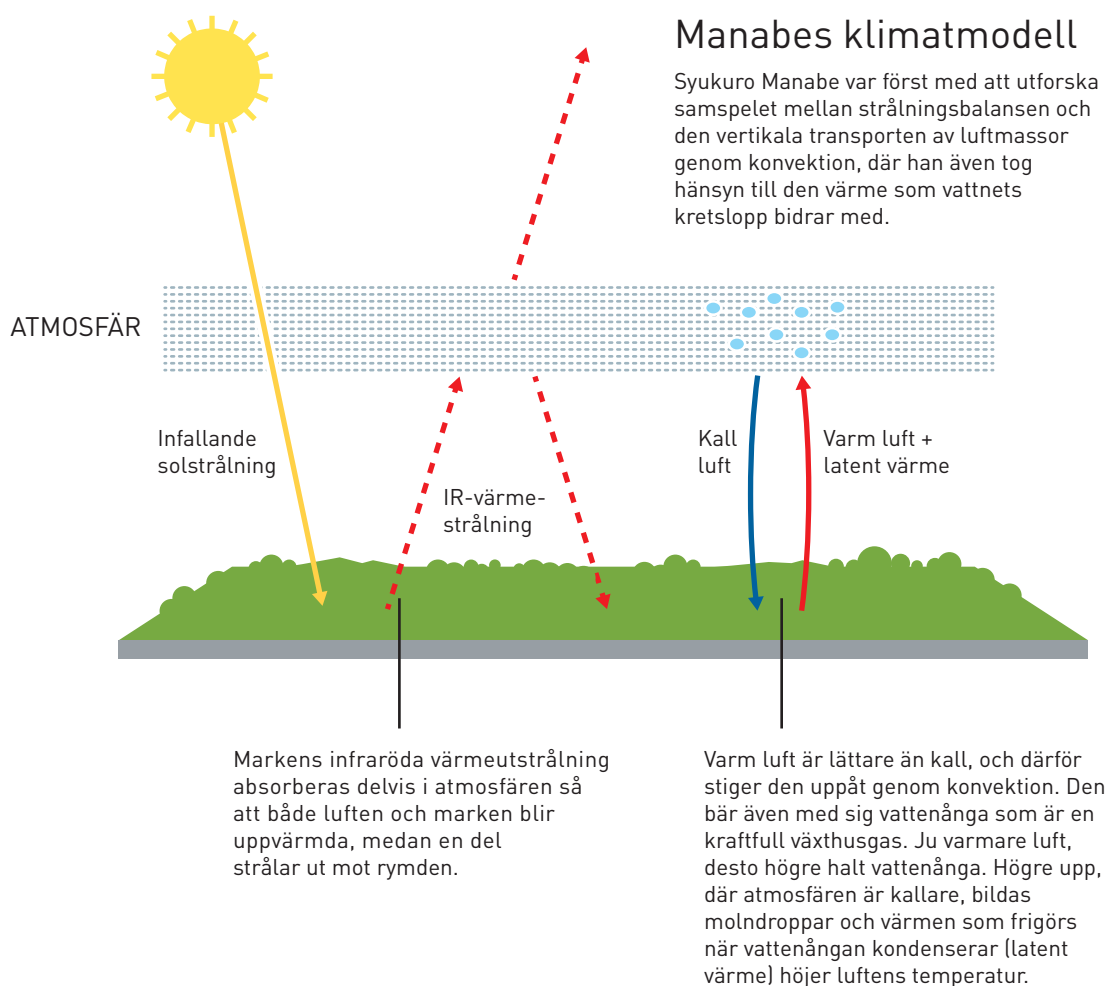
Fysiken bakom växthuseffekten hade Arrhenius klar för sig redan i slutet av 1800-talet – den utsända strålningen är proportionell mot den strålände kroppens absoluta temperatur ( $T$ ) upphöjd till fyra ( $T^4$ ). Ju hetare strålningskällan är desto kortare är strålarnas våglängd. Solen, med en yttemperatur på 6 000 grader Celsius, sänder ut mest strålar inom de synliga våglängderna. Jorden, med sina ynka 15 grader på ytan, återutsänder infraröd strålning som är osynlig för ögat. Om inte atmosfären fångade in denna värmestrålning skulle marktemperaturen knappast nå över  $-18$  grader Celsius.

Arrhenius försökte i själva verket räkna ut vad som låg bakom den då nyligen upptäckta förekomsten av istiderna, och kom fram till att det skulle räcka med att koldioxidhalten i atmosfären halverades för att jorden skulle hamna i en ny istid. Och omvänt – en fördubbling av mängden koldioxid skulle höja temperaturen med 5–6 grader Celsius, ett resultat som något tursamt ligger häpnadsväckande nära dagens uppskattningar.

## Föregångsmodellen för koldioxidens verkan

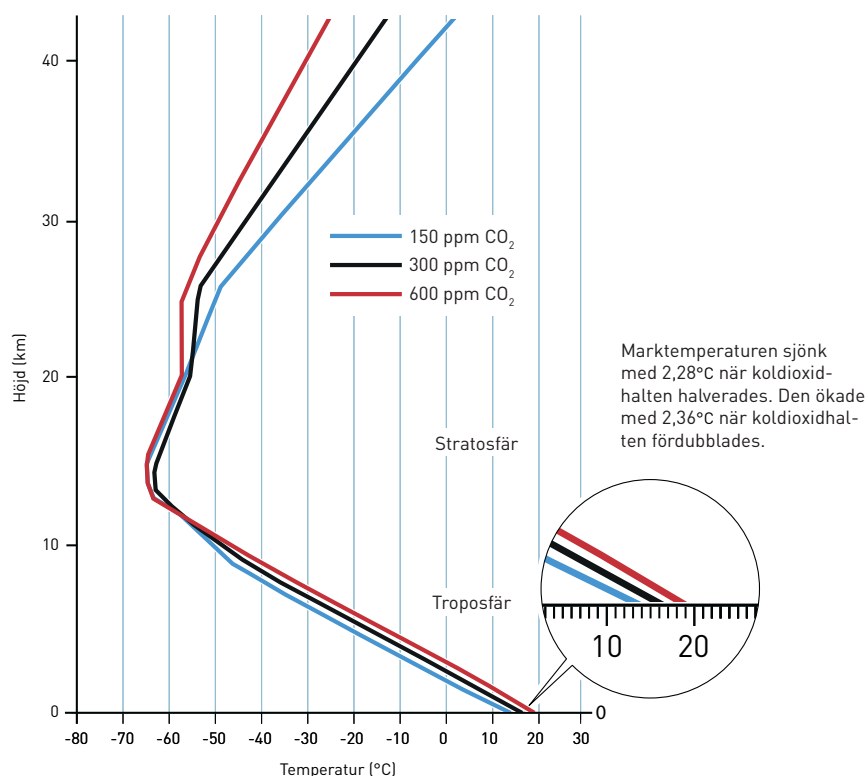
Den japanske atmosfärfysikern **Syukuro Manabe** var en av de unga begåvade forskare i Tokyo som under 1950-talet lämnade det av kriget ödelagda Japan för att fortsätta sin forskarbana i USA. Målet med hans forskning var, liksom för Arrhenius ett sjuttio år tidigare, att förstå hur ökad koldioxidhalt kan ge upphov till temperaturökning. Men medan Arrhenius hade fokuserat på strålningsbalansen ledde Manabe under 1960-talet arbetet med att utveckla fysikaliska modeller som för första gången någonsin skulle ta hänsyn till den vertikala transporten av luftmassor i atmosfären genom konvektion, och även av vattenångans latent värme.

För att göra beräkningarna hanterbara valde han att reducera modellen till en dimension – en vertikal pelare 40 kilometer upp i atmosfären. Det tog ändå hundratals dyrbara datortimmar att testa modellen genom att variera halten gaser i atmosfären. Syre och kväve hade försumbar inverkan på temperaturen, däremot gav koldioxiden tydliga avtryck: när koldioxidhalten fördubblades ökade den globala medeltemperaturen med drygt 2 grader Celsius.



## Koldioxid bakom uppvärmningen av atmosfären

Ökad koldioxidhalt ger högre temperatur i lägre atmosfären samtidigt som övre atmosfären blir kallare. På så sätt bekräftade Manabe att temperaturvariationen beror på ökad koldioxidhalt; hade den orsakats av ökad solstrålning borde hela atmosfären värmts upp.



Källa: Manabe och Wetherald (1967) Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 24, nr 3, maj.

Att uppvärmningen verkligen var ett resultat av koldioxidökningen bekräftades av att modellen förutsade högre temperatur närmast marken medan atmosfärens högre luftlager blev kallare. Hade istället variationer i solinstrålningen legat bakom uppvärmningen borde hela atmosfären värmts upp samtidigt.

Datorerna för sextio år sedan var hundratusentals gånger långsammare än dagens, så modellen blev relativt enkel, men trots det fick Manabe de viktigaste storheterna rätt. Du måste alltid förenkla, påpekar Manabe. Det går inte att tävla med komplexiteten i naturen – i varje regndroppe är så mycket fysik inblandad att det blir omöjligt att beräkna allt. Insikterna från den endimensionella modellen ledde till en klimatmodell i tre dimensioner som Manabe publicerade 1975. Den blev ännu en milstolpe på vägen att förstå klimatets hemligheter.

## Vädret är kaotiskt

Drygt tio år efter Manabe lyckades **Klaus Hasselmann** koppla ihop väder och klimat genom att hitta ett sätt att överlista de för beräkningar så besvärliga kaotiska och snabba väderväxlingarna. Att vi har så starkt skiftande väder på vårt klot beror på att solinstrålningen är ojämnt fördelad, både geografiskt och över tid. Jorden är rund, så färre solstrålar når de höga breddgraderna än de låga, runt om ekvatorn. Dessutom lutar jordaxeln vilket leder till att instrålningen varierar med årstiderna. Skillnader i densitet mellan den varmare och kallare luften ligger bakom de kolossala värmetransporterna mellan olika breddgrader, mellan hav och land, mellan lägre och högre luftmassor, som driver vädret på vår planet.

Som bekant är det svårt att göra pålitliga förutsägelser om väder för mer än tio dagar fram i tiden. För tvåhundra år sedan hävdade den franske vetenskaps-giganten Pierre-Simon de Laplace att om man bara kände till positionen och hastigheten hos alla partiklar i universum så skulle det vara möjligt att både räkna ut vad som har hänt och vad som kommer att hända i vår värld. I princip borde det stämma – de tre sekler gamla Newtons rörelselagar som också beskriver lufttransporten i atmosfären är helt deterministiska, de styrs inte av slumpen.

Inget kan dock vara felaktigare när det gäller vädret. Det beror dels på att det i praktiken är omöjligt att tillräckligt exakt och i varje punkt i atmosfären ange luftens temperatur, tryck, fuktighet eller vindförhållanden. Dels är ekvationerna ickelinjära – små avvikelser i begynnelsevärden kan få vädersystemet att utvecklas åt helt olika håll. Med frågan – kan en fjärils vingslag i Brasilien orsaka en orkan i Texas? – döptes fenomenet till fjärilseffekten. Det innebär att det i praktiken är omöjligt att göra långsiktiga väderprognoser – vädret är kaotiskt. Upptäckten gjordes på 1960-talet av den amerikanske meteorologen Edward Lorenz som har lagt grunderna till dagens kaosteori.

### Att få ordning på brusiga data

Hur kommer det sig att det alls går att göra pålitliga klimatmodeller för flera decennier eller hundratals år framöver, trots att väder är ett kaotiskt system? Runt 1980 visade Klaus Hasselmann hur de kaotiskt växlande väderfenomenen kan beskrivas som snabbt skiftande brus, och därmed satte han långsiktiga klimatprognoser på fast vetenskaplig grund. Dessutom utvecklade han metoder för att identifiera människans påverkan på den observerade globala temperaturen.

Efter att som ung doktorand och forskare i fysik under 1950-talet i tyska Hamburg ha ägnat sig åt vätskedynamiken, utvecklade Hasselmann observationer och teoretiska modeller för oceanernas vågor och strömmar. Han flyttade till Kalifornien, fortsatte med oceanografin och mötte kollegor som Charles David Keeling, med vilken paret Hasselmann startade en madrigalkör. Keeling är legendarisk för att redan 1958 ha inlett den numera längsta mätserien av atmosfärens koldioxidhalt från stationen vid toppen av vulkanen Mauna Loa i Hawaii. Föga anade Hasselmann att han i sin senare gärning flitigt skulle använda Keelingkurvan över förändringar av koldioxidhalten.

Att få fram en klimatmodell ur brusiga väderdata kan illustreras med en hundpromenad: hunden springer lös, kors och tvärs, fram och tillbaka runt dina ben. Hur ska man utifrån hundens spår se om du står stilla eller går? Och går du långsamt eller snabbt? Hundens spår – det är vädersvängningarna, din promenad är det beräknade klimatet. Kan man då sluta sig till klimatets långsiktiga utveckling från det kaotiska väderbruset?

En ytterligare svårighet är att de svängningar som påverkar klimatet är ytterst varierande i tid – det kan vara snabba förändringar som i vindstyrkan eller lufttemperaturen, och mycket långsamma som avsmältning av istäcken eller uppvärmning av havet. Exempelvis kan likformig uppvärmning av havet med bara en grad ta tusen år, medan det för atmosfären bara tar några veckor. Det avgörande knepet var att bygga in de snabba väderväxlingarna som brus i beräkningarna och visa hur detta brus påverkar klimatet.

Hasselmann skapade en stokastisk klimatmodell, vilket innebär att slumpen finns inbyggd i modellen. Inspirationen hämtade han från Albert Einsteins teori för brownsk rörelse, också kallad slumpvandring. Med hjälp av teorin visade Hasselmann att den snabbt varierande atmosfären faktiskt kan orsaka långsamma variationer i haven.

## Urskiljer spår av människan

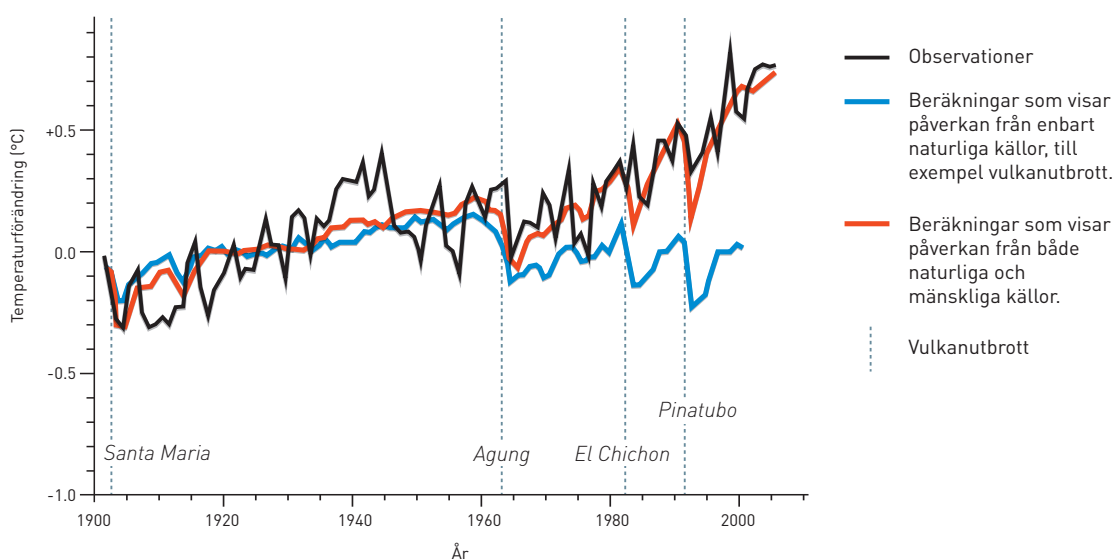
När modellen för naturliga klimatvariationer var klar utvecklade Hasselmann metoder för att identifiera människans avtryck i klimatsystemet. Han fann att modellerna, tillsammans med observationer och teoretiska övervägningar, innehåller tillräcklig information om egenskaper hos både brus och signaler. Till exempel lämnar förändringar i solinstrålningen, vulkaniska partiklar eller halten växthusgaser unika signaler, fingeravtryck, som kan urskiljas. Metoden att identifiera fingeravtrycken kan även tillämpas på mänskliga avtryck. På så sätt stakade Hasselman ut vägen för vidare studier av klimatförändringar som påvisade spår av människans påverkan på klimatet i en stor mängd oberoende observationer.

Klimatmodellerna har blivit alltmer förfinade i takt med att de olika processer som ingår i klimatets komplicerade samspel blir noggrannare kartlagda, inte minst genom mätningar och väderobservationer med satelliter. Modellerna visar tydligt på en skenande växthuseffekt. Sedan mitten av 1800-talet har halten koldioxid i luften ökat med 40 procent. Så mycket koldioxid har det inte funnits i jord-atmosfären på hundratusentals år. Följaktligen visar temperaturmätningarna att världen har blivit 1 grad varmare på 150 år.

Syukuro Manabe och Klaus Hasselmann har bidragit till mänsklighetens största nytta, i Alfred Nobels anda, genom att sätta våra kunskaper om jordens klimat på fast fysikalisk grund. Vi kommer aldrig mer att kunna säga att vi inget visste – klimatmodellerna lämnar klara besked. Håller jorden på att värmas upp? Ja. Är det ökad mängd växthusgaser i atmosfären som är orsaken? Ja. Kan detta förklaras med bara naturliga faktorer? Nej. Är det människans utsläpp som är anledningen till den allt högre temperaturen? Ja.

## Identifierar fingeravtryck

Klaus Hasselmann utvecklade metoder att skilja mellan naturliga och mänskliga orsaker (fingeravtryck) till uppvärmningen av atmosfären. Jämförelse mellan globala förändringar i medeltemperatur i förhållande till genomsnittet 1901–1950 (°C).



Källa: Hegerl och Zweirs (2011) Use of models in detection & attribution of climate change, *WIREs Climate Change*.

## Metoder för oordnade system

Runt 1980 presenterade **Giorgio Parisi** sina upptäckter av hur till synes slumpmässiga fenomen styrs av dolda regler. Dessa arbeten anses i dag vara några av de viktigaste bidragen till teorin om komplexa system.

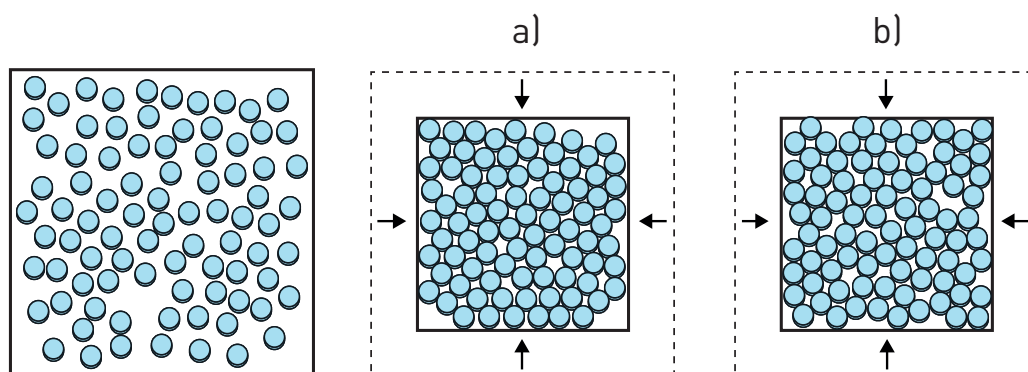
Moderna studier av komplexa system har sina rötter i den statistiska mekaniken, som utvecklades under andra halvan av 1800-talet av James C. Maxwell, Ludwig Boltzmann och J. Willard Gibbs, vilken också myntade områdets namn 1884. Den statistiska mekaniken växte ur insikten att för att beskriva system som bestod av stora mängder partiklar, som gaser eller vätskor, krävdes en ny sorts metod som tog hänsyn till partiklarnas slumpvisa rörelser. Grundidén var att beräkna partiklarnas genomsnittliga effekt istället för att studera varje enskild partikel för sig. Till exempel är temperaturen i en gas ett mått på medelvärdet av energin hos gaspartiklarna. Den statistiska mekaniken är en stor framgång eftersom den ger en mikroskopisk förklaring till makroskopiska egenskaper, som temperatur och tryck hos gaser och vätskor.

Partiklarna i en gas kan ses som små kulor som flyger omkring med en hastighet som ökar vid högre temperatur. När temperaturen sänks, eller trycket ökas, kondenserar kulorna först till en vätska och sedan till en fast kropp. Ofta är den fasta kroppen en kristall, där kulorna är ordnade i ett regelbundet mönster. Men om förändringen sker snabbt kan kulorna bilda ett oregelbundet mönster som inte ändras även om man kyler vätskan ytterligare eller försöker trycka ihop den mer. Om experimentet upprepas kommer kulorna att ordna sig i ett nytt mönster trots att förändringen skett på exakt samma sätt. Vad är det som styr resultatet?

## Matematik för komplexa oordnade system

Varje gång många identiska runda brickor trycks samman bildas ett nytt oregelbundet mönster trots att hoptryckningen sker på precis samma sätt. Vad är det som styr resultatet?

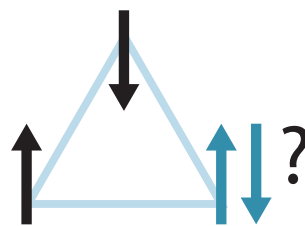
Giorgio Parisi upptäckte att det finns en dold struktur hos sådana komplexa oordnade system, som brickorna här representerar, och fann ett sätt att beskriva dem matematiskt.



## Att förstå det komplexa

De hoptryckta kulorna är en enkel modell för vanligt glas och för granulära material, som sand eller grus. Men Parisi ursprungliga arbete rörde ett ganska annorlunda material som kallas spinnnglas. Det är en speciell typ av metallegeringar där till exempel järnatomer är slumpmässigt inblandade i ett gitter av kopparatomer. Fastän järnatomerna är få ändrar de materialets magnetiska egenskaper på ett radikalt och mycket förbryllande sätt. Varje järnatom beter sig som en liten magnet, eller ett spinn, som påverkas av de andra järnatomerna i dess närhet. I en vanlig magnet pekar alla spinnen i samma riktning, men i ett spinnnglas är de *frustrerade*: vissa par av spinn vill peka åt samma håll och andra åt motsatt håll. Så hur hittar då spinnen en optimal riktning?

Att studera spinnglasen är som att bevittna de mänskliga tragedierna i Shakespeares dramer, skriver Parisi i inledningen till sin bok om spinnglas. Om du vill bli vän med två personer samtidigt, medan de hatar varandra, kan det bli frustrerande. Än svårare blir det i en klassisk tragedi, med starka känslor då många vänner och fiender möts på scenen samtidigt. Hur kan då spänningen i rummet minimeras?



## Frustration

När ett spinn riktas uppåt och det andra neråt, kan inte det tredje tillfredsställa båda samtidigt, eftersom närliggande spinn vill peka åt olika håll. Så hur hittar spinnen en optimal riktning? Giorgio Parisi är en mästare på att besvara sådana frågor för många olika material och fenomen.

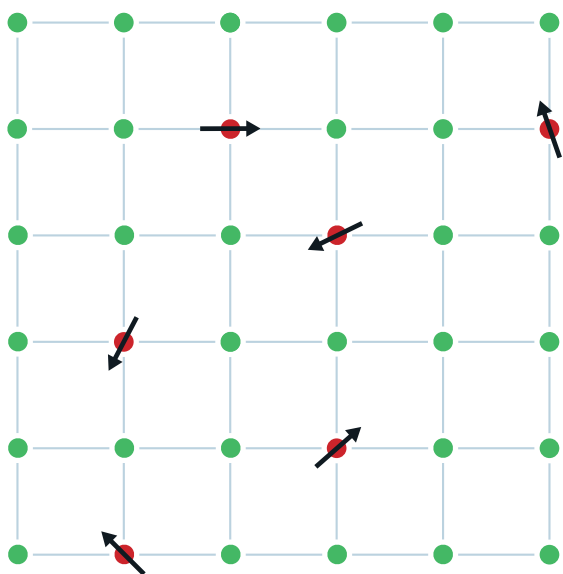
Spinnglas och deras exotiska egenskaper utgör en modell för komplexa system. Många fysiker, inklusive flera Nobelpristagare, sökte på 1970-talet efter ett sätt att beskriva de gåtfulla och frustrerade spinnglasen. En metod som användes, den så kallade replikatekniken, var ett matematiskt trick där många kopior, replikor, av systemet behandlas på samma gång. Men de ursprungliga beräkningarna gav fysikaliskt orimliga resultat.

Ett avgörande genombrott kom 1979 då Parisi visade hur replikatekniken på ett intrikat sätt kunde användas för att lösa ett spinnglasproblem. Han upptäckte en dold struktur hos replikorna, och fann ett sätt att beskriva den matematiskt. Det tog åtskilliga år innan Parisis lösning till slut kunde visas vara matematiskt korrekt. Hans metod har sedan använts på en rad ordnade system och blivit en hörnsten inom teorin för komplexa system.

Ett avgörande genombrott kom 1979 då Parisi visade hur replikatekniken på ett intrikat sätt kunde användas för att lösa ett spinnglasproblem. Han upptäckte en dold struktur hos replikorna, och fann ett sätt att beskriva den matematiskt. Det tog åtskilliga år innan Parisis lösning till slut kunde visas vara matematiskt korrekt. Hans metod har sedan använts på en rad ordnade system och blivit en hörnsten inom teorin för komplexa system.

## Frukterna av frustrationen är vitt spridda

Spinnglas och granulära material är båda exempel på frustrerade system där olika beståndsdelar måste arrangera sig på ett sätt som är en kompromiss mellan motverkande krafter. Frågan är hur de bär sig åt och vad resultatet blir. Parisi är en mästare på att besvara sådana frågor för många olika material och fenomen. Hans grundläggande upptäckter om strukturen hos spinnglas var så djupa att de påverkat inte bara fysik, utan också matematik, biologi, neurovetenskap och maskininlärning, eftersom det i alla dessa områden finns problem som är direkt relaterade till frustration.



## Spinnglas

Ett spinnglas är en metallegering där till exempel järnatomer är slumpmässigt inblandade i ett gitter av kopparatomer. Varje järnatom beter sig som en liten magnet, eller ett spinn, som påverkas av de andra magneterna i dess närhet. Men i ett spinnglas är de frustrerade och har svårt att välja vilken riktning de ska peka åt. Utifrån sina studier av spinnglas utvecklade Parisi en teori om ordnade och slumpmässiga fenomen som omfattar många andra komplexa system.

- Järn
- Koppar



Parisi har också studerat många andra fenomen där slumpmässiga processer spelar en avgörande roll, både för hur strukturer bildas och utvecklas, och behandlat frågor som: Varför har vi periodiskt återkommande istider? Finns det en mer allmän matematisk beskrivning av kaotiska och turbulenta system? Eller – hur uppkommer mönstren i en flock av tusentals stjärnor i flykt? Frågan kan tyckas väldigt långt ifrån spinnglas. Men, har Parisi sagt, det mesta i min forskning har handlat om hur enkla beteenden ger upphov till komplexa kollektiva beteenden och detta gäller såväl spinnglas som stjärnor.

---

## LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, [www.kva.se](http://www.kva.se), och på [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org). Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelprizemuseum.se](http://www.nobelprizemuseum.se).

---

## Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2021

*”för banbrytande bidrag till vår förståelse av komplexa fysikaliska system”*

med ena hälften gemensamt till

### **SYUKURO MANABE**

Född 1931 (90 år) i Shingu, Japan.  
Fil.dr 1958 vid University of Tokyo,  
Japan. Senior Meteorologist vid  
Princeton University, USA.

### **KLAUS HASSELMANN**

Född 1931 (89 år) i Hamburg, Tyskland.  
Fil.dr 1957 vid Georg-August-Universität  
Göttingen, Tyskland. Professor,  
Max-Planck-Institut für Meteorologie,  
Hamburg, Tyskland.

och med andra hälften till

### **GIORGIO PARISI**

Född 1948 (73 år) i Rom, Italien.  
Fil.dr 1970 vid Sapienza Università di  
Roma, Italien. Professor vid  
Sapienza Università di Roma, Italien.

*”för fysikalisk modellering av jordens klimat, kvantitativ analys av variationer och tillförlitlig förutsägelse av global uppvärmning”*

*”för upptäckten av hur oordning och fluktuationer samverkar i fysikaliska system från atomära till planetära skalor”*