

SÄRTRYCK UR:

KOSMOS

FYSIKENS MYSTERIER

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2019

UNIVERSUMS URSPRUNG

© MARTIN SAHLÉN



Artikeln publiceras under Creative Commons-lisensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Martin Sahlén

är docent i astronomi med inriktning mot astrofysik vid Uppsala universitet. I sin forskning studerar han bland annat vad observationer av universums tomrum, galaxhopar och galaxer kan avslöja om mörk energi, mörk materia och om fysiken i det tidiga universum. Han intresserar sig även för frågor inom kosmologins filosofi, och deltar i förberedelserna för EUCLID-satelliten samt teleskoperna 4MOST och Square Kilometre Array.

Frågan om världens ursprung har eggat människors fantasi sedan urminnes tider. Det är dock först nu som vi har tillgång till verktygen för att kunna angripa frågan vetenskapligt. Men kan vi hoppas finna svar på alla frågor? Martin Sahlén reder ut den moderna kosmologins möjligheter och utmaningar.

Bilden: Illustration av skapelsemyten Enuma Elish, troligen föreställande guden Marduk i strid med kaosmonstret Tiamat.

Universums ursprung

Varför finns något snarare än intet? Varifrån kommer universum? Hur har allt uppstått? De frågorna har sysselsatt människor sedan de första kända mytologiska berättelserna. Den äldsta nedskrivna skapelsemytologin, den babyloniska Enuma Elish, finns delvis bevarad på lertavlor från 800-talet f.Kr. men härrör troligen från 1100–1700-talet f.Kr. Där beskrivs hur världen uppstår då det ursprungliga sötvattnet Apsu, saltvattnet Tiamat och dimmolnen Mummu blandades till ett. Det finns och har funnits många olika typer av berättelser om kosmos ursprung, *kosmogonier*. Den bibliska skapelseberättelsen beskriver att ”I begynnelsen skapade Gud himmel och jord”, och därefter ljuset. I den nordiska mytologin finns beskrivningen av hur världen uppstod ur Ginnungagaps intighet, då eldriket Muspelhem och isriket Nifelhem föddes. Deras eld och rimfrost gav sedan upphov till jätten Ymer och kon Audhumbla, och så var det hela igång.

I den nuvarande staden Ascea i Italien föddes och levde Parmenides, ansedd som den förste västerländska filosofen, på 500-talet f.Kr. Genom honom och de andra för-sokratiska filosoferna i dåvarande Storgrekland, såsom Thales, Anaximander, Pythagoras och Demokritos, kom en ny metod för att närma sig frågor om naturen att få spridning. Man utvecklade sammanhängande argument genom kritiskt rationellt tänkande. Den kände österrikisk-brittiske filosofen Karl Popper (1902–1994) menade att Parmenides och hans för-sokratiska efterföljare var först med att utforma den hypotetisk-deduktiva metod vi alltjämt använder inom vetenskapen: anta en hypotes, härled de logiska följderna av den, och pröva sedan om dessa följder är förenliga med den kunskap vi har om verkligheten.

Vad ansåg då Parmenides om varför det finns något snarare än intet? Han menade att frågan är felställd. Parmenides tillskrivs

det filosofiska argumentet att inget kommer ur intet, på latin ”*ex nihilo nihil fit*”. Enligt honom är ”intet” en chimär som saknar existens, och frågan varför något finns, snarare än intet, blir därför absurd. Universums existens får antas evig och på något vis metafysiskt nödvändig. Det argumentet var dock inte tillfredsställande för många andra, och olika varianter av berättelser om hur något uppstått ur intet har formulerats under årtusendena sedan dess. Aristoteles (384–322 f.Kr.) klassiska analys av frågan utgick från tanken om orsak och verkan: alla rörelser måste ha en direkt föregående orsak, vilket leder till slutsatsen att världen är uppbyggd i en lång, sammanhängande orsakskedja. Men den kedjan måste sluta med en icke-orsakad orsak, en första rörelse. Thomas av Aquino (cirka 1225–1274) förenade den här idén med den kristna skapelseteologin, och menade att den första rörelsen hade sitt ursprung i Gud. Den kristna världsbilden omfattar också via bland annat Augustinus (354–430) idén om ”*creatio ex nihilo*”, en skapelse ur intet.

Aristoteles argumentation bygger på den filosofiska principen om *den tillräckliga grundens lag*. Enligt den principen har varje sakförhållande, som faktiskt existerar i verkligheten, en tillräcklig orsak eller förklaring. Inom naturvetenskapen använder vi oss regelmässigt av den när vi söker efter orsaker och förklaringar till hur naturen fungerar: vi antar att det finns något skäl, någon orsak att upptäcka. Den tyske filosofen Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716) gav också den tillräckliga grundens lag en framträdande plats i sitt tänkande. Enligt honom existerar vår värld med stöd av den tillräckliga grundens lag för att det är den bästa av ett oändligt antal möjliga världar som Gud i sin godhet kunde ha valt att skapa. Leibniz något mer pessimistiske landsman Arthur Schopenhauer (1788–1860) hävdade å sin sida att vår värld måste vara den värsta av alla möjliga världar. Han ifrågasatte i sin doktorsavhandling just hur långt bortom vardagserfarenheten som den tillräckliga grundens lag kan tillämpas.

I och med att den kopernikanska¹ revolutionens heliocentriska världsbild så småningom etablerades från 1500-talet och framåt, öppnades också för spekulationer om andra världar – andra solsystem eller galaxer (även om det begreppet då inte var etablerat). Den förste att beskriva denna idé var den svenske vetenskaps-

1 Efter Nikolaus Kopernikus (1473–1543).

mannen Emanuel Swedenborg (1688–1772), som i verket ”*Principia rerum naturalium* ...” 1734 skrev (i översättning från latinet):

Det kan finnas oräkneliga sfärer av detta slag eller stjärnbeströdda himlar i vårt ändliga universum. Dessa kan vara associerade med varandra ... och hela den synliga stjärnbeströdda himlen är kanske bara en punkt i jämförelse med universum. De objekt som vår kroppsliga syns omfång kan uppfatta är kanske få ... Den rikligt stjärnbeströdda himlen, hur hisnande den må vara, utgör kanske endast en liten del ... Möjligen finns det oräkneliga andra sfärer liknande de vi ser; kanske så många och så storslagna att vår egen bara utgör en punkt i jämförelse ...

Den engelske astronomen Thomas Wright (1711–1786) och den tyske filosofen Immanuel Kant (1724–1804) skrev på 1750-talet om möjligheten att vår galax Vintergatan var en av många samlingar stjärnor samt att de suddiga, ljussvaga fläckar som man börjat upptäcka med de allt bättre teleskopen kunde vara andra stjärnsamlingar långt borta. Tack vare allt bättre observationella verktyg och den moderna fysikens genombrott har vi sedan dess lyckats vetenskapligt etablera en världsbild som bekräftar att vår galax är en av många miljarder i ett expanderande universum. Med hjälp av den kosmologiska standardmodellen (se figur 1) kan vi framgångsrikt beskriva universums storskaliga utveckling alltsedan Big Bang fram till idag omkring 14 miljarder år senare, även om vissa väsentliga detaljer ännu är okända. En av årets Nobelpristagare i fysik, den amerikanske fysikern James Peebles, har utvecklat viktiga delar av det nödvändiga teoretiska ramverk som gjort den här utvecklingen möjlig. Men svaren på vad som sätter villkoren för Big Bang och varför universum överhuvudtaget existerar undflyr oss alltjämt.

Nu finns dock fysikaliska teorier och observationer som börjar ge viss vägledning om hur vi ur ett vetenskapligt perspektiv kan tänka kring universums begynnelsestillstånd och eventuella ursprung. Om det ska fortsättningen handla.

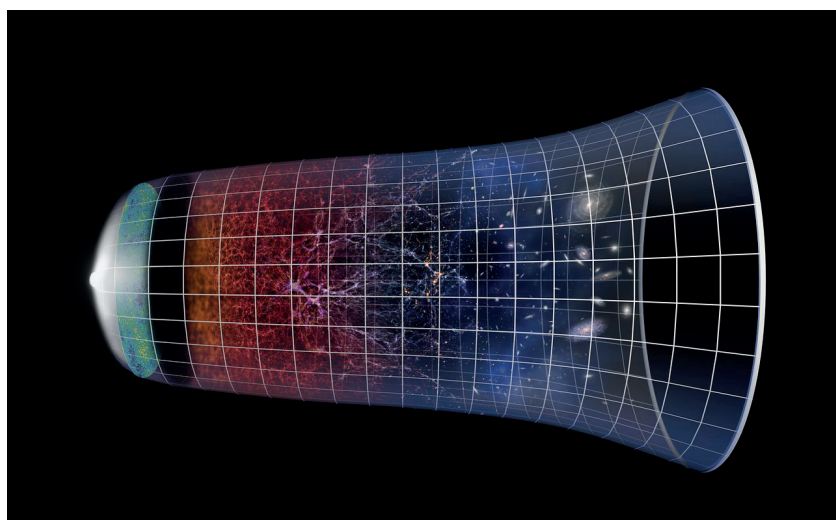


BILD: ESO/M. KORNMESSER

Figur 1: Översikt av universums utveckling i den kosmologiska standardmodellen. Tiden löper framåt i riktning åt höger, och omkretsen på "tratten" illustrerar universums relativa storlek vid olika tidpunkter, som ökar eftersom universum hela tiden expanderar. I begynnelsen ser vi en snabb expansion i den kosmiska inflationsepoken, och bildandet av den kosmiska bakgrundsstrålningen (blått/grönt/gult) omkring 400 000 år efter Big Bang. Därefter följer den mörka tidsåldern, då universum innehåller stora mängder neutral vätgas. Först några hundra miljoner år efter Big Bang börjar stjärnor och galaxer för första gången bildas vid den kosmiska gryningen (orange). Strålningen från de allt fler stjärnorna och galaxerna får sedan vätgasen att joniseras under återjoniseringsepoken, som sträcker sig till omkring en miljard år efter Big Bang. Bildningen av stjärnor och galaxer fortsätter under många miljarder år, och växer sakta samman till den kosmiska vävstrukturen bilden visar. Omkring 8–10 miljarder år efter Big Bang kan vi se att universums expansion tycks accelerera – storleken växer snabbare och snabbare. Orsaken är den mörka energin, som nu börjar bli avgörande för universums utveckling.

Begynnelsen, Big Bang och singulariteten

En beskrivning man ofta hör är att universum skapades ur en singularitet² i Big Bang, och variationer på det temat. Men det vi kan säga vetenskapligt är inte så entydigt, och därför kan det vara bra att klargöra de olika begreppen och hur de förhåller sig till den kosmologiska världsbild vi kan konstruera på empirisk grund.

Alltsedan Georges Lemaîtres (1894–1966) och Edwin Hubb-

2 En singularitet är en punkt där våra teorier slutar fungera, vanligen för att någon storhet blir oändlig.

les (1889–1953) upptäckt av universums expansion på 1920-talet visar våra observationer på samma sak: universum tycks ha expanderat kontinuerligt så långt tillbaka i tiden som vi kan observera, omkring 380 000 år efter den ”nollpunkt” som vi kommer till om vi extrapolerar expansionen bakåt i tiden med hjälp av kosmologins standardmodell. Det är med hjälp av Einsteins allmänna relativitetsteori, som formulerades 1915, som vi har kunnat utforma en modell över hur universum som helhet utvecklas. Den allmänna relativitetsteorin beskriver hur gravitationen verkar. Å ena sidan orsakar massors placering i rummet att det kröks på olika sätt, å andra sidan avgör rummets krökning längs vilka banor massor rör sig genom rummet. Det här kan vi använda för att beskriva hur universum som helhet utvecklas.

Alla observationer tyder också på att universum var allt tätare och allt hetare ju längre tillbaka i tiden man går. Därav kan vi dra slutsatsen att universum från något mycket tätt begynnelsestillstånd (vilket Lemaître beskrev som ”ur-atomen” i ett berömt arbete från 1930-talet) utvecklats framåt i tiden med expansion i enlighet med standardmodellen. Kan vi säga något mer om begynnelsestillståndet? Var det en singularitet? Nej, vi kan inte med säkerhet säga något om den saken, eftersom den fysikaliska modell vi använder – Einsteins allmänna relativitetsteori – börjar bryta samman vid mycket höga energier, och extrapoleringen bakåt i tiden blir osäker. Universums täthet går, om man ska tro teorin, mot oändligheten ju närmare ”nollpunkten” vi kommer. Men en oändlig täthet förefaller ofysikalisk. Matematikern David Hilberts (1862–1943) poäng att oändligheter inte kan existera i den fysiska verkligheten framhålls idag ofta av kosmologen George Ellis i det här sammanhanget. Dessutom vet vi att kvantmekaniska effekter börjar bli viktiga vid höga energier, men den allmänna relativitetsteorin kan inte beskriva dessa på ett sammanhängande vis. Vi har alltså goda skäl att tvivla på den allmänna relativitetsteorins förutsägelser vid mycket höga energier. Därför är det vi kan säga om saken ganska begränsat: universum kan ha haft sin begynnelse i en singularitet, men kan lika gärna ha existerat i någon form sedan tidigare. Om vi så småningom hittar en bra teori som förenar gravitation och kvantmekanik³, skulle denna kunna ge vägledning i den här frågan.

3 Strängteorin är idag vår mest välutvecklade kandidat till en sådan teori.

Ett populärvetenskapligt försök att ge ett svar med den utgångspunkten gjordes för några år sedan dels av Stephen Hawking (1942–2018) och Leonard Mlodinow i boken *Den stora planen*, dels av Lawrence Krauss i boken *Ett universum ur ingenting*. I kort-het menar de att universum troligen har uppstått som en konsekvens av en samverkan mellan kvantmekaniska fluktuationer i ett tänkt ursprungligt vakuumtillstånd och gravitation. Därmed skulle universums uppkomst vara oundviklig – någon gång uppstår en tillräckligt stor kvantmekanisk fluktuation som gravitationen kan ta tag i och få att blåsas upp i en ”stor smäll”. Den här idén bygger visserligen på känd fysik, men mer precist på extrapolationer av känd fysik till fysikaliska tillstånd som ligger långt bortom de energier och processer som har undersökts experimentellt. Förklaringen bygger också på att det metafysiska begreppet ”intet” får en fysikalisk tolkning: ”intet” är nu ett kvantmekaniskt vakuum i vilket fysikaliska lagar (specifikt gravitationen) på något sätt existerar latent. Den här användningen av ”intet” har kritiserats bland annat av filosofen David Albert som oförenlig med det som vanligen åsyftas med begreppet inom filosofi: en total avsaknad av såväl egenskaper som lagar. Varför och hur vakuum och lagar existerar till att börja med är oklart, men de torde antas vara eviga och äga ett slags platonisk idealexistens. Det här är inte en vetenskaplig förklaring av universums ursprung, utan snarare en metafysisk spekulation som tar inspiration av vår vetenskapliga kunskap. I vilken mån den är bättre eller sämre än andra metafysiska förklaringar är en filosofisk och kunskapsteoretisk fråga.

Men vad menas då egentligen när man talar om Big Bang som begynnelsen? Den kosmologiska standardmodellen bygger på en ”het Big Bang”, dvs. att universums begynnelsetillstånd var mycket tätt och hett. Ett svalt universum med en ”kall Big Bang” är inte i överensstämmelse med den kosmiska bakgrundsstrålningens egenskaper. Den kosmiska bakgrundsstrålningen kallas ibland ”ljuset från Big Bang”, och består av de fotoner som ingick i det termiska jämviktstillståndet några hundra tusen år efter Big Bang. De släpptes sedan fria i samband med att universum blev tillräckligt kallt och glest, och når fram till oss idag i form av mikrovågsstrålning. Den ”heta Big Bang” föregås i standardmodellen av en kosmisk inflationsepok, och är därmed inte universums begynnelse i absolut mening, men väl begynnelsen för uppkomsten av materiell struktur. Härnäst ska vi fördjupa oss i detta.

Kosmisk inflation och strukturbildning

En av de centrala komponenterna i den moderna kosmologiska standardmodellen är en period av enorm expansion under en mycket kort tid i det tidiga universum, den s.k. *inflationsepoken*. Inflationsteorin utvecklades på 1980-talet av bl.a. Demos Kazanas, Alan Guth, Alexei Starobinsky, Andrei Linde och Paul Steinhardt. Teorin motiverades av att kunna lösa flera teoretiska problem med att förklara flera till synes högst osannolika observationer. Redan omkring 10^{-35} sekunder efter den tänkta begynnelsen avslutas inflationsepoken, och har då hunnit blåsa upp universum med en faktor $\sim 10^{25}$. Det här kan förklara varför den kosmiska bakgrundsstrålningen från universums begynnelse har en homogen temperatur till en precision av en på hundra tusen, och ser likadan⁴ ut i alla riktningar: den kommer från ett litet område i termisk jämvikt som inflationen expanderat till att täcka hela vårt observerbara universum. Det förklarar också varför universums krökning på stora skalor är så nära noll: inflationens enorma expansion har ”plattat ut” det. Slutligen kan inflationen också förklara varför inga magnetiska monopoler⁵ har observerats: de har späts ut av inflationen till en täthet nära noll.

Ett avgörande bidrag i inflationsteorins utveckling gavs 1981 av Viatcheslav Mukhanov och Gennady Chibisov (1946–2008). De visade att inflationsteorin också kan ge en förklaring till hur den materiella strukturen i universum bildas, eller närmare bestämt fröna till den. Kvantmekaniska fluktuationer i det tidiga universum, som enligt Heisenbergs osäkerhetsprincip alltid finns där, ”fryser fast” som en konsekvens av den enorma, snabba expansionen av universum. Därigenom övergår de till att bli ”klassiska” (dvs. icke kvant-mekaniska) fluktuationer i materietäthet. När inflationsepoken nått sitt slut börjar de tätare områdena efterhand att växa till sig gravitationellt i enlighet med Matteuseffek-

4 Mer precist är det de statistiska egenskaperna hos de små rumsliga variationerna i temperatur som är likadana.

5 Standardmodellen för partikelfysik är inte fullständig, utan behöver kompletteras med en s.k. *storförenad teori* (eng. *grand unified theory*, GUT) då man vill beskriva partikelfysiken vid de höga energier som råder i det tidiga universum. Dessa teorier förutsäger generellt att magnetiska monopoler – objekt med endast en magnetisk laddning – produceras i det tidiga universum. Vanliga magneter har ju som bekant två poler.

ten⁶: områden där det finns aningen mer materia drar till sig ytterligare materia, medan områden med mindre materia tunnas ut ännu mer. Så småningom blir tätheterna stora nog att de kan bilda stjärnor (efter några hundra miljoner år), galaxer (efter ytterligare några hundra miljoner år) och galaxhopar (efter några miljarder år). I den kosmologiska standardmodellen sker strukturbildningen hierarkiskt: de minsta strukturerna bildas först, och dessa slås efterhand samman till allt större strukturer – vilket också stämmer väl med de observationer vi har. Inflationsteorins förutsägelser stämmer också väl överens med hur mycket struktur av olika storlekar som vi ser i universum i form av galaxer. Satelliterna WMAP och Planck har också från 2000-talet fram till idag visat att de små variationerna i den kosmiska bakgrundsstrålningens temperatur och polarisering har ungefär de statistiska egenskaper som inflationsteorin förutsäger.

Samtidigt som inflationsteorin har varit väldigt framgångsrik och så här långt kunnat verifieras med hjälp av astronomiska observationer, har en diskussion om dess vetenskapliga status seglat upp under senare år. Inte minst har en av inflationsteorins skapare, Paul Steinhardt, tillsammans med Anna Ijjas och Abraham Loeb vädrat mycket kritiska synpunkter bland annat i *Scientific American* under 2017 – och mött starkt motstånd av en lång rad andra forskare. Ijjas, Steinhardt och Loeb påpekar bland annat att de senaste mätningarna av den kosmiska bakgrundsstrålningen kräver att parametrarna i de ännu gångbara inflationsteorierna måste anpassas med mycket precis finjustering, vilket talar mot teorins gångbarhet. En vanlig kritik är också att inflationsteorin inte är att betrakta som en vetenskaplig teori, eftersom det tycks svårt att falsifiera (motbevisa) teorin som sådan – det finns alltid någon variant av den som kan anpassas till observationerna. Därför talar man också ofta om inflationsparadigmet som omfattar alla varianter av inflationsteorier. Inflationsparadigmet verkar svårt att falsifiera i princip, medan en rad specifika varianter av inflationsteori har avfärdats med hjälp av observationer av den kosmiska bakgrundsstrålningen under åren.

Det finns dock en möjlig ”smoking gun” för inflationsteorin, en förutsägelse som i forskarvärlden allmänt accepteras som ett avgörande test av teorins giltighet. Det handlar om så kallade

6 Efter Matteus-evangeliet 25:29: ”Var och en som har, han skall få, och det i överflöd, men den som inte har, från honom skall tas också det han har.”

B-svängningar (eng. *B-modes*) i den kosmiska bakgrundsstrålningens polarisering. Den här typen av variationer i strålningen förväntas som en följd av de gravitationsvågor som skapas under inflationsprocessen. Gravitationsvågorna tänjer ut och trycker ihop rummet om vartannat i det tidiga universum där den kosmiska bakgrundsstrålningen bildas. Hoptryckningarna och uttänjningarna gör så att bakgrundsstrålningens fotoner växelverkar med något fler eller något färre andra partiklar på olika platser, vilket ger upphov till det karakteristiska B-svängningsmönstret i dess polarisering. Ju mer energi som frigjorts under inflationsepoken, desto större blir B-svängningarna i bakgrundsstrålningens polarisering. Faktum är att BICEP2-experimentet, som observerat den kosmiska bakgrundsstrålningen från Sydpolen, redan 2013 offentliggjorde att man upptäckt B-svängningar i polariseringen. Man gjorde till och med en YouTube-film där inflationsteoretikern Andrei Linde överraskades av BICEP2-medlemmar med champagne för att fira upptäckten. Nobel-vittringen till trots visade det sig så småningom att vad man egentligen hade upptäckt bara var störningar orsakade av rymdstoft i Vintergatan, något som blev klarlagt tack vara andra forskares undersökningar och särskilt Planck-satellitens mätningar. Den förväntade signalen orsakad av inflationsepoken är svag, och kan bara mätas korrekt om en störande förgrundssignal från bland annat rymdstoft i vår galax kan subtraheras med god noggrannhet. Det blev en nesa för BICEP2-experimentet, men kanske kommer pågående och framtida experiment att ha större framgång. Nobel-kommittén för fysik får vänta och se.

Inflationsteorin har på ett framgångsrikt sätt kunnat förklara hur struktur uppstår i universum, och varför dess storskaliga egenskaper är så pass lika i alla riktningar. Men det här fungerar bara förutsatt att man väljer teorins parametrar och begynnelse-tillstånd på rätt sätt. Normalt väljer vi dem helt enkelt så att det fungerar. Men parametervärdena och begynnelse-tillståndet bör ju egentligen komma någonstans ifrån – från någon fysikalisk princip eller process. Åtminstone om vi vill kunna hävda att inflations-teorin faktiskt ger en lösning på universums annars så osannolika egenskaper. Hur sannolikt är det att inflationsteorins parametrar och begynnelse-tillstånd faktiskt antar de värden som måste till?

Entropi-problemet

Inflationsteorin ger oss en fysikalisk mekanism för hur frön för universums storskaliga struktur kan uppstå. Men den svarar inte på hur speciella de här fröna i ursprungstillståndet behöver vara för att ge upphov till ett universum likt vårt, eller hur lätt eller svårt det är för rätt sorts frön att uppstå.

Ett sätt att närma sig frågan om hur speciellt ursprungstillståndet behöver vara går ut på att försöka beräkna dess entropi⁷. För att utvärdera detta kan man jämföra antalet universa liknande vårt med det totala antalet möjliga universa. Det kan ge oss en uppfattning om hur speciellt vårt universums begynnelsestillstånd torde vara. Roger Penrose har undersökt den här frågan sedan 1970-talet, och beskriver i sin bok *The Emperor's New Mind* från 1989 en uppskattning där han kommer fram till att i storleksordningen endast ett på $10^{10^{123}}$ av olika möjliga begynnelsestillstånd kan ge upphov till ett universum likt vårt. Det här hänger samman med att vårt universum idag, omkring 14 miljarder år efter Big Bang, har en väldigt ordnad struktur (i form av stjärnor, galaxer, galaxhopar, med mera) och därför en låg entropi. Därmed måste redan begynnelsestillståndet ha haft en oerhört låg entropi. I enlighet med termodynamikens andra huvudsats kan ju den totala entropin (och därmed sannolikheten för universums tillstånd) bara öka med tiden. Så sannolikheten att hitta ett begynnelsestillstånd med tillräckligt låg entropi tycks alltså vara det helt häpnadsväckande minimala en på $10^{10^{123}}$. Hur kan vi förstå detta? Det här brukar kallas för universums entropi-problem.

En tolkning av Penroses analys är att den pekar på att här finns något att förklara, med ledning av den tillräckliga grundens lag. Analysen antyder att det kan finnas någon orsak att upptäcka till varför vårt universum trots allt "valts ut". Sannolikt är de antaganden som Penrose gör i sin analys inte fullständiga, eller kanske bristfälliga. Men även om detaljerna inte stämmer till fullo, verkar det som att ett universum fullt av irreversibla fysikaliska processer som kan ge upphov till en komplex materiell struktur hänger på att begynnelsestillståndet har rätt speciella egenskaper. Kan en för-

7 Inom termodynamiken är entropi ett mått på ett systems oordning: ju lägre entropi, desto mer välordnat är ett system. I vattenånga är entropin hög, då molekylerna är slumpmässigt fördelade. I ett isblock är entropin låg, då molekylerna är arrangerade i en fast kristallstruktur.

klaring vara att många av de universa som Penrose inkluderar i sin analys egentligen *inte är möjliga*?

Vad som än ligger bakom entropi-problemet, är det bara ett exempel på ett intressant fenomen som vi hittar på fler ställen: att många av universums grundläggande egenskaper ser ut att vara finjusterade för att tillåta uppkomsten av komplex struktur och liv.

Finjustering av naturkonstanter

En av de märkligare upptäckter som gjorts sedan det tidiga 1900-talet är att de naturkonstanter som bland annat beskriver de olika naturkrafternas växelverkan tycks ha värden som är märkligt finjusterade och dessutom på något sätt tycks vara sammankopplade.

Några första steg i den här riktningen togs av den tyske fysikern Hermann Weyl (1885–1955) och den brittiske fysikern Arthur Eddington (1882–1944), som på 1920-talet undersökte samband mellan värdena hos olika naturkonstanter, såsom protonens massa och elektronens laddning, och universums storlek. De tyckte sig kunna se att många konstanter kunde kombineras tillsammans med universums storlek till ett *dimensionslöst* tal (dvs. ett värde utan fysikaliska enheter) av storleksordningen 10^{40} . Även Paul Dirac (1902–1984) intresserade sig för de här sambanden, och tolkade det i sin ”*Large Number Hypothesis*” från 1937 så att naturkonstanten G , som beskriver gravitationens styrka, kanske ändras med tiden allt eftersom universum växer, för att bibehålla relationen mellan de olika konstanterna. Senare observationer talar dock emot denna tolkning. Amerikanen Robert Dicke (1916–1997) tolkade på 1960-talet de stora talens sammanträffanden som relaterade till biologiska faktorer: att universum måste vara tillräckligt stort och gammalt idag för att kunna ha producerat de kemiska ämnena – bland annat via kärnprocesser i stjärnor – som är nödvändiga för att liv ska kunna existera.

Fred Hoyle (1915–2001) gjorde 1953 en ovanlig teoretisk förutsägelse, som hade att göra just med hur grundämnen bildas inne i stjärnor. Han insåg att kol-12-kärnor – dvs. den vanligaste isotopen av grundämnet kol som utgör stommen i allt liv på jorden – måste ha ett ännu okänt exciterat tillstånd med tillräckligt lång livstid, för att sakta ned omvandlingen av kol-12 till syre-16 genom kombination med helium-4. Energinivån hos detta okända exciterade tillstånd måste också vara finjusterat på procentnivå.

Hans förutsägelse utgick från observationen att stjärnor annars inte skulle kunna bilda så mycket kol-12 som vi kan mäta att de innehåller, och som är en förutsättning för livet. En kort tid efter förutsägelsen, kunde den bekräftas experimentellt.

Bernard Carr och Martin Rees visade 1979 att de grundläggande egenskaperna hos galaxer, stjärnor och planeter bestäms av ett fåtal mikrofysikaliska naturkonstanter och gravitationen, och att en rad förutsättningar för att liv skall kunna uppstå tycks vara beroende av en märklig finjustering av naturkonstanter värden.

Under den senare delen av 1980-talet kom frågan om det finns en *kosmologisk konstant* att alltmer sysselsätta forskare inom kosmologi. Den kosmologiska konstanten kan förstås som en konstant, helt homogen energitäthet, men med den kontraintuitiva egenskapen att denna energi har negativt tryck. Enligt den kosmologiska standardmodellen är det den kosmologiska konstanten som har fått universums expansion att accelerera under de senaste 3–5 miljarder åren (det här är den enklaste modellen för *mörk energi*, se vidare Joel Johanssons artikel). Om vakuum i sig självt skulle ha en energi så skulle den motsvara just en konstant energitäthet med negativt tryck, och vanligen tolkas därför den kosmologiska konstanten som härrörande från universums vakuumenergi. Det sena 1980-talets nya astronomiska observationer pekade mot att en kosmologisk konstant faktiskt fanns där, men mätningarna var inte precisa nog för att avgöra frågan med säkerhet. Många i forskarvärlden var också mycket skeptiska och höll fast vid den då etablerade kosmologiska modellen utan kosmologisk konstant. I detta läge gjorde Steven Weinberg (1987) en oväntad förutsägelse: den kosmologiska konstantens värde måste ligga inom ett relativt litet intervall, och dess värde kan inte vara alltför stort. Om konstanten skulle vara alltför stor och positiv, skulle universum expandera så snabbt att galaxbildning hindrades. Om den å andra sidan skulle vara alltför stor och negativ skulle universum ha dragit ihop sig och kollapsat i en ”Big Crunch” på betydligt kortare tid än universums nuvarande ålder. När man så småningom lyckades mäta universums accelererande expansion, och därmed den kosmologiska konstanten, på sent 1990-tal och tidigt 2000-tal, visade det sig att värdet ligger inom det intervall som Weinberg förutsagt.

Även den svensk-amerikanske fysikern Max Tegmark har gett sig på frågan om hur naturkonstanter kan vara relaterade till förutsättningarna för ett universum liknande vårt. År 1997 publi-

cerade han en studie där han kom fram till att antalet rumsliga och tidsliga dimensioner i vårt universum (dvs. 3+1) är den enda kombination som tycks förenlig med ett komplext universum. Alla andra kombinationer leder till universa som saknar förutsättningar för komplexitet eller intelligent liv. Också tid och rum tycks vara finjusterade.

Hur ska man då förhålla sig till dessa frågor om finjustering? Kan vi hoppas hitta någon förklaring till fenomenet? Bland många föreslagna möjligheter – med varierande ambition att förklara – kan några huvudalternativ urskiljas:⁸

1. Absurt universum: vårt universum råkar bara vara så som det är.
2. Unikt universum: det finns en djupgående fysikalisk enhetlighet som gör att universum måste vara precis så som det är.
3. Multiversum: det finns många universa, med alla möjliga kombinationer av egenskaper, och vi befinner oss ofrånkomligen i ett universum där vår existens är möjlig.

Vi kommer att titta närmare på det tredje alternativet, vilket är det som dels får sägas ha det starkaste teoretiska underlaget idag, dels har ett visst förklaringsvärde för observationer. Dessutom har det kommit att bli ett populärt tema inom metafysiska spekulationer av olika slag.

Multiversum

Det engelska ordet "multiverse" dyker upp i skriven form för första gången år 1895, men begreppet används inte i sin nuvarande betydelse förrän 1963, och då i science fiction-novellen *The Sundered Worlds* av Michael Moorcock. Under de senaste årtiondena har idén om ett multiversum blivit en alltmer etablerad, om än kontroversiell, del av den kosmologiska teoribildningen. Själva grundtanken med multiversum är att det kan finnas andra universa, annorlunda än det observerbara universum vi kan se. På vilket sätt de skiljer sig åt finns olika varianter av. Två av de oftast diskuterade nivåerna är:

⁸ Ytterligare några exempel: designat universum, simulerat universum.

Nivå 1: Delområden i ett och samma universum (men över så stora avstånd att de är ”utom synhåll” för varandra) som har olika begynnelsefördelningar av materia.

Nivå 2: Separata ”bubbel-universa” med olika värden på naturkonstanter.

Inflationsteorin har inte bara gett upphov till en förklaringsmodell för hur bildningen av storskalig struktur startade. Inflationsspionjärerna på 1980-talet visade att den också tycks förutsäga existensen av de två ovanstående multiversum-nivåerna. För det första kunde man visa att alla möjliga begynnelsefördelningar av materien realiserar någonstans i universum. För det andra kommer inflationsprocessen att ge upphov till en lång rad ”bubbel-universa” – avgränsade bubblor i ett större multiversum, där varje bubbla skulle kunna ha sina egna värden på naturkonstanterna. Sannolikt fortsätter processen med nya bubbel-universa i all evighet. Om det är så, skulle det förklara varför naturkonstanterna i vårt universum tycks vara så finjusterade: av många olika möjliga värden på naturkonstanter, befinner vi oss i en ”bubbla” som har just sådana värden på konstanterna att vi kan existera – det hade ju inte kunnat vara annorlunda! Förklaringen är med andra ord en urvalseffekt av det faktum att vi faktiskt existerar. Det här är ett exempel på *den svaga antropiska principen* – universum måste vara sådant att liv ska kunna existera – först formulerad av Brandon Carter 1973. Den antropiska principen är i denna tappning okontroversiell, eftersom vi uppenbart existerar (någon solipsist kanske protesterar, men får så roa sig med det i sin ensamhet). Vi kan inte leva i ett universum där vår existens är omöjlig.

Inflationsteorins bubbel-universa kan på ett naturligt sätt beskrivas i ett strängteoretiskt modellbygge. Strängteorin beskriver materien och naturlagarna som bestående av fundamentala subatomära strängar och deras växelverkningar. En av de stora upptäckterna inom strängteorin sedan 1990- och 2000-talen har varit det som den amerikanske fysikern Leonard Susskind kallat för *strängteorins landskap*. Det har visat sig att strängteoretiska modeller förutsäger existensen av i storleksordningen 10^{500} olika så kallade falska vakuum-tillstånd som kan realiserar i olika bubbel-universa. Mer specifikt innebär det här att det finns ungefär lika många varianter av lågenergi-fysik, som uppsättningar olika värden på naturkonstanter. Detta trots att en enhetlig strängteori

alltså antas beskriva fysiken vid mycket höga energier långt bortom dagens kända partikelfysik. Längre hoppades man på att strängteorin skulle förutsäga ett unikt vakuumtillstånd och därmed kunna förklara värdena på naturkonstanterna – ett ”unik universum” i listan ovan – men det har alltså visat sig att strängteorin förutsade något helt annat: ett multiversum. Det här har öppnat för en möjlighet att förklara varför det uppmätta värdet på den kosmologiska konstanten är så ofantligt litet, men ändå inte noll, jämfört med den teoretiskt förväntade storleksordningen. Stränglandskapet medger möjligheten att den kosmologiska konstanten skulle kunna ha olika värden i olika bubblor, och i någon ”bubbla” realiseras ett falskt vakuumtillstånd med en kosmologisk konstant med just det värde vi uppmätt – och vi hade heller inte kunnat existera i ett universum med väsentligt annorlunda värde.

En kritik som ofta har riktats mot landskaps-förklaringen är att man inför 10^{500} nya universa för att kunna förklara ett enda universum. Ockhams rakkniv – principen att inte anta mer än nödvändigt för att förklara ett fenomen – tycks tala emot att införa ett så stort antal saker för att förklara en sak. Men alla dessa universa har inte införts *ad hoc*, utan är en förutsägelse från en sammanhållen fysikalisk teori som tros gälla vid mycket höga energier, strängteori. Snarare bör vi kanske fråga oss hur många nya antaganden och parametrar som finns i teorin. Då handlar det snarare om en handfull nyheter som har införts, och kanske är då den Ockhamska rakkniven inte längre så vass. Vidare kan man också hävda att ifråga om komplexitet (mätt genom s.k. *Kolmogorov-komplexitet*⁹) kan en uppsättning av flera objekt faktiskt vara enklare att beskriva än ett enskilt objekt.

Vid sidan av mer filosofiska överväganden har också något nytt dykt upp i stränglandskapet på senare år: *träskmarkerna*. Många av de falska vakuumtillståndens lågenergi-fysik verkar faktiskt inte förenlig med någon överordnad strängteori, och är därför kanske ofysikalisk. De här vakuumtillstånden utgör strängträskmarkerna, och en stor del av stränglandskapet kanske egentligen utgörs av träskmarker. Det pågår en livaktig diskussion i forskarsamhället kring vad konsekvenserna av detta är för stränglandskapet som förklaringsmodell, men det skulle kunna innebära en drastisk reduktion av antalet gångbara vakuumtillstånd.

9 *Kolmogorov-komplexitet*, eller *algoritmisk komplexitet*, är längden på den kortaste algoritmen som kan generera en viss given uppsättning data.

Från kosmisk inflationsteori och strängteori har vi alltså goda skäl att tro att universum skulle ha kunnat vara annorlunda än det är. "Någonstans" uppstår ett universum med sådana egenskaper som vårt, och därmed skulle vi utifrån den svaga antropiska principen kunna förklara varför det har till synes finjusterade naturkonstanter. Än så länge måste det här dock framförallt ses som teoretiska spekulationer.

Finjustering och sannolikhet

Vi har tagit upp begrepp som finjustering och osannolika tillstånd som märkliga förekomster som behöver en förklaring, och vi har diskuterat olika möjliga lösningar. Men hur har vi kommit fram till de här siffrorna på finjusteringar och sannolikheter?

I fallet med finjusteringar har man, som regel, först uppskattat det intervall av parametervärden som är förenligt med uppkomsten av olika former av komplex struktur som finns i vårt universum. Sedan har man jämfört det med en tänkt fördelning av möjliga parametervärden, och sett att det intervall som är förenligt med komplex struktur är betydligt mindre än det tänkta möjliga intervallet. I resonemanget antas ofta implicit att alla värden på konstanter är lika sannolika, att det inte finns några väsentliga korrelationer mellan värden på olika naturkonstanter, och att de fysikaliska lagarnas matematiska form inte varierar med naturkonstanternas värden. Men vi vet inte om dessa antaganden verkligen är rimliga, och därför brukar man tala om *synbar* finjustering. Samtidigt är det ett faktum att många naturkonstanter är synbart finjusterade, och det mönstret i sig är kanske skäl nog att tro att det finns något att förklara här, att något djupare sammanhang kan ligga bakom. Eftersom konstanterna heller inte har några uppenbara kopplingar till varandra, är det svårt att se att någon enkel princip på ett trivalt sätt skulle kunna förklara detta.

Att i någon mer objektiv mening säga hur osannolikt värdet på en viss naturkonstant är kan vi ännu inte göra. För att besvara den frågan behöver vi i förlängningen veta hur sannolika universums olika möjliga begynnelsestillstånd är. Och för att få reda på det skulle vi allra helst ha möjlighet att experimentellt testa hur sannolikhetsfördelningen för olika universa ser ut – något som förefaller mycket svårt. Först har vi den uppenbara svårigheten med att i experiment skapa nya universa med olika egenskaper, för att på den vägen uppskatta sannolikhetsfördelningen. Men även om

vi skulle lösa det med någon genial mekanism, finns ytterligare en svårighet. Hur kan vi veta att den mekanism vi använder faktiskt ger upphov till samma fördelning av universa som den mekanism (om någon) som gav upphov till vårt universum?

Någonstans finns en gräns för det som vår induktiva vetenskapliga metod kan ge oss kunskap om, den metod som bygger på statistisk prövning av hypoteser genom experiment och observation. Om vi inte kan grunda vårt sannolikhetsbegrepp i något empiriskt – som ett antal utfall av något experiment – vad kan vi då säga vetenskapligt? Under senare år har både filosofer och fysiker, inklusive undertecknad, börjat undersöka detta mer systematiskt inom det nya fältet *kosmologins filosofi*¹⁰. Stockholmsfilosofen Richard Dawid har också utarbetat nya meta-empiriska sätt att utvärdera teoriernas gångbarhet. Vetenskap är inte bara induktiv till sin form, utan kräver också olika former av något som ibland kallas *abduktion*. Ockhams rakkniv är ett exempel på en abduktiv förklaringsprincip, dvs. principer som går ut på att hitta den sammantaget bästa helhetsförklaringen. I fallet med Ockhams rakkniv anses den bästa förklaringen vara den förklaring som är den enklast möjliga. Andra exempel på abduktiva principer är matematisk skönhet och enkelhet, liknande teoretisk struktur som kända framgångsrika teorier, och sammankopplingar med andra teorier. Man kan säga att abduktiva förklaringar knyter samman den induktiva kunskapen i ett sammanhängande pussel. Inom kosmologi, liksom inom evolutionsbiologi och geologi, lägger vi just sådana pussel med hjälp av de historiska och nutida data som finns tillgängliga. I vilken utsträckning abduktiva förklaringsprinciper kommer att kunna ge god vägledning med avseende på universums ursprung, begynnelsestillstånd och synbara finjustering återstår att se. Men exemplet med Hoyles abduktiva förutsägelse av den okända energinivån hos kol-12 antyder att det kan vara en fruktbar metod.

Så vad vet vi egentligen?

Även om vi gjort stora framsteg i den fysikaliska och observationella kosmologin under det senaste århundradet, förblir universums ursprung och begynnelsestillstånd ett mysterium. Det finns många tänkbara alternativ: universum kan ha uppstått ur intet, ur

10 Se K. Chamcham *et al* (red.), *The Philosophy of Cosmology* (Cambridge University Press, 2017); www.philosophy-of-cosmology.ox.ac.uk

ett kvantmekaniskt vakuum, eller vara evigt och kanske cykliskt med upprepade Big Bang-episoder. Vi kan dock ringa in mysteriets karaktär, och har upptäckt att uppkomsten av universums komplexa struktur och liv tycks förutsätta en synbar finjustering av naturkonstanter och begynnelsestillstånd. En möjlig förklaring kan vara ett multiversum i kombination med den svaga antropiska principen. Vad vi kan säga med rimlig säkerhet är att det åtminstone – utifrån den tillräckliga grundens lag – tycks finnas något att på allvar försöka förklara. Exakt hur det ska gå till, och hur vi ska pröva våra hypoteser, är än så länge oklart. Vi rör oss in på metafysikens gränsmarker, och det finns de som ifrågasätter om de här frågorna ens är vetenskap.

Hur observation och teori kommer att utvecklas är dock inte alltid lätt att förutse. Fysikern Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) återberättar i en Gifford-föreläsning (publ. i tryckt form 1964) att den berömde fysikaliska kemisten Walther Nernst (1864–1941) vid ett kollokvium 1938 argt avfärdade tanken att universum skulle kunna ha en ålder som ovetenskaplig. Detta eftersom denna idé motsade något han såg som själva grunden för vetenskap: den aristoteliska idén om ett evigt universum. Idag är det istället Nernsts ståndpunkt som vi betraktar som ovetenskaplig, med vetenskap om det vi upptäckt sedan dess. Och mycket återstår ännu att upptäcka om universums begynnelse och barndom, såväl filosofiskt, teoretiskt och observationellt. ♦

För vidare läsning

Ulf Danielsson, *Den bästa av världar*
(Albert Bonniers förlag, 2012)

Geraint Lewis och Luke Barnes, *A Fortunate Universe*
(Cambridge University Press, 2016)

Roger Penrose, *Cycles of time* (Bodley Head, 2010)

Joanna Rose, *Kosmiskt pussel* (Volante, 2017)

Max Tegmark, *Vårt matematiska universum* (Volante, 2016)



Artikelns vinjettbild i sin helhet.