

# Inflation: Én oprindelse for alt?

Martin S. Sloth, CP3-Origins, Center for Cosmology and Particle Physics, Syddansk Universitet

Spørgsmålet om oprindelsen af vores univers og dermed det ultimative spørgsmål om altings oprindelse er et af de mest fundamentale videnskabelige spørgsmål, man kan stille. Hvis det lykkes at finde en foreningsteori for alting, så må denne også rumme et svar på spørgsmålet om altings oprindelse.

Da Stephen Hawking var en ung ph.d.-student på treogtyve år, fandt han ud af, at det følger som en konsekvens af klassisk generel relativitetsteori, at universet lader til at være startet i en singularitet i rumtiden, lidt ligesom den type singularitet man finder inde i et sort hul, hvor rum og tid ophører med at eksistere i normal klassisk forstand.

Hawkings opdagelse understreger det grundlæggende problem i standard Big Bang-modellen. Inden for klassisk generel relativitetsteori er det vanskeligt at forstå universets begyndelsesbetingelser tæt på Big Bang. For at forstå universets oprindelse, så tænker vi normalt, at vi må have en teori for kvantegravitation, som tager over nær ved Big Bang, når energitætheden af universet er tilstrækkelig stor, og som erstatter klassisk generel relativitetsteori i disse ekstreme situationer, sådan at Hawkings singularitetsargument ikke længere gælder. Vi har endnu ikke en endelig teori for kvantegravitation og derfor heller ikke en entydig forståelse af universets oprindelse endnu.

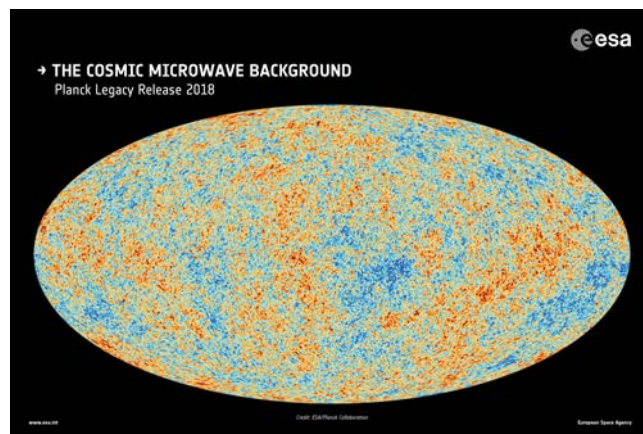
Det ville måske være ok, hvis vores univers ikke afhæng særlig meget af begyndelsesbetingelserne nær ved Big Bang, og at meget generelle antagelser om universet lige efter Big Bang ville være nok til at kunne forklare oprindelsen af vores univers. Hvis det var tilfældet, så kunne vi lave forudsigelser for egenskaberne af vores univers uden at kende detaljerne omkring teorien for kvantegravitation. Men dette er ikke tilfældet. Uden en teori for begyndelsen, så er standard Big Bang-teorien ikke komplet og rummer kun en mere begrænset videnskabelig forudsigelseskraft.

Alligevel er vi overbeviste om, at Big Bang-teorien er korrekt, og det er paradoksalt, at det er – som vi vil se nedenfor – det samme fysiske fænomen, som både rummer den mest overbevisende evidens for Big Bang-teorien, og samtidigt leder til standard Big Bang-teoriens andet store problem i tillæg til singularitetsproblemet.

## Evidens for Big Bang-teorien

Den første observationelle evidens for Big Bang-teorien kom, da Edwin Hubble i 1929 opdagede, at universet udvider sig. Hvis universet udvider sig i dag, så må det logisk nok have været i en tættere og varmere tilstand i fortiden. Men Hubble målte ekspansionshastigheden til at være flere gange højere, end vi måler den til nu, hvilket betød, at universet ifølge Hubbles observationer ville være yngre end Jordens alder på 4,5 milliarder år. Da man allerede på det tidspunkt havde geologiske

metoder til at fastslå Jordens alder, ledte det Fred Hoyle og andre til at foreslå en alternativ teori til Big Bang-teorien, steady-state-modellen. I denne model udvider universet sig samtidigt med, at der kontinuert skabes nyt stof, sådan at energitætheden holdes konstant, og universet altid har udvidet sig på samme måde med samme temperatur og er altså ikke startet i en Big Bang-tilstand.



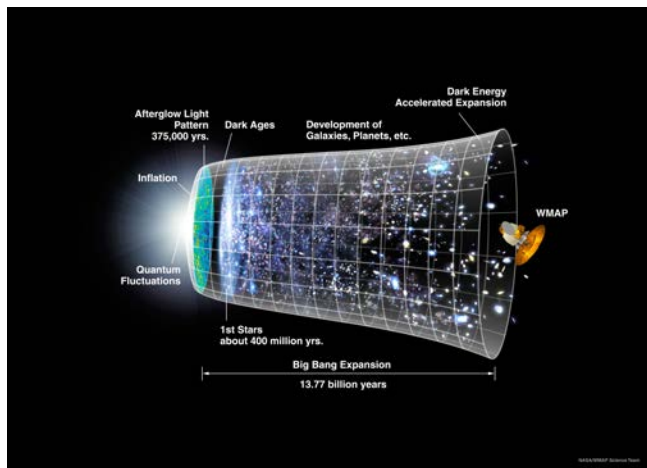
**Figur 1.** Anisotropier i den kosmiske mikrobølgestråling observeret med ESAs Planck-mission, og som viser et øjeblikbillede af det ældste lys i universet, da det kun var 380.000 år gammelt. Anisotropierne er små temperatursvingninger, der svarer til regioner med lidt forskellige densiteter, der repræsenterer de fremtidige strukturer, nemlig dagens stjerner og galakser.

Mens observationerne af universets udvidelse langsomt blev bedre med bedre teleskoper og bedre forståelse af de stjerner, som man brugte til at bestemme afstande med, og den observerede ekspansionshastighed langsomt blev konsistent med Jordens alder, så forudsagde George Gamow og Ralph Alpher i 1948 den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling som en teoretisk konsekvens af Big Bang-teorien.

Hvis man tænker sig, at man spoler tiden baglæns tilbage mod begyndelsen, så vil universet trække sig sammen, indtil det bliver et meget varmt og sammenpresset plasma, hvor temperaturen er højere end bindingsenergien af hydrogenatomet. I dette plasma vil elektroner ikke være bundet til protonerne i elektrisk neutrale hydrogenatomer, og fotoner vil hele tiden vekselvirke med de elektrisk ladede partikler på vej gennem universet, som på dette tidspunkt derfor ikke er transparent for fotoner (lyspartikler). Senere, ca. 380.000 år efter Big Bang for 13,8 milliarder år siden, blev universet transparent for fotoner, fordi den kosmiske ekspansion fik temperaturen til at falde, sådan at

neutrale hydrogenatomer blev dannet, og fotonerne blev ikke længere stoppet af elektrisk ladede partikler på deres vej gennem universet. Man kan sige, at universet for 13,8 milliarder år siden efterlod et snapshot af sig selv i form af fotoner, der har rejst uhindret igennem universet fra da af og frem til i dag, mens de langsomt blev koldere pga. universets ekspansion. Disse fotoner, som altså er et levn fra Big Bang, udgør den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, som vi kan observere i dag.

Selvom George Gamow og Ralph Alpher i 1948 var de første til at forudsige den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling teoretisk, så blev idéen glemt igen, indtil Robert Dicke, James Peebles, P.G. Roll og David Wilkinson og også Yakov Zel'dovich og Fred Hoyle sammen med R. J. Taylor uafhængigt genopdagede teorien i starten af 60'erne. Dette var kort før, at de to ingeniører Arno Penzias og Robert Wilson i 1965 målte støj på deres antenne, som de efter elimination af andre støjkilder – såsom fuglelort på deres antenne – måtte konkludere kun kunne komme fra kosmos. Det blev hurtigt klart for Arno Penzias og Robert Wilson, at de havde observeret den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling ved et tilfælde – ekkoet fra Big Bang, som det også sommetider populært kaldes. De fik Nobelprisen for opdagelsen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling i 1978. I 2006 gik Nobelprisen i fysik desuden til COBE-eksperimentet, der for første gang målte det præcise spektrum af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, og i 1992 også opdagede små temperaturfluktuationer i spektret. James Peebles fik Nobelprisen i 2019 for sine bidrag.



**Figur 2.** En repræsentation af universets udvikling gennem 13,8 milliarder år. Helt til venstre skildres det tidligste øjeblik, vi nu kan undersøge, da en periode med inflation frembragte en ekstremt hurtig vækst i universet. (Størrelsen er indikeret med det lodrette gitter). I de næste flere milliarder år bremsede udvidelsen af universet gradvist. For nylig er udvidelsen begyndt at accelerere igen, domineret af mørk energi. Eftergløden fra Big Bang, der blev observeret af WMAP, blev udsendt ca. 380.000 år efter inflationen og har krydset universet stort set uhindret siden da.

Det var dermed opdagelsen af den kosmiske mikrobølgestråling i 1965, som én gang for alle lagde Fred Hoyles konkurrerende teori i graven og etablerede Big Bang-teorien som standardteorien for vores univers. Målinger af universets ekspansionsrate var blevet mere

præcise og var nu konsistente med, at universet er meget ældre end Jorden, og fjernede noget af motivationen for Hoyles konkurrerende teori. Men den kosmiske mikrobølgestråling er en unik forudsigelse i Big Bang-modellen og en “smoking-gun” for Big Bang-teorien. Opdagelsen af mikrobølgestrålingen kunne slet ikke forklares uden, at universet har været i en varm og tæt tilstand, hvor universet var ugennemtrængeligt for fotoner og kunne beskrives som et sortlegeme og dermed forklare, hvorfor vi ser kosmisk stråling i dag med et meget præcist sortlegemespektrum.

Opdagelsen af den kosmiske mikrobølgestråling rummer altså det endelige bevis for Big Bang-teorien, men som antydnet ovenfor, så rummer mere præcise målinger af den kosmiske mikrobølgestråling også en af standard Big Bang-teoriens største udfordringer. Et sortlegemespektrum er karakteriseret ved en temperatur. Når vi måler denne temperatur af den kosmiske stråling, som kommer fra forskellige retninger på himlen, så måler vi den samme temperatur til meget høj præcision (2,725 Kelvin) i alle retninger. Først ude på fjerde decimal ser vi variationer afhængigt af retningen, vi kigger.

### Problemer for standard Big Bang-modellen

Der er et fundamentalt problem med denne observation i standard Big Bang-modellen. Siden universet først blev gennemtrængeligt for lys, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt, så følger det, at den kosmiske baggrundsstråling også er både den ældste og længst-væk-fra-kommende elektromagnetiske stråling, som vi rent faktisk kan observere. På det tidspunkt, kun 380.000 år efter Big Bang, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt, var universet meget mindre, da lys kun havde haft 380.000 år at rejse i. Størrelsen af vores observerbare univers er nemlig defineret ved, hvor langt lys har kunnet rejse siden Big Bang. Et væsen, der havde levet på det tidspunkt (hvis det havde kunnet lade sig gøre — universet var 3000 Kelvin på det tidspunkt), ville altså have kunnet se meget kortere og have observeret et meget mindre univers. Dette væsen ville på det tidspunkt have set et univers, som var 1/1.000.000 del af vores nuværende synlige univers. Vores nuværende synlige univers var altså 1.000.000 små uafhængige universer på det tidspunkt, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt. Men hvis det er sandt, at ikke engang lys kunne have nået på tværs af de her 1.000.000 uafhængige universer, så er der ingenting, der ville have kunnet, og vi ville ikke forvente, at de har noget som helst tilfælles. Med andre ord, så ville vi forvente, at de havde vidt forskellige temperaturer, og når vi ser tilbage på dem i dag, hvor det observerbare univers er blevet større, og vi kan observere den kosmiske mikrobølgestråling fra dem alle, afhængigt af hvilken retning vi kigger, så ville vi forvente at observere vidt forskellige temperaturer afhængigt af retningen, vi kigger i. Men det gør vi ikke. Temperaturen er den samme i alle retninger!

Det er, som hvis vi var ankommet til en fest med 1.000.000 mennesker meget præcist klædt i nøjagtigt det samme tøj helt ind til underbukserne. Vi ville anta-

ge, at de havde modtaget en invitation inden festen med en dresscode eller på anden vis havde kommunikeret med hinanden. Hvis de påstod, at det var et tilfælde, at de mødte op alle 1.000.000 iklædt det samme tøj med så stor præcision, så ville vi ikke tro dem. Vi ville tænke, at de skjuler information for os om den fælles dresscode. På samme måde tænker vi, at det er umuligt, at alle 1.000.000 områder af universet, som vi i dag måler til at have meget nøjagtigt den samme temperatur, ikke har kommunikeret sammen eller modtaget en fælles besked på det tidspunkt 380.000 år efter Big Bang, da strålingen blev til. Paradokset i standard Big Bang-modellen er, at det jo tilsyneladende vil kræve kommunikation hurtigere end lysets hastighed at forklare, hvorfor temperaturen er ens i alle retninger!

## Kosmisk inflation

Alan Guth var i 1981 den første til at komme med en løsning på dette paradoks. Han forstod som den første, at hvis universet har udvidet sig med en accelereret ekspansion i starten, så vil information have kunnet sprede sig hurtigere i universet og områder, som tilsyneladende ikke burde kunne have kendt til hinandens eksistens, har været i kausal kontakt med hinanden. Sådant en periode med accelereret ekspansion i det tidlige univers, kaldet kosmisk inflation, er med andre ord den invitation, hvor dresscoden stod skrevet på, som blev sendt ud inden festen.

Kosmisk inflation er en succesfuld teori for det tidlige univers. Ikke alene løser teorien kausalitetsproblemet i standard Big Bang-teorien, men den forudsiger også et spektrum af temperatur-variationer i den kosmiske mikrobølgestråling, som med rigtig høj præcision passer med vores efterfølgende eksperimentelle observationer. Kosmisk inflation er derfor vores foretrukne teori for, hvordan universet startede.

Inflationsteorien har også en anden attraktiv egenskab. Som Hawking påpegede, så kan vi ikke forstå, hvordan universet er startet uden først at forstå kvantegravitation. Men forudsigelserne i inflationsteorien er helt uafhængige af, hvordan inflation startede, eller hvad der kom før. Det betyder, at vi kan forstå egenskaberne af vores univers uden at løse problemet med kvantegravitation først. Vi behøver blot at antage, at nogle meget generelle betingelser var tilstede for, at inflationsperioden kunne starte i udgangspunkt. På denne måde skjuler inflationsteorien det andet af de grundlæggende problemer i standard Big Bang-modellen, nemlig hvordan universet startede nær ved Big Bang-singulariteten. Inflationsteorien giver ikke en komplet forståelse af universets oprindelse, men den tilbyder en komplet forståelse af universets egenskaber, sådan som vi observerer dem.

I den simpleste version af inflationsteorien er alt stof og struktur i universet skabt af et enkelt felt, og ved at forstå kvantefluktuationer af dette felt under inflationsperioden, kan vi forstå oprindelsen af alt stof og struktur i universet. I denne forstand kan inflations-teorien ses som endnu en foreningsteori, da den giver en forenet forklaring for altings oprindelse. Men dybest set er den mere et udslag af almindelig reduktionistisk

videnskabelig tankegang. Vi kan sagtens forestille os, at inflation involverede flere felter, men så længe den simpleste model er nok til at forklare data, så ser vi ingen grund til at antage en mere kompliceret model.

Kosmologer tester denne simpleste inflations-teori ved at se efter ikke-Gaussiske temperaturvariationer i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, isocurvature-variationer (variationer ude af sync med selve inflationsfeltet), og andre effekter som ikke kan forklares med blot ét inflationsfelt. På denne måde kan vi teste inflationshypotesen og også få bedre indsigt i detaljerne af den fysik, som gjaldt lige efter Big Bang, da universet havde en energitæthed så høj, som vi nok aldrig nogensinde kommer til at kunne studere i en menneskeskabt accelerator.

## Forudsigelser fra inflationsteorien

Den vigtigste forudsigelse af den simpleste inflations-teori er, at tyngdebølger også skulle være blevet skabt under inflationsperioden, og de skulle have sat et aftryk i polariseringen af den kosmiske mikrobølgestråling. Vi har endnu ikke observeret dette aftryk, men ser vi det, så får vi til gengæld adgang til meget præcis information om inflationsperioden, og vi vil for eksempel kunne bestemme den præcise energitæthed i universet under inflationsperioden. Dette ville være en "smoking gun" for inflationsteorien, og nok også overbevise Nobelpriskomiteen om inflationsteoriens rigtighed. Men indtil da må vi leve med, at der også er alternativer til inflationsteorien i spil.

Ud over muligheden for at flere felter end inflationsfeltet er nødvendige for at forstå dynamikken lige efter Big Bang, så er det også muligt, at hele inflationsidéen er forkert. En alternativ mulighed er den såkaldte præ-Big Bang-teori, hvor universet først trak sig sammen for så at begynde at udvide sig igen. I denne teori er Big Bang øjeblikket, hvor universet går fra at trække sig sammen til at udvide sig igen. Frøene til alt stof og struktur er sået i fasen før Big Bang ved hjælp af det, som vi kalder en curvaton-mekanisme. Curvatonen er det felt, der erstatter inflationen som årsagen til alt stof og struktur i disse teorier (curvatonen kan også have denne funktion i inflations-teorier med flere felter, hvor inflationen ikke gør hele jobbet alene). Filosofien i denne type teorier for universets skabelse er derfor også helt modsat filosofien bag inflationsteorien. En teori for kvantegravitation er nødvendig for at forklare hvordan universet går fra at trække sig sammen til at udvide sig igen, og teorien er ikke komplet uden en forståelse af dette intermezzo. Mens vi husker, at i inflationsteorien blev det spekulative skabelsesøjeblik i kvantegravitationens domæne skubbet til et fjernt irrelevant øjeblik før inflationsperioden, så sker dette kvantegravitationsmirakel midt i det hele i præ-Big Bang-scenariet. Derfor er forudsigelserne i præ-Big Bang-modellen afhængige af, at den endelige teori for kvantegravitation skal fortælle os, hvordan dette "big-bounce" finder sted. Siden teorien for kvantegravitation ikke er endeligt kendt, så giver det en stor usikkerhed i denne type af forklaringer, som også har gjort dem mindre populære blandt forskere end inflationsteorien,

som er mere under kontrol med de metoder, som vi kender.

Men naturen må antages at være ligeglad med, hvor gode vi er til at forstå kvantegravitation, og i sidste ende er det observationer, der vil fælde dommen over hvilken teori for universets oprindelse, som er rigtig. I curvaton-modellen er der ikke noget aftryk af gravitationelle bølger i polariseringen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, men til gengæld er der en unik signatur af ikke-Gaussiske fluktuationer i mikrobølgebaggrundsstrålingen, som kan bruges til at teste, om den ene eller den anden teori er korrekt.

## Litteratur

- [1] A. A. Penzias og R. W. Wilson (1965) "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s". *Astrophysical Journal*, bind **142**, side 419–421.
- [2] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll og D. T. Wilkinson (1965) "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophysical Journal*, bind **142**, side 414–419.
- [3] S. W. Hawking (1966) "Properties of Expanding Universes", PhD thesis, University of Cambridge.

- [4] A. H. Guth (1981) "The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", *Phys.Rev.*, bind **D23**, side 347–356.
- [5] M. Gasperini og G. Veneziano (1993) "Pre-big bang in string cosmology", *Astropart. Phys.*, bind **1**, side 317.
- [6] K. Enqvist og M. S. Sloth (2002) "Adiabatic CMB perturbations in pre-big bang string cosmology" *Nucl. Phys. B*, bind **626**, side 395.



Martin S. Sloth er professor ved CP3-Origins, Center for Cosmology and Particle Physics, på Syddansk Universitet.

# Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
<b>Aug 2020</b>				
31/8	18.15	Fra Gagarin til Mogensen – bemandede rummissioner og deres bidrag til videnskaben	Flemming Hansen	AS (Kbh)
<b>Sep 2020</b>				
7/9	19.15	Fra Gagarin til Mogensen – bemandede rummissioner og deres bidrag til videnskaben	Flemming Hansen	AS (Aarh)
7/9	19.30	Ørsteds bidrag til det danske sprog	Frans Gregersen	SNU
7/9	18.15	Det kolde og støvede univers – infrarøde øjne i rummet	Jes Kristian Jørgensen	AS (Kbh)
14/9	19.15	Det kolde og støvede univers – infrarøde øjne i rummet	Jes Kristian Jørgensen	AS (Aarh)
14/9	18.15	Vores fremtid i rummet – rumforskning og rumfart i de kommende årtier	Michael Linden-Vørnle	AS (Kbh)
21/9	19.15	Vores fremtid i rummet – rumforskning og rumfart i de kommende årtier	Michael Linden-Vørnle	AS (Aarh)
21/9	19.30	Hvad er magnetisme, og hvad er elektromagnetisme	Steen H. Hansen	SNU
21/9	18.15	Mørkt stof og mørk energi i fokus – Europas rummission Euclid	Michael I. Andersen	AS (Kbh)
28/9	19.15	Mørkt stof og mørk energi i fokus – Europas rummission Euclid	Michael I. Andersen	AS (Aarh)
28/9	18.15	Syngende stjerner og exoplaneter – rumteleskoperne Kepler og TESS	Rasmus Handberg	AS (Kbh)
<b>Okt 2020</b>				
15/10	19.15	Syngende stjerner og exoplaneter – rumteleskoperne Kepler og TESS	Rasmus Handberg	AS (Aarh)
19/10	19.30	Foredrag ved guldmedaljemodtager i fysik (tentativt)	NN	SNU
<b>Nov 2020</b>				
2/11	19.30	Om magnetometer	Chris Finlay	SNU
23/11	19.30	Ørsteds erkendelsesteori og metafysiske erindringer	Anja Skaar Jacobsen	SNU
<b>Dec 2020</b>				
14/12	19.30	Ørsted, Tesla og Faraday	Hans Buhl	SNU

**AS (Kbh):** Astronomisk Selskab (Kbh), CSS, Gammeltoftsgade 15, 1353 København K, lokale 35.-1.05 (astronomisk.dk).

**AS (Aarh):** Astronomisk Selskab (Aarh), Auditorium E, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, 8000 Aarhus C.

**SNU:** Aud. 1, H. C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlæren.dk, facebook.com/SNU1824).