

Inhomogen kosmologi: universet tænkt forfra

Asta Heinesen, Niels Bohr instituttet og Niels Bohr International Academy, Københavns Universitet, og Sofie Marie Koksang, CP3-Origins, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet.

Moderne kosmologi er blevet erklæret som værende i krise. Uoverensstemmelserne mellem astronomiske observationer og kosmologiens standardmodel hober sig op, og kosmologer kan ikke finde konsensus om en løsning. I denne artikel introduceres først kosmologiens standardmodel og dens problemer. Derefter dykker vi ned i *inhomogen kosmologi* og spørgsmålet om, hvorvidt denne forskningsgren kan bringe kosmologien ud af dens krise ved at revurdere Einsteins over 100 år gamle antagelse om homogenitet af universets stof.

Moderne kosmologis begyndelse

Moderne kosmologi, læren om universet som helhed, er baseret på den førende teori for tyngdekraften, Albert Einsteins generelle relativitetsteori fra 1915. I denne teori er tiden ikke absolut, men er i en vis forstand bundet sammen med rummet, hvorfor vi i relativitetsteorien bruger det samlede begreb: rumtiden. Ifølge teorien er det, vi opfatter som en tyngdekraft, i virkeligheden et udtryk for at rumtiden krummer. Den tiltrækkende tyngdekraft som massive objekter har på mindre objekter skyldes i virkeligheden, at rumtiden krummer omkring objekter.

Vi kan opnå en fornuftig intuitiv forståelse af rumtidskrumningerne omkring legemer ved at forestille os dem som fordybninger i et lagen: hvis vi placerer andre små objekter på lagenet, vil de have en tendens til at falde ned i fordybningerne.

Rumtidens krumning beskriver vi via Einsteins ligning

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant, c er lysets hastighed, og $g_{\mu\nu}$ er den såkaldte rumtidsmetrik, der beskriver objekters baner og afstande mellem dem.

Højresiden angiver fordelingen af energi i rumtiden. Ifølge Einstein er energi (E) og masse (m) to sider af samme sag, $E = mc^2$, så "energien" på højresiden af ligningen ($T_{\mu\nu}$) kunne eksempelvis være masserne af de velkendte atomer i vores periodiske system. Venstresidens første led ($G_{\mu\nu}$) beskriver rumtidens krumning (altså tyngdekraften), imens der ikke er konsensus omkring betydningen af det andet led.

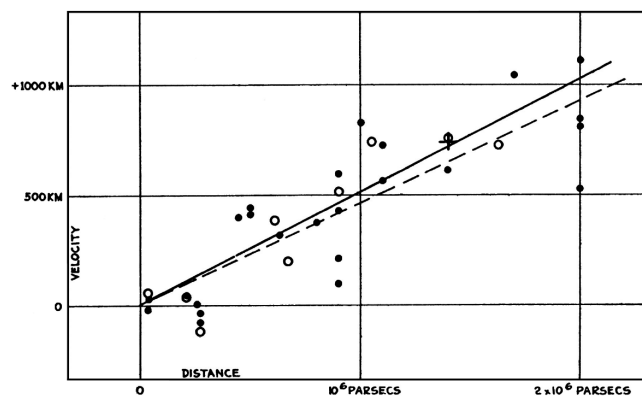
Symbolet Λ kaldes for den kosmologiske konstant. Den kosmologiske konstant blev indført af Einstein i 1917, da han som den første brugte ligningen til at beskrive hele universet. Første opgave for Einstein var at finde et passende udtryk til højresiden af sin ligning, det vil sige en beskrivelse af fordelingen af al energi i universet.

Einstein brugte til dette formål den simplest tænkelige model med en fuldstændigt ensartet fordeling af energi i universet. Den tilhørende venstreside viste sig at beskrive en rumtid, der ikke blot krummede, men som også var dynamisk: universet kan udvide sig og trække sig sammen. Men i 1917 var mange aspekter af universet endnu ukendt terræn for astronomerne. De

kendte fx ikke til galakser og de vidste heller ikke, at universet udvider sig.

Universets udvidelse blev først opdaget i 1920'erne og 1930'erne af astronomerne Georges Lemaître, Edwin Hubble og Vesto Slipher. Inden da troede astronomerne at universet var statisk, og Einstein indførte derfor den kosmologiske konstant i ligningen, fordi han fandt frem til at et sådant led kunne justeres, så det præcist forhindrede rumtiden i at være dynamisk.

Einstein var tilbageholdende med at acceptere at universet rent faktisk udvider sig, men da han endelig blev overbevist i 1931, smed han den kosmologiske konstant i skraldespanden [1]. Omkring årtusindskiftet genindførte kosmologer konstanten.



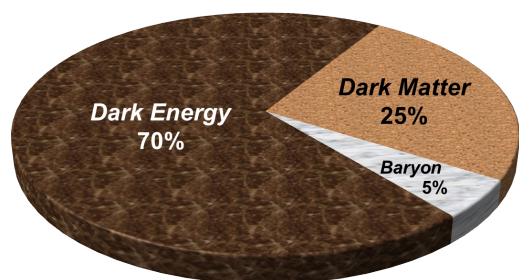
Figur 1. Hubble's oprindelige målinger fra 1929, der påviste universets udvidelse. Hastigheden er vist som en funktion af afstanden mellem os og de observerede galakser. Cirklerne og krydset repræsenterer gennemsnitlige målinger for grupper af galakser. © US National Academy of Sciences.

Kosmologiens standardmodel

Denne gang var formålet med den kosmologiske konstant ikke at opnå et statisk univers. Målet var i stedet at få Einsteins ligning til at stemme overens med en accelereret ekspansion af universet. Uden en kosmologisk konstant viser Einsteins ligning, at rumtiden enten vil have en decelereret ekspansion eller et accelereret kollaps, såfremt højresiden kun indeholder energi fra kendte elementarpartikler såsom elektroner, kvarker og fotoner. Men supernovaobservationer fra slutningen af 1990'erne indikerer at universet udvider sig *hurtigere og hurtigere*. Den nemmeste måde at få den observerede accelererede ekspansion til at passe med Einsteins ligning er via den kosmologiske konstant. Den

kosmologiske konstant fungerer ved at have en form for antityngdekrafteffekt således, at den kan modvirke påvirkningen, som det almindelige stof har på rumtiden. Einstein kunne således bruge den kosmologiske konstant til at lave et statisk univers, men ved at justere lidt på talværdien af konstanten kan den kosmologiske konstant i stedet generere accelereret ekspansion af universet. Et af de største spørgsmål i grundlæggende fysik er at finde ud af, hvad den kosmologiske konstant repræsenterer. Mange kosmologer betragter konstanten som en indikation af, at universet indeholder en mystisk substans med antityngdekrafteffekt. Substansen er blevet døbt "mørk energi" og nu gælder det om for kosmologer at finde ud af, hvad mørk energi egentlig er for en størrelse.

Ved at sammenligne astrofysiske observationer med forudsigelserne fra Einsteins ligning, er kosmologer kommet frem til at mørk energi udgør omkring 70% af universets indhold i dag. De resterende 30% består af substanser der opfører sig almindeligt i forhold til tyngdekraften/rumtidskrumning. Substanserne opdeles i almindeligt stof – de kendte elementarpartikler – som udgør 5% af universets indhold, samt endnu en ukendt substans "mørkt stof", der udgør 25%. De fleste fysikere har på nuværende tidspunkt en forventning om at mørkt stof består af en eller flere typer af ukendte partikler. Partiklerne menes at bevæge sig meget langsommere end lyset, hvilket fysikere beskriver ved at kalde dem "kolde". Dermed er 25% af universets indhold på formlen "koldt mørkt stof", på engelsk "Cold Dark Matter", CDM.



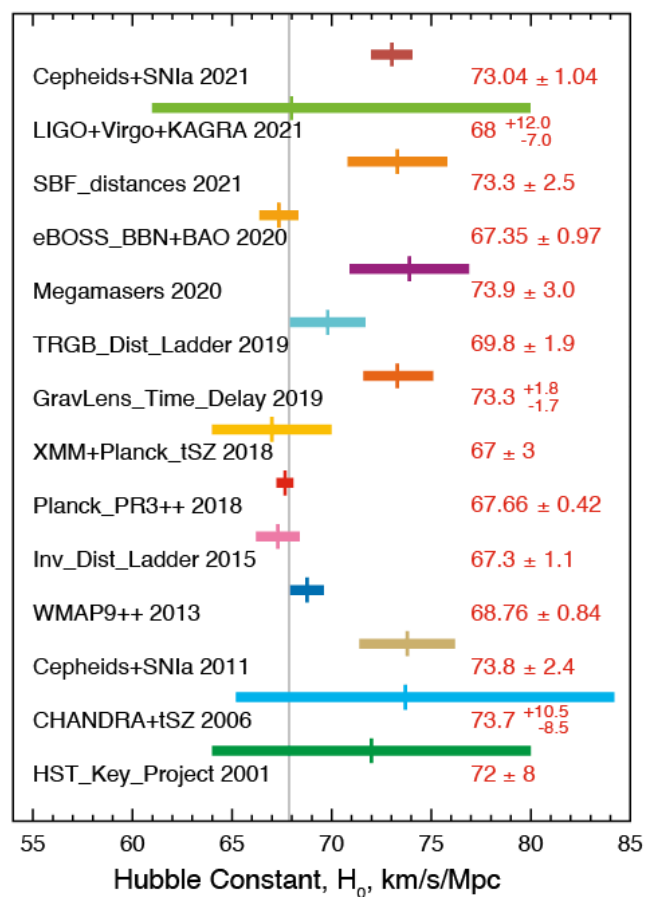
Figur 2. Fordelingen af forskellige typer af stof/energi i universet ifølge Λ CDM-modellen: mørk energi, mørkt stof og almindeligt stof ("Baryon").

Den førende kosmologiske model kaldes for kosmologiens standardmodel, og den nuværende af slagsen har fået betegnelsen Λ CDM-modellen, netop fordi den er karakteriseret ved at 95% af universets indhold ifølge denne model består af mørk energi (Λ) og koldt mørkt stof (CDM), det vil sige fuldstændigt ukendte substanser. Kosmologi har de seneste godt 20 år primært handlet om at lære mere om, hvad disse ukendte substanser er. Kosmologer har derfor også i nogen tid yndet at bemærke, at Λ CDM-modellen kun har to problemer: Λ og CDM. Men vittigheden er ikke længere sand. I dag har kosmologien nemlig fået et tredje problem, som er så alvorligt, at nogle kosmologer ligefrem har erklæret at vi har en kosmologisk krise.

Kosmologien i krise

I den første tid efter 1990'ernes supernovatriumf, der førte til indførelsen af mørk energi og dermed Λ CDM-modellen, var kosmologer godt tilfredse med deres

nye standardmodel. Modellen lod – i første omgang – til at passe forrygende godt med observationer. Men som tiden er gået, er observationerne blevet mere mangfoldige og præcise og i dag kan vi se, at Λ CDM-modellens forudsigelser faktisk ikke passer med det, vi observerer. Det mest kendte og simpleste observationelle problem kaldes Hubbletensionen og går ud på, at forskellige observationer af Hubblekonstanten giver forskellige resultater. Hubblekonstanten angiver, hvor hurtigt universet udvider sig *lige nu* og har dermed selvsagt kun én værdi. Men når vi bruger forskellige typer af observationer til at måle Hubblekonstanten for netop vores univers, får vi forskellige værdier. Uoverensstemmelsen mellem de forskellige målinger har nu en ekstremt høj statistisk signifikans på 99,9999% [2].



Figur 3. Diagrammet viser en række målinger af Hubblekonstanten baseret på forskellige astronomiske objekter. Målingerne er inkl. usikkerheder (vandrette farvede linjer). En række af de vandrette linjer overlapper *ikke*, hvilket betyder at de ikke stemmer overens. Grafik: NASA / LAMBDA Archive Team.

Men Hubble-tensionen står som sagt ikke alene. For eksempel indikerer observationer med endnu større statistisk signifikans end Hubbletensionen, at universet slet ikke er isotropt, det vil sige, at observationer viser, at universet har forskellige egenskaber i forskellige retninger [3]. Når vi fortolker data med Λ CDM-modellen er der desuden en række interne problemer med målingerne af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, lys der blev udsendt da universet kun var 380.000 år gammelt, og som vi har målt på siden 1960'erne. Disse og flere

observationelle udfordringer for Λ CDM modellen er sammenfattet i [4].

Inden for de seneste få år er kosmologers forskning derfor blevet fokuseret på at finde alternative kosmologiske modeller, der passer bedre med observationerne end Λ CDM-modellen. Nogle forsøger sig med blot at lave mindre ændringer af Λ CDM-modellen såsom at indføre nye typer af mørk energi eller nye former for vekselvirkninger mellem mørk energi og mørkt stof [5]. Inden for forskningsgrenen *inhomogen kosmologi* stiller vi i stedet spørgsmålstejn ved den vedvarende brug af de simplificerende antagelser, Einstein introducerede for over 100 år siden.

Strukturernes betydning

En mulig forklaring på Λ CDM-modellens observationelle problemer er, at den hviler på den forenklet beskrivelse af universets strukturer som værende udvaskede, og som Einstein introducerede i 1917. Det udgangspunkt er et muligt problem, fordi vores univers indeholder et væld af strukturer – fra mikroskopiske elementarpartikler til stjerner, galakser og enorme galaksehobe – som påvirker både den overordnede dynamik af universet samt lysets bevægelse igennem universet og dermed astrofysiske observationer.

Einstein var bevidst om dette mulige problem, men man kendte endnu ikke til galakser og galaksehobe i 1917, og det var nødvendigt med simple antagelser for at komme frem til resultater med de sparsomme målinger, der var tilgængelige på det tidspunkt.

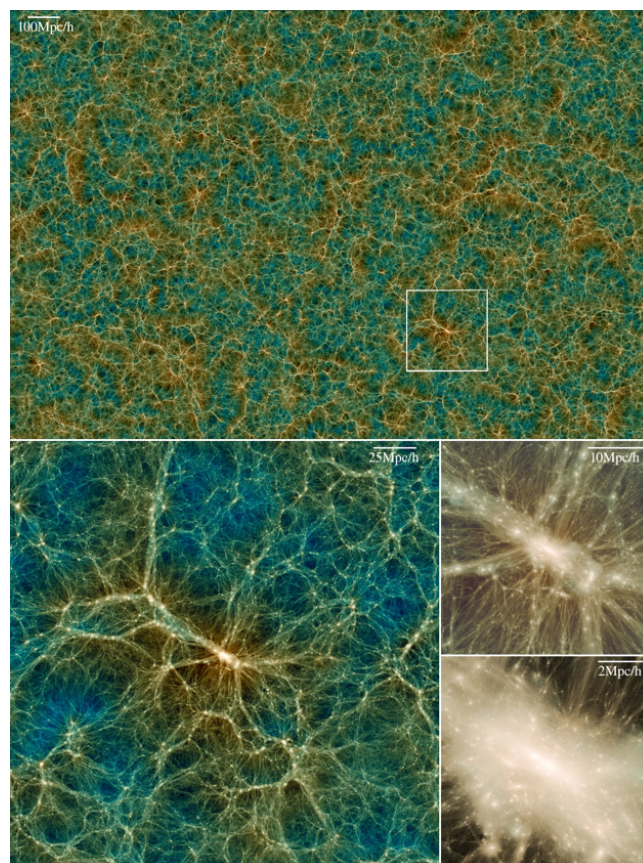
Den dynamik, som Einsteins ligning beskriver, når højresiden indeholder en ensartet substans gælder i virkeligheden kun for et univers, der er homogent og isotropt på *alle* skalaer, det vil sige et univers, som ikke indeholder nogen former for strukturer, og som dermed ikke kan repræsentere vores univers. Idet Einsteins ligning er et sæt af ikke-lineære, koblede partielle differentilligninger, er der forskel på dynamikken af et univers, der er homogent og isotropt på alle skalaer, og et der kun er det på meget store skalaer – selv hvis vi zoomer ud og ser på universet på skalaer, der er større end de største kendte strukturer.

Forskellen på de to typer af dynamik kaldes kosmisk tilbagevirkning. Vi ved ikke, hvor stor betydning kosmisk tilbagevirkning har i vores univers, men vi kan se, at den i visse teoretiske modeller kan generere accelereret ekspansion helt uden mørk energi. Der er derfor rig mulighed for at en kvantificering af den kosmiske tilbagevirkning kan afhjælpe visse af Λ CDM-modellens problemer.

Samtidig påvirker inhomogeniteterne såsom galaksehobe direkte lyset på dets vej fra stjernerne til vores teleskoper. Et område med høj densitet vil for eksempel udover at lave en stor lokal "fordybning" i rumtiden også udvide sig langsommere end omkringliggende tomme områder. Begge effekter påvirker lyset, når det bevæger sig imod vores teleskoper. Fænomenet er velkendt og forsøges medtaget indenfor standardmodellen ved at introducere små fluktuationer i den ellers homogene rumtidsbeskrivelse af Λ CDM-modellen. Men standardmodellen er kun approksimativ, og det er uklart, om

modellen er præcis nok til at beskrive den høje kvalitet af kosmologisk data, som vi har i dag.

Idéen om at inhomogeniteter kan forklare nogle eller alle de observationelle problemer, som Λ CDM-modellen står overfor, er nærmest radikalt konservativ i forhold til de mere gængse løsningsforslag, der involverer nye upåviselige partikler eller modifikationer af relativitetsteorien. Samtidig er det en idé, som er overordentligt svær at teste. Det kræver nemlig, at vi starter forfra med vores beskrivelse af universet og – ikke mindst – med at etablere en ramme til at fortolke observationer i et inhomogent univers.



Figur 4. Data fra computersimuleringen Uchuu (<https://skiesanduniverses.org/>). Øverste halvdel af figuren viser et udsnit af simuleringen af universet, hvor volumet er så stort, at strukturerne fremstår udvaskede. Et kvadratisk område er markeret. Der zoomes ind på området i billedet nederst til venstre, hvor det ses, at der er en stor struktur, som der zoomes ind på yderligere i de to figurer nederst til højre.

Observationernes afgørelse

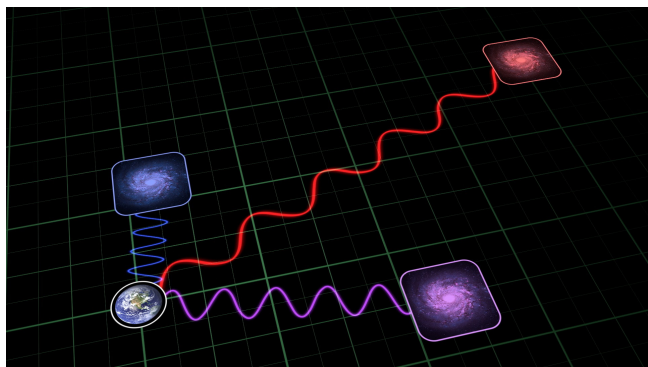
En af de helt store opgaver indenfor inhomogen kosmologi er dermed at udvikle et teoretisk udgangspunkt for at koble kosmisk tilbagevirkning til observationer samt at udlede observationelle relationer, der gælder for inhomogene universmodeller generelt.

De første skridt i den retning er allerede nået. Vi har blandt andet fundet flere observationelle signaler, der kan bruges til at kvantificere den kosmiske tilbagevirkning i vores univers. Metoden er baseret på den såkaldte *drivning* af lysets *rødforskydning*.

Når lys bevæger sig igennem en ekspanderende rumtid på sin vej mod vores teleskoper, vil dets bølgelængde blive udstrakt. Denne effekt kaldes rødforskydningen af

lyset. Navnet kommer fra at rødt lys har den længste bølgelængde af det synlige lys, så når bølgelængden af synligt lys udstrækkes, bliver lyset "mere rødt". Rødforskydning af lys er en af de simpleste og vigtigste astronomiske målinger, vi kan lave.

Men rødforskydningen *driver*, det vil sige, at den ændrer sig med tiden. Hvis vi ser på lys udsendt fra en stjerne fra en fjern galakse, vil rødforskydningen af lyset langsomt ændres. Ændringen afhænger af den præcise krumning og ekspansion/kollaps af rummet langs lysstrålens vej mellem stjerne og teleskop. Drivningen af rødforskydningen viser sig at være en vigtig brik, når det kommer til observationelt at kvantificere effekten af astronomiske strukturer. Inden for de seneste år har vi vist, at rødforskydningens drivning kan bruges til at afsløre størrelsen af den kosmiske tilbagevirkning, og vi er endda i stand til at beskrive denne drivning i et vilkårligt inhomogent univers [6, 7].



Figur 4. Tre galakser i forskellig afstand til jorden udsender lys som rødforskydes forskelligt. Som tiden går vil rødforskydningen af lyset fra hver af galakserne ændres en anelse: Rødforskydningen *driver*. Grafik: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (Caltech-IPAC).

Desværre er drivningen af rødforskydningen en enormt lille effekt, og vi kan derfor ikke måle effekten i vores astronomiske data endnu. Forventningen er dog at nyere teleskoper såsom Square Kilometer Arrayobservatoriet [8] vil kunne give os gode målinger af drivningen af rødforskydningen indenfor omkring 50 år. Da den amerikanske astronom Allan Sandage i 1962 som den første diskuterede drivningen af rødforskydningen [9] (men kun for homogene kosmologiske modeller), konkluderede han, at det med daværende teknologi ville kræve ti millioner års observationstid for at kunne detektere drivningen. Set i det lys, er 50 år måske ikke så ringe endda. Men 50 år er nu alligevel længe, hvis vi blot skal sidde på hænderne og vente. Kosmologer fortsætter derfor med at udvikle teknikker til at fortolke observationer i vores inhomogene univers, i håb om med lidt kortere tidshorisont at kunne kvantificere effekten af strukturerne i vores univers og deres indflydelse på den kosmologiske krise.

Litteratur

- [1] H. Nussbaumer (2014) "Einstein's conversion from his static to an expanding universe", *Eur.Phys.J. H*, bind **39**, side 37–62, arXiv:1311.2763v3.

- [2] A.G. Riess m.fl. (2022) "A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km s⁻¹ Mpc⁻¹ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team" *Astrophys.J.Lett.*, bind **934**, side L7, arXiv:2112.04510.
- [3] L. Dam, G.F. Lewis og B.J. Brewer (2023) "Testing the cosmological principle with CatWISE quasars: a bayesian analysis of the number-count dipole", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **525**, side 231–245, arXiv:2212.07733v2.
- [4] L. Perivolaropoulos og F. Skara (2022) "Challenges for Λ CDM: An update", *New Astron.Rev.*, bind **95**, side 101659, arXiv:2105.05208.
- [5] E. Abdalla m.fl. (2022) "Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies," *JHEAp*, bind **34**, side 49–211, arXiv:2203.06142.
- [6] A. Heinesen (2021) "Multipole decomposition of redshift drift – model independent mapping of the expansion history of the Universe", *Phys.Rev. D*, bind **103**, side 023537, arXiv:2011.10048v1.
- [7] S. M. Kocsbang (2021) "Searching for signals of inhomogeneity using multiple probes of the cosmic expansion rate $H(z)$ ", *Phys.Rev.Lett.*, bind **126**, side 231101, arXiv:2105.11880v1.
- [8] <https://www.skao.int/>
- [9] A. Sandage (1962) "The Change of Redshift and Apparent Luminosity of Galaxies due to the Deceleration of Selected Expanding Universes," *apj*, bind **136**, side 319, doi:10.1086/147385.



Asta Heinesen er Carlsberg Fellow på Niels Bohr instituttet og Niels Bohr International Academy på Københavns Universitet. Hun forsker i inhomogen kosmologi.



Sofie Marie Kocsbang er adjunkt og Villum Young Investigator på forskningscentret CP3-Origins på institut for fysik, kemi og farmaci på Syddansk Universitet. Hun forsker også i inhomogen kosmologi.