

Når man kigger langt ud i universet, er det tydeligt, at det synlige stof ikke er jævnt fordelt, men samlet i markante klumper i form af galakser.

Foto: Hubble Ultra Deep Field 2014: credit: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (ST-ScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI)

# NY KOSMOLOGISK MODEL skal medregne universets store strukturer

**Om forfatteren**  
Af Henrik Bendix,  
videnskabsjournalist.  
bendix@vidmere.dk



**DANMARKS FRIE  
FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH  
FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

**Universet er fyldt med strukturer af stof. Stjerner er samlet i galakser, og hobe af galakser ligger som perler på kosmiske tråde. Alligevel ignoreres strukturerne i den kosmologiske standardmodel, hvor udgangspunktet er et homogent univers. Det prøver forskeren Sofie Marie Koksbang at gøre op med.**

**S**ofie Marie Koksbang har en mission. Hun vil finde ud af, om den nuværende model for universet er god nok, og hvordan den i modsat fald kan forbedres. Sagen er den, at den kosmologiske standardmodel ignorerer strukturer, som ellers er svære at komme uden om.

Universet kunne i princippet være ekstremt kedeligt. Hvis al stoffet i universet var helt ligeligt fordelt, ville der ikke findes stjerner eller galakser, og vi ville ikke eksistere. Universet ville blot være en uhyre

tynd suppe af elementarpartikler.

Men heldigvis har stoffet en tendens til at klumpe sig sammen og danne en mangfoldighed af strukturer. Når vi kigger ud i universet, kan vi for eksempel se, hvordan galakser har organiseret sig i hobe, der ligger som dugdråber i vævet af et kosmisk, tredimensionelt edderkoppespind.

Men strukturer som disse optræder ikke i de ligninger, som fysikere bruger til at regne på universet som helhed. Det vil Sofie Marie Koks-

bang, der er ansat som postdoc ved forskningscenteret CP3-Origins, gerne lave om på:

»Jeg prøver at finde ud af, om man kan finde en effekt af strukturerne på den helt store skala, og hvordan eventuelle effekter kan påvirke astronomiske observationer.«

CP3-Origins er en forkortelse for Centre for Cosmology and Particle Physics Phenomenology, der hører under Institut for Fysik, Kemi og Farmaci på Syddansk Universitet. Her arbejder forskerne på at forstå,

hvordan vores univers kom til at se ud, som det gør – hvordan det almindelige og det mørke stof blev dannet, og hvordan universet har udviklet sig, siden det var helt lille.

### Einsteins ligninger bruges på hele universet

For kosmologer som Sofie Marie Koksbang er udgangspunktet Einsteins almene relativitetsteori, som han præsenterede 25. november 1915. Selv om teorien nu har mere end et århundrede på bagen, er den stadig i fremragende form. Den har modstået alle angreb og har vist sig at være en uovertruffen teori for den kraft, vi kalder tyngdekraften.

Ifølge relativitetsteorien kan tyngdekraften bedst beskrives geometrisk, idet den kan forstås som en krumning af rumtiden forårsaget af det stof – eller mere generelt den energi – der er til stede. Eller som fysikeren John Archibald Wheeler formulerede det: "Rumtiden fortæller stof, hvordan det skal bevæge sig; stof fortæller rumtiden, hvordan den skal krumme".

Det lyder forholdsvis simpelt, men det er ikke nemt at regne på. Selv om Einsteins feltligninger ofte præsenteres i en kompakt version som en enkelt ligning med masse og energi på den ene side og rumtidens krumning på den anden, er der i virkeligheden tale om et system af 10 koblede, ikke-lineære partielle differentiaalligninger, som det er svært at finde eksakte løsninger på – faktisk så svært, at Einstein selv tvivlede på, at det kunne lade sig gøre.

Det viste sig dog hurtigt, at det ikke er helt umuligt. Et par måneder efter offentliggørelsen af den almene relativitetsteori fandt den tyske astronom og fysiker Karl Schwarzschild frem til en løsning, der beskriver den ekstreme krumning af rumtiden, vi i dag kalder et sort hul.

Andre fysikere som Alexander Friedmann, Georges Lemaître, Howard

## Om forskeren

Sofie Marie Koksbang har en kandidat- og ph.d.-grad i fysik fra Aarhus Universitet. I forbindelse med sin kandidatuddannelse tog hun et semester på University of Texas i Austin og siden var hun på forskningsophold på University of Texas i Dallas som led i sin ph.d.

Efter sin ph.d. fik hun en postdoc på Helsinki Universitet via en bevilling fra Danmarks Frie forskningsfond (DFP), hvorefter hun i 2020 fik en ny postdoc på Center for Cosmology and Particle Physics Phenomenology (CP3) ved Syddansk Universitet via en bevilling fra Carlsbergfondet.

Forskningen beskrevet i denne artikel er for en stor del finansieret af Danmarks Frie forskningsfond.



Foto: AU

P. Robertson og Arthur Geoffrey Walker var mere interesserede i, hvordan Einsteins ligninger kunne bruges på hele universet.

Ud fra den antagelse (nu kaldet det kosmologiske princip), at universet er homogent og isotropt, altså at stoffet er jævnt fordelt, og at universet ser ens ud i alle retninger, fandt de en eksakt løsning på Einsteins feltligninger, der beskriver et dynamisk univers, der enten udvider sig eller trækker sig sammen.

Allerede i 1927 formåede den belgiske præst, matematiker, fysiker og astronom George Lemaître at kombinere Einsteins teori med nye astronomiske målinger, der viste en sammenhæng mellem afstanden til en galakse og dens hastighed væk fra os – en sammenhæng, vi i dag kender som Hubbles lov, men som mere korrekt hedder Hubble-Lemaîtres lov. Lemaître forstod, at de astronomiske observationer viser, at universet udvider sig, og i 1931 kom han frem til den konklusion, at universet engang har været ganske lille og har udvidet sig lige siden. Her var startskuddet til big bang-teorien.

### Universet er mest mørkt

Vil man beskrive universets udvikling er det afgørende, at man har styr på, hvad det indeholder. Det er fysikere og astronomer da også blevet meget klogere på i det forløbne århundrede, så vi i dag ved, at universet rummer meget mere stof end det, vi kender som almindeligt, baryonisk stof. Langt størstedelen af stoffet er mørkt – vi ved endnu ikke, hvad det består af.

Mørkt stof er dog ikke nok til at forklare de astronomiske observationer. I 1998 kunne to forskerhold uafhængigt af hinanden fremlægge observationer, som tyder på, at universet udvider sig stadig hurtigere. Effekten tilskrives en "mørk energi", der fungerer som en slags negativt tryk, der får selve rummet til at blive større hurtigere og hurtigere.

Efter opdagelsen af mørkt stof og siden mørk energi har fysikerne udviklet en kosmologisk standardmodel, der kaldes  $\Lambda$ CDM (udtales lambda-CDM, da  $\Lambda$  står for det græske bogstav lambda). Det er stadig Einsteins ligninger, der udgør essensen i modellen, hvor  $\Lambda$  repræsenterer mørk energi, mens CDM står for



## Universer skabes i supercomputere

I naturvidenskaben er forsøg uundværlige, når teorier skal testes. Men kosmologer har den udfordring, at det ikke er muligt at proppe hele universer ned i petriskåle, så de må nøjes med at holde observationer af det virkelige univers op imod computermodeller, hvor universer og deres udvikling simuleres.

Udgangspunktet for simuleringerne er oftest den kosmologiske standardmodel kombineret med observationer, der har givet os viden om universet indhold. Den hidtil største og mest detaljerede simulering hedder Uchuu, som er japansk for det ydre rum eller universet. Den blev præsenteret 10. september 2021. Her har en supercomputer tygget på 2,1 billioner mørkt stof-partikler i et tredimensionalt modelunivers, der måler 9,63 milliarder lysår på hver led, og som har samme fordeling af stof og mørk energi, som i 2015 kunne udregnes på baggrund af data fra Planck-satellitten.

De stadig mere detaljerede modeller giver et billede af, hvordan universet er kommet til at se ud, som det gør, med et kosmisk net af galaksehobe, der omgiver store tomrum. Men modellerne kan altid blive bedre – de kunne for eksempel inkludere den effekt, som tilstedeværelsen af strukturerne har for universets udvidelse og vores observationer af det.

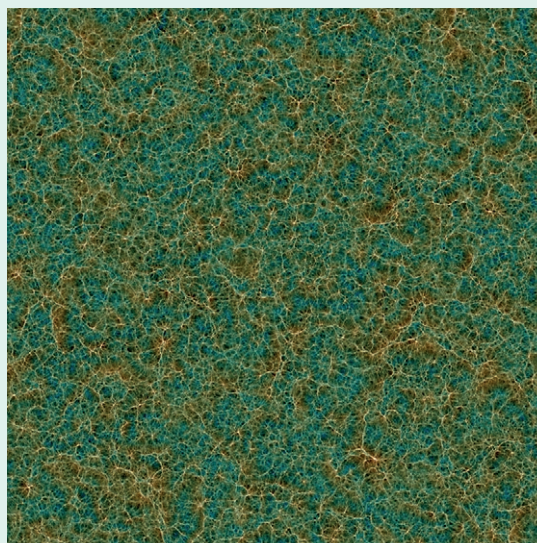
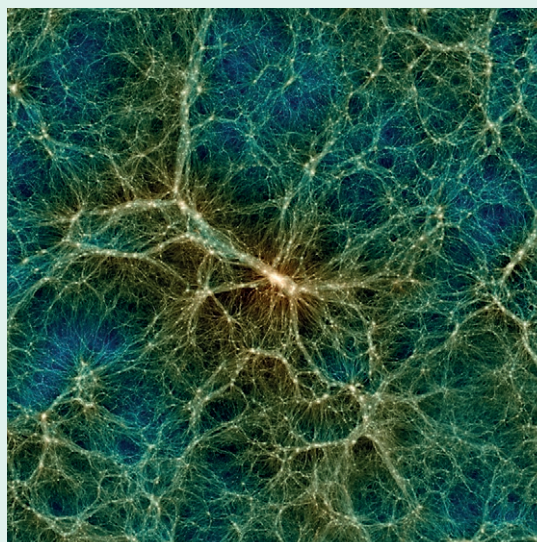
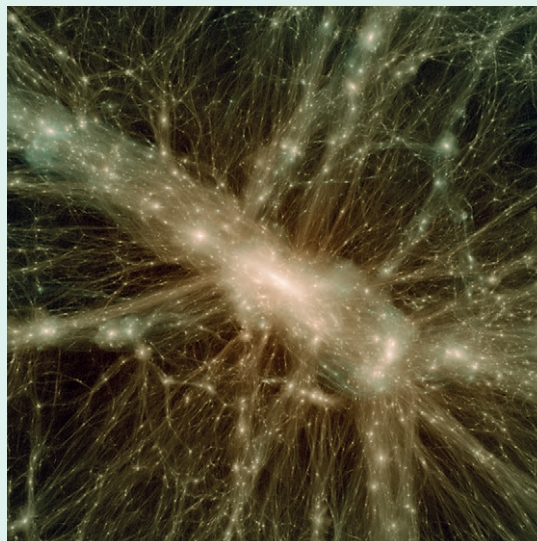
Her løber fysikerne dog hurtigt hovedet mod en mur, for så snart man bevæger sig lidt væk fra den forholdsvis simple kosmologiske standardmodel, som forudsætter et homogent univers, bliver Einsteins ligninger uhyre svære at arbejde med rent matematisk. I stedet for at arbejde med eksakte løsninger forsøger forskerne sig med numeriske metoder, så “numerisk relativitet” er et voksende felt inden for kosmologien. Så kan modeller som Uchuu blive lidt mere realistiske end i dag, hvor det i bund og grund er newtonsk dynamik, der er udgangspunktet.

Fysikerne er langt fra at lave en model, der er fuldstændig realistisk i forhold til den observerede fordeling af stof og energi i universet, specielt hvis strukturerne rotationer og vridninger af rummet skal inkluderes.

Selv ikke den kraftigste supercomputer kan regne på et realistisk univers, så Sofie Marie Koksang må nøjes med at simulere universer med en simplere fordeling af stoffet og derudfra få en idé om, hvordan de stofflige strukturer påvirker universets udvikling – og hvordan denne påvirkning kan observeres.

### Eksempler på computersimuleringer

Illustrationerne viser computersimuleringer med Uchuu. I en sådan simulering ser man på et udsnit af et univers og fordeler stoffet i et eller andet antal legemer, helst så stort som muligt. Legemerne får lov til at vekselvirke under almindelig Newtons tyngdekraft, men man tager højde for den væsentligste effekt fra generel relativitetsteori ved at lade det simulerede område udvide sig ifølge generel relativitetsteori. Man starter så simuleringen med legemerne nogenlunde jævnt fordelt i hele kassen, og man kan så observere, hvordan tyngdekraften får legemerne til at hobe sig sammen i strukturer. Det resulterende netværk af strukturer passer nogenlunde med det, man observerer i virkeligheden, men kun hvis man bruger den “rigtige”



Illustrationer: IAA-CSIC/www.skiesanduniverses.org

udvidelseshastighed igennem alle de milliarder af år, simuleringen dækker over. Derfor kan man ved at sammenligne den observerede mængde strukturdannelse i universet med det, man får fra sådanne simuleringer lære om, hvad den “rigtige” udvidelseshastighed er.





Cold Dark Matter, koldt mørkt stof. Med koldt menes egentlig bare, at det bevæger sig meget langsomme end lys.

Som modellens navn understreger, er universets udvikling først og fremmest dikteret af mørk energi og mørkt stof. Da det almindelige, velkendte stof kun udgør knap fem procent af universets indhold, spiller det ikke den helt store rolle i kosmologien.

Universets indhold af stof og energi bestemmer, hvor hurtigt det udvider sig, og hvordan udvidelseshastigheden har varieret igennem tiden. Stoffet bremser udvidelsen, mens den mørke energi – som vokser i takt med universets størrelse – sætter turbo på. Når man kender de parametre, kan man også give et bud på universets alder, hvor det seneste lyder på 13,8 milliarder år.

»Så vi har standardmodellen for kosmologi baseret på den generelle relativitetsteori og nogle antagelser, blandt andet antagelsen om, at vi

med rimelighed kan beskrive universet som fuldstændig homogent og isotropt,« siger Sofie Marie Koksang og fortsætter:

»Men det er en antagelse, og hvis man kigger på Einsteins ligninger og så sætter et inhomogent univers ind – et univers med strukturer som det, vi lever i – så kommer der ekstra led med, selv når man går til store skalaer, hvor strukturerne udviskes, og universet ser ud til at være homogent og isotropt. Spørgsmålet er så, om de ekstra led på en eller anden mystisk måde går ud, så de bliver negligeble i vores univers, eller om de ikke gør det.«

### Måske findes mørk energi ikke

Den kosmologiske standardmodel, der er bygget på den løsning af Einsteins ligninger, som Friedmann, Le-maître, Robertson og Walker fandt frem til, forudsætter et homogent univers, og Sofie Marie Koksangs pointe er, at den forudsætning måske fører til en model, der er lige simpel nok. Universet er nemlig

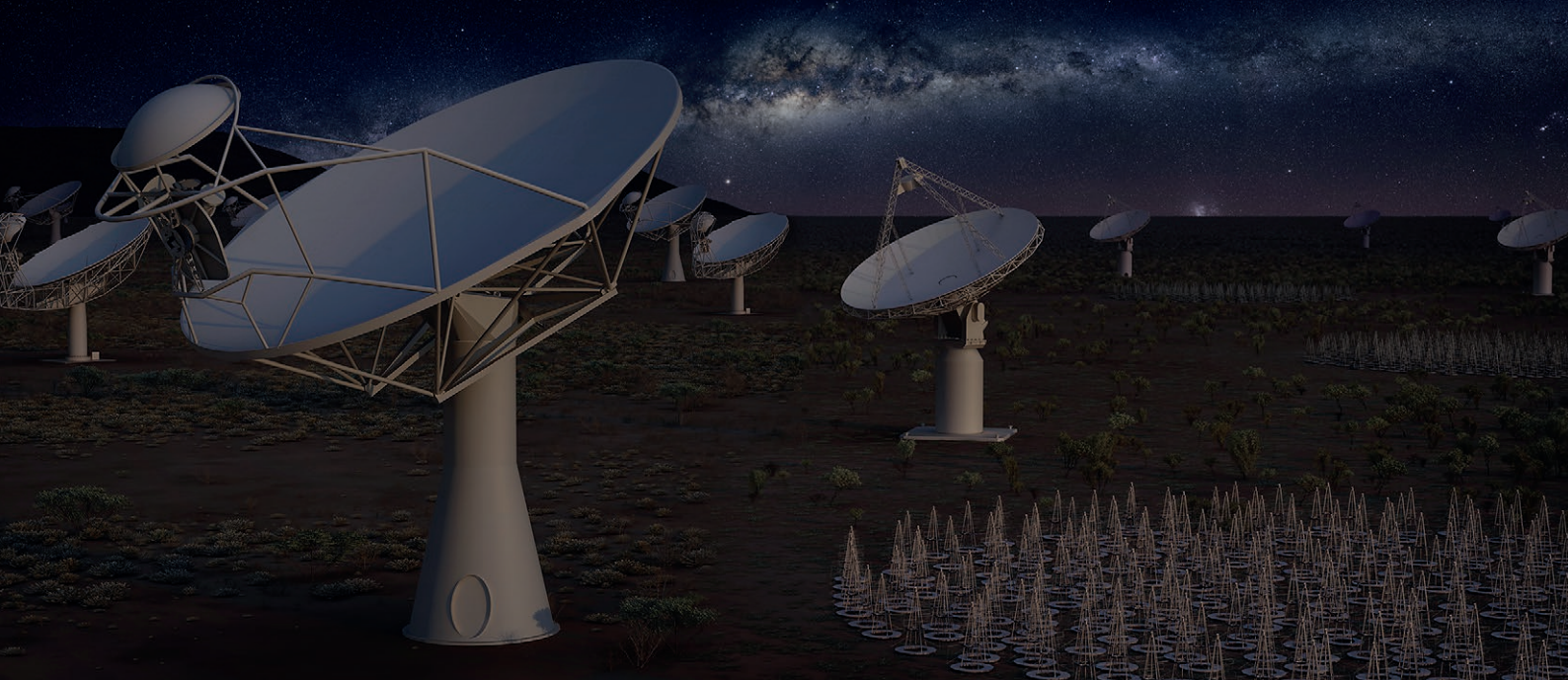
tydeligvis ikke homogent – det er præget af storstrukturer af galaksehobe adskilt af store tomrum. Når de medregnes, kan de måske have en effekt, som fysikerne kalder backreaction, forklarer hun:

»Et univers, der på små skalaer har strukturer, men på meget store skalaer ser ud til at være isotropt og inhomogent, opfører sig anderledes end et univers, der også på små skalaer er isotropt og homogent. Det er her, forskellen på backreaction og lambda-CDM er, for lambda-CDM-modellen er baseret på at antage, at der ikke er forskel på de to situationer. Derfor beskriver ligningerne i lambda-CDM-modellen et univers, der

Når Extremely Large Telescope står klar i 2027, kan astrofysikerne begynde at måle, hvordan rødforskydningen af lyset fra fjerne galakser ændrer sig med tiden. Sådanne målinger kan revolutionere kosmologien. Indsat foto: Status på byggeriet.

Illustration: ESO  
Foto: H. Millar/MCTCI, Chile





Det enorme radioteleskop Square Kilometer Array vil også kunne måle, om rødforskydninger bliver større som forudsagt af lambda-CDM-modellen eller ej.

Illustration: SKA Observatory.

#### Videre læsning

Universet har vokseværk. Aktuell Naturvidenskab nr. 2/2021

selv på lille skala er homogent og isotropt.«

»I backreaction-scenarier tager man højde for strukturerne på lille skala, hvilket genererer ekstra led i ligningerne, der beskriver universet på store skalaer, hvor det formentlig kan beskrives som homogent og isotropt.«

Så Sofie Marie Koksang regner på, om en mere kompleks kosmologisk model, hvor strukturer indgår, kan føre til andre forudsigelser end den nuværende model. Rent matematisk bør de ekstra led være der, men det er muligt, at de ikke betyder noget, når observationer skal fortolkes. Omvendt kan det også være, at de har ganske stor betydning, fortæller hun:

»I princippet kan de ekstra led give en tilsyneladende accelereret ekspansion af universet, så universet ser ud til at udvide sig hurtigere og hurtigere, selvom det i virkeligheden ikke gør det nogen steder lokalt.«

En accelereret udvidelse af universet lyder jo præcis som det fænomen, der i dag tilskrives mørk energi. De forskere, der beskæftiger sig med inhomogen kosmologi, leger da også med tanken om, at der slet ikke findes mørk energi. Måske kan de observationer, der peger i retning af en accelererende udvidelse af uni-

verset, forklares med backreaction, altså effekten af strukturerne i universet.

#### Teorien kan testes med nye teleskoper

Heldigvis findes der en måde, hvorpå man kan skelne mellem mørk energi og backreaction – en "smoking gun", som Sofie Marie Koksang kalder det:

»Jeg har fundet frem til, at man kan kigge på det, der hedder redshift drift. I et univers med egentlig accelereret ekspansion forårsaget af mørk energi, ville dette redshift drift blive positiv, men ellers bliver det negativt – også hvis vi lever i et univers, der på grund af backreaction bare ser ud til at have en accelereret ekspansion.«

I dag ved vi, at universet udvider sig, for vi kan observere, hvordan lyset fra fjerne galakser er forskudt mod det røde område af spektret. Rødforskydningen er en konsekvens af universets udvidelse, idet lysbølgerne er blevet trukket ud og har fået længere bølgelængde i takt med udvidelsen. I et univers, som udvider sig stadig hurtigere, bliver rødforskydningen gradvist større og større, og det kaldes redshift drift – at rødforskydningen rykker sig.

Denne langsomme ændring af størrelsen af rødforskydningen er desværre uhyre svær at måle, og teknologien til at gøre det indenfor

en overskuelig årrække findes endnu ikke. Men det kan ændre sig. Forskerne sætter specielt deres lid til et instrument kaldet HIREs (High REsolution Spectrograph), en spektrograf med ekstrem høj opløsning designet til superteleskopet Extremely Large Telescope (ELT), der er ved at blive bygget på en bjergtop i Chile.

ELT, der får et hovedspejl med en diameter på 39 meter, kan stå klar i 2027, og få år efter vil et andet superteleskop kaldet Square Kilometer Array (SKA) være bygget færdig. SKA bliver et enormt radioteleskop bestående af tusindvis af sammenkoblede radioantenner placeret i Sydafrika og Australien, og med det vil astronomerne også blive i stand til at måle, hvordan rødforskydningen flytter sig.

»Redshift drift kan bruges som smoking gun for, om der er mørk energi i det hele taget, og sammenholder vi med målinger af Hubble-parametret, kan vi finde ud af, om vi er i standardmodel-scenariet med mørk energi som kosmologisk konstant, om vi har en anden type mørk energi, eller om vi har backreaction – eller en blanding,« siger Sofie Marie Koksang.

Men hun må væbne sig med tålmodighed, for selv med ELT og SKA vil det sandsynligvis kræve et par årtiers målinger at få overbevisende data om rødforskydningens eventuelle ændring med tiden. ■