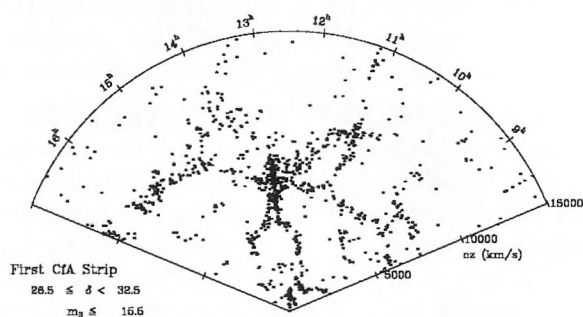


Universets storskala-strukturer

Michael Weidinger, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Vores viden om universets storskala-strukturer har udviklet sig meget dramatisk de sidste 25 år, i takt med den teknologiske udvikling af teleskopernes instrumentering. I 1920'erne tog det indtil flere nætters observationer at måle en galakses spektroskopiske rødforskydning (se boks 1.) I 1950'erne var de fotografiske plader forbedret så meget, at det tog omkring fem timers eksponering. Man fandt så i 60'erne på elektronisk at forstærke lyset fra en galakse før det ramte den fotografiske plade, hvilket reducerede observationstiden til ~ 30 minutter. Fremkomsten af halvlederteknik gjorde det i 70'erne muligt helt at undgå de fotografiske plader til fordel for de mere effektive elektroniske detektorer, hvorved observationstiden blev yderligere reduceret. Denne udvikling af instrumenterne havde en kolossal betydning for vores viden om det ekstragalaktiske univers, fordi den gjorde det muligt at lave større og større undersøgelser af fjerne galakser.

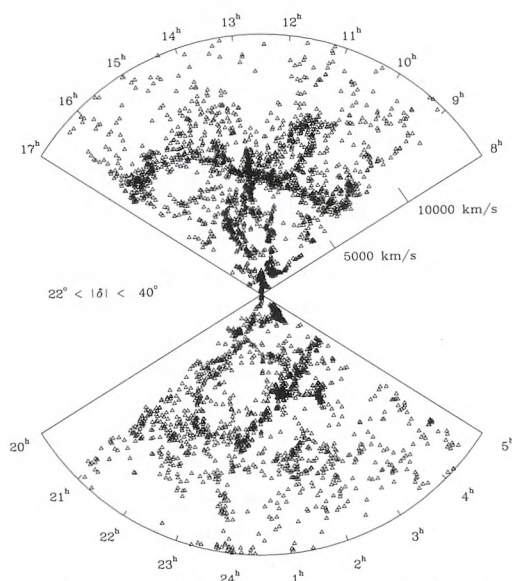


Figur 1. Kort over galakserne observeret i CfA1 undersøgelsen. Jorden er placeret i spidsen nederst. Langs cirkelbuen er rektascensionen afmærket og langs de lige kanter er rødforskydningen angivet i km s^{-1} . Dataene er for cirka 1100 galakser med $26.5^\circ \leq \delta \leq 32.5^\circ$ klarere end en størrelsesklasse på 16.6 [3].

I begyndelsen

I løbet af det 18. århundrede blev man klar over at mange af de mærkværdige "tåger", man så på himlen, kunne opløses i stjerner. Man mente at en sådan hob af stjerner måtte være dannet ved at én meget tung stjerne gravitationelt havde tiltrukket omkringliggende lette stjerner. I 1780'erne overvejede William Herschel spørgsmålet hvorvidt spiraltågerne var objekter i eller nær vores egen Mælkevej, eller om de selv var meget fjerne mælkeveje ("ø-universer"), som måske kunne være meget større end Mælkevejen [1]. Problemet stod uløst i mere end et århundrede, og i 1920

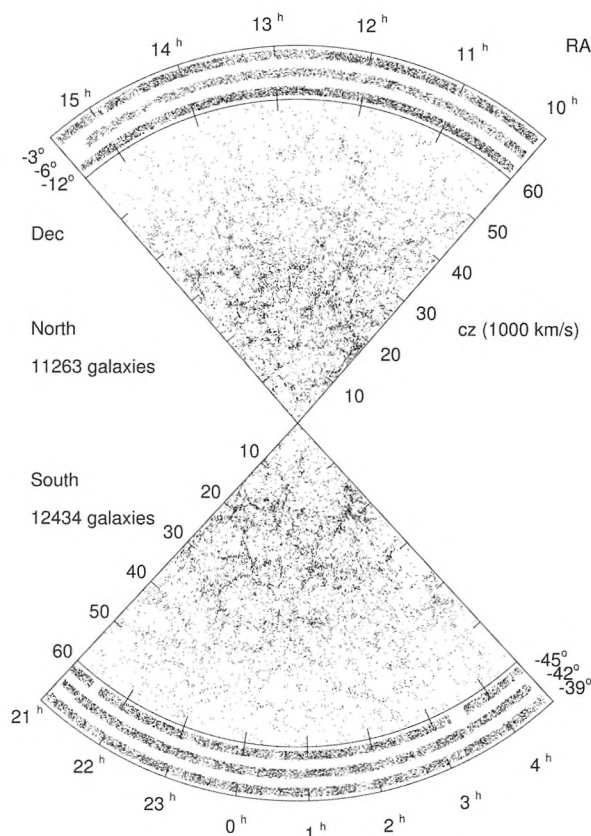
var det årsag til *Den Store Debat* mellem Shapley og Curtis, der diskuterede dette problem meget intenst. Løsningen kom i 1925, hvor Hubble bestemte afstanden til Andromeda-galaksen til 285 kpc (930 000 lysår), og dermed afgjorde at spiraltågerne ligger langt udenfor Mælkevejen. Der er etableret en glimrende hjemmeside om *Den Store Debat* [2].



Figur 2. Rødforskydning versus rektascension for galakser klarere end størrelsesklassen $B = 15.5$ og indenfor et 10° interval stammende fra det kombinerede CfA2-SSRS2 datasæt [4].

Barndommen for de mere systematiske undersøgelser af galaksernes (som tågerne nu blev kaldt) fordeling på himlen var i 1930'erne, hvor blandt andet Fritz Zwicky deltog. Han foreslog at man skulle betragte hobe af galakser, og ikke enkelte galakser, som byggestene i universet [1]. Kortlægningen af galaksernes placeringer fortsatte, og i 1953 fandt de Vaucouleurs tegn på at måske heller ikke galaksehobene var de største strukturer, men at hobene samlede sig i *superhobe* af galakser. Dette blev bekræftet i 1960, hvor Mayall havde identificeret et homogent sæt af klare galakser i Coma-hoben, og fundet rødforskydninger for 50 af dem. Ved at aftegne galaksernes rødforskydninger mod deres vinkelafstande til Coma-hobens centrum fastslog Mayall, at hoben faktisk var en del af en større struktur, der havde en udstrækning på mere end 8 Mpc. Det første *Reference Catalogue of Bright Galaxies* så dagens lys i 1964, og heri var der rødforskydninger for cirka 1000 galakser. Den næste udgave kom i 1976 og indeholdte rødforskydninger for godt 4000 galakser – et imponerende arbejde. Selvom katalogerne kun

fandt de nærmeste galakser gjorde de det klart, at det var helt almindeligt med enorme klumper af galakser med dimensioner op til ~ 7 Mpc, og man begyndte at undre sig over hvornår opdagelserne af stadigt større strukturer ville stoppe. Ville man nogensinde komme til *the End of Greatness*¹ – altså en skala, hvor universets strukturer ikke blev større – eller ville de største kendte strukturer blive ved med at vokse efterhånden som man blev i stand til at opdage dem, og dermed vise at strukturerne dannede et uendeligt fraktalt mønster?

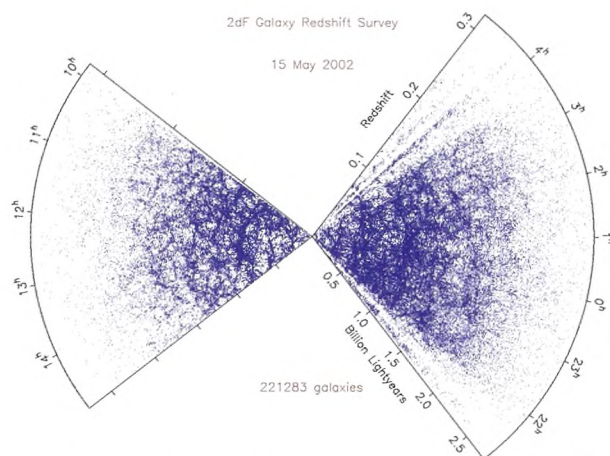


Figur 3. Las Campanas Redshift Survey. Et imponerende plot af galakser på den nordlige og sydlige himmelhalvkugle ud til en rødforskydning $z = 0.2$. Foroven og forneden vises galaksernes position projiceret ind på planerne langs de seks observerede striber. $z = 0.2$ svarer til en afstand på ≈ 880 Mpc. Plottet viser 23 697 galakser [5].

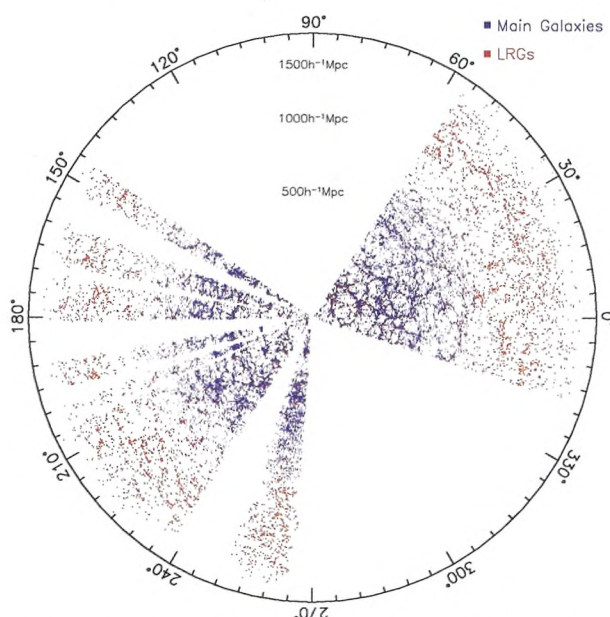
Så tog udviklingen fart

En af de første større systematiske undersøgelser af himlen, der kortlagde et stort areal til en moderat dybde, var CfA Redshift Survey 1 (CfA1). Undersøgelsen blev færdiggjort i 1982 og bestod da af 2401 galakser med målte rødforskydninger observeret i en lang, tynd stribe på himlen med stor dybde (se figur 1). Denne kortlægning var en af de første af sin slags, og den viste tydeligt hvordan der var store gab af størrelse ~ 50 Mpc i fordelingen af galakser.

¹Dette udtryk stammer fra Robert Kirshner fra holdet bag Las Campanas Redshift Survey.



Figur 4. 2dF Galaxy Redshift Survey. Plot af 221 283 galakser omkring $\delta = 0^\circ$ og $\delta = -30^\circ$ ud til $z = 0.3$ (1.29 Gpc). Enkelte felter er ikke observerede og fremstår derfor som tomme cirkelstykker [6].



Figur 5. Sloan Digital Sky Survey, Early Data Release. Plottet er for cirka 50 000 almindelige galakser (med blå) og LRGs (Luminous Red Galaxies; med rødt) omkring deklinationen $\delta = 0^\circ$. Rundt langs den yderste cirkel er markeret rektascentionen i grader. Populationen af almindelige galakser strækker sig ud til $z = 0.2$ (880 Mpc), mens LRG'erne går ud til $z = 0.5$ (2.03 Gpc). Nogle felter er endnu ikke observerede og ser derfor tomme ud [7].

I første halvdel af 1980'erne blev der startet en lang række systematiske undersøgelser, og der blev udviklet forskellige observationsteknikker, som sigtede mod forskellige mål. De første kortlægninger var fokuseret på at dække et meget stort område på himlen, men så til gengæld kun observere de klareste galakser. (For eksempel *Reference Catalogue of Bright Galaxies*.) Denne teknik kaldtes *all-sky* på grund af det store dækningsareal. For også at kunne studere galaksernes fordeling i rødforskydning begyndte man at indsnævre arealet, mens man forøgede dybden. Typisk

afsøgte man et smalt, aflangt område til forholdsvis stor rødforskydning (som CfA1, figur 1) – en *slice*. Man begyndte også at blive interesseret i hvordan strukturerne ser ud ved meget store rødforskydninger. Det var grunden til de såkaldte *pencilbeam* undersøgelser, der som navnet antyder var ekstremt dybe observationer af et meget lille areal på himlen. Der kom selvfølgelig også kombinationer af de enkelte teknikker. Nogle undersøgelser havde som mål et antal *pencilbeams* på en lang række, så man effektivt observerede en lang, smal stribe af himlen. Andre observerede *pencilbeams* spredt ud på himlen ifølge en formentlig nøje gennemtænkt plan; nærmest som et skakmønster.

I begyndelsen af 1990'erne blev forskellige kataloger over kendte galakser benyttet til at udvælge de galakser, man ønskede at finde rødforskydninger for – det blev blandt andet til Stromlo-APM undersøgelsen med 1797 målte rødforskydninger. Denne og mange andre undersøgelser tegnede efterhånden et meget detaljeret billede af universet ud til en rødforskydning på $z = 0.5$. Billedet var et univers bestående af enorme mure og lange tråde (*filamenter*), der omslutter store gab.

Boks 1. Rødforskydning

Eftersom universet udvider sig bevæger alle galakser sig væk fra hinanden. Hubbles lov kan udtrykkes som at jo fjernere en galakse er, jo hurtigere bevæger den sig væk fra os.

På grund af den store fart bliver deres lys Doppler forskudt til større bølgelængder – lyset er altså blevet rødere. Man siger at lyset er blevet rødforskydning. Rødforskydningen, z , defineres ved

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{observeret}}}{\lambda_{\text{teoretisk}}},$$

hvor $\lambda_{\text{observeret}}$ og $\lambda_{\text{teoretisk}}$ er henholdsvis lysets observerede og teoretiske bølgelængde.

Man finder den spektroskopiske rødforskydning ved at udmåle bølgelængderne af emissions- eller absorptionslinier i galaksens spektrum og sammenligne med bølgelængderne målt i et laboratorium.

Hvor er vi nu?

De seneste færdiggjorte store kortlægninger omfatter blandt andet CfA2, en udvidelse af CfA1, LCRS (Las Campanas Redshift Survey) og IRAS PSCz (Infrared Astronomical Satellite Point Source Catalog z -survey).

CfA2 kortlagde rødforskydninger for omkring 18 000 galakser klarere end størrelsesklassen $B = 15.5$ fordelt over 6 striber, der hver især er $6^\circ \times 130^\circ$, ud til $c \cdot z = 16\,000 \text{ km s}^{-1}$ (c er lysets hastighed, så $z = 0.05$) (se figur 2.) Med LCRS undersøgelsen fandt man rødforskydninger for godt 25 000 galakser i 6 striber,

der er $1.5^\circ \times 80^\circ$ ud til $cz = 60\,000 \text{ km s}^{-1}$ ($z = 0.2$) ([5], se figur 3.) Med IRAS PSCz undersøgelsen blev et enormt område svarende til 87% af hele himlen kortlagt i det infrarøde bølgelængdeområde. Et af de eksplicitte mål med undersøgelsen var at observere galakser, der set fra Jorden ligger bag ved Mælkevejen, og således ikke kan ses med optiske teleskoper. Der blev målt rødforskydninger for cirka 15 000 galakser ud til $cz \sim 30\,000 \text{ km s}^{-1}$ ($z \sim 0.1$).

I de kommende år vil i hvert fald to endnu større undersøgelser blive færdige. Der er efterhånden tale om en *rødforskydningsindustri*, hvor hver undersøgelse har deres eget teleskop dedikeret til opgaven. De undersøgelser, der er tale om, er:

- 2dFGRS (2 degree Field Galaxy Redshift Survey – opkaldt efter 2dF instrumentet, der har et $2^\circ \times 2^\circ$ felt) har som mål at observere spektre for 250 000 galakser fordelt på 5% af hele himlen. I 2001 kom 100k dataoffentliggørelsen, hvor der blev frigivet data for de første 100 000 galakser. Status i maj 2002 var godt 220 000 galakser ([6], se figur 4.)
- SDSS (Sloan Digital Sky Survey) er den kortlægning, der er størst forventninger til. Målsætningen er på fem år at observere 24% af hele himlen og finde rødforskydninger for en million galakser. I juni 2001 kom den første dataoffentliggørelse, der indeholdte 50 000 galakser fordelt på 1% af himlen (se figur 5.) En af grundene til at SDSS har så stor succes er, at man har udarbejdet en god metode til automatisk at skelne mellem en lang række forskellige objekter (asteroider, kvasarer, forskellige typer af galakser og stjerner, etc.)

Vores billede af universet ud til endda meget store afstande stykket sammen af utallige kortlægninger er nu konvergeret mod en fælles forståelse af universets udseende på stor skala. I det næste afsnit vil jeg præsentere dette samlede billede.

Det kosmiske spindelvæv

Den observationelle kosmologi har på 25 år gået fra at være nærmest ikke-eksisterende til et stort forskningsfelt i rivende udvikling. De seneste 10-15 års forskning har dannet et konsistent billede af universets strukturer på de største skalaer, som jeg har prøvet at gengive i figur 3-5. Undersøgelserne afdækker galakser helt ud til en rødforskydning på $z = 0.5$, hvor universet blot var 9 milliarder år gammelt (i forhold de nuværende godt 14 milliarder år.)

Man ser tydeligt i figur 3 hvordan der er store, nærmest cirkulære gab i galaksefordelingen med størrelser op til 100 Mpc. Omkring gabene er der mure og filamenter med størrelser op til 50 Mpc og med meget store galaksetætheder, så stoffet nærmest danner et stort, kosmisk spindelvæv (se også simuleringen

på figur 8.) Figur 4 og 5 viser hvordan fordelingen af galakser bliver mere og mere homogen, når man betragter større og større områder. Der er altså ikke større strukturer end de intergalaktiske gab, så vi er nået til *the End of Greatness*; vi har set de største strukturer der findes.

For at forstå dannelsen af disse enorme strukturer er man nødt til at ty til numeriske simuleringer af strukturdannelse i universet.

Boks 2. Nogle kosmologiske parametre

Tæthedsparameteren:

$$\Omega_m = \frac{8\pi\rho_0 G c^2}{3H_0^2},$$

hvor G er Newtons gravitations konstant, ρ_0 er universets nuværende massetæthed, c er lysets hastighed og H_0 er den nuværende Hubble parameter.

Den kosmologiske konstant:

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2},$$

hvor Λ er den kosmologiske konstant, som Einstein først indførte for at sikre et statisk univers, men senere fortrød.

Universets geometri styres af tæthedsparametren og den kosmologiske konstant. Når $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ er universet "fladt", hvilket i en to-dimensionel analog svarer til et plan. Arealet af et plan er uendeligt, så det vil volumen af universet også være i dette tilfælde. Hvis $\Omega < 1$ siger man at universet er "åbent"; her svarer geometrien til den to-dimensionelle overflade af en sadel. Også her er både arealet af sadlen og volumen af universet uendelige. Endelig når $\Omega > 1$ er universet "lukket"; man kan tænke på overfladen af en kugle. I dette tilfælde har universet et endeligt volumen, ligesom arealet af en kugleoverflade.

Den enhedsløse Hubble parameter:

$$h = \frac{H_0}{100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}}$$

h er altså blot H_0 målt i enheder af $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

I denne artikel har jeg antaget de for tiden mest populære værdier $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ og $h = 0.65$.

Simuleringer

De meget store observationer af galaksernes fordeling på mange skalaer har gjort det nødvendigt med et meget detaljeret indblik i teoriens forudsigelser. Teorien er den for en væske (en fluid) under påvirkning af sin egen tyngdekraft, som i princippet er velforstået. Desværre er der få analytiske løsninger til ligningerne, så derfor har man været nødt til at lave store numeriske simuleringer af strukturdannelsen i universet. Målet med simuleringerne er at vise hvordan strukturdannelsen i teorien vil se ud på de mange observerede skalaer.

Simuleringerne starter ud med et sæt begyndelsesbetingelser, som blandt andet består af en fordeling af tæthedsfluktuationer i en simuleringsboks, et valg af randbetingelser for boksen og et fastlagt sæt af kosmologiske parametre, der beskriver universets geometri (se boks 2.) Tæthedsfluktuationerne stammer helt tilbage fra små kvantefluktuationer i energien i det varme *Big Bang* (læs også [8].)

Normalt består tæthederne i et antal "partikler" placeret i boksen ifølge et regelmæssigt mønster, men forskubbet en smule for at opnå fluktuationerne. Disse partikler kan være "mørkt stof", "stjerne"- eller "gas"-partikler, der så repræsenterer en bestemt masse af det pågældende stof.² Man lader beregningen køre frem til en rødforskydning, hvor man er særligt interesseret i strukturerne fordeling.

Den hidtil største computersimulering, kaldet *Hubble Volume Simulation*, er udført af *Virgo konsortiet* (se deres hjemmeside [9]), og den består af 10^9 partikler af mørkt stof fordelt på 1024^3 gitterpunkter svarende til et volume på $3000^2 \times 30 h^{-3} \text{ Mpc}^3$. For at få en fornemmelse af simuleringens størrelse kan det nævnes at beregningen tog 70 timer på en Cray T3E parallel computer med 512 cpu'er. Beregningen blev udført en del gange med forskellige kosmologiske parametre (se figur 6.)

Virgo konsortiet har også gennemført en række mindre simuleringer, der så til gengæld har større detalje. Disse simuleringer (som kan ses opsummeret på figur 7) består hver især af 256^3 partikler fordelt i en kube med en sidelængde på $239.5 h^{-1} \text{ Mpc}$. Simuleringerne viser i stor detalje de enkelte strukturer og hvordan de forskellige modeller udvikler sig med rødforskydning (se boks 3 for en beskrivelse af de forskellige kosmologiske modeller.) Nogle simple iagttagelser ved disse modeller kan være at

- SCDM og τ CDM er langt mindre sammenklumpede end Λ CDM og OCDM.
- filamenter og gab er langt mere udtalte i Λ CDM og OCDM.
- strukturdannelsen i SCDM og τ CDM er kommet senere i gang end i Λ CDM og OCDM.

²Man inkorporerer ofte regler for at omdanne gas til stjerner og omvendt.

- I alle tilfælde går strukturerne fra at være små til at blive større. De mindre strukturer dannes altså før de større. Dette kaldes for hierarkiske strukturdannelse.

The Hubble Volume Simulation



MacFarland, Colberg, Yoshida, White (Munich)
Jenkins, Pearce, Frenk (Durham), Evrard (Michigan),
Couchman (London, CA), Thomas (Sussex),
Efsthathiou (Cambridge), Peacock (Edinburgh)
 Λ CDM model, $3000 \times 3000 \times 30$ (Mpc/h)³

Figur 6. Hubble Volume Simulation ved $z = 0$. Parametrene i denne simulering fremgår af figuren. Til sammenligning går Sloan Digital Sky Survey ud til $1500h^{-1}$ Mpc [9].

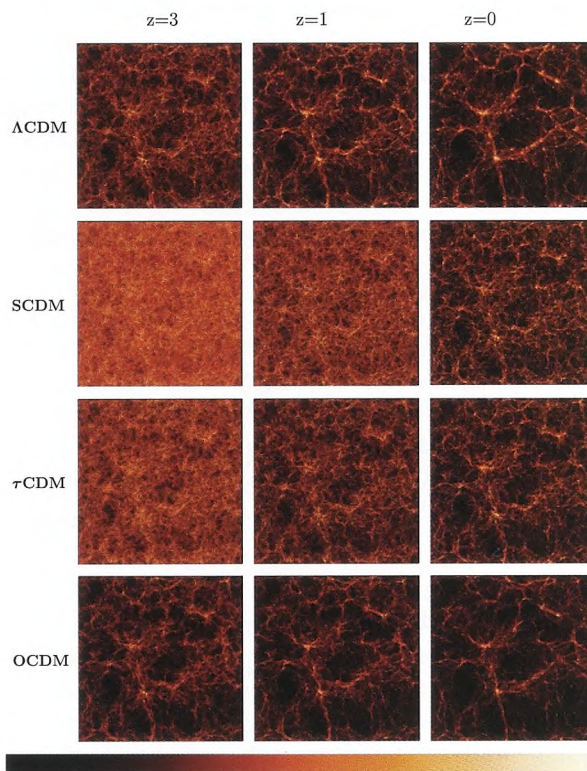
Det er illustrativt at betragte en simulering af mindre målestok, som viser mere detalje – en sådan er gengivet i figur 8. Fra observationerne genkender man straks de store karakteristiske gab med meget få galakser og de lange filamenter, der strækker sig mellem knudepunkter med meget store galaksetætheder. Idéen om det kosmiske spindelvæv er helt tydelig.

Før man giver sig i kast med at sammenligne simuleringer med observationer er der dog én vigtig ting at tage højde for: Simuleringerne viser hvordan *massen* fordeles sig, mens observationerne viser hvordan *lyset* (stjernerne) fordeles sig. Dette simple faktum er genstand for stor debat, for det er langt fra forstået hvordan man kan omregne fra masse til lysstyrke. Man indfører normalt den simple sammenhæng at fluktuationerne i antalstætheden af galakser er proportional med fluktuationer i massetætheden,

$$\frac{\delta n}{n} = b \frac{\delta \rho}{\rho},$$

hvor b er *bias*-parametren, n og ρ er den gennemsnitlige antals- og massetæthed, og δn og $\delta \rho$ er fluktuationerne

i de tilsvarende størrelser. Nogle antager at b er en universel konstant, mens andre opfatter b som en funktion af rødforskydning, galaksetype eller noget helt tredje. Når det kommer til stykket er det kun antagelser – der er endnu ikke noget solidt teoretisk grundlag. . .



The VIRGO Collaboration 1996

Figur 7. Rækkerne viser simuleringer med koldt mørkt stof (CDM) for forskellige kosmologiske parametre, kolonnerne viser den simulerede boks ved forskellige rødforskydninger. Λ CDM: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$. $SCDM$: $\Omega_m = 1$, $\Omega_\Lambda = 0$. τ CDM: Neutrino henfald og $\Omega_m = 1$, $\Omega_\Lambda = 0$. $OCDM$: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0$ [10].

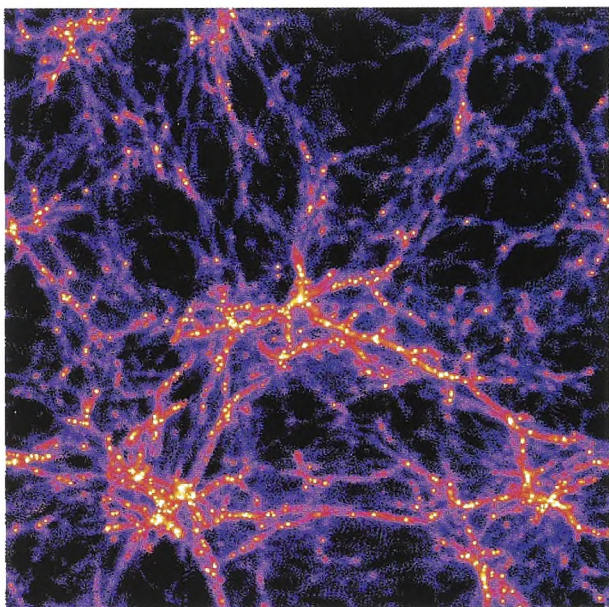
Hvis man antager en eller anden form for bias-parameter giver simuleringerne en mulighed for at sammenholde de observerede galaksefordelinger med forskellige modeller. Det viser sig, at de observerede galaksefordelinger bedst beskrives af Λ CDM modellen, og dermed at det mørke stof og den kosmologiske konstant *er* en del af vores univers. Det kan altså lade sig gøre med grundige analyser og sammenligninger af observationer og simuleringer af galaksefordelinger at bestemme de fundamentale kosmologiske parametre. Vi skal se på resultaterne af sådanne analyser i næste afsnit.

De kosmologiske parametre

Jeg har udvalgt nogle få af de vigtigste parametre, hvis resultater jeg vil præsentere.

Sammenligninger af fordelinger af galaksehobe med simuleringer gør det muligt at sætte grænser på de tilladte værdier for b og Ω_m , som vist i figur 9, hvor det antages at b er en konstant. Vi ser at der er stor

korrelation mellem de to parametre, hvilket skyldes at forholdet $\Omega_m^{0.6}/b$ er (næsten) konstant. Massetætheden af universet i enheder af den kritiske tæthed er altså ≈ 0.2 , hvilket er langt fra at gøre universet fladt, og biasparameteren er omkring 1. En biasparameter $b = 1$ betyder at fluktuationerne i det mørke stof og i galaksefordelingen følges nogenlunde ad, så det mørke stof primært befinder sig i galakserne.



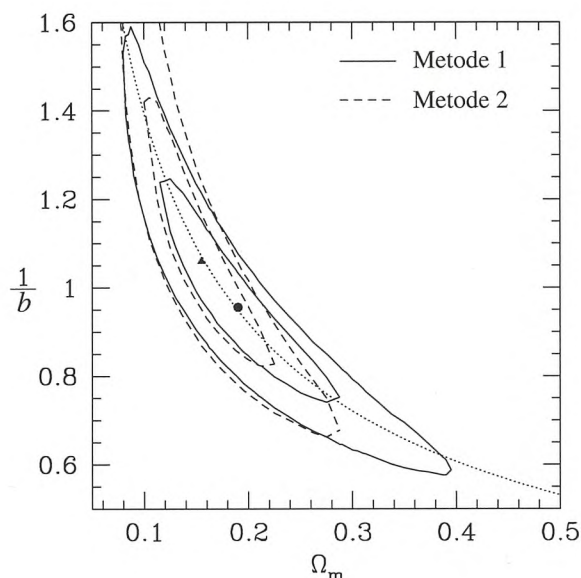
Figur 8. Simulering af universet ved $z = 3$, hvilket svarer til at universet blot er 2.3 milliarder år gammelt. Det skal ses i forhold til universets nuværende alder på 14.5 milliarder år. I denne simulering er volumen af kassen meget mindre end den i figur 6; volumenet er $(12.5h^{-1} \text{ Mpc})^3$ [11].

Observationerne af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling kan sammenlignes med numeriske modeller, og resultatet er overraskende (se figur 10.) For det første er det muligt at sætte forholdsvist snævre grænser for Ω_m og Ω_Λ , hvilket ikke var muligt for bare 15 år siden. For det andet bemærker vi at $\Omega_\Lambda = 0$ er udelukket med stor sandsynlighed, så det lader til at energien i universet er domineret af en kosmologisk konstant. Det ser endvidere ud til at summen af massetætheden og den kosmologiske konstant netop rammer 1, hvilket svarer til et fladt univers. Det er nogle astrofysikere meget glade for, fordi inflationsteorien forudsiger at universet er meget tæt på at være fladt. Endelig kan vi notere at Ω_m er meget større end tæthedsparmeteren for almindeligt stof (primært protoner og neutroner), $\Omega_B = 0.049^{+0.023}_{-0.0075}$, hvilket indikerer at der nødvendigvis må eksistere noget mørkt stof, der ikke består af almindelige partikler!

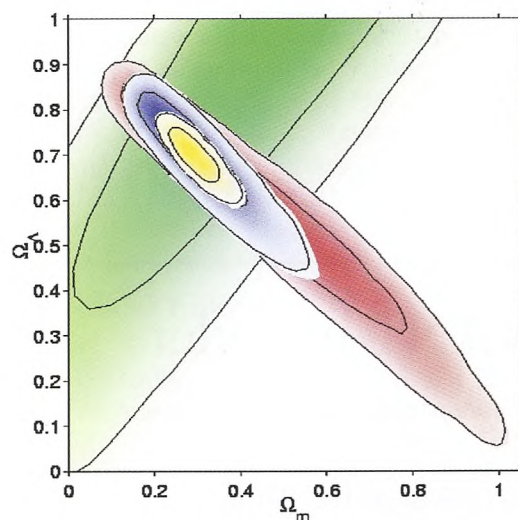
Det er først i de senere år at det har været muligt at bestemme de kosmologiske parametre med så stor nøjagtighed. Storskala-strukturerne har altså været med til at bringe os ind i en æra med præcisionskosmologi.

Storskala-strukturerne har vist sig at være meget

fascinerende på mere end én måde. Ikke nok med at galakserne danner mærkværdige mønstre med gab, mure og filamenter, der er ufatteligt store, så har disse mønstre vist sig at bære vidnesbyrde om at universet indholder endnu mere mærkværdige fænomener som den kosmologiske konstant og mørkt stof. Hvilke andre hemmeligheder mon disse strukturer kan bære på?



Figur 9. Bestemmelse af b og Ω_m ud fra ~ 300 galaksehobe i SDSS commissioning data. Figuren viser konturerne for en og to standardafvigelser resulterende fra to forskellige analysemetoder. Den stiplede linie viser det bedste fit til relationen $\Omega_m^{0.6} = \text{konstant} \cdot b$, hvor konstanten er bestemt til 0.33 ± 0.03 . Den sorte cirkel og trekant viser det optimale fit for henholdsvis metode 1 og 2. [12].



Figur 10. Fejlkonturer (1 og 2 standardafvigelser) for Ω_m og Ω_Λ bestemt ud fra forskellige målinger: Supernovæer (grøn), den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling (rød), den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling og Hubble rumteleskopets Key Project (blå), hvis formål det er at bestemme Hubble konstanten, og alle de foregående (gul) [13].

Boks 3. Mørkt stof og kosmologiske modeller

De mest lovende modeller for strukturdannelse indeholder en eller anden form for koldt, mørkt stof; Cold Dark Matter – CDM. Med "koldt" mener man at det mørke stof meget tidligt i universets udvikling kommer ned på at bevæge sig med hastigheder meget mindre end lysets.

Det mørke stof er en stor gåde for astronomerne. Det kaldes "mørkt", fordi det består af partikler, der ikke kan vekselvirke ved hjælp af den elektromagnetiske kraft og udsende fotoner. Så det mørke stof er altså ikke mørkt fordi det er en kold gas, som ikke lyser, men fordi det simpelt hen ikke kan lyse. Det er i sig selv ikke bekymrende, for man kender mange eksempler på partikler, som ikke vekselvirker elektromagnetisk (for eksempel neutrinoer.) Problemet er at observationer af blandt andet storskala-strukturer peger på at omkring 90% af al massen i universet skal bestå af mørkt stof. Det har man svært ved at få til at passe med kendte partikler.

Λ CDM: Denne model har en kosmologisk konstant, der er forskellig fra nul (derfor Λ), samt koldt, mørkt stof. Modellen har $\Omega_m = 0.3$ og $\Omega_\Lambda = 0.7$.

SCDM: Standard Cold Dark Matter. Igen koldt, mørkt stof, blot er nu $\Omega_m = 1$ og $\Omega_\Lambda = 0$. For 10 år siden betragtede man denne model som den mest lovende.

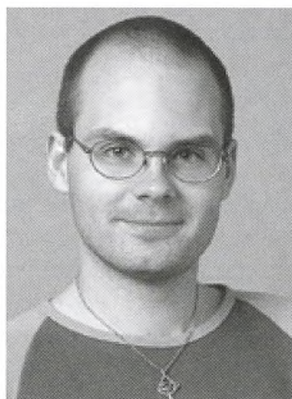
τ CDM: Her består det kolde, mørke stof af neutrinoer, som kan henfalde. $\Omega_m = 1$ og $\Omega_\Lambda = 0$.

OCDM: Open Cold Dark Matter. Dette er en model af et åbent univers med koldt, mørkt stof. $\Omega_m = 0.3$ og $\Omega_\Lambda = 0$.

Referencer:

- [1] O. Pedersen og H. Kragh (2000) *Fra KAOS til KOSMOS*. Gyldendal, 2000.

- [2] URL: http://antwpr.gsfc.nasa.gov/diamond_jubilee/debate20.html
- [3] J. Huchra, M. Davis, D. Latham og J. Tonry (1983) A survey of galaxy redshifts. IV - The data. *Astrophysical Journal Supplement Series*, **52**, 89.
- [4] L. N. da Costa (1998) Galaxy redshift surveys: 20 years later. In *MPA/ESO Conference "Evolution of Large Scale Structure"*, Garching.
- [5] S. A. Shectman, S. D. Landy, A. Oemler, D. L. Tucker, H. Lin m.fl. (1996) The Las Campanas Redshift Survey. *Astrophysical Journal*, **470**, 172.
- [6] M. M. Colless (2002) URL: <http://msowww.anu.edu.au/2dFGRS/>
- [7] C. Stoughton, R. H. Lupton, M. Bernardi, M. R. Blanton, S. Burles m.fl. (2002) Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release. *Astronomical Journal*, **123**, 485.
- [8] J. P. U. Fynbo og P. Møller (2000) Galakser i det tidlige univers i: Lyman-kanten. *Kvant*, **4**, 22.
- [9] A. Jenkins (2002) URL: <http://star-www.dur.ac.uk/~frazerp/virgo/virgo.html>
- [10] A. Jenkins, C. S. Frenk, F. R. Pearce, P. A. Thomas, J. M. Colberg m.fl. (1998) Evolution of Structure in Cold Dark Matter Universes. *Astrophysical Journal*, **499**, 20.
- [11] T. Theuns, privat kommunikation.
- [12] N. A. Bahcall, F. Dong, P. Bode, R. Kim, J. Annis m.fl. (2002) The Cluster Mass Function from Early SDSS Data: Cosmological Implications. *Astrophysical Journal*, **585**. under trykning, astro-ph/0205490.
- [13] A. Lewis og S. Bridle (2002) Cosmological parameters from CMB and other data: a Monte-Carlo approach. under trykning, astro-ph/0205436.



Michael Weidinger er Ph.D.-studerende i astronomi ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

KVANT-nyheder

Redigeret af Michael Cramer Andersen

Exoplanet-jagt på La Silla

PLANETFYSIK. Et nyt instrument, "HARPS-spektrografen", til måling af stjerners radialhastigheder er netop blevet monteret på ESOs 3,6 m teleskop på La Silla i Chile. Små periodiske ændringer i en stjernes radialhastighed (hastighed i synsretningen) har i de senere år ført til detektion af knap 100 planeter uden-

for Solsystemet, de såkaldte exoplaneter eller planeter der kredser omkring andre stjerner. Når en (stor) planet kredser (tæt) omkring en anden stjerne vil stjernens slingre lidt og det kan aflæses i stjernens radialhastighed. Alle hidtil fundne planeter regnes for at være store gasgiganter idet de har masser fra ca. 1/8 til 17 gange Jupiters masse hvor Jorden kun vejer 1/318 af Jupiter.

Følsomheden af det nye instrument som netop har haft "first light" er så stor, at det i princippet er muligt at finde planeter så små som Jorden hvis de ikke er for