

# Fra Tycho Brahe til nye overraskelser i kosmologien

Charles Louis Steinhardt, Niels Bohr Institutet

Da Tycho Brahe i 1572 opdagede en “ny stjerne”, tvang det astronomerne til at genoverveje deres grundlæggende opfattelse af himlen. Inden for blot et enkelt århundrede ændrede den videnskabelige konsensus om forståelsen af vores plads i universet sig fuldstændigt. I de sidste 25 år har nye supernovaobservationer givet os en lige så fundamental ændring i vores forståelse af kosmologien. Yderligere er der antydninger af, at flere overraskelser kan være på vej.

På mange måder begynder den moderne kosmologis historie i slutningen af 1920'erne med opdagelsen af, at universet udvider sig. I 1929 udgav Edwin Hubble en banebrydende artikel, der viste, at alle fjerne galakser er på vej væk fra os, og jo fjernere galaksen er, desto hurtigere bevæger den sig fra os. Denne såkaldte Hubble-Lemaître-lov var den første centrale observation, der førte til Big Bang-teorien og vores nuværende konsensusteori om universets historie. Universets ekspansionshastighed lige nu er beskrevet af Hubble-konstanten, som er cirka 70 km/s/Mpc.

Hubbles måling af ekspansionshastigheden var imidlertid 500 km/s/Mpc, og derfor forkert med næsten en faktor ti! Hvorfor begik Hubble så stor en fejl? En måling af ekspansionshastigheden forudsatte, at han kunne finde forholdet mellem hastighed og afstand. At måle hastighed er en af de nemmeste opgaver i astronomi. På grund af Doppler-effekten er lyset, som vi observerer fra en fjern galakse, forskudt i bølgelængde. Ved at sammenligne bølgelængderne af emissionen fra fx brint i en fjern galakse med brints bølgelængder målt i laboratoriet, kan vi nemt beregne hastigheden. Fordi alle fjerne objekter bevæger sig væk fra os, flytter deres lys sig mod længere – og dermed mere røde – bølgelængder. Således beskriver astronomer typisk ikke afstanden til et fjernt objekt i enheder af kilometer eller lysår, men i stedet ved objektets “rødforskydning”, da det er præcis, hvad der bliver målt.

## Vanskelige afstandsmålinger

Til gengæld har afstand historisk set været en af de sværeste egenskaber at måle for astronomer, og det var afstandsmålingerne, der fik Hubble til at måle så forkert. Tycho Brahe bidrog selv til vigtige tidlige fremskridt i måling af afstande til objekter i vores solsystem. I 1577 brugte han de små variationer i en kometes position, som skyldes Jordens kredsløb om Solen, til at vise, at kometen var længere væk end Månen – en teknik, som kaldes parallakse. Det tog dog yderligere 250 år, før det var muligt at måle parallaksen af blot en nærliggende stjerne. Vi kan stadig ikke måle parallaksen af fjerne galakser, fordi parallaksen er meget lille og omvendt proportional med afstanden.

<sup>1</sup>Afstanden i et ekspanderende univers er ret kompliceret, fordi afstanden til et objekt nu, afstanden på det tidspunkt, hvor lyset blev udsendt, og afstanden, som lyset rejste fra det objekt til os, alle er forskellige. Denne afstand kaldes luminositetsafstanden, da det lys, vi observerer, er den samlede luminositet spredt ud over en kugle med denne afstand som radius.

<sup>2</sup>Det specielle ved cepheider er, at deres variable periode afhænger af deres luminositet, så ved at måle perioden samt den tilsyneladende lysstyrke kan man udlede deres afstand.

Moderne teknikker til afstandsmåling er i stedet afhængige af “standardlyskilder”. Antag, at vi tager identiske lyspærer og placerer dem i forskellige afstande. Jo længere væk vi sætter hver lyspære, jo svagere bliver den, og dens tilsyneladende lysstyrke falder med kvadratet på afstanden. Hvis man kender den samlede energiudsendelse, kaldet luminositeten, kan vi bruge dette til at beregne afstanden.<sup>1</sup> I 1908 opdagede den amerikanske astronom Henrietta Leavitt et forhold, der lod hende beregne luminositeten af en type variable stjerner kaldet cepheider.<sup>2</sup> Hubble brugte dette forhold i sit arbejde to årtier senere.



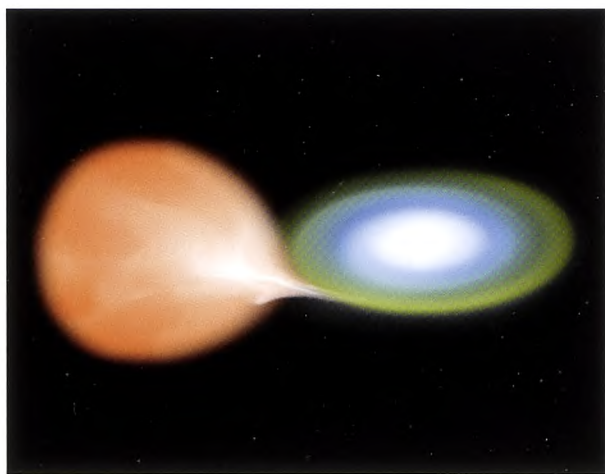
Figur 1. RS Puppis er en af de klareste kendte cepheider i Mælkevejen. (ESA/Hubble).

## Supernovaer som standardlyskilder

Selv med vores kraftigste teleskoper kan vi ikke se individuelle stjerner i fjerne galakser, i hvert fald ikke under normale omstændigheder. Når stjerner eksploderer, kan supernovaen dog i kort tid lyse kraftigere end hele resten af dens værtsgalakse således, at vi kan se dem. Selvfølgelig vil en tungere stjerne producere en større og mere

energigig eksplosion, ligesom stjerner har forskellige masser. Så umiddelbart lyder en supernova måske ikke som en særlig god kandidat til en standardlyskilde.

Vi har dog en god løsning. Der eksisterer en minimumsmasse, som er nødvendig for at producere en supernova. Stjerner med lavere masse, ligesom Solen, vil med tiden blive til en hvid dværg. En hvid dværg er en særlig type død stjerne. I en normal stjerne er den enorme tyngdekraft, der komprimerer stjernen, balanceret af det enorme udadgående tryk fra strålingsproduktionen fra fusion i dens kerne. Når kernen løber tør for brændstof og ikke længere kan undergå fusion, komprimerer tyngdekraften den så meget som muligt. Kvantemekanikken fortæller, at der er en grænse for, hvor tæt vi kan pakke elektroner. Ved denne grænse vil elektronerne modvirke tyngdekraften for at forhindre, at de bliver yderligere komprimeret. Det resulterende såkaldte degenerationstryk forhindrer en hvid dværg i at kollapse helt, men kun når den er meget, meget kompakt. Når Solen bliver en hvid dværg, vil dens radius omtrent svare til Jordens.



**Figur 2.** Illustration viser, hvordan gas strømmer fra den store røde ledsagerstjerne ind i en skive og derefter ind på den hvide dværg, der er gemt inde i det hvide område. Efterhånden som gassen strømmer stadig tættere på den hvide dværg, bliver den stadig varmere, og farven ændrer sig fra gul til hvid. Når en tilstrækkelig mængde gas har samlet sig på den hvide dværgstjerne, vil den gennemgå en termionuklear eksplosion, der vil udstøde stjernens yderste lag i et nova-udbrud. (NASA/CXC/M.Weiss)

Hvis den hvide dværg er en del af et dobbeltstjernesystem, kan den få tilført masse fra sin ledsager. Hvis dværgen tilføres for meget masse, kan tyngdekraften blive så stærk, at degenerationstrykket ikke længere er nok til at forhindre stjernen i at implodere. Hvis den hvide dværg når denne såkaldte Chandrasekhar-grænse, som er 1,44 gange Solens masse, hvilket er den maksimale grænse for en hvid dværg, eksploderer den som en Type Ia-supernova. Fordi supernovaen udløses ved at nå denne kritiske masse, burde alle Type Ia-supernovaer være meget lig hinanden. Så i de sidste tre årtier har vi brugt Type Ia-supernovaer som standardlyskilder.

Resultaterne har indvarslet en revolution, der er lige så betydningsfuld som den, der blev udløst af Hubble og Tycho Brahe. Da jeg først lærte om kosmologi

som studerende, troede vi, at vi omsider forstod alle de vigtige dele af universets historie. Efter Big Bang udvidede universet sig med en enorm hastighed. På den allerstørste "universelle" skala, behøver vi kun tænke på tyngdekraften, som forsøger at trække alt sammen igen og bremse udvidelsen. Det eneste tilbageværende store spørgsmål var, om tyngdekraften ville vinde, og universet til sidst ville smelte sammen igen i et Big Crunch, eller om tyngdekraften ville tabe, og universet ville blive ved med at udvide sig, langsommere og langsommere, for altid.

### Stigende ekspansionshastighed

Hvad Type Ia-supernovaerne i stedet viste os, var, at ekspansionshastigheden faktisk er stigende. Der skal være en endnu stærkere frastødende kraft end tiltrækningskraften fra tyngdekraften, og den frastødende kraft vinder. Vi ved nu, at såkaldt mørk energi udgør næsten 70% af universets energi i dag. Vi tror også, at mørk energi kun kan komme til at udgøre en større andel, efterhånden som universet fortsætter med at udvide sig, så til sidst vil næsten det hele være mørk energi. Dette gør, at fremtiden for vores univers er overraskende dystert: det vil fortsætte med at udvide sig hurtigere og hurtigere, udtømme sig selv og blive et koldt, mørkt sted. Eller vil det?

I de seneste par år er vi blevet meget bedre til at finde Type Ia-supernovaer, som sætter os i stand til at måle Hubble-konstanten mere og mere præcist. Opdagelsen af mørk energi i 1997 kom fra blot 46 Type Ia-supernovaer, men i dag har vi et katalog på næsten 2500. Og med alle disse ekstra observationer og de stadig mere præcise målinger af Hubble-konstanten har vi fået farten af en ny overraskelse.

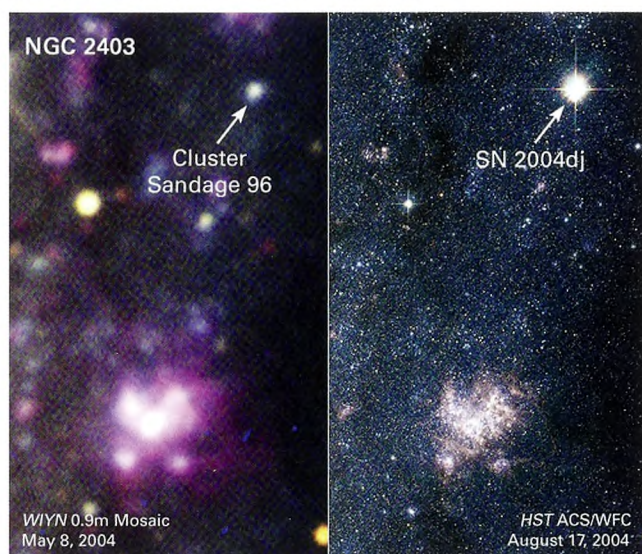


**Figur 3.** Resterne af en Type Ia-supernova, G299.2-2.9, der eksploderede for ca. 4.500 år siden i Mælkevejen. Billedet er optaget i røntgenområdet med NASA's Chandra-røntgenobservatorium. (NASA/CXC/U.Texas)

Supernova-målinger viser, at Hubble-konstanten er  $73 \pm 1$  km/s/Mpc. Men vi kan også bruge den fjerde stråling i universet, den kosmiske mikrobølge-

baggrundsstråling (CMB på engelsk), til at beregne ekspansionshastigheden på en anden måde. CMB-observationer fortæller os om det meget tidlige univers. Hvis vi bruger vores nuværende model for mørk energi, kan vi spole tiden frem med de generelle relativistiske ligninger for at beregne ekspansionshastigheden i dag. Planck-satellitens målinger giver en Hubble-konstant på  $67 \pm 1$  km/s/Mpc. Dette er tæt på de lokale supernovamålinger, men ikke helt det samme: det ser ud til, at noget er en lille smule forkert, og afvigelsen er statistisk signifikant.

En mulighed er, at der stadig er problemer med vores afstandsmålinger. Det er et godt gæt, for dette har været problemet i meget af astronomiens historie. Måske er en Type Ia-supernova ikke helt så en god standardlyskilde, som vi tror. Eller måske har vi ikke kalibreret dem korrekt, og de er en lille smule mere energirige, end vi tror. Eller måske er det CMB-målingerne, der er forkerte. Forskergrupper verden rundt arbejder nu på at finde ud af, om det er måleproblemer, der har forårsaget denne såkaldte Hubble-kontrovers. Flere af disse grupper ledes af forskere ved Niels Bohr Institutet.



**Figur 4.** Billedet til venstre repræsenterer et lille område af galaksen NGC 2403, taget to måneder før en massiv stjerne eksploderede i 2004, kendt som supernova 2004dj, på billedet til højre. Stjernen befinder sig i en hob af massive, generelt blå (men nogle røde) stjerner kaldet Sandage 96. Stjernerne i denne hob er så langt væk, at deres lys fremstår som lyset fra en enkelt stjerne. Det gule objekt under og til venstre for hoben er en forgrundsstjerne i vores Mælkevejsgalakse. Det lyserøde område nederst er en stjernefødselsregion. (ESA/Hubble).

### Mørk energi måske ikke så simpel

Hvis imidlertid begge målinger er korrekte, kan det i stedet betyde, at mørk energi ikke er helt så simpel, som vi har antaget. Faktisk havde forskere, selv før denne Hubble-kontrovers begyndte at blive et problem, foreslået, at mørk energi kunne være mere kompliceret.

Alt, hvad vi ved om mørk energi, fortæller os om dens effekter i fortiden, ikke i fremtiden. At forudsige fremtiden kræver at vide, hvad mørk energi faktisk er. En hypotese, kaldet kvintessens, antyder, at mørk energi var meget anderledes tidligt i universet, da det var kun var en lille smule af universets energi, end senere hvor det er det meste af energien. I så fald kan den fremtidige effekt være meget anderledes end den fortidige.

Når vi har mange mulige modeller at vælge imellem, som alle stemmer overens med alt, hvad vi observerer, forsøger vi ofte at vælge den enkleste model. Den enkleste model for mørk energi er så ligetil, som enhver model kunne være: bare en konstant. Før Hubbles opdagelse havde Albert Einstein introduceret en “kosmologisk konstant”,  $\Lambda$ , for at skabe et statisk og uændret univers. Men man indså senere, at denne konstant også var den enkleste måde at producere den acceleration, vi observerer i dag. Vores standard kosmologiske model,  $\Lambda$ CDM, antager, at mørk energi er en konstant.<sup>3</sup> Da en konstant selvfølgelig vil være ens til enhver tid, betyder det, at fremtiden er den samme som fortiden: accelereret ekspansion, hurtigere og hurtigere, for altid.

Så det betyder, at udbyttet fra Hubble-kontroversen er enorm: intet mindre end universets fremtid. Hvis begge målinger er korrekte, er  $\Lambda$ CDM derfor forkert. Så ville vi have brug for en anden model, og vores forudsigelser om fremtiden ville sandsynligvis ændre sig. I så fald vil det, 450 år efter Tycho's opdagelse og 25 år efter, at supernovaer første gang viste os, at det meste af universet består af mørk energi, kunne betyde, at vi nærmer os tidspunktet for endnu en stor overraskelse om vores univers.

### Litteratur

- [1] A.C. Andersen (2016) “En lille bog om universet”, Lindhard og Ringhof.
- [2] T. Davis (2005) “Misconceptions about the Big Bang”, *Scientific American*, bind 292, nr. 3, side 36–45. [www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/LineweaverDavisSciAm.pdf](http://www.mso.anu.edu.au/~charley/papers/LineweaverDavisSciAm.pdf)
- [3] B. Ryden (2002) “Introduction to Cosmology”, Cambridge University Press.



*Charles Louis Steinhardt* er lektor ved Cosmic Dawn Center og Niels Bohr Institutet. Meget af hans forskning fokuserer på galakseudvikling og på de tidligste galakser. Fordi astronomi bruger enorme datasæt, forsker han også i maskinlæring og astrostatistik. Han afholder også et internationalt sommerforskningsprogram for bachelorstuderende på NBI.

<sup>3</sup> $\Lambda$ CDM har to komponenter.  $\Lambda$  er selvfølgelig denne kosmologiske konstant. CDM er en forkortelse for “koldt mørkt stof” på engelsk, som er den mest simple mulige model for mørkt stof.