

Universet bliver mørkere og mørkere

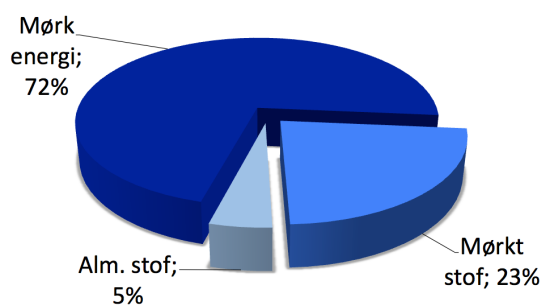
Af Signe Riemer-Sørensen, School of Physics and Mathematics, University of Queensland og Tamara Davis, School of Physics and Mathematics, University of Queensland samt Dark Cosmology Centre, Københavns Universitet

Mørk energi er en af den moderne fysiks største mysterier. Ved at accelerere Universets udvidelse, bestemmer det Universets skæbne. Alligevel har vi ingen idé om dets natur eller identitet.

Universets indhold

Alt hvad vi kender fra vores dagligdag er opbygget af almindeligt eller såkaldt baryonisk stof. Vi har en temmelig god forståelse for, hvordan baryonisk stof opfører sig. Det gælder fra de allermindste skalaer, hvor kvantemekanik gør sig gældende, til store afstande såsom planetbaner. Vi kan manipulere det almindelige stof og konstruere komplicerede systemer f.eks. computere, mobiltelefoner og andre elektroniske gadgets, der dominerer vores hverdag. Alt i alt går mange rundt med den opfattelse, at vi forstår verden omkring os ret godt... Det er bare ikke tilfældet!

Når vi kigger på det samlede indhold i hele Universet (se figur 1), udgør det baryoniske stof kun ganske få procent. Det er planeterne, stjernerne, gasskyerne, rumskibene mv., nemlig alt det vi kan observere direkte, fordi det udsender eller reflekterer elektromagnetisk stråling (lys). Resten er mørkt stof og mørk energi, hvilket er navne der dækker over det faktum, at vi ikke har den fjerneste ide om, hvad der ligger bag. Man skal passe på ikke at sammenblende de to udtryk, da det eneste de har tilfælles er "mørk" i navnet. Mørkt stof bidrager med ekstra tyngdekraft, som muliggør dannelsen og eksistensen af stjerner og galakser. Mørk energi har den stik modsatte effekt, nemlig en slags anti-tyngdekraft, som får Universet til at udvide sig hurtigere og hurtigere.



Figur 1. Universets samlede indhold. Kun ganske få procent er almindeligt baryonisk stof, som vi kender det fra Jorden, planeter, stjerner mv. Resten er mørkt stof og mørk energi.

Universets skæbne

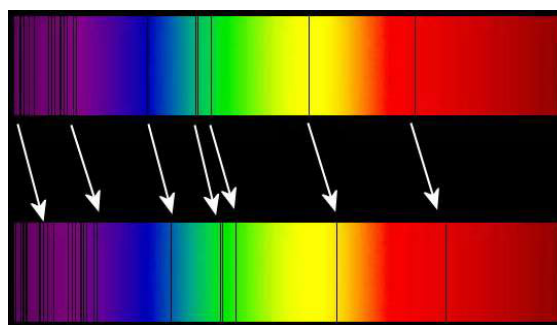
Hvorfor er det vigtigt at bruge millioner af kroner på at måle egenskaberne af mørk energi? Fordi Universets skæbne er tæt knyttet til disse egenskaber! For at

forstå hvordan, starter vi med en lille introduktion til nogle af kosmologiens grundudtryk: Rødforskydning og Friedmann-ligningen.

Hvis man kigger på spektret af lys fra f.eks. galakser, er de observerede bølgelængder længere end tilsvarende spektra produceret i laboratorier på Jorden (se figur 2). Effekten kaldes rødforskydning og kan skrives som:

$$z = \frac{\lambda_{\text{observeret}} - \lambda_{\text{udsendt}}}{\lambda_{\text{udsendt}}}, \quad (1)$$

hvor z er rødforskydningen og λ er bølgelængden.



Figur 2. Rødforskydning af et observeret spektrum (nederst) relativt til samme spektrum i et laboratorie (øverst), (Harold T. Stokes og Ian Tresman).

Den amerikanske astronom Edwin Hubble tillægges ofte æren for at have målt rødforskydningen af fjerne galakser i 1930-erne, hvilket ledte til konklusionen, at Universet udvider sig og dermed hele Big Bang teorien. Historisk set var det faktisk amerikaneren Vesto Slipher, der målte rødforskydningerne, men Hubble og hans kollega Milton Humason formulerede det, der siden hen blev kendt som Hubbles lov, nemlig at en galakses hastighed væk fra os, v , er proportional med dens afstand, d . Det kan skrives som:

$$d = \frac{v}{H_0} \cong \frac{zc}{H_0}, \quad (2)$$

hvor H_0 er udvideshastigheden i dag (normalt målt i km/s/Mpc). Det sidste lighedstegn fremkommer ved at udtrykke galaksens hastighed i brøkdeler af lysets hastighed $c = 3 \times 10^8$ m/s og gælder kun for $z \ll 1$. Rødforskydningen er defineret så $z = 0$ i dag og positiv ud i Universet dvs. bagud i tid. Til at beskrive udvidelsen af en given længde som funktion af Universets alder introducerer man skala-faktoren, a , som $1/a = 1 + z$.

I takt med at Universet udvider sig, fortyndes energitætheden af indholdet. Almindeligt stof fortyndes

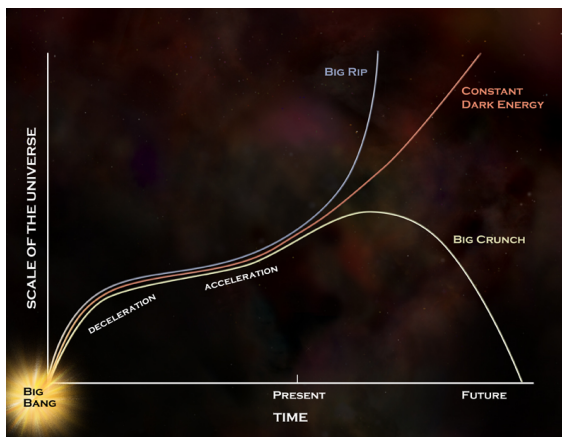
proportionalt med volumen, så udviklingen af energitætheden er givet ved $\Omega^{stof}(t) = \Omega_0^{stof}/a^3$, hvor Ω_0^{stof} er energitætheden i dag. Det forholder sig anderledes med fotoner, som fortyndes med $1/a^4$ og den mørke energi fortyndes slet ikke, da den er knyttet til det tomme rum! Universets udvidelse kan beskrives med Friedmann-ligningen der kan udtrykkes som:

$$\frac{\left(\text{Udvidelses-hastighed}\right)^2}{\left(\text{Udvidelses-hastighed i dag}\right)^2} = \left(\text{Summen af energitætheden}\right), \quad (3)$$

hvor energitæthederne, der skal summeres over, er stråling (dvs. lys), stof (både baryonisk og mørkt stof), mørk energi og rumtidens krumning. På matematisk form ser Friedmann-ligningen således ud:

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_0^{\text{stråling}}}{a^4} + \frac{\Omega_0^{\text{stof}}}{a^3} + \Omega_0^{\text{mørk energi}} + \frac{(\Omega_0^{\text{total}} - 1)}{a^2}, \quad (4)$$

hvor Ω_0 'erne er energitæthederne, målt i dag, for henholdsvis stråling, stof, mørk energi og rumtidens krumning givet i enheder af den kritiske tæthed, der er nødvendig for et Univers med flad rumtidsgeometri (dvs. $\Omega_0^{\text{total}} = 1$, så det sidste led bliver nul). Det ses af Friedmann-ligningen, at Universets skæbne er tæt forbundet til dets indhold (de tre første led) og til rumtidsgeometrien (det sidste led). Afhængig af den mørke energis egenskaber vil Universet enten udvide sig for evigt eller begynde at trække sig sammen (se figur 3).



Figur 3. Universets skæbne er tæt forbundet med dets indhold og rumtidsgeometri. Hvorvidt det vil udvide sig for evigt eller trække sig sammen igen afhænger bl.a. af den mørke energis egenskaber (Chandra/NASA).

Supernovaer afslører accelererende udvidelse

Mørk energi (i den nuværende form) blev introduceret i Friedmann-ligningen i slutningen af 1990'erne efter den overraskende opdagelse, at Universets udvidelse accelererer. I 1998 publicerede to uafhængige forskergrupper observationer af supernovaer af den såkaldte

type 1a. Denne type supernovaer er standardlyskilder, idet de skyldes stjerner der eksploderer med samme lysstyrke hver gang, hvormed deres observerede lysstyrke afhænger af deres afstand til Jorden (se figur 4). Samtidig er supernovaerne meget kraftige, så de kan observeres i fjerne galakser (se figur 5).



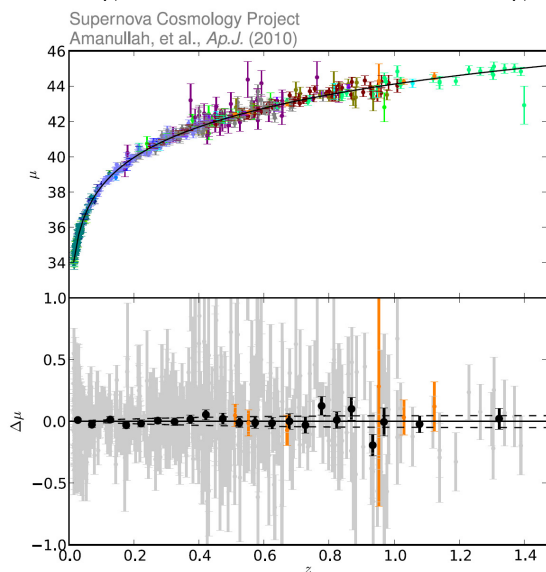
Figur 4. Standardlyskilder. Jo længere væk lyset er, jo svagere ser det ud, selv om hvert lys lyser lige meget (www.universeadventure.org).



Figur 5. Billede fra Hubble Rumteleskopet af en supernova i udkanten af galaksen NGC 4526. Supernovaer er så kraftige, at de kan observeres i fjerne galakser og type 1a er en standardlyskilde (NASA/ESA).

Man kan også udlede afstanden til supernovaerne fra rødforskydningen i ligning (2). De to afstandsmål kan sammenlignes i et såkaldt Hubble-diagram (se figur 6), hvor man plotter den målte lysstyrke som funktion af rødforskydningen. Begge er proportionale med afstand, så man forventer en ret linie, hvis Universet udvider sig med konstant hastighed. I det nære Univers ($z < 0,1$) er sammenhængen tilnærmelsesvis retlinet,

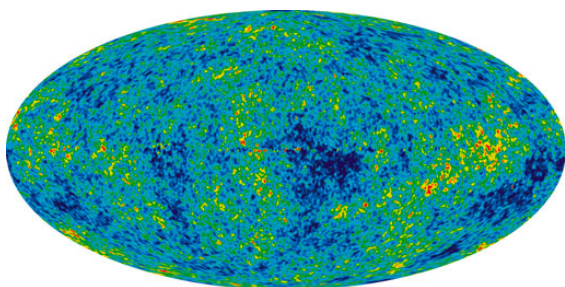
og vi genfinder Hubbles lov (ligning (2)). Længere væk afhænger sammenhængen af, hvordan udvidelseshastigheden ændres. Hvis man sammenligner med teoretiske forudsigelser for den forventede lysstyrke som funktion af rødforskydning, kan man bestemme, hvor meget Universets udvidelse skal accelerere for at forklare afvigelsen fra den lineære sammenhæng.



Figur 6. Øverst: Et Hubble-diagram hvor lysstyrken (op er svagere) plottes som funktion af rødforskydningen. Den optrukne linie viser den teoretiske forudsigelse, hvis Universets udvidelse accelererer. Nederst: Forskellen mellem de målte lysstyrker og den teoretiske forudsigelse (Supernova Cosmology Project, supernova.lbl.gov).

Mørk energi og andre observationer

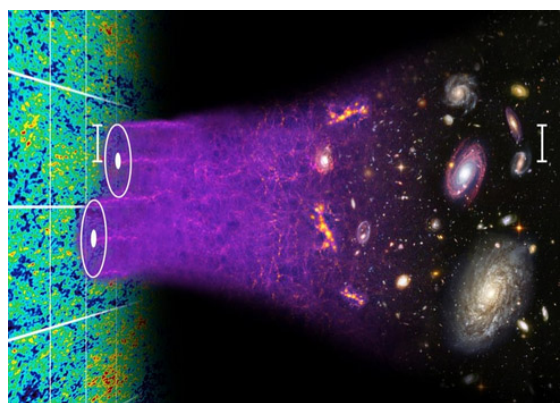
Mørk energi blev hurtigt en populær forklaring på den tilsyneladende acceleration, fordi det samtidig kan forklare et par andre uløste gåder. Målinger af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling viser, at Universet har en flad rumtidsgeometri. For at opnå denne flade geometri skal Universet have en kritisk energitæthed. Energitætheden af stof (både almindeligt og mørkt stof) kan også måles fra den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling. Resultatet er, at stof kun kan udgøre ca. 30% af den kritiske energitæthed. Det indikerer, at de sidste 70% må udgøres af en ny og ukendt form for energi med andre egenskaber end stof.



Figur 7. Kortlægning af temperaturfluktuationer i den kosmiske mikrobølgebaggrund målt med Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. Temperaturfluktuationerne giver information om rumtidsgeometrien og energitætheden af stof i Universet (WMAP/NASA).

Baryoniske akustiske oscillationer

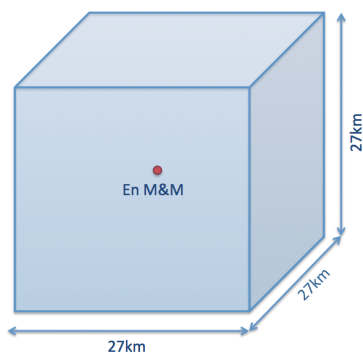
En af de nyeste metoder til at undersøge mørk energi er observationer af de såkaldte baryoniske akustiske oscillationer. De er en slags standardmålestok, som har samme længde ved alle afstande, og derfor vil se mindre og mindre ud, jo længere væk de observeres (ligesom type 1a supernovaer er standardlyskilder). De baryoniske akustiske oscillationer er rester fra udbredelsen af lydølger i det meget tidlige Univers. Som følge af Universets udvidelse faldt tætheden, og eftersom lydølger ikke kan udbredes i vakuum, fastfros lydølgerne i gassen, hvorved der opstod bølger i masse-tætheden. Med tiden kollapsede de tætte områder fra bølgetoppene og dannede galakser. Derfor er der et underliggende mønster i galaksefordelingen i dag, som afspejler lydølgerne i det tidlige Univers. Tredimensionelle galaksekort (se figur 11) giver os mulighed for at studere galaksefordelingen og dermed udlede Universets udvidelseshistorie samt egenskaberne af den mørke energi.



Figur 8. De baryoniske akustiske oscillationer er rester af lydølger, der fastfros da tætheden af Universet faldt så meget, at de ikke længere kunne udbredes. De udgør en standardmålestok, som har samme længde ved alle afstande (WiggleZ Dark Energy Survey [4]).

Mørk energis egenskaber

Fra observationer af supernovaer, den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling og de baryoniske akustiske oscillationer kan vi udlede nogle generelle egenskaber for den mørke energi. Først og fremmest skal den, som navnet antyder, være mørk. Det betyder, at den mørke energi ikke må vekselvirke med fotoner eller nogle af de andre almindelige partikler andet end via tyngdekraft. Samtidig fortæller den kosmiske mikrobølgebaggrund os, at mørk energi ikke kan være stof. Faktisk skal den have en effekt stik modsat tyngdekraft, som ofte udtrykkes som et negativt tryk, for at forklare den accelererende udvidelse. Den målte energitæthed af mørk energi er ca. 10^{-12} kJ/m³. Det svarer nogenlunde til kalorieindholdet i en enkelt M&M (ca. 20 kJ) jævnt fordelt i en terning med sidelængder på 27 km. Så lav en energitæthed er svær at måle i laboratorier og den eneste grund til, at mørk energi er så vigtig, er den enorme udstrækning af Universet.



Figur 9. Energitætheden af mørk energi svarer til kalorieindholdet i en M&M jævnt fordelt i en terning med sidelængder på 27 km.

I Einsteins generelle relativitetsteori bidrager trykket fra en komponent til dens gravitationelle tiltrækning gennem den såkaldte energi-stress tensor, som er givet ved komponentens masse, energi, tryk og viskositet. For den nuværende beskrivelse af rumtidsgeometrien (Friedmann-Robertson-Walker metrikken), udløser tilstedeværelsen af et konstant negativt tryk en accelererende udvidelse, hvis Universet allerede udvider sig, og en deceleration af hastigheden, hvis Universet allerede trækker sig sammen. Sammenhængen mellem tætheden, ρ , og trykket, p , af en komponent er givet ved tilstandsligningen:

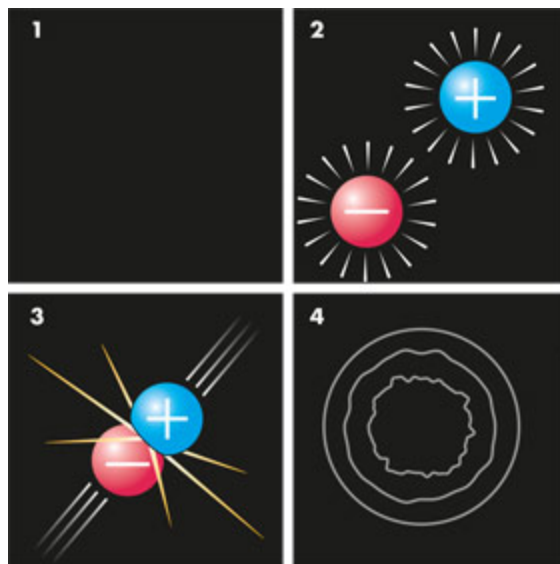
$$p = w\rho, \quad (5)$$

hvor w er en konstant, der varierer fra komponent til komponent. For at opnå en accelererende udvidelse skal den mørke energi have $w < -1/3$. Observationer af den kosmiske mikrobølgebaggrund peger mod en konstant værdi på $w = -1$ for mørk energi med en usikkerhed på mindre end 10 %.

Mørk energis natur

Hvad er den mørke energi? Der er flere teoretiske ideer til at forklare identiteten af den mørke energi. De fleste af dem falder inden for to kategorier: En kosmologisk konstant som er konstant over tid og sted, eller en dynamisk størrelse, som kan variere.

Et eksempel fra den første kategori af kosmologiske konstanter er vakuumergi. Fra kvantemekanikken ved vi, at vakuum ikke bare er et kedeligt ingenting. Det består af små energifluktuationer som skyldes usikkerhedsprincippet: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h = \text{konstant}$. Det betyder at partikel-antipartikel par kan låne en lille smule energi, ΔE , fra vakuum til at eksistere et kort tidsrum, Δt , hvis bare de annihilerer tilstrækkelig hurtigt (se figur 10). Det virker oplagt at sådanne fluktuationer kan forklare den mørke energi. Hvis man regner efter, viser det sig dog, at energitætheden af den mørke energi er 10^{120} gange mindre end den tæthed kvantemekanikken forudsiger for vakuumergi. Det kan formentlig beskrives som den største uoverensstemmelse i fysikkens historie, og hvis mørk energi og vakuumergi er det samme, så er der stadig noget, vi ikke har forstået.



Figur 10. Illustration af vakuumergi: 1. Vakuuum. 2. Et partikel-antipartikel par opstår fra vakuuum. Alle kvantetal, på nær energi, er bevarede. 3. Partiklerne annihilerer og leverer deres energi tilbage til vakuuum. Hvis det sker tilstrækkeligt hurtigt, sikrer usikkerhedsprincippet at energien er bevaret. 4. Annihilationen efterlader bølger i rumtiden (Illustration Tim Jones).

Et eksempel fra den anden kategori af tids- og stedvarierende mørk energi er et endnu uidentificeret skalarfelt. Et skalarfelt er en størrelse som er defineret i hvert punkt i rummet ved en enkelt værdi. Temperatur og tyngdepotentialer er eksempler på sådanne størrelser. De har en værdi i alle punkter, men f.eks. ikke nogen retning. Hvis mørk energi er relateret til et skalarfelt, kan det variere i tid og sted, hvilket komplicerer sagen noget. Hvis skalarfeltet ikke varierer eller kun varierer ganske langsomt, vil dets egenskaber ligne en kosmologisk konstant, og det er svært at skelne mellem de to teorier. Umiddelbart er der ingen observationer, der tyder på variation og det almindeligt accepterede kosmologiske paradigme, kaldt Lambda Cold Dark Matter (eller bare Λ CDM), er baseret på en kosmologisk konstant.

Andre forklaringer

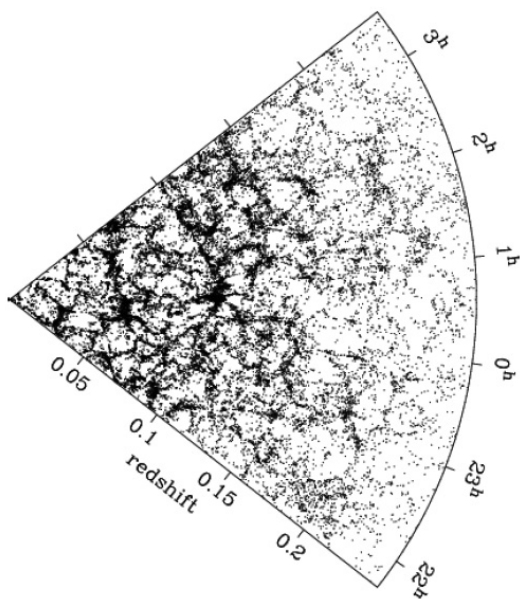
Det kan også tænkes at beskrivelsen af mørk energi ikke kræver nogen ny opdagelse, men at den observerede effekt skyldes, at vi gør forkerte antagelser om Universet. En af basis-antagelserne bag Friedmann-ligningen (ligning (4)) er, at Universet er homogent og isotropt. Med andre ord betyder det, at Universet ser ens ud over det hele. Fra tredimensionelle galaksekort (se figur 11), kan vi se, at Universet har samme struktur som en hullet ost med store tomrum i galaksefordelingen. Præcis hvor meget denne uhomogenitet betyder for præcisionen af Friedmann-ligningen, er endnu uvist.

Hvis vi tilfældigvis befinder os midt i et af tomrummene, kan det faktisk have samme effekt på vores observationer som en accelererende udvidelse. Det er meget svært at skelne mellem de to scenarier, men for at kunne efterligne en accelererende udvidelse, skal vi befinde os meget nær centrum af et kugleformet

tomrum, hvilket mange astrofysikere mener kræver en unaturlig tilpasning af teorien.

En lignende teori er, at selv om den overordnede rumtidsgeometri er flad, så kan rumtiden have lokale krumninger, der kan efterligne en accelererende udvidelse, hvis de har den rigtige størrelse og fordeling.

En anden mulighed er, at vores forståelse af tyngdekraft er forkert. Friedmann-ligningen (ligning (4)) er udledt ved hjælp af Einsteins generelle relativitetsteori. Selv om den generelle relativitetsteori er eksperimentelt bevist på flere størrelsesskalaer, er det ikke sikkert, at den er gyldig på meget store skalaer (ligesom Newtons mekanik ikke gælder på meget små skalaer, hvor vi er henvist til kvantemekanik). Hvis dette er tilfældet, bliver vi nødt til at ændre hele baggrunden for kosmologien.



Figur 11. En skive af et tredimensionalt kort over galaksernes position i Universet (hver prik er en galakse). Det er tydeligt at Universet er mere klumpet end homogent (2dF Galaxy Redshift Survey).



Figur 12. Hubble Deep Field med masser af galakser vi stadig kan se. Med tiden bliver der længere og længere mellem dem, efterhånden som Universet udvider sig (Hubble Rumteleskopet, NASA/ESA).

Universet bliver mørkere og mørkere

For en galakse betyder Universets udvidelse ikke ret meget. Inden for galaksen er det tyngdekraften, der dominerer og holder sammen på stjernerne. Det samme gælder også vores Solsystem. Det er afstanden mellem galakserne, der øges, efterhånden som Universet udvider sig. Da lys udbreder sig med en endelig hastighed, vil lyset fra færre og færre galakser have haft tid til at tilbagelægge afstanden til os. Vi vil derfor med tiden se færre og færre objekter på nattehimlen, og jo hurtigere Universet udvider sig, jo voldsommere bliver effekten. På samme tid bliver den mørke energi mere og mere dominerende på grund af de forskellige komponenters egenskaber i Friedmann-ligningen, så både direkte og indirekte bliver Universet mørkere og mørkere, jo mere det udvider sig.

Ny og spændende fysik

Den nødvendige tilstedeværelse af mørk energi, i det nuværende state-of-the-art kosmologiske paradigme, dækker i virkeligheden over et stort hul i vores viden om Universet. Uanset om observationerne skyldes vakuum energi, et kugleformet tomrum, misforstået tyngdekraft på store skalaer eller noget helt andet, så forklarer teorien om mørk energi for mange observationer til at blive ignoreret. Selv om den endnu ikke giver os nogen fysisk forklaring på den accelererende udvidelse, så er mørk energi en effektiv teori, der tillader os at beregne og forudsige Universets egenskaber og skæbne.

Litteratur

- [1] <http://arxiv.org/abs/1009.1411v1>
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy
- [3] <http://www.science.org.au/nova/115/115key.html>
- [4] <http://wigglez.swin.edu.au/site/science.html>
- [5] Barbara Ryden, "Introduction to Cosmology", ISBN-0-8053-8912-1



Signe Riemer-Sørensen er tilknyttet University of Queensland, hvor hun arbejder med bestemmelse af de kosmologiske parametre fra kortlægning af galakser.



Tamara Davis arbejder for University of Queensland og Dark Cosmology Centre ved Københavns Universitet med måling af kosmologiske parametre og modeller fra type Ia supernovaer og baryoniske akustiske oscillationer.