

Årets nobelpris i fysik bygger videre på resultater opnået af danske forskere

Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen, DTU Space og Leif Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Nobelprisen i fysik 2011 gik til Saul Perlmutter, Brian Schmidt og Adam Riess. De fik prisen for at påvise, at Universets ekspansion er accelererende, således at fjerne galakser bevæger sig hurtigere og hurtigere væk fra hinanden. Effekten blev fundet ud fra studiet af supernovaer detekteret på kosmologiske afstande, dvs. supernova-begivenheder, som fandt sted for milliarder af år siden. Danske forskere var imidlertid først til at påvise supernovaer på kosmologiske afstande og dermed bevise, at supernovaer kunne bruges til at studere Universets ekspansion over tidsrum, der udgør en væsentlig brøkdel af Universets alder.

Universets ekspansion

Det ekspanderende Univers er blevet sammenlignet med en gærdej, der hæver og er fyldt med rosiner. Under hævnningen drives rosinerne fra hinanden. På lignende vis drives galakserne fra hinanden, når rummet ekspanderer. Almen relativitetsteori forudsiger en sådan effekt, hvilket i 1917 forskrækkede Albert Einstein i den grad, at han indførte den såkaldte kosmologiske konstant i sine ligninger for at opnå en statisk model af Universet, hvilket man forventede på den tid. Da Edwin Hubble i 1929 påviste, at galakserne i vor nære omegn af Universet har hastigheder bort fra os proportionalt med deres afstande fra os, erkendte man, at det skyldes rummets ekspansion. Det fik Einstein til at fortryde sit fusk med den kosmologiske konstant. Den blev imidlertid aldrig glemt og kan i dag gives et fysisk indhold, som dog ikke medfører et statisk univers.

Det følger ligeledes af den almene relativitetsteori, at en foton, der forplanter sig i det ekspanderende Univers, vil forøge sin bølgelængde proportionalt med skalafaktoren, som repræsenterer den relative størrelse af udvidelsen. En foton, der eksempelvis blev udsendt, da afstande til kosmologiske objekter blot var den halve af, hvad den er i dag, vil derfor observeres med en bølgelængde, der er den dobbelte af den udsendte. Effekten kaldes rødforskydning og angives ved:

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

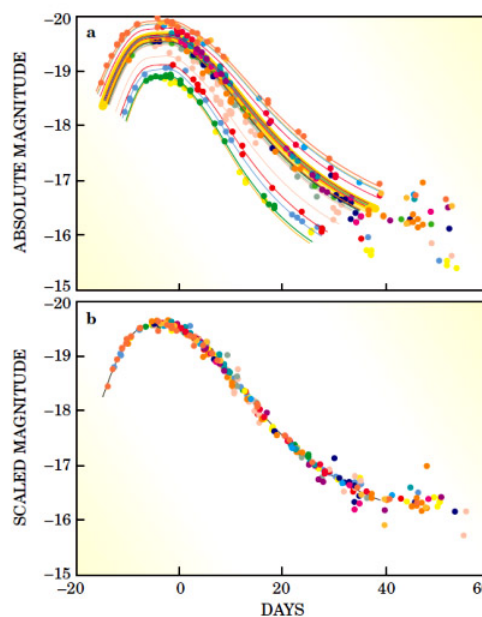
hvor λ_{obs} er den observerede bølgelængde, og λ_0 er bølgelængden ved udsendelsen. Således defineret bliver skalafaktoren på observationstidspunktet $(1 + z)$ gange større, end den var på emissionstidspunktet. Rødforskydningen kan måles for fjerne lyskilder, hvis bare man kan skaffe lys nok.

Rødforskydningen giver os altså størrelsen af skalafaktoren på emissionstidspunktet. Hvis vi ønsker at bestemme udviklingen i ekspansionen, må vi have flere oplysninger. Vi må bestemme afstanden, som lyset har tilbagelagt fra lyskilden.

Afstandsbestemmelse med standard-lyskilder

En meget brugt metode til at finde afstanden til galakser er at udnytte standard-lyskilder, dvs. en veldefineret gruppe af lyskilder, som man har undersøgt og fundet, at de har samme totale udstråling og ens spektraler – eller næsten ens, så man med passende korrektioner kan regne sig til en standardværdi for udstrålingen. Måler man fluxen fra en fjern standard-lyskilde, kan afstanden til kilden beregnes. Under jordiske forhold er det nemt nok: Fluxen falder med kvadratet på afstanden. For kosmologiske afstande må man tage hensyn til relativistiske effekter i det ekspanderende Univers, men den store udfordring er dog at finde tilstrækkeligt klare standard-lyskilder. De skal i praksis have en udstråling sammenlignelig med en hel galakse. Her er det, at supernovaerne kommer ind.

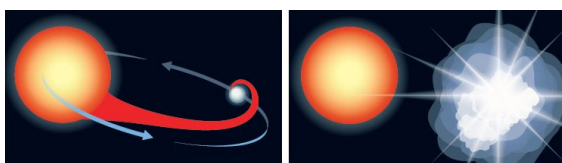
Fænomenet: Supernova Ia



Figur 1. Lyskurver for en række nære type Ia supernovaer (a). Det er tydeligt, at de supernovaer, der ikke er så lysstærke i maksimum, udvikler sig hurtigere efter maksimum end de lysstærke. Når man korrigerer lyskurverne for denne effekt, bliver de meget ens (b).

Så tidligt som i 1938 foreslog Walter Baade, at man kunne bruge supernovaer til at undersøge Universets ekspansion. Supernovaer er stjerner, der eksploderer og for en kort periode lyser op mange gange deres tidligere lysstyrke. Hvis udgangspunktet er en stjerne, der er meget tungere end Solen, får man en supernova af type II. Da den maksimale lysstyrke afhænger af massen af den oprindelige stjerne, er disse ikke særligt velegnede til kosmologiske undersøgelser. De supernovaer (SN), der er mest interessante til disse undersøgelser, er af typen Ia. Detaljerede undersøgelser har vist, at de med stor nøjagtighed (<10 procent) har samme maksimale lysstyrke og spektrer, og at lysstyrken svarer til en hel galakse, der indeholder 100 milliarder stjerner som Solen. Der er dog små, men systematiske forskelle mellem de enkelte SN Ia, men det er muligt at korrigere for disse forskelle (figur 1).

Den mest accepterede model for SN Ia er et dobbeltstjernesystem bestående af en hvid dværg og en stjerne, der stadig producerer energi ved kernereaktioner i de centrale dele. En hvid dværg er en stjerne, der ikke længere har muligheder for at skaffe sig energi ved kernereaktioner. Den består mestendels af kulstof og ilt og har en masse omkring Solens, men da størrelsen kun er som Jordens, får den en ekstrem høj massetæthed. Hvis stjernerne er tilstrækkelig tæt på hinanden, kan tyngdekraften fra den hvide dværg rive stof over fra den anden stjerne. Når massen af den hvide dværg vokser til omkring 1,4 gange Solens masse (Chandrasekhar-grænsen), kan den ikke holde sammen på sig selv mere, og det udløser en kæmpemæssig eksplosion. Da grænsen er uafhængig af den hvide dværgets detaljerede historie, dens oprindelige kemiske sammensætning etc., så forklarer denne model, hvorfor alle SN Ia er så ens. Det er meget usikkert, hvor lang tid det tager for et dobbeltstjernesystem at udvikle sig til SN Ia stadiet, men det tager helt sikkert mange milliarder år. Derfor var det på ingen måde indlysende, at disse SN Ia fandtes i kosmologiske afstande, hvor vi jo ser tilbage på et meget yngre Univers.



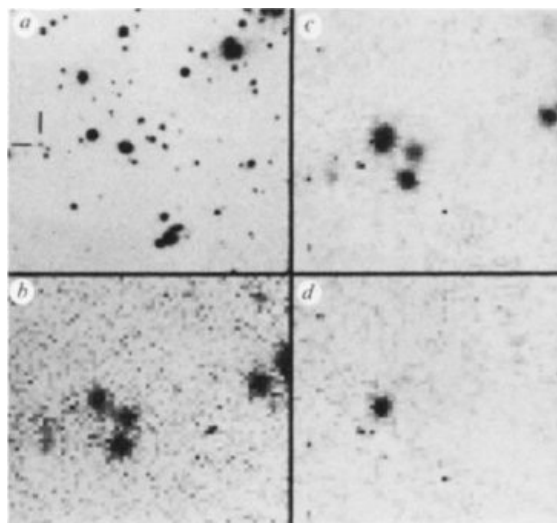
Figur 2. En hvid dværg i et dobbeltstjernesystem trækker masse til sig fra ledsageren. Når massen af den hvide dværg er vokset til 1,4 gange Solens masse, eksploderer den som en supernova Ia.

Eftersøgning efter Supernovaer Ia

Tidligere var observerende astronomer henvist til fotografiske optagelser, der havde lav respons og problemer med kalibreringen. Ved fremkomsten af CCD-kameraer (som nu sidder i hvert eneste digitale fotografiapparat) kunne man gøre sig håb om at nå meget svagere objekter med god nøjagtighed. Et af de første CCD-kameraer overhovedet på European Southern Observatory (ESO) i Chile blev i starten af 1980'erne placeret på den

danske 1,5 m kikkert der. Det gav os et forspring i brugen af den nye teknik.

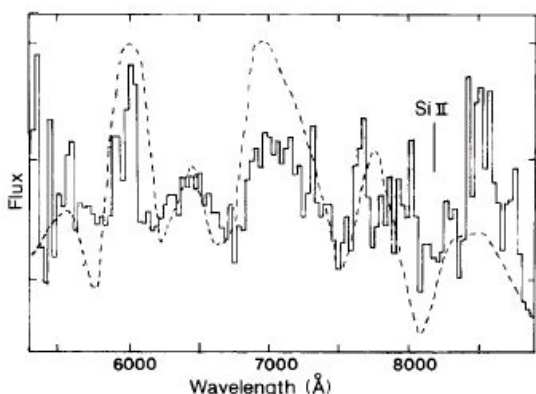
Det var før, Hubble Space Telescope (HST) blev sendt op, og på den tid overvejede man indgående, hvorledes man bedst kunne udnytte HST. Denne artikels forfattere deltog i en konference om emnet ved ESOs hovedkvarter i Garching. Professor Gustav Tammann diskuterede brugen af supernovaer type I til kosmologiske undersøgelser. På det tidspunkt var type I endnu ikke splittet op i Ia, Ib og Ic. Det skete kort efter og før, vort projekt kom i gang. Tammann konkluderede, at grundet dårlige erfaringer med at lede efter SN fra Jorden og specielt at følge op med detaljerede observationer (på grund af dårligt vejr, månelys etc.) så foreslog han, at man skulle bruge HST til at finde dem. Men det ville kræve megen observationstid at detektere SN med HST (man kikker jo i blinde), og det ville blive meget dyrt.



Figur 3. Detektion af supernova 1988U i den rige galaksehob AC118 ved $z = 0,31$. (a) Et hjørne af AC118 fra en 1-times optagelse fra 30. august 1986. Markeringen udpeger galaksen, hvori SN 1988U senere blev fundet. (b) Et udsnit af samme billede viser denne galakse øverst til venstre i en gruppe på tre. (c) Samme udsnit fra en optagelse taget 8-9. august 1988. Umiddelbart er det svært at se, at galaksen er blevet klarere. Efter korrektion for forskellige optagelsesbetingelser subtraheres (b) fra (c). Resultatet er (d), hvor supernovaen står tydeligt frem.

Med vores erfaringer med CCD-kameraet på 1,5m-teleskopet stod det straks klart for os, at vi med dette, relativt billige teleskop ville kunne detektere SN ved kosmologiske afstande, altså væsentligt større afstande, end det tidligere var gjort. Vi kontaktede australske og britiske kolleger med adgang til teleskoper i Australien og på De Kanariske Øer, som ville kunne verificere detektionen fra Jorden. Herefter ville vi følge op med detaljerede observationer på HST. Fra nære galakser vidste vi, at der er mellem 100 og 1000 år mellem supernovaer af type Ia i en pæn stor galakse, så man skulle undersøge mange på en gang for at have en rimelig chance for at finde én SN. Et af de svære problemer ved at bruge SN Ia til kosmologiske undersøgelser er at korrigere tiltrækkelig nøjagtigt for absorptionen af det støv, der ligger i galaksen omkring supernovaen. Vi valgte derfor at koncentrere os om de ca. 60 rigeste

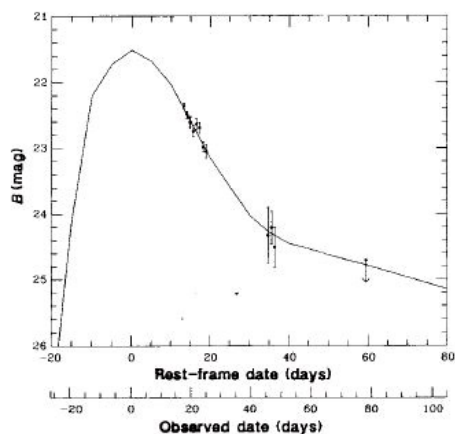
galaksehobe, der var til rådighed ved kosmologiske afstande. Sådanne hobe indeholder langt overvejende elliptiske galakser, som er støv-fri.



Figur 4. Spektrum (fuldt optrukken) af SN 1988U med overlejret spektrum af modergalaksen. Til sammenligning vises (stiplet linje) spektrum af en anden SN fra det nære univers 17 døgn efter maksimum og transformeret til $z = 0,31$. Man identificerer den karakteristiske Si II absorptionslinje trods galaksens forstyrrende lys.

Disse hobe observeredes systematisk i løbet af årene 1987 og 1988. Der blev optaget over 300 eksponeringer á 1 time. Vi havde udviklet software, så vi kunne nå at sammenligne en ny eksponering med en tidligere af samme felt, alt imens vi var i gang med den næste optagelse. Ved hjælp af det antal SN, som man havde fundet i nære galakser, havde vi beregnet, at vi skulle detektere mellem 3 og 10 SN i dette projekt. Vi fandt kun 2: én SN II og én SN Ia. figur 3 viser, hvordan denne SN (SN 1988U) blev fundet. SN 1988U havde en rødforskydning $z = 0,31$, dvs. stjernen eksploderede omtrent samtidigt med, at Solen blev dannet for ca. 4,5 milliarder år siden.

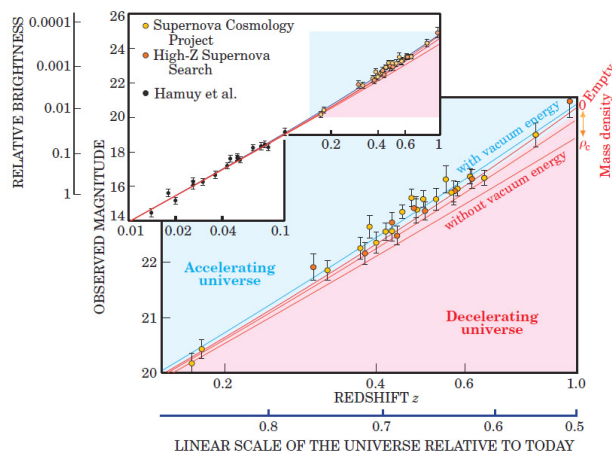
Figur 4 viser et spektrum af SN 1988U optaget med AAT 4m teleskopet i Australien. Dette spektrum beviste, at det faktisk var en SN Ia, specielt den brede Si II absorptionslinje ved 8060 Å, der er et vigtigt karakteristikum for SN Ia supernovaer.



Figur 5. Den observerede lyskurve for SN 1988U overlejret standard-lyskurven for en SN Ia transformeret til $z = 0,31$. Den gode overensstemmelse opnås kun, når man korrigerer for den relativistiske tidsforlængelse med faktoren $(1 + z) = 1,31$.

Figur 5 viser, at den observerede flux som funktion af tiden følger standard-lyskurven for SN Ia, når man korrigerer for en tidsforlængelse med faktoren $(1 + z)$, som det kræves ifølge almen relativitetsteori. Senere SN Ia har bekræftet tidsforlængelsen.

Vi søgte naturligvis om observationstid på HST for at få bedre spektrere, bedre lyskurver og en bedre bestemmelse af, hvilken type galakse supernovaerne ligger i. Vi fik det svar, at det var et vigtigt projekt, men nu havde vi jo vist, at det kunne klares fra Jorden. Derfor var der ingen grund til at bruge kostbar HST tid på det! Det var naturligvis meget skuffende. Som anført ovenfor havde vi designet eftersøgningen til primært at finde SN i støv-fri elliptiske galakser, men den, vi fandt, var tydeligvis i en lille spiralgalakse (se figur 3). I denne type galakser har man problemet med at bestemme den interne absorption, og man skal have mange SN for at kunne minimere indflydelsen af denne fejlkilde. Med vores 'succesrate' kunne vi se, at det ville tage mange år, før vi havde et tilstrækkeligt antal SN til at udlede noget sikkert om, hvilken type univers vi lever i. Alt i alt besluttede vi os for at stoppe projektet.



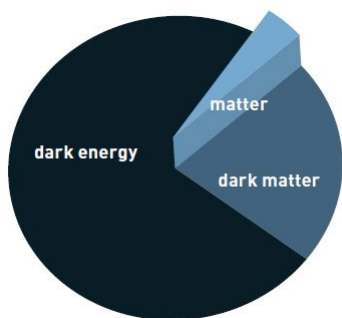
Figur 6. Resultatet af de to konsortiers supernovaeftersøgning. Størrelsesklasser (relativ klarhed) er afbildet mod z (svarende til relativ skalafaktor). Øverst ses diagrammet for både nære SN og SN på kosmologiske afstande. Nederst kun de sidste. Som forklaret i teksten viser de, at Universets ekspansion er accelereret.

I midten af 1990'erne tog 2 store amerikanske konsortier over ledet af de 3 nobelpristagere: 'The Supernova Cosmology Project' med Saul Perlmutter som leder, og "The High- z Supernova Search Team" med Brian Schmidt og Adam Riess som ledere. De havde adgang til 4m kikkerter, og der havde desuden været en løbende udvikling af CCD-kameraer, så de havde adgang til mosaikker af CCD'er med billedfelter over 10 gange så store som CCD'en på den danske 1,5 m. På den måde kunne de naturligvis undersøge mange flere galakser på en gang og dermed få en meget højere succesrate. De havde nogenlunde samme observationsstrategi, som vi brugte, men de havde altså også adgang til meget bedre grej. Konsortierne fandt tilsammen omkring 50 fjerne SN Ia og offentliggjorde deres resultater i 1998/1999.

Mørk energi og det accelererende Univers

Siden Hubble i slutningen af 1920'erne fandt Universets ekspansion, har man spekuleret over, hvad denne ekspansion ender med. Der er kun én kraft, mente man, der kan ændre galaksernes bevægelse væk fra hinanden, nemlig tyngdekraften. Ikke så meget tyngdekraften fra de enkelte galakser, men den samlede tyngdekraft fra alle galakser. Den er naturligvis proportional med middeltætheden i Universet. Hvis middeltætheden er stor, så vil tyngdekraften efterhånden bremse selv de fjerneste galakser op, og måske falder hele Universet sammen i et 'Big Crunch'. Omvendt, hvis middeltætheden er lille, så er tyngdekraften ikke i stand til at bremse galakserne væsentligt op, og de vil bare fjerne sig mere og mere fra hinanden. Den middeltæthed, der betyder, at galakserne lige netop bliver bremsede ned til hastigheden nul i grænsen, kaldes den kritiske tæthed.

Resultaterne fra de to konsortier er givet i figur 6. Den røde trekant er det område, som supernovaerne ville ligge i, hvis de kun var påvirket af tyngdekraften. Supernovaerne ville falde på den øverste røde linje, hvis der ikke var noget stof i Universet, og på den nederste røde linje, hvis middeltætheden i Universet var lig den kritiske. Men det er jo tydeligt, at supernovaerne i middel ligger over den øverste røde linje. Det betyder, at supernovaerne er for langt væk sammenlignet med det tomme Univers, altså er der noget, der har accelereret dem. Dette 'noget' har man givet navnet mørk energi. Den blå linje i figur 6 er tilpasset SN dataene under antagelse af, at massetætheden (summen af almindeligt stof og mørkt stof) er $1/3$ af den kritiske tæthed, mens tætheden af mørk energi er $2/3$ af den kritiske tæthed.



Figur 7. Supernova-resultaterne fortæller os, at Universet er domineret af mørk energi. Sammenholdt med andre resultater kan vi sige, at Universets masse/energi tæthed er lig den kritiske værdi, at stof, som vi kender det (atomer etc.), kun udgør små 5 %, mørkt stof ca. 25 %, mens den mørke energi udgør godt 70 %.

Figur 7 viser, hvad Universet består af: Nemlig af ca. 5 procent stof, som vi kender (atomer, molekyler etc), ca. 25 procent mørkt stof (som man ikke ved, hvad er, men som er forbundet med galakser og galaksehobe og påvirker omgivelserne med tyngdekraft), og så de sidste 70 procent, som er mørk energi. Alt i alt en tæthed som er tæt på den kritiske.

Den samlede masse/energi tæthed i Universet kan også bestemmes ud fra temperatur-fluktuationerne i den

kosmiske mikrobølge baggrundsstråling (CMB). Bedre og bedre observationer viste i 2003, at tætheden er lig den kritiske med en usikkerhed på få procent. Men det er ud fra SN observationer, at man ved, at størstedelen af denne tæthed kommer fra mørk energi.

At Universet netop har den kritiske tæthed, betyder, at rummet – bortset fra lokale tæthedsfluktuationer – er rumligt fladt, dvs. Euklids geometri gælder. Det følger også, at den totale energi er nul. Det gør det ulige meget lettere at kreere et univers, bare man ved hvordan.

Hvad er mørk energi?

Einsteins kosmologiske konstant vil for passende værdier give samme effekt som mørk energi. Man valgte dog at kalde fænomenet mørk energi for ikke at låse sig fast på en fortolkning. Det er interessant, at modelberegninger af udviklingen i Universets 'klumpethed' eller storskalastruktur op gennem 1990'erne indikerede, at man manglede en parameter i modellerne. En kosmologiske konstant kunne gøre tricket, og med påvisning af mørk energi synes problemet at have fundet sin løsning.

Også fra kvantemekanikken kommer der hints om, at der kunne findes noget eksotisk, som skulle have samme effekt som mørk energi. Inden for kvantemekanikken kaldes det vakuumenergi. I det tomme rum bliver virtuelle partikler hele tiden dannet og forsvinder, så selv om der er vakuum, er der altså noget alligevel. Den russiske astrofysiker Zeldovich var den første, der beregnede den kvantemekaniske vakuumenergi. Han fandt en tæthed, som er ca. 10^{120} gange større end den tæthed, som SN giver. Senere beregninger har mindsket forskellen til ca. 10^{55} , men stadigvæk er der en kolossal forskel. Hvordan man kommer uden om denne forskel af astronomiske dimensioner, er uvist, men fysikere synes altså ikke at have problemer med eksistensen af vakuumenergi. Det er dens lidenhed, der overrasker.

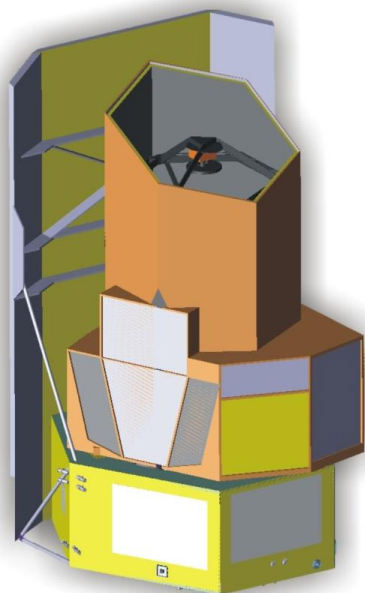
I kvantemekanikken er tætheden af vakuumenergi konstant gennem Universets ekspansion (helt naivt er det vel svært at forstille sig, at man kan udtynde vakuum), hvorimod de andre tætheder varierer kraftigt i løbet af Universets udvikling. Så det er meget muligt, at det kun er inden for de sidste få milliarder år, at mørk energi har domineret de andre komponenter i Universet. Omvendt: Hvis mørk energi havde udviklet sig på samme måde som de andre komponenter, dvs. at tætheden hele tiden har været dobbelt så stor end de andres tilsammen, så ville den have forhindret, at tyngdekraften havde dannet de strukturer (galaksehobe, galakser, stjerner etc.), vi kender i Universet i dag.

Universets fremtid afhænger af hvilken karakter, den mørke energi viser sig at have. Hvis den er konstant, vil galakserne drive ud af hinandens synsfelt, således at gravitationelt bundne systemer - så som den lokale gruppe af galakser med Mælkevejssystemet – vil blive ganske isolerede. Interessant er det at tænke sig, at vi formentlig ville være afskåret fra at udvikle Big Bang-modellen, hvis vi havde levet i en sådan æra. Man kan dog sagtens forestille sig, at mørk energi ændres

med tiden. Måske har vi et fortilfælde i Universets inflationsfase, der menes at havde fundet sted 10^{-35} sekunder efter Big Bang – eller Planck-æraen, om man vil. Der er stærke indicier på, at Universets skalafaktor i denne fase blev blæst op til monstrøse dimensioner. Drivkraften menes at være et skalart energifelt af eksorbitant størrelse, der havde karakter af kosmologisk konstant. Dette felt henfaldt ved afslutningen af inflationen.

Kortlægning af mørk energi

Samme dag, som årets Nobelpris i Fysik blev annonceret, valgte ESA, at den næste videnskabelige satellit skal give helt nye, detaljerede oplysninger netop om mørkt stof og mørk energi. Satellitten hedder EUCLID og skal sendes op i 2019. EUCLID skal undersøge morfologi og afstande til millioner af galakser. Galaksernes morfologi observeres nemlig en smule deformationeret på grund af de tæthedskoncentrationer i massefordelingen, der findes mellem dem og os (såkaldt weak lensing). Ved at kortlægge disse deformationer kan man udlede, hvordan mørkt stof og mørk energi er fordelt i rummet, og dermed få helt nye oplysninger om deres egenskaber.



Figur 8. ESA forbereder satellitten EUCLID, der skal undersøge Universets indhold af mørkt stof og mørk energi.

Danske forskere fra DTU Space og Niels Bohr Institutet er involveret i forberedelsen af den videnskabelige analyse af disse sofistikerede data. Desuden vil Danmark bidrage med faciliteter til testning af det meget kritiske optiske system i EUCLID-satellitten.

Konklusion

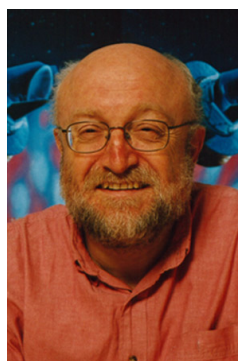
Der er ingen tvivl om, at mørk energi er kommet for at blive. Den store udfordring er at finde ud af i detaljer, hvad der giver anledning til denne mærkelige acceleration af Universets ekspansion.

Vi er naturligvis stolte over, at vi udførte pionerarbejde ved at vise, at disse vigtige SN Ia faktisk findes på kosmologiske afstande, og demonstrerede, hvorledes man kunne finde dem. De vil uden tvivl fortsat spille en central rolle i udforskningen af de fjerneste egne af Universet.

NOTE: Vi udførte denne eftersøgning efter SN Ia på den danske 1,5 m kikkert sammen med Professor Henning E. Jørgensen. Han døde desværre i november 2010.

Litteratur

- [1] Krauss, Turner (2004), *Scientific American*, 23-4
- [2] Nørgaard-Nielsen, Hansen, Jørgensen, Salamanca, Ellis, Couch (1989), *Nature*, **339**, 523
- [3] Perlmutter et al. (1999), *Astrophysical Journal*, **517**, 565
- [4] Perlmutter (2003), *Physics Today*, Vol **56**, #4
- [5] Perlmutter, Schmidt (2003), *Lecture Notes in Physics*, astro-ph/0303428
- [6] Riess et al. (1998), *Astronomical Journal*, **116**, 1009



Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen er seniorforsker ved DTU Space. Samarbejdede med Leif Hansen og Henning E. Jørgensen om forskellige ekstragalaktiske projekter, herunder eftersøgning af fjerne supernovaer. Har været ansvarlig for de danske bidrag til ESA Planck satellitten og til ESA/NASA MIRI instrumentet til James Webb Space Telescope.



Leif Hansen er lektor emeritus ved Niels Bohr Institutet. Arbejdede fra 1980 og frem til sin pensionering i 2003 tæt sammen med Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen og professor Henning E. Jørgensen inden for ekstragalaktiske og kosmologiske emner, bl.a. aktive galakser, rige galaksehobe og Universets storskalastruktur.