

GALAKSERNES OPRINDELSE OG UNIVERSETS “DARK AGES”

Når man ser ud i Universet er det *galakser* (boks 1) der dominerer billedet. Galakserne er simpelt hen byggestenene for al den struktur der kan observeres på de største skalaer i Universet. Et oplagt spørgsmål er hvor galakserne kommer fra? Eller mere præcist hvorfor findes der objekter som galakser, hvad er årsagen til den observerede variation i lysstyrke og udseende, og hvornår og hvordan er galakserne dannet? Astronomien har det tilfælles med evo-

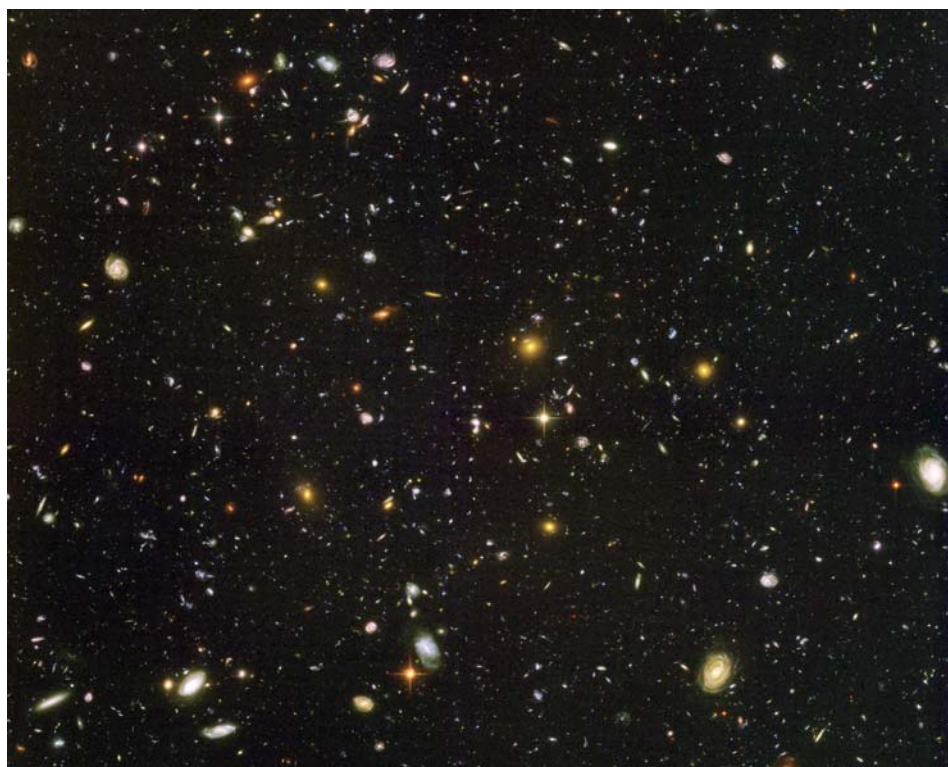
Af Johan P.U. Fynbo, Anja C. Andersen, Steen H. Hansen, Jens Hjorth, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman & Darach Watson

lutionsbiologien at der er en *historie* man må kende, før man kan gøre sig håb om at forstå galaksernes egenskaber i dag. Men astronomien har den vigtige fordel frem for evolutionsbiolo-

gien at fortiden kan observeres direkte. Fordi lyset har en endelig udbredelseshastighed på ca. 300.000 km pr. s, ser man tilbage i tiden, når man kigger ud i rummet. På afstande som her på Jorden er effekten forsvindende lille, men på intergalaktiske afstande er den betragtelig, og de fjernest kendte galakser ser man som de så ud kort efter at Universet blev til (ved Big Bang). Man kan ikke direkte studere fortiden for Jorden, solsystemet eller Mælkevejen, men man kan observere fortiden for fjernere dele af Universet. Og da Universet formodes at være isotropt og homogent på store skalaer, dvs. har ensartet stoftæthed og stofsammensætning, er uden steder eller retninger der indtager særstillinger frem for andre steder eller retninger, kan man regne med at fortiden for vores lokale omegn var som det man kan se i fjerne dele af Universet, i hvert fald hvad angår det generelle billede.

Med de dybeste billeder taget i dag (*fig. 1*) ser man mere end 12 mia. år tilbage i tiden, og da der i dag er gået ca. 13,7 mia. år siden Big Bang er det meste af Universets historie er tilgængelig for observation.

OPDAGELSEN AF GALAKSERNE



1. Hubble Ultra Deep Field. Dette er det dybeste billede taget af nattehimlen. Det er bemærkelsesværdigt at størstedelen af nattehimlen er mørk på trods af den ekstremt dybe optagelse. Dette reflekterer dybest set universets endelige alder. (STScI)

Mælkevejen – det lysende bånd der ses over det meste af himlen (*fig. 2*) – har



været kendt siden oldtiden. I den græske mytologi er Mælkevejen opstået fordi Hera spildte mælk, da hun ammede Herakles, og det er herfra det danske navn stammer. På islandsk, og derfor sandsynligvis på oldnordisk, kaldes Mælkevejen *Vetrarbrautin* som betyder vintergaden. Samme ord bruges i Sverige. På finsk-ugriske sprog omtales Mælkevejen som *Fuglenes vej* fordi man mente at trækfulgene fulgte den. At Mælkevejen er en galakse blandt utallige andre, nemlig den Jorden befinder sig i, blev først erkendt i 1920'erne.

Den første dokumenterede observation af en galakse uden for Mælkevejen går helt tilbage til Harald Blåtands tid hvor den persiske astronom Al Sufi i 964 beskriver en tåget lyskilde i stjernebilledet Andromeda. I dag ved man at det var Andromedagalaksen han så. Herefter går der adskillige hundrede år før Fernando de Magellan i 1511 beskriver de to skyer på den sydlige himmel der nu kendes som De Magellanske Skyer og som er små nabogalakser til Mælkevejen.

Det næste vigtige skridt på vejen mod opdagelsen af galaksernes natur, er opfindelsen af teleskopet i Nederlandene i 1609. Herefter voksede antallet af observerede galakser – eller tåger som de kaldtes dengang – hastigt. M33, der som Andromedagalaksen og de Magellanske skyer ligger meget nær Mælkevejen, blev opdaget før 1654 af italieneren Giovanni Batista Hodierna. I det katalog over lyssvage objekter på himmelen som den franske astronom Charles Messier udgav i 1781 (Catalog of Nebulae and Star Clusters), optræder der således 40 spiral-galakser (fig. 3). Få år efter



2. Et panoramisk billede af vores egen galakse Mælkevejen. Dette billede blev lavet i 1950'erne under ledelse af den svenske astronom Knut Lundmark i Lund. Mælkevejen er en stor galakse med en diameter ca. 100.000 lysår og en total masse på over 100 mia. gange Solens masse. (Observatoriet i Lund)



3. Spiralgalaksen NGC2613. I over to hundrede år var der stor uenighed om naturen af de dengang såkaldte spiraltåger. Frem til begyndelsen af 1900-tallet var det fremherskende synspunkt at spiraltåger er solsystemer under dannelse i Mælkevejen. Først i 1920'erne blev det endelig fastslået at spiraltåger, som den her viste, er kolossale ansamlinger af stjerner og gas. Billedet er taget med det danske 1,54 m teleskop i Chile. Galaksen befinder sig ca. 77 mio. lysår fra Mælkevejen. (NBI)

Messier publicerede William Herschel i 1785 et katalog med 1.000 nye tåger. Allerede i Immanuel Kants værk *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie Des Himmels* fra 1755 frem-

sattes en idé om tågerne som selvstændige ø-universer, men frem til ca. 1910 var den fremherskende opfattelse at alle "tågerne" havde samme natur, nemlig unge systemer i





4. Det Europæiske Syd Observatoriums Very Large Telescope repræsenterer det ypperste inden for moderne teleskopbyggeri. Det befinder sig i Atacamaørkenen syd for Antofagasta i Chile. (ESO)

Mælkevejen hvor nye stjerner kondenserer ud af gasskyer. Mælkevejen ansås for at udgøre hele Universet.

Takket være nye observationer, ikke mindst V.M. Sliphers, af spiraltågernes radialhastigheder (hastigheder langs synslinien fra jorden) udført omkring 1913 på Lowell Observatoriet i USA, vandt hypotesen om at mange tåger var "ø-universer" ligesom Mælkevejen, flere og flere tilhængere i løbet af 1910'erne og 1920'erne (*boks 2*).

I 1924 bestemte den amerikanske astronom Edwin Hubble stjerner afstanden til Andromedagalaksen og

galaksen M33 (ved hjælp af den særlig gruppe variable stjerner, der kaldes Cepheide-stjerner). Begge objekter lå så langt borte at det endeligt kunne fastslås at disse og andre spiraltåger var galakser ligesom Mælkevejen. At denne erkendelse blev gjort netop på dette tidspunkt hang i høj grad sammen med færdiggørelsen af Mount Wilson teleskopet i 1917. Dette teleskop havde en spejldiameter på 100 tommer (2,5 m), mere end noget andet teleskop på det tidspunkt, og det er stadig af en betragtelig størrelse.

Mellem opdagelsen af galaksernes sande natur og i dag ligger således ca. 80 års forskning. Takket være stadig større teleskoper (*fig. 4*) og bedre detektorer har astronomerne nu lært at galakserne er kolossale systemer af gas og stjerner. Deres totale masseindhold er domineret af stof som ikke lyser, men hvis eksistens indirekte kan fastslås pga. dets tyngdepåvirkning af det lysende stof. Dette stof omtales normalt som *mørkt stof* (Naturens Verden 2007, nr. 9:2-9). Størrelsen af galakserne varierer voldsomt med diametre fra nogle få tusinde lysår til flere hundrede tusinde. Variationen i lysstyrke, hvilket er et groft mål for antallet af stjerner i galakserne, er illustreret i *fig. 5*; fordelingen ligner i forbløffende grad fordelingen af byers størrelse i Danmark. Ud over lysstyrken adskiller galakser sig ved deres form (*boks 1*). Spiralgalakser er roterende systemer med tydelig spiralstruktur, og ofte med betragtelige mængder kold gas og aktiv stjernedannelse. Elliptiske galakser er systemer uden synderlig rotation, men hvor stjernerne har tilfældige, ellipseformede baner; disse galakser indeholder meget lidt kold gas og danner stort set ingen nye stjerner. Elliptiske galakser synes at være resultatet af sammenstød mellem flere spiralgalakser. Endelig er der et stort antal af de såkaldte irregulære dværggalakser; de er lyssvage og ofte aktivt stjernedannende systemer.

Betragtes fjernere og fjernere dele af universet sker der nogle betydelige ændringer i galaksernes egenskaber. Dette sker, når man når ud på afstan-



de hvor lyset har været mere end 2-3 mia. år undervejs, når det kan observeres fra Jorden. Resultaterne viser at galakserne bliver mere aktivt stjerne-dannende, når man ser så langt tilbage i tiden. Det ser ud som om der var et maksimum i den kosmiske stjerne-dannelsesaktivitet for 7-8 mia. år siden. Går man endnu længere tilbage bliver det stadig vanskeligere at lokalisere galakser, men alligevel kender man i dag flere tusinde galakser, fra hvilke lyset, som observeres fra Jorden, er 10-11 mia. år gammelt. Så tidligt i universets udvikling var galakserne væsentligt mindre end i dag, men allerede dengang med intens stjernedannelse.

FRA KVANTEFLUKTUATIONER TIL GALAKSER

Den nuværende teori for galaksedannelsen er i grove træk følgende: Ganske små brøkdeler af et sekund efter Big Bang blev en lille, mikroskopisk del af et muligvis meget komplekst Univers "blæst op" til noget langt større end vores nuværende observerbare Univers. Mere præcist var der en fase som var kendetegnet ved en eksponentiel udvidelse af Universet – den såkaldt *inflation*. I denne proces blev små ujævnheder i energitætheden, formentligt forårsaget af såkaldte *kvantefluktuationer* på mikroskopisk skala, forstørret til makroskopisk skala. Under hele inflationens forløb blev der kontinuerligt "trukket" i fluktuationerne, så de blev større og større. Ved inflationens afslutning fandtes derfor ujævnheder eller fluktuationer fordelt over et meget bredt interval af længdeskalaer. Fluktuationerne på de største længde-

Galakser findes i det lokale Univers i tre hovedgrupper:



1. Elliptiske galakser (STScI)



2.A. Spiral galakser med bjælke (STScI)



2.B. Spiral galakser uden bjælke (STScI)



3. Irregulære galakser (STScI)

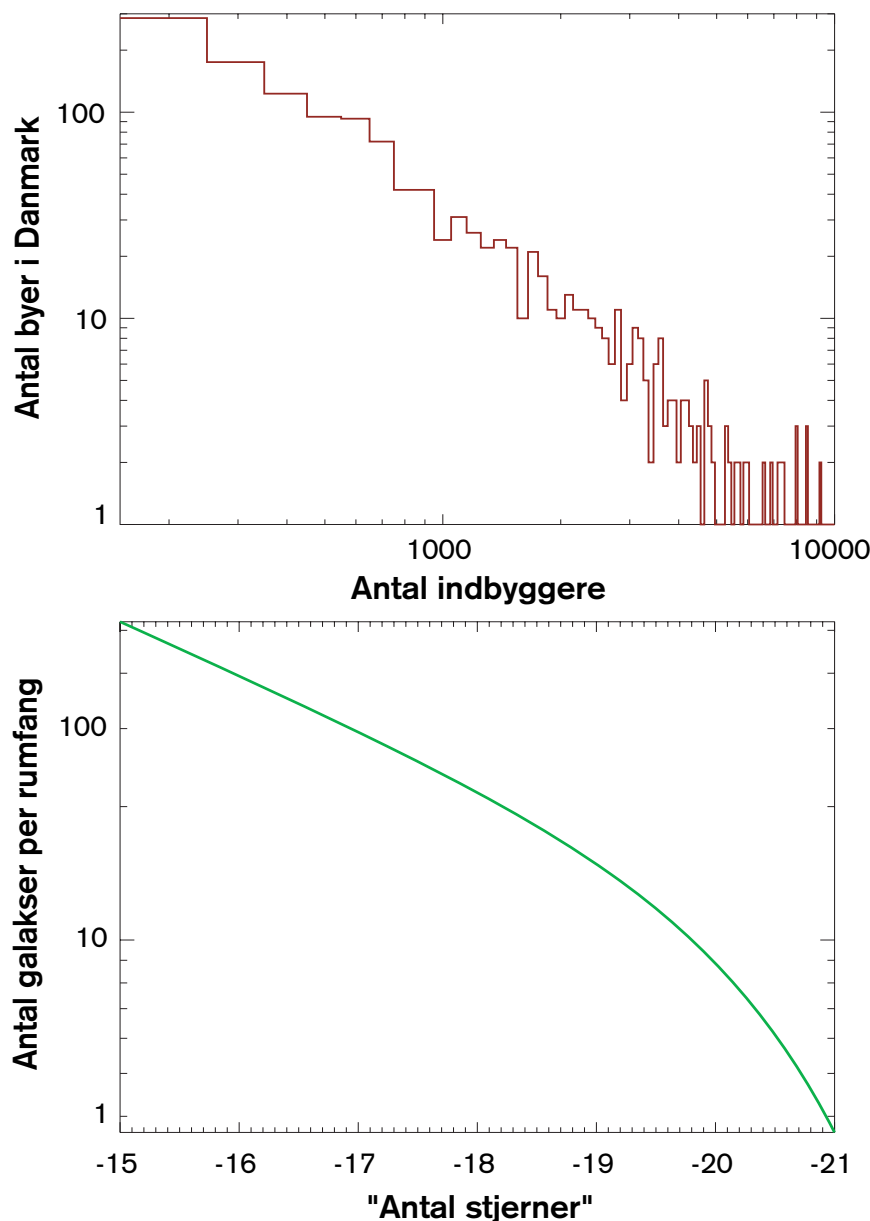
BOKS 1: GALAKSER

skalaer (meget større end vores nuværende observerbare Univers) svarer til de kvantefluktuationer, der blev blæst op helt i starten af inflationen. Omvendt svarer fluktuationerne på de mindste skalaer til de fluktuationer, der blev dannet sidst under inflationen.

I lang tid efter Big Bang var energitætheden i universet domineret af stråling, og i den periode skete der ikke

meget med størrelsen af fluktuationerne. Men efter omkring 50.000 år blev energitætheden domineret af (mørkt) stof, og på det tidspunkt begyndte fluktuationerne at vokse. Effekten af disse fluktuationer kan observeres direkte som temperaturfluktuationer i den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling (fig. 6). Den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling blev udsendt





5. Byer i Danmark og galakseres lysstyrke følger meget lignende fordelinger.

ca. 200.000 år efter Big Bang, og ved at studere den fås et fantastisk indblik i det tidlige Univers' struktur. De statistiske egenskaber ved den struktur, der ses i baggrundstrålingen, stemmer i fremragende grad overens med forudsigelser baseret på inflationsteorien.

Galaksedannelse sker i en konkurrence mellem på den ene side universets udvidelse og det intense tryk som

både lyset (tidligt i Universet) og stoffer (dominerer efter ca. 50.000 år) udøver, og på den anden side tyngdekraften der prøver at trække stoffet sammen. En galakse er opstået fra en positiv fluktuation, dvs. et område af universet med lidt større massetæthed end gennemsnittet. På grund af den ekstra tyngdekraft fra denne masse udvidede dette område sig lidt langsommere end

resten af universet. Hvis den totale energi for området var negativ, dvs. den kinetiske energi var mindre end den gravitationelle bindingsenergi, så nåede området en maksimal udstrækning hvorefter denne del af Universet begyndte at trække sig sammen igen. Gassen blev presset sammen og begyndte at danne stjerner og dermed udsende lys – galaksen var født.

En afgørende forudsætning i dette scenario er det mørke stof. Uden det mørke stof er det umuligt at komme fra de små fluktuationer (fig. 6) til de strukturer, inkl. galakserne, der observeres i dag. Dette hænger sammen med, at det mørke stof ikke er påvirket af lystrykket, da det mørke stof netop ikke kan vekselvirke med lys. Det normale stof kan der i mod ikke klumpe sig sammen før lystrykket falder efter rekombinationen, ca. 300.000 år efter Big Bang. Tilstedeværelsen af en dominerende mængde mørkt stof kickstarter med andre ord dannelsen af galakserne. Galaksedannelse afhænger nøje af naturen af det mørke stof. Ved at studere de første galakser og se hvordan galakserne efterfølgende har udviklet sig, kan man uddrage vigtig information om naturen af det mørke stof. Fra den observation at de tidlige galakser var mindre end i dag, kan vi allerede konkludere at det mørke stof er *koldt*. Hermed menes at de enkelte partikler der udgør det mørke stof, bevæger sig relativt langsomt (meget langsommere end lyset). I princippet kan vi ved at bestemme hvornår og hvordan de allerførste galakser blev dannet lægge meget stærke bånd på det mørke stofs egenskaber.

Spørgsmålet er så: hvordan lokaliseres de meget fjerne, unge galakser der først blev dannet efter Big Bang?



Reaktioner på den fremspirende idé om ø-universer – at der eksisterede andre “øer” af stof i Universet end Mælkevejen, og at nogle af de observerede “tåger” i virkeligheden var sådanne ø-universer.

Den danske astronom Ejnar Hertzsprung skrev i 1914 til Slipher: ... *congratulations to your beautiful discovery of the great radial velocity of some spiral nebulae. It seems to me, that with this discovery the great question, if the spirals belong to the system of the Milky Way or not, is answered with great certainty to the end, that they do not.*

På dansk: ... *tillykke med din skønne opdagelse af de store radial hastigheder af nogle spiraltåger. Det forekommer mig, at det store spørgsmål om spiraltågerne tilhører Mælkevejen eller ej med denne opdagelse er besvaret: det gør de ikke.*

Andre citater fra perioden viser ligeledes hvilken fascinationskraft hypotesen havde: *Whether true or false, the hypothesis of external galaxies is certainly a sublime and magnificent one. Instead of a single star-system it*

presents us with thousands of them ... Our conclusions of Science must be based on evidence, and not on sentiment. But we may express the hope that this sublime conception may stand the test of further examination. (A.C.D Crommelin, Royal Greenwich Observatory, 1917).

På dansk: *Hvad enten den er sand eller falsk, så er hyposten om eksterne galakser sublim og storslået. Frem for et enkelt stjernesystem giver den os tusinder af dem ... Vores videnskabelige konklusioner må hvile på evidens og ikke på følelser. Alligevel håber vi at denne sublime forestilling må overleve yderligere videnskabelig efterprøvning.* (A.C.D Crommelin, Royal Greenwich Observatory, 1917).

... *there is a grandeur and majesty in the concept [om ø-universer] and an agreement with the general cosmical continuity expected on philosophical grounds, which is both inspiring and alluring. Few greater concepts have ever been formed in the mind of thinking man than this one, namely, that we, the microbic inhabitants of a minor satellite of one of millions of*

suns which form our galaxy, may look out beyond its confines and behold other similar galaxies, tens of thousands of light-years in diameter, each composed, like ours, of a thousand million or more suns, and that, in so doing, we are penetrating the greater cosmos to distances of from half a million to a hundred million light-years. (H.D. Curtis, Lick Observatoriet i USA, 1924).

På dansk: ...*der er noget grandióst og majestætisk over forestillingen [om ø-universer], og en overensstemmelse med den generelle kosmiske kontinuitet forventet af filosofiske grunde, som både er inspirerende og tillokkende. Få større forestillinger er nogensinde udtænkt end dette, at vi, mikroskopiske beboere på en mindre satellit af en million af sole som udgør vores galakse, kan se ud over dens grænser og se andre lignende galakser, titusinder af lysår i diameter, hvert opbygget, som vores, af tusind millioner eller flere sole, og at vi hermed beskuer et kosmos ud til afstande fra en halv million til hundred millioner lysår.* (H.D. Curtis, Lick Observatoriet i USA, 1924).

BOKS 2: ERKENDELSEN AF GALAKSERNES NATUR

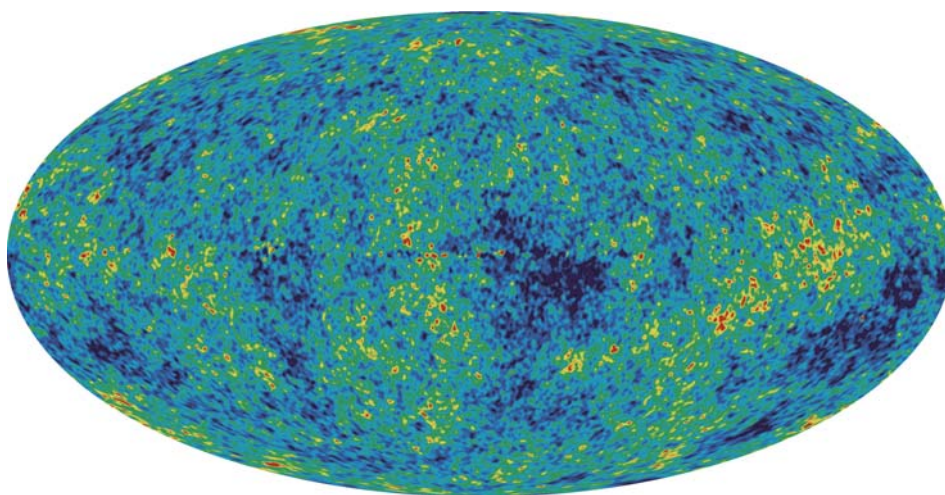
UNIVERSETS “DARK AGES”

Tiden mellem udsendelsen af den kosmiske mikrobølge-baggrundstråling og dannelsen af de første galakser kalder kosmologerne for Universets “Dark Ages” (fig. 7). Her var der intet

synligt lys, så alt var mørkt – heraf navnet. Man ved endnu ikke hvornår denne periode endte. Den fjerneste galakse man kender, udsendte sit lys ca. 750 mio. år efter Big Bang, men der ingen grund til at tro at denne galakse skulle være den første. Det er

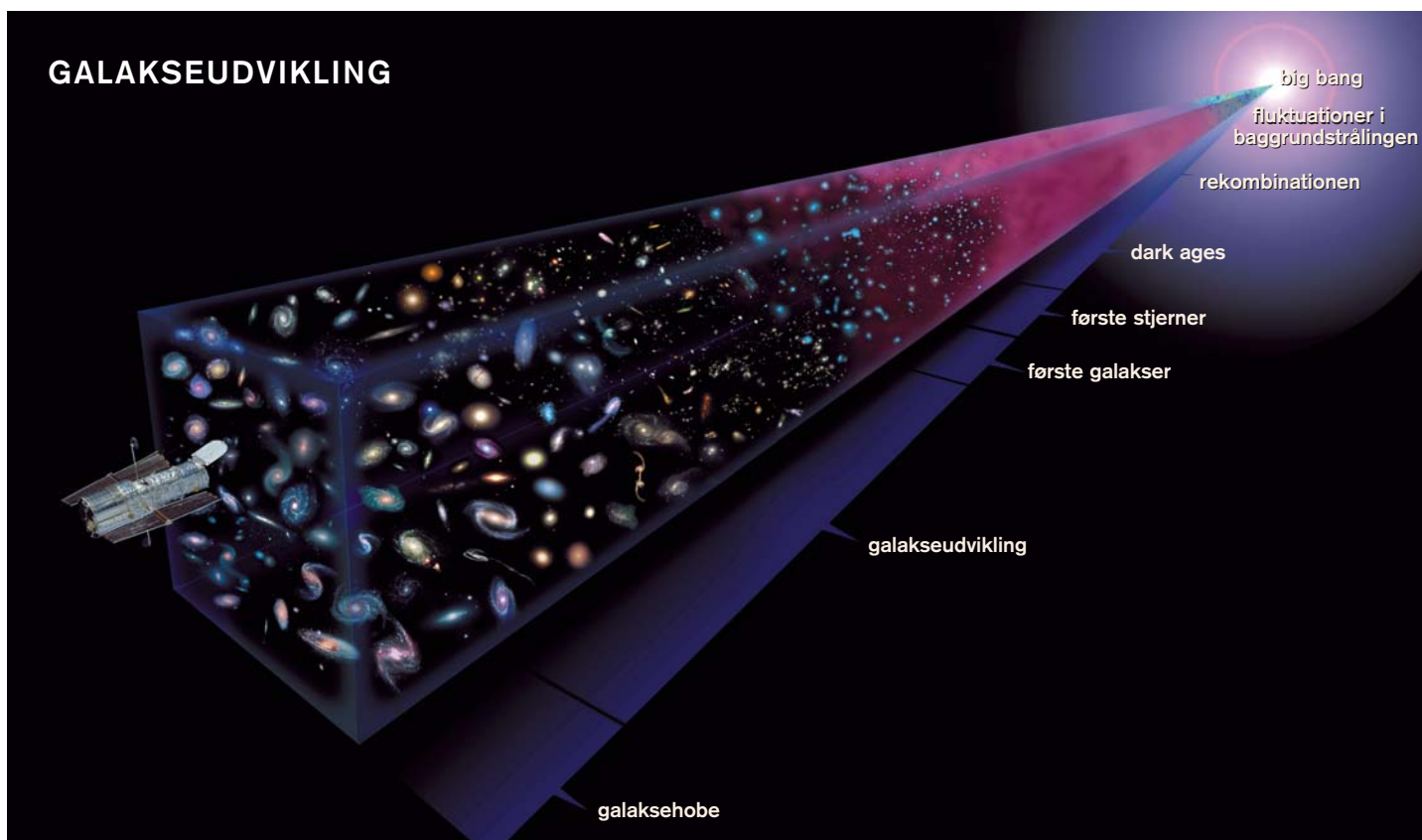
uhyre vanskeligt at observere endnu fjernere galakser, dels fordi disse galakser er umådeligt lyssvage, dels fordi man kun kan modtage lys fra så fjerne galakser i den infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum. Dette skyldes den såkaldte kosmologiske





6. Afvigelser fra middeltemperaturen i den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling. Kortet giver dybest set et indblik i tæthedsvariationer i Universet som det var ca. 300.000 år efter Big Bang. Afvigelserne er her ekstremt små, af størrelsesordenen 10 ppm. Det er af små frø som disse galakserne siden hen voksede frem, først formodentlig 300-600 mio. år efter Big Bang. (WMAP)

rødforskydning hvorved lys udsendt fra meget fjerne objekter modtages med op mod 10 gange længere bølglængde end det blev udsendt med. Lys man i dag kunne have modtaget som synligt lys, skulle være udsendt som meget energirig ultraviolet stråling, og en sådan stråling har en meget stor sandsynlighed for at blive absorberet af brint på sin vej fra galaksen til Jorden. Den p.t. fjerneste kendte galakse befinder sig netop i den maksimale afstand hvor den kan detekteres med traditionel, optisk teknologi. For at detektere endnu fjernere galakser – gå længere tilbage i tiden – så må vi bevæge os ud i det infrarøde.



7. Skematisk billede af galaksernes udviklingshistorie. Jo fjernere objekter vi observere fra jorden, jo længere ser vi tilbage i tiden. Tiden mellem udsendelsen af den kosmiske mikrobølge-baggrundstråling og dannelsen af de første galakser kalder kosmologerne for Universets “Dark Ages”. I denne periode var der mørkt i Universet i den forstand, at der ikke var nogen kilder til synligt lys. (STScI)



Komplikationerne ved at observere i den infrarøde del af spektret er flere. Dels er detektorer for denne stråling ikke så følsomme som optiske detektorer, dels er den infrarøde baggrundsstråling på himmelen langt kraftigere end den optiske.

NYE OBSERVATORIER PÅ VEJ:
VISTA OG JAMES WEBB
SPACE TELESCOPE

For at tackle vanskelighederne forbundet med at finde og studere de første galakser må man anvende nye teknikker. I den nære fremtid vil flere nye teleskoper specielt designet til observationer i det infrarøde se dagens lys. Det vigtigste bliver formodentlig det nye rumteleskop – James Webb rumteleskopet – der netop har som sit vigtigste mål at finde og studere de første galakser. Det forventes at blive opsendt i 2013. Dette teleskop er optimeret til at kunne lave ultradybe optagelser i infrarødt lys. Derfor skal teleskopet observere fra det såkaldte Jord-Sol L_2 -punkt halvanden million kilometer fra Jorden. Et solskjold skal sikre at teleskopets instrumenter altid er kolde (ca. $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$) og dermed har maksimal følsomhed og minimal baggrundstøj.

På lidt kortere tidsskala vil det Europæiske Sydobservatoriums VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, *fig. 8*) spille en vigtig rolle. VISTA udmærker sig ved i det infrarøde spektrum at kunne observere en meget stor del af himmelen ad gangen. Derfor er det et meget effektivt til at afsøge et stort område



8. VISTA-teleskopet. Dette teleskop, der forventes færdigbygget i 2008, er optimeret til at observere i infrarødt lys og er i stand til at observere store dele af himlen på en gang. Dark kosmologicerteret er involveret i et projekt, der med VISTA teleskopet vil søge efter nogle af de allerførste galakser, der blev dannet efter Big Bang. (VISTA team).

og derved lokalisere de sjældne, meget fjerne galakser. Danmarks Grundforskningsfonds Center for Kosmologi (Dark Cosmology Centre) ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet er involveret i et projekt der vil bruge VISTA til at lokalisere de første galakser vha. en særlig teknik hvor man med et specielt smalt filter kan detektere rødforskudt Lyman- α -stråling – stråling fra brint, der bliver varmet op af unge, nyfødte stjerner.

Man formoder at de første galakser

blev dannet i de første 300-600 mio. år efter Big Bang. Præcist hvornår det skete afhænger af naturen af det mørke stof, og til dels også af naturen af de første stjerner. Med de nye teleskoper der er på vej, vil det være muligt at se tilbage til slutningen af Universets dark ages og direkte se de første galakser dukke frem af mørket som små Skt. Hans orme. Det er overvejende sandsynligt, at vi inden for det næste ti-år vil nå tilbage til den epoke hvor de første galakser dukkede frem af mørket.

