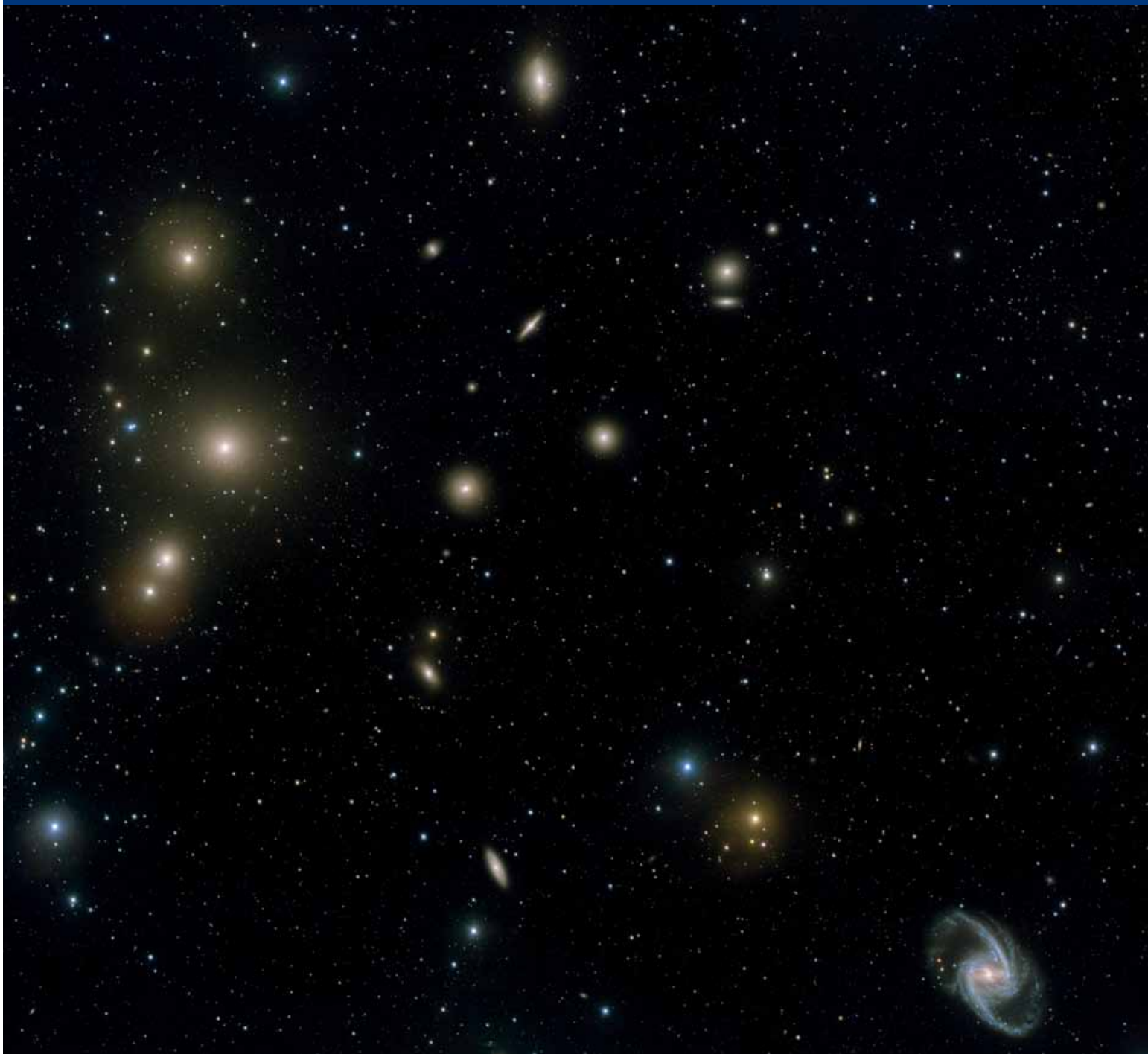


Kapitel 4 Galakser

Af Johan Peter Uldall Fynbo, Lise Christensen og Palle Møller



Når man står på Jorden og ser ud i Universet, væk fra stjernerne i Mælkevejen, er der to ting, der præger billedet: at nattehimlen er mørk og at det lys, man kan se, kommer fra galakser. Nattehimmels mørke har bl.a. at gøre med Universets endelige alder. Hvor himlen er mørk, ser man i retninger, hvor der ikke har været tid nok siden Universets begyndelse til, at lyset er nået ned til Jorden (kap. xx). Alternativt kan man sige, at man ser tilbage til en tid, hvor der endnu ikke var galakser. Der hvor man faktisk kan se lys, kommer lyset fra galakser. Galakserne er byggestenene for al den struktur, der kan observeres i Universet.

Galaksernes opdagelse

Mælkevejen, det lysende bånd der ses over det meste af himlen (fig. 4.01), har været kendt siden oldtiden. Ifølge den græske mytologi er Mælkevejen opstået, fordi Hera spildte mælk, da hun ammede Herakles, og det er herfra det danske navn og ordet galakse

stammer. På græsk betyder ordet galakse *mælkeagtig*. På islandsk, og derfor sandsynligvis på oldnordisk, kaldes Mælkevejen *Vetrarbrautin*, som betyder vintervejen. Samme ord bruges i Sverige: *Vintergatan*. På finsk-ugriske sprog omtales Mælkevejen som *Fuglenes vej*, fordi man mente at trækfuglene fulgte den. På kinesisk hedder Mælkevejen *Sølvfloden*.

Den første dokumenterede observation af en galakse uden for Mælkevejen går helt tilbage til Harald Blåtands tid, hvor den persiske astronom Abd al-Rahman Al Sufi i 964 beskrev en tåget lyskilde i stjernebilledet Andromeda. I dag ved man, at det var Andromedagalaksen, han så. Al Sufi beskrev også de to skyer på den sydlige himmel, der nu kendes som De Magellanske Skyer, og som er små nabogalakser til Mælkevejen. Den første vesterlænding, der har beskrevet disse skyer, er Peter Martyr fra Anghiera, der levede i 1400-tallet. Siden blev de i

1511 beskrevet af den portugisiske opdagelsesrejsende Magellan, som de i dag er opkaldt efter.

Det næste vigtige skridt i udforskningen af galakserne er opfindelsen af kikkerten. I 1609 rettede Galileo Galilei som den første en kikkert mod objekter på himlen. Herefter voksede antallet af observerede galakser – eller tåger som de kaldtes dengang. For eksempel blev Trekantgalaksen, i dag kaldet Messier 33, der som Andromedagalaksen og De Magellanske Skyer ligger nær Mælkevejen, opdaget i 1654 med en kikkert af italieneren Giovanni Batista Hodierna.

Det er interessant at se, hvordan de tidligste observatører af galakser fortolkede det nye, de så. Som man gør i dag, prøvede de naturligvis først at indpasse det nye fænomen i det verdensbillede, de havde i forvejen. Dette illustreres smukt i følgende citat af den engelske præst og filosof William Derham, der i øvrigt



4.01. Fiskeøjefoto af Mælkevejen over Paranal Observatoriet i Chiles Atacama-ørken. Til venstre for Mælkevejen ses de to Magellanske skyer og foruden til højre ses Andromedagalaksen (det svage lys ved siden af det forreste teleskop). Øverst til højre ses planeten Jupiter. Mælkevejen er en stor galakse med en diameter på ca. 100.000 lysår og en total masse på over 100 mia. solmasser.

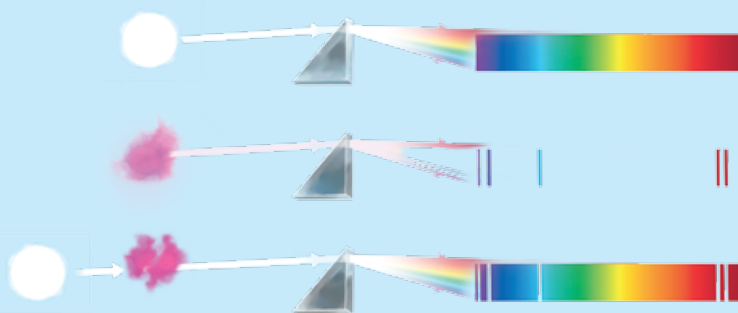
Om aftenen den 29. August 1864 rettede jeg for første gang teleskopet mod en planetarisk tåge i stjernebilledet Dragen. Læseren kan nu måske i nogen grad forestille sig den følelse af intens spænding, blandet med en vis grad af ærefrygt, med hvilken jeg, efter få øjeblikkes tøven, satte mit øje for teleskopet. Ville jeg komme til at skue et hemmeligt sted for skabelse?

Huggins blev chokeret: Han så bare en enkelt klar **emissionslinje** og ikke en kontinuert fordeling af lys, som man ser det fra stjerner. For Huggins var konklusionen klar. Tågerne er gasansamlinger og ikke samlinger af stjerner som Mælkevejen. I dag ved man, at det objekt Huggins observerede har en anden natur, nemlig slutstadiet for en solignende stjerne, der skyder sine ydre lag bort og danner en såkaldt planetarisk tåge. På Huggins tid mente man, at alle tågerne havde samme natur. Det er værd at bemærke, at Huggins på sin måde eksemplificerer, hvordan videnskabsfolk er drevet af både stor nysgerrighed og en form for ærefrygt i deres studium af verdens beskaffenhed.

I 1902 skrev Poul Heegaard, der senere blev professor i matematik både ved Københavns og Oslos universiteter og i øvrigt den første formand for Astronomisk Selskab i 1916, en meget udbredt bog med titlen *Populær Astronomi*. Her skriver han poetisk i bogens sidste linjer:

Tanken trænger ud i Verdensrummets Dybder og søger der at opdage den Plan, efter hvilken Solene er spredt i Verdensrummet. Den aner, at vort Solsystem og Fiksstjernerne er Led i en Helhed, der også omfatter de talløse Sole, der danner

Boks 4.01: Spektre



Der er i hovedsagen tre slags spektre: kontinuerte spektre som kommer fra varme objekter (fx Solen eller glødepærer), emissionslinjespektre som kommer fra bl.a. gasser (fx neonrør og LED-lamper) eller absorptionspektre, hvor en kold gas absorberer lyset fra en bagvedliggende lyskilde og giver spektallinjer.

Ordet “spektrum” kommer af det latinske *specere* som betyder at se. Ordet betyder i astronomien målinger af, hvor meget lys, der kommer fra et objekt på himlen ved forskellige bølgelængder af lyset. Astronomer danner spektre ved at lade lyset passere igennem optik, der spreder lyset som funktion af bølgelængden, som fx et prisme.

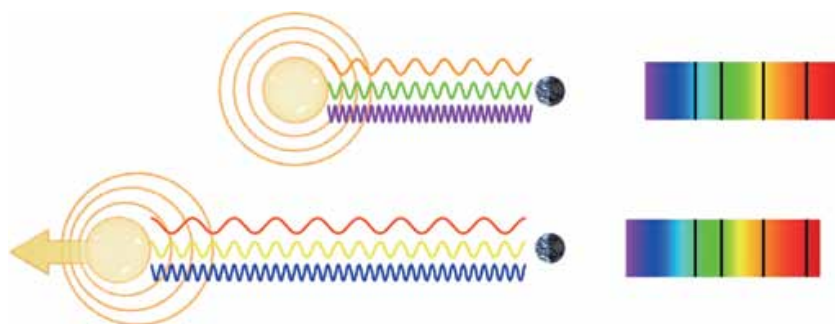
Mælkevejen. Men hvilken stilling indtager Stjernetaagerne og Stjerneboblene til dette System? Og hvad findes der i det uendelige Verdensrum uden for dette System? Vi har her naaet Grænsen for Astronomiens Viden.

emissionslinje

En linje der kan ses i et spektrum fra en gas. En glødende gas udsender emissionslinjer fra de grundstoffer, der findes i gassen.

Det er smukt formuleret og et godt udgangspunkt for det gennembrud, der fulgte i de efterfølgende årtier.

Takket være nye observationer i sidste halvdel af 1800-tallet og starten af 1900-tallet, ikke mindst Vesto Melvin Sliphers af spiraltågernes radialhastigheder (*fig. 4.03*) udført 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.



4.03. Radialhastighedsmålinger. Når en lyskilde bevæger sig væk en observatør giver den såkaldte Dopplereffekt anledning til rødforskydning af spektrallinjer. Vesto Slipher målte i 1910'erne og 20'erne, at spiraltåger har meget store radialhastigheder væk fra Jorden. Denne opdagelse var afgørende for at fastslå, at spiraltågerne ikke er en del af Mælkevejssystemet.

Gennembruddet i forståelsen af galaksernes natur blev forsinket ca. et årti af flere fejlmålinger, hvilket viser, at forskningen ikke altid skrider i den "rigtige" retning. Den hollandske astronom Adrian van Maanen publicerede i perioden 1916-1923 adskillige målinger af interne egenbevægelser i spiraltåger. Med andre ord mente han, at han kunne måle strukturer bevæge sig inde i spiraltågerne. Dette blev tolket til støtte for nebular-hypotesen, idet sådanne bevægelser ikke burde kunne måles, hvis tågerne var meget fjerne systemer lig Mælkevejen. Målingerne viste sig siden at være helt forføjede. Den svenske astronom Karl Bohlin bestemte endvidere i 1911 **parallaksen** for Andromedatågen, og deraf kunne han udlede en afstand på ca. 36 lysår. Dette viste sig også efterfølgende at være en fejlmåling. Førnævnte Poul Heegaard skrev i 1921 en ny bog med titlen *Stjerneverdenen*. Det er meget interessant at sammenligne beskrivelsen af galakser i de to bøger fra Poul Heegaards hånd. I 1921 skriver Poul Heegaard således korrekt om stjernetågerne:

Spiraltaagerne har i Modsætning til Gastaagerne et Absorptionsspektrum, saa man maa antage at de egentlig er Stjernehoer, som blot staar for langt borte til, at vi kan opløse dem.

Herefter beskriver Poul Heegaard Adrian van Maanens resultater og konstaterer, at spiraltågerne stadig er forbundet med betragtelig usikkerhed.

Løsningen på gåden kom kort efter. I 1923-1926 bestemte den amerikanske astronom Edwin Hubble (fig. 4.04) ved Mount Wilson Observatoriet afstandene til nogle af de nærmeste galakser (NGC6822, Andromedagalaksen og Messier 33). Han udnyttede egenskaber ved en særlig gruppe variable stjerner, der kaldes Cepheider (fig. 4.05). Hermed kunne det endeligt fastslås, at disse himmellegemer og dermed alle disse galakser havde samme natur som Mælkevejen. At denne erkendelse blev gjort netop på dette tidspunkt hang i høj grad sammen med færdiggørelsen af Hooker-teleskopet i 1917 (kap. xx). Dette tele-



4.04. Den amerikanske astronom Edwin Hubble var banebrydende for den astronomiske forskning i første halvdel af 1900-tallet. Mest berømt er han for opdagelsen af galaksernes natur og Universets udvidelse.

skop 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. Med dette teleskop var det muligt for første gang at tage billeder, der var skarpe nok til helt entydigt at skelne enkeltstjerner i de nærmeste galakser.

Dette er en af de sidste hundrede års største opdagelser: Mælkevejen er én blandt myriader af andre galakser i Universet.

parallaksen

Parallaksen er den vinkel, et objekt har flyttet sig på himlen, når Jorden har bevæget sig et halvt år i sin bane rundt om Solen.

For at belyse galakseres størrelse kan det være nyttigt med en nedskaleret analogi: Hvis Jorden var en ært, ville Solen være ca. 100 meter væk og være på størrelse med en badebold. Mælkevejens centrum ville så være 25 millioner km væk svarende til en sjettedel af afstanden mellem Jorden og Solen i den rigtige verden. Størrelserne er nærmest ubegribelige. Heber Curtis, som var den vigtigste fortalere for ø-univers ideen i den store debat formulerede det på denne måde i 1924 her oversat:

... der er noget grandios 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 af millioner 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 hundrede millioner lysår.

I dag tager man dette for givet, men det er altså en indsigt, der først blev nået midt i 1920'erne.

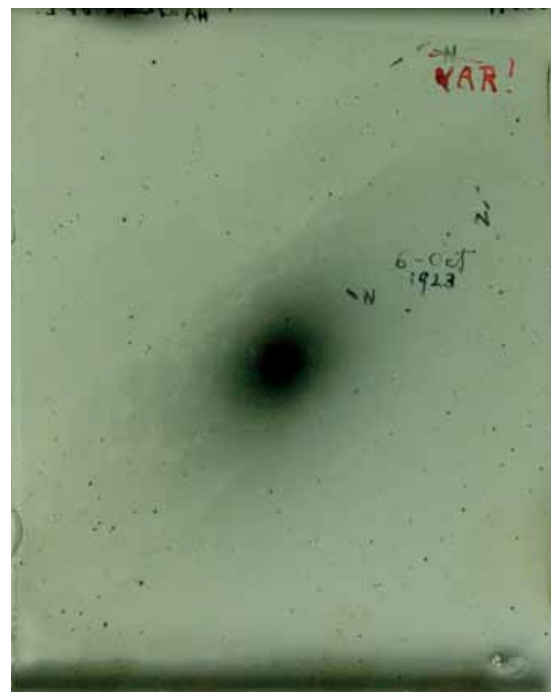
Galaksernes natur

Mellem opdagelsen af galaksernes sande natur og i dag ligger ca. 90 års forskning. Stort set samtidigt med opdagelsen af galaksernes natur fandt Edwin Hubble også frem til det der nu kaldes Hubble-loven, nemlig at de store rødforskydninger Vesto Slipher som den første havde målt for spiralltågerne vokser

proportionalt med afstandene. Hermed havde Big Bang teorien fundet sit første fundament baseret på observationer (kap. xx).

Frem til sidst i 1970'erne var ekstragalaktisk astronomi i høj grad et amerikansk foretagende, hvilket skyldes, at amerikanske astronomer havde adgang til bedre og større teleskoper på bedre lokaliteter end astronomer i andre dele af verden (kap. xx). Mange af de bedste europæiske astronomer flyttede af samme grund til USA. Dette eksemplificeres meget godt ved indholdet i den lærebog i astronomi som blev brugt på danske universiteter fra 1930'erne og frem til i hvert fald omkring 1950: *Lærebog i Astronomi* af Elis og Bengt Strömberg (anden udgave blev udgivet i 1945). Her handler kun tre ud af 455 sider om galakser, her kaldet *anagalaktiske* tåger, og kosmologien. De første artikler om galakser eller kosmologi med danske medforfattere blev først udgivet i anden halvdel af 1970'erne.

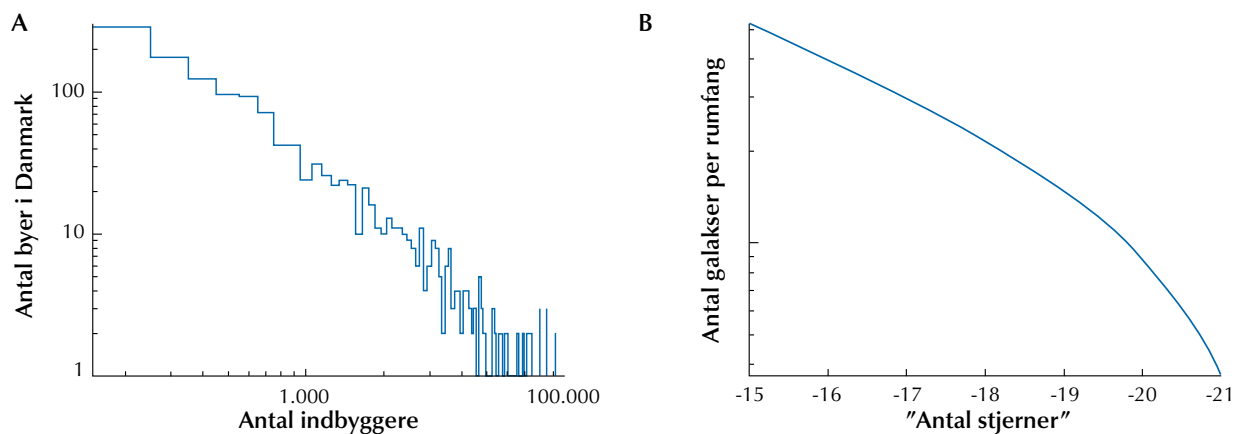
I USA gjorde man, takket være de bedre observationsmuligheder, store fremskridt allerede fra 1930'erne. Vigtige navne i dette arbejde er folk som Walter Baade (der oprindeligt kom fra Tyskland) og Allan Sandage, der var student af Baade og som også arbejdede sammen med Edwin Hubble. I grove træk lærte man følgende om galakser i perioden 1930-1980: Størrelsen af galakserne varierer voldsomt med diameter fra nogle få hundrede lysår til flere hundrede tusinde. Der er mange flere små galakser end store. Variationen i lysstyrke er et groft mål for antallet af



4.05. En legendarisk fotografisk plade af Andromedagalaksen med Hubbles markering af en Cepheidestjerne øverst til højre.

stjerner i galakserne (fig. 4.06). Fordelingen ligner i forbløffende grad fordelingen af antal byer som funktion af indbyggertal i Danmark.

Edwin Hubble studerede også galaksernes udseende og opstillede på den baggrund allerede i 1925 en klassifikation baseret på udseende. Spiralgalakser (fig. 4.07A) er roterende systemer med tydelig spiralstruktur. Spiralstrukturen fremtræder tydeligt, da der i spirallarmene er mange lysstærke, unge, blå stjerner. Spiralgalakser indeholder meget kold gas, hvoraf der kan dannes nye stjerner. Mælkevejen er en sådan spiralgalakse. Elliptiske galakser (fig. 4.07B) er systemer uden synlig rotation, men hvor stjernerne har tilfældige, ellipseformede baner. Elliptiske galakser indeholder meget lidt kold gas og danner stort set ingen

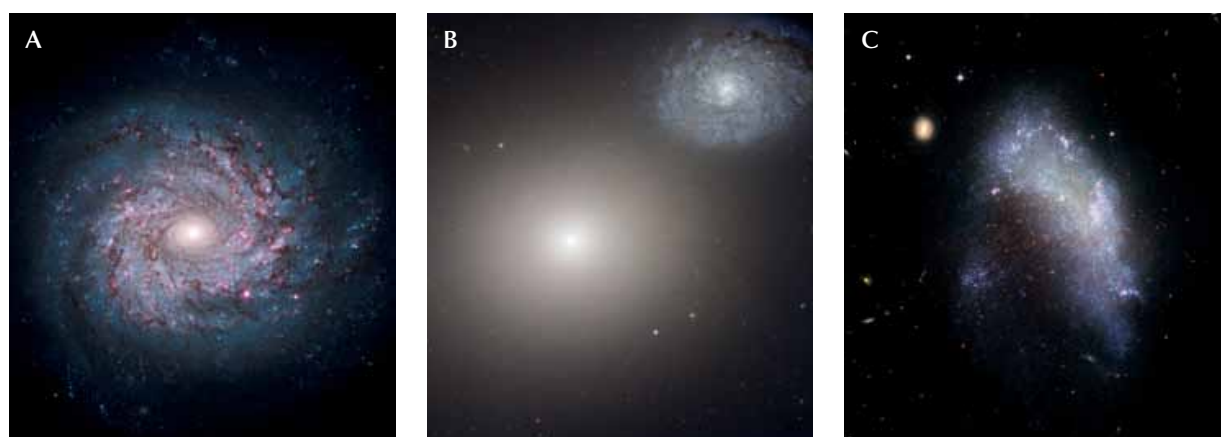


4.06. Indbyggerantal i byer i Danmark og galakseres lysstyrke har lignende fordelinger. A: Indbyggerantal i byer i Danmark. B: Galakseres lysstyrke. Enheden på x-aksen er den såkaldte absolutte lysstyrke, som er et logaritmisk mål for den totale lysmængde, som er omtrentlig proportional med antallet af stjerner.

nye stjerner. Elliptiske galakser synes at være resultatet af sammenstød mellem flere spiralgalakser, hvori kraftige udbrud af stjernedannelse hurtigt opbruger al gassen. Endelig er der et stort antal af de såkaldte irregulære dværggalakser (fig. 4.07C), de er lyssvage og ofte aktivt stjernedannende systemer.

Man fandt også ud af, at galakser ikke er fuldstændigt jævnt fordelt i Universet. Der findes store ansamlinger af galakser som man nu refererer til som *galaksegrupper* og *galaksehobe*. Galaksegrupper indeholder 5-100 galakser, mens galaksehobe kan indeholde tusindvis af galakser. I galaksehobe udgør galakserne

kun en lille del, mens langt det meste (normale) stof udgøres af diffus gas, der udfylder rummet mellem galakserne. Denne gas er meget varm (mange millioner grader varm) og lyser derfor kraftigt i røntgenområdet. Galaksehobe er de største objekter, man kender i Universet (fig. 4.08).

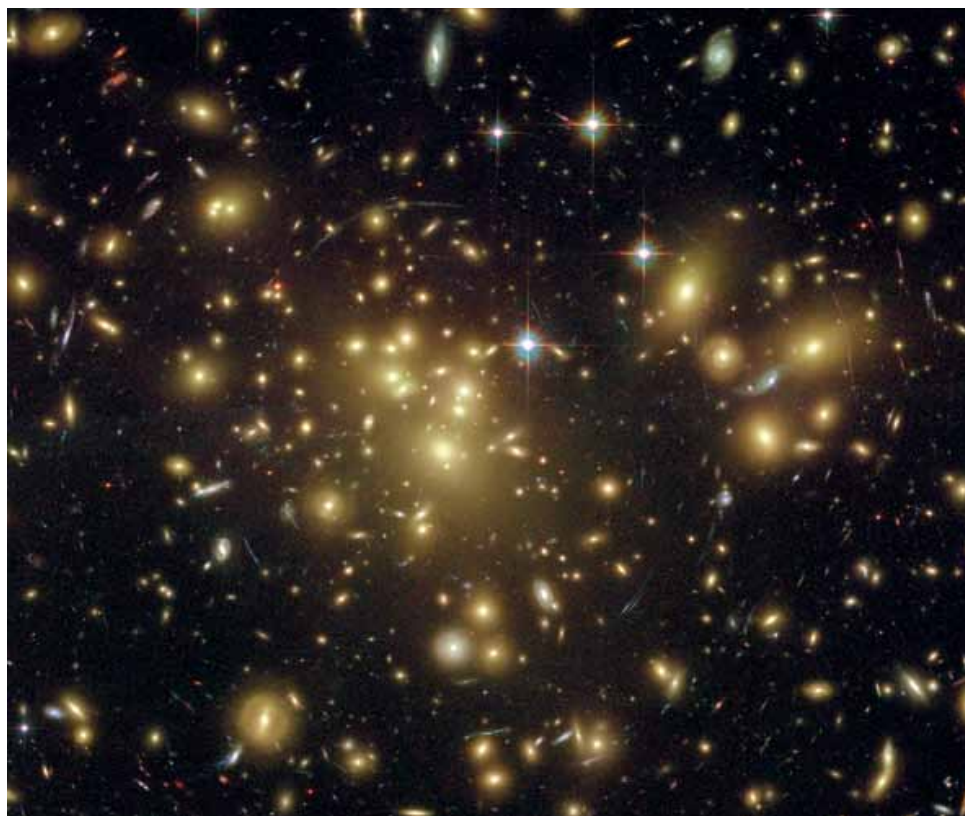


4.07. Galakser findes i det lokale univers i tre hovedgrupper. A: Spiralgalakse. B: Elliptisk galakse. C: Irregulær dværggalakse.

Allerede i 1930'erne opdagede astronomen Fritz Zwicky ved at studere galakseres bevægelser i Coma-galaksehoben (fig. 3.05, s. xx), at der må findes mørkt stof. Fritz Zwicky fandt, at Coma-galaksehobens 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* (kap. xx). Evidens for mørkt stof blev også fundet ved at studere banerne for stjerner og gas i spiralgalakser. Her spillede den amerikanske astronom Vera Rubin i 1970'erne en afgørende rolle, men der var også bidrag fra den dansksvenske astronom Anders Reiz, der var professor ved Københavns observatorium fra 1958 til 1985.

Undertiden støder galakser sammen. Afstandene mellem stjerner i galakserne er så enorme, at der ikke sker sammenstød mellem stjernerne, når galakserne støder sammen. Derimod sker der en omfordeling af stjernerne, således at sammenstød af to spiralgalakser kan lede til dannelsen af en elliptisk galakse (fig. 4.09).

De såkaldte aktive galakser blev opdaget først i 1940'erne af den amerikanske astronom Carl Seyfert som særlig lysende kerner med kraftige emissionslinjer i nogle spiralgalakser (såkaldte Seyfert-galakser). Sidenhen i 1950'erne opdagede Walter Baade og Rudolph Minkowski, at nogle galakser er kraftige kilder til radiostråling. De såkaldte **kvasarer** blev opdaget i 1960'erne og deres natur som ekstremt lysstærke galaksekerner blev fastslået af den hol-



4.08. Galaksehoben Abell 1689. Hoben har navn efter George Abell, der i 1950'erne var en af pioniererne inden for systematiske undersøgelser af galaksehobe. De store, gullige galakser er medlemmer af galaksehoben. De lysende cirkelbuer er lys fra fjernere galakser, der er udsat for gravitationel linseffekt af den tunge galaksehob.

landske astronom Maarten Schmidt i 1963 (kap. xx). Aktive galaksekerner ses ofte i galakser, der er ved at støde sammen med andre galakser.

kvasarer

Kvasarer er sorte huller med meget store masser, som ligger i centrene af nogle galakser. Kvasarer udsender ekstremt store energimængder og kan derfor ses ud til meget store afstande.

De første galakser

Astronomien har tilfælles med evolutionsbiologien, at der er en *historie*, man må belyse, før man kan gøre sig

håb om at forstå, hvor galakserne kommer fra og for at forstå galaksernes egenskaber i dag. Astronomien har en stor fordel frem for evolutionsbiologien – fortiden kan observeres direkte. Fordi lyset har en endelig udbredelseshastighed på ca. 300.000 km/s, ser man tilbage i tiden, når man kigger ud i rummet (fig. 4.10). På afstande som her på Jorden er effekten forsvindende lille. Hvis man ser fra en bjergtop til den næste, så ser man i størrelsesordenen 1/10.000 sekund tilbage i tiden. På astronomiske afstande er effekten mere betragtelig: Månen ses, som den var for et sekund siden, lyset fra Solen er ca. 8 minutter gammelt, og lyset fra Pluto er mere



4.09. Galakseparret Arp 273. To spiralgalakser, der er i færd med at støde sammen.

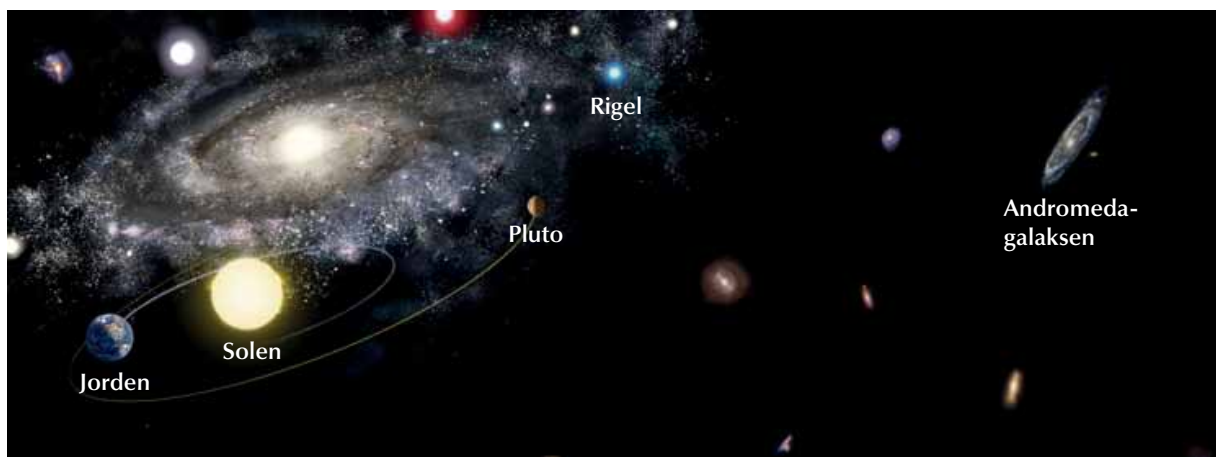
end fem en halv time undervejs. For de nærmeste stjerner ser man adskillige år tilbage i tiden og for Andromedagalaksen ca. 2 millioner år. For de fjerneste galakser ser man tilbage over et tidsspand, der er mere end 90% af tiden siden Big Bang.

Den nuværende teori for galaksedannelsen er i grove træk følgende: Ganske små brøkkele af et sekund efter Big Bang blev en lille, mikroskopisk del af et muligvis meget komplekst univers "blæst op" til noget langt større end det nuværende observerbare univers. Mere præcist var der en fase, som var kendeteg-

net ved en eksponentiel udvidelse af Universet – den såkaldt *inflation* (kap. xx). I denne proces blev små ujævnheder i energitætheden, formentlig 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 kan direkte observeres som de små ujævnheder i den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling (kap. xx).

I lang tid efter Big Bang var energitætheden i Universet domineret af lyset, og i den periode skete der ikke meget med størrelsen af fluktuationerne, fordi lysets strålingstryk modvirkede sammentrækning af stoffet. Men efter ca. 50.000 år begyndte energitætheden at blive domineret af (mørkt) stof, og dermed blev tyngdekraften stærk nok til at få fluktuationerne til at vokse. Effekten af disse fluktuationer kan observeres direkte som temperaturfluktuationer i den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling. Den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling giver et fantastisk indblik i strukturen af det tidlige univers, ca. 400.000 år efter Big Bang. 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 lyset tidligt i Universets historie og senere mørke energi (kap. xx) udøver, og på den anden side tyngdekraften, der prøver at trække stoffet sammen. En galakse er opstået fra en positiv ujævnhed, 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 massen i denne del af Universet begyndte at trække sig sammen igen. I



4.10. Da lyser udbreder sig med en bestemt fart på ca. 300.000 km/s, så ser man altid tilbage i tiden. Solen ser ud som den var for 8 minutter siden, Pluto som den var for ca. fem en halv time siden, stjernen Deneb i Svanen som den var for ca. 3.000 år siden og Andromedagalaksen som den var for ca. 2 millioner år siden. For de fjernest kendte galakser ser man mange milliarder år tilbage i tiden.

sådanne områder var det muligt for gas at blive presset sammen, køle ned til få grader Kelvin og begyndte at danne stjerner og dermed udsende lys. Det lyder måske paradoksalt, men gassen må først blive meget kold, før den kan blive tæt nok til at danne stjerner. Galakser er med andre ord steder i Universet, hvor det er muligt at lave stjerner.

rekombinationen

Rekombinationen betegner den kosmiske epoke, hvor det blev koldt nok til, at elektroner og atomkerner kunne kombineres under dannelsen af neutrale atomer.

En afgørende ingrediens i dette scenario er det mørke stof. Uden det mørke stof er det umuligt at komme fra de små fluktuationer til de struk-

turer, inklusiv 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 derimod ikke klumpe sig sammen før lystrykket falder efter **rekombinationen**, ca. 400.000 år efter Big Bang. Tilstedeværelsen af en dominerende mængde mørkt stof kickstarter i en vis forstand dannelsen af galakserne. Galaksedannelse afhænger derfor 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 man 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 man ved at bestemme hvornår og hvordan de allerførste galakser blev dannet lægge meget stærke bånd på det mørke stofs egenskaber.

Lokalisering af de første galakser

I løbet af 1980'erne begyndte man at søge efter bevis for *de første galakser* (første i betydningen først efter Big Bang) eller i hvert fald forstadierne til de galakser, man ser i dag. Grundlæggende benytter astronomer sig af spektre til at finde afstande af fjerne objekter. Galakser udsender lys med specifikke bølgelængder, og jo fjernere galakserne er, jo mere er de observerede bølgelængder forskudt mod den røde del af spektret (kap. xx). Rødforskydning beskrives ved at spektre bliver strakt med en faktor $(1 + z)$, hvor z kaldes rødforskydningen. Altså helt konkret:

de bølgelængder man måler her på Jorden er $1 + z$ gange længere end bølgelængderne af det lys, galakserne oprindeligt udsendte. Rødforskydningen hænger nøje sammen med afstanden, så når man har målt rødforskydningen kan man beregne både afstanden og hvor længe lyset har været undervejs.

Radiogalakser og kvasarer

Fra 1950 og op til 1970'erne fandt man først og fremmest galakser med højere rødforskydninger ved at studere **radiogalakser** og kvasarer (kap. xx). Kvasarer er meget lysstærke. De klareste udsender mere end 100 gange så meget lys som Mælkevejen på trods af, at de ikke er meget større end Solsystemet. Derfor kan de relativt nemt findes selv i meget store afstande. Ydermere ændrer kvasarernes fysik sig ikke nævneværdigt fra det nære til det fjerne Univers, så astronomer benytter sig af kvasarers karakteristiske farver til at lokalisere de allerfjerneste kilder. Takket være medlemskabet i *det Europæiske Syd-Observatorium* (ESO), som Danmark tilsluttede sig i 1967 (kap. xx), kunne danske astronomer også bidrage til denne forskning. Blandt andre Ralph Florentin Nielsen og Per Kjærgaard Rasmussen, arbejdede allerede fra første halvdel af 1970'erne på metoder til at lokalisere meget fjerne kvasarer både med fotografiske plader og med specialudviklede filtre til såkaldte elektronografiske kameraer. Disse projekter markerer, så vidt man kan se, starten på den ekstragalaktiske forskning i Danmark. Siden dengang er antallet af lokaliserede kvasarer vokset eksplosivt, således at man nu kender mere end en million kva-

sarer på himlen. I 2011 fandt astronomen Daniel J. Mortlock og hans kolleger en kvasar med en rødforskydning på 7,1, hvilket stadig er det fjernest kendte af denne type objekter.

Smalbåndsfiler-teknik

Nogle typer galakser har en relativt svag udstråling over en stor del af deres spektrum, men udsender derimod kraftige emissionslinjer, som er karakteristisk for den gas, de indeholder. En typisk emissionslinjegalakse indeholder relativt få gamle stjerner samt mange tunge og unge stjerner, som udsender kraftig stråling. Denne stråling ioniserer gassen i galaksen, med det resultat, at galaksen udsender stråling fra den hydrogen- og oxygengas, som befinder sig inden i galaksen mellem dens stjerner. Allerede i 1960'erne blev det diskuteret, at man kan finde sådanne meget fjerne, unge galakser ved at lede efter disse kraftige emissionslinjer. Dette gøres ved at tage et billede af en galakse gennem et såkaldt smalt filter, dvs. et filter som kun transmitterer lys i et smalt bølgelængdeinterval omkring emissionslinjen. Hermed fremtræder galaksen som meget lysstærk, relativt til et billede taget gennem et filter med et bredere transmissionsinterval (et såkaldt bredt filter).

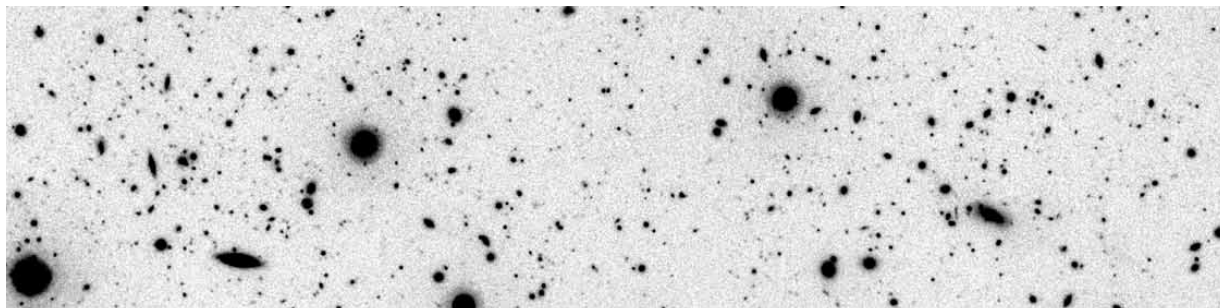
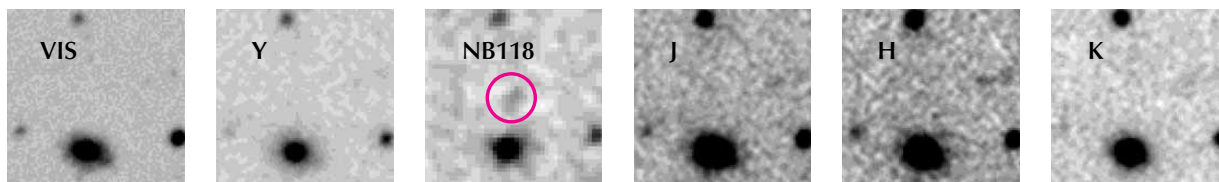
For de fjerneste galakser, er emission fra hydrogen afgørende. På dette sted er det nødvendigt at komme lidt mere ind på karakteristika ved hydrogen. Hydrogen består af en proton og en elektron. 91,2 nm er en ganske særlig bølgelængde for hydrogen derved, at fotoner med kortere bølgelængden end 91,2 nm har tilstrækkelig energi til at kunne

løsrive elektronen fra et hydrogenatom. Det er den proces, der kaldes *ionisation*. Da der er så meget hydrogen både i stjerner og i gassen mellem stjernerne i galakser, så kommer der meget lidt stråling ud af stjerner med bølgelængde under 91,2 nm. Og den stråling, der trods alt kommer fra stjernerne ved disse bølgelængder bliver stort set alt sammen brugt til at ionisere hydrogengassen mellem stjernerne. 121,6 nm er også en særlig bølgelængde, nemlig den bølgelængde der skal til for at hæve elektronen fra grundtilstanden til det næste energiniveau i hydrogen. Lys med denne bølgelængde kaldes Lyman- α . Når hydrogen rekombinerer efter ionisation, så udsendes der også Lyman- α emission, når elektronen tager det sidste spring ned til grundtilstanden. Derfor kan unge, gasrige galakser have meget kraftige Lyman- α emissionslinjer.

radiogalakser

Radiogalakser er galakser, der udsender meget energi i form af radiobølger.

Danske astronomer som Per Kjærgaard Rasmussen arbejdede som nævnt allerede i 1970'erne med specialudviklede filtre til eftersøgning efter kvasarer. Siden anden halvdel af 1980'erne har man brugt smalbåndfilterteknikken til at søge efter normale galakser med stadig større rødforskydninger. Dette kapitels forfattere har også arbejdet med smalbåndsfiler-teknikken siden starten af 1990'erne. I princippet kan de allerfjerneste galakser også



4.11. Et eksempel på en galakse, der er en god kandidat for en emissionslinje-galakse med rødforskydning 8,8. Objektet ses i den øverste række, hvor det kun ses i billedet taget gennem et smalt filter centreret på bølglængden 1.180 nm (NB118), mens det er usynligt i det visuelle og i en række brede filtre markeret ved deres tekniske navne Y, J, H, K. Det store billede viser en lille del (under 1 %) af det smal-filter billede i hvilket “ $z = 8,8$ -kandidaten” er fundet – det er virkelig en eftersøgning efter nålen i høstakken.

blive fundet via denne teknik, og en stor gruppe astronomer bl.a. fra Niels Bohr Institutet arbejder i øjeblikket på et projekt med ESO teleskopet VISTA med det formål at finde galakser med en rødforskydning på 8,8 (fig. 4.11).

Absorptionsudvalgte galakser

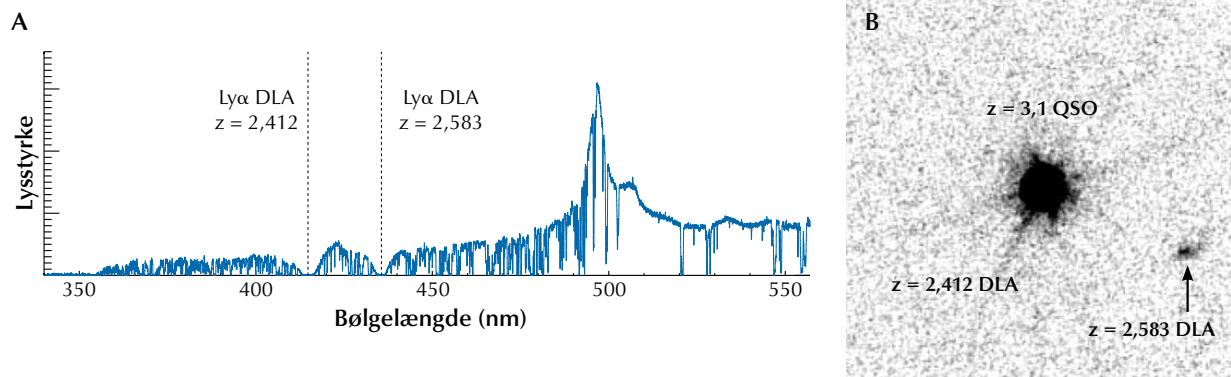
Spektroskopiske målinger af fjerne kvasarer viser, at ved kortere bølglængder end den rødforskudte Lyman- α linje optræder der en mængde absorptionslinjer. De fleste linjer dannes, når lyset fra kvasarer rammer skyer af neutral hydrogen undervejs fra kvasaren ned til Jorden. Dette fænomen kaldes Lyman- α skoven (fig. 4.12). Udover Lyman- α skoven optræder der undertiden kraftige absorptionslinjer som har en linjeprofil med karakteristiske brede “vinger”, som teknisk

kaldes dæmpningsvinger. Deraf har disse absorptionslinjer fået navnet Dæmpede Lyman- α Systemer (DLA). Sådanne linjer dannes, når skyen har en høj tæthed af hydrogen, omtrent som man ville forvente at se i en synsline gennem Mælkevejen. Den amerikanske astronom Arthur Wolfe rapporterede de første DLA'er i 1986, men kun gennem absorptionslinjer. Det har i mange år været meget svært at måle lyset fra DLA-galakserne, fordi de ligger tæt på synslinjen imod en meget kraftig kvasar, som er mange gange klarere end galaksen i forgrunden. Selvom galakserne er svære at se i emission, kan man udlede mange detaljer for galaksen via absorptionslinjerne i kvasarspektre, og den samlede viden om den kemiske sammensætning af meget fjerne galakser er domineret af DLA-studierne.

Siden 1980'erne har mange, inklusiv dette kapitels forfattere, prøvet at finde emission fra disse absorptionsudvalgte galakser, og indtil videre er kun relativt få af slagsen fundet (fig. 4.12).

Lyman-kant teknikken

En amerikansk gruppe ledet af astronomen Charles Steidel udviklede i første halvdel af 1990'erne en teknik til at afstandsbestemme mange fjerne galakser på samme tid. Steidel benyttede sig af at galaksernes spektrum alle bliver rødforskudt, og dermed ændrer galaksernes farver sig. Ved at observere galakser gennem tre filtre: et ultraviolet, et grønt og et rødt, kunne man observere, at fjerne galakser bliver yderst svage i det ultraviolette bånd i forhold til det grønne og røde bånd (fig. 4.13). Danske astronomer, fx Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen og



4.12. Et eksempel studeret af forfatterne. A: Spektrum af kvasaren Q0918+1636 som har en rødforskydning på 3,1. Det spektrale område med kortere bølgelængder end ca. 500 nm er Lyman-a skoven. De to store absorptionslinjer markeret med stiplede linjer er DLAer med rødforskydningerne 2,412 og 2,583. B: Fra Hubble rumteleskopet ses kvasaren som det mørke stjernelignende objekt i midten. Galaksen som forårsager DLAen ved $z = 2,583$ ses til højre. $z = 2,412$ DLAen skyldes en galakse som ligger stort set foran kvasaren. Begge DLAer har en usædvanlig høj grad af kemisk udvikling – dvs. et stort indhold af tungere grundstoffer end hydrogen og helium.

Peter Jakobsen, arbejdede i øvrigt allerede i 1970'erne med studier af galakser i det ultraviolette lys og med forståelsen af den såkaldte ultraviolette baggrundstråling. Med en rødforskydning på 3, vil galaksernes spektre blive tilstrækkeligt rødforskydet til at en karakteristisk spektroskopisk signatur, en såkaldt Lyman-kant, påvirker deres farver. Lyman-kanten opstår, når lys fra en fjern galakse sendes i alle retninger, og bølgelængder, som ligger ved kortere bølgelængde i forhold til Lyman-kanten ved $91,2 \times (1+z)$ nm, bliver absorberet af hydrogen, som ligger mellem galaksen og Jorden. Derved opstår Lyman-kanten. Med rødforskydninger større end ca. 5 bliver længere bølgelængder også absorberet, og her taler man om bølgelængder som kortere end Lyman- α linjen ved $121,6 \times (1+z)$ nm. Metoden er senere videreudviklet til at finde endnu fjernere galakser

helt ud til rødforskydninger på omkring 10 ved at benytte at Lyman-kanten forskydes ud til infrarøde bånd. Det er vigtigt at nævne, at metoden bevirker en betydelig usikkerhed på afstanden, og derfor bør en nøjagtig måling være baseret på spektroskopiske observationer.

Gammaglimt og deres værtsgalakser

I 1967 blev de første gammaglimt observeret med gammastrålingssatellitter i kredsløb om Jorden (kap. xx). Målet med Vela satellitten var at overvåge, om Sovjetunionen overholdt forbuddet med at teste kernevåben i Jordens atmosfære, men gammadetektionerne viste, at glimtene kom fra andre kilder end Jorden og Solen. Først i 1997 fandt man ved at måle rødforskydningen fra eftergløden af et gammaglimt, at disse opstod ved meget store rødforskydninger. I 2003 fandt to for-

skerhold ledet af Jens Hjorth fra Niels Bohr Institutet og Kris Stanek fra USA det endelige bevis på, at gammaglimt kommer fra specielle eksploderende stjerner. Eksplosionerne er yderst sjældne og er hyppigst set med rødforskydninger på omkring 2. Ved at finde fjerne gammaglimt kan astronomer dermed studere fjerne galakser, da man ved, at de eksploderende stjerner befinder sig i en fjern galakse.

Da stjerner i det tidlige univers sandsynligvis er meget tunge og nødvendigvis unge og med et lavt indhold af tungere grundstoffer end hydrogen og helium, kan man forestille sig at nogle af de allerførste stjerner også kunne eksplodere og give anledning til et gammaglimt. Da eftergløden fra et glimt kan være meget lysstærk, kan astronomer bruge glimtene til at finde nogle af de første galakser i Universet.

Meget forskning er fokuseret på at finde de fjerneste eksplosioner, og i 2009 fandt et forskerhold ledet af den engelske astronom Nial Tanvir og med deltagelse af mange danske astronomer fra Niels Bohr Institutet den til dato hidtidig højeste rødforskydning på 8,2 målt i et spektrum af eftergløden for et gammaglimt.

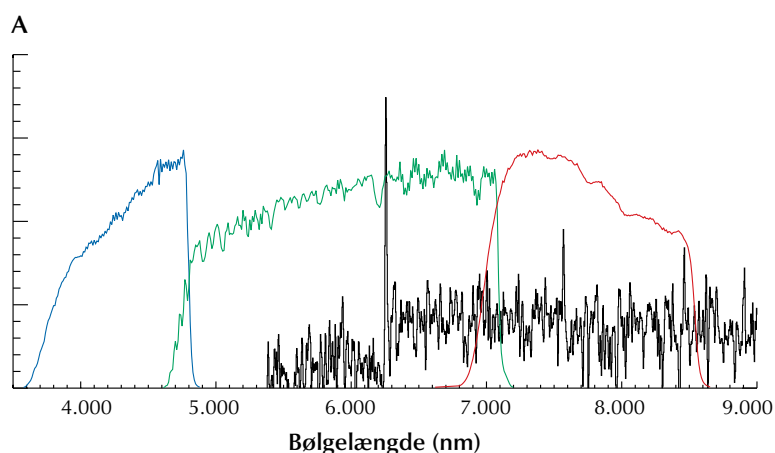
Det har ydermere vist sig at nogle af gammaglimtenes værtsgalakser er så svage at de ikke, eller kun meget vanskeligt, kan detekteres med selv de største teleskoper, der i dag er til råd-

dighed. Astronomer benytter sig derfor af gammaglimt til at undersøge galakser som ellers ville være for svage til at blive detekteret via Lyman-kant teknikken. Specielt har man endnu ikke set værtsgalaksen for det fjerneste kendte gammaglimt.

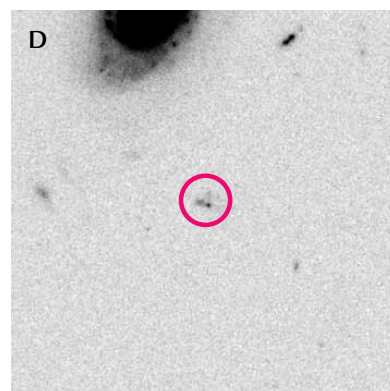
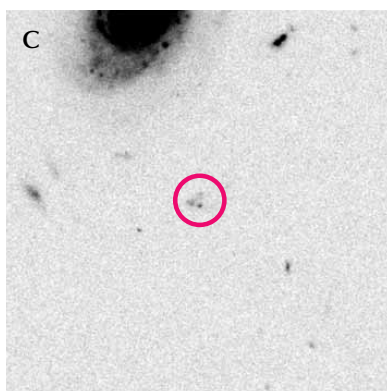
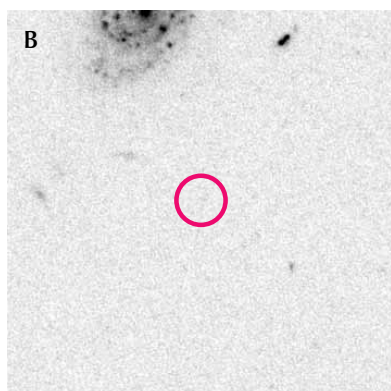
Gravitationslinser

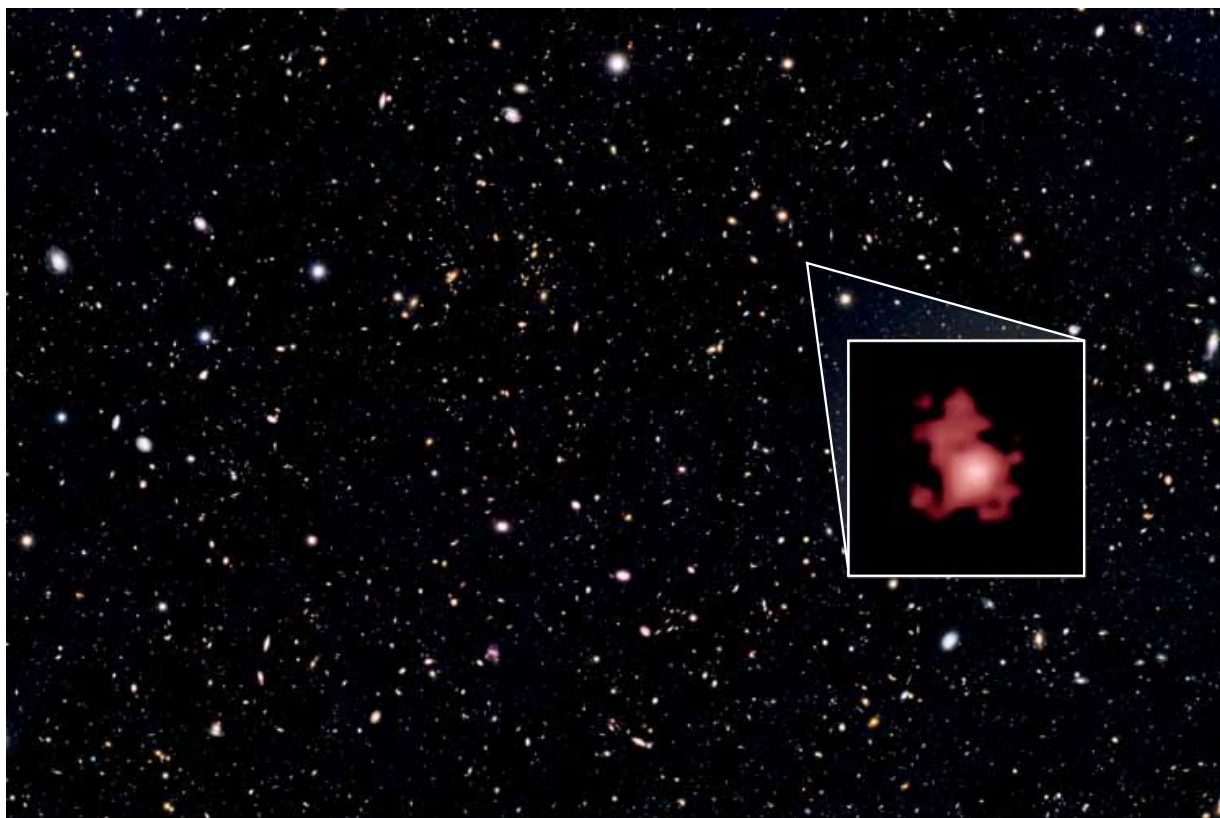
Hvis astronomer skal bestemme hvilke fysiske forhold der gør sig gældende for en galakse er spektroskopiske målinger nødvendige. Ved spektroskopiske observationer kan man undersøge, hvilke grundstoffer

er til stede og måle forekomsten af disse. Men for fjerne lyssvage galakser er dette umuligt. I stedet benytter astronomer sig af naturens egne store teleskoper: stærke gravitationelle linser (fig. 4.08). Lyset fra en fjern galakse bliver afbøjet og forstærket af fx en hob af galakser som ligger i forgrunden. Gravitationslinser blev forudsagt af Albert Einstein i 1911, men det var dog først i 1979 at Dennis Walsh og kolleger fandt den første gravitationslinse.



4.13. A: Princippet i Lyman-kant udvalgsmetoden. Ved at tage billeder i tre filtre, ultraviolet (U), grønt (G) og rødt (R), kan man finde meget fjerne galakser ved, at de "forsvinder" i U billedet. B, C og D: Et eksempel på et område på himlen observeret med U-, G- og R-filtre. Objektet i cirklen er en meget fjern Lyman-kant galakse som ikke er med i U-billedet, da man her observerer ved kortere bølgelængde end Lyman-kanten. De andre objekter ses i alle tre billeder og befinder sig derfor tættere på Jorden med lavere rødforskydninger.





4.14. Galaksen GNz11 er i 2016 den fjernest kendte galakse, med en rødforskydning på 11,1 svarende til en kosmisk tid på 400 millioner år efter Big Bang. Galaksen ligger i stjernebilledet Store Bjørn (som også indeholder Karlsvognen). Galaksen er ca. 25 gange mindre end Mælkevejen, men er i færd med at danne nye stjerner med stor hast.

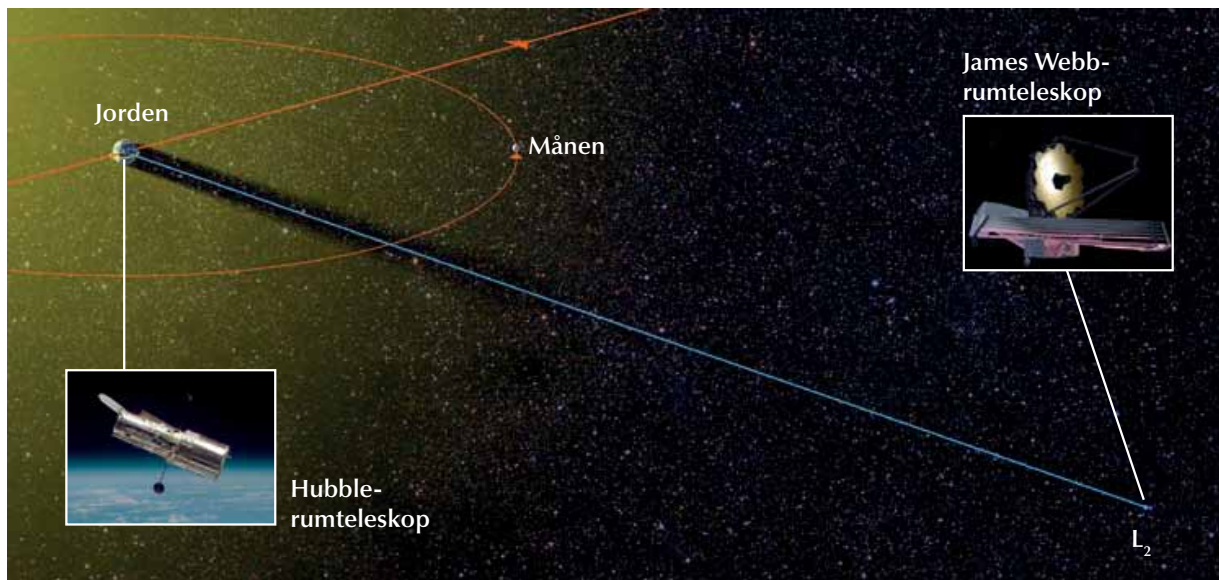
Siden den første opdagelse er der kommet hundredevis til, og specielt Hubble-rumteleskopet har været yderst vigtig i analysen af de fjerne galakser. Fordi lyset fra de bagvedliggende galakser bliver stukket ud, kan man også benytte disse systemer til at undersøge strukturen af galakserne med en rumlig opløsning som ellers ikke ville have været muligt uden gravitationslinsen. Det svarer lidt til et forstørrelsesglas, hvor man kan se finere detaljer end man kan uden forstørrelsen.

Nye observationer på vej

Ved hjælp af bl.a. de her skitserede metoder, har man de seneste 15-20 år kunne kortlægge i grove træk, hvordan galakserne har udviklet sig i den kosmiske historie. Universet har gennemgået en stadig mere intens galaksedannelsesaktivitet, der startede få hundrede millioner år efter Big Bang og fortsatte frem til en epoke med maksimal aktivitet, ca. 3-4 milliarder år efter Big Bang. Ved denne epoke var der også størst aktivitet af de supertunge sorte huller

(kap. xx), så man kan virkelig tale om en tid med kosmisk fyrværkeri. Siden da er aktiviteten aftaget, og dannelsen af nye stjerner i galakser bliver gradvist mindre og mindre, og meget langsomt går Universet mod en tid, om stadigvæk mange, mange milliarder år, hvor der ikke mere vil dannes stjerner i galakserne, da mængden af kold gas er opbrugt.

En af tidens store mål er at finde og studere de allerførste galakser, der opstod efter Big Bang. I jubilæums-



4.15. Det nye rumteleskop James Webb skal arbejde i en bane 1,5 mio. km væk fra Jorden i det såkaldte Jord-Sol L_2 -punkt. Til sammenligning er Hubble-rumteleskopets bane blot 540 km væk fra Jorden.

året 2016 tog denne mission et stort skridt fremad med lokalisering af, hvad der synes at være en galakse med en rødforskydning på 11,1 svarende til, at man ser 13,4 milliarder år tilbage til en tid kun 400 millioner år efter Big Bang (fig. 4.14).

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 disse første galakser. Det forventes

at blive opsendt i 2018. 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 halvdanden million kilometer fra Jorden. Et solskjold skal sikre, at teleskopets instrumenter altid er kolde (ca. $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$) og dermed har minimal baggrundstøj og maksimal følsomhed for infrarødt lys.

Man formoder altså, at de allerførste galakser blev dannet i de første 100-300 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 mørke tid og direkte se de første galakser dukke frem af nattehimmels mørke som små sankthansorme. Det er overvejende sandsynligt, at man inden for det næste årti vil nå tilbage til den tid, hvor de første galakser dukkede frem af mørket.