

Galakser i det tidlige Univers, II: DLA Galakser

Palle Møller og Johan P. U. Fynbo, Europæisk Syd Observatorium, Garching, Tyskland

Igennem de sidste 35 år, siden opdagelsen af mikrobølge baggrundstrålingen i 1965, har der hersket en lidt besynderlig situation mht. vores forståelse af universet. De første få minutter af universets udvikling mente vi at forstå i detaljer, og universets nuværende fase (ca. 10^{10} år senere) havde vi kunnet studere siden menneskehedens barndom og derved få et indgående kendskab til. Det meste af den mellemliggende periode, hvor alle de ting vi ser omkring os er blevet dannet, kendte vi imidlertid stort set intet til. Ydermere var det sådan, at der ikke syntes at være nogen kendt fysisk process, der kunne forklare hvordan vores nuværende univers kunne have de strukturer som vi nu ser.

På en måde kunne man argumentere, at det egentlig var ligegyldigt. Vi *havde* fået svar på det gamle spørgsmål: "Hvordan er det hele startet?". Detaljerne i udviklingen derfra og til nu kunne måske være morsomme at kortlægge, men ville ikke bringe nogen ny og dyb indsigt. Dette argument (og det blev faktisk ført frem) var selvfølgelig fundamentalt forkert.

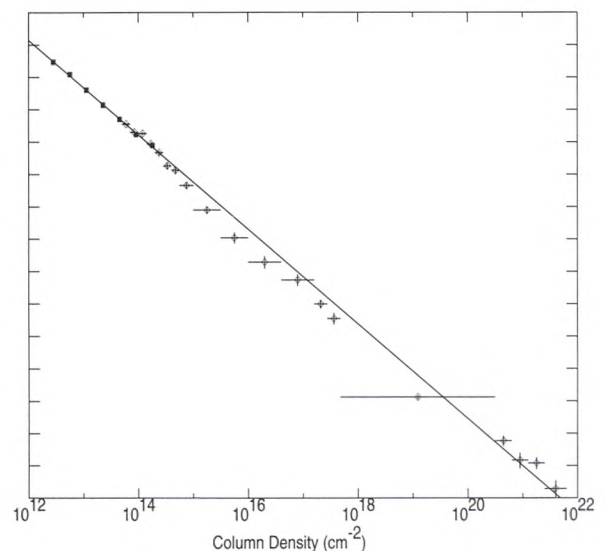
De sidste 1-2 årtier af forrige årtusinde så en rivende udvikling indenfor teleskop-, detektor- og rumfartsteknologien. Dette medførte en eksplosiv udvikling i den observerende kosmologi. Pludselig var det muligt at observere de faser af universets udvikling, der før havde været skjult bag gardiner af detektorstøj og atmosfærestøj, og det blev efterhånden klart, at nogle ekstra ingredienser i modellen af universets start var nødvendige. Først og fremmest måtte vi postulere eksistensen af ukendt mørkt stof i en mængde som totalt dominerede den samlede mængde stof i universet. Dernæst måtte vi inkludere en inflatorisk fase meget tidligt (en brøkdel af et sekund efter universets start), og her senest lader det til at være vanskeligt at komme uden om en kosmologisk konstant. Alt i alt blev det til en signifikant ændring af vort syn på det tidlige univers, og der er givetvis flere overraskelser, der lurer i kulisserne.

I den første artikel om galakserne i det tidlige univers [1], gik vi igennem nogle af de nødvendige detaljer om universets udvikling. For nem reference giver vi i box 1 på side 6 et superkomprimeret resumé af kosmologien som vi nu har forstået den. I den første artikel forklarede vi også, hvordan vi har opnået at få et detaljeret billede af, hvorledes gassen er fordelt i universet, fordi vi kan se de "fingeraftryk" som gassen efterlader i form af absorptionslinier i spektrene af kvasarer ved høj rødforskydning [2]. I denne artikel vil vi beskrive, hvordan den lange søgen efter objekterne, der er ansvarlige for disse absorptionslinier, omsider er ved at bære frugt.

Brintgassen viser hvor det sker

I hvad der følger, spiller den interne hastighedsdispersion af gassen i en sky ikke nogen større rolle, og vi kan derfor ignorere den. Gør vi det, så gælder der, at styrken af en absorptionslinie er givet ved antallet af absorberende atomer per arealenhed, hvad vi skal referere til som "søjletæthed". Dvs. man kan tænke sig et rør med et tværsnit på 1 cm^2 og en længde der svarer til skyens diameter (af størrelsesorden 10^5 lysår). Søjletætheden (N) er så antallet af absorberende atomer i dette rør.

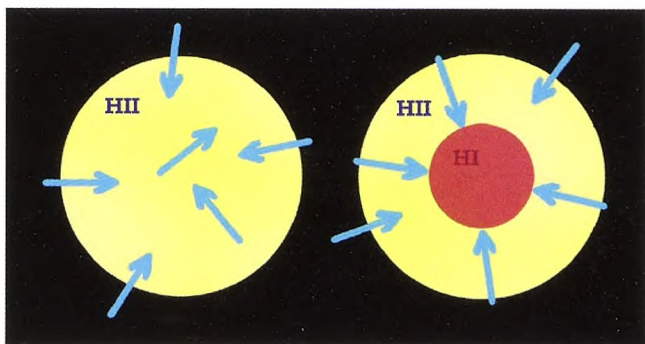
Hvis vi kigger på fordelingen (figur 1) af søjletætheder, $f(N)dN$, af neutralt brint (HI i astronomisk jargon, i modsætning til ioniseret brint: HII), så finder vi, at den følger en potenslov $f(N)dN \propto N^{-\beta}dN$, hvor $\beta \simeq 3/2$. Denne værdi af β betyder, at langt den største del af skyerne har meget små søjletætheder. På trods af dette finder man (når man integrerer fordelingen op), at langt størstedelen af HI i det tidlige univers var samlet i de meget få skyer med meget stor søjletæthed.



Figur 1. $\text{Log}(f(N))$, fordelingen af Lyman- α absorberende skyer, som funktion af deres søjletæthed af neutralt brint. Selvom der kun er meget få skyer med stor søjletæthed, findes den største del af den neutrale gas i det tidlige univers i disse få skyer.

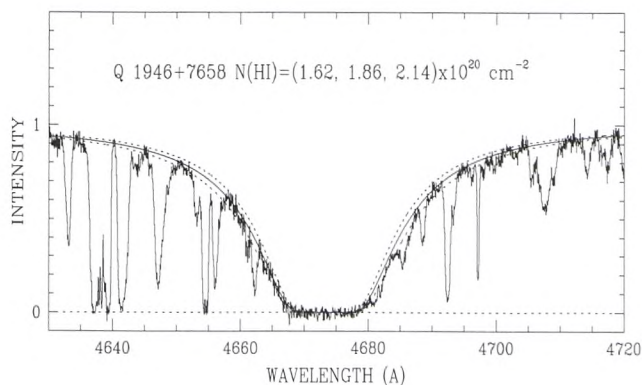
Ionisationsgrænsen for brint findes ved en bølglængde på 91.2 nm. Dette er Lyman-grænsen (eller Lyman-kanten) som vi diskuterede i detaljer i den første artikel. Absorptionstværsnittet ved Lyman-grænsen er sådan, at for en søjletæthed på ca. 10^{19} HI atomer cm^{-2} vil absorptionen ved $\lambda < 91.2 \text{ nm}$ være næsten 100%. Effekten af dette er, at skyer med

$N(\text{HI}) > 10^{18} - 10^{19}$ "lukker af" for udefrakommende fotoner, der er i stand til at ionisere brint. Vi siger, at sådanne skyer er "selvfaskærmende", fordi den ioniserende stråling ikke kan nå ind til deres centre (figur 2).



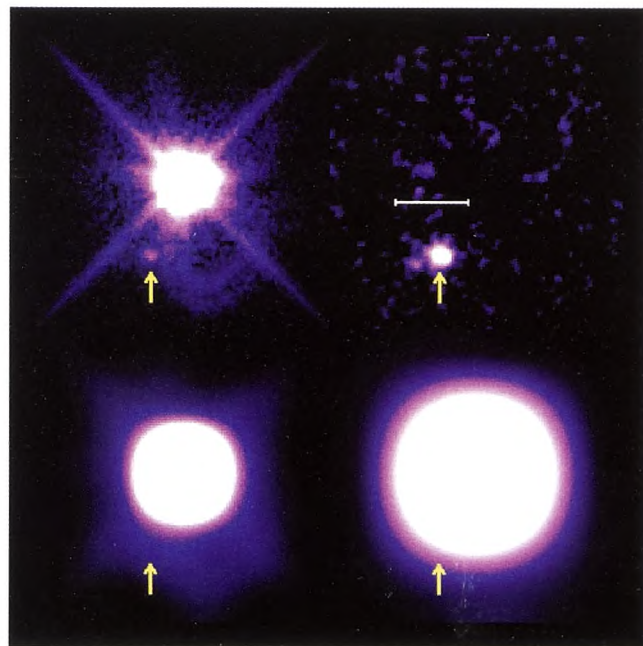
Figur 2. En sky med lav søjletæthed (venstre figur) vil være kraftigt ioniseret (HII). Ioniserende fotoner (vist som blå pile) har fri adgang til at passere ind i alle dele af skyen, så hver gang et brintatom rekombinerer, vil det straks blive ioniseret igen. Gassen er i ionisationsligevægt. De frie elektroner i skyen udgør en separat "elektrongas", og trykket af denne gas vil forhindre, at gravitationskraften kan få skyen til at falde sammen. Hvad sker der nu, hvis skyen bliver fodret med ekstra gas og derved begynder at vokse? Først sker der ikke meget; skyen vil vokse, men elektrongassen vil forhindre, at skyen komprimeres. På det tidspunkt hvor søjletætheden vokser til lidt over 10^{17} HI atomer cm^{-2} , vil antallet af ioniserende fotoner i skyens centrum begynde at dale. Når søjletætheden når 10^{19} vil der stort set ikke være nogen tilbage derinde. Effekten forstærker nu sig selv, fordi et rekombineret brintatom i centret forbliver neutralt, da der ikke længere er ioniserende fotoner tilstede. Skyen har nu fået en to-zone struktur (højre figur) med en central kerne af kold HI-gas og en ydre skal af HII-gas.

En sky der er selvfaskærmende har altså en kerne af næsten neutral gas. Neutral gas har ikke det store tryk fra de frie elektroner til at modvirke et kollaps, hvilket betyder, at de indre dele af skyen nu kan begynde at trække sig sammen i større eller mindre klumper. Hvor hurtigt en sådan sammentrækning kan foregå afhænger af hvilke kølemekanismer, der er til rådighed. Dette er et af de centrale, endnu ikke klarlagte, spørgsmål om-



Figur 3. Et eksempel på en Dæmpet Lyman- α Absorptionslinie. Bemærk de brede "vinger" der altid er til stede, og som gør det simpelt at genkende en DLA.

kring dannelsen af de første lysende objekter i det tidlige univers. I hydrodynamiske simuleringer (se f.eks. vores første artikel [1]) ses, at når en sky er kommet til dette punkt, så vil dens centrale del hurtigt udvikle sig til en lille kompakt klump af kold gas med stor tæthed. Dette er den type miljø, hvor vi ville forvente at stjerner kan dannes, og i simuleringerne kalder man derfor disse klumper for "galakser".



Figur 4. Billede taget med Hubble Rumteleskopet af kvasaren PKS0528-250 og af DLA galaksen Q0528-250-S1. Venstre øverst: Oprindeligt billede, kvasaren er det klare objekt men Q0528-250-S1 kan lige anes over pilen. Højre øverst: Vi har her fratrukket kvasar-PSF'en (se teksten for detaljer), og hævet kontrasten. DLA galaksen ses nu tydeligt, og den ses at bestå af to sub-komponenter, en svag og en meget svag. Den hvide "lineal" over DLA galaksen angiver billedets skala; den har en længde på 1 buesekund. Venstre nederst: Vi har her degraderet opløsningen af det oprindelige billede til den opløsning der typisk er den bedste man nu om dage forventer at opnå med et teleskop på Jorden. Højre nederst: Vi har her degraderet opløsningen af det oprindelige billede til den opløsning der var typisk for et godt teleskop for 9 år siden da Q0528-250-S1 blev opdaget. Pilene peger i hvert af de fire billeder på samme position.

Dæmpede Lyman- α Absorptionslinier

Hvis en kvasar var anbragt bag en sådan klump, så ville klumpen give sig til kende som en meget kraftig absorptionslinie i kvasarens spektrum. Hvis sigtelinien igennem klumpen skulle gå igennem et område, hvor søjletætheden er større end $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, kommer der specielle effekter i spil. Det er på det punkt, at dæmpningen af den kvantemekaniske oscillator i brintatomet bliver synlig, og resultatet er, at absorptionslinien får brede "dæmpningsvinger". Man kalder sådanne absorptionslinier Dæmpede Lyman- α Absorptionslinier, eller DLA'er. I figur 3 kan man se profilen af en DLA. Der er ikke noget specielt magisk ved DLA'er. Deres specielle interesse ligger i, at de er veldefinerede. Hvis

vi finder en kraftig absorptionslinie i et kvasarspektrum, så skyldes det *enten* en sky med stor søjletæthed *eller* en tilfældig sammenklumpning af 3–4 linier fra meget mindre skyer. Hvis vi derimod ser de brede vinger, så kan vi være *sikre* på at det er en sky med $N(HI) > 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$.

DLAer udgør således en meget veldefineret undergruppe af gasskyer med stor søjletæthed, for hvilke søjletætheden kan måles med stor nøjagtighed. Dette er grunden til, at de har speciel interesse. Siden studiet af DLAer tog sin begyndelse, har man detekteret godt og vel 100 DLAer i kvasarspektra [3].

Den lange søgen efter DLA galakser

Naturligvis har vi uddybet vores forståelse af DLAer over de sidste to årtier, men den generelle erkendelse af, at de på en meget direkte måde må være forbundet med de tidligste stadier i galaksedannelse, har der været temmelig bred enighed om fra første færd. Det var derfor indlysende, at det var vigtigt at finde selve de objekter, der "ejer" den gas, der forårsager DLA absorptionen, for at kunne studere dem i detaljer. I almindelighed henviser man til disse hypotetiske objekter som "DLA galakser", og vi skal i det følgende holde os til denne tradition, på trods af at de sandsynligvis ikke har megen lighed med galakser som vores Mælkevej eller Andromeda Galaksen.

Fra studiet af et stort antal kvasarspektre kan man tælle, hvor ofte man finder en DLA, og hvor ofte man ikke finder en DLA. Dette forhold giver direkte sandsynligheden for at finde en DLA, eller udtrykt på en anden måde, universets "dækningsgrad" af DLAer. I praksis afhænger dækningsgraden af hvilket rødforskydningsinterval man søger i, og kan udtrykkes på denne måde [3]

$$\frac{dN}{dz} = 0.05 * (1 + z)^{1.2}$$

For $z = 3$ får vi således $dN = 0.26dz$, hvilket betyder, at hvis vi observerer i en tilfældig retning, så vil der være 26% sandsynlighed for, at vi kigger igennem en DLA sky med en rødforskydning mellem 2.5 og 3.5. Hvad vi derimod ikke kan få noget at vide om på denne måde er, hvor mange der er, eller hvor store de er. Dette er illustreret på Kvants forside, hvor det ses, at vi kan opnå at dække den samme brøkdel af himlen med få store DLA skyer (de røde cirkelskiver), eller med flere små DLA skyer. Den store forskel kommer, når vi kigger på afstanden mellem kvasarer (markeret som violette stjerner) og de DLA galakser (grønne ellipser), der ejer gasskyerne. I første tilfælde vil gennemsnittet af denne afstand være meget større end i andet tilfælde. Denne forskel bliver af central betydning, når man ønsker at finde de hypotetiske DLA galakser som man forventer at finde tæt på centrene af skyerne. Hvis der er mange små skyer, vil en DLA galakse ligge meget tæt på kvasaren med absorptionslinien. Hvis der er få

Box 1. Kort kosmologi kompendium

Inflation: En tidlig fase af inflation (eksponentiel udvidelse) pustede en lille brøkdel af universet op til hvad vi idag kalder "det observerbare univers", dvs. den del af universet som vi har mulighed for at observere.

Rekombination: Ca. 300.000 år senere var vores del af universet ekspanderet og afkølet til det punkt, hvor elektronerne kunne indfanges af protonerne (i hvad vi kalder "rekombinationsperioden") for derved at danne neutrale brintatomer.

Frakobling: Hvor det før rekombination var umuligt for den elektromagnetiske stråling at gennemtrænge gassen af frie elektroner, kunne den nu frit bevæge sig igennem den neutrale brintgas. Dette er hvad der menes med, at strålingen "frakobler". De individuelle frakoblede fotoner lever nu alene i det ekspanderende univers i de følgende ca. 10 milliarder år.

Mikrobølge baggrunden: Fotonerne ekspanderer videre sammen med universet, så deres bølgelængde bliver større og større. Efterhånden som universet bliver ældre, bevæger de frakoblede fotoner sig således igennem det elektromagnetiske spektrum fra det ultraviolette, gennem den blå, grønne og røde del af det optiske spektrum, igennem det infrarøde, for at ende op idag som mikrobølger. Det er denne mikrobølge baggrundsstråling vi idag kan observere, og som vi betragter som et af de mest fundamentale beviser på, at vi har en god forståelse af, hvad der skete i universets barndom. Det er instruktivt at forestille sig, at hvis vi havde eksisteret i en meget tidligere fase af universets udvikling, så ville nattehimmelen ikke have været sort, men måske rød eller grøn.

Mørkt stof: Udover fotonerne og proton/elektron gassen er der noget andet som udgør langt den største del af massen i universet. Fluktuationer i massetætheden af dette, indtil nu uopdagede, mørke stof giver lokale minima i det gravitationelle potentiale. Disse minima vil tiltrække mere mørkt stof, og efter at gassen kobler fra fotonerne vil også gassen begynde at falde ind i de mørke haloers gravitationsfelter. De mørke haloer selv vil aldrig kunne ses, men paa et eller andet tidspunkt vil massetætheden i en mørk halo vokse til et punkt hvor stjerner, eller måske et sort hul, eller begge dele, kan dannes. På dette tidspunkt vil denne halo blive synlig som et af de første objekter i det tidlige univers.

store skyer, vil vi forvente for det meste at finde DLA galaksen længere fra kvasaren. Hvorfor dette viste sig at komme til at være af central betydning, forklarer vi i næste afsnit.

Flere grupper gik straks igang med, fra de største teleskoper der dengang var tilgængelige, at søge efter DLA galakserne selv. Udover at DLA galakserne forventedes at være meget svage, hvilket betød at man kun kunne bruge de allerstørste teleskoper, var der også en mulighed for, at de kunne være endog meget små. Tilsammen ville disse to forhold gøre det i praksis umuligt at finde dem overhovedet, p.g.a. billedet af den klare kvasar ved siden af. Over en periode på næsten 10 år blev der kun rapporteret om nul-detektioner og øvre grænser. Ikke før 1993 blev den første "bona fida" DLA galakse detektion rapporteret [4], og de to følgende kom med tre års mellemrum i 1996 og 1999 [5, 6].

PSFen: Punkt-Sprednings-Funktionen

Hvorfor var DLA galakserne så svære at finde? Kort fortalt er det fordi skyerne viste sig at være så små, at det var næsten umuligt at opdage de svage DLA galakser så tæt på de klare kvasarer. Vi skal ikke her gå dybt i de tekniske detaljer, men en kort beskrivelse er påkrævet. I praksis er der intet billede i verden der kan være uendeligt skarpt. Hvor skarpt et billede fra et givet kamera eller fra et givet teleskop kan være, er bestemt af mange faktorer (f.eks. kvaliteten af optikken, opløsningen af filmen eller CCDen og uro i atmosfæren). Den samlede effekt er, at et billede taget af et punkt med *uendelig lille* udstrækning vil vise sig på billedet som en klat med en *endelig* udstrækning. Udstrækningen og formen af denne klat kalder vi "Punkt-Sprednings-Funktionen" eller "PSFen".

Hvis to objekter ligger så tæt på hinanden, at deres afstand er meget mindre end udstrækningen af PSFen, så kan de to objekter ikke skelnes enkeltvis; de ses som et samlet blob. Hvis de ligger meget langt fra hinanden sammenlignet med PSFen, så kan de nemt ses som to objekter. Hvis de to objekter har en afstand, der er omkring det samme som størrelsen af PSFen, så vil det måske være muligt, ved hjælp af meget avanceret analyseteknik, at separere billedet af de to objekter til to billeder. Udstrækningen af PSFen kalder vi almindeligvis billedets "opløsning", fordi det er den der sætter grænsen for, hvor tætte objekter vi kan opløse i to individuelle billeder.

I figur 4 illustrerer vi, hvor vigtig opløsningen (PSFen) er for den, der leder efter DLA galakser. Billedet viser den første DLA galakse, der blev fundet (Q0528-250-S1). Denne galakse kunne dengang kun lige akkurat skimtes på et billede optaget med hvad der dengang var det største ESO teleskop, 3.6m teleskopet på La Silla, Chile [7]. Det seneste billede optaget med STIS instrumentet på Hubble Rumteleskopet, som vi viser i figur 4, har en opløsning der er 10 gange bedre, og her fremtræder DLA galaksen klart (over pilen øverst til venstre). Udover den bedre opløsning har rumteleskopet en anden fordel; det skal ikke kigge igennem atmosfæren. Dette betyder, at PSFen kun er bestemt af teleskopets optik og kamera. Der er ikke det meget

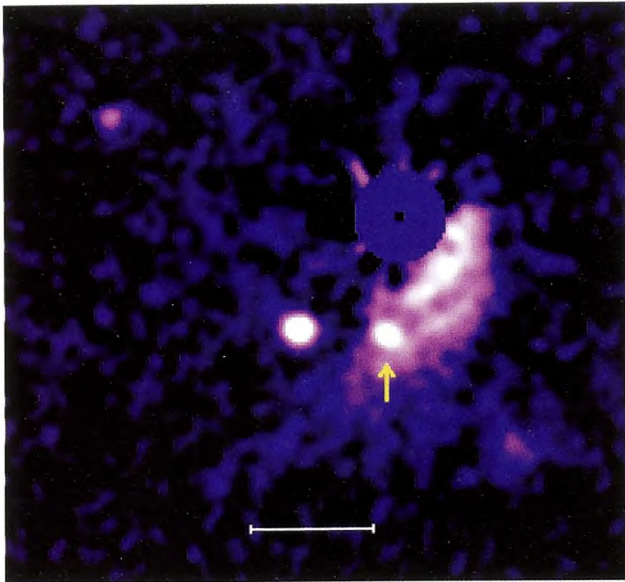
varierende bidrag fra lufturoen. PSFen er derfor stort set konstant, og vi kan bestemme hvorledes den ser ud ved at analysere andre billeder taget med STIS. Når vi gør det, og trækker denne PSF fra billedet af Q0528-250-S1, så får vi det billede, der ses øverst til højre i figur 4. Dette er et billede af en DLA galakse i så stor detalje som det idag er muligt at opnå.

Betragt, som en simpel illustration af problemet, følgende eksempel: Anbring to cykellygter på toppen af et bjerg 48 millimeter fra hinanden. Bestig et andet bjerg 10 km væk, og ret dit teleskop mod de to cykellygter. Spørgsmålet er nu, om du ser de to lygter som en enkelt klat lys, eller som to klatter lys. Afstanden 48 mm set fra en afstand af 10 km svarer til en vinkelafstand på 1 buesekund. De fleste moderne astronomiske teleskoper ville ikke have noget problem med denne opgave. For at sammenligne med DLA eftersøgningen skal den ene lygte nu gøres en faktor 1000 svagere; man kan f.eks. smide en frakke over den for at absorbere de 99.9% af lyset. Kun Hubble ville nu være i stand til at se begge lygter 10 km derfra.

DLA galakser: Kosmologiens LEGO klodser

Efter opdagelsen af de første DLA galakser var det klart hvorfor de var så svære at finde. DLA skyerne måtte være små, og der måtte være mange af dem. Med bestemmelsen af afstanden mellem kvasar og DLA galakse ville det være muligt at benytte argumentet givet ovenfor baglæns, og dermed bestemme både størrelsen af DLA skyerne i det tidlige univers, og også antallet af dem. En første approximativ bestemmelse [8] viste at DLA skyerne ved $z=3$ *ikke* var at sammenligne med de store spiralgalakser vi kender idag (dvs. som f.eks. Mælkevejen), men at nutidens spiralgalakser derimod måtte være trinvist opbygget af mange DLA galakser. Der er således god grund til at forestille sig DLA objekter, ikke som *egentlige* DLA galakser, men snarere som de første "galakse byggesten", eller som kosmologernes LEGO klodser. En forudsigelse der følger af dette er, at vi vil forvente at finde at mange af DLA galakserne har naboer tæt på, som de er ved at kolliderer med. Muligvis vil vi også finde tegn på aktive kollisioner i form af lange haler af gas der bliver slynget ud af de tidevandskræfter, der virker mellem galakser når de passerer tæt forbi hinanden. Lyman-kant galakserne (se vores første artikel [1]) selv er, med stor sandsynlighed, opbygget ved sammensmeltning af endnu tidligere DLA objekter.

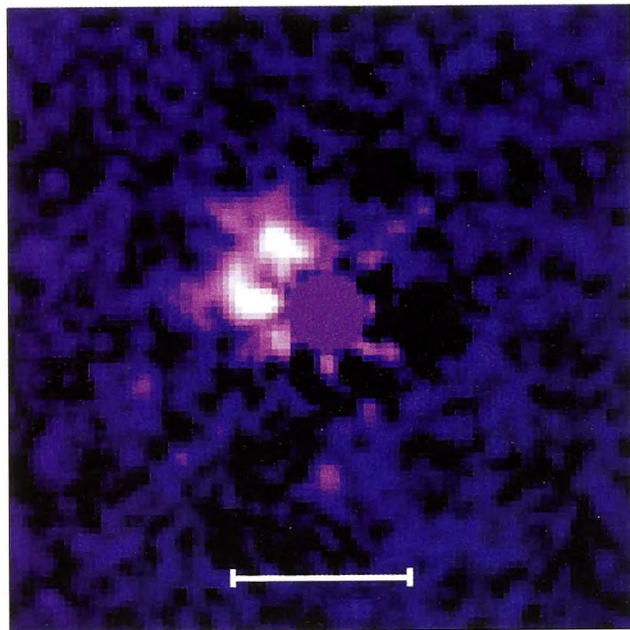
Hvordan kunne vi nu være så sikre på det? Tja, helt sikker kan man jo ikke være, når man har en testgruppe af kun tre objekter. Med så få testobjekter kan man altid argumentere for, at der er "noget særligt" ved udvælgelsen af hver enkelt objekt. Det var derfor klart, at det på det tidspunkt var på tide med et veldefineret projekt, der een gang for alle kunne løse gåden om DLA objekterne.



Figur 5. DLA galaksen mod Q2206-199N er markeret med en pil. Det rundt udseende objekt midt i billedet er en kold stjerne i vores egen galakse og har intet med DLAen at gøre. "Halen" der strækker sig opad mod højre er med stor sandsynlighed stof der er trukket ud af galaksen under en nylig kollision.

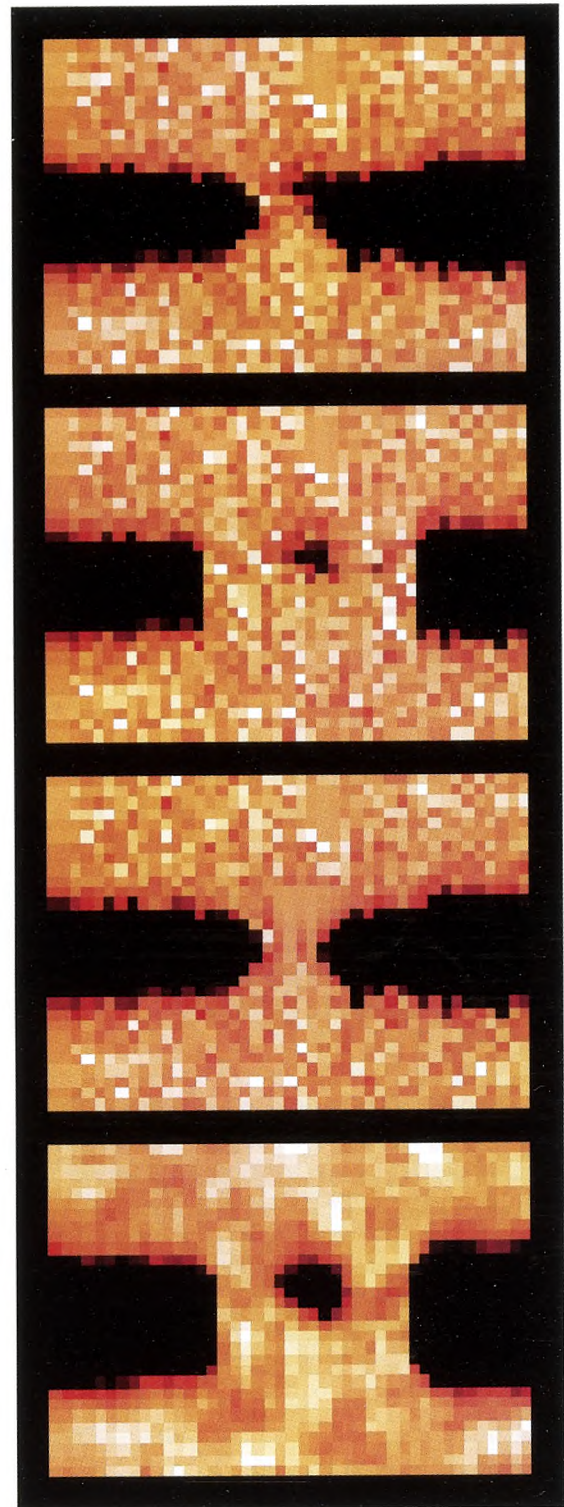
DLA galakse projektet

Fordi vi forventede, at DLA skyerne var meget små, ville projektet kun kunne gennemføres med Hubble Rumteleskopet. I samarbejde med astronomer fra England (S. Warren), fra Holland (P. Jakobsen) og fra USA (M. Fall) planlagde vi projektet, der skulle finde en re-



Figur 6. Feltet omkring kvasaren Q0049-2820 efter PSF-subtraktion. Den hvide streg angiver igen en vinkelafstand på 1 buesekund.

præsentativ testgruppe af DLA galakser. Dybe optagelser af himmelfeltet omkring 16 kvasarer med DLAer skulle optages af Hubble teleskopet i både syn-



Figur 7. 2D-spektrum af kvasaren Q2206-199N. Kun en lille del af spektret lige omkring DLA linien er vist. Den samme del af spektret er vist fire gange. Bølgelængdedimensionen er vandret, den rumlige dimension er lodret. Øverst: Det observerede spektrum. Hullet i midten af spektret er DLAen. Billede 2 fra oven: Spektret efter SPSF-subtraktion. Billede 3 fra oven: SPSF modelspektrum. Nederst: Samme som "Billede 2 fra oven" men filtreret for at hæve kontrasten.

ligt lys og i det infrarøde. Observationerne med Hubble er næsten færdige nu, og vi er i fuld gang med at analy-

sere dataene. I denne artikel viser vi for første gang nogle af disse optagelser, som endnu ikke er blevet offentliggjort. Billedet i figur 4 af Q0528-250-S1 er een af disse optagelser, og i figur 5–6 viser vi endnu to af felterne optaget med STIS instrumentet i synligt lys.

I figur 5 og figur 6 viser vi felterne omkring kvasarene Q2206-199N og Q0049-2820, efter vi har fjernet kvasar-PSF'en. Som regel er en kvasar så klar, at den mætter de centrale CCD-pixler af dens PSF. Denne del af billedet bliver derved ødelagt, og det er i så tilfælde ikke muligt at få noget brugbart ud af området lige omkring kvasar-PSFens centrum. Størrelsen af det ødelagte område vil afhænge af, hvor klar kvasaren er. I figur 5–6 har vi markeret de tabte områder ved at indsatte en flad cirkulær skive.

Man kunne nu tro, at med analysen af de dybe Hubble optagelser er vores arbejde gjort. Desværre er dette blot begyndelsen, det svære arbejde kommer bagefter. Kigger vi f.eks. på figur 5, så ser vi en kompleks struktur af emissionsområder. Hvilket som helst af disse objekter kunne i teorien være DLA galaksen. Måske er de allesammen dele af en meget kompleks DLA galakse, måske har ingen af dem noget med DLA galaksen at gøre overhovedet. Siden vi her kigger tværs igennem stort set hele universet, vil der altid være risikoen for, at der tilfældigvis ligger et objekt eller to langs med synslinien. Vi kan derfor ikke være sikre på, at vi faktisk har et billede af en virkelig DLA galakse, indtil vi har målt dens rødforskydning og sammenlignet den med rødforskydningen af absorptionslinien.

For at måle rødforskydningen er det nødvendigt at optage et spektrum. At optage et spektrum er langt mere kompliceret end at tage et billede, så i betragtning af hvor svært det er at tage et billede af en DLA galakse, er det klart, at det stort set er umuligt at optage et spektrum af en. Der er dog tre ting, der giver os håb om alligevel at kunne gennemføre dette. For det første har vi adgang til verdens bedste jordbaserede teleskop, ESOs VLT (Very Large Telescope) på Paranal i Chile. Tre af dets fire 8m UTe (Unit Telescopes) er nu i regulær drift. For det andet behøver vi ikke *hele* spektret af DLA galaksen, hvilket ville være en klart umuligt opgave. Vi behøver blot at finde en enkelt emissionlinie for at kunne bestemme dens rødforskydning. For det meste vil det give os et entydigt resultat. For det tredje og sidste bliver vi hjulpet af bredden af den dæmpede Ly α linie. Absorptionslinien fjerner en god bid af quasarens spektrum, hvilket gør det mindre umuligt at søge efter en emissionlinie på samme sted.

Ikke desto mindre er det stadig en næsten umulig opgave, og vi har været nødt til at udvikle en speciel analyseteknik for at kunne analysere vores VLT spektre. Vi skal her blot give en ganske kort beskrivelse af denne teknik, en detaljeret presentation kan findes i [9]. Princippet er stort set det samme som i PSF-subtraktionen beskrevet ovenfor, men her drejer det sig om en Spektral PSF, hvad vi kalder en SPSF.

SPSF-subtraktion

I en hypotetisk verden, hvor alt lys fra en punktkilde falder i et punkt, vil et spektrum være et punkt udstrakt i en enkelt retning, altså en linie. Hvert punkt på denne linie vil vise intensiteten af lys, der bliver modtaget med een bestemt bølgelængde. Intensitetsprofilen langs med linien (se f.eks. figur 3) er, hvad man derfor normalt forstår ved et spektrum. I den virkelige verden falder lyset i en klat (en PSF) snarere end i et punkt, og spektret bliver derfor en aflang klat snarere end en linie. Den aflange klat har en karakteristisk intensitetsprofil på *langs* af klatten, dette er igen spektret. Men den aflange klat har også en karakteristisk intensitetsprofil på *tværs*, hvilket er hvad vi kalder dens Spektrale Punkt-Sprednings-Funktion (SPSF) [9]. Ligesom tilfældet var med PSF'en, kan vi også for SPSF'en konstruere en model og trække den fra den rå (den oprindelige) optagelse.

Spektrografen vi bruger på VLTe er en "spalte-spektrograf". Det vil sige, at der i teleskopets fokus er anbragt en plade med en lang spalte. Pladen stopper alt lys, men tillader det lys, der falder på spalten at passere. I praksis betyder det, at der falder et billede af en del af himlen på pladen, og at en ganske smal stripe taget midt ned igennem dette billede passerer igennem til spektrografen. Lyset fra den smalle stripe bliver derefter spredt ud på tværs af stripens retning. Det resulterende datasæt er, hvad vi kalder et 2D-spektrum. Det er et digitalt "billede", hvor vi har en rumlig dimension langs den ene akse, mens dimensionen langs den anden akse er bølgelængde.

Tricket er nu at placere spalten således, at den dækker både billedet af kvasaren og billedet af DLA galakse kandidaten på een gang. Vi opnår derved at få et spektrum af begge objekter med samme optagelse, men svagt forskudt fra hinanden langs den rumlige akse. Igen er problemet, som nævnt ovenfor, at spektret af DLA galakse kandidaten kan være skjult under spektret af kvasaren, men efter SPSF-subtraktionen bliver den muligvis synlig (se figur 7).

I figur 7 viser vi spektret optaget af kvasaren Q2206-199N og DLA galakse kandidaten Q2206-199N-S1 (markeret med en pil i figur 5). Det samme lille stykke af 2D-spektret er vist fire gange ovenover hinanden. For hvert af de fire stykker spektrum gælder, at den rumlige dimension går op–ned, mens bølgelængde dimensionen går venstre–højre. Spektrene er her gengivet "negativt", således at kraftig intensitet er angivet som sort og nul intensitet som hvid. Vi har brugt en orange farve-tabel for at svage kontraster skal fremtræde så tydeligt som muligt. Det øverste billede er det observerede spektrum af kvasaren. "Hullet" i midten af dette spektrum er den kraftige DLA absorptionslinie. Billede nummer 3 talt fra oven er "modellen" af kvasarspektret som det burde se ud med en DLA absorptionslinie. I billede nummer 2 fra oven har vi trukket modellen fra det observerede spektrum. For at gøre det nemt at se hvor modelspektret er trukket fra, har vi kun gjort det i den centrale

del, men ladet enderne blive som referencepunkter. Det nederste billede viser det samme som billede 2 fra oven, men vi har her digitalt filtreret billedet for at fjerne den højfrekvente støj. Det ses her klart, at der er en lille klat med emission tilovers, der hvor kvasarens SPSF blev trukket fra. Den lille klat befinder sig en anelse til højre for absorptionsliniens centrum, og en god bid over kvasarens spektrum. Afstanden fra kvasarspektret til emissionslinien i den rumlige retning (op–ned) er den samme som set på billedet optaget med Hubble Rumteleskopet. Dette er således en klar bekræftelse af, at vi korrekt har identificeret DLA galakserne Q2206-199N-S1. Lad os ganske kort at opsummere:

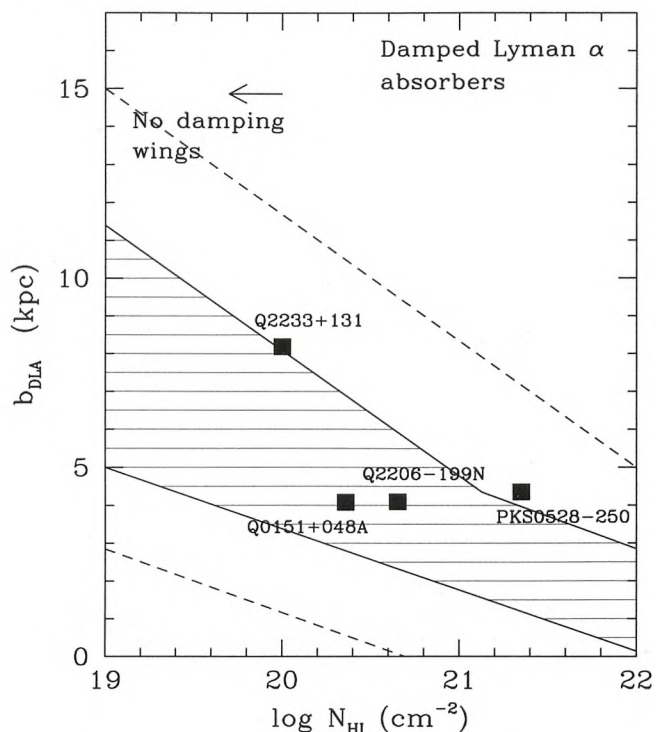
1. Fra den videnskabelige litteratur har vi kompileret en liste af kvasarer der alle har et DLA absorptionsystem liggende imellem os og kvasaren.
2. Med Hubble teleskopet har vi optaget dybe billeder af felterne omkring kvasarerne.
3. Efter omhyggelig PSF-subtraktion har vi fundet svage objekter tæt ved kvasarerne, disse er vore DLA galakse kandidater.
4. Med VLTens 8m teleskoper optager vi nu dybe spektre for at forsøge at bekræfte at vores kandidater faktisk er de DLA galakser vi har jagtet i så mange år.

Q2206-199N-S1 er altså den første DLA galakse i dette stort anlagte projekt som vi på denne måde har bekræftet ved hjælp af VLTen. Det er kun den fjerde DLA galakse kendt overhovedet, men hvad der er vigtigere er, at det er den eneste der er fundet via et stort program med kontrollerede udvælgelseeffekter. De tre der hidtil har været kendt er alle “enkelt objekter”, der muligvis slet ikke er repræsentative for typiske DLA galakser. For klasser af astronomiske objekter hvor der kun kendes meget få repræsentanter, frygter man altid (med rette) hvad vi på Engelsk kalder “publication bias” (på Dansk ville det betyde publikations-skævheden). Dette er et ret vigtigt begreb i observerende astronomi, og fortjener en kort forklaring.

Lad os antage at 100 observatører hver for sig observerer en enkelt kvasar med en DLA. Lad os yderligere antage at 97 af dem ikke finder en DLA galakse, men at de sidste 3 faktisk *finder* en DLA galakse hver. Det er nu overvejende sandsynligt, at de 97 hver for sig ikke finder deres observation vigtig nok til at publicere, men at de 3 bestemt finder *deres* opdagelse vigtig, og derfor publicerer den. Det er på forhånd klart, at en stor og klar DLA galakse er meget nemmere at opdage end en mindre og svag DLA galakse. Vi (som ved at alle 100 er blevet observeret) vil derfor forvente, at de 3 DLA galakser, der bliver publiceret, er de 3 største og klareste DLA galakser overhovedet, og at de slet ikke er gode repræsentanter for hele klassen af DLA galakser. Men fordi de 97 ikke publicerer deres nul-detektion, vil ingen anden kunne vide dette. Enhver der ville læse den videnskabelige litteratur om emnet, ville blot se tre rapporter, der fortæller om størrelse og klarhed af 3 DLA galakser,

og tro at disse er typiske tal. Dette er hvad vi forstår ved publikations-skævheden og er grunden til, at det er vigtigt med projekter, der sigter på at finde testgrupper af objekter med kontrollerede udvælgelseskriterier.

Vi har nu taget de første skridt i retning af at skabe en sådan veldefineret testgruppe af DLA galakser, og som afslutning på denne artikel vil vi give en kort smagsprøve på, hvad vi har lært og hvad vi forventer at kunne lære, når projektet er færdigt.



Figur 8. Sammenligning mellem observationer af DLA galakser og computersimuleringer af det tidlige univers. Vi plottes her b_{DLA} (den projicerede afstand mellem kvasar og DLA galakse) mod den observerede søjletæthed. Det skraverede område markerer simuleringernes forudsigelser, de fire sorte kasser er de fire observationer der til dato er bestemt. Pilen øverst til venstre angiver, at i den venstre side af dette diagram vil en absorptionslinie ikke være en DLA. Vi er derfor begrænset til at søge nye objekter til højre herfor. Objektet Q2233+131 er nominelt under grænsen for en egentlig DLA, men er medtaget for fuldstændighedens skyld.

Status og perspektiver

Først og fremmest er det oplagt at søge at sammenligne vores resultater med forudsigelserne fra de hydrodynamiske simuleringer vi har nævnt flere gange. Ved at udregne teoretiske absorptionspektre for tilfældige sigtelinier gennem simulationsboxene er det muligt at foretage denne sammenligning direkte. I figur 8 plottes vi afstanden b_{DLA} , målt fra sigtelinien mod kvasaren til centeret af emissionen fra DLA galakserne, mod søjletætheden af absorptionslinien, for de fire bekræftede DLA galakser. Det er naturligt at forvente, at søjletæthed for en sigtelinie gennem centeret af en gassky er større end for sigtelinier fjernere fra centeret. Derfor forventer vi, at afstanden

b_{DLA} statistisk set vil være mindst for skyer med stor søjletæthed og større for skyer med mindre søjletæthed. Det skraverede område i figur 8 viser, hvor de fleste punkter forventes at fordele sig baseret på en hydrodynamisk simulering [8,10]. De stiplede linier viser det fulde interval for b_{DLA} for en given søjletæthed. Der ses at være fin overensstemmelse mellem (de få) observationer og forudsigelserne. Skalaen for y-aksen (b_{DLA}) af figur 8 er defineret under antagelse af en Hubble konstant på $H_0 = 100$ km/s/Mpc. Vælger vi f.eks. $H_0 = 67$ km/s/Mpc, vil alle b_{DLA} værdier blive 50% større (dette gælder både observationer og simuleringer).

Ved at bestemme de typiske værdier af b_{DLA} har vi således også fået en ide om størrelsen af DLA galakser. Da vi hermed har fået brudt den udartning mellem størrelse og antal vi illustrerede på forsiden af bladet, kan vi nu sige noget om antalstætheden n af DLA galakser i det tidlige univers. Sammenhængen mellem $\frac{dN}{dz}$, n og arealet af DLA galakser A er givet ved:

$$\frac{dN}{dz} = nA \frac{dl(z)}{dz},$$

hvor $\frac{dl(z)}{dz}$ angiver sammenhængen mellem længde l og rødforskydning z langs sigtelinien. Da vi kender $\frac{dN}{dz}$ og har en god ide om A , kan vi bestemme antalstætheden n . Ved at sammenligne med antalstætheden af Lyman-kant galakser viser det sig, at der er langt flere DLA galakser end Lyman-kant galakser i det tidlige univers. Dette er i og for sig ikke overraskende, da en galakse for at blive detekteret med Lyman-kant metoden skal være meget lysstærk, mens DLA galakser er udvalgt helt uafhængigt af deres emissionsegenskaber. At søge efter galakserne i det tidlige univers ved at benytte Lyman-kant metoden giver med andre ord kun toppen af isbjerget. En detaljeret diskussion af sammenhængen mellem DLA galakser og Lyman-kant galakser findes i [6, 11].

Der er stadig lang vej igen før DLA projektet er fuldført. Vi mangler stadig at analysere størstedelen af de spektroskopiske observationer fra VLT. Målet med projektet er ikke blot at identificere DLA galakserne, men også at karakterisere deres egenskaber så som morfologi, grundstofindhold, masse, metallicitet, stjernedannelsesrater og mere generelt deres placering i galaksedannelsesprocessen.

Dette projekt har været lang tid undervejs, og det er først nu hvor VLTen er taget i brug, at vi har mulighed for at tage de sidste vigtige skridt. Dette er sandt ikke kun for vort eget projekt, men også for mange andre Europæiske projekter der har ligget i venteposition i mange år, mens VLTen blev bygget. Efter at vi i en lang årrække var klart distancerede af Amerikansk baserede observatorier, har VLTen på rekordtid bragt Europæisk astronomi og astrofysik tilbage helt i front.

Referencer:

- [1] J. P. U. Fynbo og P. Møller (2000) *Kvant*, 11. årg., nr. 4, s. 22.
- [2] M. Rauch (1998) *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, bind 36, 267.

- [3] A. M. Wolfe m.fl. (1995) *Astrophysical J.*, bind 454, s. 698.
- [4] P. Møller og S. J. Warren (1993) *Astronomy & Astrophysics*, bind 270, side 43.
- [5] S. G. Djorgovski m.fl. (1996) *Nature*, bind 382, side 234.
- [6] J. U. Fynbo, P. Møller og S. J. Warren (1999) *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind 305, side 849.
- [7] ESO = European Southern Observatory. Hovedkvarteret er i Tyskland, men observatoriet er i Chile (www.eso.org).
- [8] P. Møller og S. J. Warren (1998) *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind 299, side 661.
- [9] P. Møller (2000) *The Messenger*, bind 99, side 31.
- [10] Katz m.fl. (1996) *Astrophysical J. Lett.*, bind 457, s. 57.
- [11] J. U. Fynbo, Ph.D. afhandling (astro.ifa.au.dk/~jfynbo/publications.html#thesis).



Palle Møller – efter en lang nats observationer på 3.6m teleskopet på La Silla. Lige udenfor selve kuplen, hvor teleskopet er skjult om dagen, er der en "cat-walk" rundt om bygningen. Det er en herlig ting når natten er færdig at lave sig en kop the, og så stille sig ud på cat-walk'en for at vente på solopgangen over Andes Bjergene. Man kan se ned i dalen på morgendisken der ligger som et tæppe over hele Atacamas bund hvor alle bjergknoldene stikker op som små øer.



Johan P. U. Fynbo ved siden af nogle sten med petroglyffer. Petroglyfferne er lavet af indianerstammer som tidligere boede i Atacama. Disse findes få km nede i dalen bag observatoriet. Billedet er taget en eftermiddag hvor vi var stået tidligt op for at kunne nå en tur ned i dalen og tilbage igen før nattens observationer.