

Atacama Large Millimeter Array

– en ny æra i udforskningen af galakser

Af Thomas R. Greve, Dept. Of Physics & Astronomy, University College London, England

Den tidsalder hvor de første stjerner og galakser blev dannet, omkring et par hundrede millioner år efter big bang, er én af de dårligst forståede tidsaldre i Universets historie. Det næste store gennembrud i vores forståelse af disse tidlige galakser vil komme fra "ALMA" – en stor park af radioteleskoper i den chilenske ørken – som er designet til, at observere gas og støv i galakser. ALMA er netop begyndt at indsamle de første data og det vil, i de kommende år, føre til en sand revolution i vores forståelse af én af Universets mørkeste tidsaldre.

Universets mørke tidsalder

Det må betragtes som en kuriositet i moderne astrofysik, at vores forståelse af Universets egenskaber og dets udvikling i perioden fra det første splitsekund efter big bang til omkring 380.000 år senere – hvor der var dannet skyer af neutral brintgas – i mange henseender er *bedre* end vores forståelse af, hvordan de første stjerner og galakser dannedes ud af den neutrale gas et par hundrede millioner år senere. Disse første stjerner og protogalakser var *formentligt* de første gravitationelt bundne objekter i Universet, og pga. deres udsendelse af UV-lys begyndte disse første objekter at *re-ionisere* den såkaldte intergalaktiske gas omkring dem – gas som havde været neutralt siden rekombinationen (protoner og elektroner fra den 'primordiale plasmasuppe' kunne først rekombinere og danne neutralt atomart brint, da Universet havde kølet tilstrækkeligt, til ca. 3000 K). I takt med at flere og flere stjerner og galakser blev dannet, undergik større og større områder af Universet re-ionisation, og disse områder voksede med tiden sammen indtil, omtrent en milliard år efter big bang, hvor hele Universet var blevet re-ioniseret. Denne kosmiske epoke varede fra tiden, hvor de første stjerner og galakser dannedes (svarende til en rødforskydning på $z > 15$) til tiden hvor hele Universet var re-ioniseret (svarende til en rødforskydning på $z \approx 6$) kaldes *den kosmiske re-ionisationsperiode*, og på trods af dens fundamentale betydning for vores forståelse af galakseres dannelse og udvikling, ved vi så godt som ingenting om denne epoke af Universets historie. Af denne grund er de mest presserende, ubesvarede spørgsmål, der knytter sig hertil, tilsyneladende ganske basale:

1. Hvordan og hvornår dannedes de første galakser? Tunge protogalakser er muligvis dannet på relativt kort tid gennem en række mindre intense stjernedannelsesområder i proto-skyen. Man kunne også forestille sig et såkaldt monolitisk kollaps hvor gasskyen kolliderer og blive til et stort stjernedannende område. Man forventer, at mindre tunge galakser formentligt er dannet mere gradvist via en mere behersket, adstadig tilstrømning af gas til protogalaksen.
2. Hvordan udviklede de første protogalakser sig, dvs. hvad er deres evolutionære forbindelse til

galaksepopulationer ved $z < 6$? Skete der en passiv udvikling frem til vore dage, eller undergik visse galakser nye intense stjernedannelsesperioder som følge af sammenstød med andre gasrige galakser?

For at kunne besvare disse spørgsmål kræver det, at vi kan måle de basale egenskaber, dvs. masser, bolometriske luminositeter¹, stjernedannelsesrater og gas-morfologier, af galakser ved $z > 6$, såvel som til senere tider, dvs. ved $z < 6$ og i princippet frem til vore dages galakser ved $z = 0$.

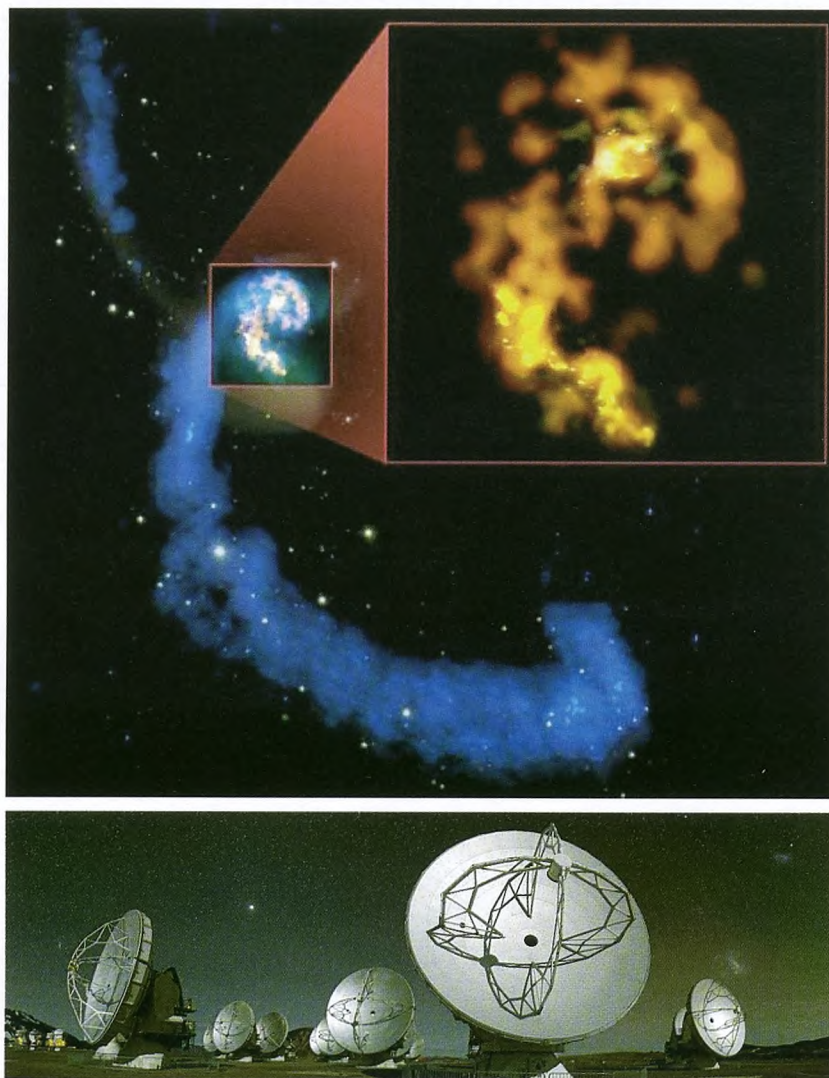
Støv og gas i galakser

Et centralt aspekt af udforskningen af galakser, er deres indhold af gas og støv, som under ét kaldes det interstellare medium. Det skyldes, at stjerner dannes ud af det interstellare medium – når områder af gassen bliver så tætte, at de bliver gravitationelt ustabile og kolliderer. Gassen i det interstellare medium er med andre ord 'brændstoffet' for stjernedannelse. Hvordan støv dannes er ikke forstået i detaljer, men vi ved dog at støvet primært består af tungere grundstoffer som kulstof og silicium, der kun kan dannes af stjerner. Selve dannelsen af støvet kan formentligt ske på flere måder. Det kan produceres i de chok, der opstår når metalrig gas fra en supernovarest støder ind i den omkringliggende gas. Det kan også kondensere ud af atmosfærerne af kolde, udviklede stjerner. I begge tilfælde er støvet en konsekvens af stjernedannelse.

Støvet absorberer UV-stråling udsendt fra de unge, varme stjerner i galaksen, og opvarmes dermed til en temperatur, som i ligevægt typisk vil være 20-50 K. Ved denne temperatur vil støvet genudsende den modtagne energi som strålingsvarme, der har maximal intensitet ved fjern-infrarøde bølgelængder (100-150 μm).

Hvis en galakse har en meget høj stjernedannelsesrate, og vel og mærke kan vedligeholde denne rate i tilstrækkelig lang tid (over 100 mio. år), så kan den i løbet af relativt kort tid (~ 100 millioner år) producere så store mængder støv ($\sim 10^8$ - 10^9 solmasser) at den bliver 'indhyldet' i støvet. Støvet blokerer for det optiske/UV lys fra stjernerne, og som følge deraf er galaksen ekstremt svær at observere og studere i detalje med optiske teleskoper.

¹Bolometrisk luminositet angiver den totale energi, i alle bølgelængder, der udsendes fra en lyskilde.



Figur 1. Øverst: En af de første videnskabelige testobservationer med ALMA af "Antennegalaksen", to lokale galakser merger der kolliderer og undergår kraftig stjernedannelse. De gule farver (indsat billede) viser ALMAs observationer, ved omkring 1 mm, af støvet og gassen i Antennegalaksen. Selvom disse data blev optaget med kun 12 ud af de 66 planlagte ALMA-antenner, giver de os et helt nyt og detaljeret billede af stjernedannelsen i denne galakse. Nederst: ALMA kommer til at bestå af 66 antenner med diameter mellem 7-12 m, og er beliggende i 5000 m i den chilenske Atacamaørken – et ideelt sted for astronomiske observationer. De næste 10 år vil ALMA være det ubetinget vigtigste astronomiske observatorium i udforskningen af Universet. Danmark er med helt fremme i udnyttelsen af ALMA når det gælder stjernedannelsesstudier i vores egen Mælkevej, men har pt. ingen ALMA eller fjern-IR/submm ekspertise inden for ekstragalaktisk forskning.

I modsætning til støvet som kan observeres direkte, kan langt størstedelen af gassen ikke detekteres direkte, idet molekylær brint ikke har rotationelle overgange pga. af dets symmetri (og dermed manglende elektriske dipolmoment). Ro-vibrationelle overgange af H_2 kan forekomme, men kun i ekstrem varm (10.000 K) gas eller gas som er undergået et chok – betingelser som kun findes sjældent i områder omkring stjerner i det interstellare medium. I stedet benytter man sig af observationer af 'spor-molekyler', såsom kulmonoxid (CO). CO er det næsthyppest molekyler efter H_2 i Universet (men dog stadig knap 10.000 gange mindre hyppigt forekommende end H_2), og det har rotationelle overgange der er nemme at excitere, selv for relativt kold (omkring 20 K) gas ved lav densitet (ca. 100 molekyler pr. cm^3). Ved at måle linjestykken af de forskellige rotationelle CO-overgange, kan vi udlede

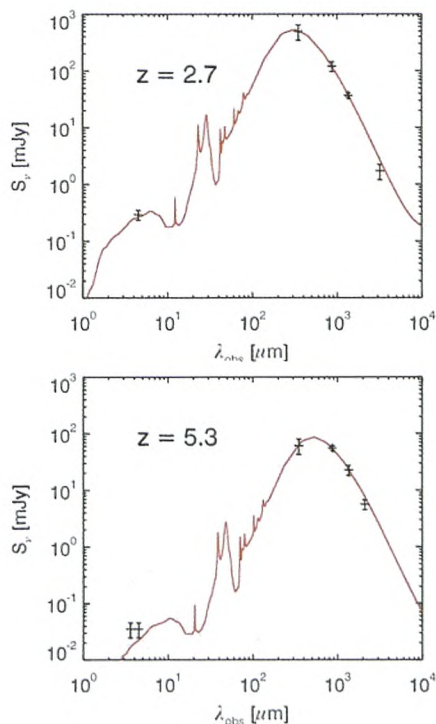
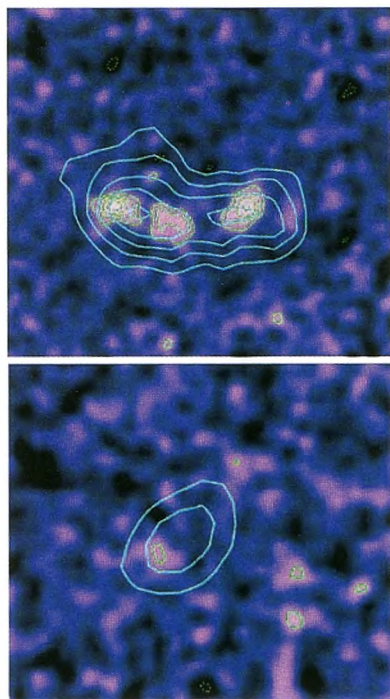
densiteten og den kinetiske temperatur af gassen, mens vi kan udlede de kinematiske forhold i galaksen og dens dynamiske egenskaber ud fra linjeprofilerne og den fysiske størrelse af området med CO-emissionen.

Vigtigheden af at kunne studere gas- og støvindholdet i fjerne galakser understreges af, at der i disse år investeres omkring 1 mia. euro til opbygning af verdens største astronomiske observatorium, "Atacama Large Millimeter Array" (ALMA), der er et fælles projekt mellem Europa, USA og Japan. ALMA er netop i år begyndt, at optage de første data (se figur 1) og teleskopet er specielt designet til at kunne observere den fjern-infrarøde stråling fra gas og støv i galakser. Selv om det er en noget slidt kliché at kalde ethvert nyt teleskop for 'revolutionerende', er det imidlertid langt fra tilfældet med ALMA. Det står klart, at langt

størstedelen af de betydningsfulde nye opdagelser, der vil blive gjort inden for galaksedannelse og udvikling, i de næste 10 år, vil blive gjort med ALMA.

Gravitationel linsning – naturens kosmiske teleskoper

Ved University College London (UCL) er vi med fremme i første række når det gælder udnyttelsen af ALMA og af det enorme potentiale som fjern-IR/millimeter



Figur 2. T.v.: Submillimeterobservationer af to SPT-galakser. Grønne konturer = 0,35 mm og blå konturer = 0,87 mm. Det øverste billede viser tydelig evidens for gravitationel linsning, idet galaksen har en tydelig aflang 'bue'-lignende struktur set ved 0,87 mm hvor vinkelopløsningen er forholdsvis grov (19"). Set ved 0,35 mm, hvor vinkelopløsningen er mere end dobbelt så god (8") splitter galaksen op i tre separate billeder – en klassisk konfiguration ved gravitationel linsning. T.h.: De spektrale energifordelinger af de to SPT-galakser, målt ved 2,0, 1,4, 0,87, og 0,35 mm (sorte punkter). Datapunkter ved 3,6 og 4,5 μm er også angivet. De røde kurver angiver modeller som er fittet til de observerede data. Disse tillader os at bestemme rødforskydningen af de to galakser til $z = 2,7$ og $z = 5,3$. For galaksen med $z = 2,7$ er rødforskydningen bekræftet spektroskopisk.

Denne nye klasse af galakser er usædvanligt klare i lys med en bølgelængde omkring 1 mm – mere end 10 gange klarere, men også ca. 100 gange sjældnere (der er under 0,1 galakse pr. kvadratgrad), end de galakser man i forvejen kendte fra tidligere gennemmønstringer ved lignende bølgelængder. Opdagelsen af disse ekstremt klare galakser var fuldstændig uventet, og vi har brugt de sidste 4 år siden deres opdagelse på, at karakterisere disse galakseres egenskaber, dvs. måle deres masse, luminositet osv., samt bestemme deres typiske afstand (rødforskydning) fra os. Derved vil det være muligt for os at forstå, hvordan disse galakser passer ind i vores overordnede forståelse af, hvordan galakser dannedes og udviklede sig.

Som et led i dette har vi foretaget observationer i submm-området (bølgelængder på 0,35 og 0,87 mm) af over 60 SPT-galakser med Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) teleskopet i Chile. Sammen med SPT-målingerne ved 1,4, 2,0 og 3,0 mm kan vi modellere den fulde termiske støvemission og infrarøde/mm luminositet, den typiske temperatur af støvet, og den samlede

astronomi besidder. Som et eksempel på dette kan nævnes, at vi spiller en ledende rolle i udforskningen af en ny type af galakser, der blev opdaget for omkring 4 år siden via en gennemmønstring af himlen ved bølgelængderne 1,4, 2,1 og 3,0 mm med South Pole Telescope (SPT), en radio-antenne med en diameter på 10 m, der som navnet antyder befinder sig på Antarktis (Dome A). Galakser opdaget med SPT-teleskopet kaldes herefter for SPT-galakser.

støvmasse fra hver af SPT-galakserne. Endelig har vi formået at bestemme SPT-galaksernes rødforskydning via deres CO-linjeemission, som det også er lykkedes os at detektere med APEX. Vi finder at SPT-galakserne i gennemsnit har højere rødforskydninger ($z \approx 2-5$ – se figur 2) end de mere typiske, ulinsede submm-galakser. Desuden er deres bolometriske luminositeter ($\sim 10^{14}$ solluminositeter), støvmasser ($\sim 10^{10}$ solmasser), og stjernedannelsesrater (~ 8.000 solmasser pr. år) mere end en størrelsesorden højere end de ulinsede submm-galakser. Dette tyder alt sammen på, at SPT-galakserne er ekstremt gravitationelt linsede eksemplarer af (ellers normale) submm-galakser. Den gravitationelle linseeffekt betyder, at lyset fra SPT-galakserne på dets vej til os bliver forstærket af en mellemliggende tung galakse, eller i visse tilfælde en hob af galakser, der krummer rumtiden og får den til at agere som et kosmisk 'mikroskop'. Mens man længe har kendt til linsede galakser, hvis fluks blev forstærket op til 2-8 gange, så er lyset fra SPT-galakserne formentligt forstærket

op til 10-50 gange. Ikke alene ville dette forklare den enorme tilsyneladende lysstyrke af SPT-galaksernes, men det ville også forklare deres i gennemsnit højere rødforskydning sammenlignet med normale submm-galakser.

I efteråret 2011 blev vi tildelt observationstid på ALMA for dermed at tage det næste store skridt i udforskningen af SPT-galakserne. Vi vil udnytte ALMAs fantastiske observationsegenskaber til, i stor detalje, at kortlægge (med en vinkelopløsning på under 1", svarende til en fysisk størrelse på mindre end ca. 1.000 parsec, hvor 1 parsec = 3,26 lysår) fordelingen af støv og molekyler (CO) gas i over 30 af disse spektakulære systemer. Det vil gøre os i stand til at bestemme præcis hvor meget og hvordan galaksernes lys er forstærket pga. gravitationel linsning, og vi vil altså kunne bestemme deres væsentligste egenskaber. Desuden vil vi i stor detalje kunne kortlægge emissionen fra en række molekyler og atomare linjer, og derigennem få et uhørt detaljeret billede af stjernedannelsen i disse tidlige galakser.

Et kig ind i fremtiden

Hvor Hubble Rumteleskopet i høj grad dominerede 1990'erne, så har vi de sidste 12 år været vidne til en IR/submm 'revolution', hvor observationer ved disse bølgelængder har stået for en stor del af de væsentligste nye opdagelser indenfor ekstragalaktisk astronomi. Med ALMA, som allerede har optaget de første data, står vi nu i en ny æra, hvor vi som nævnt vil se at fjern-IR/millimeter astronomi fuldstændig vil dominere

udforskningen af galakser og det tidlige univers. Det vil være situationen indtil ca. 2020, når den næste generation af optiske/IR mega-teleskoper som "European Extremely Large Telescope" (E-ELT), med et hovedspejl på knap 40 m, og "James Webb Space Telescope" (JWST), med et hovedspejl på 6,5 m, forventes at være klar. I mellemtiden vil detaljerede studier med ALMA af f.eks. gravitationelt linsede galakser som SPT galakserne i løbet af de næste par år bringe os syvmileskridt videre i forståelsen af hvordan de første galakser dannedes og udviklede sig.

Litteratur

- [1] Carlstrom et al. (2011) *PASP*, **123**, 568
- [2] Viera et al. (2010) *Ap. J.*, **719**, 764
- [3] www.almaobservatory.org
- [4] www.apex-telescope.org
- [5] pole.uchicago.edu



Thomas R. Greve forsker i galaksedannelse og udvikling ved at studere det interstellare medium og dets stjernedannelsesegenskaber i galakser i det meget fjerne univers. Han benytter millimeter- og radioteleskoper verden over, såsom Atacama Large Millimeter Array (ALMA), Extended Very Large Array (EVLA) og IRAM Plateau de Bure.

KVANT samlesæt sælges til favorable priser

KVANT tilbyder forskellige pakker med samlesæt af ældre årgange.

Pakke med 3 årgange: 200 kr.

Indeholder årgang 2008-2010 (de øverste tre rækker vist til højre, bortset fra nr. 1/09 og 2/10). Der er fem temanumre om:

- *Kosmologi og rumtid* • *Videnskab og kunst* • *Astronomi* (astronomiår 2009) • *Large Hadron Collider* • *Lavtemperaturfysik*.

Pakke med 5 årgange: 300 kr.

Indeholder årgang 2006-2010 (alle blade vist til højre, bortset fra nr. 1/06, 1/09 og 2/10). I årgang 2006-2007 er der temanumre om:

- *Kosmisk stråling* • *Neutronspreddning* • *Kvinder i forskningsfronten* • *Videnskab i renæssancen* • *Fysikundervisning*.

Årgang 1990-2010

Prisen for disse 'næsten komplette sæt' af alle ældre årgange af KVANT varierer fra 1200 kr. for de mest komplette sæt (der mangler en håndfuld numre) til 600 kr. for sæt, hvor godt 1/3 mangler. Kontakt kvant@kvant.dk for at få en opdateret prisliste.

Bestilling og betaling:

Pakkerne kan bestilles ved at sende en e-mail til kvant@kvant.dk, hvor du opgiver navn og adresse. Betaling sker via netbank eller girokort. Oven i priserne skal lægges udgifter til forsendelse.

