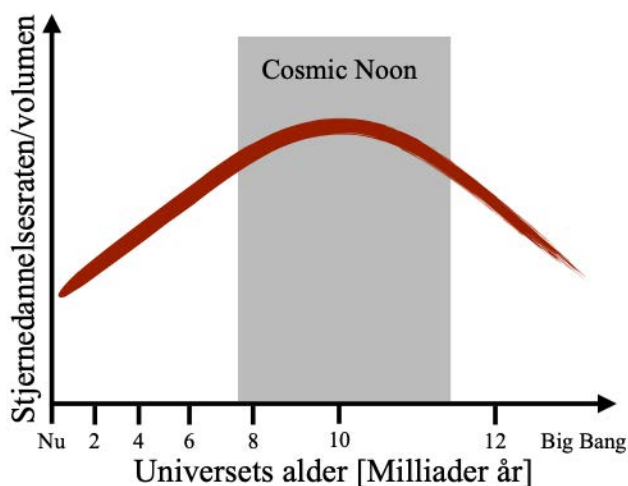


Starburstgalakser

Bitten Gullberg, Cosmic Dawn Center (DAWN), DTU Space

Stjernedannelsesraten har varieret gennem universets udvikling, og de støvrige “starburst”-galakser dannede stjerner 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen. Starburstgalakser er imidlertid svære at simulere i kosmologiske modeller, og deres udvikling er et stort mysterium.

Når vi ser på galakserne i det lokale univers, ser vi galakser med en mangfoldighed af former, farver og stjernedannelsesaktivitet, og vi spørger os selv: hvordan er disse galakser blevet født? Hvordan har de udviklet sig? Og hvordan “dør” de? Astrofysikere arbejder på at besvare disse spørgsmål ved at bruge universet som en tidsmaskine; jo længere væk de observerede galakser er, jo ældre er de. Så ved at kortlægge de lokale galakseres stamtræ forsøger vi at bestemme, hvordan de første galakser har udviklet sig til de galakser, vi ser i dag. Dette arbejde bliver desværre besværliggjort af, at produktionen af stjerner i galakserne ikke har været konstant gennem universets historie. Efter dannelsen af de første galakser for ca. 13 milliarder år siden, steg stjernedannelsesraten (dvs. hvor effektive de enkelte galakser er til at omdanne gas til stjerner, se figur 1), og toppede 1,5–5 milliarder år senere. Stjernedannelsesraten har sidenhen været aftagende, og de fleste stjerner, vi ser i de lokale galakser, er produceret, da stjernedannelsesraten toppede (for 8–11,5 milliarder år siden).



Figur 1. Stjernedannelsesraten som funktion af universets alder. Efter dannelsen af de første galakser steg stjernedannelsesraten for universet og toppede mellem ca. 8 og 11,5 milliarder år siden i en tidsalder, vi kalder Cosmic Noon (eller den kosmiske middag). Siden den tid har stjernedannelsesraten været aftagende.

Dengang så galakserne meget anderledes ud, end de gør i dag. Et eksempel på en anderledes galaksepopulation er de støvrige “starburst”-galakser. Disse galakser dannede stjerner ca. 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen og bidrog derfor med ca. 30% til produktionen af stjerner, da stjernedannelsesraten toppede [1]. På trods af deres dominerende bidrag til stjernedannelsen, er

starburstgalakser svære at reproducere i kosmologiske simuleringer, og deres udvikling er derfor fortsat et mysterium. For at danne stjerner 10–100 gange hurtigere end Mælkevejen, skal galakserne bruge store mængder af gas, som stjernerne bliver dannet af. Men det er endnu en gåde, hvor denne store mængde gas kom fra, hvad der satte gang i denne høje stjernedannelsesrate, og hvad der efterfølgende fortsat har drevet stjernedannelsen.

Støv, gas og infrarød varmestråling

Disse starburstgalakser var rige på støv. Støv gør det svært at observere stjernerne i galakser, da det absorberer lyset fra specielt de unge og varme O- og B-stjerner. Denne absorbering af lys varmer støvet op og får det til at udsende varmestråling i den infrarøde del af det elektromagnetiske spektrum. Dette betyder, at selv om disse støvrige galakser er svære at se i optiske og ultraviolette bølgelængder, så er de meget klare i infrarøde bølgelængder. Starburstgalakser er som sagt meget langt væk (8–11,5 milliarder lysår), og i den tid lyset har rejst gennem universet, har universet udvidet sig, og har dermed strakt lyset, så dens bølgelængde nu er endnu længere. Det vil sige, at det lys, der blev udsendt for 8–11,5 milliarder år siden som infrarødt lys, observerer vi i dag ved millimeter (mm) eller submillimeter (sub-mm) bølgelængder. Disse galakser er derfor meget klare, når de observeres ved mm- og sub-mm-bølgelængder, men næsten usynlige ved optiske og UV-bølgelængder. De bliver derfor også kaldt sub-mm-galakser.

Ved disse mm/sub-mm bølgelængder kan man også observere den kolde gas i disse fjerne galakser. I modsætning til støv, som udsender varmestråling over et bredt bølgelængdeområde og i et næsten kontinuert spektrum, så udsender atomer og molekyler lys i meget specifikke bølgelængder. I atomer afhænger lysets bølgelængde af, hvilke energiniveauer elektronerne bevæger sig fra og til, og i molekyler afhænger den også af, hvordan molekylet roterer og vibrerer. Stjernerne bliver dannet af koldt (ned til 10 K) molekylært gas, som består mest af molekylær hydrogen (H_2). Desværre er linjerne fra H_2 meget svære at detektere. I stedet bruges det molekyle, der er næstmest af, nemlig carbonmonoxid (CO), som er blandet med H_2 , men har den fordel at være nemmere at observere. For at kunne blive klogere på, hvorfor starburstgalakser er så effektive til at danne stjerner, skal vi vide hvor varm og hvor tæt den molekylære gas er. Det gør vi blandt andet ved at observere forskellige rotationslinjer fra CO -molekyler. Molekyler både roterer og vibrerer, men fra CO er det ro-

tationslinjerne, der er mest brugt, da de er de klareste og nemmeste af observere. Når molekylerne i en gas støder ind i hinanden, så udveksler de energi, men molekylet vil gerne af med denne energi igen og udsender derfor en foton, som vi observerer som spektrallinjer. De linjer, vi ser, samt styrken af linjerne afhænger af, hvor tæt gassen er, og hvor meget molekylerne støder ind i hinanden, hvilket fortæller om densiteten og temperaturen af gassen. Ved at observere en række af rotationslinjerne fra CO for en galakse og sammenligne lysstyrken af linjerne, kan vi bruge modeller og beregninger til at bestemme den gennemsnitlige densitet og temperatur af den molekulære gas. Denne information er vigtig for at blive klogere på, hvordan gasforholdene er i starburstgalakser i et forsøg på at finde ud af, hvad der driver stjernedannelsen.

Observationer

De første starburstgalakser blev opdaget i slutningen af 1990'erne, ved brug af et sub-mm-teleskop på Hawaii med navnet James Clerk Maxwell Telescope (JCMT). Når man observerer ved lange bølgelængder som for eksempel mm/sub-mm bølgelængder, så vil selv et teleskop som JCMT, med en diameter på 15 m, give observationer med en lav opløsning. Sammenhængen mellem opløsning af observationer (Θ) og diameteren af teleskopet (D) er givet ved $\Theta \propto \lambda/D$. Det vil sige, at opløsningen er så lav, at man ikke kan se strukturer eller former på galakser, men kun hvor klare de er. Studiet af starburstgalakser blev derfor i mange år betragtet som "studiet af blobs".

Dette ændrede sig markant for 10 år siden, da teleskopet Atacama Large Millimeter / Sub-millimeter Array, også kendt som ALMA, blev taget i brug. ALMA består af 66 antenner fordelt på et plateau i Atacamaørkenen i Chile i en højde af ca. 5000 m (figur 2). I den højde er man mindre generet af vand og ustabiliteter i atmosfæren, som ellers gør det svært at observere ved mm/sub-mm bølgelængder. Hver antenne er 12 m i diameter og forbundet, så man kan kombinere signalerne fra hver antenne ved brug af interferometri. Dette fænomen kender de fleste, som har siddet på en badebro og smidt to sten i vandet samtidig. Der hvor krusningerne på vandet møder hinanden, vil der være konstruktiv interferens, når bølgetop møder bølgetop, og destruktiv interferens, når bølgetop møder bølgedal.

Ved at have 66 antenner kan man fordele dem over et område på op til 16 km i diameter, og man kan dermed simulere et teleskop med en diameter på 16 km. Andre teleskoper har benyttet sig af samme teknologi og bølgelængdeområde før ALMA, for eksempel Sub-mm Array (SMA) på Hawaii og Plateau de Bure Interferometer (PdBI) i Frankrig. Men ALMA har været banebrydende med antallet af antenner og følsomme detektorer, som kan observere i et bredere bølgelængdeområde end tidligere, samt de gode vejrforhold. ALMA er et samarbejde mellem astrofysikere i Europa, Nordamerika og Sydøstasien. ALMA har gjort det muligt for os at se detaljer såsom former på for eksempel starburstgalakser i mm/sub-mm bølgelængder, som vi

ikke havde mulighed for tidligere. De data, man får fra ALMA, er både billeder og spektroskopi samtidig. Data er det man kalder 3D, hvilket vil sige, at man får et billede for hvert bølgelængdeinterval, man observerer i, så man får en terning med dimensionerne (pixel-x, pixel-y, bølgelængde). Dette gør det muligt for os at se galaksernes strukturer i billederne og samtidig få lysstyrken og formen på spektrallinjer, som fortæller os hvilke grundstoffer og molekyler, der er i gassen i galaksen, samt hvor meget der er af disse gasser. Samtidig gør det os i stand til at bestemme temperaturen og tætheden af gassen.

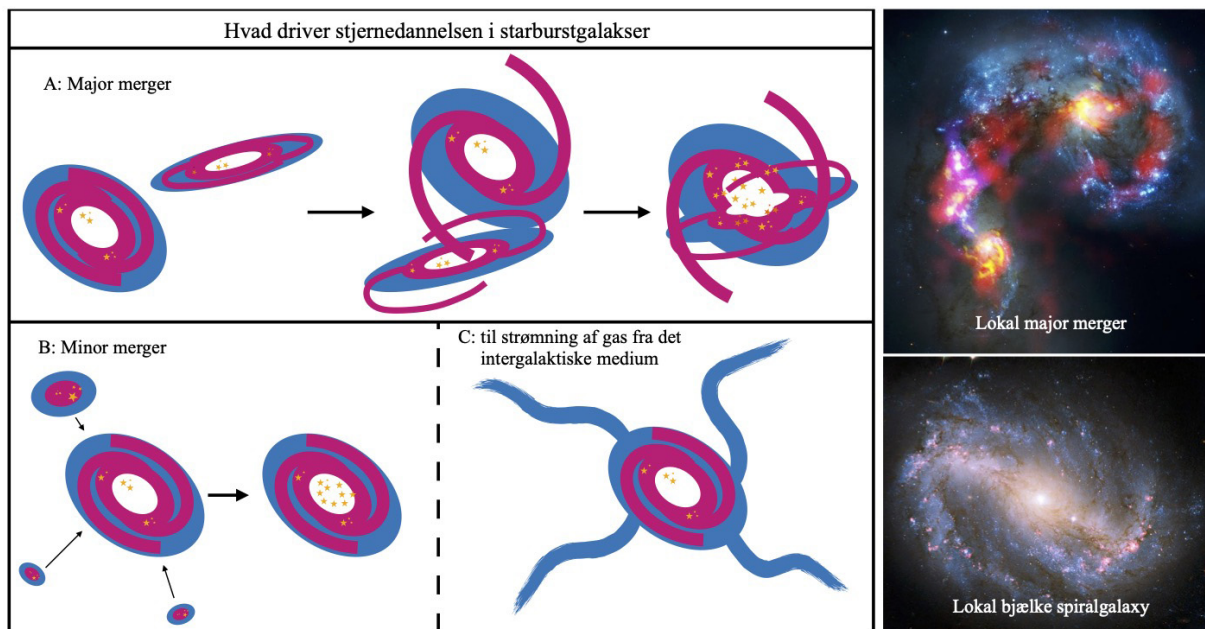


Figur 2. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) på et plateau i Atacamaørkenen i Chile i ca. 5000 m højde. ALMA består af 66 antenner med en diameter på 12 m, der kan flyttes rundt, så man kan simulere et teleskop med en diameter på op til 16 km (ESO).

Det nyeste skud på stammen med hensyn til teleskoper og studiet af starburstgalakser er James Webb Space-Teleskopet (JWST). JWST blev sendt op den 25. december 2021 og befinder sig ca. 1,5 millioner km fra Jorden. JWST har flere instrumenter om bord, der kan tage både billeder og spektra. JWST observerer i det infrarøde, det vil sige længere bølgelængde end rumteleskopet Hubble, og det gør det muligt for os at se gennem støvet og få et detaljeret billede af, hvordan stjernerne er fordelt i starburstgalakser. Viden om, hvor støvet og den stjernedannende gas i galakserne er koncentreret i forhold til stjernerne, giver os ny viden om samspillet mellem de forskellige komponenter, og hvad der antændte og drev stjernedannelsen.

Kosmiske sammenstød eller galaksekannibalisme?

Da man først opdagede starburstgalakser i slutningen af 1990'erne [2], var deres sub-mm flux, og dermed deres anslåede stjernedannelsesrate så høj, at man kun kunne forklare det ved "major mergers"-begivenheder [3]. "Major mergers" eller "store sammenfletninger" er to galakser (på ca. samme størrelse som Mælkevejen), der kommer så tæt på hinanden, at tyngdekraften får dem til at indgå i en kosmisk dans over flere millioner år, og til sidst smelter sammen til en galakse (figur 3a). Denne sammenfletning tilfører store mængder gas til den endelige sammenflettede galakse, og kollisionen presser gassen sammen og antænder den høje effektivitet i stjernedannelsen.



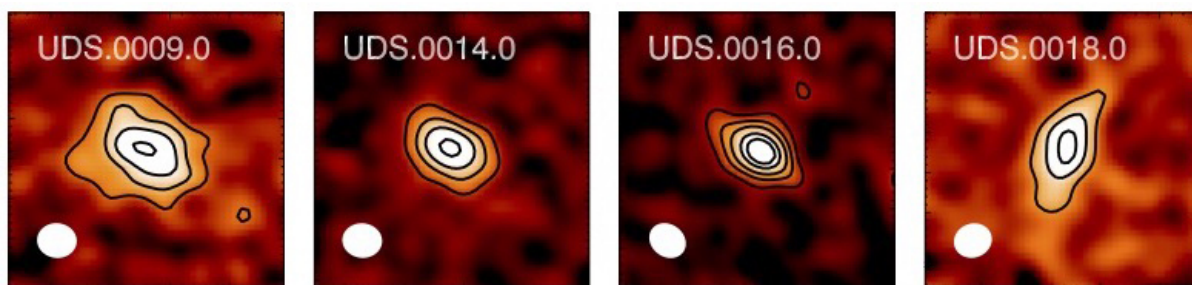
Figur 3. Panel A: major merger-begivenhed, hvor to store galakser smelter sammen til en galakse og dermed tilføjer store mængder gas til den endelige galakse samt antænder stjernedannelsen. Panel B: Minor merger-begivenhed, hvor en stor central galakse i en lille gruppe “spiser” de omkringliggende galakser, som dermed langsomt leverer gas til at holde den høje stjernedannelseseffektivitet kørende. Panel C: Tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium. Omkringliggende gas falder ned på galaksen og tilføjer dermed den nødvendige gas for at holde stjernedannelsen kørende. De to paneler til højre er eksempler på en lokal major merger-begivenhed (ALMA (ESO/ NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope), og en lokal bjælkespiralgalakse (NASA, ESA og Hubble SM4 ERO).

Denne sammenfletning fører også til, at den endelige galakse har en irregulær form (morfologi), som ikke kan karakteriseres som en skive med spiralarme, eller elliptiske som nogle af de andre typiske galaksemorfologier, vi kender. Denne irregulære form er et af karakteristikaene for major mergers.

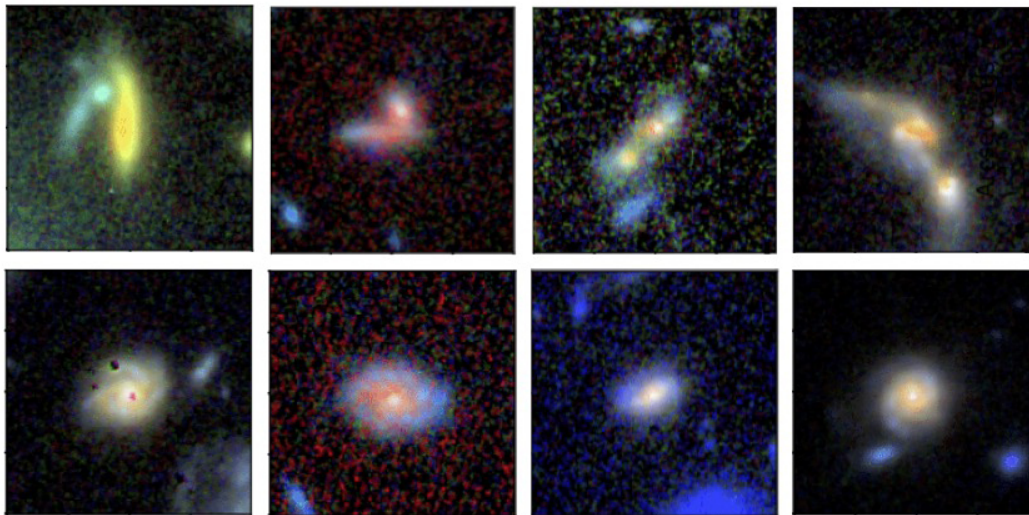
At den høje stjernedannelsesrate er drevet af major merger-begivenheder, har været den accepterede teori de sidste ca. 20 år. Men ALMA har været banebrydende og har afdækket, at det måske ikke er så simpelt, som vi tror. ALMA har givet os observationer med høj opløsning af støvet og gassen i disse galakser og har blandt andet afsløret, at morfologien af støvet kan sammenlignes med de bjælker, vi ser i den centrale del af spiralgalakser i vores lokale univers [4], selv Mælkevejen menes at have sådan en bjælke (figur 4). Denne mere ordnede morfologi er i modstrid med den irregulære morfologi, man forventer ved major merger-begivenheder. Det vil sige, at der formodentlig også er andre mekanismer, der kan antænde og drive stjernedannelsen. To andre muligheder

er minor merger-begivenheder (små sammenfletninger, figur 3b) og tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium til galakserne. Minor merger-begivenheder kan beskrives som en form for “galaksekannibalisme”, hvor en stor central galakse tiltrækker mindre satellitgalakser i nærheden, som så smelter sammen med den store centrale galakse. Minor merger-begivenheder menes at ske oftere end major merger-begivenheder og tilfører dermed sammenlignelige mængder af kold gas til den centrale galakse.

En tredje mulighed er tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium (figur 3c). Galakser hober sig ofte sammen i galaksehobe. Rummet imellem dem er ikke tomt, men kan indeholde store mængder kold gas. Denne gas kan “falde ned” på galakserne ved hjælp af tyngdekraften og bidrage til gasreservoiret til stjernedannelse. Minor merger-begivenheder og gastilstrømning er derfor også mulige forklaringer på, hvor de store mængder gas kommer fra.



Figur 4. Eksempler på starburstgalakser observeret med ALMA. Den aflange strukturer er tegn på, at støvet repræsenterer høj stjernedannelse i en central bjælke i en skiveformet galakse. Dette tyder på, at starburstgalakser måske har en mere ordnet struktur end den man forventer at se ved major merger-begivenheder.



Figur 5. Eksempler på observationer fra JWST af fjerne starburstgalakser. Øverste række: eksempler på major merger-begivenheder. Nederste række: eksempler på starburstgalakser, som er skriveformede og har antydninger af spiralarme og bjælker.

Samtidig er gastilførelsen så gradvis, at den ikke forårsager store ændringer på den store centrale galakses morfologi, hvilket betyder at spiralgalakserne kan beholde deres eventuelle bjælke og spiralarme, men stadig have en meget høj stjernedannelsesrate.

Observationer fra JWST har for nyligt givet et nyt indblik i, hvordan starburstgalakser ser ud. Ved at kende den præcise position fra ALMA til at udpege starburstgalakserne i observationer fra JWST, ser vi, at nogle af galakserne har tydelige tegn på major merger begivenheder i form af irregulære morfologier eller to galakser i gang med at flette sammen (Figur 5). Andre, derimod, har ordrede spiralstrukturer og tyder derfor mest på at være drevet af minor merger eller tilstrømning af gas fra det intergalaktiske medium. Alt dette tyder altså på, at stjernedannelsen i starburstgalakser er drevet af forskellige mekanismer, og at populationen er meget divers med mange forskellige morfologier. Det næste vil være at finde ud af, om en af de tre mekanismer til at tilføje, antænde og drive stjernedannelsen skete oftere end de andre, og om der er en sammenhæng mellem hvor høj stjernedannelsesaktiviteten er, og mekanismen der driver den.

Litteratur

- [1] C.M. Casey, D. Narayanan og A. Cooray (2014) "Dusty star-forming galaxies at high redshift", *Physics Reports*, bind **541**, side 45–161.
- [2] I. Smail m.fl. (1998) "A Deep Sub-mm Survey of the Distant Universe", *Bulletin of the American Astronomical Society*, bind **30**, side 1152.
- [3] A.W. Blain m.fl. (2002) "Submillimeter galaxies", *Physics Reports*, bind **369**, side 111–176.
- [4] B. Gullberg m.fl. (2020) "An ALMA survey of the SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey UKIDSS/UDS field: high-resolution dust continuum morphologies and the link between sub-millimetre galaxies and spheroid formation", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **490**, side 4956–4974.



Bitten Gullberg er postdoc og Carlsberg Fellow på DAWN/DTU Space.

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design



Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com