

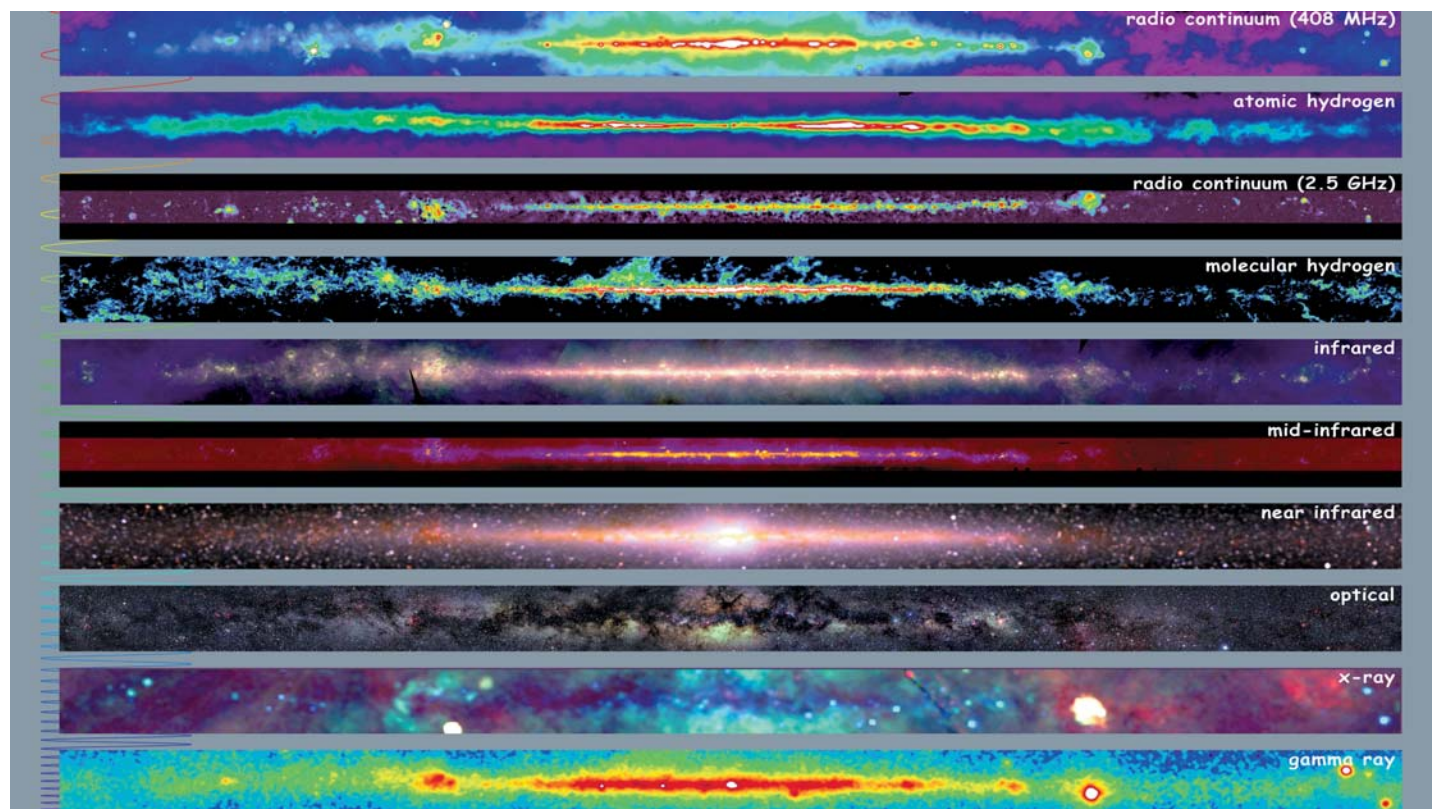
K OSMISK STØV

Støv i astronomisk sammenhæng dækker over små, faste partikler (mineraler) - størrelsesmæssigt er de som røgpartikler på Jorden. Støv er en allestedsnærværende komponent i universet, og det påvirker direkte eller indirekte de fleste forskningsområder inden for astronomi. Støv præger det der kaldes det interstellar rum (rummet mellem stjer-

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

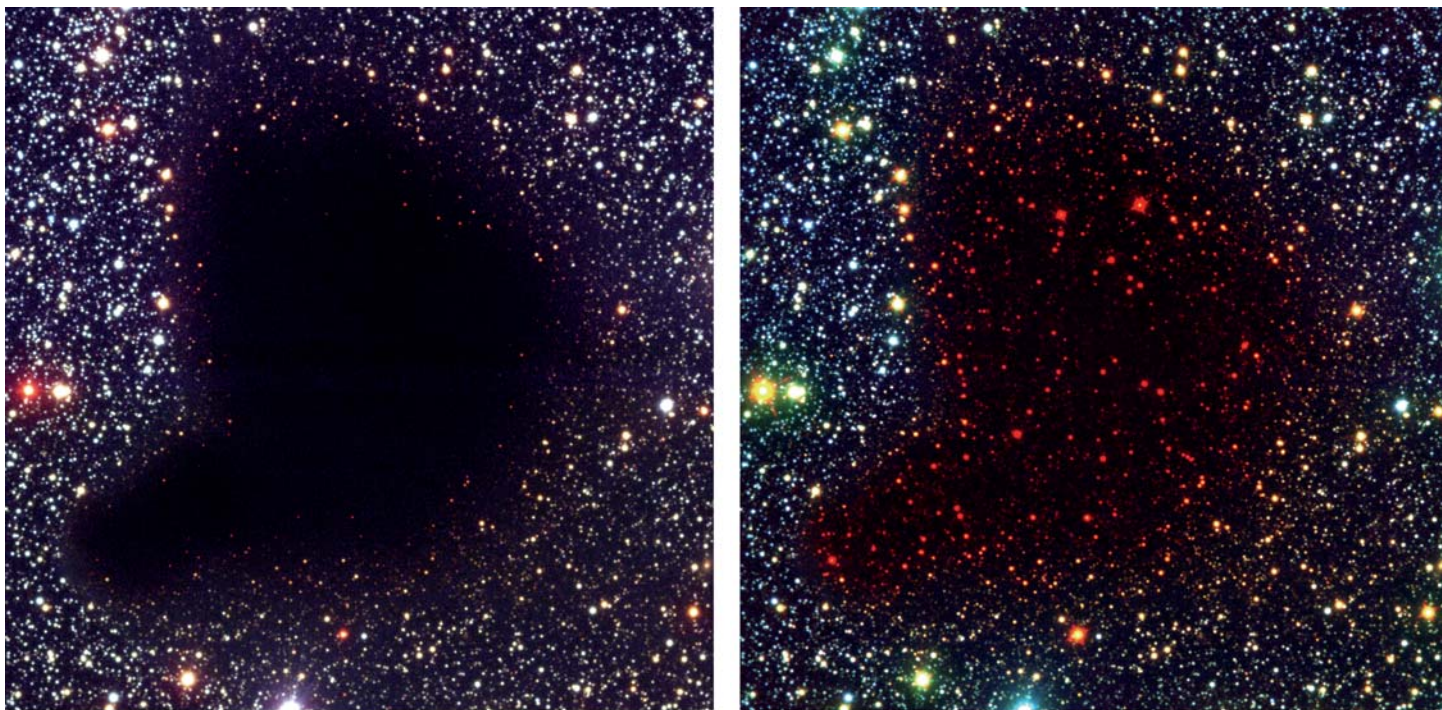
nerne) både i vores egen galakse Mælkevejen og i andre galakser.

Tætheden af atomer i det interstellar rum er, i forhold til de tætheder man kender fra Jorden, meget lille og noget nær et ideelt vakuum. Den gennemsnitlige partikeltæthed i Mælkevejen her i Solens omegn er omkring et atom pr. cm^3 hvilket er en faktor 10^{19} mindre end tætheden i Jordens atmosfære ved havniveau. På trods af denne



1. Mælkevejen set i forskellige bølgelængder. Optisk bølgelængde svarer til synligt lys, dvs. hvad man kan se med det blotte øje. De andre bølgelængder kan ikke ses med det menneskelige øje. For astronomer giver de forskellige billeder en langt mere komplet forståelse af hvad Mælkevejen består af, end hvis man blot var henvist til synligt lys. Støv udsender mest lys i det infrarøde område. De fire øverste bjælker viser radiobølger ved forskellige frekvenser, så følger to forskellige infrarøde bølgelængder, synligt lys, røntgenstråling og gammastråling. (ASD at NASA GSFC)





2. Interstellar gas- og støvsky som den ser ud i synligt lys (venstre) og infrarødt lys (højre). Skyen er mere gennemsigtig i infrarødt lys, så de bagvedliggende stjerner kan anes. Skyen går under navnet Barnard 68. (ESO)

ringe gennemsnitlige tæthed, udgør andelen af gas og støv godt en femtedel af den del af Mælkevejens masse som stjerner, planeter mm. udgør. Af denne femtedel består 99% af gas og 1% af støv.

Selvom mængden af støv er relativt lille, har det stor indflydelse på hvordan man ser universet. Støv spreder og absorberer lyset fra stjernerne og svækker derfor stjernernes lys i det synlige område. Støvet udsender den absorberede energi i form af varmestråling som kan ses med et infrarødt teleskop. En støvrig galakse vil derfor udsende mere lys ved infrarøde bølglængder end ved de bølglængder der er synlige for det blotte øje. Observationer af Mælkevejen i forskellige bølglængder (fig. 1) viser det støv som er til stede som sorte plamager i synligt lys og

som lysende plamager i infrarødt lys. Støvet absorberer ganske effektivt det ultraviolette og synlige lys fra stjernerne og blokerer ved disse bølglængder derfor de bagvedliggende stjerners lys (fig. 2). Den energi som støvet absorberer udsendes som varmestråling i det infrarøde bølglængdeområde. Derfor lyser Mælkevejen, de steder hvor støvet findes, meget kraftigt op i netop dette bølglængdeområde.

De fleste galakser er i konstant forandring, fordi der ud af galaksens gas- og støvskyer dannes nye stjerner. Stjernerne udsender stråling som påvirker deres omgivelser, og sidst i deres livsfaser returnerer de fleste stjerner væsentlig dele af deres masse til det interstellare medium – et stort kosmisk kredsløb. Det meste af den masse der returneres er i form af gas,

men nogle stjerner danner små mængder af støv som returneres sammen med gassen.

FRA BIG BANG TIL NU

Siden Big Bang satte det hele i gang for 13,7 mia. år siden, har universet været i konstant udvikling. Kort efter Big Bang blev de to letteste grundstoffer, brint og helium, dannet samtidig med meget små mængder af bor, beryllium og litium, men intet af de andre grundstoffer som findes i dag. Der var ikke noget støv, for de grundstoffer som støv kan opbygges af, fandtes ikke. Der var følgelig heller ikke mulighed for tilstedeværelse af levende organismer, for der var ingen kulatomer til at danne dem af. Men ud af de



3. Søjletågen (Cone Nebula) også kaldet NGC 2264 viser en gas- og støvsky hvor nye stjerner bliver dannet i den del der ligger i toppen af billedet. Den del af tågen der kan ses er godt 2,5 lysår høj, hele tågen er omkring 7 lysår stor og befinder sig i en afstand af 2.500 lysår i stjernebilledet Enhjørningen. (NASA, H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCSC/LO), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), the ACS Science Team & ESA)

to gasarter brint og helium kan stjerner dannes. Gasserne dannede kæmpe gasskyer hvori visse områder blev så kompakte at de begyndte at falde sammen under deres egen vægt. Da tætheden i centret af sådan et område blev høj nok til at temperaturen kom over 16 mio. °C begyndte brintkernerne at fusionere til heliumkerner. Dette skab-

te energi i centret, og når noget af denne energi blev udstrålet var en stjerne født. Man kan observere mange forskellige stjernedannelsesområder i Solens omegn af Mælkevejen (fig. 3-5). Efter stjernen er dannet, er den i de næste millioner til milliarder af år en kæmpe gaskugle der udstråler den energi som dannes i dens indre.

Det er inde i stjernerne at alle de grundstoffer der er tungere end helium og lettere end jern som man finder på Jorden i dag, er blevet skabt. Grundstofferne bliver hele tiden dannet inde i stjernerne og spredt ud i rummet i stjernerne sidste livsfaser. Universet er på den måde i et kredsløb hvor der hele tiden dannes mere og mere af de forskellige



4. Udsnit af Ørnetågen der viser en søjle af gas og støv som er 9,5 lysår høj. Det er dobbelt så langt som afstanden mellem Solen og dens nærmeste nabostjerne, Alpha-Centauri. Ørnetågen kan ses i stjernebilledet Slangen og befinder sig i en afstand af 7.000 lysår fra Jorden. (NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

grundstoffer som beriger – man kunne også sige forurener – universet. Den kombination af grundstoffer som man finder på Jorden i dag, er dannet på basis af de grundstoffer som mange generationer af forskellige stjerner tidligere i universets historie har skabt. Processen er ikke videre effektiv; blot én procent af den oprindelige brint efter Big Bang er i dag blevet omdannet til grundstoffer tungere end helium.

STJERNESTØV

I modsætning til hvad man umiddelbart skulle tro, er det meget få steder i universet der kan skabes støv. At få et støvkorn til at dannes kræver dels at der er forholdsvis koldt (dvs. under 1.500°C), og dels at molekylernes tæthed er så høj at de har en mulighed for at mødes. De fleste steder i universet hvor der er en høj tæthed, er temperaturen også høj (i stjerner), og hvor temperaturen er lav er tætheden typisk meget lav som i gas- og støvskyerne mellem stjernerne.

Det er kun i forbindelse med en stjernes død at de rette forhold for støvdannelse skabes. Der er to meget forskellige måder som en stjerne kan dø på, og i begge tilfælde er der mulighed for at støv kan dannes og blive blæst ud i rummet.

En stjerne som Solen ender sit liv med først at blive en kold, rød kæmpestjerne, og derefter en planetarisk tåge (fig. 6). Når Solen bliver til en kold, rød kæmpestjerne vil den blæse sig op, så dens yderste lag når helt ud til Mars' bane. Når det sker, om ca. 5-6 mia. år, bliver Jorden opslugt af Solen. I denne fase bliver mange af de tungere grundstoffer, der er blevet



5. Hestehovedtågen er en kold mørk gas- og støvsky der ligger mod en baggrund der bliver lyst op af nydannede stjerner. Tågen er en del af den større Oriontåge der som navnet antyder er at finde i stjernebilledet Orion (midt i sværdet). Tågen ligger omkring 1.600 lysår fra Jorden. (NASA, NOAO, ESA & The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

dannet inde i Solen, transporteret ud til overfladen. Det er ud af disse grundstoffer støvkorn kan dannes.

Når en stjerne bliver større, vil den samtidig blive koldere på overfladen. I en kold gas kan der dannes molekyler, og under gunstige forhold vil molekylerne gå sammen og danne støvkorn. Typisk vil et støvkorn bestå af 1.000 atomer eller mere. Støvet dannes i stjernens yderste lag, for kun dér er det koldt nok. Når støvet dannes, vil det blive blæst væk fra stjernen pga. lystrykket fra stjernens indre, og stjernen vil langsomt, men sikkert, miste mere og mere af sin masse og ende som en smuk planetarisk tåge. På den måde bliver nydannet støv blæst ud i

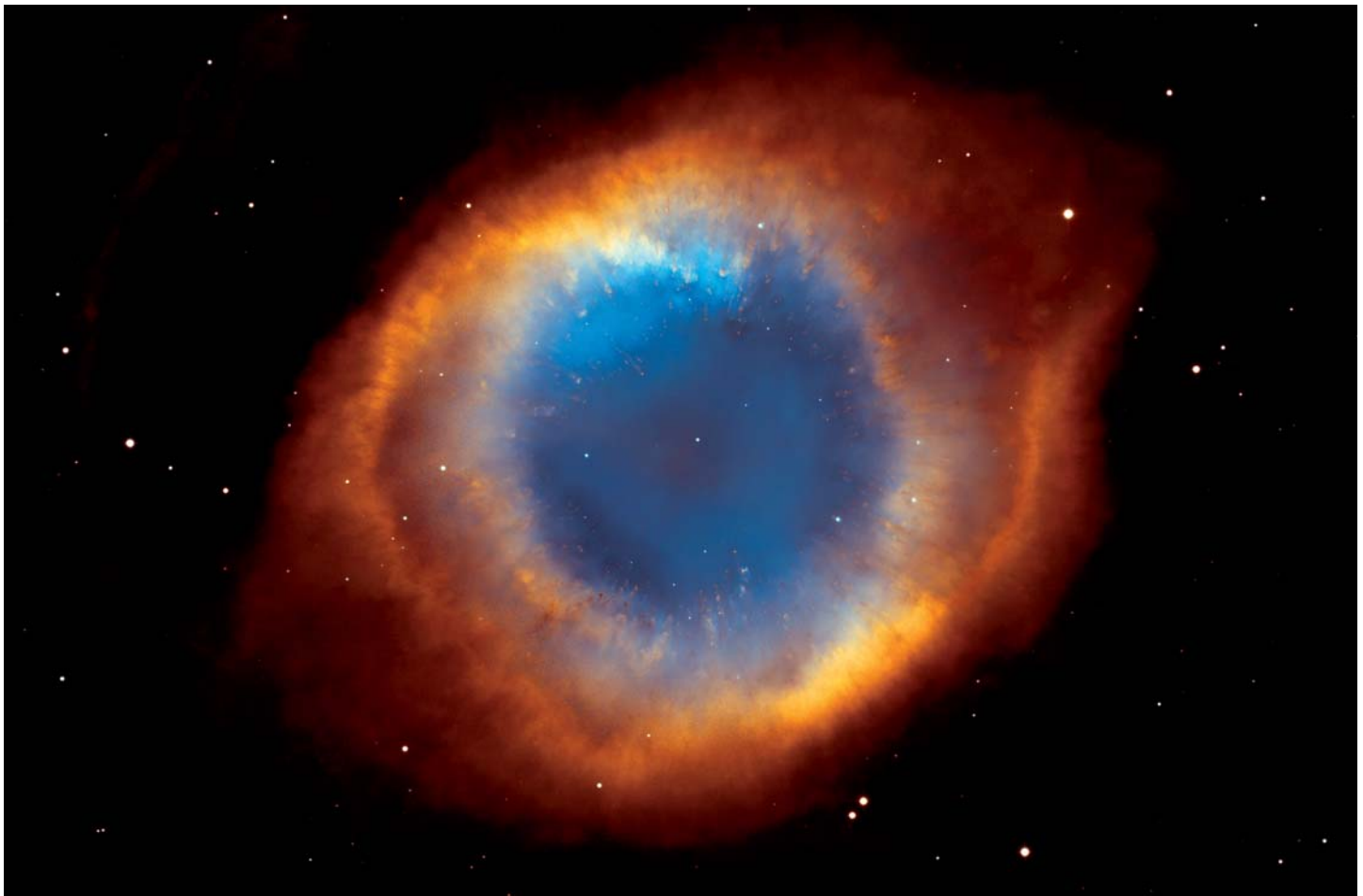
rummet mellem stjernerne hvor det vil indgå i de store gasskyer hvorfra nye stjerner bliver dannet.

Støvdannelse går noget anderledes til i forbindelse med de stjerner der er mere end otte gange tungere end vores Sol. De bliver ikke til planetariske tåger, men derimod til supernovaer. En supernova er en stjerne der ender sine dage i en gigantisk eksplosion hvor stjernen i nogle uger udsender lige så meget lys som milliarder af sole tilsammen. Under eksplosionen dannes jern og alle de resterende tunge grundstoffer som findes på Jorden i dag, fx er alle guldatomer på Jorden såvel som i resten af universet dannet i forbindelse med en supernova.

Ekspllosionen er med til at sprede de nydannede grundstoffer til det omgivende interstellare rum. Et år eller to efter en supernovaeksplosion er gassen fra den eksploderende stjerne kølet så meget ned at der er mulighed for at støv kan dannes.

STØVETS NATUR

Kosmisk støv er opbygget af de grundstoffer som er de mest hyppige i universet. Stjernerne producerer ikke lige meget af alle de 105 grundstoffer i det periodiske system. Hyppigheden af de enkelte grundstoffer afhænger bl.a. af deres atomkerne-egenskaber.



6. Den planetariske tåge kaldet Helix-tågen eller NGC7293 befinder sig i en afstand af 650 lysår og kan ses i stjernebilledet Vandmanden. Det er i stjerners sidste livsfaser at de danner stjernestøv, og støvet bliver spredt ud i rummet mellem stjernerne når de bliver til en planetarisk tåge. (NASA, ESA, C.R. O'Dell (Vanderbilt University), M. Meixner and P. McCullough (STScI))

Efter brint og helium er de mest hyppige grundstoffer i universet i dag ilt, kulstof, kvælstof, jern, neon, silicium, magnesium, svovl, argon, calcium og aluminium. Som en konsekvens af dette er de hyppigst forekommende støvtyper i universet kulstøv og silikater. Kulstøvet kan have form som sod, grafit, C_{60} eller diamant. Silikater er en fællesbetegnelse for mineraler der består af silicium og ilt i kemisk forbindelse med forskellige metaller, fx magnesium, jern og/eller aluminium.

Silikatmineraler udgør størsteparten af jordens skorpe og kappe.

Observationer tyder på at forskellige typer stjerner producerer forskellige støvtyper. Dette kan forklares ved at mængden og typen af støv afhænger af hvilke grundstoffer der er til rådighed, og hvilke tryk og temperatur som er til stede på det tidspunkt i stjernens livsfase hvor støv har mulighed for at dannes.

Støv kan ikke dannes i gas- og støvskyerne mellem stjernerne da tætheden

her er så lav at det tager længere tid at danne et støvkorn end det tager at ødelægge et. Fordi ultraviolet stråling og kosmisk stråling nedbryder støvkornene, har et støvkorn kun en endelig levetid når det svæver rundt i det interstellare rum. Mens støvkornene befinder sig i en sky hvor der er atomer og mindre molekyler til stede, vil det kunne vokse i størrelse ved at disse sætter sig på støvkornets overflade. Et gennemsnitligt støvkorn forventes i sin levetid at gennemgå

mange perioder med vækst og fordampning.

STØV SKABER
KOMPLEKSE MOLEKYLER

I løbet af et støvkorns levetid vil nye typer af molekyler blive dannet på dets overflade. Det er nemlig mere effektivt for atomer at møde hinanden på en overflade og danne molekyler dér, end det er at danne disse direkte i gassen i det interstellare rum. Brintmolekylet er det mest almindelige molekyle i universet og det meste af gassen i de interstellare støv- og gasskyer består af brint på enten atomar eller molekylær form. Fordi brintmolekylerne i de interstellare skyer hele tiden bliver slået i stykker af ultraviolet stråling fra omkringliggende stjerner og af kosmiske stråler fra energirige kosmiske hændelser som fx supernovaer, må der hele tiden blive dannet nye brintmolekyler.

Når brintmolekyler dannes, udløses der så meget energi at molekylet straks bliver revet fra hinanden igen, medmindre en tredje part kan optage energien og lede den væk. Her på Jorden vil en sådan tredje part typisk være et andet brintatom eller overfladen af den beholder som brintgassen opbevares i. Men i de interstellare støvskyer er der så langt mellem de enkelte brintatomer at det stort set aldrig sker at tre af dem møder hinanden samtidigt. Derfor er det mest sandsynligt at brintmolekylerne dannes på overfladen af de kosmiske støvkorn. Hvis et atom er løst bundet til overfladen af et støvkorn, kan det sidde der i måneder eller år og vente på at et andet atom ender på støvkornets overflade. Mens de sidder her, har atomerne mulighed



7. Galaksen M101 befinder sig godt 25 mio. lysår fra Jorden. De centrale dele af galaksen lyser rødt fordi der er flest gamle røde stjerner, mens spiralarmene ser blå ud fordi de indeholder mange unge stjerner som er blålige. Støvet i galakseskiven ses som sorte plamager. Galaksen er næsten dobbelt så stor som Mælkevejen. (NASA, ESA)

for at flytte rundt på overfladen til de mødes og derefter indgå i en kemisk reaktion. I sådanne reaktioner er der ofte noget energi der skal afsættes eller tilføres, og det tager støvkornet sig af.

I gas- og støvskyerne mellem stjernerne, har man observeret tilstedeværelsen af aminosyrer, alkohol og sukker. Det vil sige at livets byggesten, findes svævende i rummet. Der er – så at sige – alle de nødvendige byggeklodser til stede for at kunne opbygge liv. Disse komplekse molekyler er også blevet dannet på overfladen af støv-

korn. Støvkornene er derfor helt fundamentale for dannelsen af molekyler – både de simple og de komplekse – og dermed er støvkornene i universet helt essentielle for dannelsen af liv.

UNIVERSETS STØVEDE HISTORIE

Når man ser på fjerne galakser, ser man samtidig tilbage i tiden. Det tager nemlig tid for lyset at tilbagelægge vejen fra det objekt der har udsendt det til fx Jorden. Lyset er godt fem en





8. Sombrero-galaksen, også kaldet M104, ses lige fra kanten. Galaksen indeholder omkring 800 mia. stjerner og befinder sig 28 mio. lysår fra Jorden. Det sorte bånd i midten indeholder kosmisk støv. (NASA & the Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

halv time om at komme fra dværgplaneten Pluto i solsystemets udkant til Jorden og lidt over 8 min. om at bevæge sig fra Solen til Jorden. Fra de fjerne galakser har lyset været milliarder af år undervejs.

I Mælkevejen bliver meget støv i dag tilsyneladende dannet i de lette stjerner der ender deres dage som planetariske tåger. Men meget tyder på at supernovaer må have dannet det meste af det støv der fandtes i universets tidlige barndom. Det skyldes at tunge stjerner lever væsentlig kortere end lette stjerner. En stjerne med en masse på fx 25 gange Solens masse har en levetid på nogle hundrede millio-

ner år, mens Solen har en forventet levetid på 10 mia. år. Stjerner der er mindre end Solen lever adskillige milliarder år længere. Tunge stjerner brænder ud langt hurtigere end lette stjerner (fig. 7 & 8).

Det helt tidlige univers – lige efter Big Bang – må have været helt støvfrit, idet de første stjerner, hvori de grundstoffer som siden kunne blive til støv, først skulle dannes – og dø. Hvorvidt de første stjerner var i stand til at danne støv ud af de grundstoffer som de selv skabte, er endnu uvist. Det er et vigtigt spørgsmål da det har betydning for hvordan man kan fortolke observationer af meget fjerne objekter der

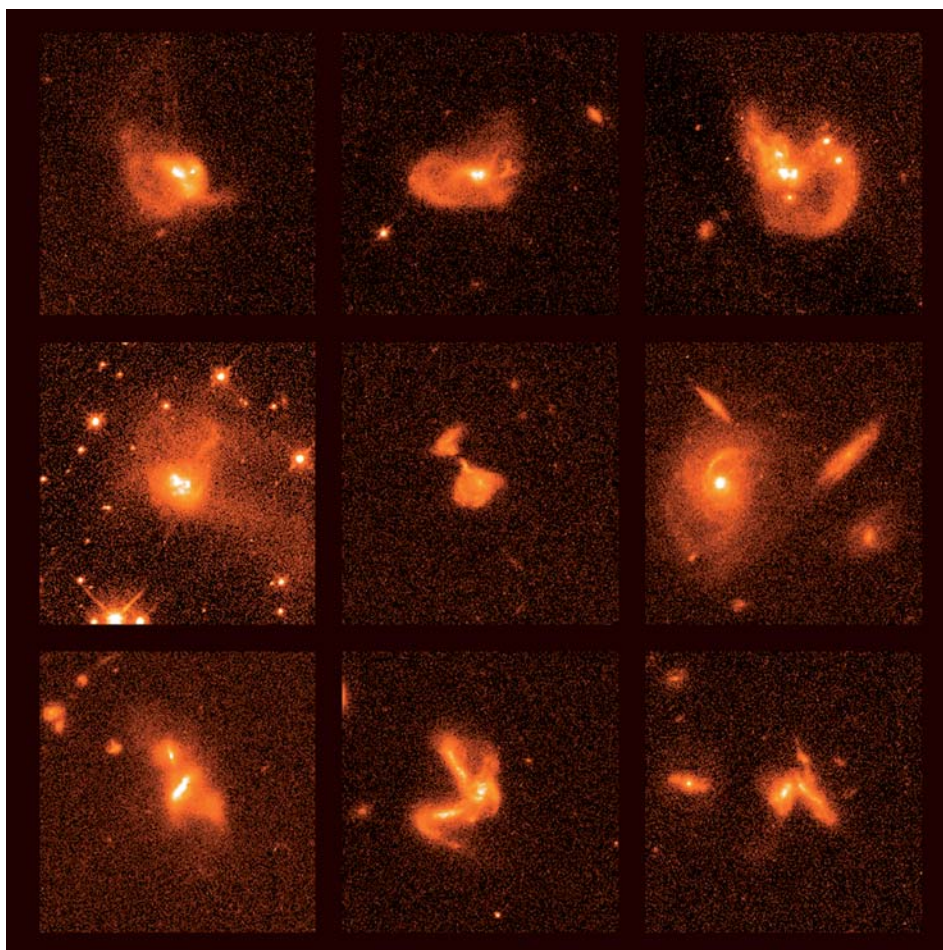
udsendte deres lys inden for et par milliarder år efter Big Bang. Hvis de tidligste stjerner kun skabte grundstofferne, men ikke opbyggede støvpartikler, må det tidlige univers forventes at være støvfrit. Men hvis selv de første stjerner kunne danne støv, bør vi astronomer bekymre os om hvordan det påvirker observationerne af de meget fjerne objekter. Der er fx god grund til at tro at de fjerneste galakser som observeres, ikke nødvendigvis er repræsentative, fordi det på store afstande er lettere at finde meget lystærke objekter end lysvage. Tilstedeværelsen af støv vil gøre en galakse mindre lystærk i synligt lys. Hvis man derfor kun observerer i syn-

ligt lys vil man overse de galakser der indeholder støv. De støvede galakser lyser til gengæld op i infrarødt lys, derfor er det vigtigt at foretage observationer over et bredt spektrum af bølglængder.

Observationer af infrarødt lys er ikke muligt direkte fra Jordens overflade, idet størstedelen af det infrarøde lys fra rummet bliver absorberet af Jordens atmosfære. Derfor kan infrarøde objekter (fig. 9) kun observeres ordentligt med satellitter som befinder sig uden for Jordens atmosfære.

Universet bliver med tiden mere og mere beriget med tungere grundstoffer som der kan dannes støvpartikler af. Hver gang en stjerne dør, skabes nye grundstoffer der blæses ud i rummet mellem stjernerne. Det spørgsmål der trænger sig på, er så: hvor mange generationer af stjerner skal der til, før der er dannet nok tungere grundstoffer til at de første støvkorn kan dannes? Var det allerede muligt i supernovatågerne fra den første generation af stjerner, eller gik der mange stjerne-generationer – millioner eller milliarder af år – før der var nok af de rette grundstoffer til de første støvkorn kunne dannes?

På Dark Cosmology Centre, finansieret af Danmarks Grundforskningsfond, er det nogle af de spørgsmål som vi forsøger at besvare. Vi studerer vha. computermodeller hvordan støvkorn kan dannes i forbindelse med tunge stjerner dannels af supernovatåger og lette stjerner sidste livsfaser lige inden de bliver til en planetarisk tåge. Ved at opnå en teoretisk forståelse af de mekanismer som hersker i de to scenarier, kan vi komme med et bud på hvor effektive de første generatio-



9. Disse galakser lyser langt mere op i infrarødt lys end i synligt lys, idet galakserne indeholder store mængder af støv. Støvet absorberer ultraviolet og synligt lys fra stjernerne i galaksen og udsender lyset som infrarødt lys. (NASA, Kirk Born, Luis Colina, Howard Bushouse & Ray Lucas)

ner af stjerner har været til at danne støv. Parallelt med den teoretiske angrebsvinkel har vi også en mere direkte angrebsvinkel. Her bruger vi observationer til forskellige tider i universets historie til at forsøge at bestemme den mængde og type af støv som de fjerne galakser indeholder. På den måde forventer vi at kunne kortlægge hvordan mængden og typen af støv har udviklet sig i universets historie.

En ændring kan forekomme hvis de tunge stjerner og de lette stjerner har bidraget til støvdannelsen i forskellig grad til forskellige tider i universets historie. Sådanne observationer kan også afsløre hvorvidt den type af stjerner der bidrog med støv i det tidlige univers adskiller sig fra den type af stjerner som bidrager med støv i Mælkevejen i dag – og dermed hvilket stjernestøv vi mennesker er lavet af.

