

Hvor kommer stjernestøvet fra?

En fortælling om støv i det tidlige univers og i Mælkevejen

Ann-Sofie B. Nielsen, Rikke L. Saust og Anna-Sofie K. Zahl, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Støv i det interstellare medium, ISM, er vigtig for, hvordan stjerner og planeter dannes. Der er derfor en stor interesse for at kende kompositionen, samt at vide, hvordan støvet produceres og videreudvikles i ISM, for at få en bedre forståelse af udviklingen af stjerner og galakser. De to bedste støvproducentkandidater er supernovaer, SN, og asymptotiske kæmpegrænsstjerner, AGB, men der er stadig tvivl om, hvilke af disse, der bidrager med mest støv til ISM. Støvet videreudvikles i ISM, så for at kunne lave modeller for det tidlige univers, er det vigtigt at undersøge udviklingen, da støvet er dynamisk.

Supernovaer

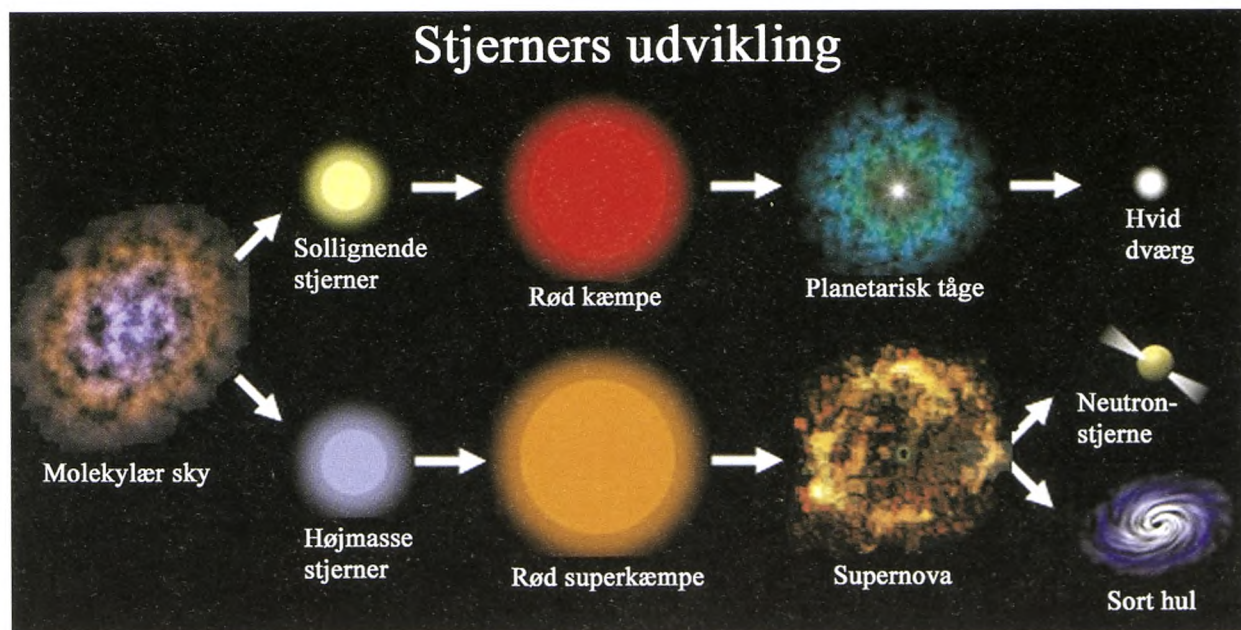
Stjerner med en startmasse på mindst otte gange Solens masse, $M_{\star} > 8 M_{\odot}$, ender med at eksplodere som SN'er. SN'er er i teorien et optimalt sted for støvdannelse. Der er dog stadig tvivl om, hvorvidt SN'er danner eller destruerer støv, så det er derfor vigtigt at undersøge de stjerneprocesser, der fører til, at den oprindelige stjerne eksploderer som en SN og danner støv. Stjerner er objekter i hydrostatisk ligevægt, hvor strålingstrykket, der skabes af kernesyntese inde i kernen af stjernen, samt gastrykket, der skyldes den høje temperatur, modsvarer gravitationstrykket fra resten af stjernens masse.

De tunge stjerner, der ender som SN'er, kan uden problemer fusionere op til jern, ^{56}Fe , på grund af den høje temperatur, som kernen får fra den gravitationelle energi. Den gravitationelle energi går dels til at opvarme kernen, og resten af energien omdannes til stråling,

hvoraf hoveddelen er fotoner. Et udtryk for strålingsenergien af fotonerne, der forlader en kugleoverflade, kan udtrykkes i form af luminositet, L . Ændringen af L afhængig af afstanden til en stjernes centrum, r , ses i ligning 1. K beskriver omdannelsen fra gravitationel potentiale til energi, og energien fra kernesyntesen beskrives af E . Den skabte energi går altså dels til luminositeten og dels til opvarmning af partiklerne, U , som derfor trækkes fra udtrykket for L . ρ i formelen er massedensiteten af stjernen.

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho [E - U + K] \quad (1)$$

Under den første del af en stjernes liv er det E -leddet, der er dominerende for L , da der er hydrostatisk ligevægt. En højmassestjerne bliver ved med at udvides, i takt med at kernen bliver varmere og udvikles til en rød superkæmpe (figur 1).



Figur 1. Her ses de to primære udviklings-stier, stjerner kan følge efter dannelse i en molekylær sky.

Men når stjernen har dannet en kerne af jern, bliver E -leddet ubetydeligt. Dette skyldes, at jern har den højeste bindingsenergi per nukleon, hvilket betyder at fusion af tungere metaller ikke vil skabe energi men i stedet koste energi, så de overordnede fusionsprocesser stopper. Som det kan ses i ligning 1, betyder det, at gravitationsudtrykket, K , dominerer. Kernen og resten af stjernen begynder at falde sammen på grund af det nu manglende fotontryk og det dominerende gravitationelle tryk. Kernen bliver ustabil, og når hurtigt et punkt, hvor den pludselig ikke kan falde mere sammen. Dette skyldes bl.a., at densiteten er så høj at nukleonerne bliver tilstrækkeligt tætte til, at de frastødes pga. den stærke kernekraft. Det pludselige stop af kollapsedet skaber en chokbølge, der bevæger sig ud igennem stjernens lag. I disse lag dannes endnu tungere metaller end jern, ved at atomerne indfanger en masse energirige neutroner, som er dannet ved fusionsprocesserne. Mange af neutronerne er allerede indfanget i de atomer, stjernens kerne består af, og hvad der bliver tilbage af stjernen, er denne kerne med neutronrige atomer, kaldet en neutronstjerne. Hvis densiteten er høj nok, kolliderer kernen dog til et sort hul (figur 1).

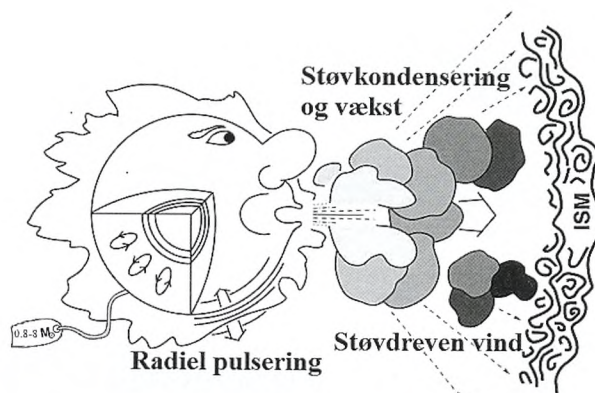
Støvet produceres umiddelbart efter SN eksplosionen, når chokbølgen udbreder de yderste lag nok, til at temperaturen sænkes til kondensationstemperaturen. De ny producerede metaller kondenserer til forskellige typer støv i det udkastede materiale. Støvkornenes størrelse kan forventes at være relativt små, da kornene bliver ødelagt, når chokbølgen kastes tilbage af ISM. Spørgsmålet er dog om kornene kun bliver delvist ødelagt til mindre korn, eller om de bliver helt opløst til metaller – måske er det endda kun de store korn der overlever.

Hvilken type støv, der dannes i SN'er kan i teorien være alle tænkelige typer, da der findes de fleste metaller i det udkastede materiale. Dog kan det forventes at der fx er en større mængde silikater end carbonstøv, da en stor del af carbon vil kunne fusioneres videre til bl.a. silicium. Dog har carbonstøv en højere kondensationstemperatur end silicium, og derfor ville man også kunne argumentere for at der er mere carbonstøv end silikater.

Asymptotiske kæmpegrensstjerner

Stjerner med en masse på $0,8 M_{\odot} < M_{*} < 8 M_{\odot}$, lever størstedelen af deres tid på hovedserien som stabile stjerner, der brænder hydrogen til helium. Når stjernerne er omkring én milliard år gamle, forlader de hovedserien. Grunden til at stjernen forlader hovedserien og bliver ustabil er, at den har brændt alt sit hydrogen til helium, og fusionsprocesserne stopper i stjernens kerne. Strålingstrykket fra stjernens indre forsvinder, og det gravitationelle tryk bliver dominerende, og stjernen begynder at kollapse. Når dette kollaps sker, er det U - og K -leddene i ligning 1, der dominerer. Stjernens temperatur stiger herefter, og der begynder at brænde hydrogen til helium i skaller rundt om heliumkernen. Denne stigning i temperatur fortsætter, indtil stjernen er varm nok til at brænde helium til carbon. Når stjernen

brænder helium til carbon er den på heliumhovedserien, hvor stjernen er variabel, og ændrer radius og luminositet periodisk, samtidig med at temperaturen af stjernen ændres, først stiger den, og senere falder den, hvorefter stjernen ender på den asymptotiske kæmpegrensfase (figur 1).



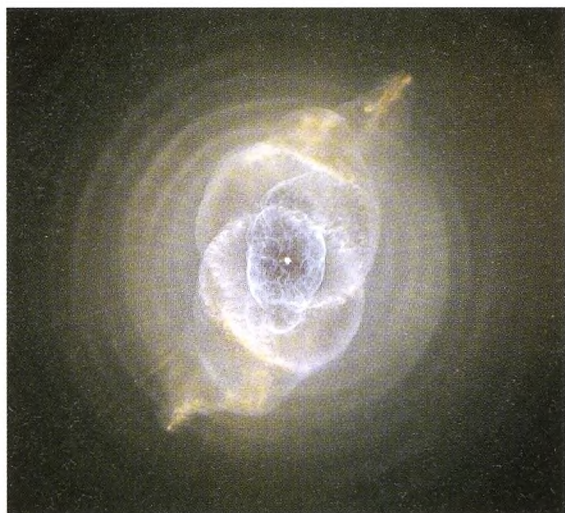
Figur 2. Her ses processerne, der sker ved en stjerne i AGB-fasen, herunder støvproduktion og den støvdrevne vind.

AGB-stjerner har brændt helium til carbon i kernen, og har ikke en høj nok temperatur til at sætte gang i afbrændingen af carbon til tungere grundstoffer. Der er derfor, på den sidste del af AGB-fasen, ikke andet end en udbrændt carbonkerne tilbage. På AGB-fasen gennemgår stjernerne en række komplekse processer. Mens stjernen er i AGB-fasen, nedkøles den, udvider sig, trækker sig sammen, hvorved den pulserer. Når stjernen udvider sig bliver den mere lysstærk, alt imens kerneprocesser brænder dens sidste hydrogen og helium i skaller omkring en udbrændt carbon-askekerne. På samme tidspunkt i stjernens liv dannes der også en dyb konvektionszone, som fører store mængder af varmt materiale til overfladen, og mængder af koldere materiale ind til stjernens indre. Dette fungerer, ligesom når vand koges i en gryde. Her kommer de varme bobler op til overfladen, og koldere vand fra overfladen trækkes ned til bunden af gryden.

Det, der er dominerende på AGB-fasen, er det gravitationelle tryk. Dette er den dominerende faktor når stjernen kolliderer, og det er beskrevet i ligning 1. Her er det igen leddene U og K , der dominerer.

Fordi AGB-stjernen pulserer, løftes de yderste lag fra stjernens overflade, og der dannes et køligt lag af gas, hvor metaller kan kondensere til støvkorn.

AGB-stjernens pulsering og dannelsen af støv, får stjernen, til at smide sine yderste lag af, og drive dem væk fra sig med en støvdreven vind (figur 2). Vinden er støvdreven, da det er strålings- og gastrykket fra stjernen, der skubber til støvet og driver det væk fra stjernen. Denne vind danner ringe af støv rundt om den resterende del af stjernen, og fører støvet ud i ISM. Den del af stjernen der er tilbage er en hvid dværg. En hvid dværg er den afbrændte askekerne, som er det eneste af stjernen, der ikke blæser ud i ISM (figur 3).



Figur 3. På figuren ses katteøjetågen, som er den planetariske tåge, efter AGB fasen af en stjerne.

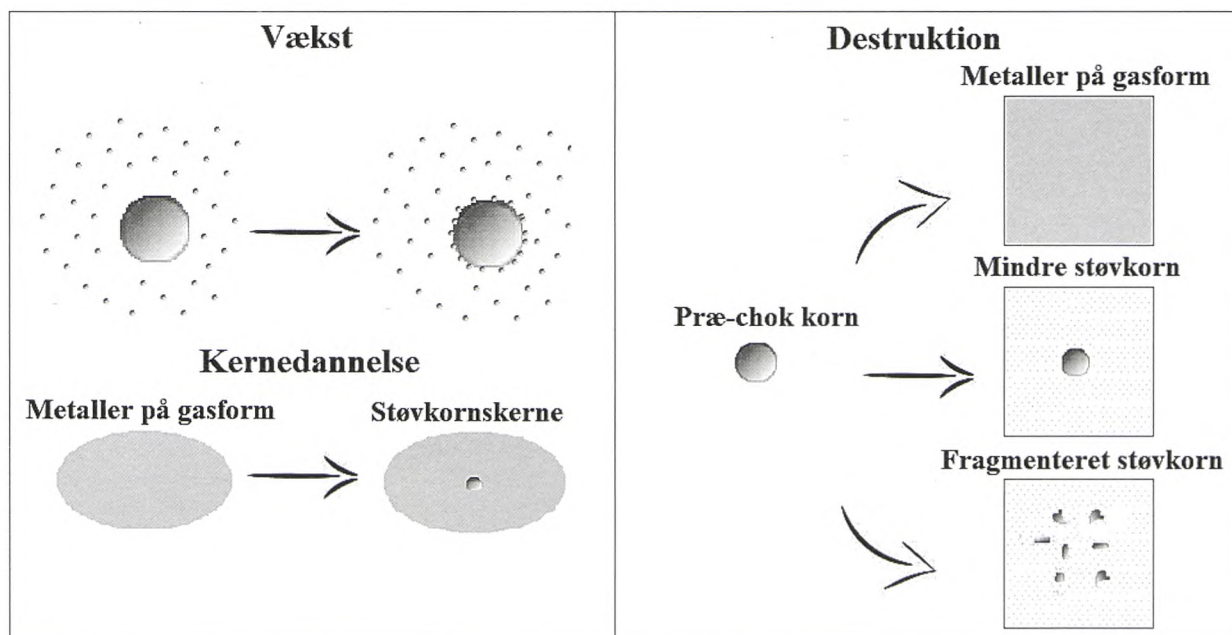
Det støv der dannes i AGB-stjerner er en blanding af forskellige grundstoffer. De primære støvtyper der dannes er silikat og carbon. I AGB-stjerner dannes der mest carbon, da disse stjerner ikke når at fusionere carbon til tungere grundstoffer. Dermed producerer AGB-stjerner ikke selv silicium. Der skal derfor have været silicium til stede i den molekylære sky, som kollapsede til den stjerne, der senere udvikledes til en AGB-stjerne, før der kan dannes silikatstøv. Støvkornene fra en AGB-stjerne varierer meget i størrelse, og er mellem 0,003-10 μm i radius. En del af de korn, der menes at stamme

fra AGB-stjerner, er fundet i meteoriter, som giver en god mulighed for at undersøge støvkorn.

Støvets udvikling i det interstellare medium

Nu, hvor vi ved, hvordan støvet er blevet dannet, skal vi se på støvets videre udvikling i ISM. Støv befinder sig hovedsageligt i molekylære skyer, der er meget tætte og kolde. Her dannes en stor mængde molekyler, hovedsageligt hydrogenmolekyler, H_2 . Metallerne i skyen er vigtige, for at få temperaturen i skyen til at falde, da der findes lavenergi vibrationelle overgange i metallerne. Molekylære skyer kan blive så tætte og kolde, at de kolliderer og danner stjerner. Derfor er molekylære skyer også betegnet som stjernedannende områder, hvor stjernerne, når de begynder at lyse, kan blæse den oprindelige molekylære sky væk, hvis stjernen er lysstærk nok. Støvet i skyen, er med til at danne molekyler, da H_2 lettere dannes på overfladen af støvkornene, end fx ved sammenstød af hydrogenatomer.

Der er fornyligt blevet observeret overraskende store mængder støv i det tidlige univers. Grunden til at det er overraskende er, at man indtil fornyligt regnede med, at AGB-stjerner var den eneste støvproducent. AGB-stjernerne producerede ikke støv før efter en rødforskydning på omkring 6, da denne svarer til en stjernes alder, når den når AGB-fasen. En mulig støvkilde er SN'erne, der menes allerede at kunne have startet deres støvproduktion så tidligt som ved rødforskydning 50. Men selvom SN'ere kan danne støv, er der stadig stor debat om, hvorvidt det producerede støv overlever den tilbagevendende SN chokfront.



Figur 4. Denne figur illustrerer støvvækst, destruktion, samt dannelsen af støvkorn fra en metalrig gas.

Støvet dannet i SN'er og AGB-stjerner har meget forskellige kornstørrelser, hvor støvkorn dannet i SN'er er generelt meget små og støvkorn dannet i AGB-stjerner er relativt store, hvilket påvirker støvets udvikling i ISM. De vigtigste processer, som forandrer støvkornene, er vækst og destruktion. Væksten af støvkornene er stærkt afhængig af, hvor stort et overfladeareal støvkornene har, da et stort overfladeareal øger sandsynligheden for, at en mindre partikel kan sætte sig fast på støvkornets overflade (figur 4). Derfor vil de mindre korn gro bedre end de større støvkorn, under de rigtige forhold af tryk, temperatur og metalindhold. Det er nemlig metallerne, som også dannes i SN'er og AGB-stjerner, der kan sætte sig fast på støvkornenes overflade og derved forårsage vækst (figur 4). Hvor meget et støvkorn kan gro, kan udregnes ved hjælp af en vækst faktor, ϵ .

$$\epsilon \propto \left(\frac{a}{\mu\text{m}}\right)^{-1} \left(\frac{\Sigma_g}{M_{\odot}/\text{pc}^2}\right) \quad (2)$$

Denne afhænger af støvkornenes gennemsnitslige radius, a , og overfladedensiteten af den gassky støvet befinder sig i, Σ_g , her er Σ_g givet i enheder af $M_{\odot}/\text{pc}^2$, hvor en parsec er $1 \text{ pc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$. Ved hjælp af denne ligning kan man bestemme, hvor meget forskellige typer støv gror i ISM, da de forskellige støvtyper har forskellig størrelse og overflade tæthed. Dette er interessant at undersøge, fordi sammensætningen af støv i fx Mælkevejen stadig er ukendt.

Støv kan også blive destrueret, hvilket kan ske ved SN'ernes chokfronter, hvor støvkornet enten ødelægges helt, bliver mindre og evt. opløses til metaller igen i ISM (figur 4). Destruktionsraten har sandsynligvis ikke været konstant gennem hele universets levetid, fordi der i det tidlige univers blev dannet flere og tungere højmasse stjerner, end der gør i dag. Dette kan have ført til en højere destruktionsrate i det tidlige univers i forhold til det nuværende.

Destruktion af støvkorn betyder ikke nødvendigvis, den samlede støvmængde bliver mindre, da destruktio- nen også påvirker væksten af støvkorn. De to nederste eksempler på destruktion i figur 4 øger overfladeare- alet, hvilket øger vækstraten ϵ . En forøgelse af ϵ vil forårsage vækst af støvkornene, som igen kan påvirke, hvilken form for destruktion, der sker. På den måde er korntilvæksten og -destruktionen i høj grad forbundne størrelser. Men SN'er kan også resultere i vækst af støvkornene i ISM. Dette sker fordi SN chokfronterne presser gassen sammen, hvilket øger tryk, temperatur og metaltætheden, derfor kan SN'erne også påvirke den samlede støvmængde til at stige. Disse effekter er dog endnu ikke helt velkendte, men kan være med til at forklare, hvorfor der observeres så store mængder støv ved høj rødforskydning.

Litteratur

- [1] Christensen-Dalsgaard, J.: Lecture notes on stellar structure and evolution, *Institute for Physics and Astro- nomy*, Aarhus Universitet, 6. udgave (2008).
- [2] Draine, B. T.: Physics of the interstellar and intergala- ctic medium, Princeton University, *Princeton Universi- ty Press*, Kapitler: 21, 22, 23 og 39 (2011)
- [3] Gall, C., Hjort, J. og Andersen, A. C.: Production of dust by massive stars at high redshift, *A&A*, Review 19, 43 (2011).
- [4] Mattsson, L., Andersen, A. C., og Munkhammar, J. D.: On the dust abundance gradients in late-type galaxies: I. Effects of destruction and growth of dust in the interstellar medium, <http://arxiv.org/abs/1201.3375v1> (2012).
- [5] Valiante, R., Schneider, R., Bianchi, S. og Andersen, A. C.: Stellar sources of dust in the high-redshift Universe, <http://arxiv.org/abs/0905.1691v1> (2009).



Ann-Sofie Bak Nielsen er bachelor i astronomi ved Københavns Universitet i 2012. Har skrevet bachelorprojekt hos Anja C. Andersen i Støvets udvikling og oprindelse. Har gået i gymnasiet på Odense Katedralskole, og har igennem 4 år været aktiv i Ungdommens Naturvidenskabelige Forening.



Rikke Lund Saust er bachelor i astronomi ved Københavns Universitet i 2012. Har skrevet bachelorprojekt hos Anja C. Andersen i Støvets udvikling og oprindelse. Har gået i gymnasiet på Københavns Abne Gymnasium.



Anna-Sofie Köhn Zahl er bachelor i astronomi ved Københavns Universitet i 2012. Har skrevet bachelorprojekt hos Anja C. Andersen i Støvets udvikling og oprindelse. Har gået i gymnasiet på Zahles gymnasieskole og er bestyrelsesmedlem i Kvinder i Fysik.