

Grundstoffernes historie

For halvtreds år siden faldt vores forståelse af, hvordan grundstofferne dannes, i store træk på plads. I dag arbejder forskerne med at forstå de finere detaljer i, hvordan især de tungeste grundstoffer bliver til.

Af Hans Fynbo og Nikolaj Zinner

■ De gamle grækere troede, verden var opbygget af de fire elementer luft, ild, vand og jord. I dag ved vi, at alle gasser, væsker og faste stoffer på jorden er opbygget af omkring hundrede grundstoffer, som den russiske kemiker Dmitri Mendeleev for mere end 100 år siden organiserede i det periodiske system. Det periodiske system forklarer dog ikke, hvordan grundstofferne er dannet, og hvorfor nogle grundstoffer er meget almindelige, mens andre er sjældne. Svarene på disse grundlæggende spørgsmål om grundstofferne blev første gang ridset op i en skelsættende artikel fra 1957, og denne milepæl fejrer altså i år sit 50års-jubilæum.

Styr på atomet

En seriøs beskrivelse af grundstoffernes oprindelse måtte vente på den grundlæggende forståelse af atomer og atomkerners opbygning, der kom med den engelske fysiker James Chadwicks opdagelse af neutronen i 1932. Da blev det umiddelbart klart, at atomkerner er opbygget af neutroner og protoner, og at antallet af



Grundstoffet jern har den største bindingsenergi af alle kerner. Jern findes normalt ikke frit, men er bundet i mineraler som f.eks. hæmatit, som er et jernoxid.

protoner bestemmer grundstoffet, mens antallet af neutroner bestemmer isotopen af grundstoffet.

Ret hurtigt derefter kunne den tyske fysiker Hans Bethe

og andre beskrive, hvordan solens energi kommer fra omdannelsen af Brint til Helium. Ud fra den forståelse, man på det tidspunkt havde af betingelserne i stjerners indre,

mente man dog ikke, at grundstoffer tungere end Helium kunne dannes i stjerner – f.eks. vurderede Bethe, at mængden af kulstof dannet i solen måtte være forsvindende, fordi sand-

synligheden for, at tre Helium-kerner fusionerer, er ekstrem lille, og fordi fusionen af to Helium-kerner giver en isotop af Beryllium, som henfalder umiddelbart efter den er dannet.

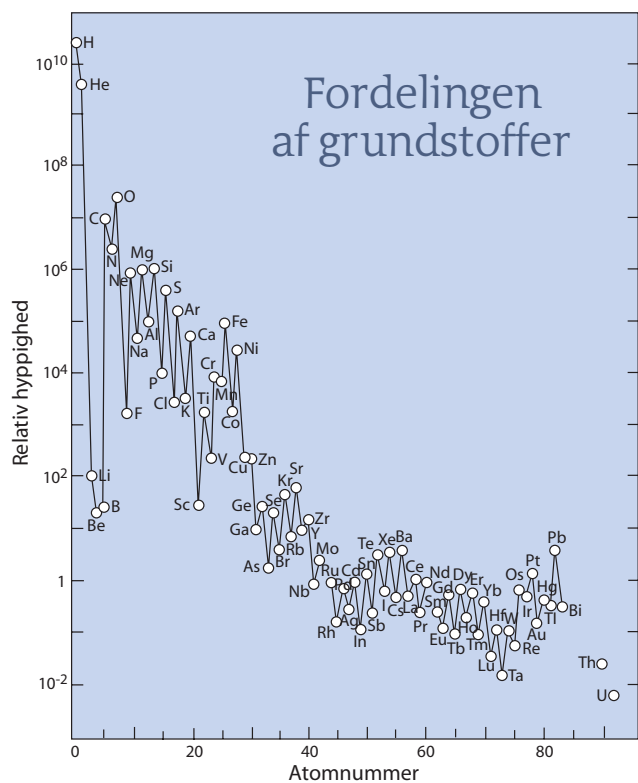
Big Bang og grundstofferne

I slutningen af 1920'erne opdagede den amerikanske astronom Edwin Hubble universets udvidelse, og samtidigt var de kosmologiske konsekvenser af Einsteins generelle relativitetsteori blevet afklaret. I 1940'erne, og navnlig efter anden verdenskrig, blev ideen om et ekspanderende univers taget op i diskussionen om grundstoffernes oprindelse. Erkendelsen af, at universet har haft en varm og tæt begyndelse (senere ironisk navngivet Big Bang af astrofysikeren Fred Hoyle) gjorde det mere påtrængende at forklare den fordeling af grundstoffer, vi ser i dag. En naturlig forklaring kunne selvfølgelig være, at alle grundstofferne blev dannet i de første stadier af universets udvikling efter Big Bang. Denne hypotese blev efterprøvet af fysikeren George Gamow og hans studerende Ralph Alpher. De antog, at universet startede som en varm suppe af neutroner og protoner, og at alle grundstoffer blev dannet ved successive indfangninger af neutroner på tungere og tungere kerner, efterfulgt af beta-henfald, når produktet efter neutronindfangning blev radioaktivt (se boks). Ved at tilpasse en blød kurve til data fra det amerikanske atombombeprojekt (Manhattan projektet), hvor man havde målt sandsynlighederne for neutronindfangning for en lang række isotoper, kunne Gamow og Alpher nogenlunde forklare den observerede grundstoffordeling. Resultat blev publiceret i 1948 i en artikel, hvor Gamow også inkluderede Bethes navn i forfatterlisten, som så meget passende blev Alpher, Bethe og Gamow – efter de tre første bogstaver i det græske alfabet. Gamow og Alpers teori løb dog umiddelbart ind i alvorlige

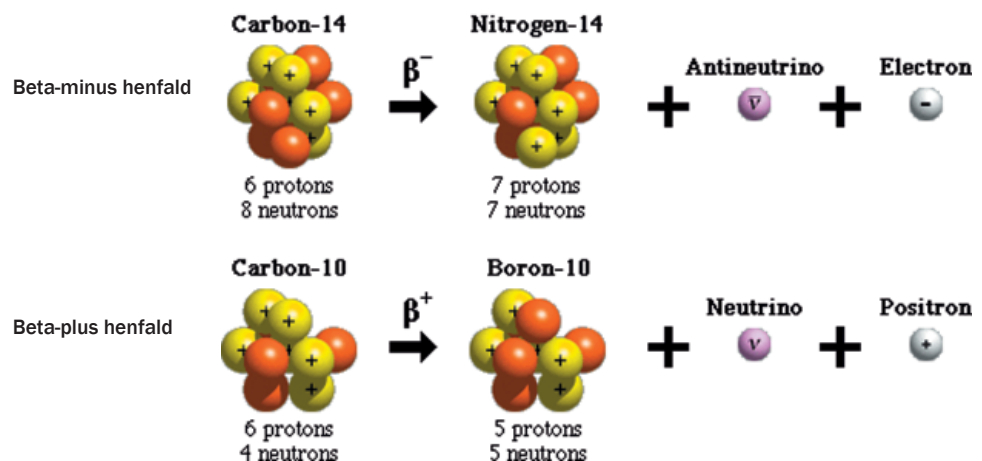
Fordelingen af grundstoffer observeret i solens atmosfære.

Langt de almindeligste grundstoffer er brint og helium, som produceres i det tidlige univers. Kerner med ladninger fra 10 til ca. 20 produceres i tunge stjernes forskellige forbrændingsstadier. Man ser tydeligt toppen omkring ladning 26, hvilket er ved jern som er endepunkt for kerneforbrændingen. De resterende kerner med større ladninger produceres ved indfangning af neutroner. Denne proces er mere kompliceret, og man observerer således også mindre forekomster af disse tungere kerner.

Bemærk dog, at der er toppe i fordelingen omkring kerneladning 50 og 80 – de såkaldt magiske kerner, som er mere stabile end andre kerner. At figuren er konsekvent savtakket skyldes, at kerner med et lige antal protoner er mere stabile end kerner med et ulige antal protoner. Den markante "dal" ved Li, B og Be skyldes, at disse grundstoffer ikke dannes i stjerner og kun i meget ringe grad i Big Bang.



Henfald af atomer



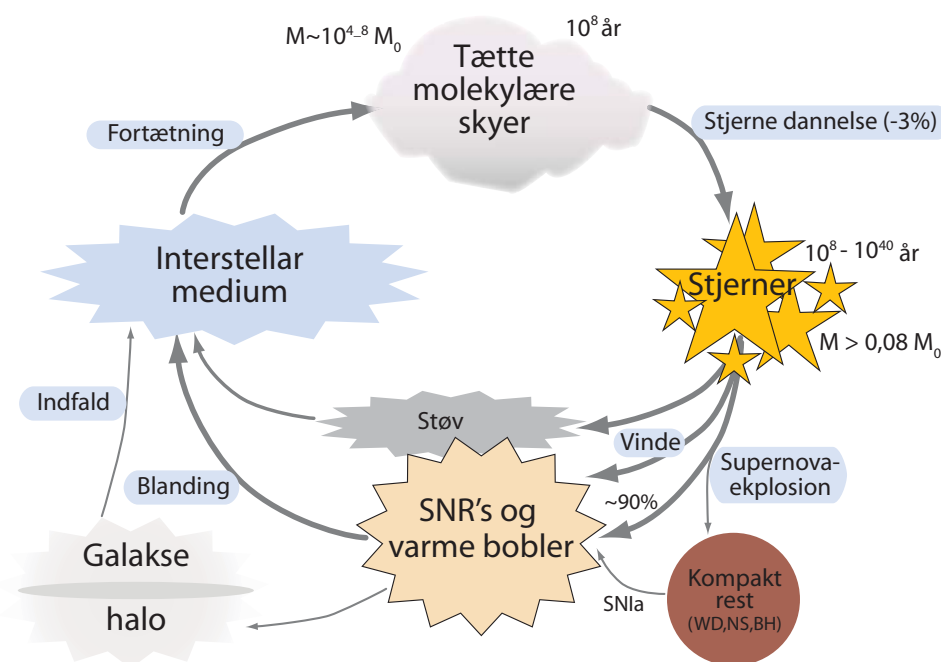
Atomer består som bekendt af en lille positivt ladet kerne – bestående af positivt ladede protoner og neutrale neutroner – som er omgivet af en negativt ladet sky af elektroner. Antallet af protoner modsvarer antallet af elektroner i elektronskyen, sådan at atomet totalt er neutralt ladet. Atomernes kemiske egenskaber (dvs. hvilket grundstof atomet tilhører) bestemmes af antallet af elektroner, og dermed af antallet af protoner i kernen. Atomer med samme antal protoner men forskelligt antal neutroner er iso-

toper af samme grundstof. Ikke alle kombinationer af antal protoner og neutroner i kernen leder til stabile kerner – langt de fleste kombinationer er ustabile og henfalder ved tre typer af radioaktivitet. Ved alfa-henfald udsendes en Helium-kerne (dvs. to protoner og to neutroner). Dermed opnår datterkernen en anden opbygning af protoner og neutroner, der er en mere stabil kombination. Denne type henfald sker typisk for tungere kerner.

Andre kerner kan henfalde ved, at en neutron i kernen omdannes

til en proton, en elektron og en anti-elektron-neutrino; eller en proton henfalder til en neutron, en positron (elektronens anti-partikel), og en neutrino. Disse to typer henfald kaldes beta-minus og beta-plus henfald, og de forekommer for kerner, der hhv. har for mange neutroner eller for mange protoner i kernen for at være stabile. På figuren vises som eksempel henfald af ^{14}C til ^{14}N , som er et meget anvendt henfald til datering af organisk materiale, og henfaldet af ^{10}C til ^{10}B .

Den kosmiske cyklus for stjernedannelse



Figuren viser den britiske astrofysiker Fred Hoyles kosmiske cyklus for stjernedannelse. Interstellært stof kondenserer under afkøling og trækker sig sammen. Dannelsen af stjerner begynder når den gravitationelle tiltrækning overvinder trykket fra den interstellare gas, hvilket er muligt pga. den lave temperatur i gassen. Derefter øges temperaturen i

stjernerens centrum igen indtil forbrændingen af hydrogen til helium begynder. Milliarder af år senere ender stjerner sit liv som en hvid dværg, en supernova, eller et sort hul, men på vej mod denne proces vil en betydelig brøkdel af stjernerens masse blive sendt tilbage i det interstellare medium. Dette stof kan så deltage i nye stjernedannelser.

problemer, da den italienske fysiker Enrico Fermi påpegede, at hvis man i stedet for den bløde kurve brugt af Gamow og Alpher brugte de faktisk målte neutronindfangnings-sandsynligheder, kunne man ikke danne grundstoffer tungere end Helium, fordi sandsynligheden for at indfange en neutron i Helium er forsvindende lille. Samtidig fik Fermi sin ven Martin Schwartzschild til at lede efter beviser for dannelse af tunge grundstoffer i stjerner. Ved at sammenligne grundstofindholdet i meget gamle stjerner og yngre stjerner kunne Schwartzschild vise, at indholdet af tunge grundstoffer er væsentligt højere i unge stjerner end i gamle stjerner. Resultatet blev præsenteret i en nu klassisk artikel inden for observationel astrofysik, som slog det sidste søm i teorien om Big Bang som arnestedet for grundstoffernes dannelse.

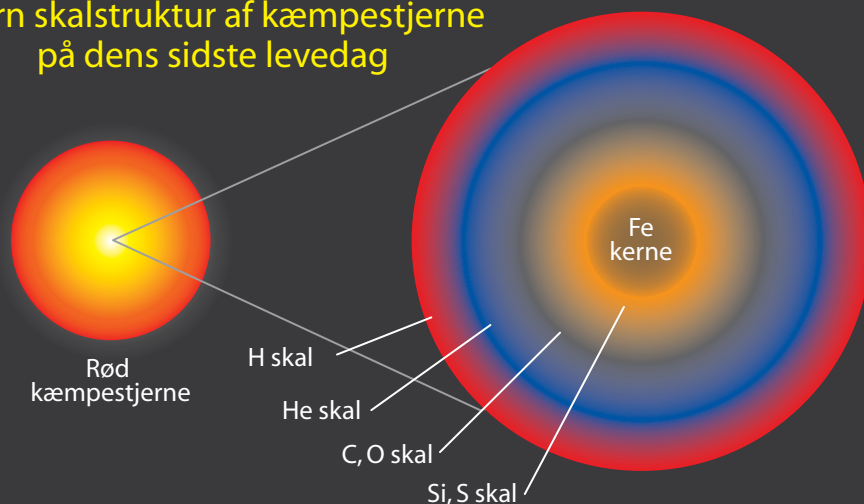
Brikkerne falder på plads

Nu har vi scenen klar til at beskrive den opklaring, der kom med "jubilæumsartiklen" fra 1957. Forfatterne til artiklen var et firkløver bestående af ægteparret Magaret og Geoffrey Burbidge, der var involveret i målinger af stjernespektrere med henblik på forståelsen af stjernes grundstofindhold, Willy Fowler, som var eksperimentel kernefysiker, som i starten af 1950'erne var i gang med at måle på kernereaktionerne i omdannelsen af brint til helium, og endelig Fred Hoyle, som var teoretisk astrofysiker og kosmolog med baggrund i teoretisk kernefysik.

I starten af 1950'erne kom disse fire personer ved en række delvise tilfældigheder til at starte et frugtbart samarbejde, der mandede ud i en beskrivelse af, hvordan grundstofferne kan dannes i stjernerne, og hvordan observationer af stjerner og laboratoriemålinger af kernereaktioner kunne hjælpe til med at præcisere dette billede.

I 1946 havde Fred Hoyle gjort et første forsøg på at beskrive de senere stadier af

Intern skalstruktur af kæmpesterne på dens sidste levedag



Figuren viser de indre dele af en såkaldt Rød Kæmpesterne på dens sidste levedag, inden den eksploderer i en supernova. Her ser man, hvorledes de forskellige forbrændingsstadier har efterladt stjernen med lag af forskellige grundstoffer.

I yderste skal finder vi brint (H), dernæst helium (He), så kommer en skal med kulstof og ilt (C og O) efterfulgt af en med silicium og svovl (Si og S) og til

sidst har vi den indre kerne af jern. For tunge stjerner kan massen af denne jernkerne være omkring halvdelen gange solens masse. Radius af denne kerne er omkring 3000 km og man får således en tæthed af stof over 26 kg/cm³. Til sammenligning er solens tæthed kun ca. 1,5 g/cm³, så der er tale om kerne-stof under ekstreme forhold! (Nb: Farver og størrelsesforhold er forregnede).

stjerner livscyklus, efter at brinten i de indre dele er omdannet til Helium. Herunder foreslog han en række processer, der endte med dannelsen af jern. I dette arbejde antog Hoyle eksistensen af store mængder kulstof i det indre af tungere stjerner, men som nævnt tidligere var det svært at se, hvorfra kulstoffet skulle komme. Under et besøg ved Fowlers gruppe i Californien i 1953, foreslog Hoyle, at dette afgørende problem kunne løses, hvis der i kulstofkernen fandtes en resonans – en eksiteret tilstand af kulstof-atomkernen – ved en ganske bestemt energi. Han overtalte Fowler til at efterprøve hypotesen i et eksperiment. Tre måneder senere kunne Fowler fastslå, at Hoyle havde haft ret, og at han dermed havde været i stand til ud fra astrofysiske argumenter at forudsige eksistensen af en kernetilstand i kulstof. Med dette afgørende skridt var vejen banet for en beskrivelse af dannelsen af grundstoffer op til jern i en række forbrændingsprocesser i forskellige typer af stjerner, som stort set er identisk med det billede, vi har i dag.

For at runde den historiske baggrund af bør det nævnes, at der i 1960'erne var en heftig debat om Big Bang teorien versus den såkaldte Steady State teori. Hoyle var modstander af Big Bang, men ironisk nok var han selv med til at argumentere for, at mængden af Helium i universet er for stor til, at den kan være dannet i stjerner, og Hoyle foreslog i 1964, at det meste Helium kunne være dannet vha. Gamows teori efter et Big Bang. Med opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling samme år blev denne sidste bestanddel endeligt bekræftet.

Tyngdekraften er nøglen

Forudsætningen for dannelsen af grundstoffer tungere end helium i stjerner, er stjernerens voldsomme tyngdekraft. Tyngdekraften trækker stjernen sammen og opvarmer derved stoffet, hvilket får stjernen til at lyse. Når temperaturen bli-



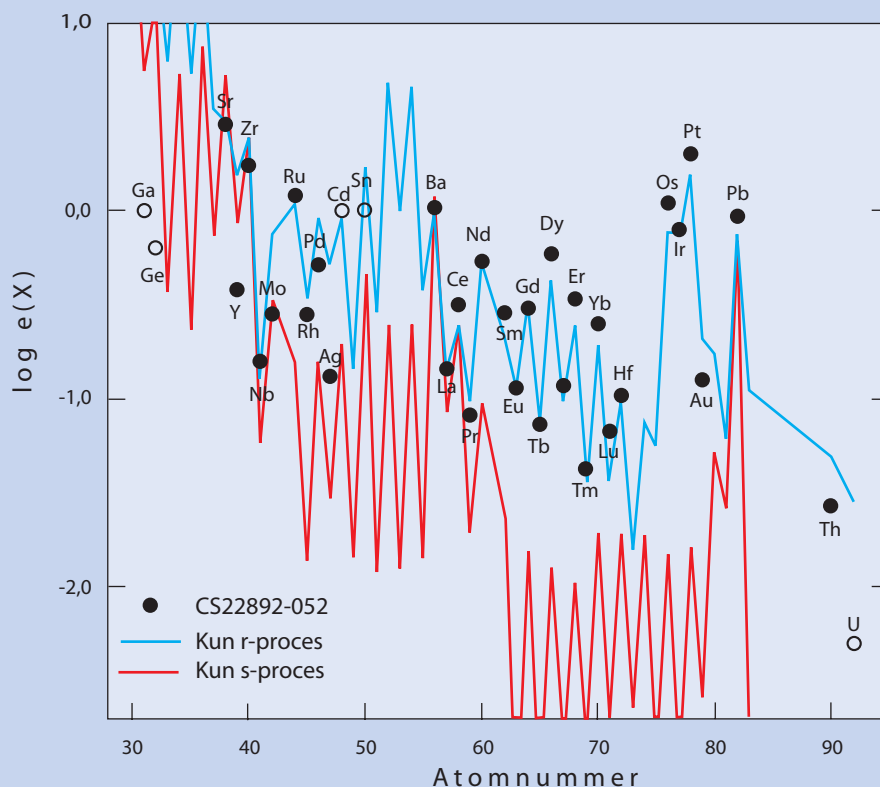
Billedet viser Orion tågen som er en gigantiske sky som består af hydrogen molekyler og carbonmonoxid. Det er i sådanne skyer at de stjerner vi observerer på himlen fødes. Foto: NASA, Robert Gendler

ver høj starter en proces, hvor atomkerner fusionerer – dvs. smelter sammen. Ved sådanne fusionsprocesser kan stjernen udvinde energi nok til at modstå tyngdekraften og derved bremses sammentrækningen. I de tidlige stadier forbrændes brint til helium. Dette tager flere milliarder år og er det længste forbrændingsstadium i stjerner. Dette forklarer også, hvorfor vi observerer langt flest stjerner i dette stadium, de såkaldte hovedserie-stjerner. Når brint er opbrugt i stjernens centrum vil der ske yderligere sammentrækning, hvorved temperaturen øges i de centrale dele af stjernen. Dette bevirker, at helium nu kan forbrændes til tungere grundstoffer som kulstof, ilt, neon, og en lang række andre grundstoffer op til jern, som har den største

Stjerner forbrændingsstadier

Brændsel	Hoved produkt	Sekundær produkt	T (10 ⁹ K)	Tid (år)	Vigtigste reaktion
H	He	¹⁴ N	0,02	10 ⁷	4 H ^{CNO} → ⁴ He
He	O, C	¹⁸ O, ²² Ne s-proces	0,2	10 ⁶	3 He ⁴ → ¹² C ¹² C(α,γ) ¹⁶ O
C	Ne, Mg	Na	0,8	10 ³	¹² C + ¹² C
Ne	O, Mg	Al, P	1,5	3	²⁰ Ne(γ,α) ¹⁶ O ²⁰ Ne(α,γ) ²⁴ Mg
O	Si, S	Cl, Ar, K, Ca	2,0	0,8	¹⁶ O + ¹⁶ O
Si	Fe	Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni	3,5	0,02	²⁸ Si(γ,α)...

Tabellen forbrændingsstadier for en stjerne med en masse som er 20 gange Solens. Pilene angiver hvorledes produkterne af et stadium er udgangspunkt for efterfølgende stadier. De sekundære produkter bidrager ikke betydeligt til energiproduktionen, men er vigtige for grundstoffordelingen vi observerer. Temperaturen og tidsskalaen for de forskellige stadier er ligelides angivet. Bemærk her at højere temperatur giver kortere forbrændingstid. Yderst til højre ses de dominerende kernereaktioner i stadiet.



Dannelse af tunge grundstoffer

Tungere grundstoffer end jern dannes ved, at atomkerner indfanger neutroner. Dette foregår ved to forskellige processer – en langsom (s-processen), hvor indfangningen af neutroner er langsommere end beta-henfald, og en hurtig (r-processen), hvor indfangningen sker hurtigere.

Når der ikke er flere neutroner at indfange vil kernerne henfalde tilbage mod stabilitet via gentagne beta-henfald. Da kerner dannet ved r-processen starter med et relativt større antal neutroner, vil disse kerner også nå stabilitet med et relativt større antal neutroner sammenlignet med kerner dannet ved s-processen. Dette giver os to toppe i grundstoffordelingen omkring de

såkaldt magiske kerner med kerneledninger omkring 50 og 80.

Figuren viser målinger af grundstoffordelingen af en stjerne i mælkevejens udkant som funktion af kerneledning (sorte cirkler) (usikkerhederne er udeladt her). Grundstoffernes navne er ligeledes angivet på figuren. Stjernen er næsten ligeså gammel som galaksen selv, og indeholder meget lidt jern, så stjernen har ikke selv gennemgået de sædvanlige forbrændingsstadier. Forekomsten af tunge grundstoffer må derfor skyldes forurening fra stjerneekspllosioner i nærheden. Den blå kurve viser fordelingen af grundstoffer observeret i solen som er dannet i r-processen, mens den

røde kurve viser grundstofferne dannet i s-processen.

Man kan se, at der for kerneledninger over ca. 55 er meget fin overensstemmelse mellem målingerne og den blå kurve (inden for usikkerhederne), mens der for lavere kerneledninger ses klare afvigelser (for eksempel for sølv, Ag, med kerneledning 49). Mange forskere ser dette som en indikation af, at der er to forskellige astrofysiske begivenheder, der producerer kerner gennem r-processen: en til at lave dem med kerneledninger over 55 og en til at skabe dem med lavere ladninger. Identifikation af sådanne processer er således et særdeles aktivt forskningsområde i disse år.

har en masse, der er mellem 8 og 20 gange større end Solen. Stjerner af denne størrelse bliver til supernovaer, som ud over at sprede tunge grundstoffer i universet, også efterlader sig en kold og kompakt neutronstjerne efter eksplosionen. For stjerner med masser over 20 gange solens vil tyngdekraften være så stærk, at de centrale dele vil kollapse til et Sort Hul, et objekt så tungt og kompakt, at selv ikke lyset kan undslippe dets tiltrækning.

Stjerner med masser på under 8 gange solens vil ikke kunne producere kerner helt op til jern, men vil som regel kun bidrage op til kulstof og ilt.

Hvordan dannes de tungeste grundstoffer?

Da der ikke kan vindes energi ved at danne grundstoffer tungere end jern i stjerner, er det ikke åbenlyst, hvorledes de tungeste grundstoffer er blevet skabt. Artiklen fra 1957 (samt en lignende af Al Cameron) udmærker sig netop ved for første gang at angribe dette problem ved systematisk at kombinere eksperimentel og teoretisk information til at identificere nogle kernefysiske processer, som er ansvarlige for de tungeste grundstoffers dannelse.

Det afgørende hint var, at man havde observeret toppe i grundstoffordelingen ved nogle ganske bestemte tunge kerner, de såkaldt magiske kerner. Ud fra disse blev det sandsynliggjort, at tunge grundstoffer fremstilles gennem indfangning af neutroner i to forskellige processer. Disse blev døbt henholdsvis s-processen (for slow) og r-processen (for rapid), hvor hastigheden refererer til, om neutronerne indfanges langsommere eller hurtigere end betahenfald. Hver især er de to processer ansvarlig for produktionen af omkring halvdelen af de tunge kerner i naturen. Hvor s-processen kun danner stabile kerner, kan r-processen danne nogle meget eksotiske kerner med mange overskydende neutroner (se boks).

I naturen finder vi kerner,

bindingsenergi af alle kerner. Stjernens centrale dele ender således med at være en massiv jernkerne, hvorfra der ikke længere kan udvindes energi ved fusion. Derfor vil tyngdekraften nu trække stjernen sammen

til stadig højere tæthed. Denne proces forsætter indtil tætheden bliver ligeså høj som i en enkelt atomkerne. Stoffet kan derefter ikke trykkes mere sammen og stjernen dør i en gigantisk Supernova-eksplosion. Herved

hvirvles de dannede grundstoffer ud i Universet, hvor de blandes med andet stof og f.eks. kan indgå i opbygningen af planeter og du og jeg.

Dette udviklingsscenarium sker dog kun for stjerner, der

Det periodiske system

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lantanider	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Actinider	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Kilde: Wikipedia.org

■ Alkalimetaller ■ Lantanider ■ Overgangsmetaller ■ Metalloider ■ Halogener
■ Alkaliske jordmetaller ■ Actinider ■ Andre-metaller ■ Ikke-metaller ■ Ædelgasser

Et grundstof er et kemisk stof, der udelukkende består af atomer med samme atomnummer (dvs. det samme antal protoner i kernen) - for eksempel jern, som består af atomer med præcis 26 protoner i kernen. Derudover klassificerer det periodiske system som bekendt atomerne efter deres kemiske egenskaber i forskellige hovedgrupper. Disse er bestemt af antallet af elektroner i de ydre atomare orbitaler.

som kan fremstilles af begge processer, og kerner, som kun kan fremstilles i den ene af de to. Dette er et særdeles vigtigt faktum, idet man derved kan sortere grundstofferne efter hvilken proces, de stammer fra.

Åstedet indkredses

Den langsomme proces – s-processen – forventes at foregå over lange perioder (tusinder af år), hvor kerner udsættes for en lav intensitet af neutroner. Sandsynligvis er der to separate komponenter i s-processen, som giver grundstoffer, der er henholdsvis lettere og tungere end strontium (med 38 protoner og de magiske 50 neutroner). Den tunge komponent formodes at forekomme i stjerner med masser under ca. 10 gange solens, mens den lette (der laver kerner fra jern op til strontium), forventes at forekomme i stjerner med masser over 10 gange solens masse.

Motsat s-processen, betragtes åstedet for r-processen stadig af mange forskere som helt eller delvist ukendt. Der er dog

en del forudsætninger, som gør listen over mulige steder ganske kort. For at indfangningen af neutroner kan foregå hurtigere end beta-henfald, kræves der en særdeles stor intensitet af neutroner. De hidtil bedste kandidater for en r-proces er derfor området lige over en nyfødt neutronstjerne i en Supernova eller i forbindelse med det meget voldsomme sammenstød mellem to neutronstjerner.

Da det sidste scenarium indebærer en begivenhed, der må forventes at være yderst sjælden, arbejder de fleste forskere mest med modeller, hvor r-processen er knyttet til en supernova. I disse år er der desuden mange nye observationer af grundstofforekomster, som kun kan fremstilles i r-processen, og der er således fornyet håb om, at man mere præcist kan kortlægge, hvor denne foregår.

En passende stjernefordeling

For at få grundstoffordelingen til at passe skal man også rede-

gøre for, at der fødes og dør et passende antal stjerner i hvert af de nævnte masseintervaller i galakserne. Det viser sig heldigvis, at observationer og teoretiske modeller for stjernedannelse i vid udtrækning giver os en fordeling af stjernemasser, som stemmer overens med den observerede grundstoffordeling, når produktionen af tunge kerne i hvert masseinterval tages i betragtning.

Afslutningsvis er det interessant, at man inden for de sidste 10 år har vist, at grundstofferne kun bidrager med ca. 5 % af universets samlede energitæthed – resten udgøres af ca. 25 % mørkt stof, som man ikke i dag ved, hvad er, og ca. 70 % mørk energi, hvis nærmere identitet også er ukendt.

Spørgsmålet er, om man kan forklare denne opdeling på samme måde, som man har kunnet forklare fordelingen af grundstofferne gennem dynamiske processer i det tidligere univers – det vil kun fremtiden vise. ■

Om forfatterne



Hans Fynbo er lektor ved Institut for Fysik og Astrofysik, Aarhus universitet. E-mail: fynbo@phys.au.dk Tlf.: 89423661



Nikolaj Zinner er ph.d., og Villum Kahn Rasumssen stipendiat Institut for Fysik og Astrofysik, Aarhus universitet, samt ved Department of Physics, Harvard University, USA. E-mail: zinner@phys.au.dk Tlf.: 89423662

Læs videre:

Simon Mitton, "Fred Hoyle - A life in Science", Aurum press Ltd., London, 2005.

John Gribbin, "Stardust - the cosmic recycling of stars, planets and people", penguin books, London, 2000.

Jubileumsartiklen: Burbridge, Burbridge, Fowler and Hoyle, Review of Modern Physics, vol. 29, page 547, 1957.

www.chemicool.com/