

Med neutrinoen som fødselshjælper – en ny mekanisme for grundstofdannelse

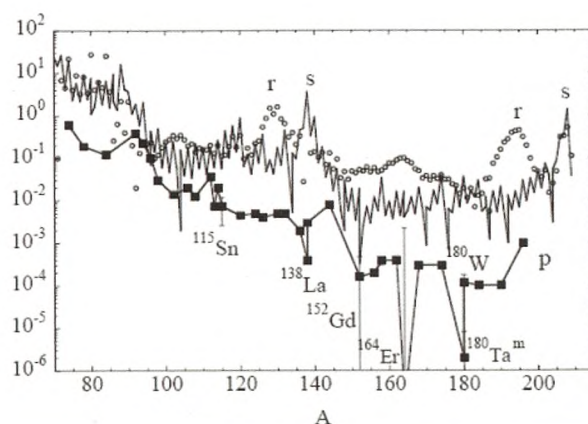
Af Nikolaj Thomas Zinner, Department of Physics, Harvard University og Det Naturvidenskabelige Fakultet, Århus Universitet.

Grundstoffernes dannelse i den såkaldte kernesyntese er et område af astrofysik som har fejret mange triumfer i sidste århundrede. Man har nu et klart billede af hvor og hvordan hovedparten af de naturlige isotoper skabes. Dog er der nogen meget lidt forekommende protonrige kerner som hidtil har voldt forskerne problemer. Her vil vi beskrive en ny proces, hvor neutrinoer i stjerner faktisk kan forklare forekomsten af nogle af de sjældneste grundstoffer i Naturen.

Grundstoffernes oprindelse

Når vi udforsker Naturens mange grundstoffer finder vi en overvældende mangfoldighed. Som vi alle lærer i skolen så kan grundstoffer organiseres efter deres kemiske egenskaber i Mendelevs periodiske system, hvori der optræder lidt over 100 forskellige elementer. Imidlertid findes der for stort set alle grundstoffer en række såkaldte isotoper. Disse er defineret som elementer med samme antal protoner og tilhørende elektroner, men med varierende antal neutroner. Altså grundstoffer med samme kemiske egenskaber men med forskelligt indhold i atomkernen. En voksende gren af kernefysikken kaldet nuklear astrofysik beskæftiger sig blandt andet med de naturlige spørgsmål der opstår når man betragter mængden af isotoper i naturen. Hvordan er disse blevet dannet, og hvorfor er de relative forekomster af forskellige isotoper som vi observerer?

Disse spørgsmål blev forskere for alvor interesseret i omkring starten af forrige århundrede, og specielt efter den moderne kvantemekaniks indtog i atom- og kernefysikken (efter 1925) fik man pludselig en lang række redskaber som kunne hjælpe med til at få dem besvaret. Observationer af lyset fra forskellige stjerner kunne sammenholdes med eksperimentel viden om atomernes udsendelse af lys og man kunne således påvise tilstedeværelsen af diverse atomer på stjernernes overflade. Sideløbende med dette forudsagde teoretikere forskellige kernefysiske processer som kunne smelte grundstoffer som hydrogen og helium sammen og frigive energi. Således kunne man pludselig forstå hvorledes Solen og andre stjerner fungerer. Eksperimentelle kernefysikere gik herefter i laboratoriet og målte på de forskellige processer således at man nu havde både kvalitativ og kvantitativ forståelse af stjerners udvikling. Fusionen af lette kerner til tungere eksemplarer giver jo netop et muligt svar på hvorledes grundstofferne faktisk dannes. Idet man på dette tidspunkt var sikker på at grundstoffernes fordeling ikke blot er en medfødt egenskab ved Universet, så var kernesyntese i stjerner lige det man havde brug for.



Figur 1. Fordelingen af tungere kerner i Solsystemet som funktion af kernerens massetal A (normaliseret til $\text{Si}=10^6$). På figuren ses bidrag fra kernesyntese ved langsom (s) og hurtig (r) neutronindfangning. Bemærk specielt toppene i de to kurver som svarer til bestemte kernetal hvor man eksperimentelt finder at kernerne er ekstra stabile. Den nederste kurve (p) viser fordelingen af de meget sjældne protonrige kerner.

Når man betragter bindingsenergien af kerner så finder man et pudsigt maksimum omkring jern. Dette betyder at stjerner ikke kan udvinde energi ved at fusionere kerner som er tungere end jern. Altså vil man umiddelbart ikke forvente at tungere grundstoffer kan produceres i stjernerne. Imidlertid viser det sig at man via indfangning af frie neutroner kan danne de tungere kerner. Når disse neutroner er indfanget vil de henfalde til protoner inden i kernerne og dermed skabe de tungere grundstoffer. Dette billede af kernesyntese med hydrogen og helium som oprindeligt materiale i Universet og stjerner som brændeovne for dannelsen af de resterende isotoper blev udviklet i løbet af 1940'erne og 1950'erne og blev opsummeret og systematiseret i banebrydende artikler af Burbidge, Burbidge, Fowler og Hoyle [1] og af Cameron [2]. Heri beskrives det hvorledes kernesyntesen i stjerner kan forklare de overordnede linier i grundstoffordelingen (se figur 1). 50 år senere er der ikke mange ændringer på det billede disse forskere opstillede af kernesyntesen,

dog er der stadig meget arbejde der skal gøres for at få de kvantitative detaljer på plads, og ligeledes med hensyn til at identificere præcis hvilke type stjerner der producerer de forskellige isotoper. En elementær introduktion til kernesyntese i stjerner med yderligere referencer kan findes i [3].

I de senere år har man fundet ud af, at kernesyntesen i specielt tungere stjerner foregår under påvirkningen af massive mængder af neutrinoer. Disse bliver fremstillet i forskellige fusionsprocesser samt under tunge stjernes kollaps frem mod en supernovaeksplosion. Det viser sig, at neutrinoer kan ændre fordelingen af grundstoffer i de øvre lag af sådanne stjerner når de reagerer med stoffet i disse områder. Ved at inkludere neutrinoer i simuleringer af kernesyntesen har man været i stand til at forklare nogle pudsige detaljer i fordelingen som ikke var forstået tidligere. For ganske nyligt har vi fundet ud af, at man via neutrinoer faktisk kan fremstille mange af de meget sjældne protonrige kerner som vi finder i naturen (se figur 1). Dette foregår i tunge stjerner som er på vej til at blive supernovaer. I resten af denne artikel vil vi introducere denne proces og forklare lidt om hvilke udsigter denne giver med henblik på at få et sammenhængende billede af kernesyntesen i stjerner.

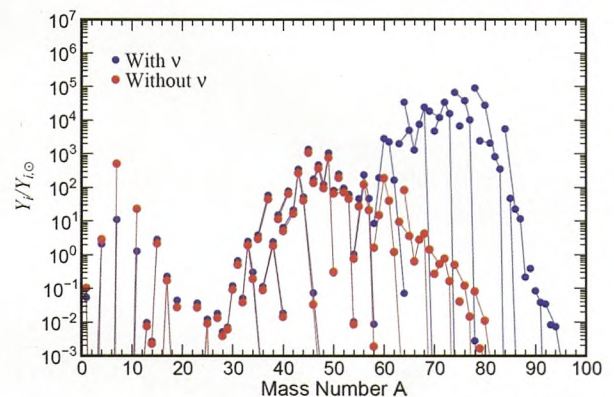
Eksotiske supernovaer

Når en tung stjerne løber tør for brændstof i form af kernemateriale der kan fusioneres, så vil den begynde at trække sig sammen under sin egen tyngdekraft. Stoffet i stjernens centrum vil således blive presset sammen til enorm tæthed. Imidlertid kan man ikke øge stoffets tæthed mere end til det punkt hvor det er omtrent ligeså tæt som i en atomkerne. Når denne grænse nås vil der udsendes en chokbølge fra stjernens centrum som kan udløse en supernovaeksplosion. Denne begivenhed efterlader en indre kerne af stjernestof med en radius på kun få kilometer og, afhængig af den oprindelige stjernes masse, vil enten en nyfødt neutronstjerne eller et sort hul være at finde i centrum. Vi er her specielt interesserede i det første tilfælde (se [4] for en introduktion til detaljerne omkring supernovaeksplosioner).

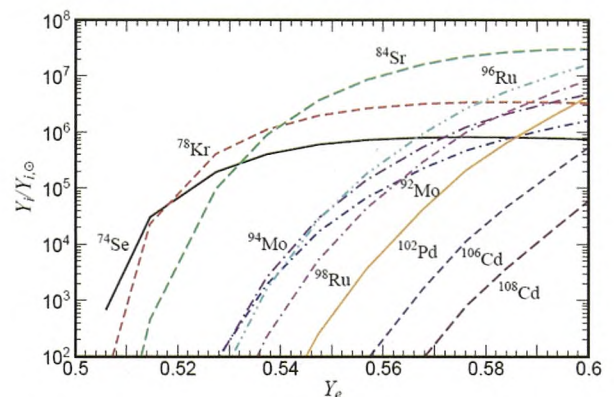
Neutronstjernens sammensætning skyldes at der under de enorme tætheder der hersker inden den dannes er mulighed for at omdanne proton og elektroner til neutroner og neutrinoer. De meget lette neutrinoer kan slippe væk med store mængder energi og det er således også en god måde for stjernen at køle af på. Man opnår nu en sammensætning af stof som er rig på neutroner. Imidlertid viser det sig at et lille område lige udenfor det såkaldte 'mass cut' mod forventning har overtal af protoner (mass cut er defineret som den radius hvor stoffet indenfor vil falde indad mens stoffet udenfor vil blive blæst bort af eksplosionen). Dette faktum skyldes en byge af meget energetiske neutrinoer som rammer området ved mass cut umiddelbart efter chokbølgen og eksplosionen starter. Flere uafhængige grupper har ved simulering af disse lag i stjernen fundet, at man netop her har betingelser som giver neutrinoerne mulighed for at skabe protonrigt materiale [5, 6].

Neutrinoens rolle

For at udforske mulige effekter på kernesyntesen af sådanne protonrige lag har man gennemført beregninger af isotopfordelingen for forskellige stjernemasser og forskellige eksplosionsenergier. I figur 2 viser vi resultatet af sådanne beregninger både med og uden neutrinoernes effekt. Her ses det at der er en slående effekt af neutrinoer for syntesen af kerner med massetal over $A \sim 64$! Dette skyldes at en strøm af antineutrinoer hjælper med at overvinde en tærskel for indfangning af protoner (husk at omgivelserne er protonrige!) omkring ${}^{64}\text{Ge}$ og derved hjælper kernesyntesen videre op mod tungere protonrige kerner [7]. Dette fortsætter op til $A \sim 100$ hvor kernerne begynder at henfalde meget hurtigt ved udsendelse af alfapartikler, hvilket stopper syntesen. Protonrige kerner med endnu højere massetal findes fremstilles ved en anden mekanisme [1].



Figur 2. Grundstoffordeling fra protonrige lag uden (rød) og med (blå) neutrinoer inkluderet i beregningen. Fordelingen er normaliseret til forekomsten i Solen. Bemærk at det protonrige lag er meget tyndt og at man derfor godt kan have forekomster langt over Solens og stadig få et samlet resultat som er i overensstemmelse med observationer.

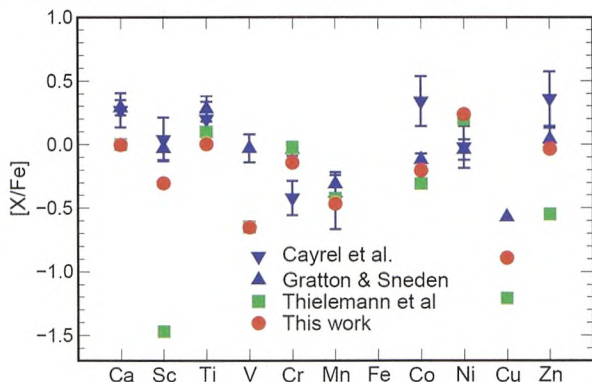


Figur 3. Forekomster af udvalgte isotoper som funktion af forholdet mellem protoner og neutroner (Y_e) i det materiale de dannes fra. $Y_e = 1/2$ betyder lige dele protoner og neutroner, mens $Y_e = 0,6$ indikerer at 6 ud af 10 kernepartikler er protoner.

Den ovennævnte proces for kernesyntese af protonrige kerner er blevet døbt νp -processen, ν for neutrino og p fordi der kræves overskud af protoner i omgivelserne. Det viser sig at denne er meget følsom overfor det præcise forhold mellem antal protoner og

antal neutroner i den pågældende stjerne. På figur 3 ser vi hvorledes forekomsten af forskellige kerner afhænger af netop dette forhold. Bemærk her specielt $^{92,94}\text{Mo}$ og $^{96,98}\text{Ru}$ som kan fremstilles i udpræget protonrige lag. Syntesen af disse kerner har hidtil været en gåde for forskerne. Denne nye mekanisme giver således grund til at tro at også syntesen af disse isotoper er indenfor rækkevidde.

Via nye teknikker for observationer og banebrydende forbedringer af vor viden om atomare linier har man gennem de senere år kunnet observere et stort antal såkaldte metal-fattige stjerner. Som navnet antyder, er der tale om stjerner som kun har ganske få metaller (såsom jern) på deres overflade. Dette tolker man som et tegn på at de ikke har produceret tungere kerner i deres indre men at forekomsterne man observerer i dem er et resultat af at stof fra astrofysiske begivenheder i omgivelserne er faldet ind på stjernernes overflade. Mange af disse stjerner er beliggende i udkanten af galaksen og er desuden meget gamle. Man forventer således ikke at de har deltaget i den blanding af stof der sker i en galakse, når stjerner udvikler sig, dør og eksploderer, og derefter bliver blandet med interstellart støv som føder nye stjerner. De metal-fattige stjerner giver os således en unik mulighed for at se påvirkningen af enkelte supernovaeksplosioner, og dermed få viden om hvilke grundstoffer der dannes i sådan en begivenhed.



Figur 4. Sammenligning af observationer af metal-fattige stjerner (Cayrel et al. og Gratton & Sneden) med simuleringer af kernesyntese uden (Thielemann et al.) og med (This work) effekten af neutrinoer for udvalgte grundstoffer. $[X/Fe]$ er forholdet mellem forekomsten af kerne X og jern, normaliseret til det samme forhold observeret i Solen.

I figur 4 viser vi en sammenligning af resultatet af kernesyntese ved νp -processen og observationer fra sådanne stjerner. Her ses det tydeligt, at inddragelsen af neutrinoer giver en meget bedre beskrivelse af observationerne. Bemærk specielt hvorledes forekomsten af ^{45}Sc , som før lå langt under data, nu giver et fornuftigt resultat. Dette er specielt interessant, idet ^{45}Sc er den eneste stabile isotop af Scandium og dens syntese har hidtil været en gåde for forskerne.

Fremtidige udsigter

Med νp -processen har vi nu en mekanisme som kan fremstille mange protonrige kerner som hidtil har været svære at forklare i realistiske simuleringer. Det viser sig også at de protonrige lag der kræves for at denne

proces kan operere forventes at forekomme i tunge stjerner for en række forskellige masser. Det vil sige at det beskrevne scenarium må antages at være en del af de fleste tunge kommende supernovastjerner. Dette giver en konsistent måde at få dannet de sjældne protonrige kerner på, og foreløbige simuleringer indikerer ligeledes at de fremstilles i relative mængder der svarer til observationerne. Det næste skridt man ønsker at udforske er hvorvidt man kan få en konsistent proces der både kan fremstille de protonrige og de neutronrige kerner vi ser i naturen. Neutronrige kerner forventes også at være skabt i tunge stjerners eksplosioner, blot i lag der ligger over dem vi har snakket om for νp -processen. Således ville det være særdeles interessant at gennemføre en simulation af kernesyntesen, hvori både de protonrige lag og de overliggende neutronrige lag beskrives. I bedste fald kunne man så få et helstøbt billede af kerneproduktionen ved disse eksplosioner. Dette kræver dog en forbedring af den nuværende metode, noget man i øjeblikket arbejder hårdt frem imod.

Til slut skal det understreges hvor vigtigt det er at vi i disse år ser en så gennemgribende forbedring og udvidelse af astronomiske observationer. Det var observationer der drev de afgørende idéer omkring kernesyntesen i forrige århundrede, og data fra de metal-fattige stjerner giver os nu ny indsigt i processerne. Dette er således afgørende for vores udsigt til en skønne dag at fuldende forståelsen af hvorledes grundstofferne fremstilles.

Litteratur

- [1] E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler og F. Hoyle, *Reviews of Modern Physics* **29** 547 (1957).
- [2] A. G. W. Cameron, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **96** 201 (1957).
- [3] H. Fynbo og N.T. Zinner, *Grundstoffernes Historie*, *Aktuel Naturvidenskab Årgang 2007 nummer 6*.
- [4] H.-Th. Janka og S.E. Woosley, *Nature Physics* **1** 147 (2005).
- [5] J. Pruet *et al.*, *Astrophysical Journal* **644** (2006) 1028.
- [6] C. Fröhlich *et al.*, *Astrophysical Journal* **637** 415 (2006).
- [7] C. Fröhlich *et al.*, *Physical Review Letters* **96** 142502 (2006). Se også *Physical Review Focus* **17** story 14.



Nikolaj Thomas Zinner har i sit nyligt afsluttede ph.d. arbejde ved Institut for Fysik og Astronomi, Århus Universitet, beskæftiget sig med nuklear astrofysik, specielt neutrinoens rolle i syntesen af forskellige proton- og neutronrige kerner. Han arbejder som postdoc ved Department of Physics, Harvard University i USA, hvor han kigger på teoretiske aspekter af meget kolde atomare gasser.