

Universets alder og de første tunge grundstoffer

Birgitta Nordström, NBI/AFG, Københavns Universitet, og Lunds Observatorium, Sverige, og Johannes Andersen, NBI/AFG, Københavns Universitet.

I millioner af år efter Big Bang bestod Universet kun af brint og helium plus en ubetydelighed lithium. Alle de andre grundstoffer er derefter opbygget ved kernereaktioner inden i stjerner (lithiumisotopen ${}^6\text{Li}$, beryllium og bor er undtagelser, som bekræfter reglen). Oprindelsen til de tungere grundstoffer – startende med det kulstof og ilt, vi selv består af – er således uløseligt forbundet med dannelsen af de første stjerner og galakser i Universet. Men hvordan så disse første stjerner ud? Hvilke kerneprocesser var de vigtigste dengang? Og kan de hjælpe os til at tidsfæste selve Big Bang?

Trods stædig søgen er der ikke fundet stjerner af det originale materiale fra Big Bang. Men i vor egen Mælkevej er der identificeret stjerner, som ser ud til at tilhøre generationen umiddelbart efter. I deres indhold af tunge grundstoffer er resultatet af den allerførste kernesyntese arkiveret. Som vi skal se, kan de tilmed gemme et radioaktivt ur, som blev startet i Universets tidligste barndom og har tikket uforstyrret siden da.

Grundstofsyntese i stjerner

Som bekendt “finansierer” stjernerne deres udstråling ved at forbrænde brint til helium og endnu tungere grundstoffer ved kerneprocesser i deres indre (se f.eks. [1]). En stjerne som Solen har holdt sig i gang ved at forbrænde brint til helium siden sin fødsel for 4.6 mia år siden og kan blive ved mindst lige så længe endnu. Stjerner med væsentlig større masser har langt højere centralt tryk og temperatur. De kan derfor forbrænde helium videre til kulstof og ilt og endnu tungere grundstoffer under stadig højere temperaturer i dybere og dybere skaller i stjernen. Når stjernen til sidst eksploderer som en supernova, spredes de nydannede kerner ud i rummet og indgår i næste generation stjerner (se billedet på Kvants forside). Disse får derved en stadig voksende koncentration af tungere grundstoffer – af astronomer lidt sløset under ét kaldet “metaller”, selv om mange, f.eks. kulstof, ilt og silicium, strengt taget ikke er det.

Disse processer frigør kun energi, hvis de ny kerner har mindre masse, dvs. større bindingsenergi end “brændslet”. Når grundstofopbygningen når til jern (atomvægt 56), er bindingsenergien maksimal, og der kræves *tilførsel* af energi for at opbygge endnu tungere grundstoffer. Opbygningen stopper derfor ved jern. Men hvordan produceres så grundstofferne mellem jern og uran, det tungeste naturligt forekommende grundstof (atomvægt 238) – inklusive så værdifulde sager som sølv, guld og platin?

Ved en supernova-eksplosion opstår et overskud af neutroner i stjernens centrale dele, og de nydannede grundstoffer udsættes for en heftig neutronbestråling. Kernernes positive ladning frastøder ikke neutronerne, så kernerne “pumpes” hurtigt op til en høj atomvægt. Men kerner med stort neutronoverskud er ustabile; en neutron henfalder snart til en proton og en elektron (β -henfald), og atomet rykker op på næste trin i det periodiske system. Balancen mellem neutronindfangning og β -henfald bestemmer den mængde af hvert grundstof og isotop, som når at dannes, inden neutronkilden dør ud. Ved denne såkaldte r-proces (*r* for “rapid”) fyldes det periodiske system op på få sekunder, fra jern til og med uran.

Tunge grundstoffer kan også opbygges mere stilfærdigt i højt udviklede stjerner på blot et par solmasser. Ved forbrænding af bla. kulstof yderst i centralområdet opstår et mindre overskud af neutroner, som indfanges af jern- og andre tunge kerner. Dette foregår så langsomt, at kernen når at opleve et β -henfald og tage et skridt opad i det periodiske system inden næste neutrons ankomst. Når stjernen blæser de ydre lag af på vej mod sit slutstadium som hvid dværgstjerne, går disse nye grundstoffer videre i kredsløbet. Denne såkaldte s-proces (*s* for “slow”) behøver imidlertid “metal”-kerner fra en tidligere generation stjerner som “kim”, og den kan ikke opbygge de allertungeste grundstoffer.

Stoffet i vor Sol har bidrag fra alle disse processer i 5–10 mia års utalte generationer stjerner i Mælkevejen, før Solen blev dannet. De tunge grundstoffer udgør knap 2% heraf efter vægt, og isotopforholdene er bestemt i stor detalje ved analyse af meteoritter. r- og s-processerne producerer de forskellige grundstoffer og deres isotoper i helt forskellige blandingsforhold; ved studium af de enkelte isotoper kan man derfor skønne over de to processers bidrag til hvert enkelt af de tungere grundstoffer. Nogle, som f.eks. bly, skyldes næsten udelukkende s-processen; andre, som europium, thorium og uran, er rene r-proces produkter.

De første stjerner

Længe mente man, at de kugleformede stjernehobe indeholdt Mælkevejens ældste stjerner. De har også meget lavt indhold af tungere grundstoffer, som man ville vente fra ovenstående beskrivelse, men dog mindst ca. 0.01% (0.5% af Solens indhold). Stjerner med præcis 0% tunge grundstoffer er aldrig fundet, men der kendes nogle hundrede med metalindhold i intervallet 0.01%–0.0002%, altså 200–10.000 gange mindre end i Solen. Hvis billedet af stoffets gradvise berigelse er no-

genlunde korrekt, skulle disse stjerner være endnu ældre end kuglehobene.

Selv om vi ikke finder stjerner af første generation, ser vi måske derfor her nogle af deres umiddelbare efterkommere. Denne opfattelse støttes af foreløbige analyser af deres indhold af tunge grundstoffer, som viser sig at være rene r-proces produkter. De synes altså dannet i meget tunge stjerner, som ikke behøvede præfabrikerede "kim" til neutronindfangningen. Dette igen stemmer med nye beregninger af stjernedannelsen i gasskyer lige efter Big Bang, som forudsiger mindstemasser på hundredvis af solmasser (se f.eks. [2]).

Virkelige anden-generations stjerner synes at udvise endnu større fantasi end teoretikerne mht. varieret grundstofproduktion. Men præcisionsanalyse af disse svage stjerner er for krævende for traditionelle 4m teleskoper; men ESOs 8m *Very Large Telescope* og UVES-spektrografens kombination af høj opløsning og høj effektivitet er som skabt hertil. Vi samlede derfor de fleste europæiske grupper på feltet i ét konsortium og redegjorde for, at VLT på netop dette felt kunne skabe et regulært gennembrud. Og fem års sejt, forberedende observationsarbejde havde resulteret i en liste med de allerbedste "lækkerbiskener". Strategien virkede: Vi fik tildelt hele 40 observationsnætter på VLT i 2000-2001.

CS 31082-001: En regulær skatkiste

På en af de første observationsnætter observerede vi en relativt klar stjerne med det "poetiske" navn CS 31082-001. Som forventet var spektrallinierne af jern, mangan mv. meget svage, afspejlende en hyppighed af disse grundstoffer på ca. 1/800 af Solens. Stjernen må altså være dannet meget tidligt, nok højst en mia år efter Big Bang. Men spektret vrimlede desuden med linier af sjældne tungmetaller som europium, holmium, osmium og iridium – typiske r-proces produkter. Mere forbløffende var hele 14 linier af thorium, hvoraf man typisk blot ser en enkelt: Relativt til jern indeholder stjernen 70 gange mere thorium end Solen. Febrilsk ledte vi ved bølglængden 386 nm, hvor den stærkeste uran-linie findes: Var den synlig?? Jo, minsandten (figur 1)! Et "Letter" til *Nature* [3] gik afsted med ekspresfart.

Hvorfor var det så sensationelt at finde uran i en så gammel stjerne? Nogle få gamle stjerner med stor overhyppighed af r-proces produkter var allerede kendt. Én har tilmed en linie med den rette bølglængde; men desværre skyldes den CN, idet stjernen også er rig på kulstof. Sådanne stjerner viser direkte, at første generations supernovaer i visse tilfælde kunne producere helt unormale grundstoffblandinger; hvordan dette sker, er et ubesvaret spørgsmål. Men den helt store gevinst ligger i muligheden for en direkte, præcis bestemmelse af supernovaens alder – og dermed både Mælkevejens og Universets.

Radioaktive aldersbestemmelser

Måling af en radioaktiv isotops henfald i forhold til en stabil isotop er en standardteknik i arkæologi og geologi. Kender man radioisotopens halveringstid og det oprindelige forhold, kan tiden fra kernerne dannelse bestemmes. Den mest kendte version er kulstof-14 metoden, som fornylig er beskrevet detaljeret her i bladet [4]. Men ^{14}C selv (halveringstid 5730 år) kan ikke bruges her; blot siden Solens dannelse er der gået ca. 800.000 halveringstider. Selve tallet siger måske ikke så meget; men om så hele Universet bestod af lutter ^{14}C ved Solens dannelse, ville der ikke være et eneste ^{14}C atom tilbage i dag!

De langlivede isotoper af thorium og uran er derimod velegnede. ^{232}Th (halveringstid 14.1 mia år) har været anvendt med europium (et andet r-proces produkt) som stabil reference. Det har hidtil givet plausible resultater under den antagelse, at alle stjerner dannes med samme Th/Eu forhold som Solen. Men det såkaldte Th/Eu "kronometer" har to svage punkter: Præcision og nøjagtighed – to principielt forskellige begreber.

Tiden T siden dannelsen af to grundstoffer R og S , hvis forhold aftager en faktor 10 i tiden $t_{1/10} = t_{1/2} \log 10$, hvor $t_{1/2}$ er den sædvanlige halveringstid, kan udtrykkes:

$$T = t_{1/10} \left(\log \left(\frac{R}{S} \right)_0 - \log \left(\frac{R}{S} \right)_{\text{nu}} \right), \quad (1)$$

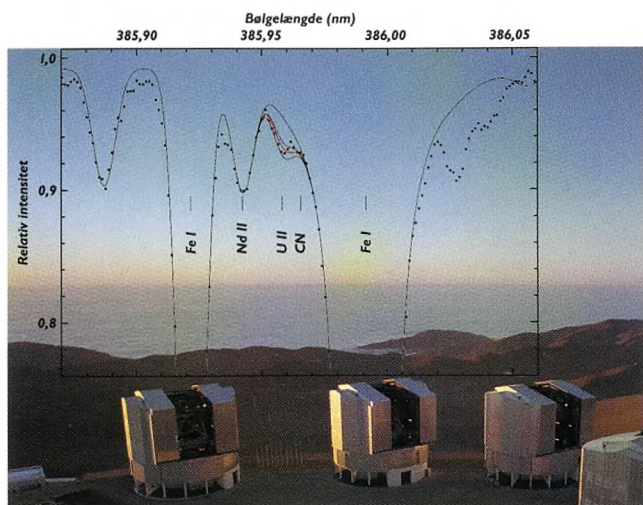
hvor $(R/S)_0$ er det oprindelige og $(R/S)_{\text{nu}}$ det nu målte forhold mellem de to isotoper.

Som man ser, bliver usikkerheden på T også $t_{1/10}$ gange usikkerheden i forholdene på højre side. Alle realistiske fejlkilder medregnet er denne ikke under 25% eller 0.1 i logaritmen (0.1 dex). For $R/S = \text{Th}/\text{Eu}$ er $t_{1/10} = 46.7$ mia år. Th/Eu kronometret har derfor en indbygget " aflæsningsfejl " på næsten 5 mia år – knap så anvendeligt. Men endnu værre: I CS 31082-001 er Th/Eu forholdet større end den hidtil accepterede oprindelige værdi. "Kronometret" viser således efter 12–15 mia år formelt en negativ alder, en noget pinlig situation for et kronometer. Th og Eu produceres øjensynlig ikke altid i samme forhold...

Uran har her to vigtige fordele. For det første er $t_{1/10}$ for ^{238}U "kun" 14.8 mia år ($t_{1/2} = 4.5$ mia år), så observationsfejl giver nu kun en usikkerhed på 1.5 mia år i alderen. For det andet kan vi benytte Th som den "stabile" reference, idet $t_{1/10}$ for forholdet $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ er 21.2 mia år, svarende til en usikkerhed i alder på ca. 2 mia år.

U/Th giver altså et mindre tab på gyngerne; men til gengæld vinder vi stort på karrusellerne. Både atom- og kernestruktur for U og Th ligner nemlig hinanden så meget, at fejl i de spektroskopiske bestemmelser udlignes i høj grad i forholdet U/Th. Men en endnu vigtigere gevinst er, at det kernefysiske beregnede produktionsforhold for nabokerner som ^{238}U og ^{232}Th er

langt mere robust end for $^{232}\text{Th}/^{151,153}\text{Eu}$. Sammenlagt forfines både aktuel aflæsning og oprindelig “urstand”, da U/Th kronometret i CS 31082-001 startede i en fjern fortid.



Figur 1. Det observerede (prikker) og beregnede spektrum (linier) for CS 31082-001. Den øverste linie er beregnet helt uden uran, den røde linie for den bedste værdi. VLT ses som baggrund (Ill: ESO/Tycho Brahe Planetarium/Anne Marie Brammer).

Tilbage til laboratoriet – og rummet

For at omsætte målte liniestyrker til nøjagtige grundstofhyppigheder skal de atomare parametre (levetider, oscillatorstyrker, hyperfinstruktur mm.) være nøjagtigt kendt: Fejl i oscillatorstyrken slår direkte igennem som fejl i alderen. Vore kolleger ved Afdelingen for Atom-spektroskopi ved Lunds Universitet reagerede straks og har allerede målt nye, meget nøjagtige værdier for både U og Th på Lunds Laser Center ([5]).

I samarbejde med kernefysikere i Bruxelles og Mainz søger vi også at mindske usikkerheden i det oprindelige produktionsforhold. En vigtig test er her hyppighederne af andre tunge grundstoffer i CS 31082-001, især bly og vismut, som produceres ved henfald af U og Th, men ellers (næsten) ikke i r-processen. Linier af disse grundstoffer ses desværre ikke i vores fremragende VLT-spektre – de stærkeste linier i det ultraviolette når ikke gennem atmosfæren. Men heldigvis har vi netop fået bevilget tid på *Hubble Space Telescope* til at måle disse linier fra rummet, så vi kan forbedre kronometret også på dette punkt.

P.t. viser kronometret 13.4 ± 2 mia år. Det er ene-

stående ved, at det gik i gang i det øjeblik, en supernova producerede uran- og thorium-atomer en lille mia år efter Big Bang. Siden har det gået støt, styret af det radioaktive henfald. Hvornår CS 31082-001 selv blev dannet undervejs, om vi forstår sådanne stjerners udvikling korrekt, om Mælkevejen allerede var dannet, og hvordan den siden har udviklet sig, er altså uden betydning. Jagten på flere “ure” af samme slags er derfor gået ind for alvor; det bliver spændende at se, hvad de viser!

Referencer:

- [1] B. Pagel (1997) “Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies”, Cambridge Univ. Press.
- [2] R. B. Larson og V. Bromm (2001) “The First Stars in the Universe”, *Sci. Am.*, december, side 52.
- [3] R. Cayrel m.fl. (2000) “Measurement of stellar age from uranium decay”, *Nature*, bind 409, side 691.
- [4] J. Heinemeier og N. Rud (2001) “Hvad isotoperne fortæller om de forsvundne vikinger på Grønland”, *Kvant*, bind 12, nr. 1, side 3.
- [5] H. Nilsson m.fl. (2002) “Experimental oscillator strengths of U II of cosmological interest”, *Astron. & Astrophys.*, i trykken.



Birgitta Nordström deler sin tid mellem NBIAFG i København og Lunds Observatorium i Sverige. Hendes forskningsområde er Mælkevejens udvikling.



Johannes Andersen arbejder på NBIAFG i København med Mælkevejens udvikling og astronomisk instrumentering som hovedemner.