

Vad gjorde stjärnorna före Vintergatan

Hur såg de allra äldsta stjärnorna egentligen ut? De fanns troligen redan innan Vintergatan hade formats. Och de måste ha innehållit mycket lite av tyngre grundämnen, men hur lite? Här är en skildring av jakten på dessa svår-fångade relikter från universums tidiga historia.

av Bengt Gustafsson

Mike Bessell hade sänt ett fax. Nu låg det framför oss. Norbert drog tungt efter andan. Jag kunde knappast tro mina ögon. Där man vanligtvis såg djupa sänkningar i kurvan, som visade mörka linjer i spektrum, syntes bara obetydliga gropar. På många ställen gick kurvan rakt, utan tillstymmelse till spektrallinjer. Vad var detta? En gång läste jag om upptäckten av kvastefeningen, urfisken som alla trodde var utdöd. Nu stod vi och såg på något liknande.

En tillbakablick om grundämnenas uppkomst

På vilket sätt grundämnena uppkommit ”synes nu och för alltid ligga utanför det omedelbara området för vår synkrets”, skrev kemiprofessorn i Lund, Christian Wilhelm Blomstrand 1875. Och det verkade svårt att någonsin få klarhet. Naturvetarna tog grundämnena, liksom hela universum, som givna. Kanske hade de alltid existerat. Det var först på 1950-talet som Fred Hoyle och William Fowler och deras kollegor visade att grundämnena inte funnits från början, utan hade uppkommit genom kärnreaktioner i stjärnorna. Bland deras bästa argument fanns två observationer:

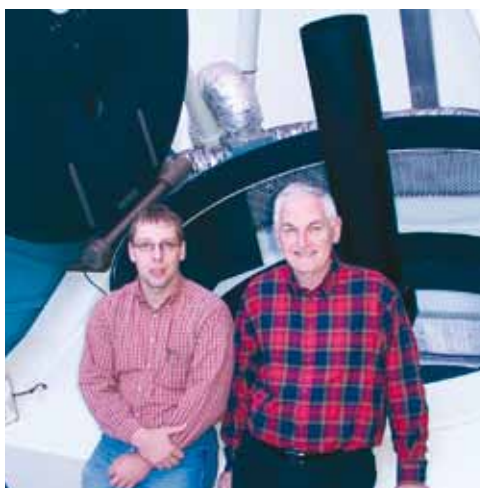
P. W. Merrill fann det radioaktiva grundämnet teknetium i spektra från röda jättestjärnor. Teknetium sönderfaller på en miljon år. Ämnet finns därför inte naturligt på jorden, men framställs t.ex. vid kärnreaktorer – därav dess namn. Jättestjärnorna är säkert äldre än några miljoner år och måste alltså själva ha byggt upp sitt teknetium.

En lika viktig upptäckt gjorde Joseph Chamberlain och Lawrence Aller med 2,5-meterteleskopet på Mt Wilson. De undersökte spektra hos några subdvärgar – stjärnor som liknar solen men har betydligt svagare absorptionslinjer från tunga ämnen. De är stjärnor som rör sig med stora hastigheter, de kommer farande från Vintergatans utsträckta halo. De tillhör alltså vad man kallar population II, inte population I, som solen tillhör liksom andra stjärnor i Vintergatsskivan. Vanligen är spektra av stjärnor med samma temperatur och ljusstyrka förvånansvärt lika, så lika att man brukade anta att solens grundämnessammansättning var typisk för alla stjärnor. Skulle subdvärgarna avvika? Chamberlain och Aller fann att subdvärgarnas metallhalter var mindre än en tiondel av solens.

Därmed var saken klar: det fanns stjärnor med mycket lägre halter av tunga ämnen, de som astronomerna slarvigt kallar ”metaller”. Alltså måste Vintergatans gas, som stjärnorna bildats ur, en gång ha varit mycket metallfattigare än idag. Universum producerade de tunga ämnena allteftersom tiden gick. Den enda miljö där grundämnesuppbyggnad kunde pågå var i stjärnornas inre.

Nu återstod ett stort arbete: att klarlägga grundämnenas kretslopp – från gas till stjärnor till gas till stjärnor – mer i detalj. När, hur och i vilka stjärnor bildades

de olika ämnena? Man visade att olika slag av supernovor bidrog på olika sätt. Syret, magnesium, och kisel bildas t.ex. i tunga stjärnor som till slut kollapsar i ett



Upptäckarna av HE0107-5240, Norbert Christlieb och Mike Bessell, framför 2,3-meterteleskopet vid Siding Spring-observatoriet i Australien.

norna



FOTO: ESO

Paranalobservatoriet med dess fyra jätteteleskop. Teleskopet Kueyen, darspektrometern UVES finns monterad, är det i mitten av den bakre raden.

supernovautbrott. Järnet bildas till stor del i dubbelstjärnor med en vit dvärgstjärna som överlastas av materia från sin kompanjon, så att den kollapsar och exploderar. Kolet och kvävet kommer antingen från vindar från röda jättar eller från mycket tunga stjärnor som blåser ut kol- och kväverika moln långt innan de når supernovastadiet i sin utveckling. Några lätta atomkärnor bildas i gasen mellan stjärnorna när tyngre atomkärnor slås i stycken av kosmiska partiklar med hög energi. Därtill bidrog kärnprocesser under universums första tre minuter, själva Big Bang, med litium och det mesta av heliet. Men alla ämnen tyngre än bor bildades i stjärnor. Genom stjärnvindarna kastades de ut mellan stjärnorna, nya stora gasmoln byggdes upp där nya stjärnor bildades, anrikade med tunga ämnen från den första stjärngenerationen. De nya stjärnorna kastade i sin tur ut sina bidrag av tunga ämnen i det stora kosmiska kretsloppet. Efter flera varv har gasen nu anrikats till cirka en viktprocent av ämnen tyngre än helium.

På spaning efter population III

Om Vintergatans tunga ämnen byggts upp i stjärnor skulle man kunna hitta stjärnor med extremt låga halter av metaller. Den första stjärngenerationen i vår galax borde ju bara bestå av rent väte och helium, och något litium, från Big Bangs sekunder. De tyngre stjärnorna i den generationen har visserligen kollapsat och bidragit med sina tunga ämnen, men en del stjärnor lättare

än solen borde finnas kvar, rödbleka små solar, helt utan fingeravtryck från järn och andra tunga ämnen i sina spektra. Stjärnor med så liten massa förekommer i solomgivningen. Men alla bär tydliga märken av tunga grundämnen. ”Vart har de metallfria lätta stjärnorna tagit vägen”, frågade sig Howard Bond vid Louisianauniversitetet och kallade dessa ”population III”-stjärnor. Han sökte igenom fotoplåtar tagna med ett teleskop med objektivprisma, där varje plåt innehåller hundratals små spektra. Upplösningen var tillräcklig för att man skulle kunna upptäcka stjärnor som saknar de i vanliga fall kraftiga spektrallinjerna från joniserat kalcium i den violetta ändan av spektrum. Bond fann bara två stjärnor som var extremt metallfattiga. Ändå saknade de inte tunga ämnen, halten var ”bara” reducerad till cirka en tusendel av solens. Resultatet fick honom att 1981 skriva en artikel med titeln ”Var är population III?” Det visade sig vara en svår men fruktbar fråga.

Redan åren innan hade några spekulerat om att de första tunga ämnena kanske bildades före Vintergatans, t.ex. i kortlivade supertunga stjärnor. En annan idé var att ämnena kastats ut från Virgohopens centrum, innan Vintergatans stjärnor bildats. Eller hann de tunga stjärnorna som först uppstod explodera som supernovor och anrika gasen med metaller innan de lättare stjärnorna hunnit dra ihop sig ur gasen? Därför skulle helt metallfria lätta och långlivade stjärnor saknas. Eller, kanske hade de första stjärnorna genom ärmiljarderna svept upp

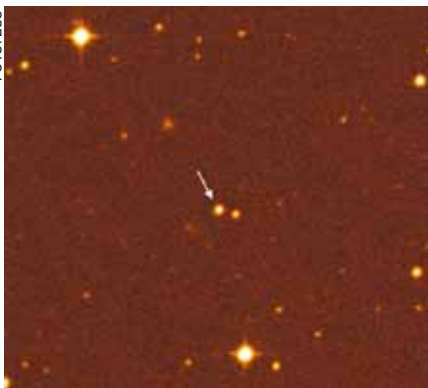


så mycket metallrikt material från Vintergatans gasskiva att åtminstone deras ytterlager skulle vara ”nedsmutsade” av tunga ämnen?

Men frågan är om lätta stjärnor överhuvudtaget kan bildas ur helt metallfri gas. Stjärnbildning sker ju genom att gasmoln dras ihop genom sin inneboende gravitation. Den motverkas av trycket inifrån, ett tryck som växer med stigande temperatur. Allt som kan kyla gasen sänker trycket och gynnar bildningen av lätta stjärnor, med deras svagare gravitationsfält. Kylning sker genom strålning. Först trodde man att de tyngre ämnena var nödvändiga för avkylningen genom att bara de kunde stråla ut värme i infrarött. Därmed skulle gåtan om population III vara löst: den innehöll inga lätta stjärnor som kunnat överleva till vår tid. Men så fann man att molekylärt väte, de vanliga H_2 -molekylerna, kan bildas i metallfri gas, och de kan stråla effektivt i infrarött. Om det bara finns ungefär en molekyl på var tusende väteatom sänks gasens temperatur radikalt.

Hur uppkom då H_2 -molekyler i gasen? Det skedde i flera steg, genom kollisioner mellan väteatomer, vätejoner och elektroner. Strålning åstadkommer elektroner och joner, och möjligheten till kollisioner med flera väteatomer hänger på densiteten. Effektiviteten i molekylframställningen beror på vilka strålningskällor som fanns där och vilken täthet som rådde. Om man kan påvisa lätta stjärnor lär man sig alltså något om strålning och densitet i gasen i det unga universum.

Bonds fråga ledde till utvidgade spaningar efter population III-stjärnor. Den djupaste genomsträngningen startades av en forskargrupp vid Hamburgobservatoriet med Schmidtteleskopet på ESO:s La Silla-observatorium. I första hand var man ute efter att finna fler



Ett litet fält i stjärnbilden Fenix med stjärnan HE 0107-5240 vid pilen. Stjärnans visuella magnitud är drygt 15 och dess avstånd kan uppskattas till 36 000 ljusår.

Den stora och tunga spektrometern UVES monterad på teleskopet Kueyen, som skyms i bakgrunden. Instrumentet är en viktig arbetshäst vid VLT, och levererar spektra för tusentals svaga stjärnor av en kvalitet som man för några decennier sedan bara kunde få för solen.

kvasarer. Men en biprodukt var en stor samling extremt metallfattiga stjärnor. Doktoranden Norbert Christlieb började undersöka dem närmare. Efter hårt arbete, där flera miljoner spektra granskades mer eller mindre automatiskt, hade han funnit 8 000 stjärnor med ungefär solens temperatur eller svalare, där knappast några metallinjer alls kunde skönjas i de lågupplösta objektivprismespektren. Han började nu samarbeta med forskare med tillgång till de största teleskopen för att syna stjärnorna närmare. Han kom upp till Uppsala för att lära sig konsten att göra kemisk analys av stjärnor. En som började ta spektra av hans stjärnor var Mike Bessell i Australien som hade tillgång till 2,3 m-teleskopet på Siding Spring-observatoriet. Det var ett spektrum därifrån som vi stod lutade över. Det förbluffande var att knappast några metallinjer syntes!

HE 0107-5240 – Christliebs stjärna

På Bessells spektrum kunde vi bara ana spektrallinjer i bruset. Vi behövde ett med bättre signal, i högre upplösning. Stjärnan var ljussvag, drygt femtonde magnituden (cirka 5 000 gånger svagare än någon man kan se med blotta ögat). Vi måste finna ett större teleskop och fick av ESO-direktörens egen tid på Very Large Telescope. Så fick vi snabbt ett utmärkt spektrum av den svaga stjärnan med UVES-spektrometern vid VLT.

Analysen började. De ynkliga små groparna i stjärnans spektrum skulle omsättas till haltbestämningar. Vi gjorde, efter konstens alla regler, en modell av stjärnans atmosfär vid våra datorer. Först måste vi uppskatta stjärnans grundegenskaper, dess ”effektiva temperatur”, som ger ett mått

på temperaturen i atmosfären, och tyngdaccelerationen i ytlagen, som bestämmer tryckförhållandena. Vi använde vätelinjer i stjärnspektrum och temperaturkänsliga stjärnfärger för att uppskatta den effektiva temperaturen. Vi fick värdet 5 100 K, lite kallare än solen. Tyngdaccelerationen var svår att bestämma, men med olika metoder fann vi ett värde 150 gånger mindre än solens, vilket innebär att radien är cirka 10 solradier. Vi har alltså att göra med en orange jättestjärna. Så varierade vi vår modells grundämneshalter

tills det beräknade spektrumet stämde med det observerade.

Det finns förstås en massa osäkerheter med analyser av detta slag. Modellerna ger idealiserade bilder av verkligheten. Men osäkerheterna är under kontroll – de halter vi bestämmer är nog i regel korrekta inom en

Ett litet avsnitt ur spektrum i det ultravioletta våglängdsområdet, för solen, CD -38°245, HE 0107-5240 och för en hypotetisk helt metallfri stjärna. CD -38°245 var den mest metallfattiga stjärnan man funnit, med ett metallinnehåll av ungefär en tiotusendel av solens, innan HE 0107-5240 upptäcktes. Spektrallinjerna syns som "hängande istappar" i kurvan över hur stjärnljusets intensitet ändras med våglängden.

faktor 3, vilket är acceptabelt när de totala effekterna är av storleksordningen 100 000.

För det var det sensationella resultatet – stjärnan var metallfattigare än solen med en faktor 200 000. Den slog den tidigare rekordinnehavaren, CD -38° 245, med mer än en faktor 10. Vi skrev en tidskriftsartikel om saken på hösten 2002 och nyheten gick ut över världen och hamnade på dagstidningarnas förstasidor. Vi började kalla den "Christliebs stjärna".

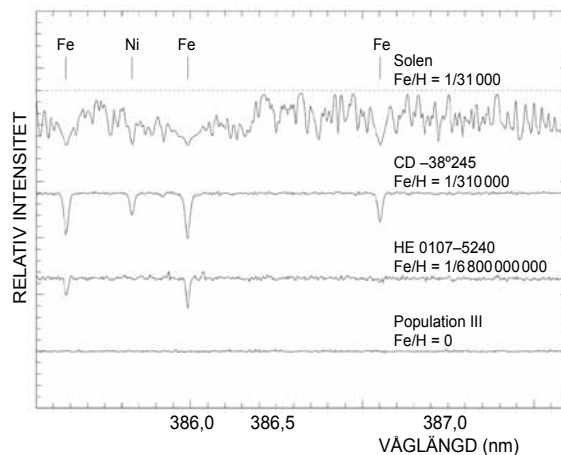
Vi kunde mäta stjärnans halter av kol, kväve och syre, natrium, magnesium, titan, järn och nickel. Järninnehållet, som ofta tas som karakteristiskt för "metallerna", är alltså rekordlåg, och det gäller också magnesium, titan, och nickel. Men natrium finns det (i förhållande till järn) mer än i solen, och kväve och syre är (också i förhållande till järn) anrikade med en faktor 500. Det konstigaste är kol – kolinnehållet i förhållande till solen är bara reducerat med en faktor 30; anrikat i förhållande till järn med cirka en faktor 6 000. Hur i allsin dar gjorde naturen det här?

Varifrån kommer ämnena?

De flesta ämnena i Christliebs stjärna verkar vara resultat av en supernova, som förorenade den gas som stjärnan uppstod ur. De vanliga modeller som finns för supernovaexplosioner och deras bidrag av grundämnen stämmer bra med stjärnans halter av tyngre ämnen, om man antar att stjärnan som blev supernova hade en massa på 20–25 solmassor. Men hur får man en supernova att göra så mycket kol, kväve och syre?

Två japaner, Hideyuki Umeda och Ken'ichi Nomoto, har föreslagit att en supernova med "låg" energi i utbrottet (cirka en tiondel av normalt) kan vara ansvarig. Detta är en modell med flera osäkra antaganden och parametrar, men den behöver inte vara fel för det. Väljer man parametrarna gynnsamt ger den upphov till de önskade mängderna av kol och kväve, men lite för mycket syre. Andra supernovaidéer inbegriper stjärnor med mycket stora massor som kan åstadkomma höga halter av kol och syre, men tyvärr alldeles för mycket kväve.

En annan möjlighet är att stjärnan påverkats av en grannstjärna, som i slutstadierna hävt ur sig kol, kväve och syre och smutsat ner Christliebs stjärna på ytan. Det finns andra stjärnor som fått sin sammansättning genom sådan dumpning från en döende granne. För dem finner man dock ofta rester av nedsmutsaren i form av en svalnad vit dvärg som avslöjas genom små variationer i stjärnans hastighet när den rör sig kring systemets tyngdpunkt. Hastighetsvariationerna syns som förskjutningar av linjerna i stjärnans spektrum. Några sådana



dopplereffekter har vi inte kunnat spåra, trots att vi nu har åtskilliga spektra över en femårsperiod.

Det finns också en möjlighet att stjärnan lyckats smutsa ner sig själv, att den kan ha blandat upp kol, kväve och syre i samband med att helium omvandlats till kol och syre i dess inre, och färskt väte blandats ner från ytan och bildat kväve av en del av kolet. Andra tecken tyder dock på att den mekanismen knappast varit i farten.

Ytterligare en möjlighet är att kolet, kvävet och syret bildats på något av dessa sätt medan metallerna tillkommit genom att stjärnan under sitt liv samlat på sig material från omgivande gas. Då skulle stjärnan alltså från början ha varit helt utan tunga ämnen, en sann population III-stjärna. Detta scenario är dock inte övertygande.

Det troligaste är nog att stjärnan fick alla sina tunga grundämnen av en supernova eller liknande. Precis hur denna supernova fungerade vet vi inte.

Men varför "före" Vintergatan?

Varför "före" i titeln på denna artikel? Ordet blev aktuellt när WMAP-satelliten kartlade den kosmiska bakgrundsstrålningen för drygt ett år sedan och kunde mäta polarisationsvariationerna i denna strålning. Dessa variationer visar att gasen av väteatomer i det unga universum åter joniserades cirka 200 miljoner år efter Big Bang, långt innan de stora galaxerna hunnit bildas. Jonisationen har troligen skett genom strålning, och i så fall knappast från kvasarer utan snarare stjärnor. (Notera dock att en alternativ strålkälla är sönderfall av hypotetiska instabila partiklar, bildade i Big Bang.) Vi vet idag ingenting om dessa första stjärnor, före galaxernas tid. Men kanske hade vi resterna av dem framför våra ögon där vi stod och gapade över spektrumet i Bessells fax.

Kommer vi att finna fler materialprover från det tidigaste universum? Vi vet inte. Men bland de 8 000 stjärnorna som Christlieb plockade ut har vi ännu bara hyggliga spektra för en liten del, trots att vi fått många observationstimmar på världens största teleskop. Kanske finns det ännu större fynd att göra. ♦

BENGT GUSTAFSSON utgick för denna artikel från sin Nordenmarkföreläsning vid astronomdagarna i Lund 2003.