

Hvor kommer guldet fra?

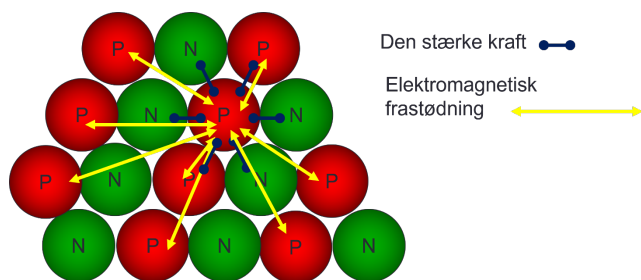
Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I jordskorpen estimerer vi at der findes ca. 400 millioner tons guld. Ved den nukleosyntese der skete i de første 20 minutter af Big Bang, blev der dannet lette grundstoffer som deuterium, helium og litium. De tungere grundstoffer er dannet ved fusionsprocessen i stjerner. Men fusion kan kun producere grundstoffer op til og med jern (atomnummer 26). Alligevel indeholder jorden tunge grundstoffer op til atomnummer næsten 100, heriblandt guld (atomnummer 79). Disse tunge grundstoffer kan ikke være dannet ved fusion i stjerner. De må være dannet på en anden måde. Vi vil her se på hvorledes de tunge grundstoffer dannes og prøve at besvare spørgsmålet: Hvor kommer guldet fra?

Bindingsenergi i atomkernen

Atomkernen består af protoner og neutroner. De har næsten samme masse, men protonen har elektrisk ladning mens neutronen er neutral. Begge kan mærke den stærke kernekraft, da de er opbygget af kvarker. Men mens den elektromagnetiske frastødning mellem protonerne falder med afstanden i anden potens, har den stærke kernekraft meget kort rækkevidde, kun nogle få nukleondiametre. Hvis en kerne består af protoner og neutroner, vil den enkelte nukleon derfor kun mærke tiltrækningen fra sine umiddelbare naboer, mens alle protoner kan mærke frastødningen fra de andre protoner.

Dette er illustreret på figur 1 hvor vi ser de kræfter som virker på en proton inde i kernen.

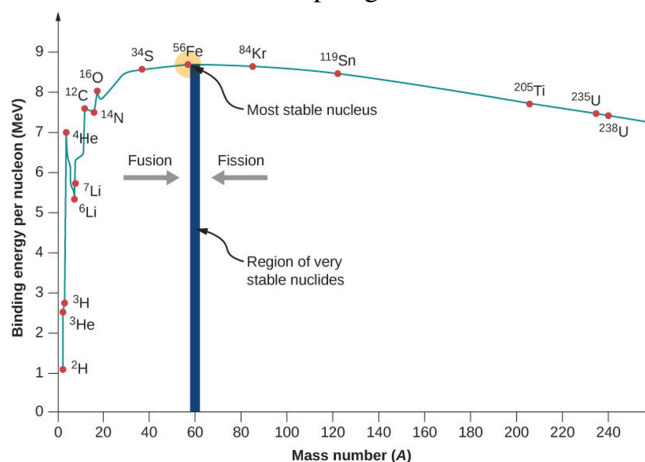


Figur 1. Kræfter på en proton i kernen.

Protoner og neutroner kan forvandle sig til hinanden ved at udsende en elektron eller en positron (antielectron). Den udsendte energi svarer til massedifferencen plus forskellen i bindingsenergi. Da massedifferencen er meget lille (kun 1,4 promille), vil en forskel i bindingsenergien kunne medføre at protoner eller neutroner forvandler sig til hinanden hvis dette giver en højere bindingsenergi. Videre er protoner og neutroner fermioner, der adlyder Paulis eksklusionsprincip. Dette medfører, at der kun kan være to nukleoner i samme energitilstand (fermioner har to spintilstande). Dette favoriserer kerner med ca. samme antal protoner og neutroner. Dog vil der være overtal af neutroner i tunge kerner på grund af den elektrostatiske frastødning mellem protonerne, som kræver ekstra neutroner som "lim".

Når vi kombinerer disse kræfter, og tager hensyn til, at nukleoner i overfladen af kernen ikke har lige mange naboer som nukleoner inde i kernen, får kur-

ven for bindingsenergien per nukleon som funktion af atomnummer. Den er vist på figur 2.



Figur 2. Bindingsenergi per nukleon som funktion af atomnummer.

Som vi ser, har Fe (jern) den højeste bindingsenergi. Dette medfører at vi kan frigøre energi ved at fusionere kerner der er lettere end jern eller dele (fissionere) kerner der er tungere end jern.

Nukleosyntesen

Fra ca. 10^{-10} til 10^{-6} sekunder efter Big Bang var universet fyldt af fotoner, neutrinoer og et plasma af kvarker og gluoner. Da temperaturen var faldet så meget, at den kinetiske energi for kvarkerne var mindre end bindingsenergien i protoner og neutroner (ca. 1 GeV/c), blev protonerne og neutronerne dannet. Dette skete efter et mikrosekund.

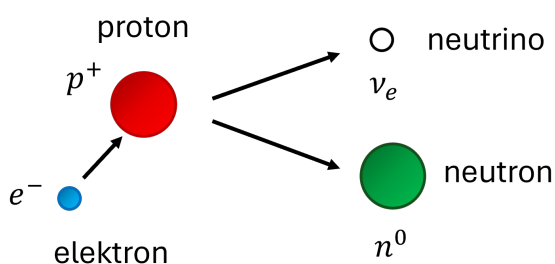
De første kerner af tunge grundstoffer end brint, blev dannet fra et til hundrede sekunder efter Big Bang.

Når en proton og en neutron kommer tæt på hinanden (nogle få protondiametre), kan de binde sig til hinanden og danne en kerne bestående af de to partikler. Denne kerne kaldes en deutron, og er kernen i deuterium, som er en tung isotop af brint. Denne proces kan fortsætte så kernen optager en neutron mere. Denne kerne er en meget tung isotop af brint, kaldet tritium. Den er ikke stabil, derfor finder vi den ikke i universet (men den bruges i brintbomber). Hvis tritium kernen fanger en proton mere, danner den en kerne bestående af to protoner og to neutroner. Dette er helium, det næstmest forekommende grundstof i universet. Reaktionskæden er vist på figur 3.

hvor m_e er elektronmassen, ρ er densiteten af elektroner og \hbar er Plancks konstant. For en hvid dværg, giver dette et tryk på $1,9 \cdot 10^{22}$ Pa.

Når hydrogenandelen af kernens masse falder under ca. 5%, vil hele stjernen begynde at kollapse. Dette vil medføre, at temperaturen i kernen stiger. Efterhånden vil kernen begynde at fusionere helium og tungere grundstoffer. Det betyder, at kernen, ud over helium, indeholder en række tungere grundstoffer. Samtidig vil stjernens lysstyrke øge voldsomt og temperaturen i den omgivende skal af brint vil stige, så den begynder at fusionere.

Men der er en grænse for hvor højt tryk kernen kan tåle. Dette skyldes, at hvis elektronernes energi overstiger massedifferencen mellem neutroner og protoner ($1,29 \text{ MeV}/c^2$), vil protonerne begynde at absorbere elektronerne og danne neutroner ved omvendt betahenfald (figur 6)



Figur 6. Omvendt betahenfald.

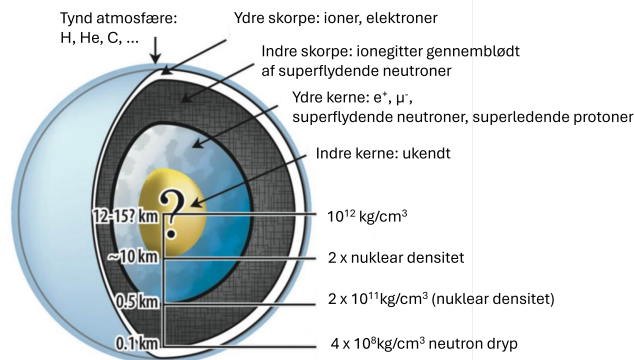
Neutronstjerner

Hvis stjernens masse ikke er for stor, vil elektrondegenerationstrykket kunne holde tyngdekraften i skak, og stjernen ender med at blive en hvid dværg, hvor fusionsprocessen går i stå, når der ikke er flere lette grundstoffer at fusionere. Men hvis stjernens masse overstiger Chandrasekars grænse på 1,44 solmasser, vil tyngdekraften overvinde trykket og stjernen vil begynde at kollapse. Når densiteten overstiger 10^{12} kg/m^3 , vil protonerne i tunge kerner som jern ($^{56}_{26}\text{Fe}$) begynde at absorbere elektroner og blive til neutroner. Stjernen vil nu bestå af et plasma af tunge kerner, neutroner, protoner og elektroner. Ved øgende densitet vil stjernen bestå af stadig mere neutronrige kerner som jern, nikkel og krypton. Denne proces kaldes neutronisering. Da der ikke er ledige energitilstande for frie elektroner, kan neutronerne ikke forvandle sig tilbage til protoner.

Når densiteten overstiger $4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$ vil der dannes et stigende antal neutroner udenfor kernerne. Denne proces kaldes neutrontryk. Fordi neutroner er fermioner (ligesom elektronerne), adlyder de også Paulis eksklusionsprincip, og det bliver nu neutrondegenerationstrykket, som holder tyngdekraften i skak. Nu bliver stjernen til en blanding af neutronrige kerner, degenererede neutroner og degenererede elektroner. De degenererede neutroner vil danne et Bose-Einsteinkondensat, og bliver en superflydende væske. Efterhånden som densiteten og trykket øges, vil næsten

alle protonerne absorbere elektroner og stjernen bliver en slags kæmpe stor kerne bestående af hovedsagelig degenererede neutroner. Dens radius er nu kun 10 km.

Det indre af en sådan neutronstjerne er vist på figur 7.



Figur 7. Det indre af en neutronstjerne.

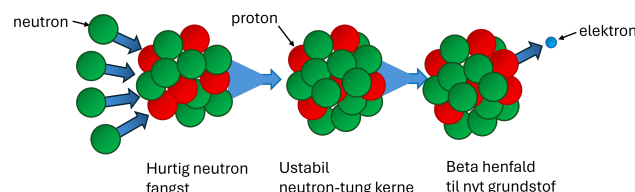
Så længe tyngdekraften er mindre end neutrondegenerationstrykket er en neutronstjerne stabil, men hvis massen er større end ca. fire solmasser, vil stjernens radius blive mindre end Swartzschild radien og stjernen kolliderer til et sort hul.

R-processen

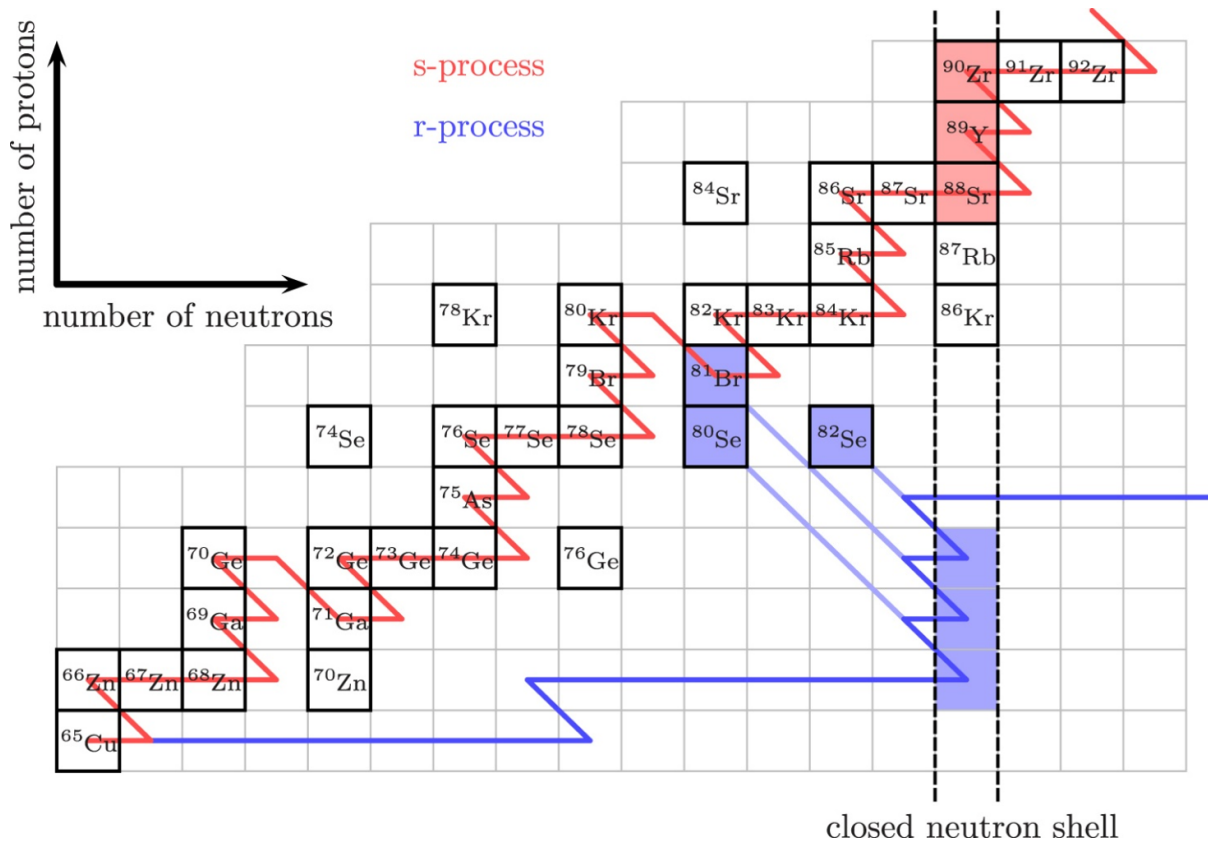
Fusionsprocessen i stjerner kan frigøre energi ved at fusionere kerner op til jern. At danne tungere kerner, kræver energi. Denne kan komme fra frie neutroner eller protoner. Der er tre mulige processer som kan danne tungere kerner end jern [3].

- s-processen, hvor kernen langsomt absorberer neutroner enkeltvis
- r-processen hvor kernen absorberer mange neutroner i et meget kort interval
- p-processen hvor kernen absorberer protoner.

Ved s-processen bliver kernen til en anden isotop af det samme grundstof. Men hvis den nye kerne er ustabil, vil den ændre atomnummer ved betahenfald. Dette vil kunne ske, før kernen absorberer den næste neutron. Ved r-processen absorberes neutronerne så hurtig, at ustabile kerner ikke når at henfalde inden næste neutron absorberes (se figur 8). Dette giver forskellige "veje" gennem det periodiske system eftersom der dannes tungere kerner. Disse veje er vist i figur 9.

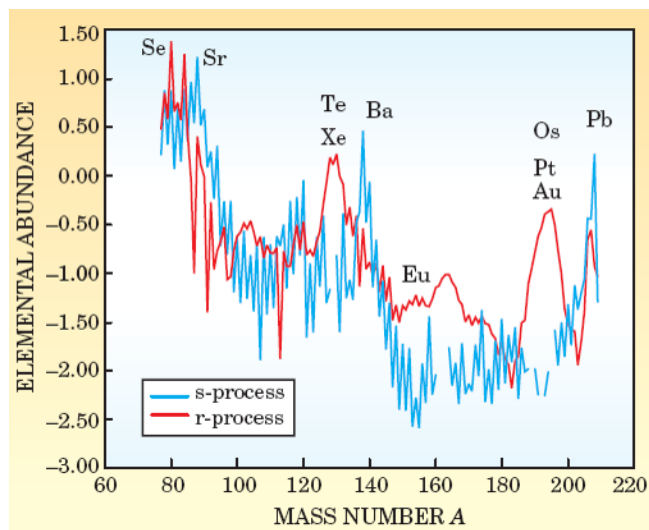


Figur 8. r-processen.



Figur 9. r- og s-processernes veje i det periodiske system.

Dette medfører, at de tunge grundstoffer dannes ved fortrinsvis ved den ene eller den anden proces. Det viser sig at guld (Au), dannes ved r-processen [5] (figur 10).



Figur 10. Processer der danner tunge grundstoffer.

Men hvor kan vi finde betingelser hvor der er så stort et overskud af neutroner at r-processen kan finde sted?

I en neutronstjerne er der masser af neutroner, men de fleste er degenererede og kan ikke deltage i en r-proces. For at processen skal finde sted, skal der være masser af frie neutroner. Det ville der blive hvis to neutronstjerner kolliderer, og udløser en byge af frie neutroner.

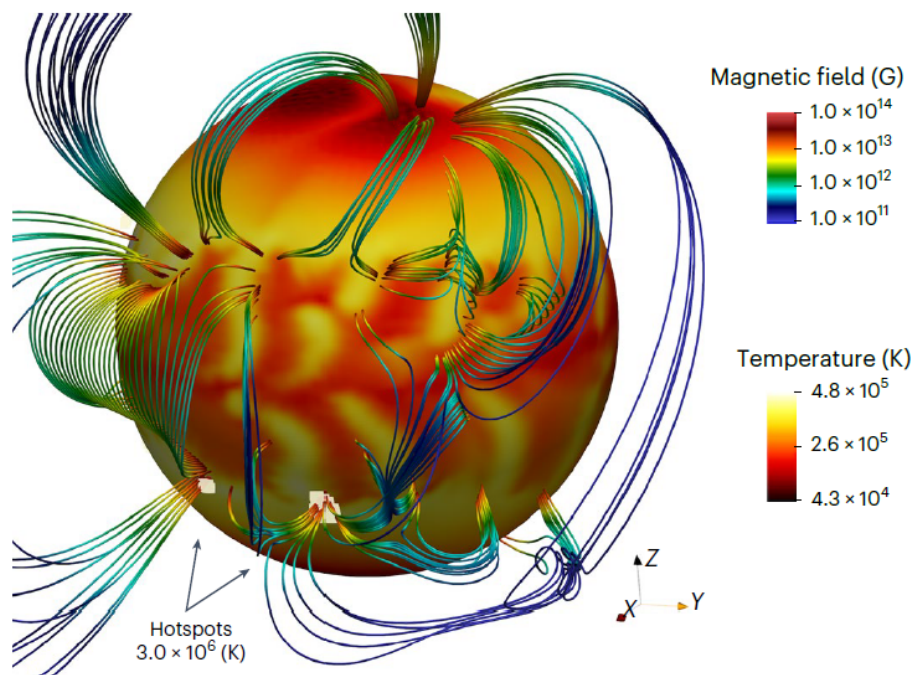
I august 2017 opdagede Ligo- og Virgodetektorerne tyngdebølger fra en voldsom begivenhed, som havde fundet sted i galaksen NGC 4993 i en afstand af 140 millioner lysår fra Jorden. Kort tid efter observerede NASAs Fermirumteleskop et kraftigt gammaglimt fra samme kilde. Den efterfølgende analyse viste, at der var tale om kollision og fusion af to neutronstjerner. Ved at analysere spektret af lyset fra begivenheden viste det sig, at der var blevet dannet store mængder af tunge grundstoffer, blandt andet guld og platin [6]. Dette var den første bekræftede observation af r-processen i praksis.

Men denne begivenhed kan ikke være forklaringen på ophavet til det guld, der befinder sig i solsystemet. Kollision mellem neutronstjerner er nemlig så sjælden en begivenhed, at vi ikke kan være sikre på, at det overhovedet er sket en eneste gang i Mælkevejens levetid. Vi må derfor lede efter en anden måde at lave r-processen på.

Magnetarer

Der findes en speciel type neutronstjerner som har et ekstremt kraftigt magnetfelt. De kaldes magnetarer. Mens jordens magnetfelt er på ca. 0,5 μ T, kan en magnetar have en feltstyrke på 10^{11} T. Til sammenligning har verdens kraftigste supraledeende magnet en feltstyrke på 45 T.

Vi ved ikke præcis, hvorledes magnetarernes stærke magnetfelt (figur 11) opstår, men den mest lovende teori går ud på, at der dannes turbulens i ultratunge flydende plasma i den nyopståede neutronstjerne.



Figur 11. Magnetfelt fra magnetar.

Denne turbulens vil danne “dynamoer” ved hjælp af de elektrisk ladede partikler i hvirvelbevægelse [7]. Dette vil forstærke det allerede eksisterende magnetiske felt, ligesom jordens kerne danner jordens magnetfelt ved bevægelse af flydende jern.

På grund af den stærke turbulens i plasmaet kombineret med det stærke magnetfelt, udsender magnetarer gigantiske udbrud af gammastråler, når de snoede magnetiske feltlinjer brister. Disse gammastråler vil medføre en voldsom opvarmning og udstødning af plasma i form af neutroner og kerner. I denne proces viser det sig også, at der kan dannes tunge kerner ved hjælp af r-processen. Vi kan observere denne proces i form af byger af højenergetiske fotoner med varighed på flere uger. Et sådant udbrud er vist på figur 12.

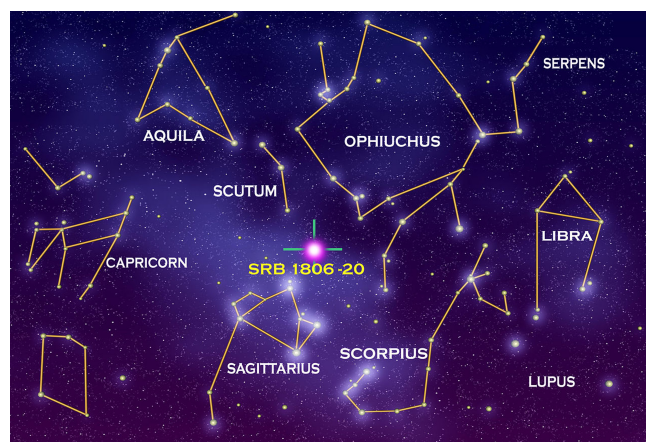


Figur 12. Udbrud fra magnetar.

Således dannes guld

SRB 1806-20 er en magnetar, som ligger i stjernebilledet Skytten, 42.000 lysår fra Jorden (figur 13). Den har

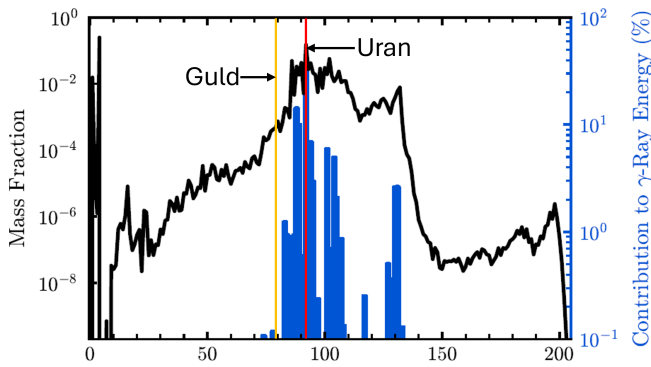
en diameter på kun 20 km og roterer med en periode på 7,5 s. Det vil sige, at dens ækvatoriale hastighed er ca. 8 km/s.



Figur 13. Magnetaren SRB 1806-20 i Skytten.

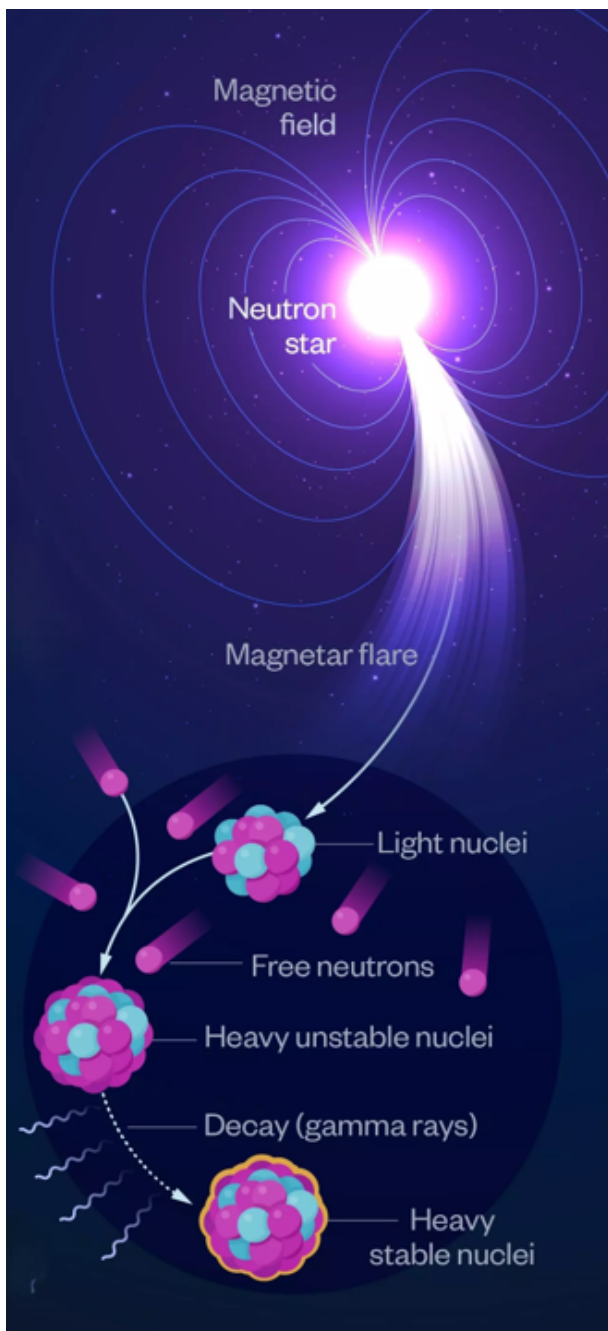
Den 27. december 2004 registrerede observatorier på Jorden en byge af fotoner fra et udbrud i denne magnetar [8]. Denne byge viste at magnetaren havde udsendt mere energi på et tiendedelssekund end Solen udsender på 150.000 år.

Nu har en nøjagtig analyse af spektret fra den observerede stråling fra SRB 1806-20 vist et massivt indhold af fotoner fra tunge grundstoffer [9]. Resultaterne er vist på figur 14. Her kan vi se fordelingen af de forskellige kerner som er ophav til fotonerne som funktion af atomnummer. De blå søjler viser den individuelle procentvise andel af radioaktive kerner i forhold til den totale gammaenergi i tidsintervallet 103 til 104 sekunder efter udbruddets start.



Figur 14. Spektret af fotoner i udbruddet fra SGR 1806-20 som funktion af atomnummer.

Som vi kan se, indeholder spektret et betydelig bidrag fra guld (atomnummer 79) og uran. Processen, hvor udbrud fra magnetarar danner tunge grundstoffer ved hjælp af r-processen, er vist på figur 15.



Figur 15. Dannelsen af tunge grundstoffer i magnetar.

Konklusion

Det ser ud til at den vigtigste kilde til guld og andre tunge grundstoffer er r-processen, hvor lette kerner absorberer en række neutroner så hurtigt, at ustabile kerner ikke når at henfalde, inden de absorberer næste neutron. Denne proces er observeret ved kollision mellem neutronstjerner, men da dette er en meget sjælden begivenhed, er den næppe ophav til det guld vi finder i solsystemet.

Men der findes mange magnetarar i Mælkevejen. Når disse går i udbrud, vil de kunne producere store mængder tunge kerner, inklusive guld, ved r-processen.

Det guld vi finder på Jorden, må derfor være udslynget fra en magnetar der eksisterede før solsystemet blev dannet. Dette materiale har blandet sig med hydrogen og andre lette kerner, som er ophavet til Solen og planeterne

Litteratur

- [1] R. R. Tayler (1993) "The Stars, their structure and evolution", Cambridge University Press, side 207–220.
- [2] B. W. Carroll og D. A. Ostlie (2006) "An Introduction to Modern Astrophysics", 2. udgave, side 567–569.
- [3] B. S. Meyer (1994) "The r-, s-, and p- Processes in Nucleosynthesis", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, bind 32, side 153–190.
- [4] J. J. Cowan m.fl. (2021) "Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process", *Rev. Mod. Phys.*, bind 93, side 015002.
- [5] J. J. Cowan og F.-K. Thielemann (2004) "R-Process Nucleosynthesis in Supernovae", *Physics Today*, oktober, side 47–53.
- [6] E. Pian m.fl. (2017) "Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger", *Nature*, bind 551, side 67–70.
- [7] A. Igoshev m.fl. (2025) "A connection between proto-neutron-star Tayler–Spruit dynamos and low-field magnetars", *Nat Astron*, bind 9, side 541–551.
- [8] D. Palmer m.fl. (2005) "A giant γ -ray flare from the magnetar SGR 1806–20", *Nature*, bind 434, side 1107–1109.
- [9] A. Patel m.fl. (2025) "Direct evidence for r-process nucleosynthesis in delayed MeV emission from the SGR 1806-20 magnetar giant flare", *The Astrophysical Journal Letters*, bind 984, side L29.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han underviser i fysik og matematik på Midtbyens Gymnasium, Mercantec, i Viborg.