Mere om hvor guldet kommer fra

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

En opmærksom læser har stillet nogle spørgsmål, som fortjener svar i form af en lille opdatering til artiklen *"Hvor kommer guldet fra?"* i *Kvant* nr. 3, 2025 [1]. Jeg vil her gennemgå de punkter, vores læser påpeger.

I artiklen skriver jeg, at forholdet mellem protoner og neutroner "fryser", når temperaturen er faldet til 10^9 K. Vores læser gør opmærksom på, at dette allerede sker ved 10^{10} K. Jeg beklager, at der her har sneget sig en kommafejl ind ved omregningen fra termisk energi til temperatur. Overgangen sker ved 0,8 MeV, som giver en temperatur på $9{,}12 \cdot 10^9$ K.

Der er tre processer, der kan danne tungere grundstoffer end jern i stjerner. Jeg vil her uddybe beskrivelsen lidt mere:

P-processen

P-processen (protonprocessen) foregår ved, at en kerne absorberer en ekstra proton. Da protoner har elektrisk ladning, frastøder de hinanden. Processen kan derfor kun finde sted med høje protonenergier. Tunge kerner er ustabile, hvis de ikke har et overskud af neutroner, så selv om processen øger atomnummeret med $+1$, er der stor sandsynlighed for, at kernen henfalder ved omvendt beta-henfald.

S-processen

S-processen (slow neutron capture) beskriver, at kernen absorberer neutroner enkeltvis, men med et tilstrækkeligt stort tidsinterval til, at ustabile kerner kan nå at henfalde. Det er således ikke muligt at lave store ændringer i atomvægten uden, at atomnummeret løbende også ændres.

R-processen

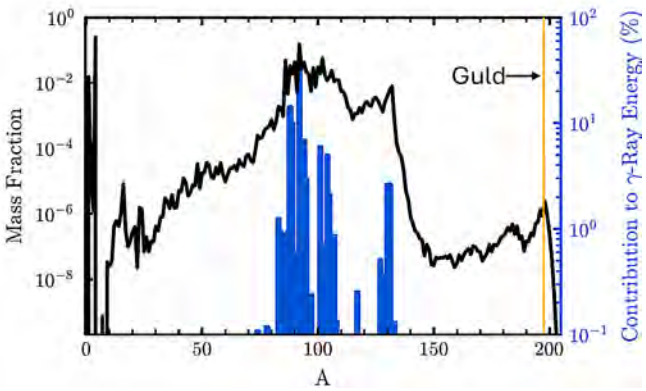
R-processen (rapid neutron capture) kan ske, når densiteten af omgivende neutroner er så høj, at kernen kan nå at absorbere adskillige neutroner i et "haps" uden at nå at henfalde undervejs. Det efterfølgende henfald vil derfor ske fra en isotop af den oprindelige kerne, men med et overskud af neutroner.

I spektret af fotoner i udbruddet fra SGR 1806-20 er jeg kommet til at placere markeringen for guld efter atomnummer ($Z = 80$) i stedet for atomvægt ($A = 197$). Den rigtige markering er vist her:

Vores læser sætter spørgsmålstegn ved konklusionen om, at guldet på Jorden kommer fra en magnetar, der eksisterede før Solsystemet blev dannet. Min konklusion bygger på følgende ræsonnement:

Som beskrevet i artiklen har vi observeret, at guld kan dannes ved kollision mellem neutronstjerner. Men vi ved, at dette er en sjælden begivenhed. Vi har kun en enkelt observation (som er beskrevet i artiklen). Da vi ikke kan lave statistik på én observation, må vi se på populationen af neutronstjerner. For at to skal kollidere, må de være tæt på hinanden. Da Mælkevejen ikke er fuld af omkringfarende neutronstjerner, må der være tale om binære neutronstjerner. Det totale antal er ukendt, men vi har ca. 30 bekræftede observationer. Blandt disse har vi set én kollision.

Vi har observeret ca. 30 magnetarer i Mælkevejen. Det virkelige antal er ukendt, men man regner med, at det er meget højere.



Figur 1. Spektret af fotoner i udbruddet fra SGR 1806-20.

Det er muligt, at der er det samme antal magnetarer og binære neutronstjerner i Mælkevejen, men vi ved, at kollisioner mellem neutronstjerner er meget sjældne begivenheder. Der er derfor mange (inklusive mig selv), som mener, at udbrud fra magnetarer er en vigtigere kilde til tunge grundstoffer end kollisioner mellem neutronstjerner. Hvad der er rigtigt, vil vise sig, hvis vi gør flere opdagelser af tyngdebølger fra neutronstjernekollisioner.

Når vi nu taler om guld, vil jeg gerne nævne en lille kuriositet, når det gælder guldets farve.

Vi har tidligere beskrevet Dirac-ligningen, som er den relativistisk korrekte bølgeligning for elektronen [2].

Dirac-ligningen forklarer, hvorfor guld har den gyldne farve, mens sølv er farveløst. Sølv har atomnummer $Z = 47$, og dets elektroner når ikke tæt på lyshastigheden. Guld har atomnummer $Z = 79$, og de inderste elektroner er tæt på kernen. Dette gør, at de bevæger sig med ca. halvdelen af lyshastigheden. Dette får elektronens masse til at øges med ca. 20%.

Farven til metaller som sølv og guld skyldes i hovedsagen absorption af lys ved, at en elektron i d-skallen springer til en bane i s-skallen. For sølv svarer energiforskellen mellem $4d \rightarrow 5s$ til en bølgelængde i det ultraviolette område. Det lys, der ikke absorberes, bliver reflekteret, og sølv reflekterer derfor alle bølgelængder af det synlige lys og er farveløst.

For guld derimod gør elektronens masseforøgelse, at forskellen mellem d- og s-banerne bliver mindre, og energiforskellen mellem $5d \rightarrow 6s$ (som er den dominerende absorption) svarer til blåt lys. Guld vil derfor absorbere blåt lys, men reflektere gult og rødt lys. Derfor har guldet den gyldne farve.

What keeps that golden twinkle bright?
Mass increase near speed of light!

Litteratur

[1] B. L. Schistad (2025) "Hvor kommer guldet fra", *Kvant*, bind **36**, nr. 3, side 8–13.

[2] B. L. Schistad (2019) "Antimaterien, der blev væk", *Kvant*, bind **30**, nr. 2, side 22–28.



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