

KOSMOS NYA GULD FABRIKER

Hur skapas material runt omkring oss? Vissa kända metaller bildas på alldeles oväntade ställen, visar den senaste forskningen. Stephan Rosswog förklarar.

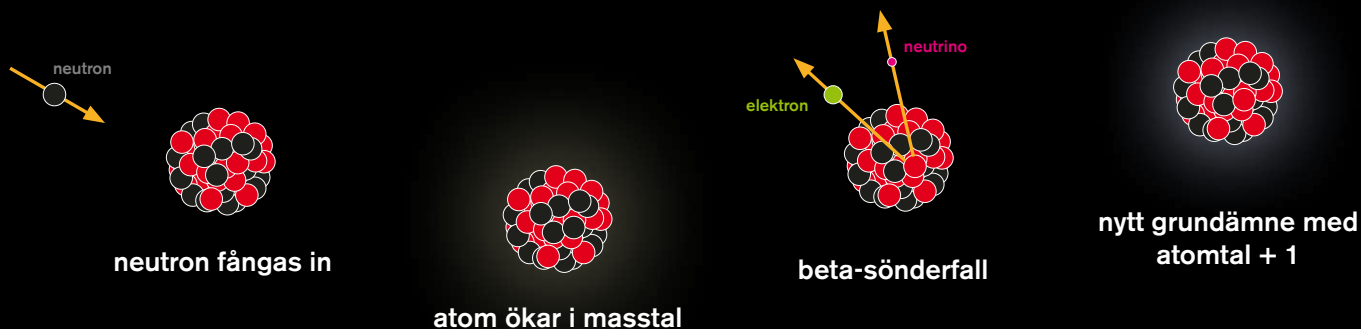
Sedan länge har guld uppskattats för sin skönhet, sin sällsynthet och ett antal förbluffande fysiska egenskaper. Så är till exempel guld ett av de minst reaktiva grundämnena, det är mycket mjukt och så smidbart att ett enda mynt kan hamras ut till mer än 30 kvadratmeter. Med andra ord: idealiska egenskaper för vacker smyckekonst! Men har du någonsin frågat dig varifrån guld kommer? Eller mer allmänt, varifrån kommer den materia som vi och vår planet består av? Det är en av de mest grundläggande frågorna som astrofysiken försöker svara på.

Så skapas grundämnena

Under Stora smällen byggdes bara de lättaste grundämnena upp, främst väte, helium och lite litium. Alla andra grundämnena bildas vid olika astrofysikaliska skeenden, och det är en av astrofysikens grundläggande uppgifter att fundera ut under vilka omständigheter de olika ämnena bildas.

Grafen nedan ger en överblick över de grundämnesförekomster som vi hittar i solsystemet. Här är "masstalet"

SÅ SKAPAS TUNGA GRUNDÄMNEN



Ett nytt tungt grundämne blir till när en atom fångar in en neutron.

summan av antalet protoner och neutroner, eller nukleoner, som bygger upp en atomkärna. Förekomsterna ges som viktsandelen delad med masstalet och visar då hur vanligt ett ämne är i kosmos.

Åtskilliga ämnen, upp till järn – se bilden – uppkommer genom termonukleär fusion i stjärnornas inre. Där är temperaturerna så höga att alla grundämnen är totalt befriade från sina elektroner; atomkärnorna badar i ett hav av fritt rörliga elektroner. Som följd av de höga temperaturerna har atomkärnorna så stora relativa hastigheter att de kan komma varandra tillräckligt nära så att den starka kärnkraften med sin korta räckvidd kan träda i aktion – mot den starka frånstötande kraften mellan de likartat laddade protonerna – och kan slå ihop två kärnor till en ny och tyngre atomkärna. Inne i en kärna kan neutroner omvandlas till protoner genom att sända ut en elektron och en obetydlig partikel som kallas antineutrino. Denna process, kallad ”betasönderfall”, är en typ av radioaktivitet och reglerar förhållandet mellan neutroner och protoner.

Under sin livstid passerar en stjärna genom flera olika kärnomvandlingsstadier, under vilka – i skal efter skal – allt tyngre grundämnen byggs upp. För de allra tyngsta stjärnorna slutar detta först när ämnena i järngruppen, som – av kärnfysikaliska skäl – har den största bindningsenergin per nukleon, har bildats. Det innebär att kärnbränning till ännu tyngre atomkärnor skulle kräva energi i stället för att frigöra den, och därför förekommer det inte i naturen. Atomkärnor som är tyngre än de hos ämnen runt järn måste bildas på annat sätt. Men vilket?

De tyngsta grundämnena

Svaret är att redan befintliga atomkärnor fångar in neutroner. Om man granskar hur vanligt förekommande atomer med olika masstal är kan man skönja ett mönster. Naturen tycks gärna skapa atomer med masstal runt 130 (till exempel jod och cesium), men också runt 140 (t. ex. barium) och 200 (guld, platina och kvicksilver) och sedan

även runt 210 (t. ex. radon och bly).

Detta säger oss att naturen verkar på två sätt: det finns ”långsam neutroninfångning”, *s*-processen (”slow”) och ”snabb neutroninfångning”, *r*-processen (”rapid”). Här menas med snabb eller långsam hur tiden mellan två infångningar förhåller sig till hastigheten hos de radioaktiva sönderfallen; om en kärna fångar in en neutron i en långsam process har en möjligen radioaktiv nybildad kärna tid att sönderfalla innan nästa neutron fångas in. Under en snabb process bombarderar däremot många neutroner kärnan, och flera av dem kan fångas in innan kärnan sönderfaller.

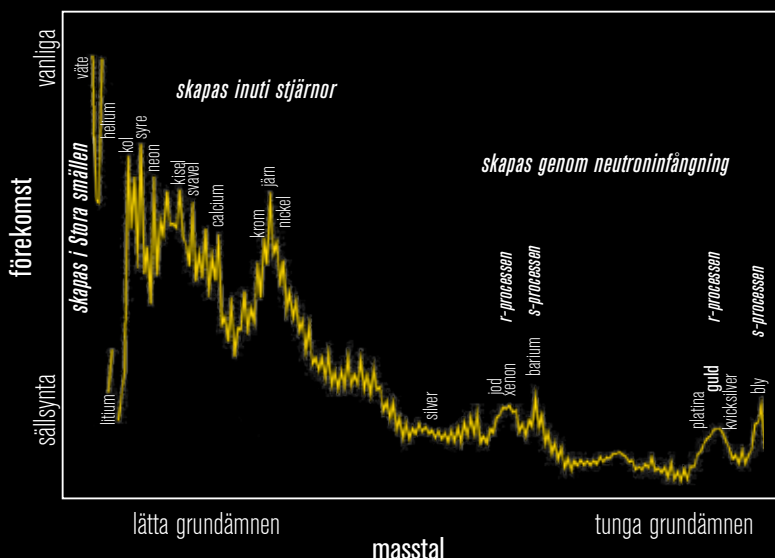
För en astrofysiker är den viktigaste skillnaden mellan de två processerna den miljö i vilken de uppträder. För *s*-processen behöver neutronerna bara sändas ut i maklig takt (detta sker under sena utvecklingsstadier hos stjärnor liknande solen), medan *r*-processen kräver mycket mer extrema förhållanden där många neutroner levereras under en mycket kort tid. Så krävs det till exempel för att bygga upp en atomkärna som guld med ca 200 nukleoner från, säg, järn med 56 nukleoner att 144 neutroner fångas in.

För att nya atomer ska kunna bildas med *r*-processen krävs extrema förhållanden: en explosion i en neutronrik miljö. Den återstående stora frågan är: *Vilka kosmiska explosioner finns det som kan bilda tunga grundämnen som guld, platina eller plutonium?*

Supernovor

Kärnkollapsupernovor har varit förstahandskandidater som producenter av de tyngsta ämnena genom snabb neutroninfångning sedan mitten av förra seklet. Bara stjärnor med mer än åtta gånger solens massa kan nå den punkt där en inre kärna av järn bildas i mitten av stjärnan. Så snart denna kärna når en kritisk massa börjar den kollapsa, och en explosion börjar.

Under kollapsen ökar temperaturen och tätheten i kärnan kontinuerligt. Med de förutsättningarna kan elektroner tryckas in i protoner så att neutroner bildas (på



Universums vanliga och ovanliga atomer. Merparten av universums materia består av väte och helium. Det finns bara små mängder av ämnen tyngre än järn. Tung grundämnen är mycket sällsynta – uppemot 10 miljarder gånger mer sällsynta än väte – och bildas genom att befintliga atomkärnor fångar in neutroner.

De dubbla topparna tyder på att naturen verkar på två olika tidsskalor: neutroninfångning kan verka snabbt (*r*-processen) eller långsamt (*s*-processen).



Förloppet enligt NASA:s rymdkonstnär: ljussvagt neutronstjärnpar snurrar tätare och tappar energi som osynliga gravitationsvågor.



Energi frigörs när stjärnorna går samman: datorsimuleringarna på motsatt sida visar bättre hur det kan se ut i verkligheten.



En kort blick av gammastrålning uppstår och ett nytt svart hål bildas. Materian som kastas ut kan bilda en kilonova.

mer fysikaliskt språk kallas det ”elektroninfångning” och är motsatt process mot det ovan nämnda betasönderfallet: en elektron och en proton slås samman till en neutron och sänder då ut en neutrino).

På så vis blir stjärnans kärnparti alltmer rik på neutroner. Kollapsen vänds slutligen till en explosion först då materian blir så enormt sammanpressad att nukleonerna nuddar vid varandra. Vid så små avstånd blir den starka kärnkraften (som annars är attraktiv och håller ihop atomkärnorna) extremt repulsiv och kan faktiskt åstadkomma en ”studs” så att kollapsen vänds till en kraftfull explosion.

Så det är den mikroskopiska, i vardagslivet omärkliga starka kärnkraften som är ansvarig för en av de största explosionerna i universum! Kvar finns stjärnans ursprungliga kärnparti, men nu hoptryckt till i stort sett atomkärnetäthet. En sådan ”protoneutronstjärna” sänder ut enorma mängder neutriner under den första sekunden av sin tillvaro, typiskt är den utsända energin per tidsenhet häftiga 20 storleksordningar större än solens luminositet! En del av dessa neutriner fångas in av stjärnmaterian och hjälper högst sannolikt till för att ge explosionen full fart.

Den omgivningen mitt i explosionen, het och rätt så neutronrik, har i decennier varit den främsta kandidaten som producent av *r*-processgrundämnen. Men nu har åsikterna börjat svänga.

Extrema stjärnor som smälter samman

Redan på 1970-talet hade en alternativ bild föreslagits. Grundtanken är att börja från början på den extremt neutronrika sidan: med en *neutronstjärna*. Sådana stjärnor bildas så som beskrevs ovan i en kärnkollapsande supernova, och för astrofysiker är de laboratorier för fysik under de mest extrema villkor.

Med massor omkring 1,5 gånger vår sols, men med en radie på bara 12 km är deras tätheter enorma och kan nå flera gånger en atomkärnas. En tesked full av materia från en neutronstjärna skulle väga otroliga 100 miljoner ton! En annan intressant egenskap är att de till allra största del består av neutroner. Här finns i princip ideala förutsättningar för en möjlig *r*-process.

Men det finns fortfarande viktiga frågor att besvara: för det första, hur kan dessa neutroner användas för att bilda tunga atomkärnor? För det andra, om sådana kärnor faktiskt kan bildas, hur kan de slippa loss från neutronstjärnans enorma tyngdkraft? Svaret är: genom en annan exotisk kropp. Denna andra kompakta kropp kan vara antingen en annan neutronstjärna eller ett svart hål med några få solmassor.

Att ha två sådana exotiska kroppar i ett dubbelsystem verkar vid första påseendet rätt osannolikt; men i dag känner vi till tio dubbla neutronstjärnesystem i Vintergatan. System med en neutronstjärna och ett svart hål borde också finnas enligt teorin för stjärnutveckling, men inget har ännu hittats. Ett särskilt dubbelsystem av två neutronstjärnor, kallat PSR 1913+16, har följts mycket noga sedan det upptäcktes 1974. Det har visat sig vara ett mycket värdefullt laboratorium för gravitationsteori, och ett antal

effekter som förutsagts av Einsteins allmänna relativitetsteori har mätts upp i detta system med otrolig noggrannhet. Så som Einsteins teori förutsäger producerar systemet gravitationsvågor, små krusningar i rumtiden som bär bort energi och rörelsemängdsmoment. Därför närmar sig de två neutronstjärnorna långsamt varandra.

I början är effekten mycket liten, de två stjärnorna närmar sig varandra med bara 1 mm per omlopp. Men processen skyndas på dramatiskt, och de sista åtskiljande 100 km kommer att tillryggaläggas på mindre än en sekund! Som slutresultat kommer de två stjärnorna med sina enorma tyngdkrafter att kollidera våldsamt med varandra.

Och, som man tidigt tänkte sig, vid denna våldsamma kollision kastas en liten del av den neutronrika materian ut i rymden. Det är här som guld skapas.

Dubbellösningen

Från början förkastades den som en rätt udda idé, men under det senaste decenniet har tanken på sammanslagning av kompakta dubbelstjärnor fått mer och mer stöd, och många forskare inom nukleär astrofysik betraktar den nu som den fysikaliskt mest troliga modell vi har fått fram så här långt. Ett antal studier av kärnkollapssupernovor finner att de helt enkelt inte kan nå de extrema förhållanden som krävs för att bilda de tyngsta ämnena som guld eller platina.

Å andra sidan tycks sammanslagningar i kompakta dubbelsystem helt naturligt ge rätt mängder utkastad materia och producerade *r*-processgrundämnen i rätta proportioner. Superdatorsimuleringar som den i bilderna här intill tyder på att omkring en procent av en solmassa av neutronstjärnematerian kastas ut i rymden. Datorsimuleringar som följer många tusen kärnreaktioner i denna utkastade materia hittar god överensstämmelse med de ämneshalter som observeras i kosmos. De visar särskilt att de tyngsta ämnena som guld, platina – till och med uran och plutonium – produceras naturligt under neutronstjärnematerians utvidgning.

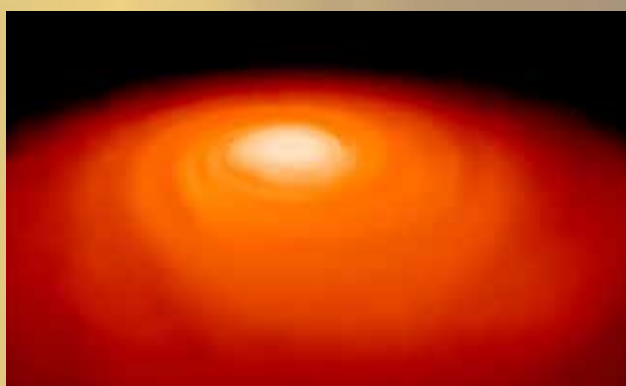
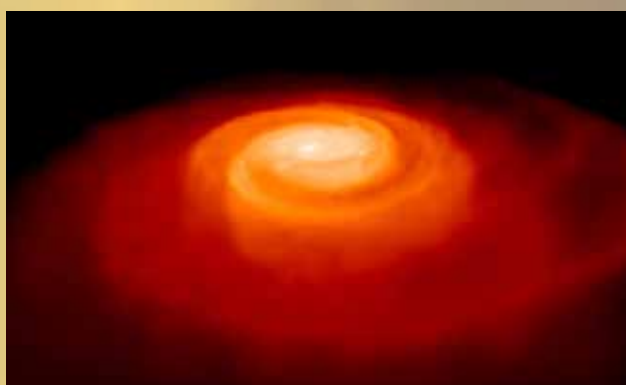
Under expansionen fångas neutroner in mycket snabbt och bildar extremt neutronrika kärnor. Efter en sekund har alla neutroner fångats in, och de just formade atomkärnorna sönderfaller radioaktivt till långlivade eller stabila ämnen.

När väl materian har utvidgats tillräckligt så att den strålning som uppkommer genom sådana sönderfall kan slippa ut blir explosionen synlig som en elektromagnetisk blixtn som försvinner på några dygn. Astronomerna kallar en sådan händelse för "kilonova" eller "makronova".

Bevis: den första kilonovan

För mer än tio år sedan förutspådde teoretiska astrofysiker att de just bildade *r*-processatomkärnorna skulle lysa som ett snabbt övergående ljusblint tack vare det radioaktiva sönderfallet. De utvecklade alltmer förfinade teoretiska modeller för dessa blixtnar, men tyvärr undgick dessa fyrverkerier konstant alla astronomiska observationer.

Först sommaren 2013 ändrades det. Den 3 juni upptäckte



Två neutronstjärnor smälter samman. I den här superdatorsimulering visas bara den undre halvan av materian för att medge en blick in det sammansmälta kroppen (efter 3, 4,89, 10,1 och 19,1 millisekunder). Färgkodningen ger temperaturen; toppvärdena når 500 miljarder grader, 30 000 gånger hetare än i solens kärna. Under den våldsamma sammanslagningsprocessen kastas omkring 1% av en solmassa av mycket neutronrik materia ut i rymden. Medan den expanderar skapas tunga *r*-processgrundämnen som guld och platina.

NASA, ESA, M. TANVIR (U LEICESTER), A. LEVAN (U WARWICK), A. FRUCHTER (STSC), J. HUDORTH (KÖPENHAMNS UNIV), R. HOUSSELL (STSC), K. WIERSEMA (U LEICESTER), R. TUNNICLIFFE (U WARWICK)



Ljus från en kilonova i en avlägsen galax fångades 2013 av Hubbleteleskopet.

satellitexperimentet *Swift* en kort och ljusstark blix i gammastrålning, en så kallat kort gammablixt som i den astronomiska litteraturen fick beteckningen GRB130603B. Kortvariga gammablixtar antas också vara resultatet av sammansmältningen av två täta himlakroppar i ett dubbelstjärnesystem. (För mer om andra gammablixtar, se artikeln av Andreas Johansson i *Populär Astronomi* 2013/4.)

Nio dygn efter blixten upptäckte Hubbleteleskopet ett snabbt bleknande sken i kortvägigt infrarött ljus, just så som de teoretiska modellerna förutspått.

Om ljusskenet som Hubble såg verkligen är en kilonova har det mycket påtagliga följder. För det första betyder det att korta gammablixtar faktiskt uppstår i sammansmältningen av kompakta dubbelsystem, ett samband som länge hade misstänkts men aldrig verkligen bevisats. För det andra betyder det att sammansmältningen av kompakta dubbelsystem verkligen är åtminstone en större källa till grundämnen som skapas genom r -processen och möjligen den viktigaste.

En tredje spännande implikation kommer från sambandet med gravitationsvågor. För närvarande byggs ett antal kilometerstora detektorer för gravitationsstrålning över hela jorden. Deras främsta mål är, inte alltför överraskande, de sista stadierna i det spiralformade närmandet och den slutliga sammansmältningen av de kompakta kropparna i ett dubbelsystem. Så här långt har ännu inget upptäckts, men förväntningarna är stora på att en era av gravitationsvågs-astronomi ska kunna börja nästa decennium.

De snabbt övergående blixterna som uppkommer genom de just bildade tunga ämnena är ett unikt tecken på sammansmältningen av ett dubbelsystem som kan bestå av två neutronstjärnor eller en plus ett svart hål. Ljusblixtarna kan faktiskt bli väsentliga för att spåra vad som ligger bakom de första direkta observationerna av gravitationsvågor. Om en gravitationsvågssignal är mycket svag skulle en samtidigt observerad kilonova stärka tilltron till att det verkligen var sammanslagningen av ett kompakt dubbelsystem. Och att observera rymden med gravitationsvågor kommer att öppna ett helt nytt och spännande fönster mot en hittills helt okänd sida av universum. ★

STEPHAN ROSSWOG är professor i astronomi vid Stockholms universitet.

Orienteringskurser i astronomi



BILD: NASA/HUBBLE HERITAGE TEAM

Universums byggnad
 Interstellär kommunikation
 Universums utveckling
 Etnoastronomi
 Exoplaneter
 Astronomi - Navigeringskonstens historia
 Astrologi
 Astronomisk rymdforskning
 Den astronomiska världsbildens utveckling
 Livsbetingelser i universum
 Astronomi i konstens historia

Under HT14 går kurserna
 Interstellär kommunikation
 Navigeringskonstens historia

Välkommen att läsa astronomi hos oss!

<http://physics.gu.se/~tfams/Astro/Orient.html>

Kontakta:

Maria Sundin
 maria.sundin@physics.gu.se
 Institutionen för fysik
 Göteborgs universitet
 412 96 Göteborg



GÖTEBORGS UNIVERSITET