

KOSMISCHE EVOLUTIE

Het proces van kosmische evolutie, dat vooraf ging aan de biologische evolutie en noodzakelijke voorwaarden daartoe schiep, beslaat een periode van de orde van 10 miljard jaar.

Het begint met de “**Big Bang**” ruwweg 15 miljard jaar geleden.

Alhoewel de kosmische evolutie nog steeds verder gaat, zullen we het vooral toespitsen op:

- Het ontstaan van de chemische elementen.
- Het ontstaan van de Aarde ongeveer 4.5 miljard jaar geleden.

TIJDSCHALEN

- De ouderdom van de **Aarde** wordt bepaald met behulp van vervalreeksen van radioactieve elementen.
Zware elementen, die al bij het ontstaan van de Aarde aanwezig moeten zijn geweest, vervallen via allerlei tussenprodukten tot stabiel lood.
De belangrijkste beginnen met de zwaarste in de natuur aanwezige atomen:
 - Uranium-238 (^{238}U ; halfwaardetijd 4.5 miljard jaar), eindigt in ^{206}Pb ;
 - Uranium-235 (^{235}U ; halfwaardetijd 700 miljoen jaar), eindigt in ^{207}Pb ;
 - Thorium (^{232}Th ; halfwaardetijd 14 miljard jaar), eindigt in ^{208}Pb .
- De ouderdom van het **heelal** wordt bepaald met behulp van
 - De expansie van het heelal
 - Theoretische modellen van de structuur en evolutie van sterren
 - Verval van radioactieve elementen in meteorieten.

MELKWEGSTELSELS

Melkwegstelsels zijn de fundamentele bouwstenen van het heelal.

Ze komen voor in een grote variëteit; de belangrijkste klasse is die van de spiraalnevels.

Deze hebben als meest opvallende component de zgn. **schijf**, die sterk is afgeplat.

In die schijf zien we **spiraalarmen**; dit blijken de gebieden te zijn, waar tot op dit moment stervorming optreedt.

Stervorming vindt plaats als een wolk gas in het interstellare medium onder invloed van zijn eigen zwaartekracht samentrekt.

Overigens gebeurt dit in de praktijk alleen bij zeer grote massa's, die dan fragmenteren en een hele zwerm sterren (sterrenhoop) vormen.

Ons Melkwegstelsel is ook een spiraalnevel en wel een relatief groot exemplaar. Enige belangrijke getallen:

- Diameter ruim 100.000 lichtjaar (1 lichtjaar = $9,5 \times 10^{12}$ km);
- Massa in sterren en interstellair gas ongeveer 10^{11} keer die van de Zon (de massa van de Zon is 2×10^{30} kg);
- Sterren komen voor tot enkele tientallen keren zo zwaar als de Zon (erg weinig) tot ongeveer tien keer zo licht als de Zon (erg veel). Dan kom je op totaal enige keren 10^{12} sterren;
- Moderne onderzoeken geven aan dat er minstens nog tien keer zoveel materie is in een grotere en nauwelijks afgeplatte structuur; de zgn. halo van donkere materie.

LEEFTIJD VAN HET HEELAL

De melkwegstelsels bewegen zich van elkaar met een snelheid, die evenredig is met de afstand.

Dit is ontdekt in de jaren twintig van deze eeuw (Slipher en Hubble).

De expansie volgt de Wet van Hubble:

$$V_{rad} = H_0 \times d$$

Elke plek *lijkt* daardoor het centrum van deze expansie van het heelal te zijn.

De Hubble constante H_0 heeft de dimensie van tijd^{-1} en is het omgekeerde van het tijdsinterval, waarin alles terugextrapolerend bij elkaar was:

$$H_0^{-1} = \frac{d}{V_{rad}}$$

De modernste bepalingen van de Hubble constante geven een leeftijd van het heelal van 10 tot 15 miljard jaar.

- De theorieën van de structuur en evolutie van sterren geven voor de oudste sterren in ons Melkwegstelsel een vergelijkbaar getal.
- Meteorieten geven via radioactieve isotopen ook aan, dat de eerste elementen zo'n 5 tot 10 miljard jaar eerder zijn gevormd dan het zonnestelsel.

KOSMISCHE ABONDANTIE

Als we de chemische samenstelling van sterren bepalen komen we tot een opmerkelijke conclusie.

Alle sterren bestaan voornamelijk uit waterstof en helium in een massa-verhouding van ongeveer drie op één.

De overige elementen omvatten niet meer dan 0.1% van de massa voor de oudste sterren tot een paar procent (2% voor de Zon) voor de jongste.

Daarvan maken koolstof, stikstof en zuurstof het merendeel uit; juist de elementen nodig voor het ontstaan van leven.

Onder de zware elementen komen alle elementen en hun isotopen overal ruwweg in dezelfde verhouding voor.

Voor deze zgn. kosmische abundantie-tabel moet dus wel een heel fundamentele reden zijn.

KOSMOLOGISCHE NUCLEOSYNTHESE

In het begin moet het heelal erg heet zijn geweest.

Materie kon slechts bestaan in zeer energetische vorm, dus in de vele kortstondig voorkomende, hoog energetische deeltjes, die ook in deeltjesversnellers worden gevormd.

Na enige tijd (ongeveer *drie minuten*) was de temperatuur voldoende gedaald, dat protonen en neutronen konden bestaan zonder telkens weer bij botsingen te worden getransformeerd in andere deeltjes.

De theorie van de zgn. zwakke wisselwerkingen voorspelt, dat ongeveer 12 tot 13% neutronen was en de rest protonen.

De protonen en neutronen “reageerden” meteen bij botsingen tot zwaardere elementen (eerste zware Waterstof –of Deuterium–, dan Helium-3, Helium-4).

Echter dit proces stopt bij helium, omdat er in de natuur geen isotoop bestaat met massagetal 5 of met massagetal 8.

Het resultaat is, dat na drie minuten het heelal wat de materie betreft (er was en is nog veel energie in de vorm van fotonen en neutrino's) bestond uit ongeveer drie-kwart waterstof en één-kwart helium.

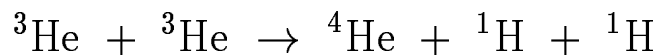
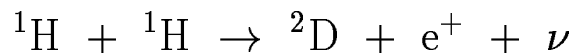
Waar komen dan de ander elementen vandaan, die voor het ontstaan van leven zo essentiël zijn, met name koolstof, stikstof en zuurstof?

STELLAIRE NUCLEOSYNTHESE

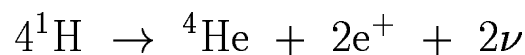
1. Energie productie in de Zon

De Zon is ontstaan uit een samentrekkende gas wolk in het interstellair medium.

Daarbij kwam gravitationele energie vrij, waardoor de temperatuur in het centrum kon oplopen tot zo'n 10 miljoen graden. Dan kan de volgende reaktie-keten optreden:



Opgeteld geeft dit



Daarbij komt energie in de vorm van straling (en neutrino's) vrij.

De Zon straalt zo ongeveer 4×10^{26} J/sec uit.

Dit kan je al schatten als je waarneemt, dat het op de rug van je hand vergelijkbaar voelt als je in de Zon ligt en als je je hand op een afstand van enkele tientallen centimeters van een 100 Watt lamp houdt.

De Zon kan dit ongeveer 10 miljard volhouden tot alle waterstof in het centrale deel op is.

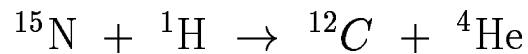
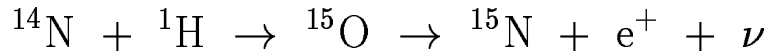
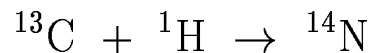
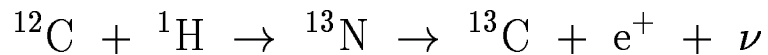
De Zon zal dan na enige tussenstadia vrij snel uitdoven.

2. Evolutie van zwaardere sterren.

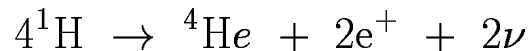
Nu een zwaardere ster, zeg zo'n tien keer zo zwaar als de Zon.

Die besteedt het grootste deel van zijn leven op vergelijkbare manier, namelijk "verbranden" van waterstof in helium.

Alleen gebeurt het veel sneller (gemeten in miljoenen jaren en niet miljarden) en via een andere set reacties (de zgn. Koolstof-cyclus):



Opgeteld geeft dit ook



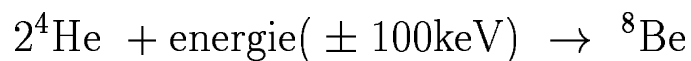
Zulke zware sterren gaan veel minder zuinig met hun waterstof om en hebben veel minder tijd nodig om hun waterstof in het centrale deel op te gebruiken.

Een ster van 10 zonsmassa's straalt zo'n duizend keer zoveel energie uit als de Zon en kan dit dus honderd keer minder lang volhouden (ofwel 10^8 jaar).

De zwaarste sterren zijn zo'n 30 zonsmassa's en daarvoor is die tijd in de orde van 10^7 jaar.

Daarna trekt de ster samen onder invloed van zijn eigen zwaartekracht, omdat er geen energieproductie in het centrum meer is en dus de gasdruk lager wordt.

Maar dan stijgt de temperatuur op den duur weer door vrijkomende gravitatie-energie. Bij zo'n 10^8 K kan dan een nieuwe reactie optreden.



Dit is een “resonantie-toestand” van Beryllium met een lange vervaltijd (10^{-17} sec), die lang is vergeleken bij de botsingstijd in de ster (10^{-21} sec).

Daardoor kan de ster over het ontbreken van stabiele isotopen met massagetal 8 heen komen.



Bij deze temperaturen kan meteen een volgende reactie optreden.



Zo worden in massieve sterren met name koolstof en zuurstof gevormd.

3. Supernovae.

De periode van Helium-verbranding bij zulke massieve sterren duurt ook niet lang (veel minder dan een miljoen jaar).

Weer stopt de energieproductie en trekt de ster samen.

Maar weer neemt daardoor de temperatuur toe als gevolg van gravitatie energie.

Nu wordt de temperatuur zo hoog, dat er een heel scala van kernreacties mogelijk wordt.

Daardoor wordt een deel van de koolstof en zuurstof omgezet in de verdere zware elementen, die we kennen.

Daarbij komt zoveel energie vrij, dat de (zware) ster zichzelf opblaast in een zogenaamde supernova, waarbij de gevormde elementen in het interstellair medium worden geblazen.

Dit gebeurt met snelheden van enkele duizenden km/sec.

Daarbij wordt de ster voor korte tijd zo helder als een heel melkwegstelsel, zodat deze dus miljarden keer zoveel energie uitstraalt als de Zon.

Daarna koelt de ster af en neemt de helderheid af in een periode van maanden.

Het blijkt, dat als we de fysische condities weten en de details van de structuur van atoomkernen en daardoor welke reacties moeten plaatsvinden, we tot in detail kunnen verklaren, waarom de elementen en hun isotopen in de natuur voorkomen in de verhoudingen, die we waarnemen.

Het verklaart dan ook de bovengenoemde kosmische abundanties.

Ik beschouw dit als één van de grootste triomfen van de natuurwetenschap.

Het is voor het eerst beschreven door Burbidge, Burbidge, Fowler en Hoyle in de jaren 50. Fowler heeft er in 1983 een (halve) Nobel-prijs voor gekregen.

4. Samenvatting

Van belang is het volgende te bedenken:

- In zware sterren wordt eerst de waterstof en helium omgezet in koolstof en zuurstof.
- Bij de supernova explosie worden de verdere zware elementen gevormd en in het interstellair medium gebracht.
- De totale evolutietijd van die zware sterren is heel kort vergeleken met de leeftijd van het heelal en van melkwegstelsels.
- Daardoor kon het interstellair medium worden verrijkt met elementen zwaarder dan waterstof en helium.
- Volgende generaties van sterren bevatten dus meer en meer zware elementen en de zware sterren eronder zetten dit proces van nucleosynthese en verrijking van het interstellair medium voort.

- Met name koolstof en zuurstof (maar door de Koolstof-cyclus is er altijd ook een zekere hoeveelheid stikstof aanwezig) komen daardoor in relatief grote hoeveelheid voor.
- Toen dus de Zon en het planetenstelsel ontstond, was er door deze stellaire nucleosynthese een redelijke hoeveelheid zware elementen gevormd in in het interstellair gas gebracht, met name van de elementen noodzakelijk voor het ontstaan van leven.

STRUCTUUR VAN HET PLANETENSTELSEL

De Zon is dus een gemiddelde ster, ontstaan toen er al een hele periode verlopen was, waarin sterren in het Melkwegstelsel hadden kunnen vormen en waarvan de zwaarste voor de aanwezigheid van zwaardere elementen hebben gezorgd.

Net als alle andere sterren is de Zon gevormd uit een wolk gas in het interstellair medium.

Maar daarbij zijn planeten gevormd.

De Zon heeft er negen, waarvan de Aarde een relatief kleine is en de derde van binnen is.

De binnenste kleine planeten (Mercurius, Venus, Aarde en Mars) hebben een vast (rotsvormig) oppervlak.

De buitenste (Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus) zijn gasvormig.

De buitenste (Pluto) heeft meer het karakter van een satelliet, zoals de manen van de grote planeten.

Het planetenstelsel heeft de volgende eigenschappen:

- Alle planeten draaien om de Zon in bijna cirkelvormige banen;
- Alle banen van de planeten liggen ongeveer in hetzelfde vlak;
- Alle planeten draaien om de Zon in dezelfde richting;
- De Zon bevat praktisch alle massa, maar de planeten hebben bijna al het hoekmoment.

VORMING VAN HET ZONNESTELSEL

Het volgende is deels speculatief; we weten niet precies wat er gebeurd moet zijn.

De wolk, waaruit het zonnestelsel ontstond, moet een zekere hoeveelheid hoekmoment hebben gehad.

Dus zal er bij samentrekking snel een sterk afgeplatte schijf zijn ontstaan.

Dit lijkt de verklaring van de bovenstaande eerste drie punten.

Het centrale deel trok samen en daarin werd de temperatuur snel hoger door de vrijkomende gravitatie-energie, waardoor waterstof-verbranding op gang kon komen.

Door de samentrekking moet die proto-zon zeer snel hebben rondgedraaid.

De proto-zon raakte daardoor vrijwel volledig geïoniseerd en door de draaiing en stromingen ontstond een magneetveld.

De gasvormige schijf (de “solar nebula”) werd door de straling gedeeltelijk geïoniseerd, waardoor de buitendelen door de snel draaiende proto-zon worden versneld.

Daardoor werd hoekmoment van binnen naar buiten getransporteerd, waardoor het laatste punt wellicht verklaard kan worden.

VORMING VAN DE AARDE

In de “solar nebula” vormen de zware elementen (hi-ermee is alles bedoeld behalve de lichtste elementen) stofdeeltjes. Dit zien we ook nu in het interstellair medium.

De stralingsdruk van de Zon verdrijft de gasvormige elementen meer en meer naar de buitenste delen.

Deze stofdeeltjes klonteren samen tot grotere eenheden, die uiteindelijk de (binnenste) planeten worden, waaronder de Aarde.

Verder naar buiten is veel gas en daar vormen de grote planeten, zoals Jupiter, Saturnus, enz., die een heel ander karakter hebben (nu bestaan ze vooral uit methaan en ammoniak).

Op de Aarde worden de zuurstof en waterstof vooral in verbindingen gebonden. De gassen (zoals overblijvende waterstof en het helium) worden door de opwarming van de Zon verdampt.

Het centrum van de Aarde wordt steeds warmer als gevolg van de vrijkomende energie bij natuurlijke radioactiviteit.

De gesteenten gassen daardoor uit, vooral in de vorm van reducerende verbindingen als methaan (CH_4), ammoniak (NH_3), vrije stikstof (N_2) en kooldioxide (CO_2).

De atmosfeer bestaat uit zulke zwaardere gassen, omdat dat minder gemakkelijk verdampt dan de waterstof en helium.

Vrije zuurstof is dan nauwelijks aanwezig in de atmosfeer van de vroege Aarde.

Waterdamp komt weinig voor, omdat dat vooral wordt gebonden in gesteenten.

Daardoor wordt de ultra-violette straling van de Zon nauwelijks in de atmosfeer geabsorbeerd.

Onder deze omstandigheden moet dan leven zijn ontstaan en de biologische evolutie een aanvang hebben genomen.