

CHEMIE & MAATSCHAPPIJ

MODULE: De Aarde

Prof. dr. Johan De Grave

Vakgroep Geologie

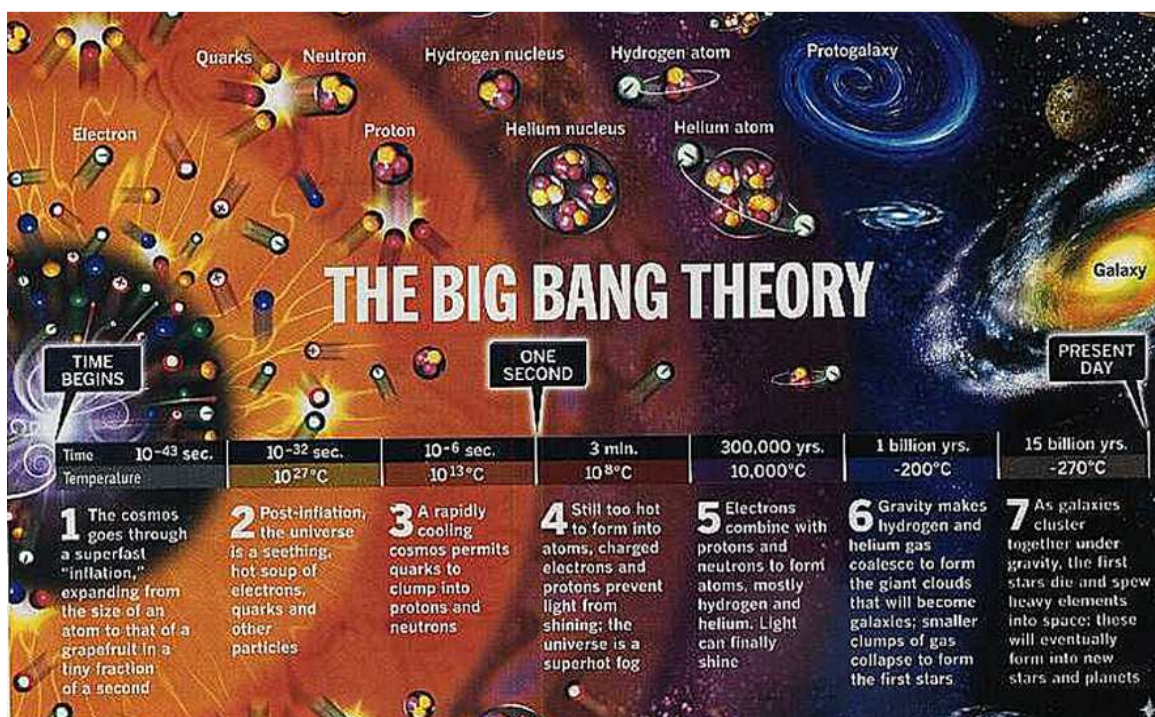
1^{ste} Bachelor Chemie
Academiejaar 2019–20

1.4. Ontstaan van de Aarde en de elementen waaruit ze is opgebouwd

Voordat we ons verder in de aarde en haar chemische verbindingen in de geosfeer zelf kunnen gaan verdiepen, is het van belang om te begrijpen hoe de aarde is ontstaan, aangezien dit zowel bepaalt wat de chemische samenstelling van onze planeet is, welke de temperaturen en drukken er heersen binnen de aarde, en wat haar opbouw is. Deze variabelen hebben een belangrijke invloed op de wijze waarop de aarde werkt en welke (minerale) verbindingen er tot stand komen.

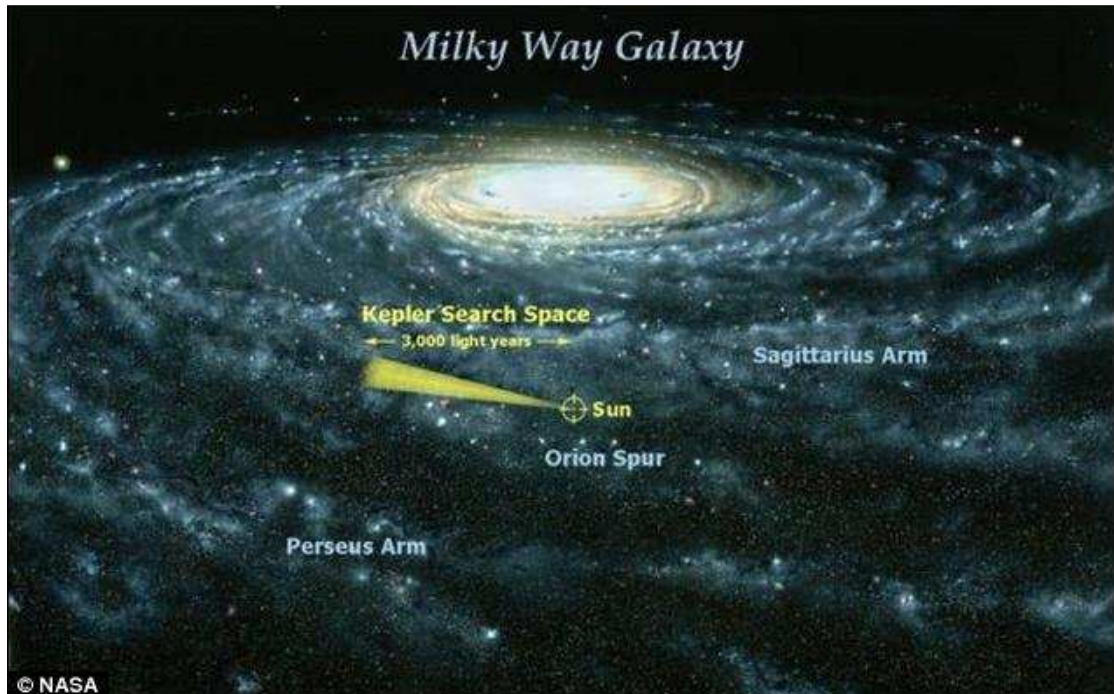
1.4.1. De voorgeschiedenis: ontstaan van het heelal en ons vroege zonnestelsel

Het *universum* ontstond ongeveer 13,7 miljard jaar geleden, bij de zogeheten **Big Bang** of *oerknal* (Figuur 1.10). Hierbij werd plots een onvoorstelbare hoeveelheid energie omgezet in materie, en "ontstonden" tijd en ruimte. Het kleine, zeer jonge universum was zeer heet ($\sim 10^{27}^{\circ}\text{C}$). De eerste materie die fracties van een seconde na de Big Bang ontstond, gedurende de zgn. periode van *inflatie* en afkoeling waren elektronen, quarks en andere subatomaire deeltjes. Een miljoenste van een seconde na de Big Bang was de temperatuur gedaald tot ongeveer 10^{13}°C en was deze laag genoeg opdat subatomaire deeltjes zoals *quarks* konden "samenklonteren" tot *protonen* en *neutronen* (de bouwstenen van atomaire kernen). Naarmate de seconden, minuten en jaren verder tikten, koelde het universum verder af terwijl het expandeerde, maar de temperaturen waren nog steeds te hoog om atomen te gaan vormen. Het universum bleef een superhete brij of mist van energie, straling en geladen, subatomaire deeltjes die verhinderden dat o.a. licht kon ontsnappen. Het universum was nog steeds niet transparant, dit zijn wat astrofysici kennen als de **Donkere Tijden** of Dark Ages. Pas ongeveer 300 tot 400 duizend jaar na de Big Bang recombineren elektronen, protonen en neutronen zich tot de eerste eenvoudige atomen van waterstof (H) en helium (He). Deze elementen worden dus massaal aangemaakt in deze vroeger stadia van het universum en zijn bijgevolg ook de meest abundante elementen.



Figuur 1.10: Schematisch overzicht van de oerknal en de belangrijke stappen in de vorming van materie en sterren.

Het duurde tot ongeveer een half tot één miljard jaar na de Big Bang alvorens gas en stofwolken (vnl. opgebouwd uit H en He) zich gravitationeel samentrokken tot vorming van de eerste sterren en sterrenstelsels. Onze zon is een ster uit een latere generatie van sterren.



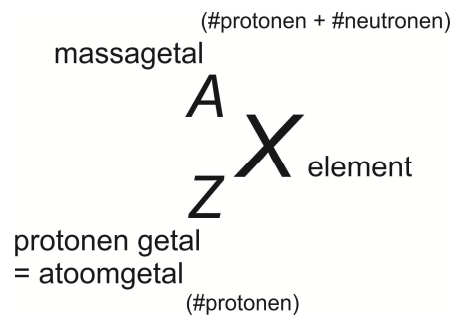
Figuur 1.11: structuur van de spiraalvormige melkweg met een centrale sterrencluster en afgeplatte spiraalarmen. Onze zon is deel van de Orion Spur of Orion zijarm, tussen de Sagittarius en Perseus hoofdarman, op 25.000 lichtjaren van het centrum van de melkweg (deze is zelf 100.000 lichtjaren in doorsnede).

Ons zonnestelsel bevindt zich in de Melkweg (Figuur 1.11), één van ongeveer 80 miljard **sterrenstelsels** of **galaxies**. Dat ene spiraalvormige stelsel, de Melkweg heeft een doorsnede van 100.000 lichtjaren en bevat ruwweg 400 miljard sterren, waarvan de zon er één is – dit om onze eigen belangrijkheid even in perspectief te stellen. Ons zonnestelsel is een relatieve nieuwkomer in een latere generatie van sterren, ontstaan rond 4,56 miljard jaar of Ga geleden.

In SI eenheden is 1 jaar = 1 annum of 1 a; 1 miljoen jaar is dus 1 Mega-annum = 1 Ma, en 1 miljard jaar is dus 1 Giga-annum = 1 Ga. Je zal deze notatie dus vaak terugvinden als we geologische tijd gaan kwantificeren.

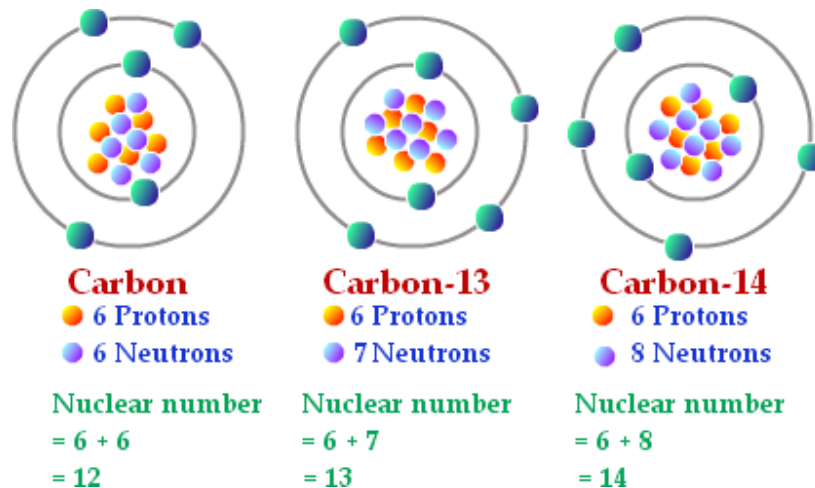
In ons zonnestelsel is er naast de abundante hoeveelheden H en He ook een belangrijke hoeveelheid gerecycleerde materie voor handen. Deze gerecycleerde materie bevat ook (veel) zwaardere elementen dan H en He (dit zijn dus meer complexe clusters van protonen en neutronen). Ons zonnestelsel heeft bij zijn vorming materiaal gebruikt dat al door één of meerdere leven-en-dood cycli van sterren is gebruikt of daar door is ontstaan. De bij de oerknal gevormde elementen H en He zijn immers in de eerste en latere generatie sterren als brandstof gebruikt voor diverse **kernfusie** processen. Bij deze kernfusie worden de lichte elementen als het ware versmolten tot meer complexe en zwaardere elementen. Ook andere processen van **nucleosynthese**, in bijvoorbeeld **supernovae** zorgen voor de aanmaak van steeds zwaardere elementen en isotopen. **Isotopen** zijn deeltjes die tot hetzelfde elementtype behoren (zelfde

Z = zelfde protonengetal) maar die een andere massa hebben (t.g.v. een ander aantal neutronen in de kern) (Figuur 1.12).



Figuur 1.12: algemene notatie m.b.t. een isotoop van een chemisch element.

Bijvoorbeeld, de meest voorkomende isotoop van koolstof is koolstof met massa 12, genoteerd als ^{12}C (Figuur 1.13). Andere C-isotopen zijn ^{13}C en (in minimale hoeveelheden op Aarde), ^{14}C .



Figuur 1.13: de isotopen van koolstof.

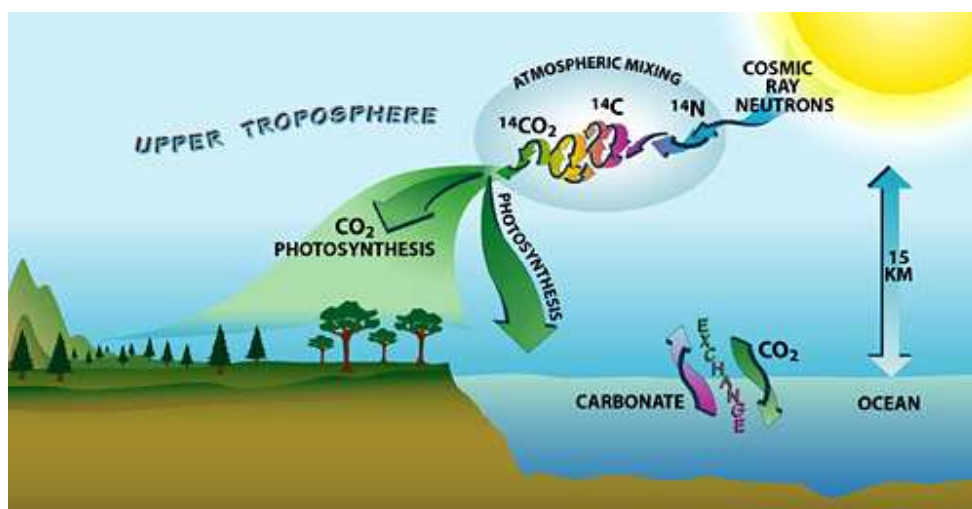
Koolstof is het zesde element in het periodiek systeem (Figuur 1.14), het bevat dus 6 protonen en de meer correcte notatie is $^{12}_6\text{C}$. In onze atmosfeer wordt door interactie van stikstofgas (N_2) met hoog-energetische kosmische straling ook een zwaardere isotoop van koolstof aangemaakt: $^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C}$ (Figuur 1.15). Een proton uit de kern van ^{14}N wordt hierbij omgezet naar een neutron. De totale massa van het deeltje verandert dus niet (blijft 14) maar er verdwijnt een proton en er ontstaat dus een element met één proton minder dan N, i.e. C, maar met een massa 14. Dit is dus $^{14}_6\text{C}$, een zwaardere isotoop van het element koolstof (C). Deze koolstof isotoop is onstabiel (radioactief) en vervalt terug naar ^{14}N . Radioactieve isotopen (zoals ^{14}C of radio-koolstof) vervallen aan constant tempo ($\sim 1/t$). Ze kunnen dus als absolute dateringstechniek worden gebruikt. Wegens de korte halfwaardetijd is de ^{14}C methode vooral van toepassing in archeologische vraagstukken of probleemstelling m.b.t. de zeer recente geschiedenis van de Aarde (de zgn. Kwartaire periode, of de laatste 2,58 miljoen jaar). Isotopische systemen met lange halfwaardetijden zijn zeer belangrijk in het dateren van gesteenten en allerlei geologische processen tot ver terug in de geologische geschiedenis (bv. $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$, $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$, $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$, $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{144}\text{Nd}, \dots$).

Periodic Table of the Elements

1 IA 11A																	18 VIIIA 8A																														
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003																														
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180																														
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948																														
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.833	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.08	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.90																														
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.29																														
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018																														
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium unknown	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Lv Livermorium [293]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown																														
<table border="1"> <tr> <td>57 La Lanthanum 138.905</td> <td>58 Ce Cerium 140.115</td> <td>59 Pr Praseodymium 140.908</td> <td>60 Nd Neodymium 144.24</td> <td>61 Pm Promethium 144.913</td> <td>62 Sm Samarium 150.36</td> <td>63 Eu Europium 151.965</td> <td>64 Gd Gadolinium 157.25</td> <td>65 Tb Terbium 158.925</td> <td>66 Dy Dysprosium 162.50</td> <td>67 Ho Holmium 164.930</td> <td>68 Er Erbium 167.26</td> <td>69 Tm Thulium 168.934</td> <td>70 Yb Ytterbium 173.04</td> <td>71 Lu Lutetium 174.967</td> </tr> <tr> <td>89 Ac Actinium 227.028</td> <td>90 Th Thorium 232.038</td> <td>91 Pa Protactinium 231.036</td> <td>92 U Uranium 238.029</td> <td>93 Np Neptunium 237.048</td> <td>94 Pu Plutonium 244.064</td> <td>95 Am Americium 243.061</td> <td>96 Cm Curium 247.070</td> <td>97 Bk Berkelium 247.070</td> <td>98 Cf Californium 251.080</td> <td>99 Es Einsteinium [254]</td> <td>100 Fm Fermium 257.095</td> <td>101 Md Mendelevium 258.1</td> <td>102 No Nobelium 259.101</td> <td>103 Lr Lawrencium [262]</td> </tr> </table>																		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.965	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967	89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.965	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967																																	
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]																																	
Alkali Metal		Alkaline Earth		Transition Metal				Semimetal		Nonmetal		Basic Metal		Halogen		Noble Gas		Lanthanide		Actinide																											

Figur 1.14: het periodiek systeem der elementen.

Aangezien er dus in ons zonnestelsel duidelijk andere elementen aanwezig zijn dan enkel waterstof en helium (kijk maar naar de samenstelling van de aarde en het periodiek systeem, Figuur 1.14), moeten deze elementen in andere sterren zijn aangemaakt voordat ons zonnestelsel zich begon te vormen. Onze eigen zon bestaat zoals gemeld al 4,56 Ga, en heeft nog een geschatte 5 Ga vóór zich. Andere sterren, die groter zijn, hebben een kortere levensduur. Deze zware sterren zullen op het einde van hun ontstaan exploderen in een zogenaamde supernova. Er was dus m.a.w. genoeg tijd voor andere sterren om te ontstaan en weer te sterven, alvorens ons zonnestelsel zich vormde.



Figuur 1.15: Vorming van ^{14}C in de atmosfeer en herverdeling via de zgn. koolstofcyclus.

1.4.2. Nucleosynthese

1.4.2.1. Kosmologische nucleosynthese

Vermoedelijk begon ons (het?) universum dus met een oerknal (*big bang*), ergens tussen de 10 en 20 miljard jaar geleden; de meeste astronomen houden het op ongeveer 13,7 Ga geleden. Het universum was zeer kort na deze oerknal (10^{-34} seconde, dus inderdaad zeer kort) klein, warm (10^{27} K), en stond onder hoge druk. Op dat moment bestond materie dus enkel nog in zijn meest fundamentele vorm, als quarks. De expansie van het universum ging erg snel, en tijdens deze expansie ging de temperatuur omlaag, zodat na enkele minuten al de atoomkernen van waterstof (H) en helium (He) gevormd werden, en een klein beetje lithium (Li). Dit ging door tot 30 minuten na de big bang. Na enkele honderdduizenden jaren was de temperatuur laag genoeg (~ 3000 K) dat elektronen zich konden vasthechten aan de atoomkernen. Het proces van *kosmologische nucleosynthese* is dus verantwoordelijk voor het H, He en een zeer klein deel van het Li in het universum. Hierdoor komt het dat de ratio van H/He in het universum constant is ($\sim 12,5$). De rest van de elementen zou pas later, door andere processen ontstaan. Hoewel men vroeger op zoek was naar één enkel proces dat het ontstaan van alle andere elementen kon verklaren, neemt men nu aan dat er meerdere processen (die nog steeds aan de gang zijn) aan het werk zijn geweest. We zullen nu bekijken welke processen dat zijn.

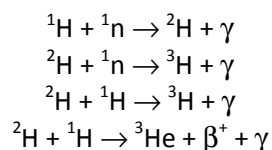
Condensatie van de eerste materie in de vorm van lichtere deeltjes zoals elektronen, positronen en neutrino's begon ongeveer een microseconde na de oerknal bij temperaturen in de grootte-orde van 10^{11} K. Zwaardere *hadronen* (o.a. neutronen en protonen) volgden in de seconden nadien en bij verdere afkoeling en zij werden meer abundant. Eerst bestonden neutronen en protonen in evenwicht met elkaar:

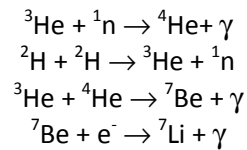


Bij verder afkoeling beneden 10^{10} K verlopen deze reacties in het voordeel van protonen (p^+ of ${}^1\text{H}$). Slechts 2 s nadien was verdere afkoeling verantwoordelijk voor het stilvallen van deze reacties, waarbij de neutron/proton verhouding van het universum werd bevroren op een 1/6 verhouding. Een verhouding die we uiteraard vandaag ook nog steeds waarnemen.

Men veronderstelt dat een klein onevenwicht in de zgn. *hyperzwakke kracht*, materie licht bevoordeelde t.o.v. antimaterie, waardoor de meeste antimaterie werd geannihileerd en materie (zoals wij dat kennen) in het universum de bovenhand kreeg.

Een 100-tal s later, ongeveer 3 minuten na de Big Bang, was de temperatuur gedaald tot 10^9 K en konden onderstaande reacties plaatsgrijpen. Hierbij ontstond dus zwaardere kernen van waterstof isotopen (deuterium $A = 2$; en tritium $A = 3$), van meerdere isotopen van He, Li en Be (in mindere mate – ${}^7\text{Be}$ is immers een onstabiele isotoop die snel vervalt naar ${}^7\text{Li}$). Let wel, dit zijn nucleaire reacties; op dit ogenblik was de temperatuur van het vroege universum nog steeds veel te hoog om recombinitie tussen kernen en elektronen toe te laten. Atomen bestonden dus nog steeds niet.

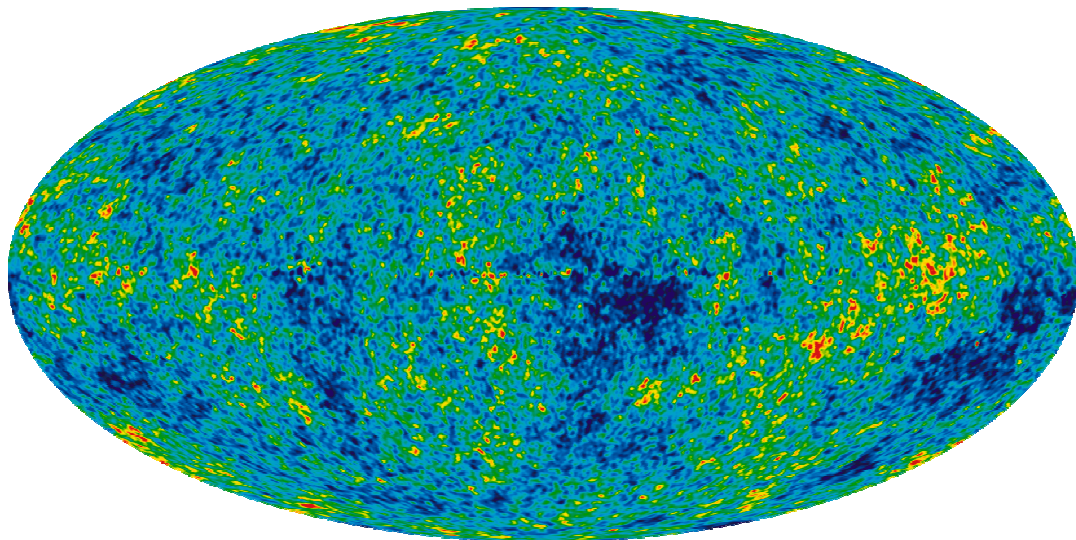




De bovenstaande reacties vielen na ongeveer 20 minuten stil omdat de temperatuur ($\sim 3 \times 10^8$ K) was gedaald onder de drempelwaarde voor deze kernreacties.

Op deze manier vormen zich door de Big Bang en in zijn kielzog, in het vroege universum enkel kernen van H en He isotopen, en in veel mindere mate, sporen van Li (${}^7\text{Li}/\text{H} = 10^{-9}$). Deze elementen werden dus in vaste verhoudingen geproduceerd door de kosmologische nucleosynthese. Deze vaste verhoudingen worden vastgelegd op het ogenblik dat de temperatuur van het vroeger universum dusdanig is gedaald ($\sim 3 \times 10^8$ K) dat nucleaire reacties zoals hierboven aangehaald, niet meer spontaan kunnen plaatsvinden.

Pas als de temperatuur voldoende gedaald was, tot grootte-orde enkele duizenden K, kon recombinitie tussen de positief geladen kernen en elektronen plaats vinden. Pas dan ontstaan dus de eerste atomen H, He (en Li). Het is ook pas na deze recombinitie dat het universum transparant wordt. Het is pas in deze periode, die astronomen de *Recombination Epoch* noemen, dat licht en straling er vrij doorheen konden bewegen. Pas dan kunnen fotonen als het ware uit het plasma ontsnappen (*photon decoupling*) zonder dat zij continu worden verstrooid door interacties met geladen deeltjes. De zeer zwakke zgn. achtergrond straling (cosmic background radiation, Figuur 1.16) toont aldus in feite een eerste beeld van het vroege universum. Zeer kleine temperatuur fluctuaties zijn hierbij te zien (als kleurverschillen, door straling bij andere golflengtes) en zijn gerelateerd aan minieme dichtheidsvariati es (zones waar iets meer materie aanwezig was). Deze worden beschouwd als de zones waar de eerste sterren en sterrenstelsels zouden "ontkiemen".



Figuur 1.16: kaart van de kosmische achtergrondstraling (microgolf spectrum) van ons universum.

1.4.2.1. Stellaire nucleosynthese

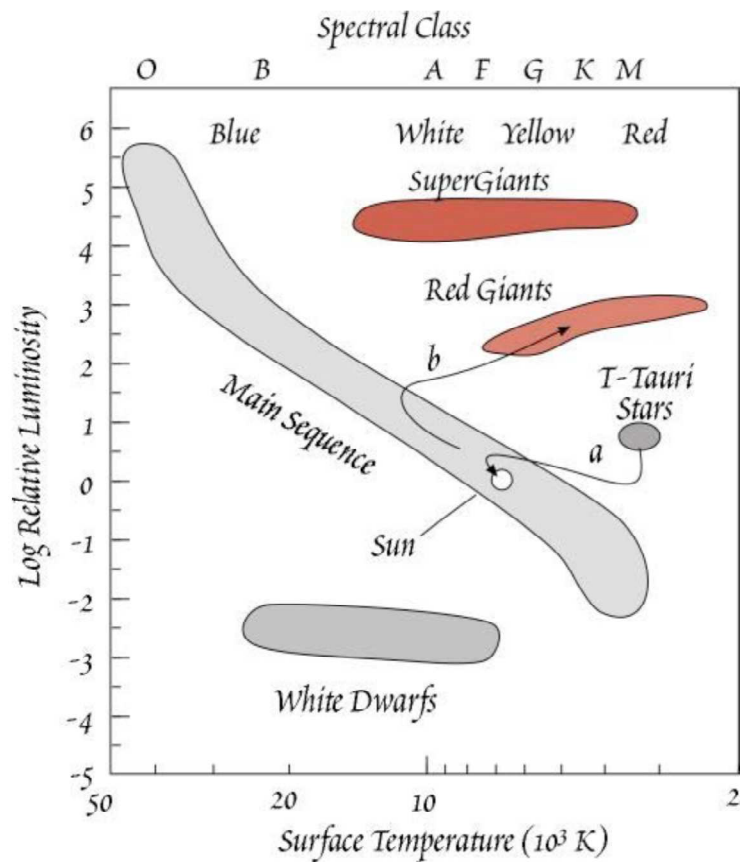
Ongeveer 500 miljoen jaar na de oerknal begonnen zich de eerste sterren te vormen. Door de hoge temperatuur in de kern van deze sterren (10-20 miljoen K) kan daar waterstof 'verbrand' worden tot andere producten en zo worden de zwaardere elementen gevormd in een proces van **stellaire nucleosynthese**.

In deze voormelde periode bestond het universum uit een ijle H/He gasnevel waar sommige zones net iets dener waren dan andere (Figuur 1.16). Sterren ontstaan door gravitationele instorting van deze meer dene gaswolken. Bij vergevorderde gravitationele contractie wordt het gas zodanig samengedrukt dat heel hoge temperaturen worden bereikt (miljoenen K). Bij deze condities kunnen kernfusiereacties in gang treden (zie verder) die massale energiewinst opleveren. Deze energie uitbarsting (het schijnen van de ster) heeft de neiging om het samengebalde gas van de proto-ster thermisch ongecontroleerd te laten expanderen, dit terwijl gravitationele contractie de materie verder wil doen inklappen. Een stabiele ster ontstaat dus bij het fijne evenwicht tussen thermische expansie en gravitationele contractie. In de hete kern van deze sterren kunnen dan de fusieprocessen verder lopen en kunnen alzo nieuwe, zwaardere elementen ontstaan.

Merk hierbij op dat de oppervlakte temperatuur van de ster veel koeler is (~5000-6000 K) dan de kerntemperaturen (miljoenen K). Deze oppervlakte temperatuur dicteert de lichtkleur (spectrum) en gebaseerd hierop kunnen sterren worden ingedeeld in verschillende klassen, van warm naar koud (van golfengtes in de blauwe naar rode zones in het zichtbaar licht spectrum): O, B, A, F, G, K, M klasse sterren (nog verder onderverdeeld in subklassen). Dit zijn de zgn. **spectraalklassen**. Onze zon is een klasse G ster. Sterren worden ook ingedeeld in **populaties**: Populatie I sterren zijn sterren van de tweede of latere generaties en bevatten dus meer zwaardere elementen, overgeërfd uit de eerste generatie sterren die Populatie II sterren worden genoemd. Onze zon is een Klasse G, Populatie I ster.

De intensiteit van het licht dat uitgestraald wordt door een ster is zijn **luminositeit**. Een zgn. **Hertzsprung – Russell diagram** (zie figuur 1.17) zet deze luminositeit (log-schaal) uit in functie van de golfengte van het uitgestraalde licht (kleur van de ster; dus zijn spectraalklasse). In dit sterren classificatiediagram tekent zich een zone af waar de meeste sterren (>90%) in plotten, dit is de **Main Sequence**. Deze sterren worden dan ook **Main Sequence sterren** genoemd. Onze zon is ook een dergelijke ster.

Warmere sterren zijn energetischer en stralen sterker (hogere luminositeit) en plotten dus linksboven in deze Main Sequence. Alle Main Sequence sterren worden gekenmerkt door **H-burning** (waterstof-verbranding): het proces waar kernfusie van H, He zal produceren. Hoog energetische sterren zijn ook groter (meer gas, sterkere gravitationele contractie, dener, hogere energieën). Sterren kunnen bijgevolg ook ingedeeld worden gesteund op hun massa. Onze zon is een relatief lichte, kleine ster. Haar massa (solar mass, M_{\odot}) wordt vaak als eenheid gebruikt om de massa van andere sterren te beschrijven. Zware, energetische sterren branden ook veel sneller op en hebben dus een kortere levensverwachting. Onze Zon is ongeveer 4,56 Ga oud (ouderdom van de aarde en dus ons zonnestelsel). De zon zal naar verwachting nog een goede 5 Ga overleven, en dus een totale ouderdom van ongeveer 10 Ga halen. De grootste en zwaarste sterren (~100 M_{\odot}) leven bijv. slechts een paar Ma; zeer kleine sterren (~0,01 M_{\odot}) bereiken ouderdommen van meerdere tientallen Ga.



Figuur 1.17: Hertzsprung-Russel diagram en spectraal klassen van sterren.

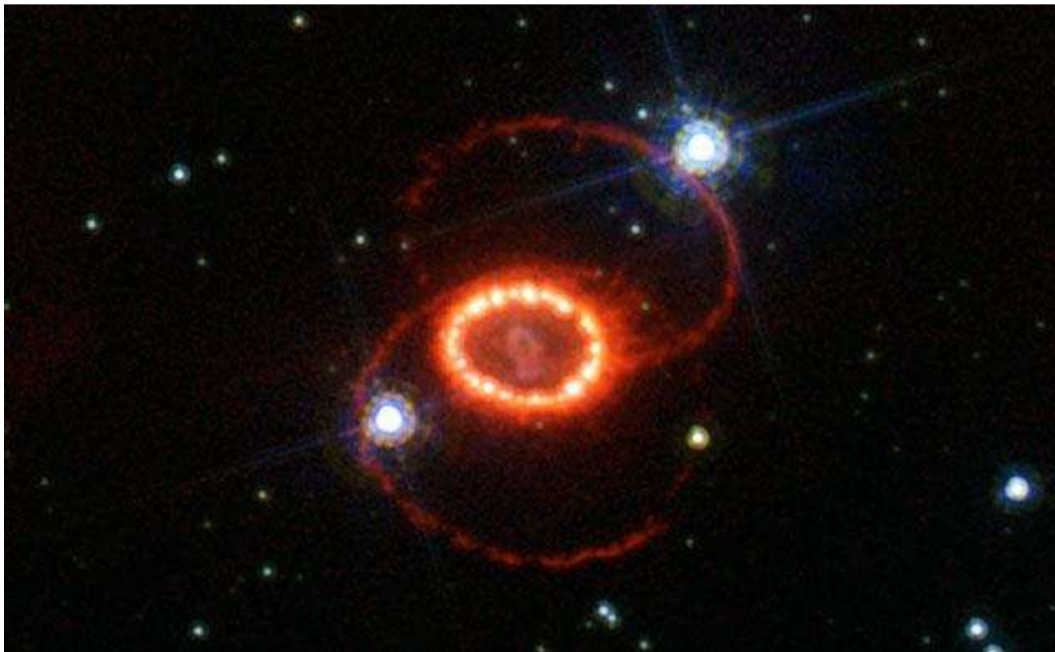
Zoals uit het Hertzsprung – Russell diagram blijkt, zijn er twee belangrijke uitzondering op de Main Sequence sterren: nl. de **Rode Reuzen** en de **Witte Dwarfen**. Beide typen zijn “uitgedoofde” sterren die in hun kern alle H hebben opgebrand. Terwijl er nog H in de buitenste lagen van de ster kan bestaan, is de kern in eerste instantie tot He verworden. Convectieve menging van de buitenste lagen en de kern wordt onmogelijk gemaakt door de grote dichtheidsverschillen ($H/He \sim 1/3$ tot $1/4$). De “dode kern” begint dan een proces van verdere, verregaande gravitationele instorting, terwijl kortstondige H-burning in de buitenste lagen kan opstarten om de ster nog tijdelijk te stabiliseren.

In de instortende He-kern van de ster, kan er, als de dichtheden en temperaturen hoog genoeg zijn geworden, **He-burning** (He verbranding of -fusie) plaatsvinden. Hierbij worden dus de He-nucleï gefuseerd tot zwaardere elementen en blijft de instortende kern weer even stabiel. De expanderende buitenste lagen van de ster koelen af, en het koelere oppervlak straalt “koeler” (lagere golflengte) licht uit. Dit resulteert in het zgn. Rode Reus stadium van de ster. Onze zon zal dit stadium ook bereiken binnen ongeveer 5 Ga en daarbij aanzwellen tot zij zelfs de regio van de huidige aardbaan zal innemen. Het Rode Reus stadium van een ster duurt ongeveer 1 tot 100 Ma.

Wanneer ook het He is opgebrand in de kern van de ster, hangt het sterk van de sterrenmassa af wat er nadien staat te gebeuren. Kleine sterren (zoals onze zon) ondergaan verdere contractie zonder dat er nieuwe kernfusie reacties mogelijk worden. Door de extreme contractie ontstaat een zeer kleine, dichte “dode” ster, waarbij het oppervlak toch nog extreem kan opwarmen. Zo ontstaat een Witte Dwerg.

Zware, grote sterren (vanaf ongeveer $4 M_{\odot}$), zullen na de Rode Reus fase explosief “sterven” in een proces dat een **supernova** wordt genoemd. Hierbij explodeert de ineensklappende ster met ontzettend grote energie: men schat dat een supernova (die doorgaans slechts enkele dagen duurt) meer energie vrijstelt dan een volledig sterrenstelsel (met miljarden sterren!) in dezelfde periode. Een supernova zendt hierbij massaal veel hoogenergetische straling, (sub)atomaire deeltjes en een enorme schokgolf de interstellaire ruimte in.

Onderstaande foto (Figuur 1.18) toont de iconische “1987A” supernova, gefotografeerd door de Hubble ruimtetelescoop in 1994. Supernova 1987A was een supernova die eerder, op 24 februari 1987 werd ontdekt in de Grote Magellaanse Wolk. Op ouder beeldmateriaal kon men opzoeken welke ster geëxplodeerd was, waarschijnlijk was dat Sanduleak $-69^{\circ}202a$, een blauwwitte superreus (doorsnede 40 maal die van de zon, spectraalklasse B3, oppervlaktetemperatuur 16 000 K). Nog een vergelijking om bij te duizelen: de energie-uitbarsting van de 1987A supernova in zijn eerste 10 s was meer dan 100 keer de totale energie die de zon in heel haar 10 Ga bestaan zal uitzenden...



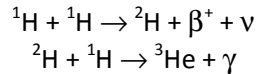
Figuur 1.18: 1987A supernova, gefotografeerd door de Hubble ruimtetelescoop (1994).

Het is in de He-burning processen in de Rode Reus fase en in hoog-energetische processen van supernovae dat de (stellaire) nucleosynthese van de zwaardere elementen zich uiteindelijk kan voltrekken.

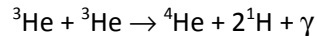
1.4.2.2. H-burning of pp-processen en He-burning

Dit is de klassieke kernfusie die van start gaat in veruit de meeste sterren met de fusie van protonen of ^1H kernen. Dit is zeer sterk verwant met de fusieprocessen eerder beschreven in de kosmologische nucleosynthese. Dit is dus het belangrijkste proces in de energiehuishouding van een ster en komt voor in eerste en ook latere generatiesterren zoals onze zon. Het proces start op in een contractionele

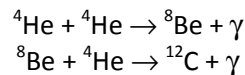
gaswolk wanneer temperaturen van 10 a 20 miljoen K en dichtheden van 6 g/cm^3 bereikt worden in de kern van de (proto)ster. *H-burning* of *pp-processen* omvatten volgende reacties:



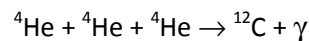
In mindere mate kan ook volgende reactie plaatsvinden:



Deze *He-burning* reacties brengt opnieuw protonen of ${}^1\text{H}$ kernen in het systeem. Wanneer alle H in de kern uiteindelijk is opgebrand bestaat de kern grotendeels uit He, en vangt de Rode Reus fase aan. De buitenste lagen van de ster expanderen en koelen af, terwijl de gravitationele contractie van de He-kern uiteindelijk andere He-burning reacties op gang brengt. De temperatuur in de kern is hierbij terug verder opgelopen tot ongeveer 100 miljoen graden K.

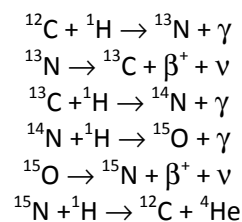


Of aangezien halfwaardetijd van ${}^8\text{Be}$ slechts 10^{-16} s is, is dit een verwaarloosbare tussenstap en:



1.4.2.3. CNO- en gerelateerde processen

Voorgaand proces is cruciaal in het ontstaan van alle elementen zwaarder dan He; als het niet plaats had gevonden was het universum is essentie nooit verder gekomen dan He en H. De processen in deze eerste-generatie sterren gingen echter niet verder dan de productie van koolstof. Het is pas bij de volgende generatie sterren, Populatie I sterren, dat zwaardere elementen in de stellaire nucleosynthese worden aangemaakt. De volgende generatie sterren die ontstond gebruikte, naast het klassieke pp proces of He-burning, het koolstof immers als een soort katalysator voor het zogeheten **CNO proces**. Hierbij wordt uiteindelijk netto van 4 H-atoomkernen, 1 He-atoomkern gevormd, maar op een wat ingewikkelder manier dan bij de gewone H-burning:

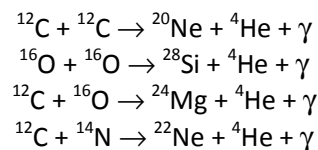


In deze serie is de reactie van ${}^{14}\text{N}$ naar ${}^{15}\text{O}$ de langzaamste, zodat er een netto productie is van ${}^{14}\text{N}$. Dit is dan ook het frequentst voorkomende isotoop van stikstof in de natuur). Voorgaande reacties maakten gebruik van waterstof, dus zijn nog steeds een vorm van *H-burning*.

Op een gegeven moment is de waterstof in de kern van deze Populatie I ster ook verbruikt, en kunnen voorgaande reacties niet meer plaatsvinden. De (latere generatie) ster is nu ook een Rode Reus

geworden. Nu zal er He verbrand worden, volgens het eerdergenoemde proces waarbij 3 He kernen koolstof produceerden. Bij zware latere generatie sterren (die dus C, N en O bevatten uit de CNO reacties) kan via He-burning (dus telkens laten versmelten met een ${}^4\text{He}$ kern) ook ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$ en ${}^{24}\text{Mg}$ gevormd worden. De zwaarste nuclide die gevormd kan worden door deze *alpha-capture* (invangen van een ${}^4\text{He}$ atoomkern) is ${}^{56}\text{Ni}$, dat onstabiel (= radioactief) is en tot ${}^{56}\text{Fe}$ vervalst. Een alfa (α) deeltje is een kerndeeltje, een cluster van 2 protonen en 2 neutronen.

Indien deze tweede (of latere) generatie ster voldoende zwaar is ($>11M_{\odot}$), kan de kern verder contracteren tot dichtheden van duizenden kg/cm^3 en temperaturen bereiken van meer dan 600 miljoen K. In deze omstandigheden kan zelfs C en O fuseren, dit is **C-** en **O-burning**:

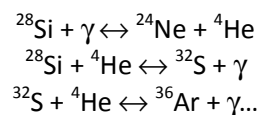


Andere, analoge reacties (waaronder ook *Ne-burning*) kunnen in deze fase ook kernen van Na, Al, P, S en K aanmaken. Uit het bovenstaande, wordt vooral ${}^{28}\text{Si}$ aangemaakt. Al deze reacties produceren grote hoeveelheden energie die de ster stabiel houden en catastrofale instorting blijven tegengaan (uitstellen). Dit uitstel van executie verloopt op een schaal van slecht jaren/maanden.

1.4.2.4. Het e-proces

Na de voornoemde processen kunnen zware, tweede generatie sterren massieve Si-kernen bezitten (vnl. uit de reactie ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He} + \gamma$) die verdere contractie kan ondergaan als deze processen uiteindelijk stilvallen. Bij temperaturen van meer dan een miljard K in hun contracterende kern, en dichtheden die meer dan $10\,000\text{ kg}/\text{cm}^3$ bereiken, kan op den duur nog **Si-burning** plaatsvinden; dit is het **e-proces** ("e" van evenwicht/equilibrium). Dit proces houdt de ster in uiterste omstandigheden nog maar een paar dagen "in leven". Ook dit nucleosynthetisch proces verloopt maximaal tot ${}^{56}\text{Ni}$ dat in een paar dagen vervalst naar ${}^{56}\text{Fe}$. Deze laatste bezit hierbij de meest stabiele van alle kernen (ideale nucleonen configuratie = hoogste bindingsenergie per nucleon).

Het e-proces omvat bv. volgende (evenwichts)reacties:

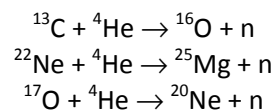


Bij deze processen worden dus vooral kernen van isotopen met een massa van een veelvoud van 4 gevormd en Z een veelvoud van 2. Dit zijn zeer stabiele elementen/isotopen en zijn dan ook zeer abundant in de natuur. Met ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ dat hierbij zoals vermeld de kroon spant omdat de bindingsenergie per nucleon in deze kern het hoogst is van alle kernen. Het wordt dus niet versmolten in kernfusie reacties.

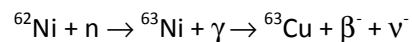
1.4.2.5. Het s-proces

Enkel in voldoende zware tweede of latere generatie sterren, met dus reeds voldoende hoeveelheden zware elementen, kan ook een bijkomend nucleosynthetisch proces plaatsvinden. Dit is het **s-proces** of *slow-proces* waarbij reeds bestaande of gevormde kernen op een “trage” wijze neutronen invangen. Deze zgn. *neutron capture* gebeurt vooral in de eindstadia van de Rode Reus fase. Dit proces produceert door het invangen van een neutron bijgevolg zwaardere isotopen van bestaande elementen, die eventueel instabiel kunnen zijn en door β^- verval (een radioactief proces waarbij de facto een neutron tot een proton wordt omgezet) uiteindelijk ook aanleiding kunnen geven tot zwaardere elementen ($Z + 1$). Dus op deze wijze kunnen ook voor het eerst elementen zwaarder dan Fe worden aangemaakt.

De neutronen zelf worden geproduceerd in reacties van het type:



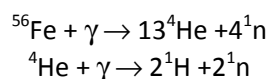
Als voorbeeld van het s-proces kunnen we eens kijken naar (Figuur 1.19):



Hierbij is ${}^{63}\text{Ni}$ instabiel en vervalt snel tot stabiel ${}^{63}\text{Cu}$ door de productie van een elektron en een antineutrino. Vervolgens kan ${}^{63}\text{Cu}$ weer een neutron invangen om het instabiele ${}^{64}\text{Cu}$ te vormen, dat kan vervallen tot stabiel ${}^{64}\text{Zn}$ of stabiel ${}^{64}\text{Ni}$. Dit proces van invangen van neutronen (één neutron per reactie) is dus relatief langzaam, en vindt plaats wanneer de neutronen flux laag is, zodat instabiele atomen de tijd krijgen om te vervallen tot stabielere nucliden voordat het volgende neutron ingevangen wordt. Het effect van deze s-proces reacties is een zig-zag beweging door de nucliden kaart (zie figuur 1.19).

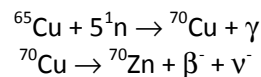
1.4.2.6. Het r-proces

Het r-proces is één van de processen die enkel kan gebeuren fracties van een seconde voor en tijdens een supernova (dus enkel bij voldoende zware sterren). Wanneer Si-burning stilvalt omdat de reacties stoppen bij het zeer stabiele ${}^{56}\text{Fe}$, wordt de ineenslopende dense kern van een contracterende zware ster niet meer gestabiliseerd door exotherme reacties. Gravitatie neemt de bovenhand en de intussen sterk gekrompen, gecompecteerde kern van een paar 1000 km doorsnede wordt in fracties van een seconde verder ingeklapt tot een sfeer van hoogstens 100 km doorsnede. Hierbij wordt de materie dusdanig gecompecteerd dat dichtheden die significant hoger zijn dan de dichtheid van atoomkernen (honderden miljarden kg/cm^3 ! en dit in tienden van een seconde) worden bekomen. Het is de “rebound” van deze instorting die de kern laat uiteenspatten en een enorme schokgolf de interstellaire ruimte instuurt. Een groot deel van de dense kernmaterie wordt hierbij door zgn. foto-desintegratie vernietigd en hoog-energetische (sub)atomaire deeltjes worden aldus mee vrijgesteld. Zelfs ${}^{56}\text{Fe}$ wordt niet ontzien:

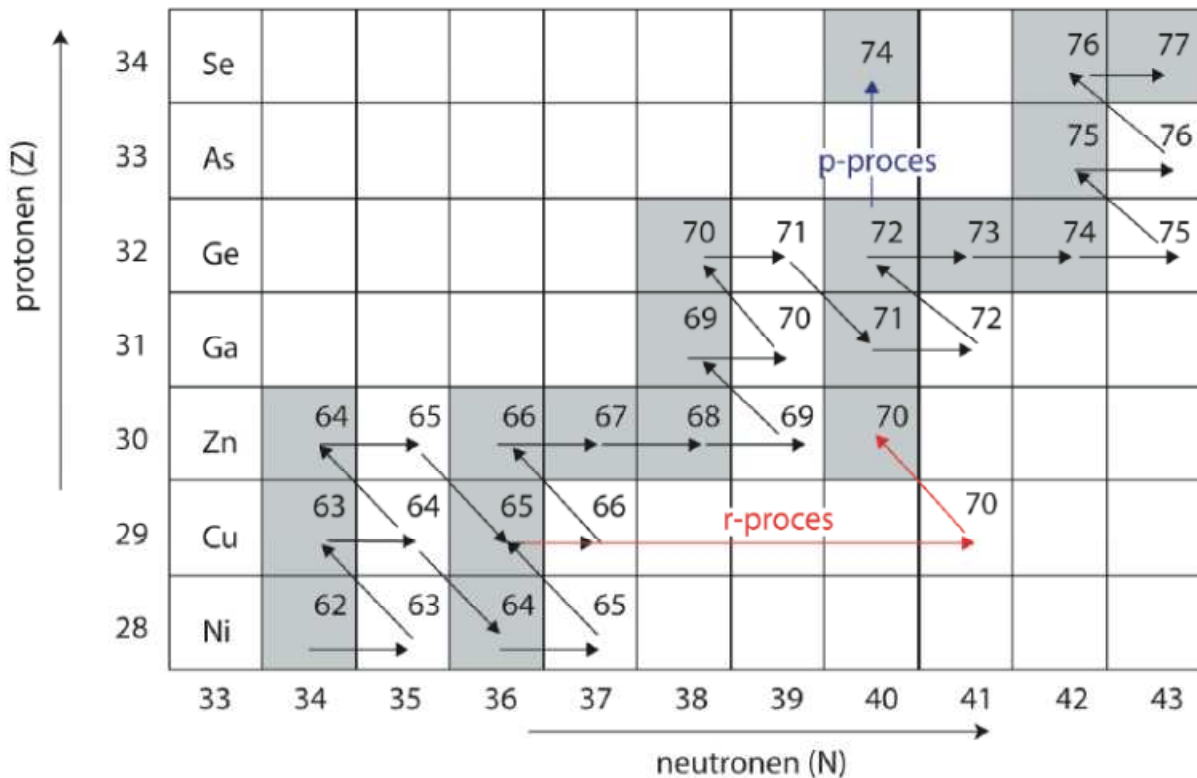


Deze reacties stellen dus grote hoeveelheden hoog-energetische, vrije neutronen (^1_0n) en protonen (^1_1H) vrij. Deze hoog-energetische, hoge neutronenflux faciliteert dan weer het ingevangen van neutronen door elementen in de flarden van de buitenste sterrenlagen en zgn. explosieve nucleosynthetische processen komen op gang. Deze *neutron capture* aan dit snel tempo (sneller dan het vervaltempo van de geproduceerde onstabiele kernen) wordt het **r-proces** of *rapid-proces* genoemd.

Doordat het proces zo snel gaat krijgen instabiele isotopen dus niet langer de tijd om te vervallen voordat ze het volgende neutron hebben ingevangen. Hierbij kan bijvoorbeeld het stabiele ^{65}Cu dus opeens meerdere neutronen invangen om zichzelf terug te vinden als het instabiele ^{70}Cu , dat dan vervalt tot het stabiele ^{70}Zn :



Het r-proces produceert de zwaarste (neutronen-rijkste) isotopen van een gegeven element en resulteert in grote sprongen in de nucliden kaart richting hogere neutronengetallen (zie figuur 1.19).

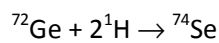


Figuur 1.19: nucliden kaart met aanduiding van de zgn. s, r en p-nucleosynthetische processen.

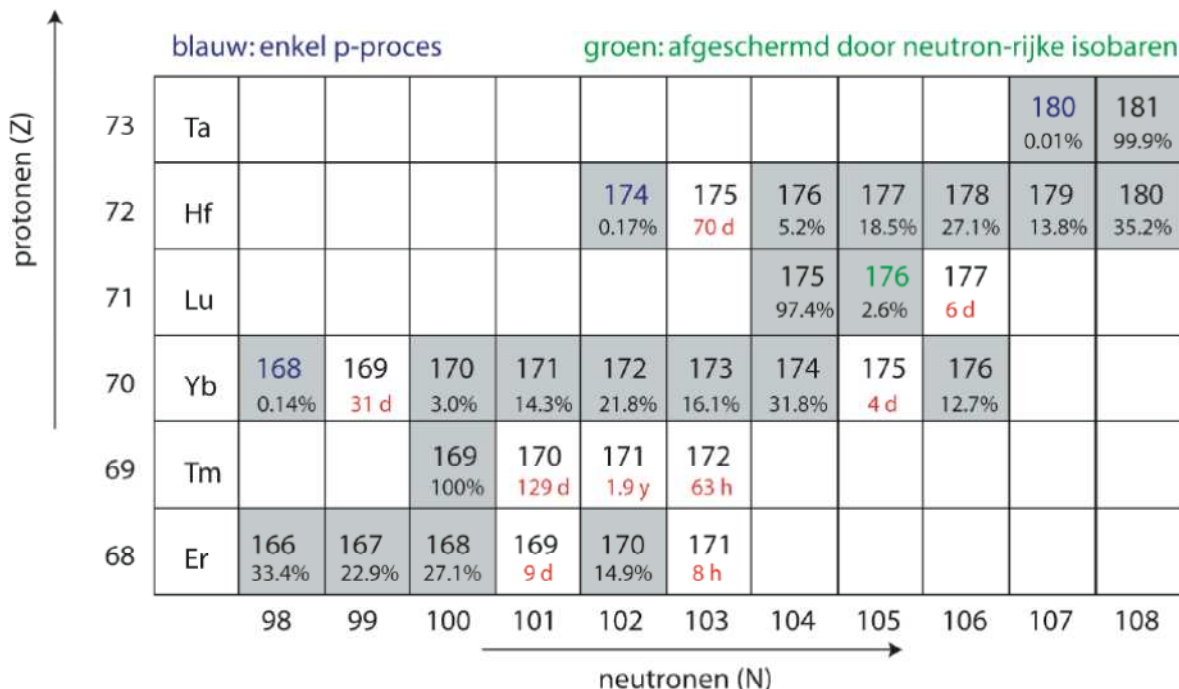
Het r-proces duurt slechts enkele seconden (1 – 100 s) en vindt plaats gedurende de kortstondige piekactiviteit van de supernova. Aan dit proces is een maximum verbonden en isotopen met $Z > 90$ zijn zeer onstabiel in de hoge neutron en proton-fluxen en verbrossen door nucleaire fissie tot opnieuw lichtere fragmenten. Kernen van isotopen met zgn. *neutron magic numbers* (stabiele kernen met specifieke neutrongetallen en -configuraties) worden in dit proces makkelijk aangemaakt, zijn zeer stabiel en zijn in de natuur bijgevolg heel abundant. Voorbeelden zijn $N = 50, 82, 126$, corresponderend aan isotopen van Sr, Zr, Ba en Pb.

1.4.2.7. Het p-proces

Het p-proces is ook een voorbeeld van een proces dat plaatsgrijpt in de piekmomenten van de supernova. Het gaat hier specifiek om het invangen van één of meerdere protonen (p of ^1H) in bestaande atoomkernen. Dit proces is uiteraard veel moeilijker te bewerkstelligen omdat het heel wat energie vraagt om de Coulomb repulsiekrachten te overwinnen om een positief proton in te vangen in een hoog positief geladen kern. De proton-fluxen moeten dan ook zeer hoog en hoog-energetisch zijn. De protonen worden geproduceerd door foto-desintegratie in de ontploffende sterrenkern zoals aangegeven in de voorbeeldreactie van ^{56}Fe in vorige paragraaf. De productie van zwaardere kernen via het p-proces is dan ook significant lager dan bij het r-proces. In tegenstelling tot dit r-proces, zullen door het p-proces lichtere isotopen van een element worden aangemaakt (zie figuur 1.19). Een voorbeeld is de productie van ^{74}Se via:



Aangezien productie via proton capture in het p-proces beperkt is, zullen lichte isotopen die enkel via dit proces worden aangemaakt een lage abundantie hebben (zie figuur 1.20). Ook zgn. *afscherming* of *shielding* door stabiele, neutron-rijke isobaren inhiberen de productie van sommige isotopen, wat resulteert in hun relatief lage natuurlijke abundantie (zie figuur 1.20). Isotopen die door meerdere processen gevormd kunnen worden, zijn bijgevolg in grotere hoeveelheden aanwezig dan de isotopen die door slechts één soort nucleosynthetisch proces gevormd kunnen worden. Zo kan ^{174}Yb (31,8% van totale Yb) door zowel het s- als het r-proces gevormd worden, en ^{176}Yb (12,7%) enkel door het r-proces. ^{176}Lu komt ook maar weinig voor, omdat de stabiele isobaar ^{176}Yb hem afschermt van productie door het r-proces, gevolgd door β - verval.



Figuur 1.20: nuclidenkaart met voorbeelden van en abundanties van isotopen in relatie tot hun vormingsprocessen (halfwaardetijden instabiele isotopen weergegeven in jaar, y, dagen, d, of uur, h).

In wat overschiet van de ingeklapte sterrenkern, is de gravitationele contractie dusdanig groot dat elektronen recombineren met protonen om nieuwe neutronen te vormen die zo samen met de reeds bestaande, neutronen, een dichte, kleine bal neutronen te vormen: een **neutronenster**. Deze ontwikkelt zich in het centrum van de expanderende supernova. De temperaturen hierin lopen op tot honderden miljarden K. Door de catastrofale instorting tot zeer kleine dimensies en de wet van behoud van impulsmoment, draait een neutronenster aan waanzinnige snelheden van meer dan 2000 omwentelingen per seconde. Dit terwijl de neutronster continu elektromagnetische straling blijft uitzenden. Op dergelijke wijze ontstaat een zgn. **pulsar**, hun straling wordt als het ware met grote regelmaat pulserend waargenomen.

Dit proces kent in het geval van de meest massieve sterren een finaliteit in een **zwart gat**. Dit is in feite de complete contractie van een massieve neutronster tot een **singulariteit**, een virtueel punt met oneindig kleine diameter waarin alle massa is samengeballt. Deze oneindige dichtheid zorgt er voor dat zelfs fotonen (licht) niet aan zijn attractie kunnen ontsnappen – vandaar de naam.

1.4.2.8. Nucleosynthese in de interstellaire ruimte

Wat uit het voorgaande opvalt, is dat enkele van de lichte elementen bij deze processen niet of in extreem lage hoeveelheden worden gevormd. Het betreft Li, B en Be. Alhoewel kleine hoeveelheden ${}^7\text{Li}$ in of kort na de Big Bang zijn aangemaakt, en dat onstabiele, snel vervallende Be-isotopen een rol spelen als kortstondige tussenstap in meerdere reacties, worden de elementen dus niet of nauwelijks via eerder genoemde processen geproduceerd. Desalniettemin vinden we ze in de natuur terug, weliswaar met zeer lage abundanties. De isotopen van deze drie elementen worden vnl. aangemaakt door interactie van zwaardere kerndeeltjes met hoog-energetische kosmische straling (vnl. γ). Deze straling en interactie veroorzaakt een proces van **spallatie**, of het afsplinteren van kleinere kerndeeltjes. Deze kleinere kerndeeltjes kunnen zo toevallig de nucleonen-configuratie hebben van Li, B of Be isotoopkernen en als deze elektronen invangen, ontstaan deze elementen in de interstellaire ruimte. Dit is dus bij lage drukken en temperaturen die maken dat deze elementen kunnen blijven bestaan en niet worden opgebruikt bij andere nucleosynthetische reacties.

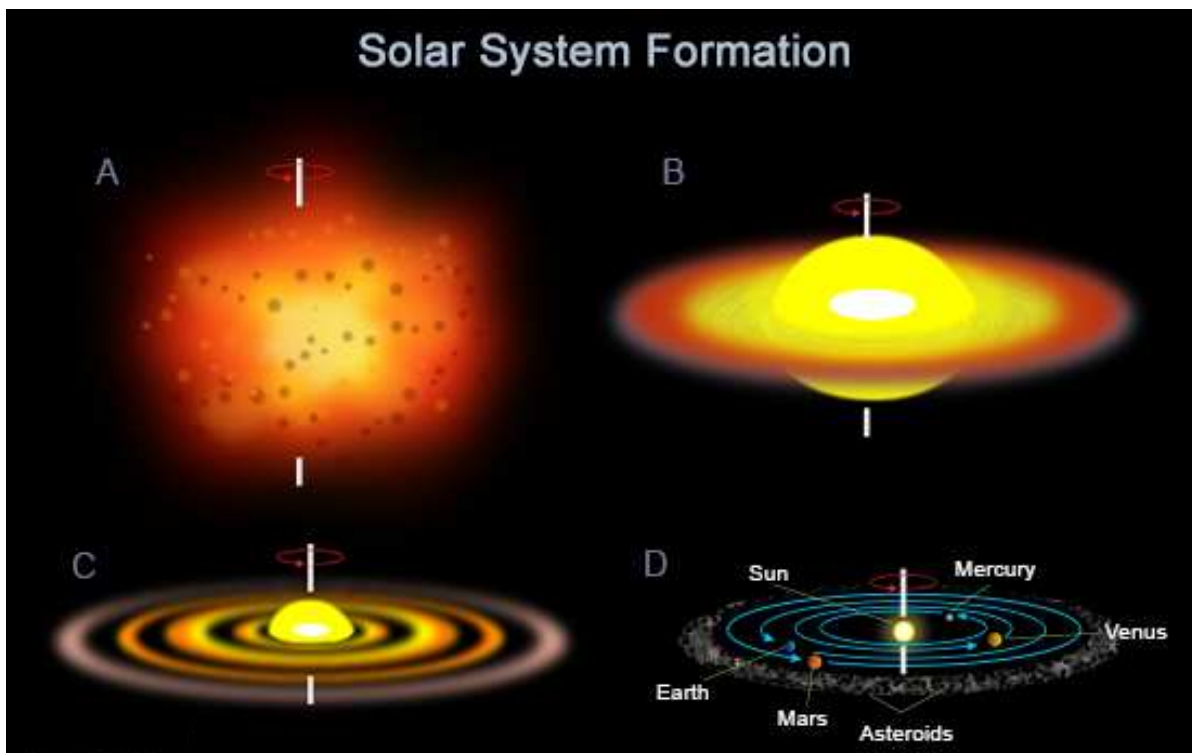
1.4.3. Vorming van een ster (onze zon)

De eerste stap in de vorming van een ster in het algemeen, en dus ook voor de zon in ons zonnestelsel, is de aanwezigheid van een **dichte gaswolk** ("dense cloud") met 10^9 - 10^{12} deeltjes/ m^3 . Dit klinkt misschien niet speciaal dicht en dens in eerste instantie, maar in de gewone interstellaire ruimte zweven gemiddeld niet meer dan 10^6 deeltjes/ m^3 . Wanneer we het over "deeltjes" hebben, bedoelen we eigenlijk gasmoleculen, en van deze gasmoleculen is het waterstof molecuul (H_2) verreweg de meest abundante. Er zijn vrij veel van dit soort gaswolken in de Melkweg, dus het beginmateriaal voor een ster is ruimschoots voor handen. Deze gaswolken bevinden zich in een roterende beweging, omdat ook de hele Melkweg ronddraait.

De volgende stap is dat deze dichte of dense gaswolk gravitationeel in elkaar begint te storten doordat de deeltjes elkaar aantrekken (Figuur 1.21). Nu trekken deeltjes elkaar altijd aan, maar in de meeste dergelijke gaswolken of **sterrennevels** is er een dynamisch evenwicht tussen de aantrekkingskracht van de deeltjes onderling, en de toevallige botsingen die de deeltjes weer uit elkaar drijven. Voordat de deeltjes elkaar effectief aan beginnen te trekken en gravitationele instorting kan initiëren, is er een minimumgrootte en dichtheid van de wolk nodig. Daarbij denkt men dat schokgolven, bijvoorbeeld

afkomstig van een naburige exploderende ster of supernova, de eerste aanzet kunnen geven tot het dener maken en uiteindelijk gravitationeel instorten van de gaswolk.

Wat de aanleiding ook moge zijn, de roterende gaswolk of sterrennevel begint samen te trekken of contractie te ondergaan, en hierdoor zal deze wolk sneller beginnen te draaien (dit is de wet van behoud van hoekmoment, die door kunstschaatsers regelmatig wordt gedemonstreerd). Doordat de wolk sneller gaat draaien, wordt deze door centrifugale krachten meer en meer afgeplat tot een schijf, waarbij er ook nog steeds materiaal gravitationeel naar het midden van deze schijf migreert (Figuur 1.21). Men noemt dit proces **disc dissipation**. De dichtheid en de druk in het midden van de schijf wordt dus steeds groter, waardoor er meer botsingen komen tussen deeltjes in dit gebied van de schijf. Door de botsingen wordt de temperatuur in het midden van de schijf ook groter, en wordt er een zogenaamde **protoster** gevormd. Dit is dus niks anders dan een sterk verhitte, dense gaswolk in het midden van een afgeplatte, snel roterende schijf gas en stof.



Figuur 1.21: Schematisch overzicht van de vorming van een ster (onze zon) uit een sterrennevel (zonnenevel) en haar planetair stelsel (zonnestelsel). A – gravitationeel samentrekken van de zonnenevel met steeds snellere rotatie tot gevolg. B – de fase van disc dissipatie (zie tekst). C – de protozon vormt zich wanneer in haar dichte, hete nucleus, kernfusie processen (H-verbranding) op gang komen. D – de restanten van materie in de circum-solaire schijf amalgameren tot proto-planetten en worden zo uiteindelijk de planeten die we kennen door verdere accretie.

Doordat de temperatuur en de dichtheid van de protoster gradueel hoger worden, beginnen op een gegeven moment kernfusie processen op te treden. Dit zijn de processen die er voor zorgen dat de ster, of onze zon energie opwekt en warmte afgeeft. Op het moment dat kernfusie begint, wordt de ster als het ware geboren en houdt de contractie van de gaswolk op (Figuur 1.21). Er ontstaat een delicaat evenwicht tussen gravitatie (die de wolk, de ster wenst te doen instorten) en kernfusie (die de ster energetisch in stand houdt) en centrifugale krachten. Het hele proces, van het begin van de gaswolk-

contractie, tot het ontstaan van een ster, gaat (naar astronomische en geologische maatstaven) zeer snel: dit gebeurt in tijdspannes in grootte-orde van 1 miljoen jaar.

1.4.4. Condensatie, coagulatie, accretie en planetesimalen

Niet al het materiaal van de initiële gaswolk wordt uiteindelijk samengebaldd in de centrale ster; er blijft ook nog wat materiaal over in de zogenaamde **circumstellaire schijf** (Figuur 1.21). Hieruit zijn in ons zonnestelsel uiteindelijk de planeten gevormd, inclusief de aarde. De temperatuur van de circumstellaire schijf was relatief hoog dicht in de buurt van de zon, en nam af met afstand van de zon. In de buurt van de zon kon dus enkel materiaal **condenseren** dat relatief **refractair** is (verbindingen met een hoge condensatie temperatuur), terwijl verder weg van het middelpunt van de schijf ook meer **volatiele** (vluchtige) materialen konden condenseren. Met **condenseren** wordt in dit geval niet de overgang van de gasfase naar de vloeibare fase bedoeld, maar die van de gasfase direct naar de vaste fase (dus het tegenovergestelde van **sublimatie**). Dit gebeurt doordat de druk in de circumstellaire schijf zo laag is, rond de 10^{-3} bar ($\sim 10^{-3}$ atmosfeer), of 100 Pa.

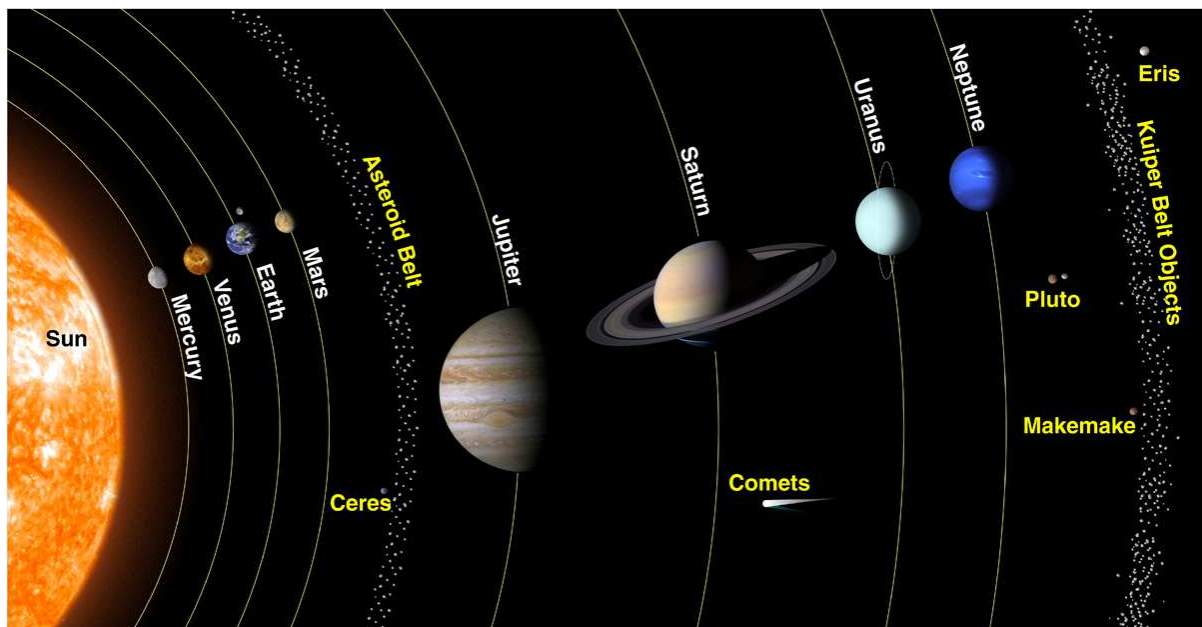
Tabel 1.1 geeft de condensatietemperatuur van verbindingen waarvan men denkt te weten dat ze van belang zijn geweest bij de vorming van de planeten. Sommige daarvan zijn veelvoorkomende minerale verbindingen die ook veelvuldig op onze Aarde voorkomen (zie latere lessen). Deze tabel laat zien dat gesteente-achtige verbindingen of **lithische** verbindingen en metallische verbindingen met Ca, Al, Ti, Mg, Si, Fe en Ni een vrij hoge condensatietemperatuur hebben en dus heel refractair zijn. Deze konden dus al vroeg in de buurt van de zon, waar de temperaturen hoger waren, beginnen te condenseren. IJs van water en methaan bijvoorbeeld condenseren pas bij een veel lagere temperatuur, en dus verder weg van de zon. Dit verklaart waarom de binnenste vier planeten van ons zonnestelsel (Mercurius, Venus, Aarde, Mars) voornamelijk uit ijzer en silicaten bestaan (Figuur 1.22), dit zijn de zgn. **terrestrische planeten**. De buitenste vier (Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus) hebben een veel lagere dichtheid, omdat ze voor een groot deel uit verbindingen met lichte elementen (H, C, N, O) water, methaan en andere koolwaterstoffen, koolstofdioxide en ammonium bestaan, dit zijn de **gasreuzen**.

Materiaal	Formule	Condensatie T (K)
korund	Al_2O_3	1760
perovskiet	CaTiO_3	1650
spinel	MgAl_2O_4	1510
nikkel-ijzer metaal	Ni, Fe	1470
diopsied (pyroxeen)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	1450
forsteriet (olivijn)	Mg_2SiO_4	1440
alkaliveldspaat	$(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	<1000
troiliet	FeS	700
gehydrateerde mineralen	divers	550-330
water (ijs)	H_2O	180
methaan-ijs	$\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	70

Tabel 1.1: Condensatietemperatuur (bij 10^{-3} bar) voor geselecteerde verbindingen (minerale, lithische en ijzerrijke verbindingen die ook veelvuldig op Aarde voorkomen).

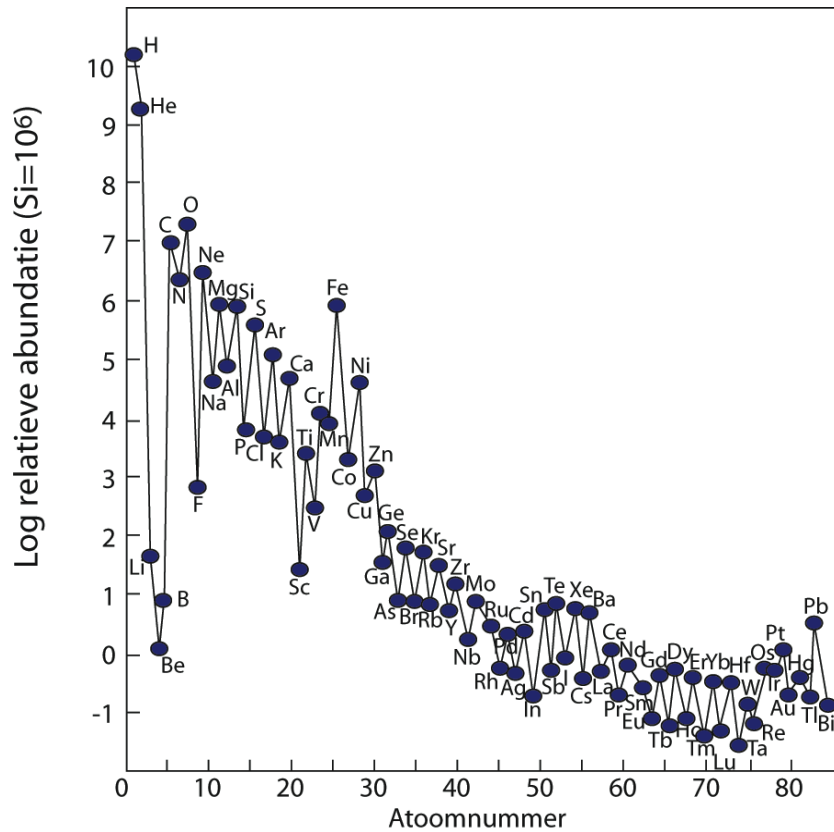
Pluto wordt niet langer als planeet beschouwd en behoort tot de zgn. **ijsdwergen** en heeft sterke affiniteiten met objecten uit de Kuipergordel (zie verder).

Als we kijken naar de relatieve abundantie van elementen in ons zonnestelsel (Figuur 1.23) valt op dat waterstof (H) en helium (He) het meest voorkomen (want het zijn de alom tegenwoordige producten van de oerknal); koolstof (C) en zuurstof (O) zijn een orde-grootte meer abundant dan silicium (Si), magnesium (Mg) of ijzer (Fe), de elementen waaruit de terrestrische planeten voornamelijk bestaan. Dit verschil in abundantie is de reden waarom de vier buitenste planeten beduidend groter zijn dan de binnenste vier: er is eenvoudigweg veel meer materiaal voor handen om de planeten uit op te bouwen. Er zijn vele andere fascinerende observaties te maken over figuur 1.23, zoals de grotere abundantie van elementen met een even atoomnummer (vergelijk dit met de eindproducten van de nucleosynthetische processen zoals in de vorige paragrafen uit de doeken gedaan).

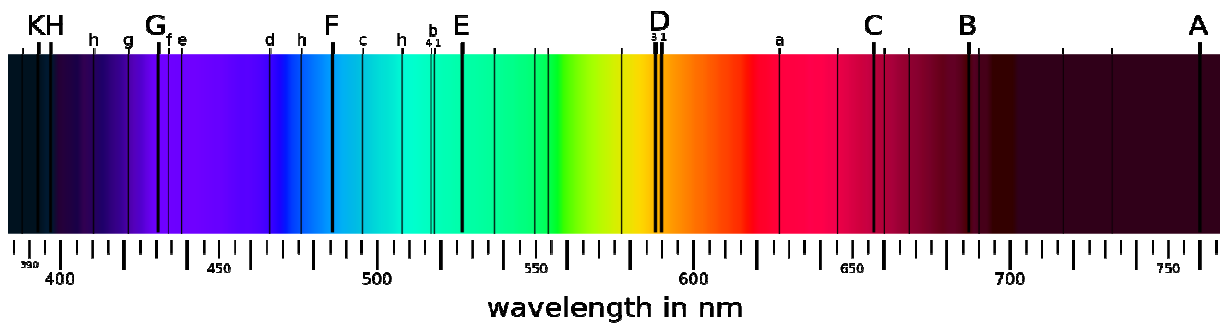


Figuur 1.22: een overzicht van ons zonnestelsel (niet op schaal) met de interne terrestrische planeten (met een samenstelling van vnl. steen- en ijzerverbindingen), de asteroïdengordel tussen Mars en Jupiter, en de externe gasplaneten of gasreuzen. Pluto wordt niet langer tot de planeten gerekend en heeft affiniteiten met de ijsrijke objecten en kometen uit de Kuipergordel.

Onze kennis van de abundantie van de elementen in ons zonnestelsel komt grotendeels van de kennis die we over de zon hebben. Aangezien de zon meer dan 99.8% van de massa van ons zonnestelsel vertegenwoordigt, kunnen we er van uit gaan dat de samenstelling van de zon min of meer vergelijkbaar is met die van ons zonnestelsel als geheel. En de samenstelling van de zon weten we spectrometrisch, doordat we bv. de absorptielijnen van de verschillende elementen in het zonlicht kunnen meten; de zgn. Fraunhofer lijnen (Figuur 1.24). (Verdere informatie over de samenstelling van ons zonnestelsel komt van meteorieten, waar we het zo meteen over zullen hebben).



Figuur 1.23: relatieve abundantie (genormaliseerd naar 10^6 Si deeltjes) van de elementen uit ons zonnestelsel.



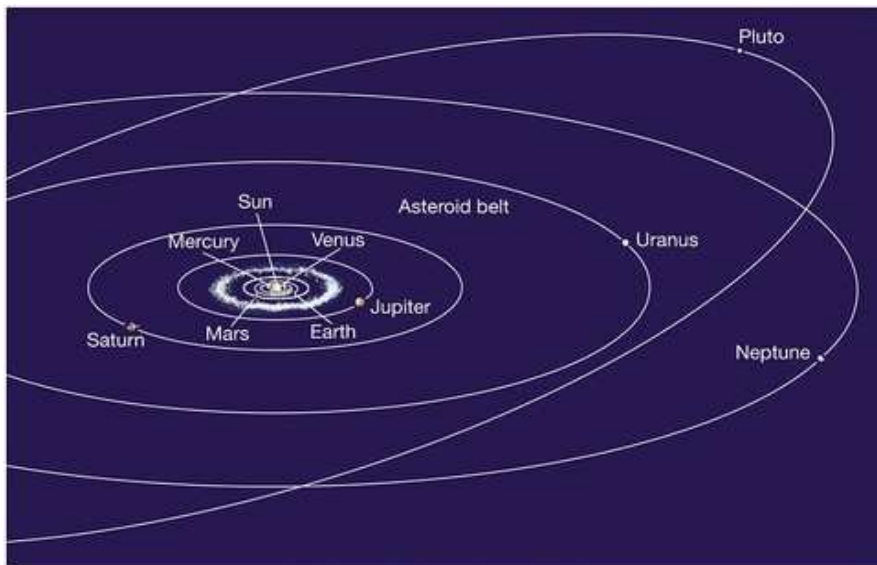
Figuur 1.24: Fraunhofer absorptielijnen uit het zichtbare lichtspectrum van de zon

Na de fase van condensatie, zullen de aldus gecondenseerde (miniscule) deeltjes verder **coaguleren** (samensmelten) en zo grotere deeltjes vormen. En deze worden dan weer samen gevoegd tot grotere fragmenten, er treedt m.a.w. **accretie** op en uiteindelijk worden zo nog grotere objecten gevormd, die we vanaf een diameter van 0,1 km **planetesimalen** noemen. Dit zijn de embryonale kernen van planeten en andere grotere hemellichamen.

1.4.5. T-Tauri fase van de zon en ontstaan van de planeten

In de vroege evolutie van sterren, gaan ze door een fase die de **T-Tauri fase** wordt genoemd naar een jonge ster in de constellatie Taurus waar men deze processen actief waarneemt. Deze T-Tauri fase gebeurt wanneer een jonge ster (met circa de massa van onze zon) ongeveer 1 miljoen jaar oud is. Deze fase wordt gekenmerkt door een sterke sterrenwind (zonnwind), oftewel een intense stroom hoog-energetische deeltjes die met grote kracht en snelheid uit de ster wordt geblazen. Deze wind is zo sterk dat het alle objecten uit de circumstellaire schijf, die kleiner dan ~10 meter in diameter zijn, wegblaast richting de interstellaire ruimte. Dat impliceert dus dat de vorming van planetesimalen heel vroeg in de evolutie van ons zonnestelsel moet hebben plaatsgevonden, want anders was al het materiaal waaruit de planeten gevormd konden worden, weggeveegd door deze sterrenwind. Daarom neemt men aan dat de vorming van onze zon, ons zonnestelsel en de planeten (en daarmee dus de aarde) min of meer tegelijk plaatsvond, en stelt men de ouderdom er van op 4,56 miljard jaar – een ouderdom die trouwens bepaald is aan de hand van de meting van radiogene isotopen in meteorieten.

Nadat de planetesimalen gevormd waren, groeiden deze door verdere accretie (= samenklonteren door botsingen) aan tot zogenaamde *planetaire embryo's*. Hierbij groeiden grotere lichamen sneller aan dan kleinere, waardoor er een zgn. *run-away effect* ontstond. En uit deze planetaire embryo's ontstonden dan door verdere accretie uiteindelijk de **planeten** die we vandaag kennen (Figuur 1.23).



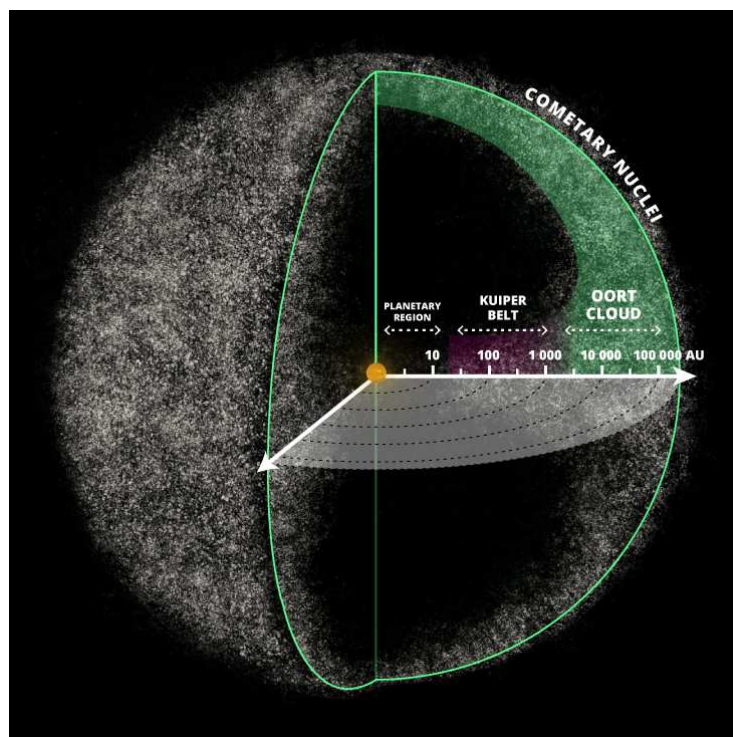
Figuur 1.25: de planeten draaien in eenzelfde vlak, *Ecliptica*, in tegenwijzerszin rond de zon.

De geschetste geschiedenis van het ontstaan van ons zonnestelsel wordt onderbouwd door bijvoorbeeld de samenstelling en de grootte van de planeten; maar ook door het feit dat alle planeten in min of meer éénzelfde vlak (Figuur 1.25), het **ecliptica-vlak**, in tegenwijzerszin rond de zon draaien en ook dezelfde rotatiezin hebben als de zon. Dit ondersteunt het idee dat de planeten inderdaad gevormd zijn uit een circumstellaire schijf. Pluto is ook hier het buitenbeentje, zijn baan maakt een hoek van 17° met ecliptica, en dit is o.a. één van de argumenten om Pluto haar planetenstatus te ontnemen.

1.4.6. Meteorieten

Niet al het materiaal uit de circumstellaire schijf is echter samengeklonterd tot planeten. In een band tussen Mars en Jupiter vinden we de **asteroïdengordel** (Figuur 1.22), waarin zich talloze asteroïden bevinden (= gesteente- en/of ijzerrijke hemellichamen in een baan rond de zon). Men denkt dat de zwaartekracht van Jupiter verhinderde/verhindert dat deze brokstukken ooit samensmolten tot een echte planeet. De meeste extra-terrestrische objecten die op aarde terecht komen, vinden hun oorsprong in deze asteroïdengordel. Pas wanneer extra-terrestrische gesteente- en/of ijzerobjecten op aarde worden aangetroffen noemen we ze **meteorieten**.

Kometen zijn objecten die zowel uit ijs als steen/ijzer-verbindingen bestaan, en komen uit de **Kuiper gordel** (die ter hoogte van de baan van Pluto ligt; Figuur 1.22) of de **Oort wolk** (Figuur 1.26) die nog een stuk verder weg van de zon ligt en nagenoeg de grens van ons zonnestelsel aflijnt. Daar waar de Kuiper gordel nog enigszins een afgeplatte gordel voorstelt, min of meer in het verlengde van Ecliptica (als restant van de circum-solaire schijf), is de Oort wolk letterlijk een wolk rondom rond ons zonnestelsel (Figuur 1.26). Ze strekt zich uit tot meer dan 100.000 **astronomische eenheden** (astronomical unit = AU) van de zon. Eén AU is éénmaal de afstand aarde-zon.



Figuur 1.26: positie van de kometen van de Oortwolk aan de rand van ons zonnestelsel.

Er zijn verschillende soorten meteorieten. Ze bestaan allemaal uit hetzij silicaat-mineralen ("**gesteente**"), hetzij ijzerrijke verbindingen, of een combinatie van de twee. De ijzermeteorieten, en steen-ijzermeteorieten zijn allemaal brokstukken van zogenaamde **gedifferentieerde** objecten, die zich hebben verdeeld in een ijzerrijke kern en een silicaatrijke mantel, net als de aarde (we bespreken zo meteen hoe dat gebeurt). Dit zijn dus restanten van objecten die een zekere post-formatie evolutie en verandering hebben doorgemaakt (ze zijn dus gedifferentieerd en hun originele elementaire samenstelling kan

veranderd zijn hierdoor). Sommige van de gesteentemeteorieten zijn ook afkomstig van deze gedifferentieerde objecten (dit is de klasse van de zgn. *basaltische achondrieten*; sommige hiervan zijn afkomstig van de Maan of Mars).

De belangrijkste meteorieten m.b.t. onze kennis van de gemiddelde samenstelling van ons zonnestelsel, zijn echter de zogenaamde **chondrieten**, en dan met name de koolstofhoudende chondrieten. Zij worden beschouwd als de meest primitieve objecten in ons zonnestelsel, dat wil zeggen dat ze een klompje materiaal voorstellen waarmee sinds 4,56 Ga (Giga annum = miljard jaar) eigenlijk niets meer mee is gebeurd. Deze zijn dus niet gedifferentieerd en weerspiegelen nog steeds hun originele en primitieve samenstelling. De chondrieten danken hun naam aan de aanwezigheid (in de meeste soorten) van **chondrules**. Dit zijn mm-grootte ronde, kristallijne bolletjes van *olivijn*, *pyroxeen* en eventueel *veldspaat* (dit zijn veel voorkomende, refractaire silicaat mineralen die ook veelvuldig op aarde voorkomen, we bespreken ze in detail in de volgende lessen). De meest primitieve chondrieten bevatten ook Calcium-Aluminium-rijke Insluitsels (**CAI**, cm grootte, zeer refractair) en ook meer vluchtige bestanddelen (zoals koolstof en koolwaterstofverbindingen, zoals bv. zelfs aminozuren).

Als we weer even naar de hele meteorieten kijken, in plaats van hun microscopische constituenten, dan blijkt dat de chemische samenstelling van de meteorieten in één klasse, de zogenaamde **CI chondrieten** (C van carbonaceous of koolstofhoudend, I van *Ivuna*, de naam van de localiteit in Tanzania waar de eerste meteoriet van deze klasse ooit gevonden en beschreven is), sterk lijkt op de samenstelling van de zon. Men neemt bijgevolg aan dat de CI chondritische meteorieten de meest primitieve objecten in ons zonnestelsel zijn. De overeenkomst van hun samenstelling met die van de zon ondersteunt het idee dat dit vergelijkbaar is met de samenstelling van ons zonnestelsel als geheel. Het betekent ook dat de ouderdom van deze meteorieten dezelfde moet zijn als die van ons meest primitieve en vroege zonnestelsel. Door de datering van mineralen (via radiometrische dateringstechnieken) in deze meteorieten weten we zodoende dat het zonnestelsel 4,56 miljard jaar geleden ontstaan is.

1.4.7. Planetaire differentiatie

De reden dat we meteorieten moeten gebruiken om de ouderdom van de aarde te achterhalen ligt in het feit dat de aarde een sterk gedifferentieerde planeet is: de chemische elementen hebben zich na de accretie en vorming van de aarde sterk herverdeeld over een (ijzerrijke) kern en een (silicaatrijke of steen-achtige) mantel. Dat dit niet enkel op de aarde is gebeurd kunnen we, zoals hierboven vermeld, afleiden uit het bestaan van meteorieten (en de parentale lichamen waarvan ze afkomstig zijn) die een soortgelijke differentiatie hebben ondergaan.

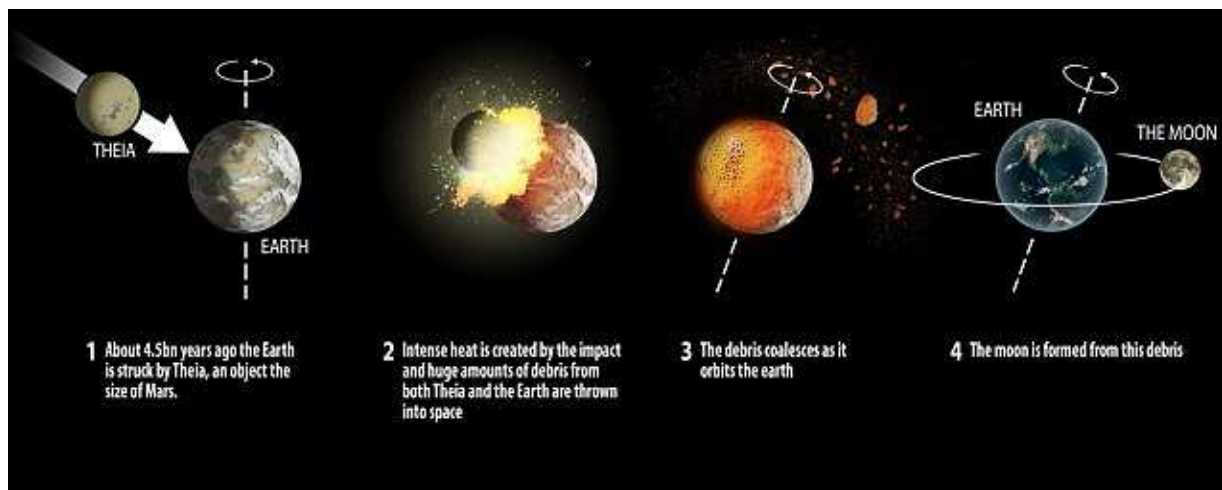
De aarde als geheel is gevormd door de accretie van hoofdzakelijk refractaire planetesimalen (dicht bij de jonge zon dus). Die accretie vond plaats doordat objecten tegen elkaar aan botsten en met elkaar versmolten. Hierdoor werd hun kinetische energie omgezet in thermische energie, en steeg de temperatuur van de proto-aarde sterk. Dit is wat men noemt, de **primordiale warmte** van onze planeet. Een andere bron van energie was de aanwezigheid van *kortlevende radio-isotopen* in het materiaal waaruit ons zonnestelsel gevormd werd. Deze kortlevende isotopen zijn nu allemaal vervallen en uitgestorven naar hun stabiele dochterisotopen (b.v. ^{182}Hf , dat nu helemaal vervallen is naar ^{182}W), maar 4,56 Ga geleden en gedurende de eerste paar Ma van de evolutie van de Aarde, bestonden ze nog wel, en hun radioactief verval leverde ook weer heel wat thermische energie op. Het gevolg hiervan was dat de temperatuur van de aarde zo hoog werd dat ze grotendeels smolt. De vroege Aarde wordt dan ook vaak omschreven als een *magma-oceaan*.

In deze magma-oceaan ontmengde zich gradueel een ijzersmelt van een silicaatsmelt (cfr. onmengbare olie en azijn fasen in een vinaigrette). Deze ijzersmelt had een beduidend hogere dichtheid dan de silicaatsmelt (vergelijk bv. Fe en Si in figuur 1.14), en zank geleidelijk naar het binnenste van de aarde. Op deze wijze zijn de kern en de mantel van de aarde ontstaan of gedifferentieerd (er is dus chemische differentiatie opgetreden). Door verdere afkoeling is een deel van de ijzerrijke kern intussen gestold tot een vaste metallische, ijzerrijke legering en is de aardmantel gestold tot (silicaatrijke) gesteenten die we kennen (Figuur 1.4). De gesteente mantel (silicaat mantel) is beduidend volumineuzer dan de ijzerkern. De kern-mantel grens bevindt zich ongeveer op een diepte van 2900 km (Figuur 1.4).

Ook andere belangrijke differentiatie gebeurtenissen en aanhoudende processen zorgen er voor dat de chemische samenstelling van onze planeet steeds verandert, in die zin dat er een sterke herverdeling van de elementen plaats vindt en in sé die verdeling meer en meer heterogeen wordt op planetaire schaal.

1.4.8. De maan

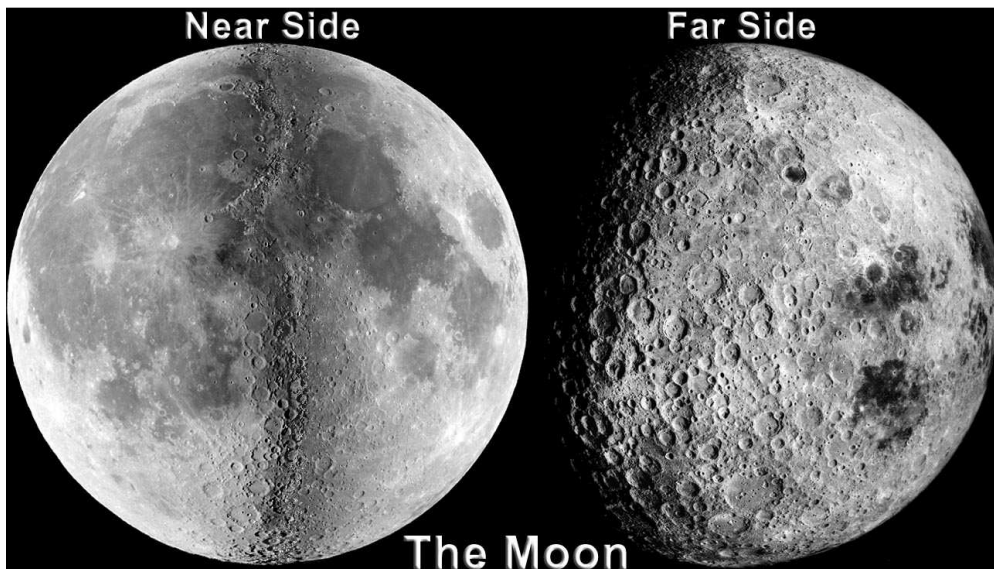
Het ontstaan van de maan is nauw gerelateerd aan het ontstaan van de aarde zelf. Tijdens de eerste fasen van differentiatie van de aarde is er een groot object (bijna zo groot als de huidige planeet Mars), vermoedelijk een andere, ten dele gedifferentieerde, **planetoïde** (*Theia*) op de aarde ingeslagen. Hierdoor werden brokstukken van de aarde, van voornamelijk de mantel (men heeft redenen om aan te nemen dat de mantel-kern differentiatie in de vroege aarde reeds ver was gevorderd op het moment van de Theia impact), samen met delen van de impactor Theia, de ruimte in geslingerd (Figuur 1.27).



Figuur 1.27: een schematisch overzicht van de vorming van de maan (zie tekst voor meer uitleg).

Andere delen van deze planetoïde versmolten vermoedelijk met de aarde zelf. De brokstukken die de ruimte in waren geslingerd, en in het gravitatieveld van de aarde gevangen bleven, vormden al spoedig daarna het hemellichaam dat we als de Maan kennen (Fig. 1.28). Vergeleken met de aarde bevat de maan relatief weinig ijzer. Dit is één van de redenen dat men dus denkt dat de aardkern al (ten dele of zelfs grotendeels) was gevormd, zodat het weggeslingerde materiaal hoofdzakelijk uit silicaten (gesteenten) bestond. Deze gigantische impact en de geassocieerde vorming van onze maan, moet meer

dan 4,5 miljard jaar geleden hebben plaatsgevonden. De impact van Theia zorgde er ook voor dat de rotatie-as van onze planeet niet meer loodrecht op Ecliptica staat, maar een helling, een inclinatie wordt gemaakt van ongeveer $23,5^\circ$ (wat aanleiding geeft tot seizoenale variaties in insolutie op hogere latitudes – onze seizoenen dus).



Figuur 1.28: de oppervlakte van onze maan is bezaaid met meer dan 30.000 impactkraters.

Na deze inslag werden zowel de aarde als de maan nog door vele andere objecten getroffen. Hiervan zien we op de maan nog duidelijk de kraters (ongeveer 30.000 stuks zijn met een kleine telescoop vanaf de aarde waar te nemen; Figuur 1.28), maar op de aarde is dit veel minder zichtbaar. Dit wil helemaal niet zeggen dat deze impactstructuren niet op aarde bestaan of bestonden, maar heeft alles te maken met het feit dat ze in de loop van de geologische geschiedenis gradueel zijn uitgewist. Dit komt doordat het aardoppervlak nog voortdurend verandert door processen als magmatisme, plaattektoniek en erosie, terwijl dit op de maan niet het geval is. De maan is, net als de aarde, gedifferentieerd, met een (kleine) ijzerrijke kern (de grootte hiervan kan worden afgeleid aan de hand van het zwaartekrachtsveld van de maan) en een meer silicaatrijke of gesteente mantel. Sinds 3 Ga is er echter op de maan niet veel meer gebeurd in termen van magmatisme of plaattektoniek, terwijl dit proces op de aarde dus nog steeds plaatsvindt. In tegenstelling tot de aarde heeft de maan geen atmosfeer, en daardoor ook geen erosie door stromend water of krachtige windwerking. Aan de hand van de hoeveelheid kraters op de maan kunnen we vermoeden dat ook de aarde sinds haar ontstaan door een enorme hoeveelheid meteorieten is getroffen, ook al vinden we hier dus nog maar weinig bewijzen voor op het aardoppervlak zelf.

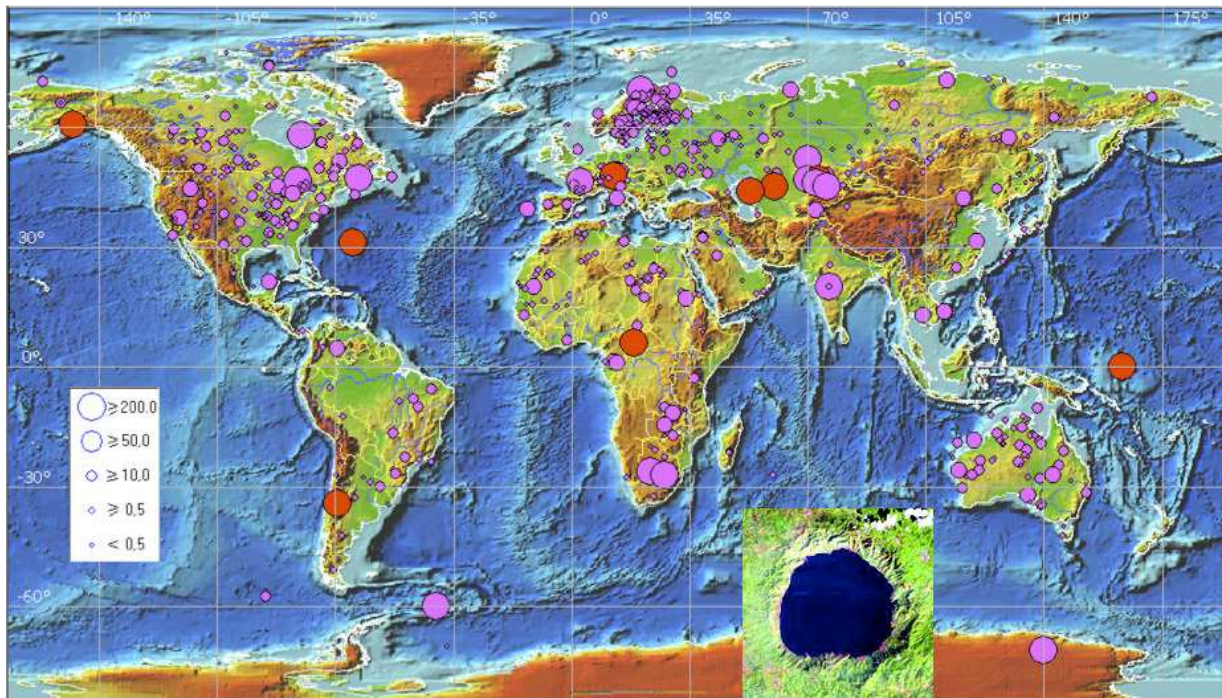
Vandaag kennen we nog een kleine 200 grotere en kleinere impactstructuren op onze planeet (Figuur 1.29). Sommigen daarvan zijn zeer jong naar geologische termen (b.v. Meteor Crater in Arizona, VSA, is rond de 50 000 jaar oud), andere gaan tot ver terug in de geologische geschiedenis (b.v. de reusachtige Vredefort krater in Zuid-Afrika is meer dan 2 Ga oud).

1.4.9. Vorming van de korst

We hebben al gezien dat de aarde niet alleen een ijzern kern en een silicaatmantel heeft, maar ook nog omgeven wordt door een dunne buitenste rigiede schil, de korst (Figuur 1.4). De aardkorst is ontstaan door het gedeeltelijk of partieel (her)opsmelten van de mantel. De gevormde smelt of magma migreerde opwaarts (door de lagere dichtheid van de smeltfase in vergelijking met de vaste gesteenten) en stelde uiteindelijk en stelselmatig om zo de aardkorst te gaan vormen. Ook dit proces zorgt voor voortdurende chemische differentiatie van de Aarde aangezien de bulksamenstellingen van de gevormde smelten zelden of nooit dezelfde zijn als de bulksamenstellingen van de uitgangsgesteenten. Niet alle verbindingen en elementen worden immers even makkelijk in de smeltfase opgenomen. De vorming van de korst is waarschijnlijk ook al vroeg in de geschiedenis van de aarde begonnen. Dit wordt afgeleid uit het feit dat er kristallen van *zirkoon* (= silicaatmineraal met de formule $ZrSiO_4$, zie lessen 2, 3 en 4) bestaan die 4,4 Ga oud zijn, en dat zirkoon een mineraal is dat eigenlijk enkel in de continentale korst gevormd kan worden. M.a.w., 4,4 Ga geleden was er dus zeker reeds differentiatie tussen mantel en korst aan de gang. Het grootste deel van deze primitieve aardkorst is nu door latere processen reeds verdwenen.

Plaattektoniek en erosie zijn immers processen die de gevormde korst voortdurend weer vernietigen. Het oudste (korst) gesteente dat ooit gevonden is, is de 4,03 Ga jaar oude *Acasta Gneiss* (een gneiss is een metamorf gesteente) uit Canada. Dit maakt deel uit van de **continentale korst**. Het oudste stukje **oceanische korst** dat bestaat is slechts iets ouder dan 180 miljoen jaar oud (dus meer dan twintig keer zo jong). De reden ligt vnl. in het verschil in chemische samenstelling tussen beide types korst. Oceanische korst heeft namelijk een samenstelling met meer ijzer (Fe) en magnesium (Mg) en minder silicium (Si) en aluminium (Al) dan de continentale korst, en heeft daardoor een grotere dichtheid dan de continentale korst (Figuur 1.4). De oceanische korst heeft, wanneer deze net gevormd is, een geringere dichtheid dan de onderliggende mantel. Naarmate de oceanische korst echter ouder wordt, koelt deze af, en neemt de dichtheid toe, totdat deze groter is dan van de mantel, en de oceanische plaat dus de neiging zal hebben om weer terug in de mantel weg te zinken. De continentale korst (met haar hoog Si gehalte) heeft altijd een geringere dichtheid dan de mantel, en zal dus quasi nooit spontaan terug in de mantel zinken. Dit verklaart het verschil in maximale ouderdom tussen deze twee soorten korst: zwaardere oceanische korst wordt relatief makkelijk en snel door plaat-tektonische processen gerecycleerd.

Het verschil in dichtheid tussen oceanische en continentale korst (~ 3 versus $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$) zorgt er ook voor dat continentale korst hoger in de plastische mantel ligt dan oceanische korst (Figuur 1.4), dit is het principe van **isostasie**. Dit is volledig vergelijkbaar met het feit dat lichte objecten hoger in het water liggen dan zware. Het "water" is in dit geval de plastische mantel. Bovendien is de gemiddelde dikte van oceanische korst (7 km) significant kleiner dan die van continentale korst (35-40 km; onder gebergten gordels kan dit zelfs oplopen tot 70 km). Gebieden met oceanische korst liggen hierdoor veel "dieper" dan de hoger uitstekende continentale korst, en vormen zo diepere bekkens die overspoeld zijn door de oceanische waters van ons planeet. De hogere continentale korst steekt dan hierbij grotendeels boven zeeniveau uit. Dit zijn dus m.a.w. allemaal gevolgen van de chemische differentiatie van onze planeet Aarde.



Figuur 1.29: locaties van impactstructuren op aarde (cirkels geven de diameter van de impactkraters in km op schaal aan).