Wetenschapsagenda (3a): Oorsprong van het heelal

Sinds 2015 heeft Nederland een Nationale Wetenschapsagenda: een lijst van 140 vragen die het wetenschappelijk onderzoek in Nederland in de komende jaren een richting moeten geven. De komende maanden bespreken we zeven van deze vragen die goed bij de thema's van de Quantum Universe-website passen.

Vandaag:

Wat zijn de oorsprong, geschiedenis en toekomst van het heelal?

We vroegen Richard Bartels, natuurkundige aan de universiteit van Amsterdam, om zijn licht te laten schijnen op het eerste deel van deze vraag, en dan in het bijzonder op de oorsprong van de bouwstenen waaruit alles om ons heen is gemaakt.

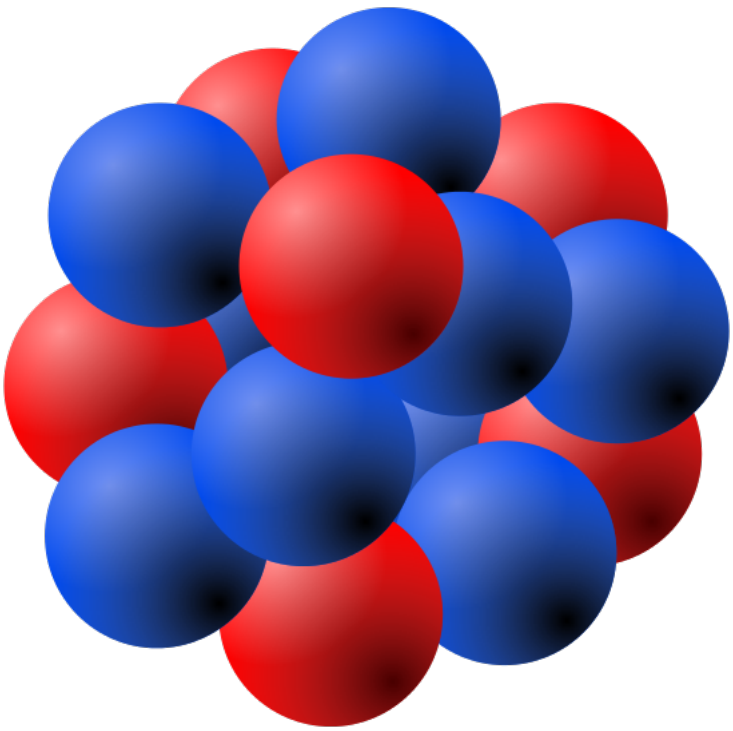
Bouwstenen van het leven en alles om ons heen

Kort na zijn geboorte bestond het heelal uit een hete soep van losse deeltjes: protonen, neutronen, elektronen, neutrino's en lichtdeeltjes, oftewel fotonen. We zouden het heelal kunnen vergelijken met een grote bak lego. De verschillende kleuren blokjes staan voor verschillende deeltjes, bijvoorbeeld blauw voor het proton en rood voor het neutron. Het jonge heelal bestond uit alleen maar losse blokjes. Alle elementen die wij nu terugvinden op aarde bestaan echter uit een atoomkern van protonen en neutronen met daaromheen een wolkje elektronen. In de lego-analogie komt de atoomkern overeen met legobouwsels bestaande uit rode en blauwe blokjes. Hoe zijn de elementen, waaruit alles op aarde bestaat, eigenlijk ontstaan uit deze hete soep? Oftewel: hoe hebben de losse legoblokjes elkaar gevonden en grotere bouwsels gevormd?

Elementen

Op aarde vinden we veel verschillende elementen terug. Deze

elementen werden al in de 19e eeuw door Dmitri Mendeleev gerangschikt in het periodiek systeem. Een element wordt geclassificeerd door de hoeveelheid protonen in de kern, oftewel het aantal blauwe legoblokjes. Het aantal neutronen bepaalt de *isotoop*. Isotopen zijn dus elementen met evenveel protonen maar een verschillend aantal neutronen. Het lichtste element, waterstof, bestaat uit slechts 1 proton. Dit wordt vaak aangeduid als ^{1}H; de "H" komt van het woord Hydrogenium – waterstof in het Latijn. Het iets zwaardere isotoop van waterstof, genaamd deuterium, bestaat uit 1 proton en 1 neutron: ^{2}H, waar de 2 het aantal protonen plus het aantal neutronen weergeeft. Het op een na lichtste element is helium, bestaande uit 2 protonen en meestal ook 2 neutronen: helium-4, oftewel ^{4}He. Een complexer element als goud is veel zwaarder en heeft maar liefst 79 protonen in de kern.



Afbeelding 1. Een atoomkern.Zwaardere elementen bevatten een kern bestaande uit meerdere protonen (blauw) en neutronen (rood) bij elkaar. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker Marekich.

Nieuwe, zwaardere elementen, kunnen worden gevormd door middel van *nucleosynthese*. Nucleosynthese wordt ook wel kernfusie genoemd: het is het samensmelten van twee lichtere atoomkernen tot een zwaardere atoomkern. In het legovoorbeeld zou dit beteken dat twee stukken lego aan elkaar vast worden geklikt. Een waterstofkern, bestaande uit 1 blauw blokje, en een deuteriumkern, bestaande uit een blauw en een rood blokje, kunnen bijvoorbeeld samensmelten tot Helium-3: $^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He$, 2 blauwe blokjes en 1 rode.

Kernfusie kan plaatsvinden doordat de massa van ^{3}He kleiner is dan die ^{2}H en ^{1}H bij elkaar. Dit klinkt nogal gek: twee 2 blauwe “legoblokjes” en 1 rood “legoblokje” aan elkaar vast wegen minder dan allemaal losse blokjes! Een gevolg hiervan is dat bij dit proces wat energie vrijkomt: massa (m) kan omgezet worden in energie (E) volgens Einsteins bekende formule $E = mc^2$. Zodoende kan ^{3}He niet vervallen tot weer losse waterstof zonder dat er eerst energie wordt toegevoegd.

Nucleosynthese vindt echter niet zomaar plaats, ondanks dat de zwaardere toestand energetisch gunstiger is. Er moet eerst een “energiedrempel” worden overwonnen. Het is zoals het aansteken van een lucifer nodig is om een houtvuur uiteindelijk te laten branden: een kleine investering voor een grote opbrengst, maar wel noodzakelijk.

Oerknal-nucleosynthese

Zoals gezegd bestond het vroege heelal, ongeveer 1 seconde na de oerknal, uit een hete soep van ongeveer 10 miljard °C met daarin losse protonen en neutronen. Oftewel: alleen losse blokjes in de bak lego. Er waren dus oorspronkelijk geen andere elementen dan waterstof! Doordat het echter zo heet was, bevatten de protonen en neutronen in het jonge heelal veel energie, en tijdens een botsing konden ze daarom fuseren tot zwaardere elementen. Zo werd eerst deuterium (1 rood en 1 blauw blokje) en vervolgens helium gevormd (2 blauwe en 1 rood blokje). Aan de hand van onze modellen van het vroege heelal en onze kennis van deeltjesfysica kunnen we berekenen dat ongeveer 3 minuten na de oerknal het heelal voor 76% uit waterstof en voor 24% uit helium bestond. Van de andere elementen was er slechts een minuscuul beetje aanwezig, en alleen van de allerlichtste, dus

bijvoorbeeld geen goud (79 protonen). Het hier beschreven proces, en de theorie die het beschrijft, noemen we “oerknal-nucleosynthese”.

Het evenwicht tussen de hoeveelheid helium en waterstof was heel precair. Als de parameters in de natuur iets anders zouden zijn geweest was de verhouding volgens de theorie heel anders. Er was dan, bijvoorbeeld, helemaal geen helium gevormd in het vroege heelal. Metingen hebben bevestigd dat het vroege heelal inderdaad uit 76% waterstof en 24% helium bestond, dus onze modellen van het vroege heelal lijken heel accuraat.

Na 3 minuten was de hete soep waaruit het heelal bestond zover afgekoeld dat geen nieuwe, zwaardere elementen meer gevormd werden. “Afgekoeld” is daarbij een relatief begrip: de soep was nog steeds 1 miljard °C heet! Oerknal-nucleosynthese kwam hiermee ten einde. Maar wij mensen bestaan niet alleen uit waterstof en helium, maar ook uit koolstof (6 protonen) en zuurstof (8 protonen). Waar komen die elementen dan vandaan?

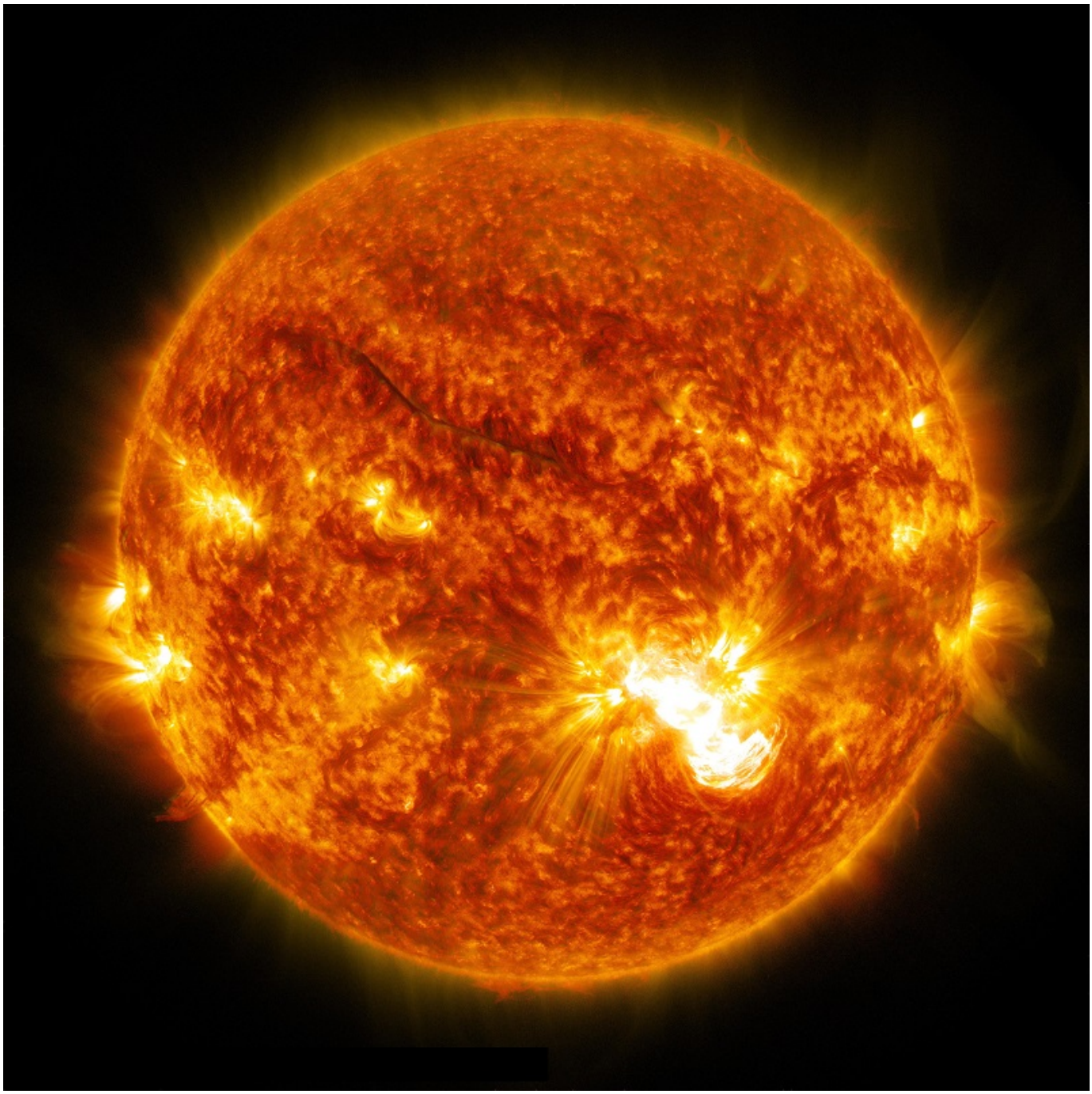
Klontjes in de soep: nucleosynthese in sterren

De oersoep was niet overal even dik: op sommige plaatsen zaten kleine klontjes. Door de zwaartekracht trokken deze klontjes materie uit de omgeving aan en zo groeiden de structuren in ons heelal. Op sommige plaatsen met heel veel waterstof kon er door de zwaartekracht een implosie plaatsvinden en zo werden de eerste sterren gevormd. Deze eerste sterren moeten dus uit ongeveer 76% waterstof en 24% helium hebben bestaan, want dit was de samenstelling van de oersoep waaruit ze gevormd werden. Helaas hebben astronomen deze sterren nog niet kunnen waarnemen, waarschijnlijk omdat de meeste al lang geleden opgebrand zijn.

De energie die een ster uitstraalt komt vrij uit kernfusie; zoals we eerder zagen wordt elke keer een klein beetje massa omgezet in energie. Naast in het vroege heelal vindt dus ook in een ster nucleosynthese plaats. Nucleosynthese gaat in een ster echter nog een stapje verder. De elementen waterstof en helium worden hier gefuseerd tot zwaardere elementen, die op hun beurt weer tot nóg zwaardere elementen worden gefuseerd. Alsmaar grotere legostructuren, dus!

Op deze manier werd en wordt onder andere zuurstof, koolstof en uiteindelijk ijzer (56 protonen in de kern) gemaakt. Op het moment dat de eerste sterren stierven bliezen zij deze

materie de ruimte in, en zo werd de ruimte verrijkt met zwaardere elementen. Toen die opnieuw samenklonterden konden zich structuren zoals onze aarde vormen. We kunnen dus zeggen dat wij allemaal uit sterrenstof bestaan, want behalve het waterstof is alle materie in ons lichaam ooit gevormd in de kern van een ster.



Afbeelding 2. De zon.Alle elementen zwaarder dan waterstof en helium zijn ooit gevormd in een ster. Kernfusie is ook wat onze zon laat branden! Afbeelding: NASA.

Tot slot nog een laatste opmerking over de allerzwaarste elementen, alles zwaarder dan ijzer.

Als deze elementen gevormd worden, komt er geen energie vrij, maar moet er energie bijgevoegd worden. Deze elementen kunnen daarom niet worden gevormd in een ster. Sommige sterren exploderen aan het einde van hun leven – dat noemen we een *supernova*. In de schokgolf die vrijkomt tijdens de supernova is genoeg energie aanwezig om ook zwaardere elementen te vormen. Een ander proces waarbij zware elementen gevormd kunnen worden is het samensmelten van twee zogenaamde *neutronensterren*. Neutronensterren zijn de overblijfselen van zware sterren die een supernova-explosie hebben ondergaan. Een paar maanden geleden is door middel van zwaartekrachtgolven voor het eerst de samensmelting van twee neutronensterren waargenomen. Tegelijkertijd werd op dezelfde plek de productie van grote hoeveelheden goud gemeten. Goud is dus niet alleen heel bijzonder door zijn zeldzaamheid op aarde, maar er is ook een heel bijzonder proces in het heelal voor nodig om het te produceren!

Samengevat

We hebben besproken dat het vroege heelal uit een hete soep van losse protonen en neutronen bestond. Door middel van nucleosynthese in het vroege heelal kon helium worden gevormd. Voor het vormen van nog zwaardere elementen waren echter sterren nodig, die branden doormiddel van kernfusie. Hierbij werden de zwaardere elementen geproduceerd. Als een ster sterft blaast hij deze elementen de ruimte in en hieruit kunnen nieuwe sterren, planeten en het leven op aarde vervolgens ontstaan.

Ook wij zijn dus allemaal sterrenstof.