

---

# Het simuleren van de Chemische Verrijking van het Intergalactisch Medium

ONZE planeet draait om een enkele ster, de Zon, een van vele in ons Melkwegstelsel, die zelf een van de miljarden sterrenstelsels is die deel uitmaken van het heelal. Vroeg in de twintigste eeuw begonnen astronomen buiten de grenzen van ons eigen melkwegstelsel te kijken, op zoek naar aanwijzingen over de oorsprong van het heelal. Na de ontdekking van een schijnbaar oneindige uitgestrektheid van sterrenstelsels realiseerden astronomen zich dat er natuurkunde is die werkt op schalen veel groter dan eerder gedacht. Tegenwoordig is kosmologie een ver ontwikkeld gebied met nauwkeurige voorspellingen en observationele tests.

Het zeer vroege heelal bestaat vermoedelijk uit slechts waterstof en helium, met enkele sporen van lithium en beryllium. In de loop van de tijd produceren sterren zwaardere elementen (hierna "metalen" genoemd), die de omliggende ruimte met elementen zwaarder dan helium 'vervuilen'. Een paar specifieke metalen werden gekozen om te condenseren rond een schijnbaar onbeduidende ster in een planeet die we nu kennen als 'Aarde'.

Naast deze misschien romantische redenen is het van cruciaal belang voor ons begrip van het heelal om te kunnen verklaren hoe metalen gemaakt en vervoerd worden en wat hun effecten zijn op de verdere structuurvorming. Niet alleen fungeren metalen als een 'fossil record' van de stervormingsgeschiedenis van het heelal, ze kunnen ons ook vertellen hoe gas ontsnapt uit stervormingsgebieden. Metalen doen echter veel meer dan fungeren als een diagnostiek. Ze dienen ter versnelling van de afkoeling van gaswolken, een effect dat de vorming van sterrenstelsels drastisch verandert. Zonder een solide begrip van het gedrag van metalen is ons vermogen om de evolutie van het heelal te verklaren onvolledig.

## DE BRONNEN VAN METALEN

Met uitzondering van de witte dwergen ondergaat elke ster in het heelal kernfusie. Het proces van het creëren van zwaardere elementen van lichtere elementen wordt nucleosynthese genoemd. Dit proces gebeurt diep in het binnenste van een ster, dus er moet een mechanisme zijn om metalen uit een ster te krijgen.

Voor alle sterren is er een stellaire 'wind', die massa uit de ster drijft via stralingsdruk. Omdat massieve sterren meer licht produceren, neemt dit effect toe met de massa van de ster. Dit kan een belangrijk mechanisme zijn voor het vervoer van metalen uit sterren.

Tegen het einde van hun levensduur ondergaan sterren met een massa van meer dan 8 keer die van de zon een supernova explosie. Tijdens een dergelijke explosie wordt niet alleen een groot deel van de inhoud van de ster uitgeworpen maar treden ook de condities op die ideaal zijn voor snelle nucleosynthese. Het is tijdens dit proces dat de meeste van de elementen zwaarder dan ijzer vormen. Deze vorm van supernovae, die 'kern-ineenstorting' wordt genoemd, is verantwoordelijk voor het merendeel van de metalen die worden geproduceerd in de vroege stadia van een stellair systeem. Van dit type supernova is bekend dat het de belangrijkste producent van elementen zoals zuurstof, neon, silicium en zwavel is.

Deze supernova explosies genereren ook een grote hoeveelheid energie, die vrijkomt in het interstellair medium (ISM). Deze energie kan bijdragen aan de turbulentie van het ISM of resulteren in de uitstroom van gas uit het sterrenstelsel. Omdat sterren vaak gevormd worden in een uitbarsting, kan het effect van de explosies worden vergroot indien er meerder supernovae in harmonie afgaan.

Voor de sterren met een massa van minder dan 8 maal de massa van de zon is er geen explosief eind aan het leven. Deze sterren zullen in plaats daarvan een periode ervaren van significant massaverlies aan het eind van hun leven. Hierin blazen de buitenlagen op en deze worden uiteindelijk afgestoten. De uitwerpselen zijn samengesteld uit waterstof en helium, verrijkt met metalen, voornamelijk koolstof en stikstof.

Een andere methode van metaalverrijking is afkomstig van 'type Ia supernovae'. Dit zijn explosies die zich voordoen wanneer twee lage massa sterren, die om elkaar heen draaien oud worden en samensmelten of massa met elkaar beginnen te delen. Op een bepaald punt wordt de activiteit te sterk het systeem wordt ontbonden in een explosie. Omdat de omstandigheden rond de explosie heel anders zijn dan de explosies van hoge massa sterren, zijn ook de nucleosynthetische producten verschillend. In deze explosies ontstaat een groot deel van het ijzer en nikkel.

Sterren die hun leven eindigen in een van de bovenstaande twee processen leven lang, maar niet allemaal even lang, zodat astronomen de verhouding van bepaalde elementen als "klokken" kunnen gebruiken, die de leeftijd van een groep sterren aan kan geven. Metalliciteit (dat is de massa in metalen ten opzichte van de totale massa) moet met de tijd oplopen, omdat opeenvolgende generaties sterren het interstellair medium (ISM) zullen verrijken. De hoeveelheid zuurstof ten opzichte van ijzer, silicium t.o.v. koolstof, en stikstof t.o.v. neon zijn allemaal voorbeelden van chemische verhoudingen die moeten afnemen met de tijd.

## DE VORMING VAN STERRENSTELSELS

Omdat sterren zijn gegroepeerd in sterrenstelsels, kan men op een kosmische schaal sterrenstelsels zien als fabrieken, die het intergalactische medium met metalen vervuilen. Als zodanig is het begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels essentieel

om te begrijpen hoe de metalen worden verdeeld en hoe die distributie tot stand kwam.

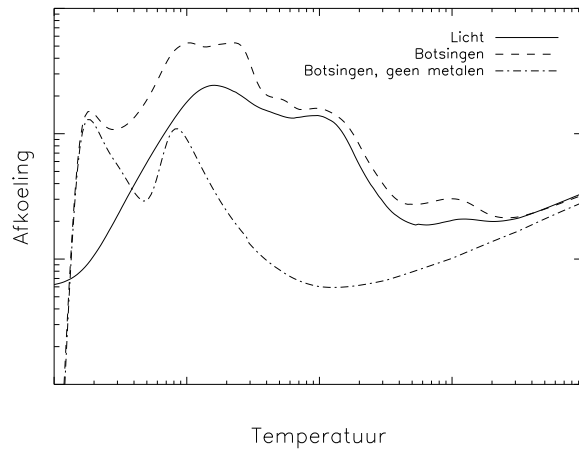
Sterrenstelsels vormen voornamelijk op twee manieren, door het geleidelijk aanvoeren van materiaal aan een oorspronkelijke concentratie van massa en door de samsmeltingen van kleinere systemen in grotere. In werkelijkheid vormt dit een continuüm van dien aard dat het moeilijk kan worden onderscheiden wat geleidelijk aanvoeren en wat samsmelten is. Terwijl botsingsvrije materie (dat willen zeggen dat er geen gasdruk is, samengesteld uit sterren en de zogenaamde 'donkere materie') weinig problemen heeft een gebonden systeem in te tuimelen, zal gas aan interne energie winnen die de aanwas van massa via gasdruk kan ontcrachten. Dergelijke interne energie kan echter worden uitgestraald. Dit proces staat bekend als afkoeling.

Afkoeling kan optreden op sub-atomair, atomair en moleculair niveau. Vrije elektronen kunnen verstrooien aan passerende fotonen (lichtdeeltjes), waarbij ze wat energie aan de fotonen mee kunnen geven. Ze kunnen ook afkoelen via bremsstrahlung, wat betekent dat ze energie uitstralen tijdens het passeren van een ander geladen deeltje. Atomen kunnen koelen door van een aangeslagen elektronenconfiguratie naar een energetisch lagere toestand te gaan. Dit is de reden waarom metalen zo belangrijk kunnen zijn. Omdat er veel meer configuraties bestaan in metaalatomen (omdat zij meer elektronen hebben), koelen zij ook veel efficiënter. Dit effect kan koeling tot een orde van grootte (een factor tien) laten toenemen. Moleculen kunnen ook efficiënte koelers zijn, bij temperaturen die laag zijn in vergelijking met het intergalactische medium (IGM). Deze temperaturen zijn typisch voor bepaalde fasen van het ISM en dat gas is dus gevoelig voor moleculaire koelers. Moleculen zoals CO kunnen dan overheersen en dit is een andere reden waarom metalen zo belangrijk zijn. Dit proefschrift behandelt schalen veel groter dan die waarop stervorming plaatsvindt, dus laten we de details van moleculaire koelers achter ons en richten we ons op wat er gebeurt net buiten sterrenstelsels en proto-stelsels.

Gas bij voldoende lage dichtheden zal geen sterren vormen. Na reïonisatie (dat is nadat het IGM werd geïoniseerd), heeft de straling van de sterrenstelsels en quasars in het heelal invloed op de manier waarop een gaswolk afkoelt. Deze achtergrondstraling zal niet alleen het gas opwarmen, maar het zal ook van invloed zijn op de ionisatiebalans van de wolk: het verandert de elektronische configuratie van de atomen aanzienlijk.

In figuur 7.1 we zien hoe de afkoelingsfunctie afhangt van de temperatuur. De doorgetrokken lijn laat zien hoe deze functie zich gedraagt als het gas door fotonen is geïoniseerd, wat heel anders is dan wanneer het gas alleen wordt geïoniseerd door botsingen (stippellijn). Vaak nemen berekeningen van de kosmische afkoeling alleen het laatste geval mee, wat leidt tot veel hogere waarden voor de afkoelsnelheid. Aan de andere kant negeren andere simulaties vaak de bijdrage van metalen, die kan worden gezien door vergelijking van de streep-stippellijn met de stippellijn. Het is duidelijk dat beide effecten moeten worden beschouwd.

Aangezien de productie van metalen de manier waarop sterrenstelsels vormen beïnvloedt en dus ook de manier waarop verder metalen worden geproduceerd, staat de productie van elementen bekend als een feedback mechanisme. De effectiviteit van deze feedback betekent dat elke gedetailleerd model van galactische systemen metalen



**Figuur 7.1:** Afkoelsnelheden voor gas dat afkoelt terwijl geoniseerd door fotonen (doorgetrokken lijn), geoniseerd door botsingen (stippelijijn) en geoniseerd door botsingen zonder metalen dat metalen worden meegenomen (streepstippelijijn).

en hun invloed zo nauwkeurig mogelijk zullen moeten meenemen.

## SIMULATIES

Om tot een volledig begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels, zoals ook de verdeling van kosmische metalen, te komen is het vaak wenselijk om computersimulaties uit te voeren. Dergelijke simulaties kunnen dienen om waarnemingen te interpreteren en hebben duidelijke voordelen ten opzichte van andere theoretische methoden. Simulaties laten je terugkijken in de tijd zonder de beperkingen die inherent zijn aan waarnemingen (niet dat simulaties zelf zonder beperkingen zijn).

Bij het uitvoeren van een simulatie van het heelal, moet men rekening houden met twee soorten materie, donkere materie en baryonische materie. De simulaties in dit proefschrift maken gebruik van de populaire hydrodynamica-code GADGET. Met deze code wordt de donkere materie gemodelleerd als een botsingsvrije vloeistof die alleen de zwaartekracht ervaart. De baryonen kunnen verder onderverdeeld worden in gas en sterren. Het gas wordt gediscrètiseerd tot deeltjes met behulp van de 'uitsmeerd deeltje hydrodynamica' ('Smoothed Particle Hydrodynamics' in het Engels - SPH) methode. Elk deeltje vertegenwoordigt een vloeistofelement die zijn dichtheid "uitsmeert" over haar naburige deeltjes terwijl ze ook druk uitoefent op hen. Deze deeltjes worden ook meegenomen in de berekening van de zwaartekracht. Sterren worden gemaakt van gas op basis van enkele criteria, waarna deze baryonische deeltjes ook botsingsvrij worden en ze dus geen gasdruk meer uitoefenen op hun omgeving.

Door computationele beperkingen moeten wij in plaats van de vorming van individuele sterren hele populaties van sterren tegelijk vormen. We moeten dus aannemen dat de sterren in zo'n populatie allemaal worden geboren op hetzelfde moment. Op deze manier, uitgaande van een initiële verdeling van sterrenmassa's, kunnen we het uitrekenen hoeveel metalen er worden uitgestoten door zowel hoge als lage massa sterren.

Natuurlijk moeten we voor deze berekening vertrouwen op berekeningen van het verlies van metalen uit deze verschillende sterren door eerdere onderzoekers. Niet alleen moeten we zorgvuldig een passende reeks van stellaire 'opbrengsten' (de hoeveelheid van verschillende metalen die de sterren produceren) kiezen, maar wij moeten ook schattingen maken van de distributie van stellaire geboortemassa's, de levensduur van sterren, en het tempo waarin type Ia supernovae exploderen. De onzekerheden van al deze ingrediënten resulteren in grote onzekerheden in de relatieve abundanties van de elementen.

## HET OWLS PROJECT

Om simulaties beter te kunnen interpreteren, werd het overweldigend grote simulaties ('OverWhelming Large Simulations' in het Engels - OWLS) project bedacht. Het idee achter dit project is het uitvoeren van een grote verzameling van simulaties, met in elke simulatie een iets andere fysisch model of numerieke parameter (dat wil zeggen, de grootte van de simulatie of de typische deeltjesmassa). In vergelijking met eerdere inspanningen zullen de meeste simulaties in een groot volume en met hoge resolutie uitgevoerd worden. Dus zowel de omvang van het project als de individuele simulaties zijn groot.

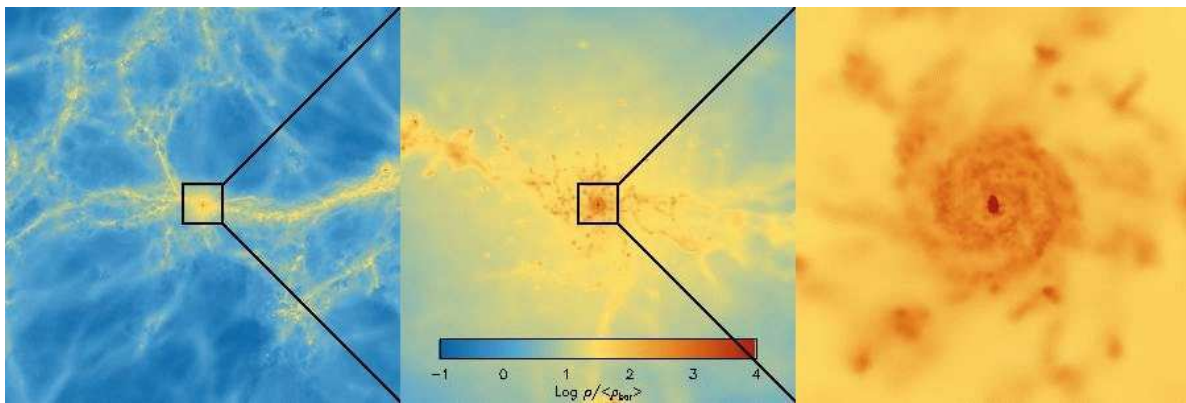
Simulaties van deze soort hebben een aantal 'sub-grid' recepten om fysische processen te modelleren, waarvoor de resolutie van de simulatie nog niet goed genoeg is. Inzicht in de beperkingen en onzekerheden in dergelijke recepten is essentieel om de vorming van sterrenstelsels en de verdeling van metalen te begrijpen. De recepten die zijn opgenomen in onze simulatie (we hebben elke module gevarieerd op een bepaalde manier) zijn:

- Gas afkoeling
- Stervorming
- Verdeling van massa's van sterren bij de geboorte ('Initial Mass Function' in het Engels - IMF)
- Stellaire feedback, en
- Actieve galactische kernen ('Active Galactic Nuclei' in het Engels - AGN).

Figuur 7.2 toont drie opeenvolgende zoom-ins op een doorsnede door een van onze simulaties. In het linker paneel kan men de grote schaal structuur van de kosmos zien, terwijl het rechter paneel lijkt op een sterrenstelsel. Het dynamisch bereik is zeer groot en vereist een zorgvuldige 'boekhouding' van de fysische processen.

## DIT PROEFSCHRIFT

Dit proefschrift is sterk gebaseerd op het OWLS project. De eerste helft beschrijft een aantal van de natuurkundige modellen die in het referentie-model van het project zijn



**Figuur 7.2:** Opeenvolgende zoom-ins op een doorsnede door een van onze simulaties. De kleurenschaal geeft gasdichtheid.

gegaan, terwijl de tweede helft zich meer richt op de analyse van de simulaties.

## Hoofdstuk 2

Hoofdstuk 2 bespreekt hoe metalen en een fotoniserende achtergrond kunnen de afkoeling door straling van kosmisch gas kunnen beïnvloeden. Dit wordt gepresenteerd in de kader van gas met eigenschappen die typisch zijn (in dichtheid, temperatuur, en ioniserende achtergrond) voor het intergalactische medium en proto-stelsels. Metaalverrijking dient meestal ter versnelling van het afkoelen (vanwege de toename van het aantal gebonden elektronen) en ionisatie dient typisch ter verlaging van de koelsnelheid (als gevolg van het verminderd aantal gebonden elektronen beschikbaar en via de opwarming door de fotonen). Hoewel beide effecten eerder zijn besproken in isolement, combineren we de twee en berekenen we de relatieve bijdrage van beide effecten voor een reeks dichtheden en temperaturen. We vinden dat het verschil van de vorige berekeningen tot ongeveer een factor tien kan zijn. Dit effect treedt op, op een niet-triviale manier, zodat zelf-consistente berekeningen noodzakelijk zijn voor een nauwkeurig afkoelsnelheid.

We laten zien hoe de berekening van de bijdragen van elk element aan de afkoeling uitgevoerd moet worden, zodat we de veronderstelling dat de relatieve abundanties van de elementen in het gas universeel is kunnen laten vallen. Zelfs in goed gemengd gas, kunnen relatieve abundanties veranderen met een factor van een paar als het wordt verrijkt door verschillende processen. Dit is zeer belangrijk omdat de individuele pieken van de koeling curve zeer gevoelig zijn voor abundanties en ionisatiegraad. De berekeningen van de afkoeling, gepresenteerd in dit hoofdstuk, worden gebruikt in de simulaties gepresenteerd in de rest van dit proefschrift.



## Hoofdstuk 3

In hoofdstuk 3 beschrijven we de chemodynamica zoals die in onze simulaties zit. Wij bekijken elk ingrediënt op zijn beurt, om de onzekerheden te illustreren. De onzekerheden in de stellaire opbrengsten, en met name in de supernova type Ia snelheid, bedragen verschillen van factoren van een paar in de hoeveelheid metaalproductie. Vervolgens bekijken we de verspreiding van metalen in het referentie model van het Overweldigend Grote Simulaties (OWLS) project, die onze methode gebruikt. We vinden dat het veranderen van de definitie van de metalliciteit in de simulaties kan leiden tot een factor anderhalf verschil in stellaire massa in het huidige heelal, een illustratie van de numerieke moeilijkheden die inherent zijn aan een dergelijke berekening.

De metalen in onze simulaties zijn relatief gelijkmatig verdeeld tussen kosmische gasfasen ongeveer 10 miljard jaar geleden en ze volgen niet de relatieve verdelingen van baryonen, die zich veelal ofwel in een schok-verwarmde, warme tot hete fase rondom sterrenstelsels, ofwel in een koude, diffuse fase bevinden. Tegenwoordig zijn de meeste metalen opgesloten in sterren.

## Hoofdstuk 4

De kracht van het OWLS project wordt helemaal duidelijk in hoofdstuk 4. Hier vergelijken we de verschillende fysische modellen die gebruikt worden in de verschillende simulaties in het kader van de kosmische metaal distributie. We onderzoeken de werking van koeling, galactische wind modellen, stellaire IMF en feedback van AGN in detail.

We vinden dat een sterke feedback nodig is om efficiënt metalen uit halo's van alle massa's te verwijderen. Dit kan gebeuren door middel van een bijzonder sterk wind model, een IMF met extra veel zware sterren in gebieden van hoge druk, of feedback van AGN. In overeenstemming met eerder werk, vinden we dat de metalliciteit van het Warm-Hete Intergalactisch Medium (WHIM) - waar zich een groot deel van de baryonen in het lokale heelal bevinden - ongeveer 10% is van wat is waargenomen in de zon, en dat dit weinig evolutie ondergaat. Tussen alle modellen varieert deze waarde met minder dan een factor drie. De enige uitzondering zijn de modellen die geen feedback in de vorm van stellaire winden en supernovae meenemen.

De metalliciteit van de gebieden in het heelal met de laagste dichtheid – het diffuse IGM – is zeer gevoelig voor de precieze parameters en de uitvoering van de feedback. Deze afhankelijkheid kan dus nuttig zijn bij het vaststellen van de geldigheid van de verschillende modellen.

We vinden in alle modellen dat de gemiddelde stellaire metalliciteit van het heelal vrij hoog is op hoge roodverschuiving (ver weg en vroeg in het heelal).

## Hoofdstuk 5

Hoofdstuk 5 gaat in op de oorsprong van de metalen die we vandaag de dag om ons heen zien. We bouwen een verrijkingsgeschiedenis voor de verschillende fasen van

het gas in het referentiemodel van de hoogste resolutie. Zoals verwacht vinden we een sterke afhankelijkheid van dichtheid, waarbij gas van hogere dichtheid later wordt verrijkt. Wij bekijken niet alleen *wanneer* dit gas is verrijkt, maar ook door *wat*. Software die sterrenstelsels zoekt wordt gebruikt om de karakteristieke massa van sterrenstelsels te bepalen die gas van een bepaalde dichtheid en temperatuur verrijkt. Ook hier vinden we een sterke dichtheidsgradiënt. Lage massa sterrenstelsels verrijken het lage dichtheid IGM terwijl hoge massa sterrenstelsels het hete gas van gemiddelde dichtheid verrijken. Dit is onafhankelijk van het feedback-model. Het koude, diffuse, lage dichtheid IGM bevat zeer weinig metalen, de metalen die er zijn, zijn voornamelijk afkomstig uit intergalactische sterren. Het feit dat veel van de IGM verrijking wordt aangedreven door de laagste massa sterrenstelsels die we kunnen simuleren, suggereert dat de karakteristieke massa van sterrenstelsels waardoor het IGM wordt verrijkt, afhankelijk kan zijn van de resolutie.