



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Simulating Cosmic Reionisation

Pawlik, A.H.

### Citation

Pawlik, A. H. (2009, September 30). *Simulating Cosmic Reionisation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/14025>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/14025>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

---

# Nederlandse samenvatting

## HET TIJDPERK VAN REÏONISATIE

De eerste sterren en sterrenstelsels vormden een paar honderd miljoen jaar na de oerknal, toen het heelal nog maar een fractie van zijn huidige leeftijd had. Er wordt gedacht dat hun straling het koude en neutrale waterstof in de ruimte veranderde in het hete en geïoniseerde kosmische plasma dat wij nu waarnemen. Deze mijlpaal in de geschiedenis van het heelal wordt het tijdperk van reïonisatie genoemd (Fig. 1).

Veel van dit tijdperk is nog onbekend. Precies kennis van reïonisatie is echter belangrijk om de huidige toestand van het universum te begrijpen. Het effect van reïonisatie op de vorming en evolutie van sterrenstelsels zou misschien de helderheidsverdeling van satellieten rond de Melkweg, ons eigen sterrenstelsel, kunnen verklaren. Wanneer vond reïonisatie plaats? Was het een eenvoudige gebeurtenis of was het een ingewikkelde, langdurige overgang? Waren de eerste sterren in de eerste sterrenstelsels krachtig genoeg om het heelal te ioniseren? Of waren er nog andere lichtbronnen van ioniserende straling?

Nog nooit zijn wij zo dichtbij het ontrafelen van de geheimen van dit kosmische proces geweest. Theoretische studies van reïonisatie zijn nu bijzonder nodig, omdat er binnenkort veel waarnemingen met nieuwe telescopen gedaan worden. Radio telescopen, zoals LOFAR<sup>1</sup>, MWA<sup>2</sup> en SKA<sup>3</sup>, zullen het mogelijk maken om een onontdekt deel van het heelal te bekijken, met lagere frequenties en hogere resolutie dan tot nu toe kon. De infrarood-ruimtetelescoop JWST<sup>4</sup> en de veertig meter optische telescoop ELT<sup>5</sup> zullen de bronnen verantwoordelijk voor het reïonisatie proces direct kunnen zien.

Hoeveel straling is er nodig om het universum te ioniseren? Deze vraag klinkt simpeler dan hij is. Sterker nog, deze vraag is waarschijnlijk een van de ingewikkeldste vragen die je kan stellen over reïonisatie. Pogingen om antwoord hierop te geven hebben al geleid tot belangrijke inzichten in de productie en de vernietiging van de straling, die het heelal geïoniseerd heeft. Hun werkelijke verdienste ligt in het besef dat een dieper begrip van de thermische interactie tussen het gas en de ioniserende straling noodzakelijk is.

Ionisaties produceren vrije elektronen wiens bewegingsenergie bijdraagt aan de thermische energie van het geïoniseerde gas. Omdat een toename in de temperatuur van het gas een toename in de druk met zich meebrengt, drijft het gas uit. De uitdijning vermindert de dichtheidsfluctuaties en 'kookt' het gas uit de lage massa sterrenstelsels. Deze verdamping onderdrukt de kosmische stervormingsnelheid en de hoeveelheid straling. Dit noemen wij negatieve feed-

---

<sup>1</sup><http://www.lofar.org>

<sup>2</sup><http://www.haystack.mit.edu/ast/arrays/mwa/>

<sup>3</sup><http://www.skatelescope.org>

<sup>4</sup><http://www.jwst.nasa.gov/>

<sup>5</sup><http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>

back. Maar deze verhitting zorgt ook voor positieve feedback, omdat het aantal recombinaties vermindert ten gevolge van het uitsmeren van de dichtheidsfluctuaties. Daardoor zijn er minder ioniserende fotonen nodig om het heelal geïoniseerd te houden. De combinatie van deze twee effecten bepaalt hoeveel ioniserende fotonen er nodig zijn om het heelal te reïoniseren.

Een van de meest veelbelovende technieken om de aard van thermische feedback te bestuderen zijn hoge resolutie, hydrodynamische simulaties met stralingstransport. Het simuleren van reïonisatie is echter een uitdagende taak, omdat wij de stralingsvergelijking moeten oplossen in een groot, representatief volume van het universum waar typisch een groot aantal bronnen van ioniserende straling in zitten. De bestaande methoden voor stralingstransport waren ontwikkeld voor hele andere doeleinden, zoals het uitrekenen van de ionisatiestructuur rond een enkele stralingsbron in een heel klein volume. Deze bereiken snel hun grenzen wanneer ze toegepast worden op moderne simulaties van reïonisatie.

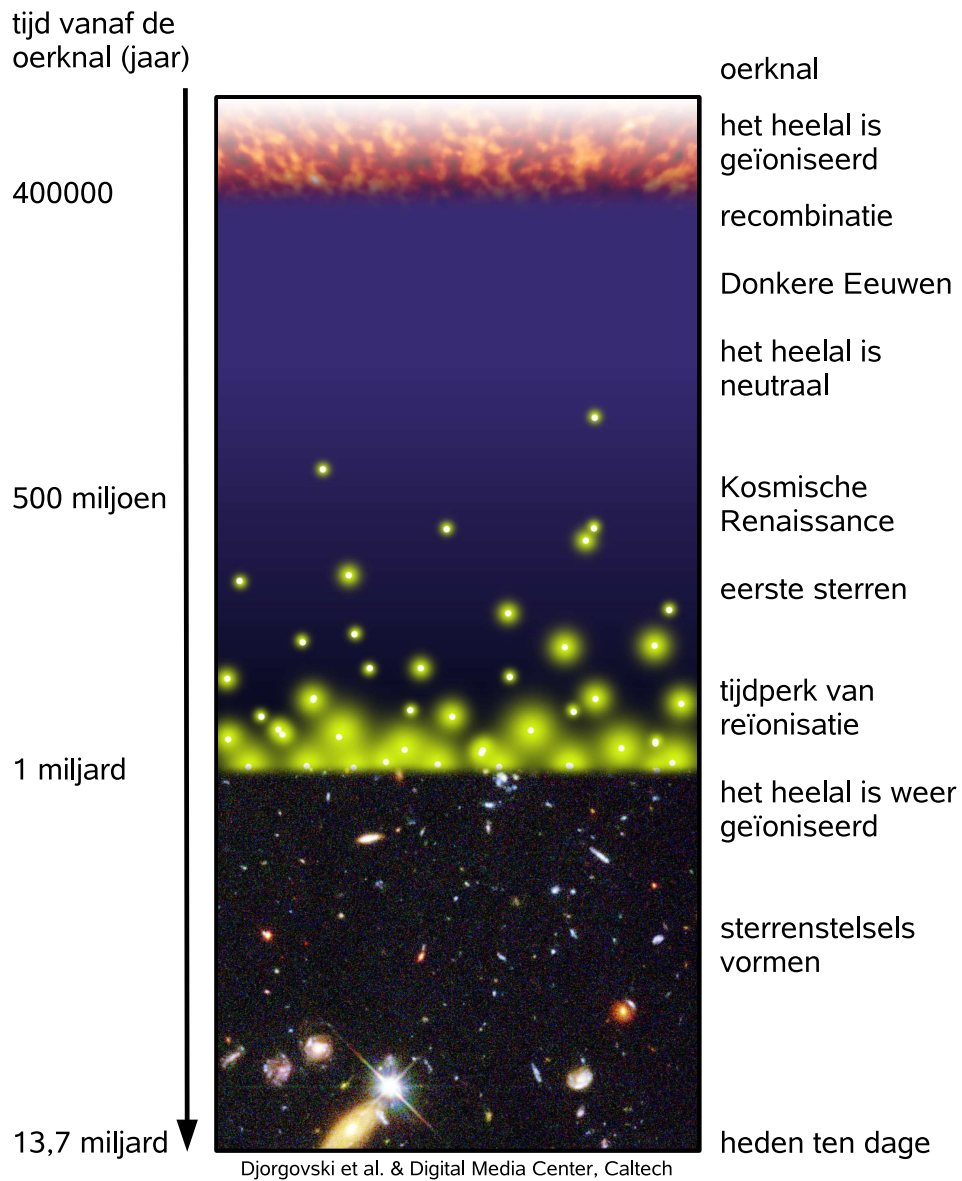
De belangrijkste wetenschappelijke bijdrage van dit proefschrift is de ontwikkeling van een nieuwe methode om het stralingstransport-probleem in grote simulaties van reïonisatie op te lossen. Deze methode - TRAPHIC (TRANsport of PHotons In Cones) - is ontworpen om de obstakels van de simulatie van reïonisatie in grote volumes en met veel bronnen te overwinnen. Het is een van de eerste van zijn soort.

## DIT PROEFSCHRIFT

In deze sectie geven wij korte samenvattingen van de inhoud van hoofdstukken 2-7 van dit proefschrift.

**Hoofdstuk 2.** De kritische dichtheid van stervormingssnelheid die nodig is om het intergalactische waterstof geïoniseerd te houden, hangt af van de gemiddelde recombinatiesnelheid in het intergalactische medium (IGM). Deze snelheid is evenredig met de *clumping factor*  $C \equiv \langle \rho_b^2 \rangle_{\text{IGM}} / \langle \rho_b \rangle^2$ , waar  $\rho_b$  en  $\langle \rho_b \rangle$  de locale en kosmische gemiddelde dichtheid van baryonen zijn en de haakjes  $\langle \rangle_{\text{IGM}}$  geven het middelen over de ruimte aan. Wij hebben een reeks kosmologische simulaties (*smoothed particle hydrodynamics* simulaties) inclusief afkoeling door straling om de clumping factor van het IGM op roodverschuiving  $z \geq 6$  uit te rekenen. Wij focussen op het effect van verhitting door foto-ionisatie door een uniforme ultraviolette achtergrond en vinden dat verhitting de clumping factor sterk reduceert omdat de toegenome druk de dichtheidsfluctuaties op kleine schaal uitsmeert. Er wordt vaak gezegd dat verhitting door foto-ionisatie een negatief feedback-effect heeft op de reïonisatie van het IGM omdat het de stervormingssnelheid vermindert door gas uit lage massa sterrenstelsels te koken. Echter, door de reductie van de clumping factor is het juist ook makelijker om het IGM geïoniseerd te houden. Verhitting zorgt daardoor ook voor een positief feedback-effect, die hoewel bekend, veel minder aandacht heeft gekregen. Wij demonstreren dat dit positieve feedback-effect erg sterk is. Met conservatieve aannames tonen wij aan dat, als het IGM op  $z \gtrsim 9$  was verhit, de waargenomen populatie stervormende sterrenstelsels op  $z \approx 6$  genoeg kan zijn om het IGM geïoniseerd te houden mits de fractie van ontsnappende ioniserende fotonen groter is dan  $\sim 0.2$

**Hoofdstuk 3.** Het is eerder aangetoond dat verhitting ten gevolge van reïonisatie en kinetische feedback van supernovae de kosmische stervormingssnelheid op hoge roodverschuiving kan onderdrukken. Hier onderzoeken wij het samenspel van verhitting en supernova feedback, gebruikmakend van een set van kosmologische *smoothed particle hydrodynamics* simulaties. We laten zien dat verhitting en supernova feedback elkaar versterken in het onderdrukken van de stervormingssnelheid. Onze resultaten demonstreren het belang van het simultaan, niet onafhankelijk toevoegen van deze twee processen in modellen van de vorming van ster-



**Figuur 1:** De geschiedenis van het uitdijende universum begint met zijn geboorte in de oerknal (Big Bang) ongeveer 13,7 miljard jaar geleden. Maar het duurde tot ongeveer 400.000 jaar na de oerknal voordat het heelal genoeg was afgekoeld zodat de vorming van atomen mogelijk was. Na deze gebeurtenis, bekend als recombinitie, bestond het heelal voornamelijk uit atomair waterstof. Na recombinitie kwam het heelal terecht in de Donkere Eeuwen, een periode waarin het ondoorlatend was voor ioniserende straling. De eerste sterren vormden honderd miljoen jaar na de oerknal, het begin van de Kosmische Renaissance. Hun straling reïoniseerde het neutrale waterstof gedurende het tijdperk van reïonisatie, waarna het universum transparant werd voor ioniserende straling. Heden ten dage bestuderen astronomen de geboorte van de eerste sterrenstelsels door de observatie van deze straling. Image credits: S. G. Djorgovski et al. & the Caltech Digital Media Center.

renstelsels, om het totale effect van negatieve feedback te schatten. Zij zullen daardoor vooral relevant zijn voor semi-analytische modellen waarin de effecten van verhitting en supernova feedback onafhankelijk van elkaar worden behandeld.

**Hoofdstuk 4.** Wij presenteren TRAPHIC, een nieuwe methode voor het transporteren van straling in *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) simulaties. TRAPHIC (TRANsport of PHotons In Cones) is ontworpen voor gebruik in simulaties met een groot dynamische bereik en een hoog aantal lichtbronnen. Het is adaptief zowel in ruimte als in hoek en kan toegepast worden op computers met gedistribueerd geheugen. De (tijd-afhankelijke) stralingstransportvergelijking wordt opgelost door individuele fotonpakketjes te volgen op een expliciet foton behoudende manier direct op het ongestructureerde rooster gemarkeerd door de set van SPH deeltjes. Om het directe transport van straling te verwezenlijken ondanks de onregelmatige ruimtelijke verdeling van de SPH deeltjes, worden fotonen binnen kegels geleid. De dure schaling van rekentijd met het aantal lichtbronnen waar in conventionele transportmethoden tegen aangelopen wordt, wordt ontweken door de samenvoeging van bronnen.

**Hoofdstuk 5.** Wij presenteren en testen een parallelle numerieke implementatie van onze stralingstransportmethode TRAPHIC voor het transport van monochromatische waterstof ioniserende straling in de *smoothed particle hydrodynamics* code GADGET-2. De tests bestaan uit meerdere stralingstransport-problemen van toenemende complexiteit. Sommige van deze tests zijn specifieke ontworpen om TRAPHIC's vermogen om het stralingstransportprobleem in grote kosmologische reïonisatie simulaties op te lossen, waar het voor was ontwikkeld. Andere tests zijn ontworpen om te demonstreren dat TRAPHIC ook in meer algemene context gebruikt kan worden. De resultaten van alle tests komen uitstekend overeen met zowel analytische oplossingen als numerieke referentie-resultaten.

**Hoofdstuk 6.** Simulaties van stralingstransport (ST) gekoppeld aan kosmologische hydrodynamische simulaties zijn een van de meest veelbelovende technieken om reïonisatie, een belangrijk tijdperk in het hoge roodverschuiving universum, te bestuderen. Huidige generaties van ST methodes zijn echter vaak beperkt in het gebruik met uniforme en relatief grove roosters, die een veel lagere resolutie hebben dan huidige hydrodynamische simulaties. Kleine schaal structuur in het kosmische gas kan dan niet of slechts statistisch bestudeerd worden. Hier gebruiken wij de ruimtelijke adaptieve ST methode TRAPHIC (Hoofdstuk 4) om de implicaties van deze benadering te onderzoeken. Wij vergelijken ST simulaties uitgevoerd op een ruimtelijk adaptief *smoothed particle hydrodynamics* dichtheidsveld met ST simulaties uitgevoerd op een dichtheidsveld gedefinieerd op een uniform rooster. Vergelijkingen van de evolutie van de gemiddelde geïoniseerde fractie, de afhankelijkheid van de geïoniseerde fractie op de lokale gasdichtheid en de *power spectra* van het 21 cm signaal van neutraal waterstof onthullen significante verschillen veroorzaakt door het verschil in het dynamische bereik toegepast door de twee types ST simulaties. Onze resultaten bevestigen eerdere suggesties dat het negeren van de inhomogene distributie van gas op kleine schaal, zoals gebruikelijk is in huidige ST simulaties van reïonisatie, kunnen leiden tot misleidende conclusies over de ruimtelijke verdeling van het geïoniseerde gas en dus over de interpretatie van huidige en de voorspellingen van toekomstige observaties van reïonisatie.

**Hoofdstuk 7.** De temperatuur van het kosmische gas is een belangrijke astrofysische grootte. Het gedetailleerd modelleren van zijn ontwikkeling met kosmologische hydrodynamische simulaties vergt het gebruik van stralingstransport methoden om nauwkeurig de effecten van foto-ionisatie en verhitting op de desbetreffende koeling en verwarming te kunnen berekenen. We breiden onze implementatie van TRAPHIC (Hoofdstuk 4 en 5) uit om de niet-evenwicht evolutie van de temperatuur van het gas blootgesteld aan waterstof-ioniserende straling te

kunnen berekenen. Wij controleren deze uitbreiding door vergelijking van TRAPHIC's resultaten in thermisch gekoppelde stralingstransport tests met referentieresultaten verkregen met andere stralingstransport codes.