



Universiteit
Leiden

The Netherlands

From atoms to the cosmos: exploring the cosmic web beyond collisional ionisation equilibrium

Stofanová, L.

Citation

From atoms to the cosmos: exploring the cosmic web beyond collisional ionisation equilibrium. (2024, November 13). *From atoms to the cosmos: exploring the cosmic web beyond collisional ionisation equilibrium.* Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4109044>

Version: 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/1887/4109044>

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

Nederlandse samenvatting

“Het grote plaatje”

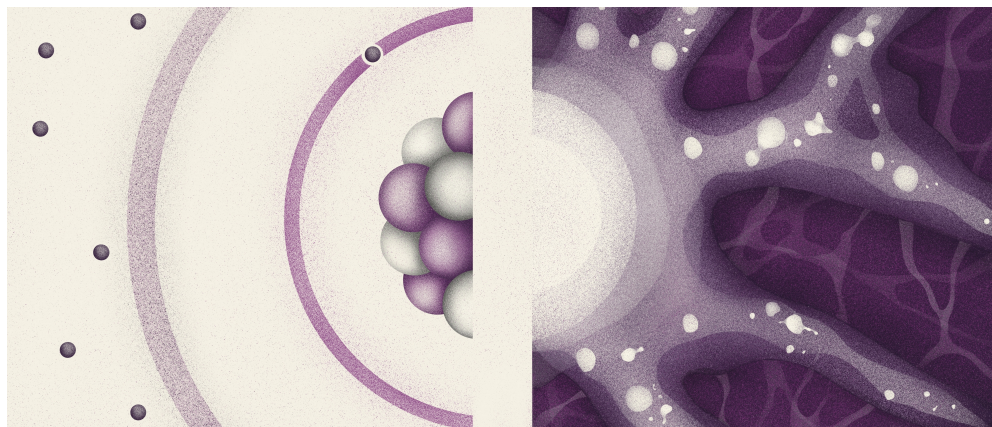
Het overgrote deel van de massa van een menselijk lichaam is opgebouwd uit slechts zes elementen: zuurstof, koolstof, waterstof, stikstof, calcium en fosfor. Vijf van deze zes elementen zijn **metalen**, een verzamelterm die astrofysici gebruiken voor alle elementen die zwaarder zijn dan waterstof en helium. *Maar hoe zijn deze metalen ontstaan, waar komen ze vandaan, en hoe hebben ze de aarde bereikt?*

Tegenwoordig is het algemeen bekend dat waterstof en helium (en kleine sporen van lithium en beryllium) van oeroude oorsprong zijn, terwijl de zwaardere elementen worden gevormd in de kernen van sterren in verschillende fasen van hun ‘leven’ (zie bijv. Cameron 1957; Burbidge et al. 1957, Mernier 2017). Wanneer deze sterren exploderen als supernova’s, stoten ze de metalen die in hun kernen zijn gevormd uit naar het medium om hen heen. Dit verrijkt de omgeving waarin de sterren zich bevinden. We vinden de metalen terug in stofdeeltjes of zelfs in grotere astrofysische objecten (bijv. asteroïden of kometen). Ze kunnen daarmee lange afstanden afleggen en mogelijk de bouwstenen van het leven vormen. Deze metalen zijn zelfs te vinden in het heelal op grote schaal: de filamenten van het kosmisch web, het intra-cluster medium van clusters en het circumgalactisch medium rond individuele sterrenstelsels. Door deze astrofysische objecten te bestuderen via spectroscopie, en de impact van verschillende terugkoppelingsprocessen op het transport van metalen op verschillende fysische schalen te onderzoeken, kunnen we de oorsprong en evolutie van metalen in enkele van de meest massieve objecten in ons universum beter begrijpen.

De grote-schaalstructuur van het heelal

Onder de vele theorieën die de evolutie van ons Universum beschrijven, wordt het model waarin de structuur hiërarchisch groeit door veel onderzoekers geaccepteerd. Metingen van het licht van de Kosmische Microgolfachtergrond geven aan dat ons Universum is geëvolueerd uit kleine dichtheidsfluctuaties, die in de loop van de tijd uitgroeiden tot grotere systemen onder invloed van de zwaartekracht. In de huidige tijd ($z = 0$) heeft ons Universum een structuur die bekend staat als het **Kosmische Web**. Veel van het gas in de filamenten van het web is nog niet gedetecteerd. Modellen voorspellen dat het temperatuur heeft tussen $10^5 - 10^7$ K, en elektronendichtheden tussen $10^{-6} - 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$. De verwachting is dat we met toekomstige röntgenspectroscopische missies de *filamenten* van dit kosmische web kunnen bestuderen. Tot nu toe is het erg moeilijk gebleken om dit hete, diffuse en ijle plasma te observeren, hoewel het niet onmogelijk is, zoals al besproken in sectie 1.3 van dit proefschrift.

Het beste idee van het kosmische web krijgen we tot nu toe door het bestuderen van zijn knooppunten, waar de *clusters van melkwegstelsels* zich bevinden. Deze massieve structuren, die gebonden zijn door de zwaartekracht, bevatten tientallen of honderden individuele sterrenstelsels. In röntgenstraling worden ze gekarakteriseerd door het zogenaamde intra-cluster medium, dat bestaat uit een zeer uitgestrekte gaswolk van 1-2 megaparsec groot, met een temperatuur van $10^7 - 10^8$ K, een dichtheid van $10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$, en een gemiddelde abundantie van 0.3 keer de abundantie van de zon.



Figuur 1: Omslag van dit proefschrift. Een artistieke interpretatie van het O VII ion (links) en het cluster van melkwegstelsels samen met de filamenten van het kosmische web (rechts).

Dit proefschrift: van atomen naar de kosmos

Hoewel veel theoretisch en ook observationeel bewijs aantoont dat de structuur van ons Universum een kosmisch web is, zijn er veel vragen over zijn eigenschappen op verschillende fysische schalen. Zoals al genoemd in de introductie, richt dit proefschrift zich op twee delen van het kosmische web: clusters van melkwegstelsels en kosmische webfilamenten. De methodologie die door dit hele proefschrift wordt gebruikt, is röntgenspectroscopie, wat hand in hand gaat met het modelleren van het röntgenplasma. Het modelleren zou onmogelijk zijn zonder kennis van processen die op atomair niveau plaatsvinden. Het doel van dit proefschrift is om te laten zien dat op röntgengolflengten de microscopische en macroscopische schalen in het kosmische web onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn. Dit is ook het idee achter de omslag van dit proefschrift (Fig. 1).

Dit proefschrift begint met een samenvatting van alle onderwerpen die voorkomen in de wetenschappelijke artikelen van dit proefschrift. In **Hoofdstuk 1** beschrijf ik de grote-schaalstructuur van ons Universum en toon ik enkele van de waarneembare eigenschappen van de clusters van sterrenstelsels (zoals temperatuur-, dichtheids-, druk-, entropie- en metalliciteitsprofielen), evenals de kosmische webfilamenten, met focus op de röntgenstraling van deze objecten. Ik beschrijf kort de kosmologische hydrodynamische simulaties die later worden gebruikt in Hoofdstuk 2. De tweede helft van de introductie beschrijft de basis van de atomaire processen in röntgenstraling, zowel de processen die leiden tot continuüm emissie als de processen die spectraallijnen veroorzaken. Het modelleren van röntgenplasma's is niet mogelijk zonder plasmacodes, die kort worden beschreven in dit hoofdstuk, samen met aannames zoals botsingsionisatie-evenwicht of foto-ionisatie-evenwicht, en de verschillen daartussen. Aan het einde van dit hoofdstuk vat ik de eigenschappen samen die kunnen worden afgeleid uit de röntgenspectra en noem ik enkele van de hoge-resolutie röntgendetectoren (Chandra, XMM-Newton, XRISM en de toekomstige missie Athena).

In **Hoofdstuk 2** demonstreer ik de kracht van de microcalorimeters die gepland zijn aan boord van toekomstige missies zoals de X-ray Integral Field Unit (X-IFU) aan boord van Athena of de voorgestelde Integral Field Unit van de Line Emission Mapper X-ray probe (LEM). Met behulp van de Hydrangea kosmologische hydrodynamische simulaties voorspel ik de verwachte eigenschappen van het intergalactisch gas in en rondom massieve clusters van melkwegstelsels. In deze studie onderzoek ik in totaal 138 projecties uit de simulatieruimtes, waarbij ik 16 richtingen vind met een totale kolomdichtheid $N_{\text{O VII}} > 10^{14.5} \text{ cm}^{-2}$. De sterkste absorptielijnen zijn doorgaans verschoven met $\pm 1000 \text{ km/s}$ ten opzichte van het rustframe van het cluster waar ze het dichtst bij in de buurt zijn. Realistische gesimuleerde waarnemingen met toekomstige microcalorimeters (Athena's X-IFU en LEM's Integral Field

Unit) laten zien dat de detectie van kosmische webfilamenten in O VII en O VIII in absorptie mogelijk zal zijn als de kernen van clusters als achtergrond worden gebruikt. Een O VII detectie met een 5 sigma significantie kan worden bereikt in 10 – 250 ks met Athena voor de meeste van de geselecteerde clusters van melkwegstelsels. De O VIII detectie wordt pas haalbaar met een spectrale resolutie van ongeveer 1 eV, vergelijkbaar met die van LEM.

In **Hoofdstuk 3** wordt aangetoond dat foto-ionisatiemodellen die alleen de kosmische ultraviolet- en röntgenachtergrond meenemen mogelijk niet voldoende zijn om de kolomdichtheden van het gas in kosmische webfilamenten te schatten. Ik laat zien dat fotonen van clusters van melkwegstelsels, afkomstig uit het intra-cluster medium, de ionisatietoestand van het nabijgelegen intergalactische medium veranderen. Dit is in strijd met het typische beeld waarin wordt aangenomen dat het gas in het kosmisch web volledig kan worden beschreven door alleen botsingsionisatie-evenwicht. Ik laat zien dat de ionfracties moeten worden geparаметriseerd met de dichtheid en temperatuur van het foto-geïoniseerde gas, evenals de afstand tussen de ioniserende bron en het foto-geïoniseerde gas. De ionisatiefracties (in het bijzonder van C IV, C V, C VI, N VII, O VI, O VII, O VIII, Ne VIII, Ne IX, en Fe XVII) die uitgerekend zijn met foto-ionisatie door de kosmische achtergrond zijn ofwel een bovengrens of een ondergrens voor de ionisatiefractie berekend als functie van de afstand tot de emissie van de cluster. Met behulp van een eenvoudig model van een kosmisch webfilament voorspel ik hoe de straling van het cluster de kolomdichtheden verandert voor twee verschillende oriëntaties van de gezichtslijn. Voor gezichtslijnen die door de buitengebieden van clusters gaan, kan O VI worden onderdrukt met een factor 4.5, O VII met een factor 2.2, C V met een factor 3, en Ne VIII kan worden versterkt met een factor 2 voor gas met lage dichtheid.

In **Hoofdstuk 4** wordt het nieuwe ‘clus’ model beschreven dat onderdeel is van het SPEX softwarepakket. Het model berekent het spectrum en het radiële profiel voor een sferisch symmetrische benadering van een cluster van melkwegstelsels, een groep van melkwegstelsels, of zelfs een massief elliptisch sterrenstelsel. Met het model onderzoek ik de omvang van systematische effecten, veroorzaakt door projectie-effecten en resonante verstrooiing, op de afgeleide temperaturen en ijzerabundantie. Ik beschouw thermodynamische profielen van nabijgelegen cool-core clusters (A383, A2029, A1795, A262, Perseus) en het massieve elliptische sterrenstelsel NGC 4636, en laat zien dat de ingevoerde emissiemaatverdeling niet uit de gesimuleerde spectra kan worden afgeleid door gebruik te maken van modellen zoals enkelvoudige temperatuur, dubbele temperatuur, of een normaal verdeelde emissiemaat. Bovendien laat ik zien dat voor sommige cool-core clusters de projectie-effecten de gemeten temperaturen aanzienlijk beïnvloeden. Eerdere studies in de literatuur tonen aan dat resonante verstrooiing het afgeleide abundantieprofiel met maximaal 10 – 20% kan beïnvloeden. Dit komt overeen met onze bevindingen voor clusters met thermodynamische profielen die vergelijkbaar zijn met de Perseuscluster, waarvoor ik een 10 – 15% verandering van het abundantieprofiel rapporteer als gevolg van resonante verstrooiing. Voor het massieve elliptische sterrenstelsel NGC 4636 kan echter, wanneer rekening wordt gehouden met het resonante verstrooiingseffect in het centrum, de centrale abundantieafname die is gemeten met XMM-Newton en Chandra worden verklaard. Deze bevindingen kunnen van invloed zijn op kruis-calibratiestudies tussen verschillende instrumenten, evenals op precisie-cosmologie.

In **Hoofdstuk 5** ligt de focus op de updates van de afkoelingscurve in het foto-ionisatiemodel ‘pion’, dat een van de modellen is in de plasma-code SPEX. Ik beschrijf berekeningen van het radiatieve verlies door botsings-excitatie, di-electronische recombinatie, en de impact hiervan op de afkoelingscurve in dit foto-ionisatiemodel in de limiet van optisch dunne en lage-dichtheidsplasma’s. Bovendien bespreek ik de updates van de atomaire gegevens voor neutraal waterstof. Ik vergelijk de bijgewerkte atomaire database en de afkoelingscurve in SPEX met andere plasmacodes (MEKAL, APEC, Cloudy) en atomaire databases (CHIANTI, ADAS). Ik toon de impact van deze updates op de stabiliteitscurve die is gesimuleerd voor de actieve galactische kern NGC 5548, waarbij ik een nieuwe stabiele tak vind. Daarnaast bereken ik de kolomdichtheden van ionen en laat ik zien welke ionen pieken op deze nieuwe stabiele tak. Dergelijke updates van de afkoelingscurve zijn ook belangrijk voor de schatting van de absorptiemaatverdeling die de ionisatiestructuur van winden bij actieve galactische kernen beschrijft.

