



Universiteit
Leiden
The Netherlands

X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters

Urdampilleta Aldema, I.

Citation

Urdampilleta Aldema, I. (2019, November 13). *X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/80400>

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/1887/80400>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/80400> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Urdampilleta Aldema I.

Title: X-ray spectroscopy of merging galaxy clusters

Issue Date: 2019-11-13

Nederlandse Samenvatting

Clusters van sterrenstelsels zijn de grootste objecten in het universum. Ze bevatten tussen de honderd tot duizend sterrenstelsels. Deze sterrenstelsels worden omringd door heet geïoniseerd plasma, het zogenaamde intracluster medium (ICM) wat geobserveerd kan worden met behulp van röntgenstraling. De sterrenstelsels vormen slechts 5% van de totale massa, terwijl het ICM 15% van de massa van het totale cluster omvat. De rest van de massa, ~80%, bestaat vooral uit donkere materie. Clusters van sterrenstelsels worden waargenomen op verschillende golflengtes. In dit proefschrift zijn de meest relevante waarnemingen gedaan in optisch-, röntgen- en radio golflengtes (zie Fig. A). Optische waarnemingen onthullen de individuele sterrenstelsels en hun over-dichtheid (nl. een hogere dichtheid dan gemiddeld in het cluster) op een vergelijkbare roodverschuiving. Met behulp van röntgenstraling kunnen de eigenschappen van het ICM worden afgeleid, zoals onder andere de dichtheid, temperatuur en abundantie van elementen. Daarbij onthullen radio waarnemingen discrete en langgerekte radiobronnen, traceren ze de kosmische straling en de versnelling van energetische deeltjes. Clusters van sterrenstelsels worden gewoonlijk geklassificeerd in verschillende groepen op basis van hun dynamische toestand: gerelaxeerde of koele-kern clusters (CC), verstoorde of niet-koele-kern (NCC) en extreem verstoorde of fuserende clusters.

Clusters van sterrenstelsels groeien hiërarchisch door middel van accretie en fusie van minder zware groepen of subclusters. Deze fuserende stelsels, ook wel cluster mergers genaamd, zijn de meest energetische gebeurtenissen in het universum sinds de Oerknal. Turbulentie, schokken en koufronten ontstaan in het hete ICM als gevolg van deze sterke fusieactiviteit. Schokken zijn grootschalige structuren die zich voortplanten vanuit het centrum naar de rand van het cluster, waar ze meestal worden gedetecteerd. Ze kunnen worden waargenomen door middel van spectrale analyse dankzij temperatuur en dichtheidsdiscontinuïteiten in het ICM en door middel van de scherpe randen waarneembaar in röntgen. Men denkt dat schokken ($\mathcal{M} \leq 3-5$) elektronen (opnieuw) versnellen via eerste-orde Fermi Diffusive Shock Acceleration (DSA). Tegenwoordig worden er ook alternatieve mechanismen voorgesteld, zoals het opnieuw versnellen van reeds bestaande kosmische stralingselektronen. Deze relativistische deeltjes zouden niet-thermische synchrotron emissie kunnen produceren in de vorm van langwerpige, gepolariseerde en steile spectrumstruc-



Figuur A: Samengestelde afbeelding (optisch, röntgen in oranje en radio in blauw) van het cluster van sterrenstelsel Abell 3376. Credit: X-ray (NASA/CXC/SAO/A. Vikhlinin; ROSAT), Optical (DSS), Radio (NSF/NRAO/VLA/IUCAA/J. Bagchi).

turen ook bekend als radio relieken. In sommige fuserende clusters verschijnt deze radio emissie (radio relieken) samen met röntgen emissie (röntgen schokken).

Het ICM van clusters is rijk aan metalen, die voornamelijk hun oorsprong vinden in supernovae met ineerstortende kernen (SNcc), type Ia supernovae (SNIa) en sterren met een lage massa op de asymptotische reuzentak (AGB). SNcc produceren met name lichtere metalen (O, Ne, Mg, Si en S), terwijl zwaardere metalen (zoals Ar, Ca, Mn, Fe en Ni) door SNIa worden uitgestoten. AGB sterren dragen het meest bij aan de productie van C en N. Als de metalen eenmaal in het ICM zijn uitgestoten, worden ze getransporteerd, gemengd en opnieuw verdeeld. In de afgelopen jaren is de Fe abundantie van CC en NCC uitgebreid geanalyseerd. Er zijn echter maar weinig onderzoeken gedaan die gericht zijn op fuserende sterrenstelsels. Een beter begrip van de verdeling van metalen langs de as waarop de sterrenstelsels fuseren, kan de chemische geschiedenis en evolutie van deze grootschalige structuren onthullen. De radiale Fe verdeling van CC clusters vertoont een hoge metaalrijke piek vergeleken met NCC clusters, die op grote radiale afstanden afvlakt naar een uniforme verdeling rond $\sim 0.2-0.3 Z_{\odot}$. Hetzelfde gedrag wordt waargenomen in NCC clusters, wat wijst op een scenario waarin het ICM al vroeg met metalen is verrijkt ($z \sim 2-3$).

Röntgen spectroscopie biedt een nuttig hulpmiddel om al deze hier boven genoemde thermodynamische en chemische eigenschappen van het ICM af te leiden. We hebben

daarom actuele spectrale plasma codes met hoge nauwkeurigheid en volledigheid nodig om röntgenspectra van clusters van sterrenstelsels te modelleren en te fitten. SPEX is een van deze software programma's voor het modelleren, fitten en analyseren van spectra. SPEX is recentelijk geupdate naar v3.0 om te kunnen voldoen aan de hoge observationele eisen m.b.t. tot de spectroscopische waarnemingen die werden verwacht van de Hitomi satelliet en van toekomstige missies: XRISM en Athena. De belangrijkste verbeteringen waren gericht op het updaten van stralingsprocessen zoals stralingsrecombinatie, botsingsionisatie, ladingsuitwisseling of foto-ionisatie en de integratie van een groot aantal emissie- en overgangslijnen.

Dit proefschrift richt zich op de röntgenanalyse van fuserende clusters van sterrenstelsels en de ontwikkeling van de plasma code voor toekomstige spectroscopische waarnemingen met hoge resolutie. Dit werk is gewijd aan een beter begrip van twee concrete aspecten van deze fuserende clusters: ten eerste, de correlatie tussen de thermische (röntgen) en de niet-thermische (radio) componenten, en als tweede, hun metaalverrijkingsgeschiedenis. Het eerste punt kan de fysieke associatie tussen de röntgen- en radiocomponenten onthullen. Het tweede kan licht werpen op de dynamische geschiedenis van de fusies en hun rol in de metaalverrijking van de clusters.

In hoofdstuk 2 behandelen we de röntgenstudie van het fuserende sterrenstelsel Abell 3376 waargenomen met *Suzaku*. We bestuderen de ruimtelijke verdeling van de thermische component van het ICM inclusief de randen van het cluster. Hiervoor bepalen we de temperatuurverdeling in vier verschillende radiale richtingen (west, oost, noord en zuid). We vergelijken deze verdelingen met universele profielen van gerelaxeerde clusters en we vinden een afwijking in alle richtingen behalve het zuiden, wat een mogelijke aanwezigheid van schokken suggereert. We vinden echter alleen aanwijzingen voor twee schokken in het westen en oosten. De ene is gekoppeld aan de westerse radio-reliëk met $\mathcal{M} \sim 2.8$ en de andere aan de oostelijke 'inkeping' met een $\mathcal{M} \sim 1.5$. We detecteren ook een koud front ten oosten van de röntgenemissiepiek. Het Mach-nummer van de oostelijke schok is consistent met eerdere radio-waarnemingen, terwijl die van het westerse radio-reliëk iets lager is, waarschijnlijk door verouderingseffecten. Tot slot beschouwen we het fusiescenario en beargumenteren een mogelijke fusie dicht bij het hemelvlak met een dynamische leeftijd van ~ 0.6 Gyr na kernpassage.

In Hoofdstuk 3 onderzoeken we de thermodynamische eigenschappen van het hete plasma in het fuserende cluster van sterrenstelsels Abell 3365 met behulp van waarnemingen met *XMM-Newton*. We zoeken hiervoor als eerste naar de discontinuïteiten in de röntgenoppervlaktehelderheid en temperatuur aan de randen van het cluster en de centrale ICM-randen. Ten tweede verkrijgen we de temperatuur, Fe-abundantie en pseudo-entropieverdelingen langs de fuserende as in het centrale heldere gebied. We vinden twee sterke schokken ($\mathcal{M} > 3$) geassocieerd met het oostelijke radio-reliëk en het westelijke kandidaat-reliëk en één koud front ten westen van de röntgenemissiepiek. De schokversnellings efficiëntie bij het oostelijke reliëk is consistent met het DSA-mechanisme, wat suggereert dat dit een gunstig scenario is voor schokken met $\mathcal{M} > 3$. De abundantieverdeling laat tekenen zien van twee pieken met een waarde van $\sim 0.6 Z_{\odot}$. De ene komt overeen met de locatie van de hoofdscluster en de andere is verplaatst ten opzichte van de röntgenemissie piek richting het houdefront. We vinden ook een laag entropie minimum, wat

suggereert dat de koelekern van het voormalige sterrenstelsel de fusieactiviteit gedeeltelijk of volledig kan overleven.

In Hoofdstuk 4 presenteren we een spectrale röntgenanalyse van zes fuserende clusters (CIZA J2242.8+5301, 1RXS J0603.3+4214, Abell 3376, Abell 3667, Abell 665 and Abell 2256) waargenomen met XMM-Newton. We verkrijgen de temperatuur, Fe abundantie en pseudo-entropieverdelingen langs de fuserende as tot r_{500} . We leiden het gemiddelde Fe-profiel af, dat een matige centrale piek vertoont, lager dan ontspannen clusters, gevolgd door een gladde afvlakking tot een uniforme waarde van $\sim 0.2-0.3 Z_{\odot}$ bij grote radii. Bovendien suggereren de pseudo-entropieverdelingen dat in sommige gevallen de relatief lage entropiekern kan overleven bij grote fusies. We bestuderen ook de correlatie tussen Fe abundantie en pseudo-entropie. We vinden een bescheiden correlatie tussen de centrale regio's, waarschijnlijk als gevolg van de fusieactiviteit en de verspreiding van de metalen. Er is echter geen bewijs voor correlaties op grote afstand van het centrum aan de randen van het cluster. Dit resultaat samen met de uniformiteit van de abundantie lijkt aanvullend bewijs te leveren voor het pre-verrijkingsscenario.

Ten slotte updaten we in hoofdstuk 5 de werkzame doorsnede voor enkelvoudige ionisatie voor ionen van H tot Zn, waarbij we rekening houden met nieuwe theoretische berekeningen en laboratorium experimenten. De doorsneden van de rest van de ionen zonder dataset worden geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd. We kunnen niet alleen de totale werkzame doorsnede, maar ook voor het eerst die van de binnenste elektronen schillen atzonderlijk bepalen. Deze dwarsdoorsnedes omvatten twee verschillende stralingsprocessen: de directe ionisatie (DI) en excitatie-autoionisatie (EA). We modelleren en fitten de DI- en EA-processen met behulp van een uitbreiding van de vergelijkingen van Younger en Mewe om zo de DI- en EA-coëfficiënten te verkrijgen. We leiden de subshell-ionisatiecoëfficiënten af, waarbij we integreren over een Maxwelliaanse snelheidsverdeling. Tot slot nemen we de DI-, EA- en ionisatiesnelheidcoëfficiënten op in de nieuwe versie van SPEX v3.0.