



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## From intracluster medium dynamics to particle acceleration

Zhang, X.

### Citation

Zhang, X. (2022, June 29). *From intracluster medium dynamics to particle acceleration*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3421512>

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/1887/3421512>

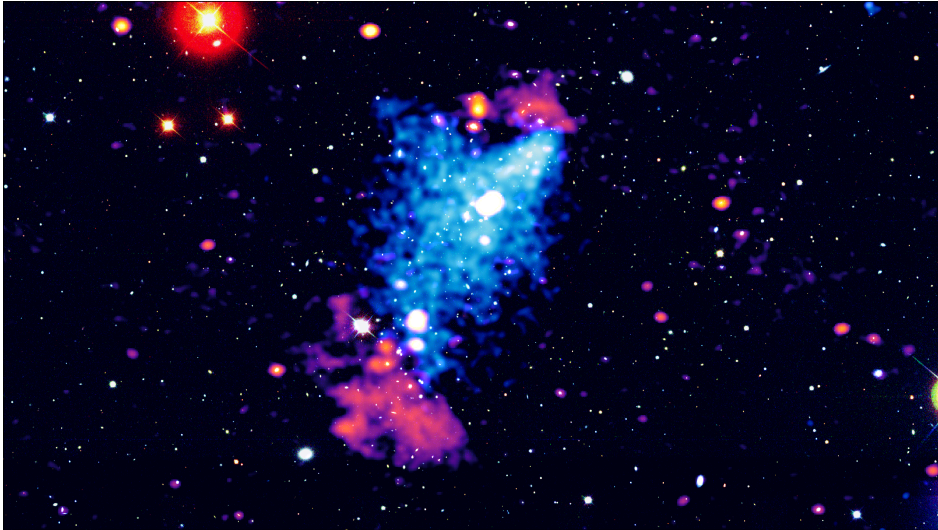
**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

---

## Nederlandse Samenvatting

Clusters van sterrenstelsels zijn knooppunten van het Kosmische Web en zijn de grootste gevirialiseerde *halo's* in het heelal, met massa's van ongeveer  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$ . Naast de vijf zesde van de massa die in de vorm van donkere materie is bedraagt het intracluster medium (ICM), die de enorme ruimte tussen de sterrenstelsels doordringt, het grootste deel van de resterende één zesde aan baryonische inhoud. De gasvormige clusteratmosfeer is extreem ijl en heet. De getalsdichtheid van het ICM is  $< 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ , wat veel lager is dan is bereikt in het beste vacuümlab op aarde. De temperatuur kan oplopen tot  $10^8 \text{ K}$ , wat betekent dat zware elementen zoals Fe worden geïoniseerd tot H- en He-achtige ionen. Ondertussen is de intracusterruimte turbulent en spelen clusterfusies een sleutelrol bij het stimuleren van de gasbewegingen. Deze gasbewegingen leiden tot grootschalige dichtheidsdiscontinuïteiten in de vorm van koude fronten en schokgolven, en thermodynamische fluctuaties als gevolg van turbulente bewegingen.

Op radiofrequenties is gevonden dat clusters van sterrenstelsels, vooral samensmeltende clusters, uitgebreide synchrotronbronnen herbergen die groottes van een Mpc kunnen bereiken en worden gekenmerkt door steile spectra. Op basis van de morfologie en radio-eigenschappen worden deze bronnen geïnclassificeerd als radiorelikwieën en radiohalo's. Het onderzoeken van deeltjesversnellingsmechanismen in het ICM is de sleutel om de oorsprong van deze uitgebreide clusterradiobronnen te onthullen. De twee algemeen aanvaarde versnellingsmechanismen voor radiorelikwieën en radiohalo's zijn respectievelijk schokversnelling en turbulente versnelling. Beide scenario's zijn het gevolg van ICM bewegingen. Daarom zijn röntgenwaarnemingen van het ICM belangrijk voor het kwantificeren van schokgolf- en turbulentie-eigenschappen om de versnellingsmodellen te testen.



**Figuur A.1:** Samensmeltend cluster ZwCl 2341+0000, met twee radiorelikwieën aan weerszijden.

De eigenschappen van schokgolven kunnen worden gekwantificeerd op basis van de Rankine-Hugoniot-conditie door de stroomopwaartse en de stroomafwaartse thermodynamische eigenschappen te meten. De turbulente snelheidsdispersie kan worden geschat door de amplitude van de dichtheidsfluctuaties te meten of in de nabije toekomst aan de hand van lijnverschuivingen en lijnbreedtes in spectra van hoge resolutie.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift richt zich op röntgenwaarnemingen van clusters van sterrenstelsels. Het hoofddoel is om de verbanden tussen röntgen- en radioverschijnselen vast te stellen en verder te onderzoeken.

1. Het verband tussen schokgolven en radiorelikwieën

In **Hoofdstukken 2 en 3** hebben we diepe röntgenwaarnemingen geanalyseerd van twee samensmeltende clusters, respectievelijk Abell 3411-3412 en ZwCl 2341+0000. De diepe waarnemingen onthullen de thermodynamische structuur van het ICM rond radiorelikwieën en illustreren dat zowel schokgolven als koude fronten ruimtelijk kun-

nen overlappen met radiorelikwie-emissie. Onder hen bevinden de geprojecteerde posities van schokgolven zich dicht bij de buitenranden van radiorelikwieën, wat het scenario voor schokversnelling ondersteunt.

Als we de resultaten vergelijken tussen de diepe en voorheen gepubliceerde ondiepe waarnemingen, is een cruciale boodschap dat schokgolven kunnen worden verward met koude fronten op basis van de vergelijkbare kenmerken van sprongen in oppervlaktehelderheid. Om de aard van een oppervlaktehelderheidssprong als schokgolf te bevestigen is röntgenspectrale analyse nodig op basis van thermodynamische eigenschappen die verschillen met die van koude fronten.

## 2. Het verband tussen schokgolven en radiohalo's

**Hoofdstuk 4** meldt twee sprongen in de oppervlaktehelderheid van de röntgenstraling op de locatie van de radiohalo rand in het cluster ClG 0217+70. Dit zijn nieuwe kandidaten voor associatie tussen de schokgolf en de radiohalo, als deze schokgolven worden bevestigd door de komende diepe röntgenwaarnemingen. Deze ontdekking en een handvol eerder gemelde gevallen suggereren dat schokgolven ook een rol kunnen spelen bij het vormen van radiohalo's.

## 3. Het verband tussen het vermogen van radiohalo's en de sterkte van turbulentie

In **Hoofdstuk 5** onderzoeken we de relatie tussen het vermogen van radiohalo's en eigenschappen van turbulentie in het ICM met behulp van het monster in de tweede gegevensvrijgave van de LOFAR Two-metre Sky Survey. Het Mach-getal van turbulentie wordt geschat door het vermogenspectrum van fluctuaties in de oppervlaktehelderheid van röntgenstraling te berekenen, wat blijkt te zijn gecorreleerd met de dynamische toestand van het cluster. Bovendien, door de turbulente dissipatieflux te berekenen, vinden we dat deze gecorreleerd is met het vermogen van radiohalo's met een regressiehellings van ongeveer één, wat een onderliggend verband suggereert tussen deeltjesversnelling en de turbulente bewegingen van het ICM.

Naast het beperken van de eigenschappen van de grootste deeltjesversnellers in het heelal, behandelt dit proefschrift diverse onderwerpen over

röntgenwaarnemingen van clusters van sterrenstelsels. In **Hoofdstuk 2** en **5** ontwikkelen we methoden voor het modelleren van de gefocuste en ongefocuste niet-röntgenachtergrond voor de *XMM-Newton* EPIC beeldvormingsspectrometer, die de systematische onzekerheid voor data-analyse in achtergrond-gedomineerde regio's reduceren. In **Hoofdstuk 3** ontdekken we een uniek kegelachtig restant van een kern in het samensmeltende cluster ZwCl 2341+0000, wat een korte overgangsfase van de kernrest in een frontale samenvoeging impliceert. **Hoofdstuk 4** illustreert de kracht van röntgenspectroscopie bij het meten van de roodverschuiving van een cluster van sterrenstelsels achter het Galactische vlak, waarvan de optische gegevens te lijden hebben onder systematische onzekerheden als gevolg van extinctie.