



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Untangling cosmic collisions: a study of particle acceleration and magnetic fields in merging galaxy clusters

Osinga, E.

Citation

Osinga, E. (2023, November 1). *Untangling cosmic collisions: a study of particle acceleration and magnetic fields in merging galaxy clusters*.

Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3655893>

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/1887/3655893>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

De Oerknal is het voorgestelde begin van het Universum, waarbij het heelal opeens ontstond in een explosie vanuit één punt dat alle energie bevatte die er ooit was en ooit zal zijn. Terwijl het Universum uitdijde en afkoelde begon materie samen te klonteren onder invloed van zwaartekracht. De eerste sterren, sterrenstelsels en groepen van sterrenstelsels vormden, en het Universum begon zich op de allergrootste schaal vorm te geven als een kosmisch spinnenweb. De meeste sterrenstelsels leven in de draden van dit web, terwijl buiten de draden van het web grote lege ruimtes ('holtes') zijn. Op de knooppunten van deze draden ontstonden de grootste structuren in het heelal die nog door zwaartekracht bij elkaar gehouden worden: clusters van sterrenstelsels (ook wel clusters van melkwegstelsels).

CLUSTERS VAN STERRENSTELSELS

Hoewel de naam doet vermoeden dat het simpelweg grote groepen van honderden sterrenstelsels zijn, zijn de sterrenstelsels het minst belangrijke deel van de clusters. Clusters bestaan vooral uit een erg heet en ijl gas, dat zich in de ruimte tussen de sterrenstelsels bevindt, in het zogenoemde *intra-cluster medium*⁶. Dit gas bestaat vooral uit waterstof- en heliumatomen, en omvat meer dan 90% van de massa van een cluster. De temperatuur van het gas is zo hoog (10 miljoen tot 100 miljoen graden Celsius) dat de elektronen loskomen van de atomen (ionisatie). Het gas is dan ook niet meer zichtbaar op golflengtes die ons oog kan zien, maar zendt röntgenstraling uit. Clusters van sterrenstelsels kunnen dus het beste worden gezien als enorme gaswolken (zie Figuur S.3, midden).



Figuur S.3: De cluster van sterrenstelsels Abell 2256 op drie verschillende golflengtes. *Links*: alleen de sterrenstelsels zijn zichtbaar in infraroodlicht; *Midden*: in blauw is de röntgenstraling van het hete gas tussen de sterrenstelsels te zien. *Rechts*: in rood is de radiostraling te zien, afkomstig van hoog-energetische geladen deeltjes in het gas die om magnetische velden gebogen worden. Infrarood: neoWISE (Meisner et al., 2017), röntgen: XMM-newton (Rajpurohit et al., 2023), radio: LOFAR (Osinga et al., 2023a), beeldoverlap: Frits Sweijen

⁶Hier negeren we donkere materie even, wat het grootste deel van de massa beslaat, maar niet de focus is van dit proefschrift. Met donkere materie erbij hebben clusters een totale massa van honderden tot duizenden biljoenen zonsmassa's ($> 10^{14} M_{\odot}$).

Clusters zijn nog steeds aan het vormen en groeien, door stof en gas aan te trekken vanuit hun omgeving en door botsingen met andere clusters. Botsingen van twee clusters zijn geweldig energetisch, en zorgen ervoor dat het gas gehusseld en geschokt wordt. De geladen deeltjes in het gas, protonen en elektronen (die van elkaar gescheiden zijn omdat het gas zo heet is), kunnen door de schokgolven en turbulentie in het gas versneld worden tot snelheden die dicht bij de lichtsnelheid liggen. In de aanwezigheid van een magnetisch veld worden de elektronen het sterkst afgebogen en zullen ze radiostraling uitzenden. Deze radiostraling is zichtbaar met telescopen zoals de *Low-Frequency Array* (LOFAR), waarvan de kern in Drenthe staat. LOFAR is bijzonder geschikt voor dit soort waarnemingen, omdat de deeltjes voornamelijk radiostraling uitzenden op lage frequenties, ofwel lange golflengtes (zie Figuur S.3, rechts).

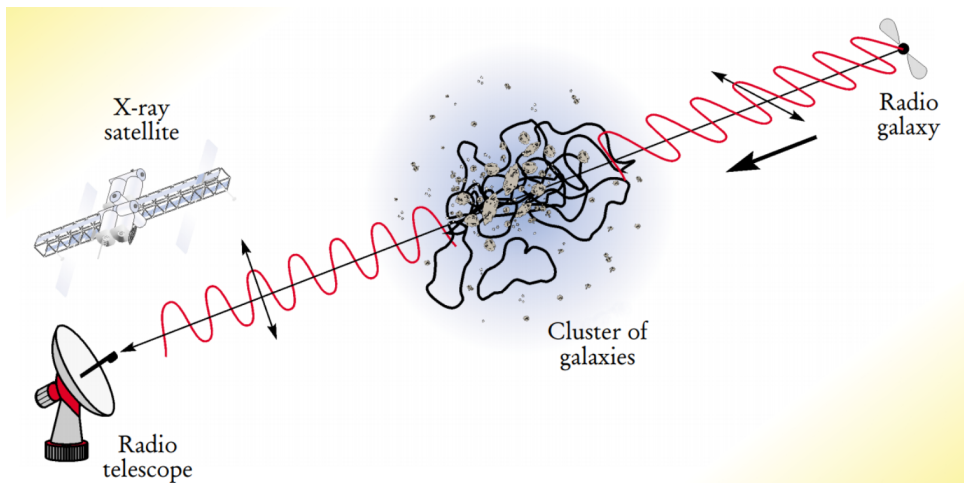
We zien over het algemeen drie verschillende klassen van radiostraling in clusters. Als eerste zijn er *radiohalo's*, grote ronde radiostructuren in het midden van clusters. De lichtkracht van radiohalos volgt grofweg de verdeling van het hete gas, dus ze zijn feller in het centrum en worden zwakker naar de buitenkant van de clusters. We denken dat radiohalos vooral een deeltjesversnellingsproces laten zien dat ontstaat door de turbulentie in het gas. Als tweede zijn er *radioschokken*, die zo genoemd zijn omdat ze lange en uitgestrekte structuren hebben die vaak schokgolven in het gas volgen. Hier worden elektronen versneld door schokgolven die ontstaan in grote botsingen van clusters. Als laatste komt er soms ook nog radiostraling van de sterrenstelsels zelf. Als een supermassief zwart gat, wat zich in het centrum van praktisch alle sterrenstelsels bevindt, genoeg materiaal om zich heen heeft wordt een sterrenstelsel actief genoemd. Een deel van het materiaal om zo'n zwart gat heen wordt opgeslokt, maar een deel wordt ook uitgeworpen in de vorm van twee immense fonteinen, of radiojets. Deze jets zijn vaak vele malen groter dan het sterrenstelsel, met afmetingen tot enkele miljoenen lichtjaren⁷. Omdat de sterrenstelsels die de jets produceren door het hete gas van de cluster bewegen, worden de jets vaak afgebogen en zien we een rijke diversiteit aan vormen. Radiojets komen niet uitsluitend voor in clusters, aangezien alle sterrenstelsels, ook die buiten clusters, een actief zwart gat kunnen hebben. Wel denken we dat de radiojets een belangrijke bron kunnen zijn van energetische elektronen die geleidelijk door de cluster kunnen verspreiden en opnieuw versneld kunnen worden wanneer clusters botsen.

MAGNETISCHE VELDEN

Het feit dat we radiostraling zien komen van clusters betekent dat er magnetische velden moeten zijn in het gas. Dit is omdat de radiostraling de kenmerken heeft van synchrotronstraling, die uitgezonden wordt door geladen deeltjes in een magnetisch veld. Het is echter een groot mysterie hoe deze magnetische velden zijn ontstaan en geëvolueerd in de ruimte tussen de sterrenstelsels. De beste theorie is dat de magnetische velden in clusters geleidelijk aan zijn gegroeid tijdens het vormingsproces van clusters vanuit een initieel zwak magnetisch veld, dat al aanwezig is bij het ontstaan van de clusters. Maar de oorsprong van het initiële magnetische veld is nog onbepaald. Er zijn twee denkrichtingen voor het ontstaan van de magnetische velden. Ze kunnen een fundamenteel deel van het

⁷Om deze onbevattelijke schaal toch enige context te geven: de afstand van de Aarde tot de Zon is ongeveer 8 lichtminuten, en de afstand van de Aarde tot het centrum van de Melkweg is ongeveer 26.000 lichtjaar.

Universum zijn, gecreëerd net na de Oerknal of tijdens de formatie van de eerste structuren in het heelal (*de fundamentele oorsprong*), of ze kunnen later de ruimte in geslingerd zijn door supernova explosies en actieve sterrenstelsels (*de astrofysische oorsprong*). Wat de oorsprong ook is, magnetische velden hebben een belangrijk effect op hoe energie wordt getransporteerd door het hete gas, en hoe deeltjes versneld worden tijdens botsingen van clusters. Echter is van de eigenschappen van de huidige magnetische velden in clusters, ook niet veel bekend. De meest effectieve manier om de eigenschappen van magnetische velden in clusters te bepalen is door het Faraday effect (zie Figuur S.4). Aangezien licht een elektromagnetische golf is, met een elektrische en magnetische veldgolf die loodrecht op de bewegingsrichting staan (en loodrecht op elkaar), zijn er veel mogelijke oriëntaties van de elektrische veldgolf. Wanneer deze slechts één bepaalde oriëntatie heeft noemen we het licht (linear) gepolariseerd. De polarisatiehoek wordt gedraaid wanneer licht door een gemagnetiseerd gas gaat zoals die in clusters. Hoeveel graden de hoek gedraaid wordt, is afhankelijk van de kracht van het magneetveld, de dichtheid van de vrije elektronen in het gas, en de golflengte van het licht. Door op meerdere golflengtes tegelijkertijd te observeren met een radiotelescoop, en een röntgentelescoop te gebruiken om de dichtheid van de vrije elektronen te bepalen, kunnen eigenschappen van het magnetisch veld worden afgeleid. Een probleem met studies van het Faraday effect is echter dat gepolariseerde radiobronnen vrij zeldzaam zijn, en hele diepe waarnemingen nodig zijn van nabije clusters om genoeg gepolariseerde radiobronnen te vinden. Als alternatief kunnen waarnemingen van verschillende clusters op elkaar gestapeld worden. Met de (allicht sterke) aanname dat alle clusters ongeveer hetzelfde zijn, kunnen dan gemiddelde eigenschappen van het magnetisch veld in clusters op statistische wijze bepaald worden.



Figuur S.4: Een illustratie van het Faraday-effect. Een ver actief sterrenstelsel zendt gepolariseerde radiostraling uit met een elektrische veldgolf onder een bepaalde hoek. Wanneer de golf het magnetische gas van de cluster bereikt, wordt de hoek gedraaid, afhankelijk van de golflengte van het licht en de eigenschappen van het gas. Deze draaiing kan worden waargenomen met een radiotelescoop die op verschillende golflengtes waarneemt. Afbeelding: Philipp P. Kronberg, *Physics Today*, December 2002.

DIT PROEFSCHIFT

Dit proefschrift onderzoekt het deeltjesversnellingsproces en de magnetische velden die tot de radiostraling in clusters van sterrenstelsels leiden. Door deze onderwerpen beter te begrijpen leren we meer over het vormingsproces van clusters, aangezien botsingen van clusters sterk verbonden zijn met beide zaken. Het deeltjesversnellingsproces kan het beste worden bestudeerd op lage frequenties (~ 100 MHz), waar LOFAR uitermate geschikt voor is. Magnetische velden daarentegen kunnen het beste worden onderzocht op hogere frequenties (~ 1000 MHz), aangezien het Faraday effect op lagere frequenties zo sterk wordt dat de polarisatie-eigenschappen verloren gaan. Daarom wordt in dit proefschrift de Karl G. Jansky Very Large Array (VLA), een telescoop in New Mexico, gebruikt om de magnetische velden in clusters beter te begrijpen.

In **Hoofdstuk 2** wordt de oriëntatie van radiojets van actieve sterrenstelsels onderzocht. Eerdere studies hebben gevonden dat de oriëntatie van radiojets niet willekeurig is over grote stukken van de hemel, maar dat jets van sterrenstelsels die dicht bij elkaar lijken te staan aan de hemel vaak dezelfde richting op wijzen. Dit zou sterke implicaties hebben voor de formatie van de structuur van het Universum. Echter kunnen kleine systematische meetfouten leiden tot een vertekening van de resultaten. Het is daarom belangrijk om ook de afstand van de radiojets tot de aarde mee te nemen (via de roodverschuiving van het actieve sterrenstelsel) en te meten of de jets die fysiek dicht bij elkaar staan (in 3D) ook echt dezelfde richting op wijzen of dat alleen lijken te doen aan de hemel (in 2D). Door een steekproef te nemen met 7,555 duidelijke radiojets uit de *LOFAR Two Meter Sky Survey* (LoTSS) wordt de nulhypothese getest dat de radiojets geen voorkeursrichting hebben in 3D en in 2D. We vinden bewijs dat de nulhypothese incorrect is in 2D, dus dat radiojets van sterrenstelsels die aan de hemel dicht bij elkaar lijken te staan inderdaad een voorkeursrichting hebben. Echter vinden we geen bewijs dat de nulhypothese incorrect is in 3D, wat er op duidt dat er waarschijnlijk onbekende systematische meetfouten in de data zitten en de oriëntatie van de jets in het Universum wel echt willekeurig is op grote afstanden.

In **Hoofdstuk 3** wordt onderzocht of kleinere clusters van sterrenstelsels, met lagere massa en dus minder energetische botsingen dan tot nu toe bestudeerd zijn, toch nog steeds radiostraling in de vorm van radiohalo's kunnen vertonen. We analyseerden de diepste radiokaarten ooit gemaakt op de frequentie van 150 MHz, als onderdeel van de *LOFAR Two Metre Sky Survey Deep Fields*. Uit de observaties bleek dat er inderdaad een cluster met een relatief lage massa (slechts 300 biljoen zonsmassa's), ook nog op een vrij hoge roodverschuiving ($z=0.77$), een radiohalo liet zien. Een mogelijke detectie werd ook gedaan in een andere cluster met nog iets lagere massa. Gecombineerd met bovengrenzen die gesteld konden worden op clusters waar geen radiostraling vandaan kwam, waren de resultaten consistent met de bekende relatie tussen cluster massa en radiohalo lichtkracht, al was de steekproefgrootte klein.

In **Hoofdstuk 4** wordt LOFAR tot het uiterste gedreven, met observaties van de nabijgelegen cluster van sterrenstelsels Abell 2256 tot de uiterst lage frequentie van 16 MHz. Dit is lastig omdat de bovenste laag van de atmosfeer, de ionosfeer, radiogolven op lage frequenties sterk afbuigt en van richting verandert. Desalniettemin lukt het om goede kwaliteit LOFAR beelden van Abell 2256 tussen 16 en 168 MHz te maken, waarin we de radioschock, radiohalo en verschillende andere radiobronnen detecteren en

onderscheiden. Door vergelijking met literatuurgegevens op hogere frequenties, meten we het geïntegreerde spectrum van de radiohalo tussen 24 en 1500 MHz en de radioschok tussen 24 en 3000 MHz. Beiden vertonen ze eenvoudige machtswetten, waarbij de radiostraling S feller wordt op lagere frequentie ν als $S \propto \nu^\alpha$, met $\alpha = -1,56 \pm 0,02$ voor de radiohalo en $\alpha = -1,00 \pm 0,02$ voor de radioschok. Ook wordt een nieuwe bron van oud radioplasma gedetecteerd met een extreem steil spectrum ($\alpha = -1,90 \pm 0,1$) die gemist was op hogere frequenties. Ten slotte wordt een model voor het genereren van de radiohalo getoetst met de combinatie van radio en gammastraling waarnemingen.

In **Hoofdstukken 5 en 6** worden waarnemingen van 124 clusters met de VLA radiotelescoop gepresenteerd. Het doel van deze waarnemingen is om statistisch de eigenschappen van het magnetisch veld van clusters af te leiden door de clusters op elkaar te stapelen. Er zijn in totaal 819 gepolariseerde radiobronnen gevonden, waarvan het Faraday effect bepaald is. **Hoofdstuk 5** presenteert de analyse van de depolarisatie van de radiosignalen. Voor de eerste keer wordt een duidelijke trend waargenomen waarbij gepolariseerde bronnen achter clusters (zoals in Figuur S.4) steeds meer depolariseren naarmate de geprojecteerde afstand tot het centrum van de cluster afneemt. Met behulp van röntgengegevens van de *Chandra* telescoop worden theoretische modellen vergeleken met de data, en worden zo de eigenschappen van de magnetische velden bepaald. **Hoofdstuk 6** verbetert deze analyse door informatie van de Faraday rotatie van de polarisatiehoek toe te voegen. We zien een duidelijke toename in de variantie van de rotatiematen naar het centrum van clusters, in overeenstemming met een gemiddelde magnetische veldsterkte van ongeveer $3 \mu\text{Gauss}$. Door de depolarisatie en rotatiemaat te combineren en te vergelijken met een model, wordt de beste overeenstemming gevonden voor een magnetisch veld met een centrale sterkte van $B = 5 \mu\text{Gauss}$ die afneemt met de dichtheid n van het hete gas als $B \propto n^{0.5}$. In het best passende model fluctueert het magnetisch veld op schalen van meer dan een miljoen lichtjaar, wat duidt op turbulentie die op grote schalen wordt opgewekt, bijvoorbeeld door botsingen van clusters.

