



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Radio emission from merging galaxy clusters : characterizing shocks, magnetic fields and particle acceleration

Weeren, R.J. van

Citation

Weeren, R. J. van. (2011, December 20). *Radio emission from merging galaxy clusters : characterizing shocks, magnetic fields and particle acceleration.*

Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18259>

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/1887/18259>

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

Nederlandse samenvatting

In dit proefschrift worden radiowaarnemingen en computer simulaties van samensmeltende clusters van sterrenstelsels besproken. Om dit beter te begrijpen wordt eerst uitgelegd wat clusters van sterrenstelsels zijn en hoe we denken dat deze ontstaan. Daarna wordt toegelicht hoe we de radiostraling, afkomstig van samensmeltende clusters, kunnen waarnemen met radiotelescopen. Ten slotte wordt het onderzoek dat in dit proefschrift beschreven is kort samengevat per hoofdstuk.

Clusters van sterrenstelsels

Alle sterren die we met het blote oog 's nachts kunnen zien behoren tot ons eigen sterrenstelsel de Melkweg. De meeste van deze sterren bevinden zich relatief dichtbij de Aarde. De Melkweg bevat echter veel meer sterren dan zichtbaar met het blote oog, wel een paar honderd miljard. Daarnaast bevat de Melkweg ook stof en gas. De Melkweg is niet het enige sterrenstelsel in het heelal. Er zijn tenminste 100 miljard sterrenstelsels en waarschijnlijk nog veel meer sterrenstelsels die elk weer uit miljarden sterren bestaan. Sterrenstelsels bevinden zich vaak in groepen. Onze Melkweg behoort tot de Lokale Groep die enkele tientallen leden bevat. Er zijn echter veel grotere groepen van sterrenstelsels, die noemen we clusters van sterrenstelsels. De sterrenstelsels in groepen en clusters worden bij elkaar gehouden door de zwaartekracht. Clusters van sterrenstelsels nemen een bijzondere plaats in als grootste door de zwaartekracht gebonden structuren in het heelal.

De dichtstbijzijnde cluster is de Virgo Cluster op een afstand van 54 miljoen lichtjaar. Dit betekent dat het licht, reizend met een snelheid van 300,000 km/s, er 54 miljoen jaar over doet om de Aarde te bereiken. We kijken dus 54 miljoen jaar terug in de tijd voor deze cluster. De meeste clusters staan veel verder weg, op afstanden van enkele miljarden lichtjaren.

Zichtbaar licht is een vorm van elektromagnetische straling net zoals radio, infrarode, ultraviolette, Röntgen en gammastraling. Het enige verschil tussen deze verschillende vormen van straling is de golflengte. Ultraviolet, Röntgen en gammastraling hebben kortere golflengtes dan zichtbaar licht. De meeste straling met kortere golflengtes en ook infrarode straling wordt tegengehouden door de atmosfeer. Radiostraling daarentegen dringt grotendeels ongehinderd door de atmosfeer heen, net zoals zichtbaar licht.

De sterrenstelsels in clusters worden bestudeerd in zichtbaar licht, maar astronomen kijken ook naar clusters op andere golflengtes. Op deze manier kan veel meer kennis worden verkregen

over de processen die zich hier afspelen. Behalve in de sterrenstelsels is er ook gas aanwezig tussen de sterrenstelsels in clusters. De massa van dit gas is zelfs veel groter dan de massa van de sterrenstelsels. Het gas in clusters is zeer ijl en heet, met een temperatuur van rond de 10 miljoen graden of hoger. Dit hete gas straalt voornamelijk Röntgenstraling uit en we kunnen dit waarnemen met Röntgen-satellieten. Clusters bevatten ook kleinere hoeveelheden koeler gas dat voornamelijk op infrarode golflengtes wordt bestudeerd.

Hoe ontstaan clusters van sterrenstelsels?

Eén van de belangrijkste vragen die sterrenkundigen proberen te beantwoorden is hoe sterren, sterrenstelsels, en clusters van sterrenstelsels zich hebben gevormd na de Big Bang, 13,7 miljard jaar geleden. Vlak na de Big Bang bestond het heelal namelijk alleen uit heet gas. Het idee is dat het gas begon samen te klonteren toen de temperatuur genoeg gedaald was, onder invloed van de zwaartekracht. Hierbij ontstonden de eerste sterren en sterrenstelsels. Uiteindelijk toen het heelal ongeveer de helft van zijn huidige leeftijd bereikt had begonnen sterrenstelsels zich te groeperen in clusters. Clusters van sterrenstelsels zijn dus relatief jong ten opzichte van de eerste sterren en sterrenstelsels. Clusters vormen zich door samensmeltingen van kleinere clusters en groepen, dit groeiproces vindt nog steeds plaats in het huidige heelal.

Tijdens de samensmeltingen en botsingen tussen clusters gebeurt er vrij weinig met de individuele sterren en sterrenstelsels. Ze bewegen meestal gewoon langs elkaar heen. Het hete gas in de groepen en clusters botst echter op elkaar en hierbij worden schokgolven in het gas gevormd. Hierdoor wordt het hete gas nog verder verhit. Deze schokgolven kunnen we zien met Röntgen-satellieten. Al met al duurt een samensmelting wel een miljard jaar lang, zodat we slechts moment opnames van deze gebeurtenissen te zien krijgen. Toch kan dit proces bestudeerd worden, door naar verschillende samensmeltingen te kijken die zich elk in verschillende stadia bevinden.

Radiostraling van clusters

In 1970 werd een belangrijke ontdekking gedaan in de Coma Cluster. Behalve Röntgenstraling bleek het gas in de cluster ook diffuse radiostraling uit te zenden. Daarna werden ook in sommige andere clusters van deze diffuse radiobronnen gevonden. Alle clusters die diffuse radiobronnen hebben zijn aan het samensmelten tot grotere clusters. Het gas in deze clusters is dan ook heter dan in clusters die zich in rust bevinden. De diffuse radiostraling is onder te verdelen in twee groepen. Er zijn radio *halo's* die zich centraal in de cluster bevinden en radio *relics* die verder van het centrum staan. De halo's laten over het algemeen weinig structuur zien, terwijl de relics vaak langgerekt zijn en onregelmatige verschillen in helderheid vertonen. De radiostraling die wordt waargenomen is van het type *synchrotron-straling*. Een specifieke eigenschap van de synchrotron-straling van halo's en relics is dat deze sterk in helderheid toeneemt met langere golflengtes. Synchrotron-straling komt vrij wanneer geladen deeltjes rondom magnetische veldlijnen cirkelen met snelheden dichtbij de lichtsnelheid. Om deze straling te produceren zijn dus hoog-energetische deeltjes nodig en een magnetisch veld. Astronomen willen graag weten waar deze deeltjes en magnetische velden vandaan komen. De deeltjes kunnen alleen deze extreme energieën bereiken als ze versneld worden, net zoals in een deeltjesversneller op aarde.

Clusters zijn niet de enige objecten in het heelal die radiostraling uitzenden. Sommige sterrenstelsels, met een zwart gat in het centrum, zenden zeer heldere synchrotron-straling uit. Daarnaast zijn er nog veel meer radiobronnen, zoals de Zon, planeten, sterren, restanten van sterren en gas in sterrenstelsels die allen radiostraling uitzenden. Deze straling is soms van een ander type dan synchrotron-straling.

Radiotelescopen

Radiotelescopen kunnen tegenwoordig gedetailleerde afbeeldingen maken van de radiobronnen in clusters. Een radiotelescoop bestaat gewoonlijk uit een grote schotel om de straling te bundelen. De resolutie, de mate waarin kleine details kunnen worden onderscheiden, wordt bepaald door de diameter van de schotel. De gevoeligheid voor de radiostraling wordt bepaald door de oppervlakte van de schotel. De grootste beweegbare schotel heeft een diameter van iets meer dan 100 meter. Er is zelfs een schotel van 300 meter maar deze kan niet bewegen. Omdat radiotelescopen waarnemen op veel langere golflengtes dan zichtbaar licht is de resolutie erg beperkt, zelfs voor schotels van 100 meter. Dit komt doordat de resolutie omgekeerd evenredig schaalt met de golflengte van de straling. Omdat clusters erg ver weg staan is een resolutie die overeenkomt met een schotel van tenminste enkele kilometers nodig om clusters in detail te kunnen bestuderen. Het is onmogelijk en te duur om zulke grote schotels te bouwen. Door gebruik te maken van radio-interferometrie kunnen we dit probleem echter omzeilen.

Radio-interferometrie

Radio-interferometrie is een techniek waarbij de opgevangen signalen van meerdere radioschotels worden gecombineerd, hiermee kun je een veel grotere telescoop nabootsen. In plaats van de diameter van de individuele schotels bepaalt nu de grootste afstand tussen de schotels de resolutie en de totale oppervlakte van alle schotels bepaalt de gevoeligheid. Dus hoe meer signalen van schotels gecombineerd worden des te beter.

De drie belangrijkste radio-interferometrie telescopen zijn de Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) in Drenthe, bestaande uit 14 schotels van elk 25 meter. De grootste afstand tussen de schotels bedraagt 2.7 km. De Amerikaanse Very Large Array (VLA) bestaat uit 27 schotels van 25 meter over een maximale afstand van 30 km. De Indiase Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) heeft 30 schotels van 45 meter, ook verspreid over een gebied van 30 km. De telescopen verschillen onderling in de golflengtes die ze kunnen ontvangen. De GMRT is vooral gevoelig voor straling met lange golflengtes, dit is een voordeel omdat de relics en halo's vooral helder zijn bij deze lange golflengtes.

Een nadeel van de lange golflengtes is het feit dat de resolutie van een telescoop afneemt met de golflengte. Ook is er op langere golflengtes vaak meer storing door radiostraling afkomstig van bijvoorbeeld mobiele telefoons en radio stations. Een nog lastiger probleem is dat een laag van de atmosfeer van de Aarde (de ionosfeer) de radiostraling iets kan afbuigen. Deze afbuiging neemt toe met de golflengte en dat kan resulteren in onscherpe beelden. De Low Frequency Array (LOFAR) is een nieuwe radiotelescoop die voor het grootste gedeelte zich in Nederland bevindt en is gebouwd door ASTRON. Deze is specifiek ontworpen voor het doen van waarnemingen op de langste golflengtes. In plaats van schotels bestaat LOFAR uit vele honderden kleine antennes die elektronisch worden gekoppeld tot stations. LOFAR heeft stations over een

gebied van 100 km in Nederland. Daarnaast zijn er ook stations in Duitsland, Engeland, Frankrijk en Zweden. De grootste afstanden tussen deze stations zijn meer dan 1000 km. Het grote aantal stations, meer dan 40, en de enorme afstanden betekent een enorme doorbraak in gevoeligheid en resolutie. Dit alles maakt LOFAR tot de meeste krachtige radiotelescoop ter wereld. Naast clusters zullen vele andere bronnen in detail bestudeerd kunnen worden.

Dit proefschrift

In dit proefschrift wordt de radiostraling van samensmeltende clusters van sterrenstelsel bestudeerd. De belangrijkste vragen zijn: Waar komen de hoog-energetische deeltjes vandaan die de radiostraling uitzenden? Hoe worden deze deeltjes versneld? Hoe is het magnetisch veld in clusters ontstaan en wat zijn de eigenschappen van dit magnetisch veld? Het beantwoorden van de bovenstaande vragen is van belang om het vormingsproces van clusters beter te begrijpen. Naast radiowaarnemingen wordt er in dit proefschrift ook gebruik gemaakt van waarnemingen van Röntgen-satellieten en optische telescopen. Tevens zijn numerieke simulaties op krachtige computers gedaan om deze samensmeltingen van clusters beter te begrijpen. Een van de problemen voor het bestuderen van samensmeltende clusters is dat er maar weinig (enkele tientallen) clusters bekend zijn met radio halo's en relics. Een ander doel is dus om meer halo's and relics te vinden om zo de gezamenlijke eigenschappen van de clusters te kunnen bestuderen en te vergelijken.

In **Hoofdstuk 2** en **3** worden GMRT, WSRT en VLA waarnemingen beschreven van 26 potentiële nieuwe halo's en relics. Deze bronnen waren gevonden in oudere radiokaarten en vielen op doordat hun helderheid sterk toenam op langere golflengtes. Het blijkt dat inderdaad enkele van deze bronnen nieuwe relics en halo's zijn. De bronnen zijn verder bestudeerd met vervolgwaarnemingen op verschillende golflengtes. Door deze gegevens te combineren met al bekende radio relics zijn correlaties gevonden tussen verschillende eigenschappen van de bronnen, zoals hun grootte en de mate waarin de intensiteit toeneemt met de golflengte. In **Hoofdstuk 4** wordt ook een zoektocht naar nieuwe halo's en relics ondernomen. Dit resulteert in de ontdekking van zes nieuwe relics en twee halo's. Het blijkt dat deze halo's en relics allemaal te vinden zijn in samensmeltende clusters, zoals verwacht. We vinden ook dat de kans om een relic te vinden toeneemt naarmate de cluster meer massa heeft. Een van deze nieuwe halo's wordt in meer detail bestudeerd in **Hoofdstuk 5**. Deze halo is de meeste verre en helderste die tot nu toe gevonden is. De halo bevindt zich in de massieve cluster MACS J0717.5+3745, welke een complexe samensmelting ondergaat van ten minste drie clusters.

In **Hoofdstuk 6** and **7** wordt de ontdekking van relics in de clusters ZwCl 2341.1+0000 en ZwCl 0008.8+5215 beschreven. Het bijzondere is dat beide clusters twee relics hebben die symmetrisch liggen aan weerszijden van het centrum van de clusters. Deze soort relics worden "dubbel relics" genoemd en zijn zeer zeldzaam. Er zijn er maar enkelen van bekend. De radio, Röntgen en optische waarnemingen van deze clusters laten zien dat deze bezig zijn samen te smelten. De dubbel relics bevinden zich op de positie van de verwachte schokgolven. Er zijn aanwijzingen gevonden dat de deeltjes die de radiostraling uitzenden versneld worden in de schokgolven van de botsingen.

In **Hoofdstuk 8** worden GMRT, WSRT en VLA waarnemingen besproken van de cluster genaamd CIZA J2242.8+5301. Deze waarnemingen laten een enorm grote relic zien. Via een

ingenieuze techniek wordt voor het eerst een precieze meting van het magnetisch veld gedaan in de cluster. Tevens is het effect van de beweging van de schokgolf waargenomen via de radiostraling. De waarnemingen van deze cluster geven het beste bewijs tot nu toe dat deeltjes inderdaad in schokgolven van clusters versneld worden tot extreme energieën.

In **Hoofdstuk 9** wordt een gedetailleerde analyse gedaan van een nieuwe cluster met een complexe radio relic en halo. Verschillende technieken om de radiostraling in detail te bestuderen worden hier ontwikkeld. Hiermee kan nieuwe informatie over het magnetisch veld en de specifieke deeltjes versnellingsmechanismen worden verkregen.

In **Hoofdstuk 10** worden simulaties van de samensmeltende clusters gepresenteerd. Door de simulaties te vergelijken met de radiokaarten is het mogelijk te reconstrueren hoe de samensmeltingen zijn verlopen. Deze techniek is toegepast op de cluster beschreven in **Hoofdstuk 8**. In dit specifieke geval vinden we dat de waarnemingen verklaard kunnen worden door een botsing tussen twee clusters met een massaverhouding van 2 staat tot 1. Ook zijn de simulaties gebruikt om de eigenschappen van het gas te onderzoeken op grote afstanden van het centrum van de cluster. Op grote afstand van het centrum van clusters is het gas zo ijl dat het nauwelijks waarneembaar is met Röntgenstraling.

GMRT en WSRT waarnemingen van de cluster Abell 2256 worden beschreven in **Hoofdstuk 11**. Een aantal nieuwe zwakke diffuse radio bronnen worden gedetecteerd. De helderheid van de bronnen neemt sterk toe met de golflengte, waardoor deze bronnen op langere golflengtes veel duidelijker zichtbaar zouden moeten zijn. Ten slotte wordt in **Hoofdstuk 12** de eerste LOFAR waarneming van de cluster Abell 2256 gepresenteerd. Deze waarneming laat voor het eerst de relic and halo zien op lange golflengtes. Zoals verwacht is ook een van de diffuse radiobronnen, beschreven in **Hoofdstuk 11**, zichtbaar op de LOFAR kaarten.

