



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Cosmic particle acceleration by shocks and turbulence in merging galaxy clusters

Hoang, D.N.

Citation

Hoang, D. N. (2019, June 26). *Cosmic particle acceleration by shocks and turbulence in merging galaxy clusters*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/74441>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/74441>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/74441> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Hoang, D.N.

Title: Cosmic particle acceleration by shocks and turbulence in merging galaxy clusters

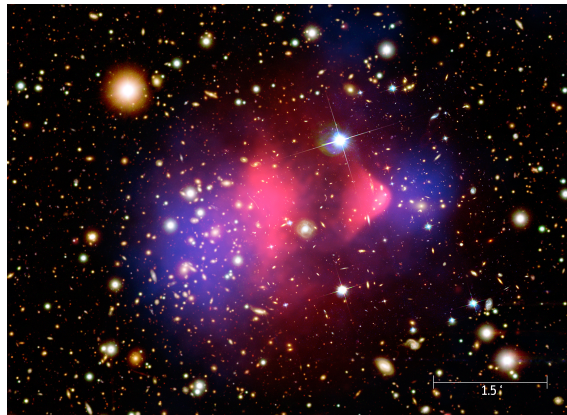
Issue Date: 2019-06-26

Nederlandse samenvatting

Clusters van sterrenstelsels zijn de grootste structuren in het heelal die door zwaartekracht bijeen worden gehouden. Zij bestaan uit honderden tot duizenden sterrenstelsels binnen een volume van maximaal $\sim 100 \text{ Mpc}^3$ (zie bv. figuur 5.7). Clusters bestaan uit donkere materie ($\sim 80 \%$ van de totale massa), uit zeer heet plasma ($\sim 16 \%$) van het zogenaamde intra-cluster medium (ICM), en uit baryonisch materiaal in sterren, koud gas en stof ($\sim 4 \%$). Binnen het raamwerk van hiërarchische vorming van structuur in het heelal groeien clusters middels een opeenvolging van samensmeltingen van kleinere clusters en groepen (zie bv. Sarazin 2002) of door continue inval van materie langs intergalactische filamenten (zie bv. Bagchi et al. 2002; Giovannini et al. 2010). Samensmeltingen van massieve clusters zijn de meest energetische gebeurtenissen in het heelal sinds de oerknal, waarbij tot $\sim 10^{64}$ ergs aan energie in het ICM wordt gedeponneerd op tijdschalen van enkele miljarden jaren. Deze energie verhit het ICM tot dusdanig hoge temperaturen ($\sim 10 \text{ keV}$) dat het Röntgenstraling gaat uitzenden. Het samensmelten genereert schokgolven en turbulentie in het ICM, wat leidt tot de (hernieuwde) versnelling van deeltjes tot relativistische snelheden. In de aanwezigheid van magneetvelden ($\sim \mu\text{G}$) zenden deze relativistische deeltjes synchrotronstraling uit die kan worden gedetecteerd met radio telescopen.

Via waarnemingen zijn inmiddels vele uitgestrekte radiobronnen gedetecteerd in het centrum en in de buitenste regio's van clusters van sterrenstelsels (zie bv. recente reviews van Govoni & Feretti 2004; Feretti et al. 2012; Brunetti & Jones 2014). Deze uitgestrekte bronnen vertonen geen duidelijke samenhang met individuele sterrenstelsels, maar zijn gerelateerd aan de niet-thermische componenten (de relativistische deeltjes en het magneetveld) in het ICM. De uitgestrekte synchrotron-bronnen vertonen een lage oppervlakte-helderheid ($\sim \mu\text{Jy arcsec}^{-2}$ op 1.4 GHz) en een steil spectrum⁴

⁴ $S \propto \nu^\alpha$



Figuur 5.7: Samengestelde afbeelding van de zogenaamde Bullet cluster: optische HST (Hubble Space Telescope) afbeelding met Röntgenstraling in roze (Chandra) en de massaverdeling afgeleid uit zogenaamde weak-lensing waarnemingen in blauw (Image credit: NASA/CXC/M. Weiss)

($\alpha \lesssim -1$). Afhankelijk van hun eigenschappen (morphologie, locatie ten opzichte van het cluster centrum, polarisatie, spectrum) zijn de uitgestrekte bronnen geclassificeerd als radio halo's, mini-halo's of relics.

Radio halo's

Radio halo's zijn uitgestrekte (\sim Mpc), niet-gepolariseerde steil-spectrum bronnen die worden waargenomen in het centrum van samensmeltende clusters van sterrenstelsels. De belangrijkste huidige modellen zijn:

- het primaire model welke stelt dat relativistische elektronen worden opgewekt door Fermi-II turbulente her-acceleratie gedurende de samsmsmelting (zie bv. Brunetti et al. 2001; Petrosian 2001; Fujita et al. 2003; Cassano & Brunetti 2005; Brunetti & Lazarian 2007, 2016; Pinzke et al. 2017)
- het secundaire model welke stelt dat relativistische elektronen in radio halo's een secundair product zijn van hadronische botsingen tussen relativistische protonen en thermische protonen in het ICM (zie bv. Dennison 1980; Blasi & Colafrancesco 1999; Dolag & Ensslin 2000; Miniati et al. 2001; Pfrommer & Enßlin 2004; Pfrommer 2008; Keshet & Loeb 2010; Enßlin et al. 2011).

Radio relics

Radio relics zijn uitgestrekte (\sim Mpc), langwerpige, sterk-gepolariseerde steil-spectrum bronnen die normaliter worden waargenomen in de buitenste regio's van clusters van sterrenstelsels. Voor radio relics wordt aangenomen dat zij gekoppeld zijn aan schokgolven die worden opgewekt door samensmeltingen van clusters, of door invallend gas langs intergalactische filamenten (zie bv. Enßlin et al. 1998; Brown & Rudnick 2011).

Dit proefschrift

De doelstellingen van dit proefschrift zijn (i) het karakteriseren van de eigenschappen van radio halo's en relics in samensmeltende clusters van sterrenstelsels, (ii) het beter begrijpen van de processen die verantwoordelijk zijn voor het versnellen van deeltjes in deze bronnen, en (iii) het verkrijgen van een gedetailleerd beeld van de dynamische toestand van de clusters van sterrenstelsels waarin deze bronnen voorkomen. De bestudeerde clusters zijn CIZA J2242.8+5301 (de zogenoemde 'Sausage' cluster), Abell 1240, Abell 520 en Abell 2146.

In hoofdstuk 2 worden nieuwe LOFAR waarnemingen op 145 MHz gepresenteerd van de prominente 'Sausage' cluster (roodverschuiving $z = 0.192$). Er wordt ook gebruik gemaakt van gearchiveerde radio telescoop-waarnemingen van GMRT, WSRT, VLA, Chandra en Suzaku. Deze studie toont aan dat (i) de vorm en spectrale eigenschappen van de noordelijke en zuidelijke relics consistent zijn met het paradigma dat relics geassocieerd zijn met schokgolven door samensmeltingen, wat in overeenstemming is met andere studies (van Weeren et al. 2010; Stroe et al. 2013); (ii) de onder de aanname van diffuse schok-versnelling (DSA) afgeleide Mach-getallen uit de radiowaarnemingen consistent zijn met Mach-getallen afgeleid uit Röntgen-waarnemingen (Akamatsu et al. 2015), wat pleit voor het schok-versnelling scenario van relics; (iii) de oppervlakte-helderheid van radio-emissie in de noordelijke relic kan worden verklaard door DSA van fossiele elektronen middels het Fermi-I proces, maar directe versnelling van thermische elektronen kan op basis van de gevoeligheid van de huidige data niet worden uitgesloten; (iv) het radiospectrum van de halo constant is over de gehele regio tussen noordelijke en zuidelijke relic, wat de aanwezigheid impliceert van een groot turbulent gebied veroorzaakt door de samensmelting.

Hoofdstuk 3 presenteert een radio-studie van het cluster Abell 1240 ($z = 0.1948$) met twee relics, gebruikmakend van LOFAR 143 MHz, GMRT

612 MHz en VLA 3 GHz waarnemingen. Deze studie bevestigt dat het spectrum van de relics steiler wordt richting het cluster centrum, en dat de uit de polarisatie afgeleide richting van het magneet veld in de relics grotendeels haaks staat op de lengte-as van de relics, wat beide in overeenstemming is met de studie van Bonafede et al. (2009). De spectrale- en polarisatie-eigenschappen van de relics zijn consistent met het scenario waarin deeltjes die radiostraling afgeven in de relics worden versneld door schokgolven die slechts marginaal worden gedetecteerd in Chandra Röntgenwaarnemingen.

In hoofdstuk 4 worden de versnellings-mechanismes bestudeerd die aanleiding geven tot de vorming van uitgestrekte radiobronnen in samensmelend cluster Abell 520 ($z = 0.201$) middels waarnemingen van LOFAR op 145 MHz, GMRT op 323 MHz en VLA op 1.5 GHz. Het zuidwestelijke deel van de uitgestrekte radiobronnen valt ongeveer samen met een boeg-schok waargenomen in Röntgenstraling, en lijkt daardoor met de schok samen te hangen. Er is ook een toename in de steilheid van het radiospectrum achter de schok. Dit impliceert dat de uitgestrekte radiobronnen een superpositie zijn van een centrale radio halo en een radio relic in het zuidwesten. DSA zou het mechanisme kunnen zijn waarmee relativistische elektronen worden versneld bij de schok. Omdat er geen uitgestrekte radiobron aan de voorkant van de schok is gevonden, is het onwaarschijnlijk dat compressie van het magneetveld verantwoordelijk is voor deeltjesversnelling.

Hoofdstuk 5 beschrijft een studie van de samensmelende cluster Abell 2146 ($z = 0.232$), gebruikmakend van nieuwe radiowaarnemingen met LOFAR op 144 MHz, aangevuld met bestaande VLA 1.5 GHz waarnemingen. Deze waarnemingen bevestigen het bestaan van uitgestrekte radiobronnen ten noordwesten en zuidoosten van het cluster, gepositioneerd achter de schokgolven die zichtbaar zijn middels Röntgenstraling. LOFAR detecteert een brug van zwakke radiostraling tussen de eerder-genoemde radiobronnen die niet zichtbaar is met de VLA. Het spectrum van de radio-emissie in het noordwesten wordt steiler in de richting van het cluster centrum, maar is inconsistent met de waarden die het DSA model voorspelt. Dit verschil kan mogelijk worden verklaard door aan te nemen dat de versnelde elektronen reeds bestaande fossiele elektronen zijn in plaats van thermische elektronen. De zuidoostelijke rand van de daar gelegen radiobron volgt bij benadering de zuidoostelijke (Röntgen) boeg-schok, wat een verband tussen de twee impliceert. Onder aanname van DSA komen de Mach-getallen afgeleid uit radio- en Röntgenwaarnemingen overeen, wat het mogelijke verband nog versterkt. Toch is het nog onduidelijk of de uitgestrekte bron in het zuidoosten een radio halo is, of wellicht een superpositie van een halo en een

relic. In beide gevallen ligt de waarde van het totale vermogen van de radiostraling van de halo dichtbij de verwachte waarde voor een cluster met een massa gelijk aan dat van Abell 2146. Afsluitend, de aanwezigheid van de uitgestrekte radiobronnen in het noordwesten en zuidoosten van Abell 2146 kan het beste worden verklaard door de versnelling van fossiele elektronen (voor het gebied in het noordwesten) en thermische elektronen (voor het gebied in het zuidoosten) door schokgolven en turbulentie in een smelting van clusters.

