



Universiteit  
Leiden

The Netherlands

## **Tuning in to the feedback bassline: revealing the operation of AGNs in galaxy clusters with high-resolution radio observations**

Timmerman, R.

### **Citation**

Timmerman, R. (2023, November 22). *Tuning in to the feedback bassline: revealing the operation of AGNs in galaxy clusters with high-resolution radio observations*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3663557>

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/1887/3663557>

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

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

Wie 's nachts naar een heldere hemel staart zal een aantal heldere sterren kunnen bewonderen. Het idee dat sterren objecten zijn net als de Zon, maar dan heel ver weg, is zo'n ruime twee duizend jaar geleden al geopperd door de Griekse filosoof Anaxagoras. Het kostte de mensheid echter nog een lange tijd (en sommigen hun leven) voordat dit idee algemeen werd geaccepteerd. Deze realisatie vormt een van de eerste momenten waarop onze horizon werd verbreed en we inzagen dat het Universum groter was dan ons eigen zonnestelsel. Dankzij de ontwikkeling van telescopen kon de distributie van sterren voor het eerst in kaart worden gebracht. Dit leerde ons dat onze Zon deel is van een grotere collectie sterren: het Melkwegstelsel. Pas in 1918 gaf het werk van Harlow Shapley met variabele sterren voor het eerst een correct beeld van het formaat van ons Melkwegstelsel, evenals de positie van ons zonnestelsel in de Melkweg. Toen kwam echter de volgende grote vraag: is ons Melkwegstelsel het volledige Universum? In het Grote Debat stelde Harlow Shapley dat de spiraalvormige nevels die reeds waren waargenomen aan de randen van ons eigen Melkwegstelsel lagen, terwijl Heber Curtis deze nevels als andere Melkwegstelsels zag. Het doorslaggevende bewijs werd aangeleverd door Edwin Hubble, die aan de hand van variabele sterren in de Andromedanevel kon aantonen dat de afstand tot deze nevel veel groter was dan het formaat van ons Melkwegstelsel: zo'n miljoen lichtjaren vanaf de Aarde. Plotseling was duidelijk dat ons Universum veel groter is dan slechts de Melkweg.

Een tweede fundamentele ontdekking was dat ons Universum niet alleen veel groter is dan voorheen gedacht, maar dat deze ook dynamisch is. Edwin Hubble's meest beroemde wetenschappelijke resultaat is de vondst van een verband tussen de afstand naar een ver sterrenstelsel en de snelheid waarmee dit object van ons af beweegt. Dit bevestigde het vermoeden van de Belgische priester Georges Lemaître dat het Universum aan het uitdijen zou kunnen zijn. Hiermee had de mensheid een eerste inzicht gekregen in de geschiedenis van ons Universum. Als alles van elkaar af beweegt dan stonden al deze objecten dus vroeger dicht bij elkaar. Sterker nog, als je alle bewegingen terug in tijd projecteert vind je dat alle sterrenstelsels op hetzelfde moment in de geschiedenis bij elkaar komen: zo'n 13.7 miljard jaar in het verleden. Dit is het fundament voor het huidige cosmologische model van de Oerknal.

Dankzij moderne instrumenten kunnen we nog veel dieper in het Universum kijken en objecten die we zien veel nauwkeuriger bestuderen. Tegenwoordig wordt het aantal sterrenstelsels in de honderden miljarden geschat. Erg waardevol voor onderzoek naar de geschiedenis van ons Universum is de beperkte snelheid van

licht. In een vacuum legt licht een afstand af van 299.792.458 meter per seconde. Deze hoge, maar beperkte, snelheid zorgt ervoor dat we vrijwel alles op grote afstanden observeren met een significante tijdsvertraging. Onze Maan staat op een ruime seconde afstand, de Zon op zo'n 8 minuten, de planeet Neptunus op ongeveer 4 uur, en de Voyager 1 sonde op het moment van schrijven bijna een dag. De dichtstbijzijnde ster (Proxima Centauri) staat op een ruime 4 lichtjaren afstand en de diameter van onze Melkweg is ongeveer 100.000 lichtjaren. Dankzij de enorme afstanden in het Universum kunnen we dus door naar verre objecten te kijken zien hoe het Universum er in het verleden uitzag. Met moderne telescopen kunnen we sterrenstelsels zien en bestuderen op miljarden lichtjaren afstand, en dus ook een blik miljarden jaren terug in de tijd werpen. Met sub-millimeter observaties hebben we zelfs de grens van ons observeerbare Universum in kaart gebracht: de nagloed van de Oerknal.

Dankzij diepe observaties en gedetailleerde simulaties weten we momenteel dat ons Universum begon als een extreem heet en dicht medium. In het begin was dit medium nog te heet voor de formatie van de meeste deeltjes waar wij uit bestaan, maar naarmate het Universum uitdijde daalde ook de temperatuur en vormden de eerste protonen, neutronen, elektronen, nucleï en atomen. Na lange tijd daalde de temperatuur genoeg om deze materie te laten samenklonteren door de zwaartekracht. Hierdoor vormden de eerste sterren, sterrenstelsels en zelfs clusters van sterrenstelsels. Deze clusters van sterrenstelsels zijn tegenwoordig de zwaarste objecten die we in ons Universum vinden. Ze bevatten niet alleen honderden tot duizenden sterrenstelsels, maar ook een heet gas genaamd het intracluster medium. Naarmate dit hete gas afkoelt slaat het neer op de sterrenstelsels in de cluster en initieert het de formatie van nieuwe sterren.

Naast de formatie van sterren voedt het intracluster medium nog iets: de superzware zwarte gaten in de kern van sterrenstelsels. Voornamelijk in de centrale sterrenstelsels vinden we vaak een zwart gat met een massa rond een miljard keer zwaarder dan onze Zon. Bij het opslokken van het gas uit hun omgeving komt veel energie vrij. Dit gebeurt op twee verschillende manieren. Ten eerste wordt het omringende gas vaak zoveel verhit dat het intense straling produceert. Ten tweede wordt een deel van dit verhitte gas door het magnetische veld in twee straalstromen gebundeld die langs de rotatie-as van het zwarte gat met bijna de snelheid van het licht ontsnappen aan de aantrekkingskracht van het zwarte gat. Dit proces zorgt voor een terugkoppelingsproces (ook wel "feedback" genoemd) die het intracluster medium weer verhit en dus de afkoeling van dit gas afremt.

Om dit proces in detail te bestuderen wordt gebruik gemaakt van verschillende soorten observaties. Allereerst zijn er optische observaties. Hiermee kunnen we goed verre sterrenstelsels in kaart brengen en zowel de bestaande populatie sterren bestuderen als de formatie van nieuwe sterren detecteren. Omdat de atmosfeer grotendeels transparant is voor optisch licht worden ook veel observaties vanaf de grond gedaan. Echter, voor het beste beeld worden optische telescopen vaak wel boven op hoge bergen geplaatst, of zelfs alsnog in de ruimte, zoals de Hubble Ruimtetelescoop. Naast optische observaties worden ook röntgen observaties gebruikt. Omdat het intracluster medium een extreem hoge temperatuur heeft is het voornamelijk zichtbaar met röntgen observaties. Onze atmosfeer is niet

transparant voor röntgen fotonen, waardoor we alleen aan de hand van satellieten zoals Chandra en XMM-newton dit soort observaties kunnen nemen.

Ten slotte maken we veel gebruik van radio observaties zoals die van de Europese LOw Frequency ARray (LOFAR) of de Amerikaanse Very Large Array. In tegenstelling tot optische en röntgen observaties, waarbij een enkele telescoop een gedetailleerde afbeelding kan maken, zijn de radio observaties in dit proefschrift genomen met behulp van interferometrie. Het oplossend vermogen van een telescoop is namelijk proportioneel aan de verhouding tussen de golflengte van het licht dat wordt waargenomen en de grootte van de telescoop. Voor radio golflengtes, die heel lang zijn, heb je dus ook een heel grote telescoop nodig. Omdat dit vaak technisch vrijwel onmogelijk is wordt gebruik gemaakt van een truc. Door verschillende radio antennes op een afstand van elkaar te zetten kan een enkele telescoop gesimuleerd worden ter grootte van de afstand tussen de antennes. Hierdoor is het mogelijk om een virtuele telescoop te bouwen met een formaat van enkele duizenden kilometers, en dus ook een zeer goed oplossend vermogen te krijgen.

Er zijn nog veel open vragen over hoe het Universum zoals het er nu uit ziet tot stand is gekomen. Hoe vormden sterrenstelsels? Wat is de invloed van het terugkoppelingsproces tussen zwarte gaten en het intracluster medium op de formatie van nieuwe sterren, en hoe werkte dit alles niet alleen nu, maar ook in het verre verleden? In dit proefschrift onderzoeken we het terugkoppelingsproces in clusters van sterrenstelsels, met name door middel van nieuwe hoge-resolutie radio observaties op lage frequenties. Hiermee willen we een beter beeld krijgen van wat er precies gebeurt dicht bij het zwarte gat, hoe het intracluster medium wordt verhit en hoe dit alles invloed heeft op de sterrenstelsels in de cluster.

In Hoofdstuk 2 bestuderen we het terugkoppelingsproces en de diffuse radio emissie (ook wel “mini halo” genoemd) in de Phoenix cluster door middel van radio observaties genomen met de Very Large Array op frequenties tussen 1 en 12 GHz. Eerdere observaties hebben aangetoond dat het intracluster medium in deze cluster erg snel afkoelt zonder dat het wordt afgeremd door het zwarte gat in het centrum. Onze vinding is dat de mini halo waarschijnlijk ontstaan is door turbulentie in het intracluster medium als gevolg van een samensmelting van clusters in het verleden. Daarnaast observeren we dat het zwarte gat variërende periodes van activiteit heeft in plaats van dat deze constant actief is, en dat de massa van dit zwarte gat waarschijnlijk aan de lichte kant is voor de cluster.

In Hoofdstuk 3 focussen we ons op de bekende radio bron Hercules A. Door Very Large Array observaties te combineren met LOFAR observaties kunnen we het spectrum van deze radio bron bestuderen over een veel breder bereik dan voorheen. Dit biedt inzicht in de populatie aan elektronen in de radio lobben van Hercules A. We vinden dat de heldere ring structuren die eerder zijn gevonden een steeds stijler spectrum hebben naarmate de afstand tot het centrale zwarte gat toeneemt. Deze meting ondersteunt de hypothese dat deze ringen niet zijn gevormd door schokgolven maar door kleine lobben die ontstaan binnen de grote radio lob. Dit biedt ook onmiddellijk inzicht in de tijdsschaal tussen uitbarstingen van het centrale zwarte gat.

In Hoofdstuk 4 nemen we LOFAR observaties van een steekproef van 14 clusters. Aan de hand van deze observaties testen we een methode om de hoeveelheid

energie die wordt uitgestoten door de omgeving van het zwarte gat te meten. Deze methode vereist dat onze lage-frequentie observaties gevoelig genoeg zijn om de volledige radio lobben te detecteren. Door het gemeten volume van de radio lobben te vergelijken met het volume van de afdruk van de radio lobben in het intracluster medium bevestigen we dat deze methode inderdaad betrouwbaar is.

In Hoofdstuk 5 passen we deze methode voor het eerst toe op een aantal verre clusters van sterrenstelsels met behulp van LOFAR waarnemingen. Dankzij LOFAR's gevoeligheid en hoog oplossend vermogen zijn we voor het eerst in staat om op dergelijke afstanden met behulp van radio waarnemingen de hoeveelheid energie die door het zwarte gat in de omgeving wordt geïnjecteerd te bepalen. Hiermee tonen we aan dat deze methode ook realistisch gebruikt kan worden om in het vroege Universum te meten wat de impact is van terugkoppeling tussen het centrale zwarte gat en het intracluster medium.