



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Giant galactic outflows and shocks in the cosmic web

Oei, M.S.S.L.

Citation

Oei, M. S. S. L. (2023, December 12). *Giant galactic outflows and shocks in the cosmic web*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3666253>

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/1887/3666253>

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

Wat is wetenschap? Wetenschap is de titanische poging van het menselijk intellect zich uit zijn kosmische isolement te verlossen door te begrijpen.

Willem F. Hermans, Nederlands schrijver, in *Nooit Meer Slapen* (1966)

9

Populairwetenschappelijke samenvatting

Dit proefschrift beschrijft een reeks onderzoeken waarin we astronomische bronnen van radiogolven voorspellen, kalibratietechnieken voor waarnemingen door radiotelescopen beschrijven, en zulke waarnemingen analyseren en interpreteren. We richten ons in het bijzonder op radiogolven afkomstig van reusachtige straalstromen en schokgolven in het Kosmische Web. Om de inhoud en portee van het proefschrift helder over het voetlicht te brengen, duiden we eerst kort enkele belangrijke begrippen.

9.1 LICHT EN ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN

Thomas Young (1773–1829) was een Britse *uomo universale* die belangrijke bijdragen heeft geleverd aan een diverse reeks vakgebieden, waaronder de egyptologie, fysiologie, klassieke mechanica en optica. Vanwege Youngs buitengewoon brede wetenschappelijke deskundigheid wordt hij regelmatig beschouwd als *‘de laatste persoon die alles wist’*. In 1803 beschreef Young voor de *Royal Society* een baanbrekend interferentie-experiment, dat hij zelf later als zijn belangrijkste wetenschappelijke bijdrage zou beschouwen. Het experiment, waarin het licht van één bron langs twee verschillende paden naar een scherm reist, toonde aan dat zichtbaar licht niet domweg bestaat uit een stroom deeltjes, zoals eminente fysici als Isaac Newton en Siméon Denis Poisson vermoedden, maar irreducibele golfeigenschappen bezit. Het was een belangrijke

stap op weg naar de acceptatie van licht als golfverschijnsel, zoals onder anderen Christiaan Huygens en Augustin-Jean Fresnel voorstonden. Niet veel later — in 1818 — bevestigde Dominique François Jean Arago van de Franse *Académie royale des sciences* Fresnels golftheorie in een *experimentum crucis*, nadat Poisson, gericht op het ontkrachten van Fresnels werk, er een ogenschijnlijk ‘absurde’ voorspelling uit destilleerde — namelijk dat zich in het midden van de schaduw van een circulair, ondoorzichtig voorwerp niettemin een zwak lichtvlekje zou vormen: de *tache de Fresnel*. Ironisch genoeg zou Poissons voorspelling zijn eigen ongelijk bewijzen. Arago’s experimentele demonstratie van het bestaan van de *tache* overtuigde het leeuwendel van de wetenschappelijke gemeenschap van het golfkarakter van licht. Experimentele én theoretische vooruitgang in het begrip van elektriciteit en magnetisme in de daaropvolgende decennia leidden James Clerk Maxwell tot een theorie van het *elektromagnetisme*, die niet alleen de samenhang tussen reeds bekende resultaten blootlegde, maar ook het bestaan van elektromagnetische *golven* voorspelde.¹ Al een decennium voordat — in 1865 — Maxwells *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* verscheen, hadden Wilhelm Eduard Weber en Rudolf Kohlrausch opgemerkt dat er een aan elektriciteit en magnetisme gerelateerde constante bestond — laten we haar voor ’t gemak c noemen — die men, gezien die dimensies, kon interpreteren als een *snelheid*. Aan de hand van een Leidse fles maten zij vervolgens dat $c = 3,1 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Deze waarde bleek verdacht veel op de toen recent vastgestelde snelheid van het licht: $3,1 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, aldus Hippolyte Fizeau in 1848, en $3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, aldus Léon Foucault in 1850. Het was echter Maxwell die het verband tussen c en de snelheid van het licht als eerste opmerkte, en concludeerde dat licht een voorbeeld van ‘zijn’ elektromagnetische golven moest zijn.

9.2 RADIOGOLVEN

Het voor ons zichtbare licht vormt maar een klein deel van het brede scala, of *spectrum*, aan elektromagnetische golven dat vanuit het Heelal op Aarde ‘aanspoelt’. Toch is het niet vreemd dat onze ogen — en die van de meeste andere diersoorten — geoptimaliseerd zijn voor het waarnemen van het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum. Het is namelijk dít ‘venster’ waarin onze ster, de Zon, het sterkst straalt. (Gevoeligheid voor een deel van het spectrum waarvoor het donker is op Aarde, is van weinig nut.)

De vorm van het Zonnenspectrum heeft niet alleen zijn stempel gedrukt op onze anatomie, maar ook op de geschiedenis van de sterrenkunde. De Zon is een ‘gewone’ ster — en dus zijn ogen die gevoelig zijn voor Zonlicht, ook bijzonder geschikt om

¹De vectoranalysevorm van de maxwellvergelijkingen, die tegenwoordig gebruikelijk is, is van de hand van Oliver Heaviside.

de straling van *andere* sterren op te vangen. De nachtelijke hemel toont het Aardse dierenoog daarom bovenal een overweldigende zee van sterren. Tot in de twintigste eeuw bestond bijgevolg het geloof dat de elektromagnetische straling uit het Heelal vrijwel volledig van sterren moest komen — en dat zichtbaarlichttelescoplen dus de meest geschikte instrumenten zijn om het Heelal te bestuderen.

In de loop van de twintigste eeuw, gedreven door stormachtige ontwikkelingen in de quantummechanica en de relativiteitstheorie, voltrok zich een ommezwaai die deze antropocentrische visie van tafel veegde. Zo voorspelden Ralph Alpher, Robert Herman en George Gamow in 1948 het bestaan van een zwakke maar alomtegenwoordige gloed van microgolfstraling die vlak na de oerknal geproduceerd zou zijn.² Het idee van een oerknal — een ‘geboorte’ voor het Heelal, in een ver maar *eindig* verleden — was indertijd controversieel. Was het Heelal dan niet, naar platonisch ideaal, onveranderlijk en oneindig oud? De toevallige ontdekking van de kosmische microgolfachtergrond door Arno Allan Penzias en Robert Woodrow Wilson in 1964, die hun de Nobelprijs voor de Natuurkunde opleverde, maakte treffend duidelijk dat waarnemingen van elektromagnetische straling buiten het optische venster tot fundamentele doorbraken kunnen leiden. Andere vroege doorbraken die het belang van de radiosterrenkunde bestendigden, zijn de voorspelling van de 21 centimeterlijn van neutraal waterstof door Hendrik Christoffel van de Hulst in 1944 en de detectie van de lijn in 1951, en de eerste metingen van gepolariseerd licht afkomstig van de Krabnevel (zie Fig. 9.1) door zowel Mikheil Alexandres dze Vashakidze als Viktor Aleksejevich Dombrovskij in 1954, en door Jan Hendrik Oort en Theodore Walraven in 1955, waarmee zij de astrofysische realiteit van het synchrotronstralingsmechanisme aannemelijk maakten. Synchrotronstraling ontstaat wanneer geladen deeltjes, zoals elektronen en positronen (anti-elektronen), met bijna de lichtsnelheid door een magnetisch veld spiralen. Deeltjes bereiken zulke snelheden niet zomaar. In de buurt van synchrotronstralingsbronnen moet daarom een natuurlijke deeltjesversneller aanwezig zijn — en een energiebron waaruit de nieuwverworven bewegingsenergie afkomstig is. Spannend genoeg verraadt een detectie van synchrotronstraling in een stuk ruimte dus het bestaan van hoogenergetische, explosieve en anderszins exotische astrofysische processen. De deeltjesversnellers die in dit proefschrift besproken worden, zijn superzware zwarte gaten, en oergas dat na miljarden jaren reizen met hoge snelheid op het Kosmische Web stort.

²Deze gloed bestond destijds vooral uit infraroodstraling, maar veranderde in de loop der tijd — door de expansie van het Heelal — in microgolfstraling. Ongeveer 1% van de ‘sneeuw’ zichtbaar op de schermen van ouderwetse, analoge televisies is het gevolg van deze kosmische microgolfstraling.



Figure 9.1: De Krabnevel, het overblijfsel van een supernova die op 4 juli 1054 als nieuwe ‘ster’ aan de hemel door Chinese astronomen opgemerkt werd. In het midden van deze foto van de James Webb Space Telescope huist de Krabpulsar, een neutronenster die zo’n dertig maal per seconde om haar as wentelt. De Krabnevel heeft een sleutelrol gespeeld in de ontdekking van de astrofysische relevantie van het synchrotronstralingsmechanisme. *Van: CSA, ESA, NASA, STScI & Teo Temim*

9.3 HET KOSMISCHE WEB

Hoewel het huidige sterrenkundige wereldbeeld incompleet is, verschaft het een verbluffend vergezicht van de bredere werkelijkheid waar wij deel van uitmaken. In dit wereldbeeld is de Aarde een natte, tollende rots van bescheiden formaat die om een middelgrote ster cirkelt — een bal van plasma en licht die wij de Zon noemen, en die het leven op Aarde al zo’n vier miljard jaar lang mogelijk maakt. De Zon staat niet op zichzelf, maar is onderdeel van een kosmisch eiland van een paar honderd miljard sterren.³ Dit eiland ziet er voor mogelijke verafgelegen waarnemers uit als een imposante, meerarmige draaikolk (zie het linkerpaneel van Fig. 9.2). Aan *onze* hemel verschijnt

³Dat zijn zo’n één tot vier sterren voor iedere mens die ooit heeft geleefd.



Figure 9.2: *Links:* Zichtbaarlichtfoto gemaakt door de Hubble-ruimtet telescoop van het sterrenstelsel UGC 12158, een Melkweganalogon. Als het mogelijk was om de Melkweg uit te vliegen in een richting loodrecht op het Galactisch Vlak, dan zou het uitzicht op ons sterrenstelsel waarschijnlijk gelijkaardig zijn. *Rechts:* De 2,6 kilometer hoge Chileense berg Cerro Paranal met de contouren van de *Very Large Telescope*, waarboven de Melkweg zich uitstrekt. *Van: ESA & NASA (links); Alberto Ghizzi Panizza, ESO (rechts)*

het eiland echter als een *band* van zwak wit licht (zie het rechterpaneel van Fig. 9.2), dat men om die reden in het Oudgrieks, en in ettelijke andere, veelal Europese talen, de naam *Melkweg* gegeven heeft.⁴ Deze hoogst zoogdierlijke metafoor hebben we aangehouden: alle andere dergelijke eilanden, die alomtegenwoordig zijn in het moderne Heelal, worden *galaxieën* genoemd (of: sterrenstelsels) — naar het Oudgriekse *γαλαξίας*: ‘melkachtig’. De galaxieën zijn niet volledig geïsoleerd, maar ingebed in een bijna onzichtbare, warme mist van waterstof — het meest eenvoudige van alle elementen, dat zich vlak na de oerknal vormde. Deze mist heet het *intergalactisch medium*, en vormt een uitgebreid netwerk van draden, of *filamenten*, dat zich door het hele Universum uitstrekt. Het netwerk als geheel, meestal met de onderliggende donkeremateriestructuur meegerekend, wordt het *Kosmische Web* genoemd — al lijkt een vergelijking met de neurale structuur van het brein (Vazza & Feletti, 2020) treffender dan een met een spinnenweb. Omdat het Heelal eindig oud is, en de aanvoer van bouw materiaal naar een bouwplaats hoogstens met de lichtsnelheid kan verlopen, is er een maximum aan de grootte van bouwwerken die tot nu toe in het Heelal door de zwaartekracht gevormd (kunnen) zijn. Wat die maximale grootte verder inperkt, is het feit dat het Heelal uitdijt: de uitdijning poogt voortdurend de afstand tussen filamenten te vergroten, en verhindert zo dat ze samensmelten. Om deze redenen is er, tot op heden, geen structuur groter dan het Kosmische Web gevormd. Het Kosmische

⁴De Melkweg heeft veel andere, beeldschone namen. In de meest gesproken Indiase talen — het Hindi, het Bengaals en het Marathi — noemt men de Melkweg *de Ganges van de Hemel*; in het Noors en het IJslands *het Winterse Pad*; in het Welsh *het Fort van Gwydion* (een magiër uit de Keltische mythologie); in het Thais *de Weg van de Witte Olifant*; en in het Hawaïaans onder andere *de Vis die in Schaduwen Springt*.

Web is het *Einde der Grootshheid* — de indrukwekkende hiërarchie van sterrenkundige lengteschalen ten spijt.

9.4 SCHOKGOLVEN IN HET KOSMISCHE WEB EN IONOSFERISCHE KALIBRATIE

Een veelbelovende methode om de filamenten van het Kosmische Web in beeld te brengen omvat het opvangen van synchrotronstraling met radiotelescopen. Die straling is, in het geval van het Kosmische Web, afkomstig van geladen deeltjes die versneld zijn door hypersonische schokgolven in de filamenten. Die schokgolven vormen zich wanneer oeroude gaswolken uit de gigantische ruimtes tussen de filamenten met snelheden van, doorgaans, honderden kilometers per seconde op de filamenten vallen. Dit proces, waarin de filamenten ‘gevoed’ worden met nieuw materiaal, wordt voorspeld door computersimulaties geënt op het reconstrueren van de ontstaansgeschiedenis van het Kosmische Web. Schokgolven in het Kosmische Web treden bovendien op ongeacht de manier waarop zulke simulaties precies afgesteld worden — de voorspelling is dus ‘robuust’. De synchrotronstraling van de schokgolven is echter zwak in vergelijking met de radiostraling geproduceerd door sterrenstelsels, en dus is er een aanmerkelijk risico dat ongerelateerde sterrenstelsels in het gefotografeerde stuk hemel de radiotelescoop ‘verblinden’. Om de schokgolven toch te kunnen zien, moet de straling van de schokgolven en dat van de sterrenstelsels van elkaar gescheiden blijven. Het is daarom essentieel dat verstoringen door de Aardatmosfeer de radiostraling van de sterrenstelsels niet onverhoopt uitsmeren over delen van de foto waar schokgolven zouden kunnen liggen.

Het deel van de atmosfeer dat de propagatie van kosmische radiogolven het meest verstoort, is de ionosfeer. De ionosfeer bestaat ’s nachts uit twee lagen en overdag uit vier lagen, die elk enkele tientallen tot honderden kilometers boven het Aardoppervlak hangen. Een klein deel van de atomen en moleculen in deze ionosferische lagen is in geïoniseerde toestand door botsingen met ultraviolette straling en röntgenstraling van de Zon. Het elektrisch veld van de inkomende radiogolven forceert de bij ionisatie vrijgekomen elektronen in oscillatie, die daardoor een gedeelte van de energie van de inkomende golf absorberen en, later, weer uitzenden. Het gevolg is onder meer een vertraging in de aankomsttijd van de radiogolven bij de telescoop.

De ionosferische verstoringen zijn het grootst voor radiogolven met grote golflengtes — en dus lage frequenties. Het wegkalibreren van ionosferische verstoringen is dan ook van groot belang voor de laagfrequente radiosterrenkunde, de tak van de astronomie die in dit proefschrift besproken wordt. Om een goede resolutie te behalen, bestaan laagfrequente radiotelescopen doorgaans uit een aantal kleinere eenheden (veelal antennes, schotels of ‘stations’) die geografisch verspreid zijn, maar samenwerken als één grotere telescoop. De nu gangbare methoden voor ionosferische kalibratie maken echter niet optimaal gebruik van het feit dat de ionosferische verstoringen

ionospheric free electron density with antenna configuration | Gaussian random field realisation

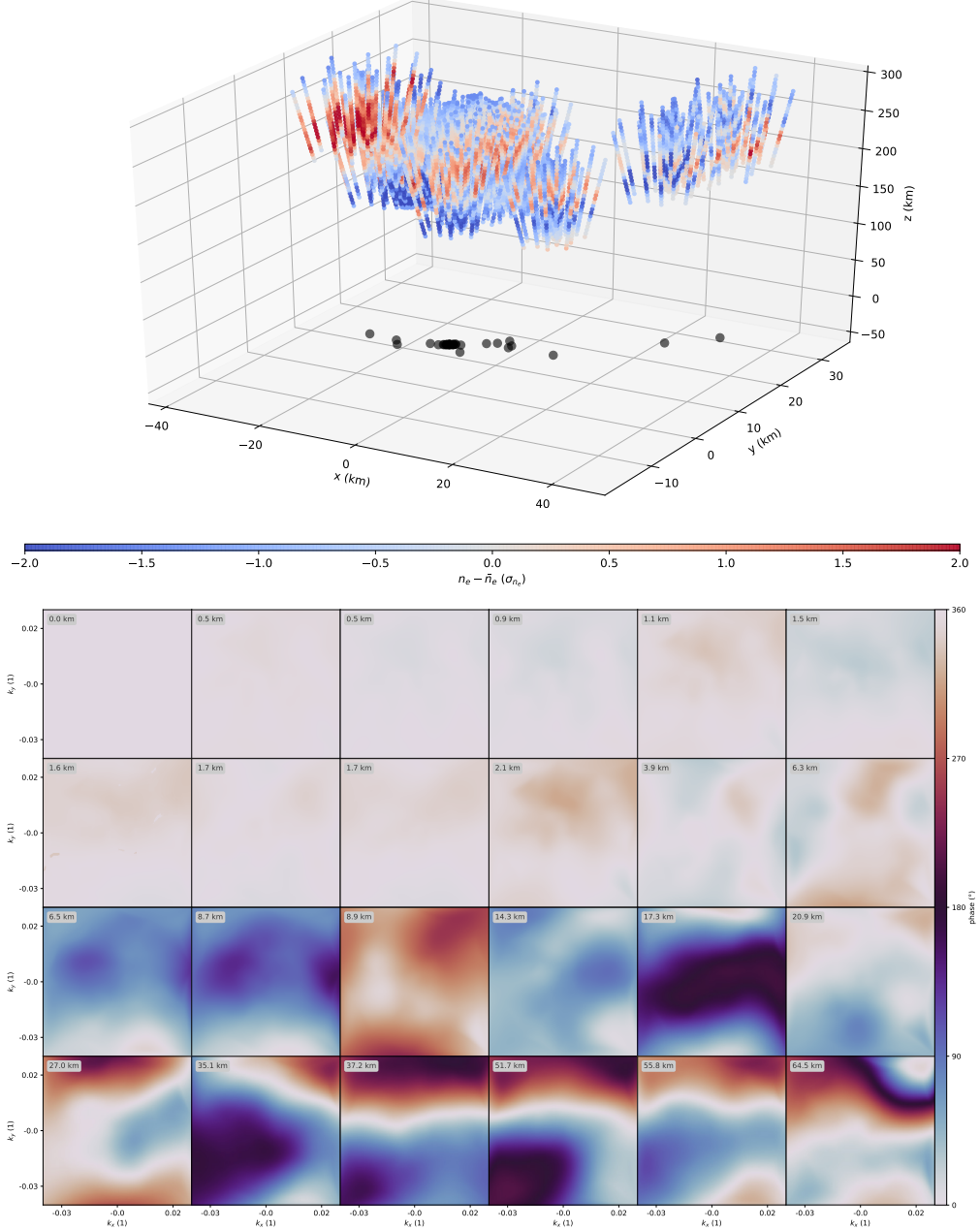


Figure 9.3: *Boven:* Ionosferische simulatie van een driedimensionaal gaussisch toevalsveld boven 24 Nederlandse LOFAR-stations (*zwarte stippen*), waarvoor Hoofdstuk 2 de optimale kalibratiemethode presenteert. We tonen het veld $n_e(\mathbf{x}, t)$ alleen langs een paar zichtlijnen. *Onder:* Ionosferische faseverstoringen als functie van hemelrichting (k_x, k_y) voor ieder station, met de afstand tot het telescoopcentrum (*grijze legenda's*) aangegeven. *Van:* Hoofdstuk 2

gen waar verschillende stations mee te maken krijgen, flink op elkaar kunnen lijken — vooral als die stations vlak bij elkaar staan. Voor een gegeven station lijken bovendien de verstoringen van naburige richtingen aan de hemel op elkaar, alsook verstoringen van twee nauw opeenvolgende momenten in de tijd. In Hoofdstuk 2 introduceren we een nieuwe ionosferische kalibratiemethode die theoretisch optimaal is wanneer de ionosferische vrije-elektronendichtheid de structuur heeft van een gaussisch toevalsveld. Met behulp van een numerieke simulatie (zie Fig. 9.3) kwantificeren we de toename in kalibratiekwaliteit van de nieuwe methode ten opzichte van die van *ad hoc*-varianten.

9.5 SCHOKGOLFVOORSPELLINGEN VOOR HET KOSMISCHE WEB AAN DE NOORDELIJKE HEMEL

Een snelle inspectie van de foto's van huidige laagfrequente radiotelescopen suggereert dat de meeste schokgolven in het Kosmische Web nog niet individueel detecteerbaar zijn. Om het bestaan van de schokgolven in het Kosmische Web toch al aan te tonen, stellen wij (zoals andere auteurs) voor om een *statistisch* vergelijk te doen tussen de huidige beelden enerzijds en voorspelde schokgolfbeelden anderzijds. Voorgaand werk in deze richting heeft echter ofwel zeer simplistische voorspellingen gebruikt, ofwel voorspellingen zonder onzekerheidskwantificatie. In Hoofdstuk 3 beschrijven en presenteren we voorspellingen, gebaseerd op kosmologische magnetohydrodynamische simulaties en bayesiaanse reconstructies van de groteschaalstructuur van het Lokale Universum, mét onzekerheden. We doen voorspellingen voor de helft van de noordelijke hemel, tot op ruim twee miljard lichtjaar van de Melkweg. Zie Fig. 9.4. Het blijkt dat de grote variatie in lichtkracht die schokgolven in het Kosmische Web kunnen hebben, een grote voorspelonzekerheid induceert — zelfs wanneer we de radiostraling flink 'uitsmeren' over de hemel (over ruimtehoeken van enkele vierkante graden). De voorspellingen suggereren dat de omgevingen van het Herculescluster, het Comacluster, Abell 2199 en het Ursa Majorsupercluster mogelijk de helderste schokgolven huisvesten in het door ons geanalyseerde deel van het Kosmische Web.

Daarnaast introduceren we een eenvoudig statistisch-geometrisch model waarmee vastgesteld kan worden of de meeste schokgolfstraling in het Kosmische Web uit de ruimte tot op twee miljard lichtjaar afstand komt, of dat de totale bijdrage van verder weg gelegen schokgolven toch aanzienlijk is — en de hier gepresenteerde voorspellingen dus incompleet zijn. We laten zien dat, tot op goede benadering, slechts één parameter de gemiddelde afstand tot de schokgolfstraling bepaalt. Deze parameter kan aan de hand van kosmologische simulaties afgeschat worden.

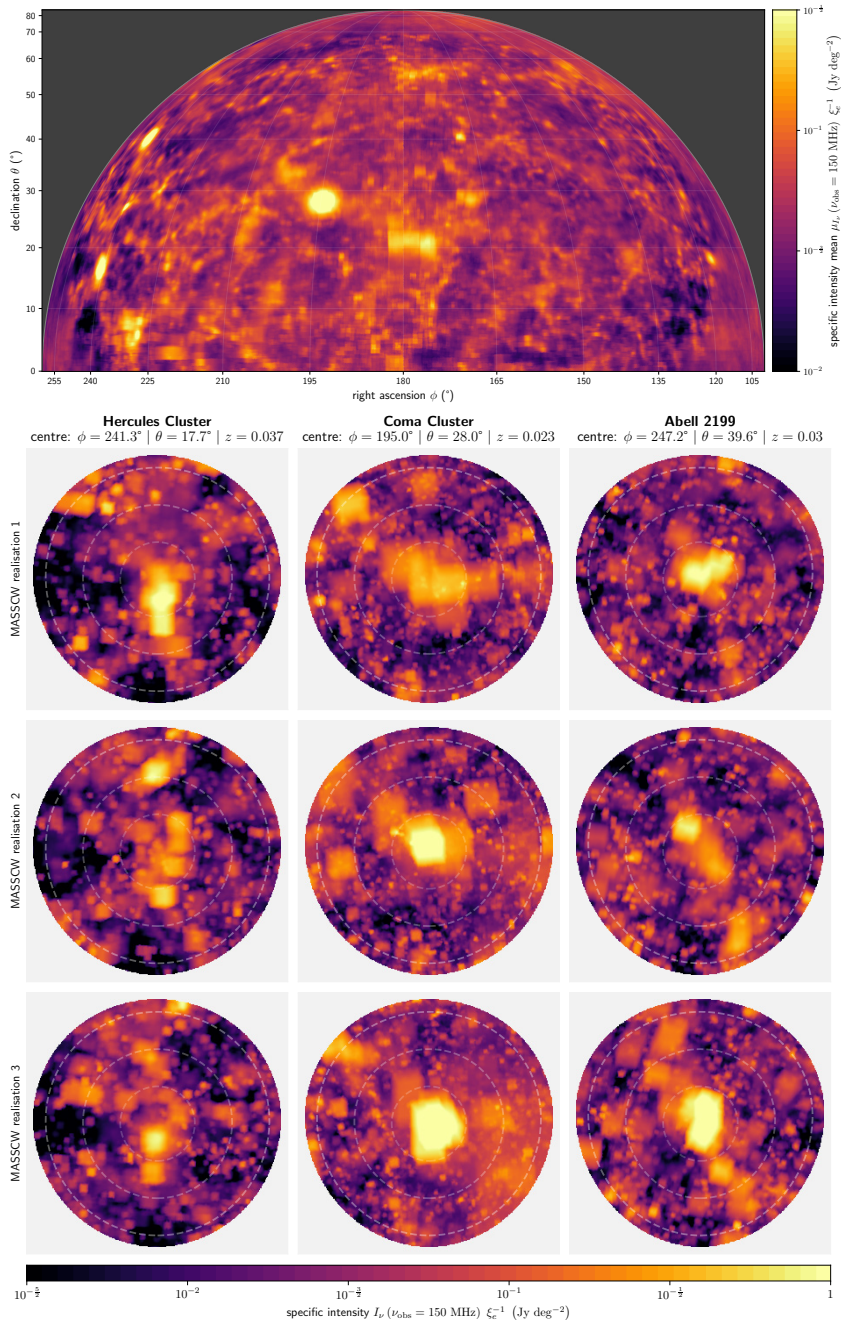


Figure 9.4: *Boven:* Gemiddelde van probabilistische Kosmische Webvoorspellingen van synchrotronstraling met een golflengte van twee meter voor de noordelijke hemel. Drie lageroodverschuivingssterstelsels vallen op; dit zijn (in volgorde van toenemende declinatie θ) het Herculescluster, het Comacluster en Abell 2199. *Onder:* Voor deze clusters (kolommen) tonen we realisaties (rijen) van hoe de omliggende radiohemel eruit zou kunnen zien (stralen van gestreepte cirkels: 3° , 6° en 9°). We modelleren slechts één stralingsmechanisme: emissie van clustersamensmeltingsschokgolven en accretieschokgolven die ontstaan tijdens de formatie van het Kosmische Web. *Van:* Hoofdstuk 3

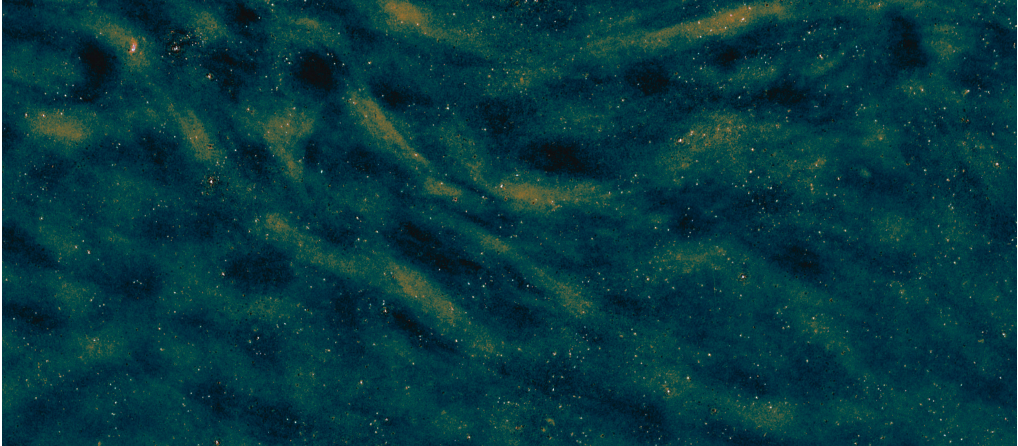


Figure 9.5: Door LoTSS-beelden te bewerken (zie Hoofdstukken 4 en 6), hebben we één van de meest, zo niet dé meest gevoelige reeks laagfrequentieradiofoto's gemaakt. Dit heeft geleid tot de toevalige ontdekking dat ons eigen sterrenstelsel de metergolfhemel met een complex patroon van gradenlange strepen vult — zelfs tot op hoge Galactische breedtegraad b . Hier tonen we een $\sim 10^2 \text{ deg}^2$ -groot mozaïek rond $b = 45^\circ$. Enkele restanten van compacte bronnen zijn onverhoopt zichtbaar.
Van: Hoofdstuk 1

9.6 GEVOELIGE LOFAR-BEELDEN EN EEN ONVERWACHTSE ONTDEKKING

Met voorspellingen van radiostraling door schokgolven in het Kosmische Web in de hand wijden we ons aan het maken van échte radiobeelden van de noordelijke hemel. We benutten data van de LOFAR, een pan-Europese radiotelescoop met een Nederlands hart. Het tot op heden meest omvangrijke waarneemprogramma van de LOFAR, de LoTSS, is een campagne om de noordelijke hemel te fotograferen in het laagfrequente radiovenster rond 150 megahertz.⁵ Het tweede grote pakket aan gepubliceerde LoTSS-data, de LoTSS DR2, omvat reeds gekalibreerde beelden van zo'n 30% van de noordelijke hemel. We bewerken deze beelden door zoveel mogelijk licht van sterrenstelsels uit de onderliggende data weg te poetsen, en vervolgens nieuwe foto's te maken met een lage resolutie. Hierdoor worden lichtzwakke patronen die zich uitstrekken over de hemel, beter zichtbaar. De bewerkte reeks beelden is de gevoeligste ooit gemaakt van de laagfrequente radiohemel met resoluties van rond de boogminuut. Spannend genoeg zou er daarom veel in te ontdekken kunnen zijn.

Het eerste dat opvalt, is een wanordelijk patroon van strepen, die vele graden lang kunnen zijn en zich tot op hoge Galactische breedtegraad manifesteren (zie Fig. 9.5). Deze strepen zijn waarschijnlijk afkomstig van de Melkweg — en niet van het Kosmische Web. Ze laten zien dat ons sterrenstelsel een tot op heden onderschatte ruisbron is in statistische zoektochten naar radiostraling van het Kosmische Web.

⁵Golven in dit venster hebben golflengtes van circa twee meter.

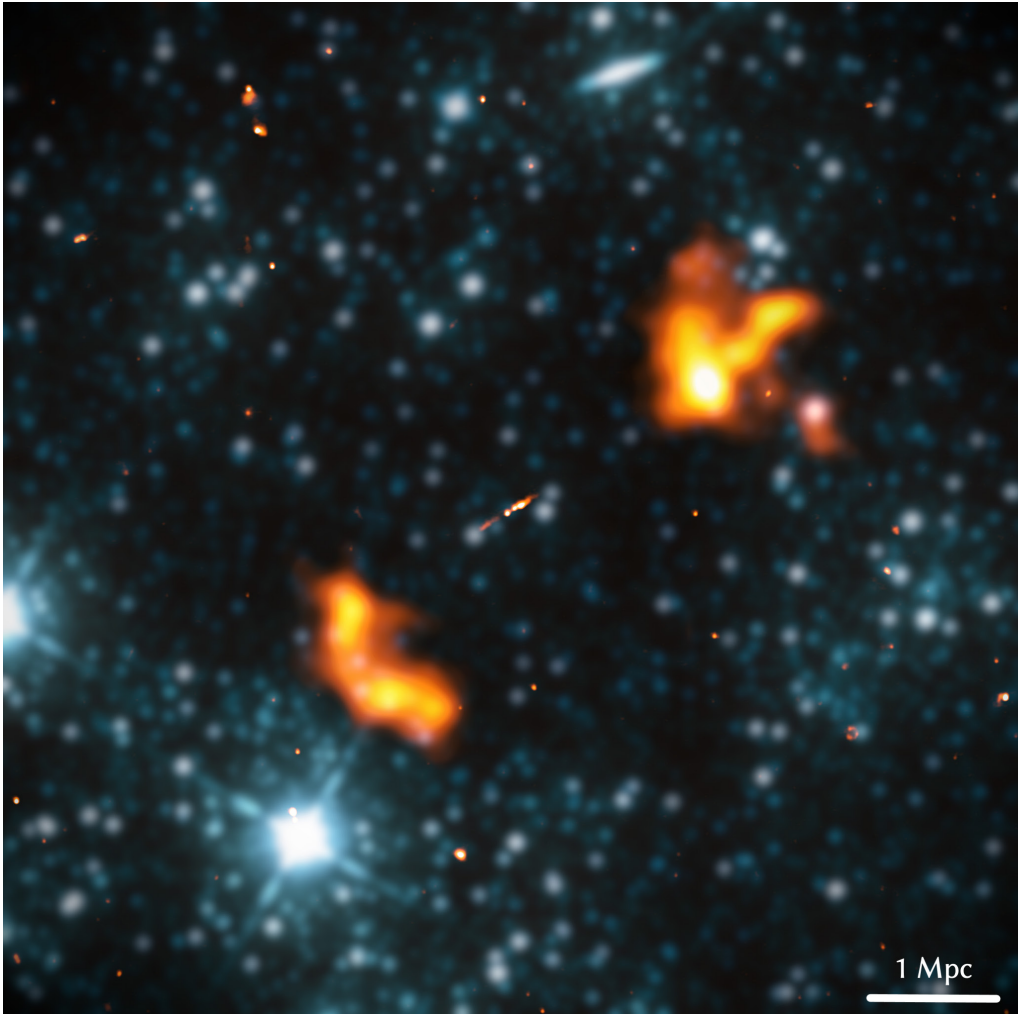


Figure 9.6: *Alcyoneus*, de grootste bekende structuur van galactische oorsprong, is gevormd door een krachtig actief zwart gat. *Alcyoneus*' ontdekking toont aan dat sterrenstelsels het omliggende Kosmische Web kunnen verhitten en magnetiseren tot op kosmologische afstanden (i.e. miljoenen lichtjaren). We combineren LOFAR-foto's bij golflengtes van twee meter (*oranje*) met een WISE-foto bij een golflengte van $3,4 \mu\text{m}$ (*blauw*). *Van: Hoofdstuk 4*

Bij het bekijken van de nieuwe beeldenreeks vallen vervolgens twee pluimen op die zich aan weerszijden van een elliptisch sterrenstelsel bevinden (zie Fig. 9.6). Nadere analyse, beschreven in Hoofdstuk 4, wijst uit dat de pluimen gigantische plasma-wolken representeren die de intergalactische ruimte zijn ingeblazen door een paar straalstromen met antiparallelle oriëntatie. Deze straalstromen zijn op hun beurt gegenereerd door een superzwaar zwart gat⁶ in het centrum van het bijbehorende ster-

⁶In de sterrenkunde zijn superzware zwarte gaten gedefinieerd als zwarte gaten met massa's van ten

renstelsel. De minimale afstand tussen de pluimen, en daarmee ook de minimale lengte van de twee straalstromen, is zo'n 5 megaparsec (16 miljoen lichtjaar). Dit gigantische galactische uitvloeisel blijkt, ten minste in geprojecteerde zin, de grootste door een sterrenstelsel voortgebrachte structuur te zijn die tot op heden bekend is. We noemen het uitvloeisel *Alcyoneus*, naar de mythologische gigant die tijdens de gigantomachie met de Olympische goden vocht om de heerschappij over de Kosmos. We onderzoeken of Alcyoneus bijzondere eigenschappen bezit die direct verklaren waarom het uitvloeisel zo groot geworden is. Opvallend genoeg zendt Alcyoneus, ten opzichte van andere bekende uitvloeisels met straalstromen van zo'n één miljoen lichtjaar en langer, een mediale hoeveelheid radiostraling uit. Ook zijn, binnen deze referentiegroep, zowel de totale massa van de sterren in het bijbehorende sterrenstelsel als de massa van het zwarte gat dat de straalstromen geproduceerd heeft, typisch — zo niet aan de *lage* kant. Blijkbaar zijn een zeer hoge radiolichtkracht, stellaire massa of zwartgatmassa geen noodzakelijke voorwaarden om uitvloeisels zoals Alcyoneus te produceren. We schatten ten slotte de druk af in de plasmawolken, en vinden — dankzij de gevoeligheid van de LoTSS — de laagste druk ooit gemeten in een uitvloeisel. Deze druk is echter nog altijd hoger dan de typische druk in filamenten van het Kosmische Web. Aangezien Alcyoneus waarschijnlijk ook in een filament ligt, zijn de plasmawolken, en daarmee Alcyoneus als geheel, nog altijd bezig te groeien.

9.7 EEN GIGANTISCH UITVLOEISEL UIT EEN SPIRAALSTERRENSTELSEL

Na de spectaculaire vondst van Alcyoneus besluiten we een uitgebreidere LoTSS-zoektocht naar gigantische galactische uitvloeisels op poten te zetten. Één van de opvallendste uitvloeisels die we vinden, gepresenteerd in Hoofdstuk 5, is een uitvloeisel van ten minste 8 miljoen lichtjaar lang dat voortgebracht is door een centraal zwart gat in een spiraalsterrenstelsel. Spiraalsterrenstelsels, zoals de Melkweg, hebben meestal geen centrale zwarte gaten die gedurende lange tijd krachtige straalstromen genereren. Daardoor zijn, voor zover bekend, galactische uitvloeisels uit spiraalsterrenstelsels zeldzaam. Het uitvloeisel dat we hier presenteren, komt uit NGC 6185, en bevindt zich een half miljard lichtjaar van ons vandaan — dat wil zeggen, op een kosmische steenworpafstand. Het is het grootste bekende uitvloeisel uit een Melkwegachtig sterrenstelsel. De radiostraling afkomstig van de plasmawolken is nog maar nét in de LoTSS-foto's zichtbaar. Vergelijkbare uitvloeisels op grotere afstand zijn met de huidige data daarom niet, of bijna niet, te zien. De ontdekking van het uitvloeisel uit het nabijgelegen NGC 6185 suggereert dat gigantische galactische uitvloeisels uit een spiraalsterrenstelsels vaker voorkomen dan tot op heden gedacht. Het gebrek aan bekende exemplaren zou zomaar eens een observationeel selectie-effect kunnen zijn.

minste een miljoen keer de massa van de Zon.

Zoals bij Alcyoneus meten we de druk in de plasmawolken, en vinden een vergelijkbaar lage waarde. Omdat NGC 6185 relatief dichtbij staat, zijn er bayesiaanse Kosmische Webreconstructies beschikbaar waarmee de dichtheid van het filament waar het sterrenstelsel zich in bevindt, grofweg kan worden bepaald. Ook zijn er relatief gedetailleerde observaties mogelijk van andere sterrenstelsels in de groep van sterrenstelsels waarin NGC 6185 het zwaarste is. Met schattingen van de druk in de plasmawolken van het uitvloeielsel van NGC 6185 en van de dichtheid van het omliggende Kosmische Web, berekenen we de temperatuur van het intergalactisch medium rond NGC 6185. Het idee is, simpelweg, om gebruik te maken van de ideaalgaswet. Onze meting, $T = 11^{+12}_{-5} \cdot 10^6$ K, geldt als de eerste bepaling van de temperatuur van het intergalactisch medium middels een gigantisch galactisch uitvloeielsel. Het voordeel van deze methode is dat er geen kostbare röntgenstraalobservaties nodig zijn. De methode kan in de toekomst preciezer gemaakt worden.

9.8 EEN CENSUS VAN GIGANTEN

Geënthousiasmeerd door onze vondsten speuren we, zoals Hoofdstuk 6 beschrijft, naar meer onbekende gigantische galactische uitvloeielsels. Dit doen we simpelweg door met het oog zorgvuldig de LoTSS-beelden te bekijken. Al gauw merken we dat er in principe zoveel giganten te vinden zijn dat we, gezien de omvang van ons onderzoeksteam, niet alle kandidaat-giganten binnen een redelijke termijn op gigantschap zouden kunnen toetsen. Om toch de grootste uitvloeielsels in de LoTSS-beelden niet te missen, besluiten we ons in de eerste plaats te richten op kandidaat-giganten die aan de hemel vijf of meer boogminuten lijken te beslaan. Na een lange lijst van kandidaten kritisch af te werken, blijken we 2.060 nieuwe gigantische galactische uitvloeielsels ontdekt te hebben (zie e.g. Fig. 9.7). Vóór onze census waren er in de wetenschappelijke literatuur circa 1.300 giganten bekend.

Omdat onze zoektocht een statistisch significante hoeveelheid hemel beslaat, en de LoTSS-waarnemingen volgens een vast procedé uitgevoerd en gekalibreerd zijn, is een betekenisvolle statistische analyse mogelijk. We modelleren hoe een geparаметriseerde onderliggende populatie, samen met twee eveneens geparаметriseerde selectie-effecten, tot een monster leidt. De selectie-effecten die we in ogenschouw nemen, zijn de eindige gevoeligheid van de LoTSS-foto's en de minimalehoekgrootte-eis van vijf boogminuten. Door het monster met onze theoretische resultaten te combineren, leiden we af dat de intrinsieke lengtes van gigantische galactische uitvloeielsels consistent zijn met een paretoverdeling. Ook geven we een eerste inschatting van de intrinsieke populatiedichtheid van giganten in het Kosmische Web.

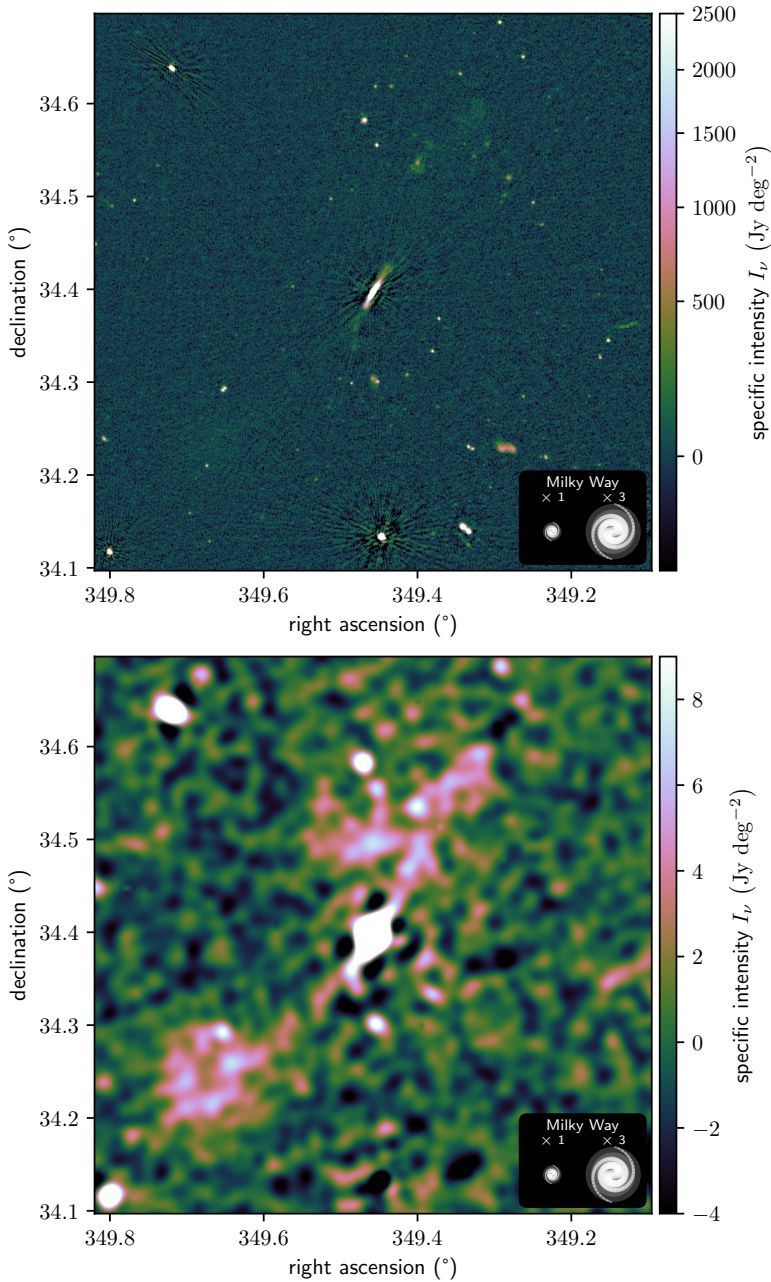


Figure 9.7: LoTSS DR2–uitsneden met resoluties van $6''$ (boven) en $60''$ (onder) van een pasontdekte gigant. Door compacte bronnen uit reeds gekalibreerde 150 MHz–data te verwijderen en lageresolutiebeeldvorming te bedrijven, leggen we anders speculatieve giganten bloot rond het nog onontgonnen oppervlaktehelderheidsniveau van $\sim 1 \text{ Jy deg}^{-2}$. Het geïdentificeerde bronsterrenstelsel bevindt zich in het midden van de plaatjes. Deze gigant heeft een geprojecteerde lengte $l_p = 1,4 \pm 0,3 \text{ Mpc}$ en een hoeklengte $\phi = 32,3 \pm 0,2'$ — groter, dus, dan de volle Maan! Om een gevoel voor de omvang te krijgen, tonen we de stellaire Melkwegschijf (waarvan de diameter 50 kpc is) alsook een driemaal grotere versie. *Van: Hoofdstuk 6*

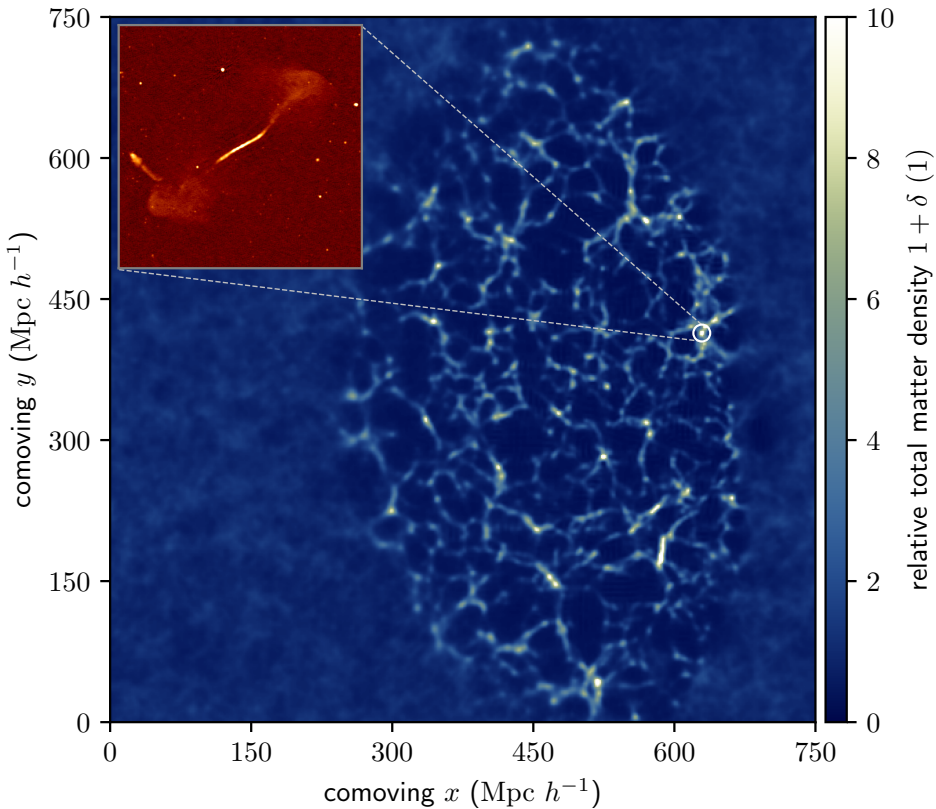


Figure 9.8: Dankzij een Kosmische Webreconstructiedoorbraak met montecarlotechnieken en herhaaldelijke simulaties van donkeremateriedynamica vanaf het vroege Heelal tot het heden, is het nu mogelijk om de dichtheid en gravitationele stabiliteit te meten van het Kosmische Web rond individuele galactische uitvloeisels (Hoofdstuk 7). Zo huist de gigant die we in Hoofdstuk 6 ontdekken en die in de vergroting weergegeven is, in een cluster van sterrenstelsels (*witte cirkel*). Het hoofdpaneel toont een plakje van het driedimensionale a-posteriorigemiddelde van de BORG SDSS (Jasche et al., 2015).
Van: Hoofdstuk 7

9.9 DE OMGEVINGEN VAN GIGANTISCHE GALACTISCHE UITVLOEISELS IN HET KOSMISCHE WEB

In Hoofdstuk 7 demonstreren we dat moderne Kosmische Webreconstructies van het Lokale Universum ingezet kunnen worden om de dichtheid van het intergalactisch medium rondom individuele galactische uitvloeisels af te schatten. We lokaliseren in totaal 260 giganten (waarvan 80% ontdekkingen zijn uit Hoofdstuk 6) en 1.443 ‘algemene’ galactische uitvloeisels, geselecteerd uit een groter monster zonder lengte als expliciete eis mee te nemen, in het Kosmische Web. Zie bijvoorbeeld Fig. 9.8.

We presenteren vervolgens de eerste kansverdelingen van de groteschaaldichtheid rond zowel giganten als algemene galactische uitvloeisels. Al enkele decennia bestaat

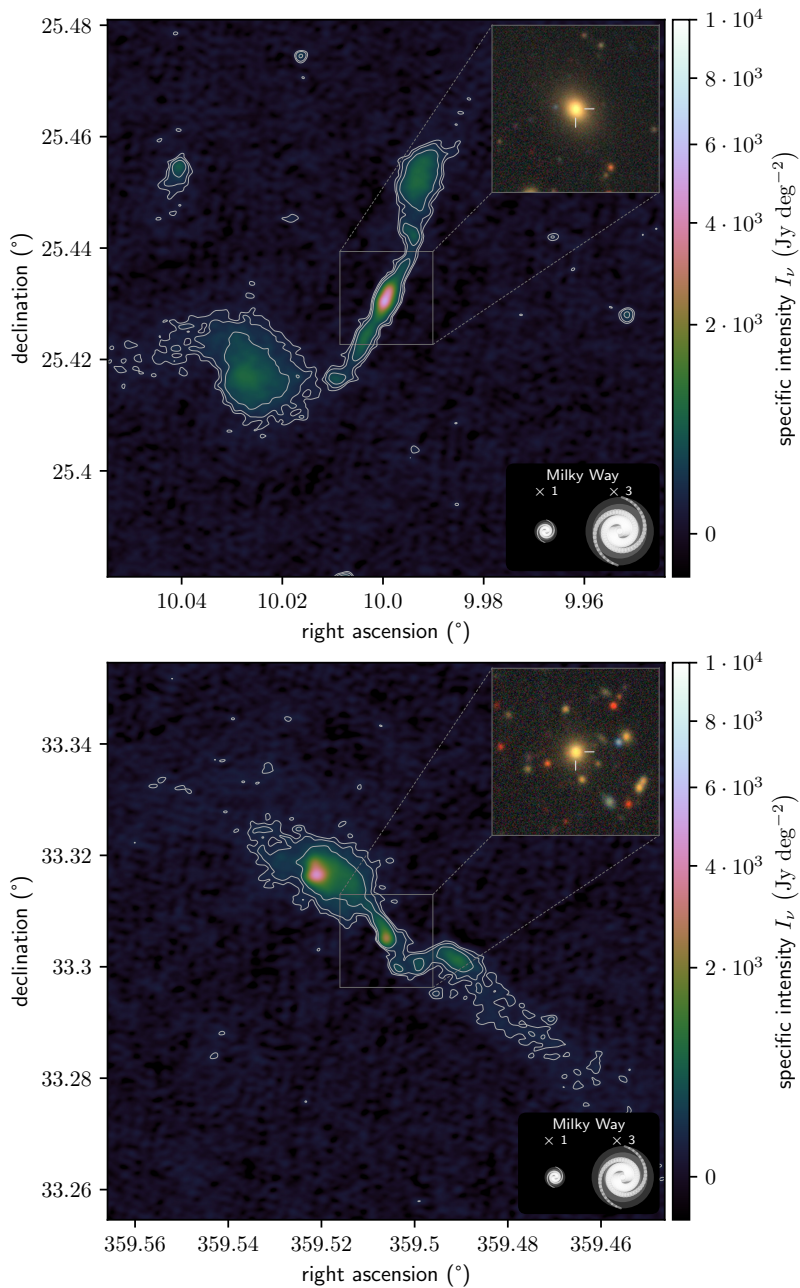


Figure 9.9: Voorbeelden van giganten die in de LoTSS DR2 gevonden zijn aan de hand van machinaal leren en geautomatiseerde, aannemelijkheidsquotiëntgebaseerde sterrenstelselassociatie. De vergrotingen tonen uitsneden van de DESI Legacy Imaging Surveys DR9 (g, r, z) (Dey et al., 2019) met afmetingen van $1' \times 1'$. *Van: Hoofdstuk 8*

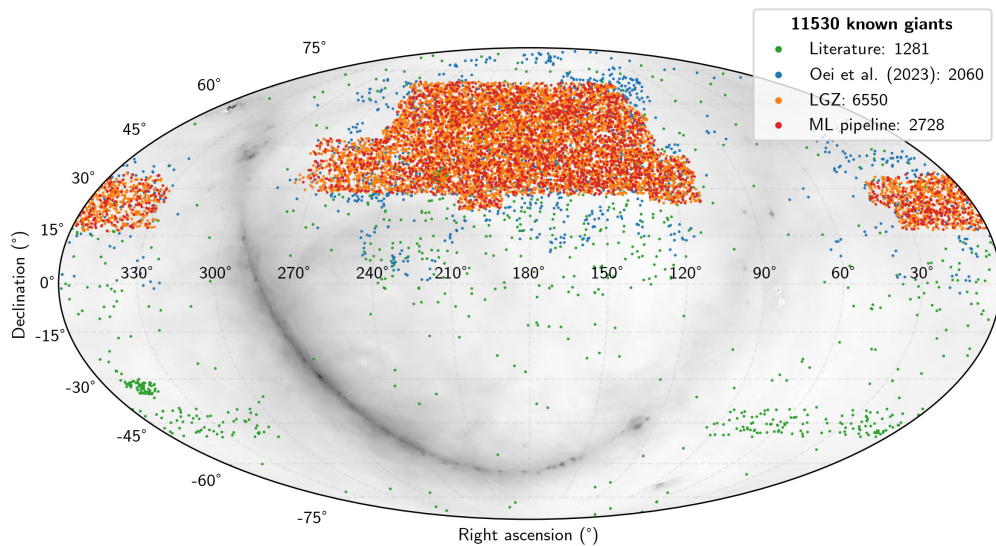


Figure 9.10: Overzicht van de hemel met de Melkweg en de coördinaten van bekende giganten ingetekend. Met in totaal 11.530 unieke bronnen presenteren we de omvangrijkste catalogus tot nu toe van grootschalige galactische terugkoppeling naar het Kosmische Web. Op het moment van schrijven zijn $\sim 90\%$ van alle bekende giganten ontdekt in zoekcampagnes die we in Hoofdstukken 6 (*blauwe stippen*) en 8 (*oranje en rode stippen*) presenteren. *Van: Hoofdstuk 8*

het vermoeden dat giganten zoveel groter zijn dan andere galactische uitvloeisels doordat ze een bij uitstek ijle groteschaalomgeving zouden hebben. Onze resultaten laten echter zien dat de op dit moment bekende giganten in *dichtere* omgevingen leven dan algemene uitvloeisels. De huidig bekende populatie giganten zijn ook radiolichtkrachtiger dan algemene uitvloeisels, maar dat kan een selectie-effect zijn: omdat giganten veelal een groter stuk hemel beslaan dan andere uitvloeisels, moeten ze in totaal meer radiostraling afgeven om boven de ruis van de foto's uit te komen. We werpen de hypothese op dat de hogere dichtheden rondom giganten een reflectie zijn van een onderliggende, positieve relatie tussen Kosmische Webdichtheid en straalstroomvermogen die valide is voor alle galactische uitvloeisels. Om deze hypothese kracht bij te zetten, presenteren we de eerste kwantitatieve, observationele relatie tussen Kosmische Webdichtheid en radiolichtkracht voor galactische uitvloeisels. Deze radiolichtkracht is een indirecte maat voor het vermogen van de straalstromen die het uitvloeisel aandrijven. Onze bevindingen zijn consistent met een scenario waarin giganten gewone, in plaats van mechanistisch uitzonderlijke, leden van de uitvloeiselpopulatie zijn.

Hoofdstuk 6 beschrijft een handmatige, visuele zoektocht naar giganten in de LoTSS met een hoekgrootte van vijf boogminuten of meer. In Hoofdstuk 8 presenteren we een zoektocht naar giganten in de LoTSS met een hoekgrootte van *minder* dan vijf boogminuten, waarbij we de kracht van burgerwetenschap en machinaal leren combineren. Via het *Radio Galaxy Zoo*-project en convolutionele neurale netwerken bereiken we een census van giganten met meer dan 10^4 exemplaren. Figuur 9.9 toont twee giganten die aan de hand van de machinaallerenaanpak geïdentificeerd zijn, terwijl Fig. 9.10 onze uiteindelijke census weergeeft. Bovendien breiden we het geometrische uitvloeiselpopulatiemodel uit dat Hoofdstuk 6 heeft geïntroduceerd, en bepalen een kansverdeling over de parameters van het model met de nieuwe census en bayesiaanse statistiek. Dit resulteert in verbeterde inschattingen van de populatiedichtheid van giganten, $n_{\text{GRG}} = 13 \pm 10 (100 \text{ Mpc})^{-3}$, en van de instantane vullingsgraad van de pluimen van giganten in clusters en filamenten van het Kosmische Web, $\mathcal{V}_{\text{GRG-CW}} = 1,1 \pm 0,9 \cdot 10^{-5}$. Ons werk levert bewijs voor het idee dat giganten binnen de uitvloeiselpopulatie talrijk zijn. Dit suggereert dat giganten een standaarduitkomst van uitvloeisevolutie belichamen. We redeneren dat de ingeschatte waarde van $\mathcal{V}_{\text{GRG-CW}}$ voldoende hoog is voor een scenario waarin giganten significant hebben bijgedragen aan de magnetisatie van het Kosmische Web. Gigantische galactische uitvloeisels, die eerder als randverschijnsel beschouwd werden, lijken voorzichtig aan hoofdverdachten te worden in de zoektocht naar de bron van kosmische magnetogenese. ■