



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Cosmic depth and detail: advancing LOFAR imaging workflows to unveil the deep high-resolution universe

Jong, J.M.G.H.J. de

Citation

Jong, J. M. G. H. J. de. (2025, May 9). *Cosmic depth and detail: advancing LOFAR imaging workflows to unveil the deep high-resolution universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4245860>

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/1887/4245860>

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

Populairwetenschappelijke samenvatting

Radio uit de hemel

Tijdens het onderzoeken van bronnen van ruis die telecommunicatie konden verstoren, ontdekte natuurkundige en ingenieur Karl Jansky in 1933 onverwachts radiostraling op een frequentie van 20,5 MHz vanuit de richting van het centrum van onze Melkweg. Met deze ontdekking opende hij een nieuw venster om het Universum te bestuderen via radiogolven. Jansky's ontdekking werd een paar jaar later bevestigd en verder uitgewerkt door ingenieur en amateur radioastronoom Grote Reber. Hij detecteerde signalen uit dezelfde richting als Jansky op een frequentie van 162 MHz, als ook radiostraling van het Andromedastelsel en andere gebieden aan de hemel. De ontwikkeling van de radioastronomie raakte in een versnelling na de Tweede Wereldoorlog, aangedreven door vooruitgang in radartechnologie die tijdens de oorlog was ontwikkeld en een daaropvolgende aandachtsverschuiving richting meer 'vreedzame' wetenschappelijke activiteiten.

Belangrijke ontdekkingen

Dit nieuwe venster om het Universum te bestuderen via radiogolven heeft geleid tot vele belangrijke ontdekkingen. De grootste en helderste objecten werden door de eerste radioastronomen als eerste geïdentificeerd, waaronder radiostraling van sterrenstelsels en van supernovaresten binnen onze eigen Melkweg. Kort daarna werden andere fenomenen ontdekt, zoals de waterstoflijn, die astronomen in staat stelt de structuur en dynamiek van sterrenstelsels en het vroege Universum te onderzoeken. Een andere grote ontdekking was de kosmische achtergrondstraling, afkomstige van de zwakke nagloed van de Oerknal. Pulsars – snel roterende neutronensterren die bundels straling uitzenden – werden ook ontdekt, waardoor ons begrip van extreme fysica werd verdiept. Meer recent zijn ook snelle radioflitsen, mysterieuze en krachtige uitbarstingen van radiogolven ontdekt. Zelfs signalen afkomstig van bruine dwergen kunnen met radiotelescopen worden waargenomen. De volgende twee secties belichten ontdekkingen op radiogolflengten die het meest relevant zijn voor

dit proefschrift.

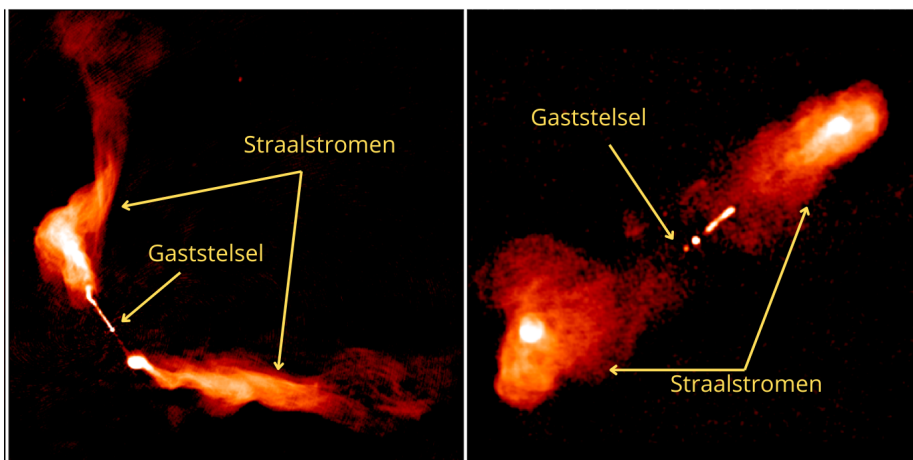


Figure I: Voorbeelden van kernheldere (*links*) en randheldere (*rechts*) straalstromen, met aanduiding van het gaststelsel en straalstromen. Bron: Hardcastle & Croston (2020).

Radiostralende sterrenstelsels

Een van de belangrijkste vroege ontdekkingen in de radioastronomie was de identificatie van heldere radiobronnen die aanvankelijk ‘quasi-stellair’ werden genoemd. Deze objecten kregen deze naam, omdat de geassocieerde gaststelsels, waargenomen met optische telescopen, sterachtig leken. Deze werden later bekend als ‘quasars’. Het meten van de afstanden tot quasars onthulde dat de radiostraling in werkelijkheid kwam van verre sterrenstelsels. Het is nu bekend dat hun krachtige radiostraling het gevolg is van grote hoeveelheden materiaal die naar een superzwaar zwart gat in het centrum van het sterrenstelsel worden getrokken. Dit materiaal vormt een hete, roterende schijf die met name energie uitstraalt bij golflengten die geassocieerd worden met hete ultraviolet (UV) en röntgenstraling.

De radiostralende sterrenstelsels vertonen in veel gevallen straalstroomstructuren die vanuit de kern van het gaststelsel ontstaan, zoals aangegeven in Figuur I. Deze straalstromen kunnen zich ver buiten hun gaststelsels uitstrekken en enorme hoeveelheden energie in de omliggende omgeving injecteren. Deze energie kan de vorming van nieuwe sterren verstoren of zelfs de groei en ontwikkeling van andere sterrenstelsels verhinderen. Sterrenstelsels met straalstromen worden op basis van hun vorm (morfologie) geclassificeerd als Fanaroff-Riley type I (kernhelder) en type II (randhelder). Kernheldere straalstromen worden gekarakteriseerd door de helderste delen van hun straalstroom dicht bij het gaststelsel, die vervolgens overgaan in

meer pluimachtige structuren naar de buitenranden toe. Randheldere straalstromen vertonen de helderste delen van hun straalstromen dicht bij de buitenranden. Figuur I toont voorbeelden van beide types. Dit verschil in verschijning wordt momenteel toegeschreven aan een combinatie van de kracht van de straalstromen en de omgevingen waarin een sterrenstelsel zich bevindt. De kernheldere straalstromen zijn namelijk niet krachtig genoeg om door hun (dichte) omgeving heen te dringen, waardoor hun straalstromen diffuus naar buiten uitwaaiëren. De randheldere straalstromen zijn echter krachtig genoeg om door hun omgeving heen te dringen en behouden zo hun helderste plekken aan de rand van de straalstroom die door het omliggende medium heendringt. Hierdoor worden sterrenstelsels met kernheldere straalstromen meestal gevonden in ‘drukkere’ omgevingen, zoals clusters van sterrenstelsels, terwijl sterrenstelsels met randheldere straalstromen vaker in geïsoleerde gebieden voorkomen.

Hoewel ons begrip van deze radiostralende sterrenstelsels in de loop der tijd is verbeterd, is onze kennis over de vorming en evolutie van hun straalstromen nog steeds onvolledig. Dit komt deels door waarnemingsbeperkingen in resolutie en gevoeligheid, die, na de ontwikkeling van betere instrumenten, tot meerdere herzieningen van de oorsprong van straalstromen hebben geleid. Dit benadrukt de wens voor het verzamelen van grotere steekproeven van radiostralende sterrenstelsels op basis van data van hogere kwaliteit, verkregen door gevoeligere telescopen die scherpere beelden kunnen maken.

Radiobruggen

Groepen van sterrenstelsels worden sterrenstelselclusters genoemd. Deze grootschalige kosmische structuren kunnen bestaan uit honderden tot duizenden sterrenstelsels die door de zwaartekracht bij elkaar worden gehouden, waardoor ze de grootste door zwaartekracht gebonden objecten in het Universum zijn. Ze bevatten vaak niet alleen sterrenstelsels, maar ook enorme hoeveelheden heet gas, donkere materie en ander intergalactisch materiaal. Een belangrijk proces in de evolutie van ons Universum is het samensmelten van sterrenstelselclusters om zo grotere structuren te vormen. De samenvoegingsprocessen genereren grootschalige, zwakke radiostraling die door onze telescopen kan worden waargenomen. De bron van deze straling kan worden toegeschreven aan verschillende effecten in de aanwezigheid van magnetische velden, zoals schokgolfachtig gedrag en willekeurige turbulentie.

Recentelijk is ook zwakke radiostraling gedetecteerd tussen sterrenstelselclusters die op het punt staan samen te smelten. Een voorbeeld van dergelijke radiostraling die een brug vormt tussen een paar sterrenstelselclusters wordt getoond in Figuur II. Terwijl sommigen hebben voorgesteld dat schokgolfachtig gedrag verantwoordelijk is

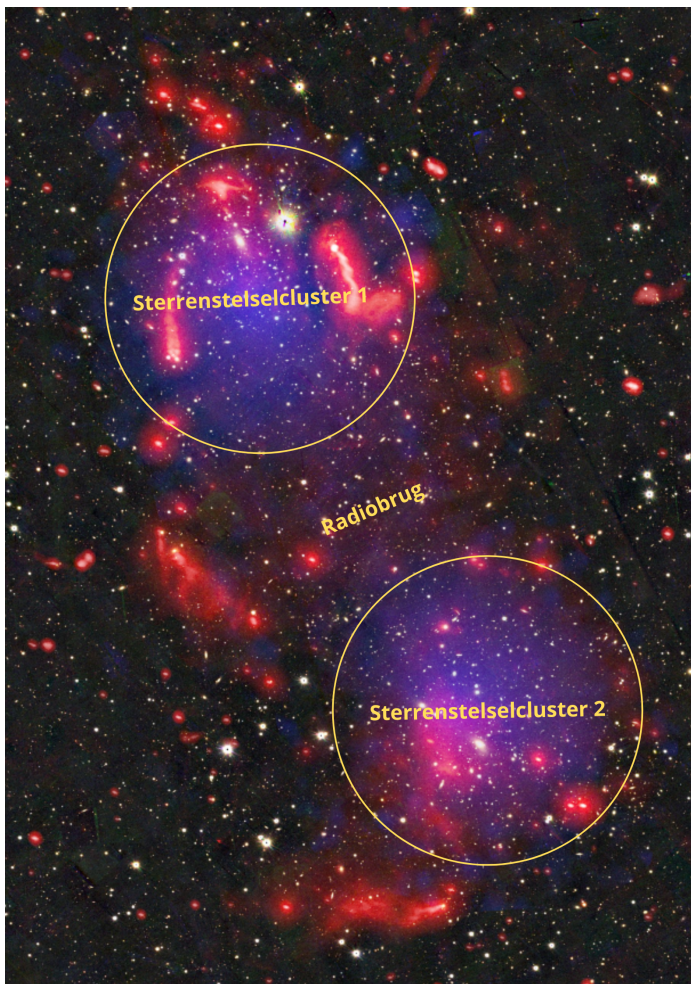


Figure II: Radiobrug tussen een paar sterrenstelselclusters die op het punt staan om samen te smelten. De rode kleur komt overeen met radiostraling, de blauwe kleur met röntgenstraling en de achtergrond toont optische data. Deze afbeelding is ontworpen door F. Sweijen, met gebruik van data uit Hoofdstuk 2.

voor hun oorsprong, suggereert recentere onderzoek dat de straling kan ontstaan door turbulent gedrag. Aangezien er tot nu toe slechts een paar directe waarnemingen van twee radiobridgen zijn geanalyseerd, zijn meer studies nodig om hun fysieke oorsprong en verspreiding volledig te begrijpen.



Figure III: De LOFAR Superterp bevindt zich in Exloo, Drenthe, in Nederland. Het woord ‘terp’ komt uit het Nederlands en verwijst naar een kunstmatige verhoging die werd gemaakt door vroege bewoners van Nederland, om zo hun huizen en vee te beschermen tegen overstromingen in laaggelegen gebieden. In de context van LOFAR is de Superterp een groter LOFAR station dat zich bevindt in het centrale gebied van het netwerk. Het is gebouwd op verhoogd terrein en omringd door een kanaal om het te beschermen tegen wilde dieren, die dit instrument anders mogelijk ook zouden gebruiken om het radiouniversum te bestuderen. De grote grijze tegels bedekken de HBA antennes, terwijl de kleinere, meer willekeurig verdeelde vierkanten de LBA antennes zijn. Bron: ASTRON.

Interferometers en de Low Frequency Array

In de afgelopen 100 jaar zijn er meerdere telescopen ontwikkeld die waarnemingen doen in het radiospectrum. Tot de bekendste behoren de Very Large Array (VLA), Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT), en de Atacama Cosmology Telescope (ALMA). Dit zijn instrumenten die gebruikmaken van interferometrie om de resolutie te verbeteren. Dit is een techniek waarbij meerdere antennes of schotels samenwerken om hetzelfde object te observeren. Door de waargenomen signalen van verschillende locaties op aarde te combineren, kunnen astronomen een veel grotere telescoop simuleren om objecten met een veel fijnere resoluties te bestuderen. Hoewel een instrument zoals de VLA ons sinds de jaren 80 hoogwaardige radiogegevens van ons Universum heeft geleverd, waren er geen gegevens van vergelijkbare kwaliteit beschikbaar bij golflengten groter dan een meter (onder ongeveer 300 MHz). Dit radiofrequentiedomein verhuult waardevolle informatie over astrofysische processen van diffusere radiobronnen van onder andere de eerder



Figure IV: Verschillende LOFAR antennes. Links is een LBA antenne te zien met een mens er naast om de schaal te verduidelijken. In het midden wordt een afbeelding van een HBA antenne getoond, die verborgen ligt onder de tegels getoond in de rechter afbeelding, waar mensen bovenop staan om de schaalgrootte aan te geven. Deze foto's zijn genomen bij station PL612 in Baldy (Polen) door de auteur en zijn collega's.

genoemde straalstromen en radiobridgen. Gelukkig is dit sinds de jaren 2000 veranderd dankzij technologische vooruitgang, een groeiende interesse en de beschikbaarheid van financiële middelen, waardoor verschillende interferometers zijn ontwikkeld die waarnemingen doen bij lage radiofrequenties. Een van de belangrijkste instrumenten die waarnemingen onder de 250 MHz verricht, is de Low Frequency Array (LOFAR).

LOFAR is een instrument dat is uitgerust met twee soorten antennes: LBA antennes die frequenties tussen 10 en 80 MHz detecteren en HBA antennes die frequenties tussen 110 en 240 MHz waarnemen. Een LOFAR station en de twee antenntypes zijn afgebeeld in Figuur III en Figuur IV. Geen van de LOFAR componenten, inclusief de antennes, heeft bewegende onderdelen, omdat LOFAR gebruikmaakt van technologie om digitaal zijn focus over de hemel te sturen. Dit betekent dat alle dataverwerking in computers plaatsvindt en dat de constructie van de antennes relatief goedkoop is vergeleken met andere radiotelescopen. De relatief lage constructiekosten en internationale samenwerkingen hebben bijgedragen aan de snelle uitbreiding van LOFAR met stations door heel Europa. LOFAR's kern bevindt zich in Nederland met internationale stations in Duitsland, Polen, Engeland, Ierland, Zweden, Letland, Frankrijk en Finland.²¹ Binnenkort zal LOFAR ook worden uitgebreid naar Italië en Bulgarije. Door gebruik te maken van al deze stations simuleert LOFAR effectief een radiotelescoop ter grootte van het

²¹Het Finse station in Kilpisjärvi opereert onafhankelijk en is niet verbonden met het LOFAR-netwerk.

Europese continent, waardoor het niet alleen een uitzonderlijk hoge resolutie biedt, maar daarnaast ook een hoge gevoeligheid dankzij het dichte netwerk van antennes.

Krachtige computers en geavanceerde software

LOFAR kan beelden vastleggen van grote delen van de hemel, tot wel tientallen vierkante graden in één enkele observatie,²² waardoor het in staat is om tegelijkertijd veel radiobronnen te detecteren. Het creëren van deze grote beelden brengt echter aanzienlijke computationele uitdagingen met zich mee, vooral wanneer data van alle internationale LOFAR stations gecombineerd moeten worden. De computationele complexiteit komt door het feit dat verschillende versturende effecten op de data moeten worden gecorrigeerd, voordat er een beeld kan worden gemaakt. Op lage radiofrequenties is één van de meest vervelende stoorzenders de ionosfeer – een laag in de atmosfeer van de aarde gevuld met geladen deeltjes die radiogolven verstoren. Het corrigeren van deze verstoringen vereist een zorgvuldig ontworpen strategie, en zodra de kalibratie voltooid is, moeten de gegevens worden omgezet in beelden – een proces dat ‘imaging’ wordt genoemd – om data klaar te maken voor wetenschappelijke analyse. Al deze stappen vereisen gespecialiseerde software.

In de afgelopen 10 jaar heeft de meeste softwareontwikkeling zich gericht op het verwerken van data van alleen de Nederlandse LOFAR stations, omdat dit computationeel minder ‘duur’ is, terwijl het nog steeds hoogwaardige kwaliteit data levert en zo helpt om nieuwe inzichten over ons Universum te verkrijgen. De volgende grote stap is om deze capaciteit uit te breiden naar het volledig automatisch verwerken van data van alle LOFAR stations tegelijkertijd. Dit zal ons uiteindelijk in staat stellen om een volledige scan van de noordelijke hemel uit te voeren met de hoogst mogelijke resolutie (zie Figuur V) en om specifieke regio’s langdurig waar te nemen door meerdere observaties van hetzelfde gebied te combineren, zonder veel handmatig werk te hoeven verrichten om scherpe beelden uit de data te krijgen. Elk van deze observaties produceert ongeveer 16 terabyte (TB) aan data.²³ Het verwerken van zulke grote hoeveelheden data kan niet worden uitgevoerd op standaard moderne laptops of desktops. In plaats daarvan is het gebruik van grote, krachtige computernetwerken nodig, die ontworpen zijn om de enorme computationele belasting efficiënt aan te kunnen (zie Figuur VI).

²²Ter vergelijking: de diameter van de maan beslaat ongeveer 0,5 vierkante graden.

²³16 TB is voldoende opslagruimte voor ongeveer 4 miljoen foto’s van een moderne smartphone, 8.000 uur aan HD-video, of meer dan 100 miljoen pagina’s aan tekstdocumenten. Een momenteel standaard laptop heeft doorgaans ongeveer 1 tot 2 TB aan opslagruimte.

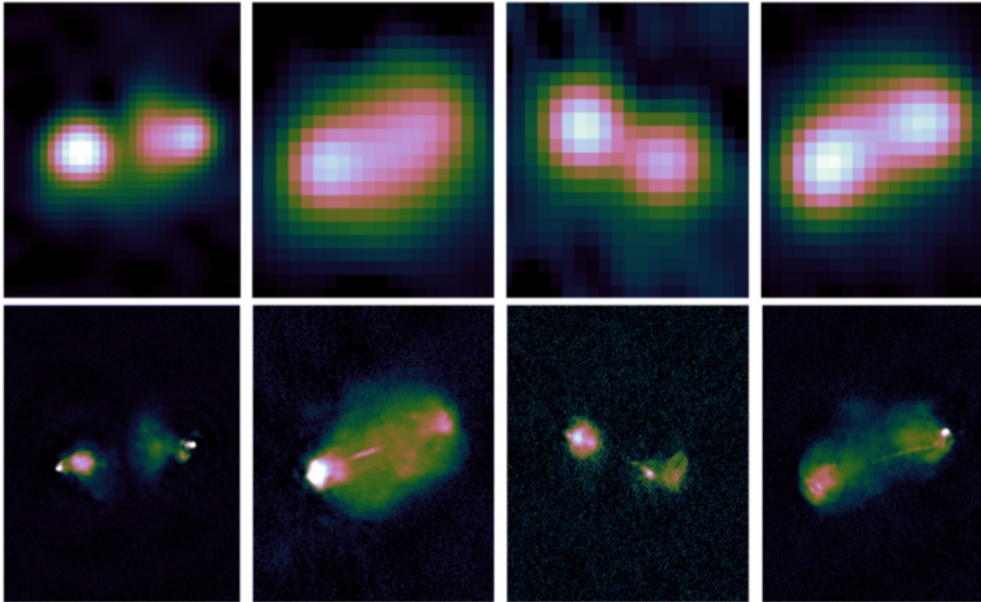


Figure V: Resolutieverbetering na het overgaan van alleen Nederlandse LOFAR-stations (eerste rij) naar de volledige internationale LOFAR (tweede rij). Elke kolom toont dezelfde radiobron. Bron: de Jong et al. (2024).

Dit proefschrift

We beginnen dit proefschrift in **Hoofdstuk 2**, waarin we zes observaties van de Nederlandse LOFAR stations combineren om het diepste beeld tot nu toe te creëren van een radiobrug tussen een paar sterrenstelselsclusters. Deze clusters bevinden zich in het proces van samensmelting tot één sterrenstelselscluster. In hun huidige fase vertonen ze radiostraling die een brug tussen hen vormt. Dit unieke fenomeen is pas onlangs ontdekt. Ons werk richt zich op verder onderzoek om de oorsprong ervan beter te begrijpen met dit nieuwe diepe beeld. Onze bevindingen wijzen op een turbulent proces, waarbij deeltjes energie winnen door interacties met turbulentie in de aanwezigheid van magnetische velden, waardoor ze straling uitzenden bij lage radiofrequenties.

Daarna richten we ons op kleinere schalen door afbeeldingen van kernheldere straalstromen (FRI) en randheldere straalstromen (FRII) van sterrenstelsels, gedetecteerd door de Nederlandse LOFAR stations, gecombineerd met data over hun kosmische afstanden, gemeten door andere telescopen. Dit stelt ons in staat om in **Hoofdstuk 3** te onderzoeken hoe deze twee typen straalstromen zich over kosmische tijd hebben ontwikkeld. We ontdekken dat het vroege Universum dichter bevolkt



Figure VI: Koningin Máxima van Nederland tijdens de inauguratie van de Snellius-supercomputer in Amsterdam. Deze supercomputer maakt deel uit van de SURF-computinginfrastructuur. Met behulp van de GPU's van dit systeem hebben we in dit proefschrift een neurale netwerk getraind om te detecteren wanneer de kalibratie van onze radiodata is geconvergeerd. Bron: Het Koninklijk Huis.

was met de helderste bronnen van beide type straalstromen. Dit komt waarschijnlijk door de grotere beschikbaarheid van gas in het vroegere kleinere Universum. We observeren echter onverwacht ook een afname in de dichtheid van zwakkere bronnen. Dit is een resultaat dat niet eenvoudig te verklaren is. We vermoeden dat dit komt door resolutiebeperkingen van onze data, wat de noodzaak benadrukt voor het maken van beelden met hogere resolutie van onze hemel.

Gedreven door de behoefte aan beelden met een hogere resolutie richten we ons in **Hoofdstuk 4** op het verwerken van gegevens van vier LOFAR waarnemingen van een enkel hemelgebied, genomen met alle Nederlandse en internationale stations. Het combineren van meerdere waarnemingen maakt het mogelijk om een dieper beeld te maken. Dit is nodig om meer verre en zwakke radiobronnen te detecteren.²⁴ Dit brengt echter ook uitdagingen met zich mee, aangezien we zo ook vier keer meer gegevens moeten verwerken, vergeleken met het maken van een beeld van

²⁴Vergelijkbaar met het instellen van een langere belichtingstijd op je camera om voldoende licht op te vangen.

een enkele observatie. Om de dataverwerkingsstrategie te verbeteren, ontwikkelen we technieken om automatisch gebieden van de hemel met voldoende signaal te selecteren om zo onze dataverwerking te optimaliseren. Deze automatische selectie is cruciaal, aangezien sterkere signalen meer informatie bieden over hoe de hemel verandert over de tijd en frequentie, waardoor we versturende effecten op de data beter kunnen corrigeren met gespecialiseerde software. Na het voltooiën van de volledige gegevensverwerking verkrijgen we het diepste beeld over een hemelgebied van 2,5 bij 2,5 graden met een 20-voudige verbetering in resolutie in vergelijking met beelden gemaakt met alleen de Nederlandse LOFAR stations (zie Figuur V). Dit betekent dat de pixels in onze beelden een 400 keer kleiner gebied bestrijken dan die in de data gebruikt in Hoofdstukken 2 en 3.²⁵

Hoewel we in het vorige hoofdstuk het diepste hoog-resolutie beeld met LOFAR hebben geproduceerd, zien we dat de computationele kosten te hoog zijn om deze aanpak effectief (en verantwoord, gezien het grote energieverbruik) op te schalen. Om dit probleem aan te pakken, herzien we in **Hoofdstuk 5** een ‘vergeten’ techniek om de datagrootte te verminderen bij het combineren van meerdere verschillende 8-uur durende waarnemingen van hetzelfde hemelgebied. Deze methode maakt gebruik van de siderische dag – de periode van ongeveer 23 uur en 56 minuten waarin de Aarde één volledige rotatie om haar as voltooit heeft. Dit stelt ons in staat om datapunten van onze waarnemingen, die elkaar herhalen op ongeveer hetzelfde siderische tijdstip, met elkaar te middelen en zo zonder veel verlies aan informatie, het datavolume te verkleinen. Onze methode maakt hierdoor een snellere verwerking mogelijk bij het omzetten van de gekalibreerde gegevens naar een definitief hemelbeeld.

Ten slotte presenteren we in **Hoofdstuk 6** aanvullende verbeteringen om de verwerking van LOFAR’s enorme datavolumes te optimaliseren. Dit omvat kwaliteitsverbeteringen, het implementeren van een raamwerk voor automatische verwerking op high-performance computer systemen en het gebruik van kunstmatige intelligentie (AI) om automatisch te bepalen wanneer de kalibratie voldoende verfijnd is, waardoor menselijke tussenkomst overbodig wordt. Bovendien optimaliseren we de meest computationeel intensieve aspecten van onze strategie, waardoor het hele proces tot ongeveer vier keer sneller wordt gemaakt. Deze verbeteringen zullen ons uiteindelijk in staat stellen om veel grotere en veel meer datasets efficiënter en kosteneffectiever te verwerken.

²⁵Dit betekent ook dat het uiteindelijke beeld, met een grootte van 32 GB, te groot is om te openen op een standaard laptop.