



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Search and detection of low frequency radio transients

Spreeuw, J.N.

Publication date
2010

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Spreeuw, J. N. (2010). *Search and detection of low frequency radio transients*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam].

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, P.O. Box 19185, 1000 GD Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Samenvatting in het Nederlands

7.1 LOFAR

Op dit moment (2010) wordt de nieuwe radiotelescoop LOFAR (LOW Frequency ARray) afgebouwd. Het ontwerp van LOFAR is drastisch anders dan van vorige radiotelescopen, zoals bijvoorbeeld de Very Large Array (VLA) in de Verenigde Staten en de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT) in Nederland. Die telescopen bestonden allemaal uit schotelantennes, zoals in figuur 7.1. De vorm van de LOFAR antennes verschilt wezenlijk van de "klassieke" schotelvorm. In respectievelijk figuren 7.2 en 7.3 staan de lage (30-80 MHz) en hoge (120-240 MHz) frequentie LOFAR antennes afgebeeld. Ze zijn dus gevoelig voor het frequentiegebied rond de FM band, dat u gebruikt als u naar de (auto) radio luistert. Eén van de redenen dat deze simpele en goedkope antennes voldoen is dat ze alleen bij frequenties onder de 240 MHz gebruikt worden. Hogere frequentie radiogolven vliegen er gewoon doorheen. Het omgekeerde is **niet** waar: de "klassieke" schotelantennes zijn **ook** gevoelig voor radiogolven met "LOFAR frequenties". Maar schotelantennes hebben het nadeel dat ze veel duurder zijn. Er is een hele stijve constructie nodig om te zorgen dat hij zijn paraboolvorm houdt en niet inzakt onder invloed van zijn eigen gewicht. Een ander nadeel is dat ze alleen gevoelig zijn voor het kleine deel van de hemel waar ze op gericht zijn. LOFAR antennes zijn niet eens te richten, we kunnen de antennes niet vanuit een controle-toren mechanisch kantelen. Dat is geen enkel bezwaar, want ze zijn gevoelig voor bijna de hele hemel. Zelfs vlak boven de horizon is hun gevoeligheid niet verwaarloosbaar, hoewel ze natuurlijk recht naar boven (het zenith) het gevoeligst zijn. Door het op verschillende

manieren combineren van de signalen van de verschillende antennes kun je met LOFAR antennes verschillende gebieden van de hemel tegelijk zien. Je kunt met LOFAR zoveel gebieden tegelijk bekijken dat je de facto altijd bijna de hele hemel ziet! Iets dergelijks is nog nooit eerder gepresteerd. Dat het nu pas kan heeft vooral te maken met de beschikbaarheid van glasvezel en computerkracht. In figuur 7.4 ziet u zo'n kaart die met een teststation van LOFAR (ITS) is gemaakt. De gevoeligheid van dit teststation is niet zo groot, vandaar dat er maar één bron (hemellichaam) te zien is, namelijk Jupiter in actieve toestand. Normaal zijn de objecten Cas A (een supernovarest in onze melkweg) en Cygnus A (een melkwegstelsel) de helderste objecten aan de noordelijke hemel, maar die bevinden zich ten tijde van deze waarneming te dicht bij de horizon om op deze kaart zichtbaar te worden.

Wat wel hetzelfde is gebleven ten opzichte van de oude schotelantennes is het principe van apertuur synthese, hetgeen ruwweg inhoudt dat verschillende telescopen samenwerken om de verschillende structuren van hemellichamen in kaart te brengen. Dit is echt een belangrijk punt: één grote telescoop met hetzelfde oppervlak als meerdere telescopen samen heeft wel dezelfde gevoeligheid, maar niet hetzelfde vermogen om, in dezelfde tijd, hemellichamen van verschillende afmetingen in kaart te brengen. De kern van de telescoop staat in Nederland, in Drenthe bij Exloo op een groot open veld van 2 bij 3 km. In het midden van dit veld is een enorme terp aangelegd met een sloot eromheen, waar een aantal LOFAR stations bij elkaar staan. Figuur 7.5 laat een foto uit 2009 van deze terp zien. Ieder LOFAR station bestaat uit 96 Lage Frequentie antennes en 48 Hoge Frequentie Antennes. In totaal staan er 18 van zulke stations in het veld bij Exloo en 18 op andere plaatsen in Nederland. Er zullen ook tenminste 8 stations worden gebouwd in het buitenland. Één, bij Effelsberg, in Duitsland, is er zelfs al gereed. Een overzicht van de plaatsen in Europa waar stations worden neergezet of gepland zijn, ziet u in figuur 7.6.

Er is jaren aan gewerkt aan de totstandkoming van deze telescoop, daarnaast is er ongeveer €140 mln aan besteed, maar wat gaan we ermee doen? LOFAR biedt een ongeëvenaarde gevoeligheid bij deze lage frequenties. Dat geeft op veel verschillende manieren mogelijkheden om ontdekkingen in het heelal te doen. We kunnen bijvoorbeeld signalen opvangen uit het vroege heelal, d.w.z. toen het heelal nog twintig keer zo jong was als nu. We kunnen ook de vorming van melkwegstelsels en sterren beter leren begrijpen. Verder weten we nog heel weinig over magneetvelden in de kosmos, zelfs over magneetvelden in ons eigen melkwegstelsel weten we nog relatief weinig. LOFAR gaat dat ook helpen verbeteren. Weer een ander onderzoeksgebied betreft elementaire deeltjes met een heel hoge energie die door het heelal vliegen: hoe worden ze gemaakt en wat zijn hun eigenschappen. Ook kunnen we met LOFAR meer leren over uitbarstingen van onze eigen zon. Maar dat zijn niet de onderwerpen van dit proefschrift, dit proefschrift over het detecteren van **lage frequentie veranderlijk radiobronnen** en dan met name bronnen die in relatief korte tijd van helderheid veranderen, dus bijvoorbeeld in een paar uur of een paar dagen. Verandering van helderheid in korte tijd kan komen door een explosie, maar het betekent in ieder geval dat het gebied waar de straling gemaakt wordt niet enorm groot kan zijn, niet zo groot als een heel melkwegstelsel, bijvoorbeeld. Die veranderlijke radiostraling komt van relatief kleine objecten zoals (zware) sterren, neutronsterren en zwarte gaten in het midden van een melkwegstelsel. Maar het kan ook gaan over planeten rond andere sterren dan de zon, zgn. exoplaneten. Die



Figure 7.1: Een aantal van de schotelantennes van de Very Large Array (VLA) nabij Socorro, New Mexico, Verenigde Staten. Op de achtergrond de maan. (Credit: Image courtesy of NRAO/AUI)



Figure 7.2: De Lage Frequenties Antennes van LOFAR zoals ze momenteel bij Exloo (Drenthe) staan opgesteld. Ze zijn vooral gevoelig bij frequenties tussen de 30 en 80 MHz.

planeten kunnen, als ze een magneetveld hebben, geladen deeltjes uit de sterrewind laten draaien (gyreren) rond hun magnetische veldlijnen. Het gevolg hiervan is dat ze een bepaald soort radiostraling, namelijk cyclotronstraling, gaan uitzenden. LOFAR is gevoelig voor de frequenties waarbij deze straling het sterkst is (en nog door de ionosfeer kan komen). Hier gaat heel **hoofdstuk 6** van dit proefschrift over. Dit is een artikel uit 2007 waarbij we van alle bekende exoplaneten, dat waren er toen ruim 200, onderzocht hebben of hun helderheid voldoende zou zijn om door LOFAR gedetecteerd te kunnen worden. Dat bleken er slechts enkele te zijn, maar één detectie zou al iets unieks zijn, dat is nog nooit eerder gedaan. Overigens is er een heel goed voorbeeld van een planeet rond onze eigen ster, de zon, die sterke lage frequentie radiostraling uitzendt, namelijk Jupiter. Jupiter zal ook uitvoerig met LOFAR bestudeerd worden, maar we weten al relatief veel van deze planeet en zijn magneetveld. Deze kennis komt niet alleen door waarnemingen met de vorige generaties radiotelescopen, maar ook door de ruimtevaartuigen Pioneer en Voyager die er vlak langs zijn gevlogen en metingen hebben verricht. Jupiter is ook een voorbeeld van een veranderlijke radiobron. De helderheid van Jupiter in de kaart van figuur 7.4, was in de opnamen 8 minuten ervoor en 8 minuten erna, die ieder ook tweeëneenhalve minuut duurden, heel verschillend. Zelfs in een seconde kan de helderheid van Jupiter al aanzienlijk veranderen als we kaarten maken met een klein frequentie bereik.



Figure 7.3: Hoge Frequenties Antennes van LOFAR van dichtbij bekeken.

7.2 Voorbereiden op LOFAR

7.2.1 Software

LOFAR is een instrument dat veel meer data produceert dan welke vorige telescoop dan ook zodat we niet goed uit de voeten kunnen met de hard- en software die voor bijvoorbeeld de Westerbork Radio Synthese Telescoop (WSRT) gebruikt wordt. Het correleren (vermenigvuldigen) van de signalen van de verschillende stations wordt voor LOFAR door software op een supercomputer (Blue Gene/P, gemaakt door IBM) gedaan. Voor de WSRT gebeurde dit op hardwareniveau, maar voor LOFAR zou dat onvoldoende flexibel zijn. De stationscorrelator, die de signalen van de verschillende antennes in een LOFAR station combineert, bestaat trouwens wél uit hardware. Dit is speciale hardware die geprogrammeerd kan worden.

Uit Blue Gene komen de gecorreleerde signalen van de verschillende LOFAR stations. Deze output moet verder bewerkt worden voor er kaarten van kunnen worden gemaakt. Het bewerken bestaat uit het verwijderen van slechte data, veroorzaakt door interferentie van bijvoorbeeld radio en tv stations, middeling over verschillende frequentiekanalen en calibratie. Iedere seconde worden er kaarten gemaakt per frequentieinterval, per gebied van de hemel,

elk nog eens voor vier verschillende polarisaties. Dat is dus een zeer grote hoeveelheid kaarten die iedere seconde verwerkt moet worden! Zo groot dat het niet mogelijk is om al deze kaarten langere tijd op te slaan, althans niet zonder ze eerst fors te comprimeren in tijd en/of frequentie. Toch hebben we, om veranderlijke radiobronnen te kunnen vinden, wel steeds iedere seconde nieuwe kaarten van de hemel nodig. Dit hebben we opgelost door speciale software die iedere kaart verwerkt en verbinding legt met een database. We zijn namelijk niet geïnteresseerd in ieder pixel van een kaart, maar alleen in de bronnen die erin staan, hoe helder ze zijn en waar ze staan aan de hemel. De software die dat doet, dus die alle bronnen in een kaart "meet", heet bronextractie software (Engels: source extraction software). De helderheden en posities van elke bron in elke volgende LOFAR kaart worden in **real time**, dus steeds binnen één seconde, vergeleken met een database. In deze database staan de posities en helderheden van bronnen die vroeger zijn waargenomen. Als uit die vergelijking duidelijk naar voren komt dat er een verschil is in helderheid van een bron t.o.v. een eerdere waarneming of dat het om een nieuwe bron gaat, wordt er een "alarm" afgegeven. Dit houdt in dat astronomen op de hoogte worden gesteld. In veel gevallen wordt LOFAR automatisch gereconfigureerd zodat er heel snel met extra gevoeligheid op deze nieuwe of veranderlijke bron kan worden "ingezoomd", zodat we er meer aan kunnen ontdekken. De beschrijving van alle componenten van de bronextractie software vindt u in **hoofdstuk 2**. Deze code heb ik niet alleen geschreven, maar ook uitvoerig getest, met behulp van statistische technieken. Het testen of software ook echt doet wat het moet doen, noemen we validatie. De validatie van alle componenten van mijn code heb ik beschreven in **hoofdstuk 3**.

7.2.2 Wetenschap

SGR 1806-20

In de aanloop naar LOFAR, kunnen we nog meer doen dan ervoor zorgen dat onze hard- en software in orde is. Dat kunnen we doen door met onze "klassieke" radiotelescopieën bij zo laag mogelijke frequenties veranderlijke bronnen waar te nemen. Die mogelijkheden deden zich al snel na het begin van mijn proefschrift (november 2004) voor. Op 27 december 2004 was er een grote uitbarsting van het object SGR 1806-20. SGR staat voor "Soft Gamma Repeater", dat zijn neutronensterren met een sterk magneetveld (magnetars) die herhaaldelijk heldere flitsen laag-energetische gammastraling uitzenden. SGR 1806-20 was dus al bekend bij astronomen, maar deze grote uitbarsting, die werd veroorzaakt door een reconfiguratie van zijn magneetveld, maakte hem bekend bij het algemene publiek. Want deze explosie gaf de meest energetische flits van gammastraling van buiten het zonnestelsel die ooit was geregistreerd! Die flits werd door de maan weerkaatst en verstoorde zelfs de aardse ionosfeer. Radiotelescopieën nemen dit vanzelfsprekend niet waar, maar wel de radiostraling afkomstig uit de wolk van plasma die zich door de explosie rond de magnetar gevormd heeft. Deze radiostraling wordt net als bij de lage frequentie radiostraling van Jupiter (cyclotronstraling) veroorzaakt door elektronen die versneld worden in magneetvelden. Alleen gaat het hier om de relativistische variant van cyclotronstraling, zgn. synchrotronstraling. Dat komt omdat de elektronen in het schokfront van de explosie snelheden hebben gekregen in de buurt van de lichtsnelheid. Aan de eigenschappen van die synchrotronstraling kunnen we allerlei dingen

afleiden. Het was al bekend, uit eerder onderzoek, dat de straling van de wolk rond SGR 1806-20 lineair gepolariseerd was. Die polarisatie wordt veroorzaakt doordat de beweging van de electronen die de straling uitzenden aan het lokale magneetveld in het plasma gekoppeld is. De polarisatierichting zegt dus iets over de orientatie van het magneetveld in het plasma, geprojecteerd op de hemel.

Met de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT) hebben we in januari, april en mei van 2005 in totaal 19 waarnemingen van deze plasmawolk gedaan bij 350, 850 en 1300 MHz. Dit staat beschreven in **hoofdstuk 5**. Wat we ontdekt hebben is dat, bij lage frequenties, de polarisatiehoek heel anders is dan bij hoge frequenties. We hebben ook afgeleid dat de polarisatiegraad bij lage frequenties niet wezenlijk anders is dan bij hoge frequenties. De combinatie van deze twee ontdekkingen is heel opmerkelijk. Bij lage frequenties kan de polarisatiehoek inderdaad anders zijn, maar dan is dat meestal in combinatie met een sterke depolarisatie. Dat is het geval waarin de polarisatiehoek van het radiosignaal flink verdraaid wordt, door een verschijnsel dat Faraday Rotatie heet. Het netto effect van de verschillende lagen plasma die de radiostraling uit de verschillende gebieden van de stralingshaard langs verschillende wegen passeert, is dan dat er weinig gepolariseerd licht overblijft. Omdat dit nu niet het geval is, lijkt het erop dat de straling afkomstig is uit ander plasma, met een anders georiënteerd magneetveld, dan de hoge frequentie straling. Het is dus misschien zo dat je naar een ander deel van de wolk "kijkt". Hoe het deel van de wolk, dat de lage frequentie straling uitzendt, er dan precies uitziet, weten we niet. Daarvoor heb je een gedetailleerd model van de wolk nodig en meer en nauwkeuriger waarnemingen, bij verschillende frequenties en tijden, om de evolutie van de wolk te kunnen volgen.

GCRT J1745-3009

In maart 2005 verscheen een opzienbarend artikel in Nature over de ontdekking van een zeer krachtige veranderlijke radiobron, genaamd GCRT J1745-3009, ruim een graad ten zuiden van het centrum van onze Melkweg. De waarneming was gedaan bij 90 cm golflengte met de Very Large Array (VLA), op 30 september/1 oktober 2002 als onderdeel van een zoektocht naar veranderlijke bronnen in de buurt van het Galactisch Centrum (GC). Het artikel verscheen pas tweeënehalf jaar later omdat de auteurs, onder aanvoering van Scott Hyman, er zeker van wilden zijn dat wat ze gevonden handen echt was. Wat ze zagen was een hemellichaam dat ze niet konden oplossen, net ten zuiden van de randen van een supernovarest, dat vijf maal steeds ongeveer 11 minuten zeer krachtig straalde met tussenpozen van zo'n 66 minuten waarin deze bron totaal niet gedetecteerd kon worden. Jammer genoeg duurde de waarneming maar zes uur, anders hadden ze waarschijnlijk nog meer uitbarstingen kunnen waarnemen. Deze uitbarstingen leken dus regelmatig met een periode van 77 minuten. Een dergelijke veranderlijke bron was nog nooit eerder waargenomen. Hyman en zijn medewerkers hebben de tientallen waarnemingen vanaf 1989 van het Galactisch Centrum bij 90 cm in het VLA archief doorgespit, maar vreemd genoeg was GCRT J1745-3009 al die keren niet te zien, geen uitbarstingen dus. Na de publicatie van het Nature artikel bleek de bron wel twee keer te vinden te zijn in het archief van een Indiase telescoop, de Giant Meter Radio Telescope (GMRT). In 2003 en 2004 waren zwakkere eenmalige uitbarstingen van deze bron te vinden, maar nooit is GCRT J1745-3009 bij een andere golflengte dan 90cm gedetecteerd.

Dat is echt heel vreemd. Het is zo'n bijzondere bron dat ik denk dat het Scott Hyman nog de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor deze ontdekking kan krijgen!

Ik heb geprobeerd om met de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT) deze bron opnieuw te detecteren, bij 90 cm en bij 21 cm golflengte. Dat is jammer genoeg niet gelukt. Ik heb ook drie van de vier alleroudste 90 cm waarnemingen van het GC met de VLA, uit 1986 en 1988, gereduceerd om GCRT J1745-3009 terug te vinden. Dat heeft helaas ook niet tot nieuwe detecties geleid, wel tot mooie kaarten van het centrum van onze Melkweg. Wat wél heeft geleid tot nieuwe inzichten, is het opnieuw reduceren en analyseren van de VLA data uit 2002 waarmee Scott Hyman GCRT J1745-3009 heeft ontdekt. Dit staat in **hoofdstuk 4** beschreven. Ik kwam erachter dat alle uitbarstingen precies hetzelfde verloop hadden, met eerst een snelle toename van de helderheid, dan een langzame toename en tenslotte een snel verval, dit alles in de 11 minuten die de uitbarstingen duurden. Ik heb ook ontdekt dat de vijf uitbarstingen niet allemaal precies even lang waren, de lengte varieerde een paar procent. De uitbarstingen waren wel strikt periodiek, er zat steeds 77.012 ± 0.021 minuten tussen het begin van twee opeenvolgende uitbarstingen. Ik vond dat de spectrale index, die aangeeft hoe helder de bron is als functie van frequentie, sterk negatief is, in zekere mate in overeenstemming met eerdere conclusies door Hyman en zijn medewerkers, op basis van de uitbarsting die in 2004 met de GMRT is waargenomen.

Maar de hamvraag is: wat is GCRT J1745-3009 nu precies voor een hemellichaam? Zoals gezegd kunnen we deze bron niet oplossen, we zien GCRT J 1745-3009 als een puntbron. Zijn het twee neutronsterren die om elkaar heen draaien in 77 minuten? Of is het een precederende pulsar met een precessie periode van 77 minuten? Een probleem is dat beide systemen waarschijnlijk nogal schaars in de Melkweg aanwezig zijn. Dat hoeft ze niet uit te sluiten, maar wat ze wel uitsluit is mijn ontdekking dat de uitbarstingen asymmetrisch in de tijd zijn, terwijl (de simpelste vorm van) deze modellen symmetrische uitbarstingen voorspellen. Er is ook gesuggereerd dat GCRT J1745-3009 een totaal nieuw soort systeem is, een zogenaamde witte dwerg pulsar, die elke 77 minuten een uitbarsting heeft. Dit zou de asymmetrie van de uitbarstingen alsmede de exacte periodiciteit kunnen verklaren. Maar dat model kan niet makkelijk verklaren waarom de uitbarstingen alleen bij 90 cm zijn waargenomen of waarom de spectrale index zo extreem is. Exoplaneten zijn ook genoemd, maar zouden eigenlijk bij wat lagere frequenties zo helder moeten zijn. Zo zijn er voor elk model wel voors en tegens, geen enkel model kan alle eigenschappen van GCRT J1745-3009 makkelijk verklaren. We moeten eerst meer soortgelijke systemen ontdekken, bijvoorbeeld met LOFAR, of meer detecties hebben van GCRT J1745-3009.

7.2.3 Waarneemstrategie voor exoplaneten

Wat is nu de meest optimale manier om met LOFAR zoveel mogelijk veranderlijke bronnen te vinden? Om die vraag te beantwoorden moet je veranderlijke bronnen in klassen en dan, afhankelijk van de karakteristieken van die klassen, per klasse een strategie bepalen. Dat is nog niet zo gemakkelijk omdat je niet precies weet hoe de veranderlijkheid van bijvoorbeeld een accreterende neutronenster bij röntgenfrequenties zich vertaalt naar lage frequentie radiogolven. Maar, stel dat je redelijk kunt voorspellen wat de helderheid en mate van veran-

derlijkheid van een bepaald type bronnen bij LOFAR frequenties zal zijn, dan kan je daar je waarneemstrategie op afstemmen en meer van dit soort bronnen vinden.

Echter, het is misschien niet het interessantst om zoveel mogelijk veranderlijke bronnen te vinden, maar meer om veranderlijke bronnen van een nieuw type te vinden, zoals Scott Hyman is gelukt met GCRT J1745-3009 (zie hierboven). In deze categorie vallen de exoplaneten, dat zijn planeten die rond andere sterren dan de zon draaien. Er zijn nu enkele honderden exoplaneten bekend, die bij de frequenties waarbij ze ontdekt zijn (voornamelijk zichtbaar licht) niet of nauwelijks veranderlijk zijn. Maar het is aannemelijk dat er een aantal exoplaneten op Jupiter zullen lijken en dus ook krachtige en veranderlijke radiostraling zullen uitzenden, zoals ik heb beschreven in paragraaf 7.1. Helaas is het nog nooit gelukt om met de huidige generatie radiotelescopen radiostraling van een exoplaneet waar te nemen, ondanks vele uren waarneemtijd. Als dit met LOFAR wel lukt, zou dit een historische ontdekking zijn! Het probleem is alleen dat als je Jupiter op de afstand van de dichtstbijzijnde ster plaatst, hij al te zwak is om te worden waargenomen, zelfs met LOFAR lukt dat niet. We zeggen dan dat de intrinsieke helderheid van systemen die lijken op de combinatie zon-Jupiter te laag is. Gelukkig zijn er genoeg exoplaneten waarvan we kunnen vermoeden dat hun intrinsieke helderheid vele malen hoger is dan Jupiter, bijvoorbeeld omdat deze exoplaneet veel dichtter bij de ster staat dan Jupiter bij de zon. Behalve genoeg intrinsieke helderheid is het natuurlijk ook belangrijk voor een geschikte exoplaneet dat hij niet te ver bij ons vandaan staat, anders lukt het ook niet. Jean-Mathias Griesßmeier, Philippe Zarka en ik hebben alle exoplaneten waarvan op 13 januari 2007 voldoende bekend was (197 stuks) doorgerekend en een ranglijst gemaakt van de geschiktste kandidaten om met LOFAR te kunnen worden gedetecteerd. Dit staat beschreven in **hoofdstuk 6**. We hebben geconcludeerd dat er van die 197 exoplaneten een paar helder genoeg zullen zijn om te worden gedetecteerd met LOFAR. Dat is natuurlijk weinig, maar het is eigenlijk ook wel hoopgevend omdat er steeds meer exoplaneten ontdekt worden. Vandaag de dag (2 mei 2010) zijn er al 453 exoplaneten bekend! Als we alle exoplaneten zouden doorrekenen die er sinds 13 januari 2007 zijn bijgekomen, zouden we waarschijnlijk weer een aantal goede kandidaten voor een detectie met LOFAR vinden.

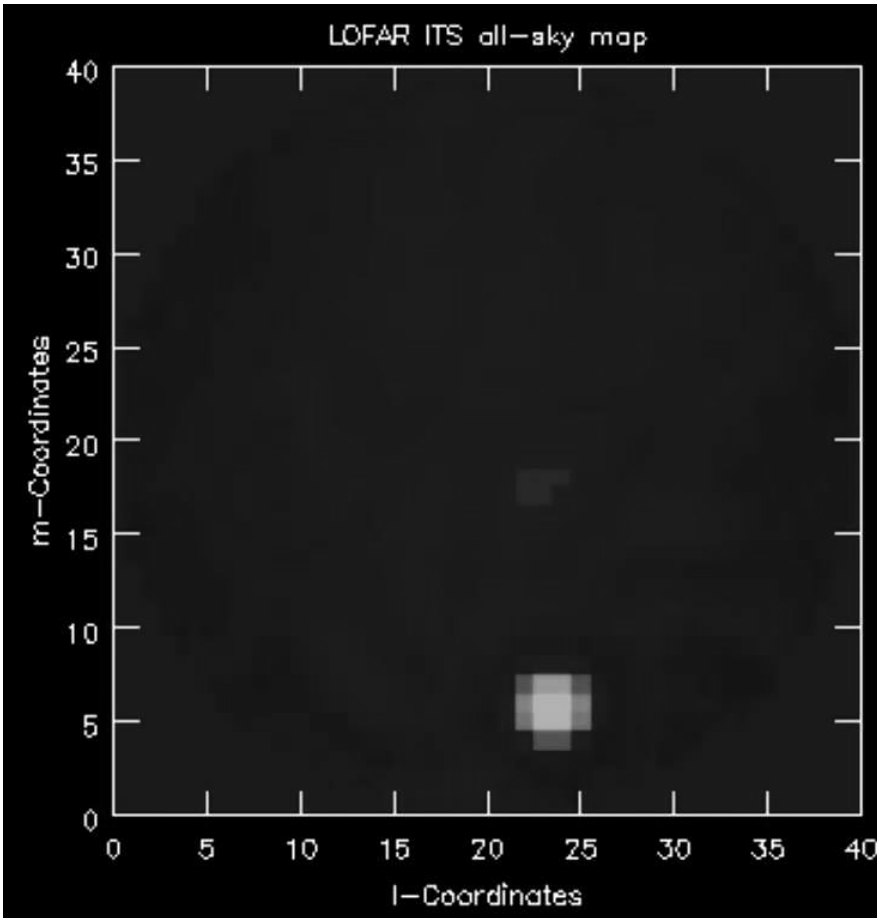


Figure 7.4: Een kaart van de hele hemel gemaakt met een teststation van LOFAR, het Initial Test Station. Het oosten is links, het noorden is boven. Misschien kunt u vaag de cirkel ontwaren die de horizon aangeeft. Het bijzondere aan deze kaart is dat er maar één (zeer heldere) bron in het zuiden te zien is. Dit is een veranderlijke bron, namelijk Jupiter tijdens een radio "storm" op 8 februari 2004. Als Jupiter en de zon niet actief zijn, zijn Cassiopeia A (een supernovarest in onze melkweg) en Cygnus A (een melkwegstelsel) de helderste bronnen aan de noordelijke hemel, bij deze frequenties (20-30 MHz). Deze opname is 's nacht gemaakt, maar ook overdag is de zon meestal niet de helderste radiobron aan de hemel. De maan is bij deze golflengten helemaal onzichtbaar. De hemel ziet er dus heel anders uit bij radiogolflengten dan bij zichtbaar licht (het optisch), waar ons oog gevoelig voor is.



Figure 7.5: Foto uit 2009 van de "superterp" in het binnengebied van de kern van LOFAR, waarop de binnenste kernstations van LOFAR geplaatst zullen worden. Deze terp wordt omringd door een sloot.



Figure 7.6: De heldere plekken laten zien waar er LOFAR stations staan, worden gebouwd of gepland zijn. Slechts voor 8 buitenlandse LOFAR stations is momenteel geld beschikbaar: 5 in Duitsland, 1 in Frankrijk, 1 in het Verenigd Koninkrijk en 1 in Zweden.

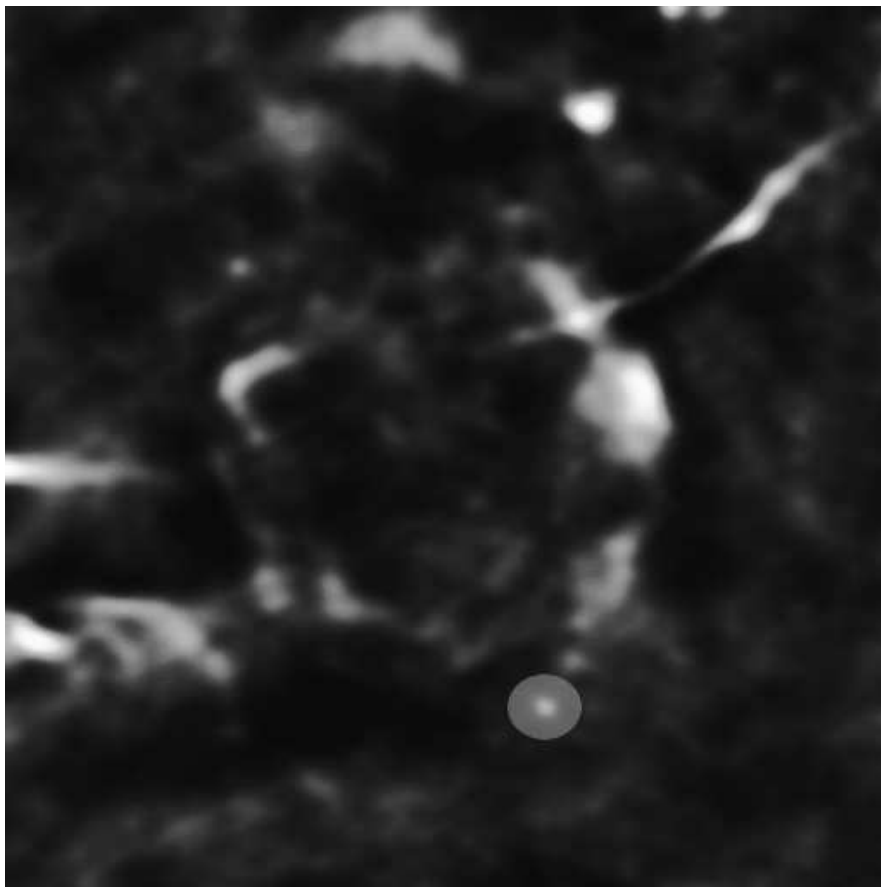


Figure 7.7: Een kaart van de supernovarest G 359.1-0.5, een graad ten zuiden van het centrum van onze Melkweg. Deze kaart is gemaakt van de data van de waarneming, op 30 september/1 oktober 2002 met de Very Large Array bij 90 cm golflengte, waarmee de veranderlijke bron GCRT J1745-3009 ontdekt is. In deze kaart is GCRT J 1745-3009, net ten zuidwesten van de supernovarest (het oosten is links). Hij staat in het midden van het heldere schijfje dat ik heb aangebracht om de positie aan te geven.