



Searching for Pulsars with LOFAR

T. Coenen

NEDERLANDSE SAMENVATTING

DE ONTDEKKING VAN RADIO PULSARS: ROTERENDE NEUTRONENSTERREN

RADIO pulsars, het onderwerp van dit proefschrift, zijn in 1967 ontdekt door Jocelyn Bell Burnell. Zij deed op dat moment promotie onderzoek naar zogenaamde interplanetaire scintillatie (IPS) en maakte daarbij gebruik van een, voor die tijd, grote radio telescoop, de Cambridge IPS array. Tijdens het inspecteren van de gemeten signalen kwam ze herhaaldelijk signalen tegen die op storing leken. Toen één van deze signalen echter steeds op dezelfde plek aan de hemel werd waargenomen, en nadat storing door radiosignalen van mensen of zelfs van buitenaardse intelligentie waren uitgesloten, bleek het om een nieuw type astronomische objecten te gaan. Het heel stabiel pulserende radiosignaal dat werd ontvangen, een “radio pulsar”, kon uiteindelijk alleen verklaard worden door de rotatie van een compact hemellichaam dat als een soort vuurtoren radio signalen uitzond. Radio pulsars bleken een niet eerder waargenomen type compact hemellichaam te zijn, de zogenaamde *neutronensterren*.

Neutronensterren zijn de restanten van tamelijk zware sterren van tussen de 8 en de 25 zonsmassa's, gemeten aan het begin van hun leven als ster. Deze sterren fuseren relatief snel door hun brandstofvoorraad heen en eindigen hun leven in een spectaculaire ontploffing, waarbij een neutronenster gevormd wordt. Deze ontploffing, een zogenaamde supernova⁷, begint wanneer de sterkern uitgebrand is en deze zijn eigen zwaartekracht niet langer kan weerstaan. De kern implodeert tot een neutronenster

⁷Hoewel er verschillende typen supernova's zijn, beperk ik me hier tot het type dat betrokken is bij de vorming van een neutronenster.

en de buitenlagen van de ster worden de ruimte ingeschoten. Omdat sterren altijd een zekere mate van rotatie hebben, zal ook de neutronenster roteren; in meer natuurkundige termen is het impulsmoment een behouden grootte. Omdat de neutronenster tijdens zijn vorming krimpt moet hij sneller gaan draaien om het impulsmoment te behouden. Dit wordt versterkt door de asymmetrische supernova, en soms door materiaal dat in een spiraal op de neutronster valt. Er zijn neutronensterren waargenomen die tot wel 716 keer per seconde roteren. Deze snelle rotatie en het immense magnetisch veld zorgen ervoor dat bij de magnetische polen van de neutronenster geladen deeltjes worden versneld (net als bij deeltjesversnellers in laboratoria als CERN, maar dan tot veel hogere energie). Die deeltjes zenden dan samen een felle smalle bundel radiostraling uit, van boven de magnetische pool. Als die bundel over de Aarde zwiept, enkele honderden lichtjaren verderop, nemen we een radio flits waar. Het draaien van de neutronster veroorzaakt dan een zeer regelmatige serie van dat soort flitsen, die miljoenen jaren aanhoudt: een radio pulsar.

Kort na de ontdekking van het neutron door Chadwick in 1932, werd al gedacht dat supernovae neutronensterren konden vormen. In een neutronenster is de onderlinge afstoting tussen neutronen de laatste horde voordat de zwaartekracht de ster volledig doet instorten tot een *zwart gat*. Neutronensterren zijn exotische hemellichamen waar omstandigheden heersen die niet op Aarde nagebootst kunnen worden: dat maakt ze dus uiterst interessant als natuurkundig laboratorium. Zo wordt de typische massa van een neutronenster geschat op 1.4 maal de massa van de zon, terwijl de straal slechts ongeveer 10 kilometer is! Eén van de vragen die spelen in het huidig onderzoek aan neutronensterren is dan ook: hoe zwaar en compact kan een neutronenster worden voordat hij instort onder zijn eigen zwaartekracht? Het antwoord hangt direct af van de eigenschappen van deeltjes kleiner dan een atoom. Maar hoe meten we de eigenschappen van een ster op vele lichtjaren van ons verwijderd? Het feit dat een radio pulsar een zeer grote massa heeft, helpt daarbij: net als bij een vliegwiel betekent dit dat rotatie zeer stabiel is. Het is daardoor mogelijk de aankomst van de volgende puls met grote precisie te voorspellen, en dus om iedere afwijking daarvan extreem nauwkeurig te meten. De rotatiesnelheid van een pulsar neemt in de loop van de tijd af omdat hij via zijn meedraaiend magnetisch veld energie uitstraalt (door deze vertraging te meten is er zowel een schatting voor de sterkte van het magnetisch veld als een schatting voor de leeftijd van de pulsar te maken). Plotselinge veranderingen in de rotatiesnelheid van een pulsar (zogenaamde glitches) geven informatie over het inwendige van een pulsar. Voor pulsars in dubbelstersystemen wordt de aankomsttijd van de puls beïnvloed door de aanwezigheid van een andere ster. Deze laatste afwijkingen kunnen worden gebruikt om de begeleider te wegen en onze ideeën over zwaartekracht zeer nauwkeurig te testen (vooral in het enige dubbelstersysteem dat twee pulsars bevat).

PULSARS ROND DWERGSTERREN

IN Hoofdstuk 2 beschrijven wij een zoektocht naar radio pulsars in een baan rond zogenaamde sdB (subdwarf-B) sterren. Deze dwergsterren, met een typisch gewicht van ongeveer een halve zonsmassa, ontleen hun naam aan het feit dat hun spectrum lijkt op dat van zogenaamde B sterren (grote, zware sterren). Uit optische waarnemingen blijkt dat een groot deel van deze sdB sterren zich in een dubbelstersysteem bevinden. Omdat de massa's van de sdB sterren bekend zijn, en hun baansnelheid te meten is aan de hand van hun spectrum, kan een indirecte meting verricht worden aan het gewicht van hun begeleider. In veel gevallen kunnen die begeleiders ook direct worden waargenomen. Er zijn echter gevallen waar dat niet kan, omdat de sdB ster veel meer licht geeft dan zijn begeleider. Er zijn een aantal soorten begeleiders waarvoor dat geldt: planeten, kleine lichte sterren en zogenaamde compacte objecten. Compacte objecten in deze context zijn witte dwergen (de uitgebrande en langzaam afkoelende restanten van zonachtige sterren), neutronensterren en zwarte gaten. Er zijn meerdere sdB sterren bekend met witte dwergen als begeleiders, één met een zwart gat maar nog geen enkele met een neutronenster. De ontdekking van een neutronenster als begeleider van een sdB zou meer informatie verschaffen over de levensloop van een sdB dubbelstersysteem.

Uit optische waarnemingen was gebleken dat er bij vier sdB sterren een compact object aanwezig was met een massa die vergelijkbaar was met de typische neutronenster massa; maar er kon niet direct bewezen worden dat er ook werkelijk een neutronenster aanwezig was in deze systemen. De detectie van een radio pulsar in een systeem zou direct bewijzen dat sdB sterren kunnen vormen rond neutronensterren. Met de Green Bank Telescope (GBT), een grote radio telescoop in de VS met een schotel van 100 meter, en de grootste volledig stuurbare telescoop ter wereld, hebben we de vier sdB dubbelstersystemen waargenomen waar de aanwezigheid van een neutronenster vermoed werd. Deze waarnemingen heb ik doorzocht op pulserende radio signalen. Ondanks de gevoeligheid van onze waarnemingen hebben wij geen pulserend radio signaal gevonden: met deze non-detectie hebben wij een bovengrens kunnen stellen aan de maximale helderheid van zo'n signaal. Die grens ligt zo laag dat, als er toch neutronensterren aanwezig zijn in de door ons waargenomen dubbelstersystemen, ze ofwel zeer zwakke radio pulsars zijn of radiostraling uitzenden in een andere richting dan die van de aarde.

PULSARS MET LOFAR

IN de afgelopen tien jaar is er in Nederland een grote radio telescoop gebouwd. Deze telescoop, de Low Frequency Array (LOFAR), ontleent zijn naam aan de lage radio frequenties waarvoor hij gevoelig is. LOFAR waarnemingen vinden plaats in twee frequentie banden: 10-90 MHz en 110-240 MHz. LOFAR bestaat uit een netwerk van relatief eenvoudige, zogenaamde *dipool* antennes, en niet uit één of meerdere *schotel* antennes zoals bijvoorbeeld de Dwingelloo telescoop, de Westerbork Radio Synthese Telescoop en de bovengenoemde GBT. De signalen van alle LOFAR antennes worden gedigitaliseerd en naar een centrale computer verstuurd via een zeer snel glasvezelnetwerk. Deze centrale computer, op het moment een zogenaamde IBM Blue Gene/P supercomputer, combineert alle dipoolsignalen, zodat LOFAR werkt als één grote radio telescoop. Omdat de meeste signaalbewerkingen in software gebeuren is LOFAR heel flexibel – LOFAR wordt ook wel de eerste *software* telescoop genoemd.

Omdat LOFAR zowel erg gevoelig als erg flexibel is, zijn er verschillende typen radio astronomisch onderzoek mee mogelijk. Aangezien dit proefschrift gaat over radio waarnemingen aan radio pulsars, beperk ik me hier tot een beschrijving van de mogelijkheden van LOFAR voor radio pulsar waarnemingen. Eén van de onderzoeksgroepen die deel uitmaken van de LOFAR samenwerking is het Transients Key-science Project (TKP). Deze onderzoeksgroep houdt zich bezig met alle radio bronnen die variabel of van tijdelijke aard zijn. Pulsars zijn variabele radio bronnen, zowel door hun pulserend signaal, als door het feit dat ze in helderheid variëren en soms zelfs tijdelijk, of voor langere tijd, uitgaan. Binnen de TKP is er een groep die zich specialiseert in radio pulsars, de zogenaamde Pulsar Working Group (PWG). Pulsar onderzoek met LOFAR kan het nog niet goed bekende gedrag van pulsars op lage radio frequenties onderzoeken, en mogelijk alle nabije, lichtzwakke pulsars ontdekken. Samen met de overige PWG onderzoekers heb ik de eerste pulsar zoektochten uitgevoerd met LOFAR.

Pulsars worden ontdekt op twee manieren, in gerichte waarnemingen van systemen waar hun aanwezigheid waarschijnlijk is, of in blinde waarnemingen van de hemel. De eerdergenoemde zoektocht naar pulsar signalen uit sdB dubbelstersystemen is een voorbeeld van een gerichte aanpak. Wanneer er geen voorkennis van de aanwezigheid van pulsars wordt gebruikt, spreekt men van een blinde waarneming. In de zogenaamde *commissioning* periode van LOFAR, de periode waarin LOFAR werd gebouwd en

uitgetest, heb ik gewerkt aan de eerste, blinde, test zoektochten naar nieuwe pulsars met LOFAR. Terwijl de telescoop steeds meer mogelijkheden kreeg en beter werd gecalibreerd, hebben wij twee keer een groot aantal blinde waarnemingen gedaan en de data daarvan doorzocht op pulsar signalen. Wij hebben deze twee zoektochten ondernomen om de twee verschillende manieren van *beam-forming* (een proces dat ik hieronder beschrijf) voor LOFAR te testen.

Voor een enkele radio telescoop die een schotel antenne gebruikt, ligt het blikveld vast door de vorm van de antenne, de ontvanger en de waarneemfrequentie. Het blikveld van een radio telescoop wordt ook wel de *primary beam* van de telescoop genoemd. Als de telescoop een bepaald object aan de hemel moet waarnemen, dan wordt de hele telescoop zo gedraaid dat het object in de primary beam van de telescoop valt. Voor LOFAR is dat niet mogelijk omdat LOFAR geen bewegende onderdelen bevat. De individuele LOFAR antennes zien *altijd* de hele hemel, maar door de gemeten signalen te bewerken, wordt het mogelijk een beperkt deel van de hemel met grote gevoeligheid waar te nemen. Dit blikveld, de *beam*, van LOFAR wordt achteraf en grotendeels in software gemaakt. Omdat de centrale computer van LOFAR krachtig is en omdat de gedigitaliseerde antenne data eenvoudig gekopieerd kan worden, is het zelfs mogelijk om meerdere blikvelden tegelijk te maken (en zodoende dus meerdere plekken aan de hemel tegelijk waar te nemen). Voor pulsar waarnemingen zijn er twee manieren om deze beams te maken, door zogenaamde *incoherent beam-forming* of door zogenaamde *coherent beam-forming*. Welke modus gebruikt wordt hangt af van het doel van de waarneming. Bij incoherent beam-forming wordt er een groot blikveld gevormd, maar niet de hele gevoeligheid van LOFAR gebruikt. Bij coherent beam-forming daarentegen, wordt de volle gevoeligheid van LOFAR bereikt, maar is het blikveld een stuk kleiner.

PULSAR ZOEKTOCHTEN MET LOFAR

DE eerste, grote blinde zoektocht naar pulsars met LOFAR is de zogenaamde LOFAR Pilot Pulsar Survey (LPPS). Het doel van LPPS was het om de *incoherent beam-forming* van LOFAR te testen. Tijdens iedere LPPS waarneming werden tegelijkertijd zeven grote blikvelden waargenomen. Omdat deze blikvelden zo groot waren, kon een groot deel van de noordelijke hemel waargenomen worden zonder al te veel waarneemtijd te gebruiken. Het doorzoeken van de LPPS data heeft geleid tot de herdetectie van 65 eerder bekende radio pulsars. Eén van die pulsars was slechts enkele

maanden eerder ontdekt in een andere gevoelige pulsar zoektocht (de zogenaamde Greenbank Northern Celestial Cap survey van de bovengenoemde GBT), iets waarmee LPPS al direct heeft aangetoond dat een *software* telescoop als LOFAR geschikt is om pulsar zoektochten mee uit te voeren. Verder hebben we, omdat LPPS een groot deel van de hemel waargenomen heeft, ook een bovenlimiet kunnen stellen aan de hoeveelheid korte, heldere radioflitsen die waarneembaar zijn op lage radio frequenties. Zulke felle flitsen, die van ver buiten onze Melkweg lijken te komen, zijn namelijk onlangs op hoger radiofrequenties ontdekt. Hun oorsprong is nog volledig onbekend en is één van de grote raadsels van de radio astronomie. LPPS wordt uitgebreid gepresenteerd in Hoofdstuk 3.

In Hoofdstuk 4 vervolg ik met de tweede blinde pulsar zoektocht met LOFAR. Deze opvolger van LPPS heet de LOFAR Tied-Array Survey (LOTAS). Tijdens deze zoektocht hebben we de “tied-array”, ofwel *coherent beam-forming* uitgetest. Gedurende iedere waarneming werden negentien beams gevormd die tezamen minder hemel oppervlak waarnamen dan de zeven gelijktijdige beams van LPPS, maar wel veel gevoeliger waren. In de LOTAS data hebben we 27 bekende pulsars waargenomen, waarvan er vier zeer recente ontdekkingen waren. Ook ontdekten we, door de grotere gevoeligheid van LOTAS, een aantal nieuwe pulsars. Deze twee nog niet bekende pulsars, die PSR J0140+5621 en PSR J0613+3731 heten, en zoals gebruikelijk zijn vernoemd naar hun positie aan de hemel, zijn de eerste pulsar ontdekkingen met LOFAR. Voor deze pulsars hebben wij vervolgwarnemingen ondernomen om de positie beter te bepalen. Bij dit type waarnemingen worden er een groot aantal (217) beams gevormd rond de voorlopige positie die uit de ontdekkingswaarneming bepaald werd. LOFAR is de enige telescoop ter wereld die dit soort directe lokalisatie in één keer kan produceren. Van pulsar PSR J0140+5621 werd op deze manier zeer snel de exacte positie bepaald, bij PSR J0613+3731 waren er een aantal waarnemingen nodig (maar nog steeds minder dan een andere telescoop nodig zou hebben). Om meer eigenschappen van de twee ontdekte pulsars te bepalen hebben we voor beide pulsars zogenaamde pulsar timing waarnemingen gedaan. Door herhaaldelijk de exacte aankomsttijd van de puls te bepalen, kunnen de rotatie periode en de verandering daarvan zeer precies vastgelegd worden. Aan de hand daarvan kunnen we vervolgens de leeftijd en de sterkte van het magneetveld van de pulsar schatten. Eén van de ontdekte pulsars, PSR J0140+5621, heeft een relatief sterk magneetveld van $10^{13.09}$ Gauss, ofwel 24.600.000.000.000 keer sterker dan het magneetveld van de Aarde.

De meeste pulsars kunnen alleen gevonden worden door naar hun periodieke signaal te zoeken. Periodiek betekend hier het zeer stabiel en regelmatig terugkomende ritme van de pulsaties, door de gehele waarneemperiode heen. Andere pulsars kunnen ook

gevonden worden door naar *individuele* heldere pulses te zoeken. De laatste 10 jaar is gebleken dat een bepaalde klasse neutronensterren, de zogenaamde Rotating Radio Transients (RRATs), zelfs *alleen* op deze laatste manier gevonden kunnen worden. Verder is de ontdekking van de eerder genoemde felle korte radio flitsen van buiten onze Melkweg ook gedaan tijdens een zoektocht naar pulsar signalen. Voor zowel LPPS als LOTAS hebben wij gezocht naar periodieke signalen en losse heldere pulsen. Ik heb getracht het proces waarmee interessante losse pulsen in de data gevonden worden, verder te automatiseren. In Hoofdstuk 5 beschrijf ik een uitbreiding op de bestaande procedure, die kan helpen met de selectie van interessante signalen.

DE LOFAR NON-DETECTIE VAN GEMINGA

GEMINGA is een beroemde pulsar die voor het eerst waargenomen werd in gamma straling. Begin jaren zeventig werd de Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2) gelanceerd die waarnemingen deed in gamma straling, een soort straling die een nog hogere energie heeft dan röntgen straling. Door de beperkte gevoeligheid en resolutie van SAS-2 werden er maar enkele bronnen waargenomen, namelijk twee eerder bekende supernova resten met radio pulsars (de Krab en Vela) en een ongeïdentificeerde heldere bron die we nu kennen als Geminga. De COS-B satelliet die in de late jaren zeventig en vroege jaren tachtig actief was, nam 25 bronnen van gamma straling waar, maar de identificatie van meerderheid van die bronnen bleef moeilijk. Voor Geminga, die ook door COS-B werd waargenomen, bleef het onzeker om welk type hemellichaam het ging. Een probleem bij de identificatie was het feit dat de positie van Geminga niet heel precies gemeten kon worden aan de hand van gamma straling. De ontdekking van een mogelijke röntgen tegenhanger van Geminga en de daaropvolgende ontdekking van een mogelijke optische tegenhanger deed vermoeden dat Geminga een neutronenster is. In 1992 werden pulsaties in zachte röntgen straling (dat wil zeggen röntgen straling met lage energie per lichtdeeltje) ontdekt die vervolgens ook nog eens zichtbaar bleken te zijn in de oude data van SAS-2 en COS-B. Deze ontdekking betekende dat Geminga echt een pulsar (en dus een neutronenster) is. Of Geminga ook waarneembaar zou zijn met een radio telescoop bleef de vraag, zeker omdat eerdere radio waarnemingen niet tot detecties geleid hadden. In 1997 publiceerde Russische astronomen radio waarnemingen van Geminga. Voor deze waarnemingen hadden zij gebruik gemaakt van de Large Phased Array (LPA) en de DKR-1000 telescoop in Pushchino. Beide werken net als LOFAR op lage radio frequenties (de LPA bijvoorbeeld rond 102 MHz).

Geen andere telescoop ter wereld kon de telescopen in Pushchino evenaren in gevoeligheid op die lage radio frequenties. LOFAR is een telescoop die de LPA wel kan evenaren in gevoeligheid en een poging het controversiële Russische resultaat te reproduceren lag voor de hand. Wij hebben daarom, gebruikmakend van de LOFAR *high-band* (in ons geval 110-188 MHz), waarnemingen gedaan aan de bekende positie van Geminga en gezocht naar radio pulsaties. Zulke pulsaties hebben we niet kunnen vinden, terwijl onze waarneming met LOFAR tientallen malen gevoeliger is dan die met de LPA. Hieruit concluderen wij dat de eerdere geclaimde detecties met de LPA waarschijnlijk onterecht waren; al laten we de mogelijkheid open dat Geminga, net als sommige andere pulsars, in de tussentijd als radio pulsar is uitgegaan en daarom niet meer waarneembaar is met LOFAR.

CONCLUSIES

IN dit proefschrift laat ik zien dat LOFAR zeer geschikt is om pulsar zoektochten mee uit te voeren. Dit blijkt uit het feit dat we in staat geweest zijn om met LOFAR in de commissioning periode, een periode waarin problemen met de telescoop verwacht kunnen worden, juist twee nieuwe pulsars te ontdekken.