



*Op zoek naar pulsars en snelle radioflitsen*

L.C. Oostrum

# Nederlandse samenvatting

---

Pulsars (PSR's) en snelle radioflitsen (*Fast Radio Bursts*, FRB's) zijn twee categorieën van kortstondige radiosignalen waarmee we de extremen van het heelal kunnen waarnemen. De focus van dit proefschrift is tweeledig: enerzijds de zoektocht naar en studie van deze radiobronnen, en anderzijds de ontwikkeling van nieuwe, high-tech instrumentatie waarmee in *real-time* naar nieuwe bronnen gezocht kan worden.

In hoofdstuk 2 richten we ons op een zoektocht naar pulsars in dubbelstersystemen. Door het meten en modelleren van de aankomsttijden van de radiosignalen die door een neutronenster in zo'n systeem worden uitgezonden, kunnen de baanparameters zeer nauwkeurig bepaald worden. Deze precisie stelt ons in staat fundamenteel fysisch onderzoek te doen. We hebben ervoor gekozen om zes subdwerg-B (*subdwarf B*, sdB) sterren waar te nemen. Van deze zes sdB sterren wisten we dat ze in een dubbelstersysteem staan, maar waren de begeleidende sterren tot dusver niet gezien.

De keuze viel op sdB sterren omdat deze hun buitenste waterstoflaag verloren zijn, hoogstwaarschijnlijk door interactie met de tot dusver ongeziene begeleider. Indien deze begeleider een neutronenster is, kan de materie die van de sdB op de neutronenster overgedragen is ervoor zorgen dat de neutronenster sneller gaat draaien. Uiteindelijk kan dit ertoe leiden dat de rotatieperiode in de orde van milliseconden eindigt. Dit kan er op zijn beurt weer voor zorgen dat de neutronenster gaat schijnen als millisecondepulsar (MSP).

Op basis van eerder onderzoek was voorspeld dat de massa van de begeleiders van de door ons uitgekozen sdB sterren allemaal binnen het bereik van een neutronenster zou liggen. Deze voorspellingen waren gebaseerd op optische metingen van de radiële- en rotatiesnelheden van de sdB sterren, modellen voor de massa's van de sdB sterren en de aanname dat de rotatie van de sdB en de baanbeweging gesynchroniseerd zijn door getijdewerking. Een neutronenster als begeleider van een sdB ster was nog nooit gezien, maar zou wel bewijs leveren voor de theorie die het ontstaan van sdB sterren in dubbelstersystemen voorspelt.

We hebben de zes sdB sterren waargenomen met de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT) en met de *Green Bank Telescope* (GBT). In de data hebben we gezocht naar zowel periodieke signalen als losse flitsen. We ontdekten een pulsarkandidaat in het veld van sdB ster HE0532–4503. Om te verifiëren dat het pulsarsignaal echt was, hebben we nog een aantal waarnemingen gedaan met de GBT en met de *upgraded Giant Metrewave Radio Telescope* (uGMRT). De pulsar werd gedetecteerd met GBT, maar omdat de waarneembundel van GBT vrij groot is, bleef de positie van de pulsar aan de hemel toch nog onzeker. Doordat

de uGMRT tegelijk interferometrische waarnemingen en hoge-tijdsresolutiewaarnemingen kan doen, hebben we uiteindelijk de pulsar kunnen lokaliseren tot een punt  $20'$  van de positie van de HE0532–4503 sdB ster. Zo'n grote afstand sluit uit dat de gevonden pulsar en sdB ster samen een dubbelstersysteem vormen. Het was dus toeval dat deze twee systemen tegelijk binnen de waarneembundel van GBT vielen.

Het feit dat we geen enkele pulsar in een sdB dubbelstersysteem gevonden hebben, kan verklaard worden door een combinatie van factoren. Ten eerste is er een kans dat sommige systemen wel een pulsar bevatten, maar dat de bundel radiolicht van die pulsar niet over de aarde schijnt. Ten tweede worden misschien niet alle neutronsterren ook echt MSP's, waardoor we ze ook niet als radiopulsar kunnen zien. Tot slot kan het zijn dat de geschatte massa's van de ongeziene begeleiders niet klopt, bijvoorbeeld wanneer daar incorrecte aannames zijn gebruikt. Specifiek suggereren we dat wellicht niet alle sdB sterren die we waargenomen hebben gesynchroniseerd zijn in hun baan. In dat geval kan ook de inclinatie van de baan niet bepaald worden. Wanneer de baaninclinaties willekeurig verdeeld zijn, verwachten we dat meerdere van onze sdB systemen niet een neutronenster als begeleider hebben, maar een witte dwerg. Systemen met een witte dwerg kunnen geen MSP bevatten.

De pulsar die we ontdekt hebben, PSR J0533–4524, zendt zogeheten *Giant Pulses* (GP's) uit. Dit gebeurt ondanks het relatief lage magneetveld aan het oppervlak van  $\sim 2 \times 10^{11}$  G, zoals afgeleid kan worden uit de rotatieperiode van 157 ms en afremsnelheid van  $3 \times 10^{-16}$  s s $^{-1}$ . Deze parameters zijn vergelijkbaar met een andere pulsar die GP's uitzendt: PSR B0950+08. We tonen aan dat de classificatie van GP's gebaseerd op hun helderheid ten opzichte van de normale pulsen fout kan zijn indien de normale pulsen een brede helderheidsverdeling hebben.

In hoofdstuk 3 presenteren we de ontdekking van een FRB met een lage DispersieMaat (DM): FRB 110214. Deze bron werd gezien in meerdere bundels van de multi-bundelontvanger van de Parkes radiotelescoop, wat een accuratere lokalisatie mogelijk maakt dan een detectie in slechts één van de bundels. Hoewel we het sterrenstelsel waar deze FRB vandaan kwam niet met zekerheid kunnen identificeren, laten we zien dat dit wel mogelijk is voor andere FRB's met een lage DM als ze met een interferometer waargenomen worden. We laten verder zien dat voor elke mogelijke locatie de FRB extreem fel geweest moet zijn. Ondanks een significante hoeveelheid waarnemingen hebben we geen herhalingen van FRB 110214 gezien. In de toekomst zouden dergelijke extreem felle FRB's met lage DM's in secundaire bundels van telescopen waargenomen kunnen worden. Dit betekent dat het nauwkeurig modelleren van bundels van multi-bundelinstrumenten zeer belangrijk zal zijn voor aankomende FRB surveys.

De volgende hoofdstukken van dit proefschrift bevatten een uiteenzetting van de ontwikkeling, tests en eerste resultaten van het *Apertif Radio Transient System* (ARTS). ARTS is de hoge-tijdsresolutiebackend van *APERture Tile in Focus* (Apertif), de nieuwe *Phased Array Feed* (PAF) ontvangers van WSRT. Door een combinatie van goede gevoeligheid, een groot beeldveld en hoge tijds- en frequentieresolutie is ARTS een zeer efficiënt instrument voor het ontdekken en lokaliseren van FRB's. Deze eigenschappen zijn ook vereist om te achterhalen wat de bronnen van FRB's zijn, iets wat op dit moment nog niet bekend is.

In hoofdstuk 4 beschrijven we het ontwerpen en testen van ARTS. Twaalf van de WSRT schotels zijn uitgerust met een Apertif ontvanger, elk bestaande uit 121 afzonderlijke elementen. Elke frontend bevat een *beamformer* die deze elementen combineert tot 40 *Compound Beams* (CB's). ARTS bestaat uit twee onderdelen die de CB data verwerken: een backend *beamformer* die de data van de schotels combineert en een *Graphics Processing Unit* (GPU) cluster dat de data in *real-time* doorzoekt op FRB's. De ARTS *beamformer* verwerkt data van de 8 tot 10 schotels van WSRT die op gelijke afstand van elkaar staan. De CB data, in X- en Y-polarisatie, hebben een tijdsresolutie van  $1.28 \mu\text{s}$  en een frequentieresolutie van  $0.78125 \text{ MHz}$  over een bandbreedte van  $300 \text{ MHz}$ , resulterende in een totaal van  $781250$  tijdstappen per seconde en  $384$  frequentiekanalen. De data worden verstuurd als complexe voltages, met  $6$  bits voor zowel het reële als imaginaire deel. De totale doorvoersnelheid is dus:

$$\begin{aligned} & 10 \text{ telescopen} \times 40 \text{ CB's/telescoop} \times 2 \text{ polarisaties/CB} \\ & \quad \times 781250 \text{ tijdstappen/seconde/CB} \times 384 \text{ frequentiekanalen/tijdstap} \\ & \quad \times 12 \text{ bits/datapunt} = 2.9 \text{ Tb/s.} \end{aligned}$$

Zo'n hoge doorvoersnelheid vereist een computersysteem dat veel sneller is dan een typische thuiscomputer. De ARTS *beamformer* werkt daarom op *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGA's). Dit zijn zeer efficiënte chips die in staat zijn om de data snel genoeg te verwerken.

Het doel van de ARTS *beamformer* is om de data van de schotels dusdanig te combineren dat dit niet ten koste gaat van het beeldveld. Dit doen we door alleen de WSRT schotels te gebruiken die op gelijke afstand van elkaar staan. Door de datastromen te kopiëren en een verschillende fase toe te passen op elke kopie, wijst elke gevormde bundel in een iets andere richting. Twaalf van deze *Tied-Array Beams* (TAB's) vullen precies het beeldveld van een CB. In totaal produceert de ARTS *beamformer* dus  $480$  TAB's verspreid over de  $40$  CB's. De uitvoer van de *beamformer* is een Stokes-I (alleen intensiteit) en Stokes-IQUV (intensiteit en polarisatie-informatie) datastroom voor elke TAB met een tijdsresolutie van  $81.92 \mu\text{s}$  en  $1536$  frequentiekanalen. Met  $8$  bits per datapunt is de totale doorvoersnelheid ongeveer  $360 \text{ Gb/s}$ , wat neerkomt op bijna  $4 \text{ PB}$  per dag. Zoveel data kunnen niet voor langere tijd opgeslagen worden. Daarom wordt alles in *real-time* verwerkt.

De TAB data worden naar een computercluster met in totaal  $160$  GPU's gestuurd. Daar worden de Stokes-I data in *real-time* doorzocht op radioflitsen. De TAB's zijn echter niet geschikt om direct te doorzoeken. Een TAB wijst namelijk niet in één richting aan de hemel, maar in meerdere richtingen tegelijk afhankelijk van de precieze waarneemfrequentie. Een signaal dat op alle waarneemfrequenties te zien zou zijn, wordt daardoor verspreid over meerdere TAB's en lijkt vervolgens maar een smalle bandbreedte te hebben in één TAB. Dit verlaagt de signaal-ruisverhouding (Signal-to-Noise ratio,  $S/N$ ) van de radioflits als de TAB data direct doorzocht worden. Om dit effect te vermijden, worden de TAB's van een enkele CB opnieuw geordend tot  $71$  *Synthesised Beams* (SB's). Elke SB is gevoelig over de hele bandbreedte en heeft een hoofdbundel die in één richting wijst, met een resolutie van  $\sim 30' \times 30''$ . In totaal zijn er dus  $40 \times 71 = 2840$  SB's die doorzocht moeten worden.

De GPU's proberen meerdere duizenden DM's uit bij het zoeken naar de radioflitsen. Tijdens de dedispersie worden de TAB's omgezet in SB's. De GPU-software produceert een lijst met

mogelijke radioflitsen en hun parameters, zoals S/N en DM. Andere software verwerkt deze metadata verder en besluit of de Stokes-IQUV data van de flits opgeslagen moeten worden. Als er geen goede kandidaten zijn, worden de Stokes-IQUV data direct verwijderd. Na afloop van iedere waarneming worden alle kandidaten door een *machine learning* classificatiesysteem beoordeeld. Van elke kandidaat wordt de kans bepaald dat het om een echt astrofysisch signaal gaat. Uiteindelijk worden alle kandidaten die een kans hebben groter dan een vooraf ingestelde grens gevisualiseerd en naar de astronomen gemaïld ter inspectie.

De werking van ARTS is geverifieerd met reeds bekende pulsars, die regelmatig blind gedetecteerd worden. Met behulp van een kalibratiebron die door de bundels beweegt is de gevoeligheid van het systeem gemeten. De gemeten gevoeligheid valt binnen de verwachte waarden. Daarnaast is bewezen dat ARTS gevoelig is voor FRB-achtige signalen, namelijk perytons. Perytons zijn gedispergeerde signalen die uitgezonden worden door magnetrons wanneer de deur van de magnetron geopend wordt terwijl het apparaat nog in werking is. We hebben twee magnetrons gebruikt om perytons uit te zenden bij WSRT, die ook in *real-time* gedetecteerd werden door de software. Daarnaast hebben we onderzocht wat de invloed van Radio Frequency Interference (RFI) is op ARTS data. De radiozendmast van Smilde blijkt een significante bron van storing te zijn. In totaal is slechts  $<10\%$  van de data beïnvloed door RFI. Bijeen genomen laten deze resultaten zien dat het systeem opereert zoals gepland en klaar is voor wetenschappelijke waarnemingen met de verwachte gevoeligheid.

Tijdens het testen van ARTS hebben we een enkele honderden uren waarnemingsduur gebruikt om FRB 121102 (R1) en FRB 180814.J0422+73 (R2) waar te nemen. Op dat moment waren dat de enige twee FRB's waarvan bekend was dat ze zich herhalen. Dit onderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 5. Ons doel was om te karakteriseren hoe beide bronnen zich herhalen en om de lokalisatie van R2 te verbeteren. We hebben 30 flitsen van R1 gedetecteerd. Van de flitsen van R1 is bekend dat de intervallen tussen flitsen niet consistent zijn met Poissonstatistiek. In plaats daarvan gebruiken we een Weibullverdeling om de aankomsttijden van de flitsen te karakteriseren. De Weibullverdeling heeft twee parameters: het gemiddeld aantal flitsen per tijdsinterval ( $r$ ) en in hoeverre de flitsen geclusterd zijn ( $k$ ). We vonden dat  $r = 6.9_{-1.5}^{+1.9}$  flitsen dag<sup>-1</sup>, wat consistent is met eerdere resultaten. Verder bleek dat  $k = 0.49 \pm 0.05$ , dit is inderdaad inconsistent met Poissonstatistiek ( $k = 1$ ). Door de complexe frequentie-tijd structuur in de flitsen was de standaardmethode voor het bepalen van de DM via het maximaliseren van de S/N niet betrouwbaar genoeg. In plaats daarvan gebruikten we een methode die de DM bepaalt door structuur van een flits te maximaliseren. Deze methode kon worden toegepast op enkele van de waargenomen flitsen. Hieruit leidden we af dat de DM van R1 is toegenomen, met ongeveer  $3 \text{ pc cm}^{-3}$  over de afgelopen twee jaar. Dit toont aan dat R1 zich in een zeer variabele omgeving bevindt, aangezien zulke variaties niet verwacht worden vanuit het interstellair noch het intergalactisch medium. Hoewel de flitsen van R1 een hoge RotatieMaat (RM) hebben op 4500 MHz, zagen we dit niet terug op 1400 MHz met Apertif. Dit suggereert een extra intrinsiek of extrinsiek depolariserend effect dat plaatsvindt op 1400 MHz.

R2 bleef onzichtbaar ondanks  $\sim 300$  uur aan waarnemingen. Dit heeft een aantal mogelijke oorzaken. Ten eerste was deze bron origineel ontdekt op 400–800 MHz. R2 zou een steil

spectrum kunnen hebben, waardoor de flitsen niet fel genoeg zijn op 1400 MHz om met Apertif waar te kunnen nemen. Ten tweede zouden de flitsen extreem geclusterd kunnen zijn, veel meer dan die van R1. Tot slot is het mogelijk dat R2 tijdelijk of permanent uit gegaan is.

In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift, hoofdstuk 6, presenteren we de eerste resultaten van de ARTS FRB survey, de *Apertif-LOFAR Exploration of the Radio Transient sky* (ALERT). ALERT is in juli 2019 begonnen en heeft sindsdien negen nieuwe FRB's ontdekt. De meeste van deze FRB's werden gedetecteerd over de volledige 300 MHz bandbreedte, maar twee bleken over slechts 100 MHz zichtbaar. Om de FRB's te lokaliseren, hebben we een telescoop-model ontwikkeld dat het hiërarchische *beamforming*-model zoals gebruikt in ARTS simuleert. Op een raster van rechte klimming- en declinatiepunten modelleerden we de relatieve S/N van elke FRB voor alle SB's. Dit model hebben we vervolgens vergeleken met de gemeten S/N in de verschillende SB's. Het lokalisatiegebied van de FRB's werd daarna bepaald met een  $\chi^2$  methode. Aangezien de WSRT schotels op één lijn staan, zijn deze gebieden meestal langwerpige. De typische grootte van de lokalisatiegebieden is 0.4–10 vierkante boogminuut.

Voor een aantal FRB's heeft het systeem de Stokes-IQUV data opgeslagen, wat ons in staat stelde de polarisatie-eigenschappen van de FRB's te onderzoeken. Eén van de FRB's, FRB 191108, bleek een RM te hebben van  $474 \pm 3 \text{ rad m}^{-2}$ , wat veel hoger is dan de verwachte bijdrage van het gas in de Melkweg. Daarnaast werd de FRB gelokaliseerd tot een gebied  $\sim 1.2^\circ$  van M33, een sterrenstelsel uit de Lokale Groep, wat betekent dat het licht door de halo's van zowel M33 als M31 gereisd is. We laten zien dat het gedeelde plasma tussen M31 en M33 waarschijnlijk bijgedragen heeft aan de DM van deze FRB, maar niet aan de verstrooiing, scintillatie of Faradayrotatie. De meest plausibele locatie van het gemagnetiseerde plasma is vlakbij de bron van de FRB. Vroege resultaten laten zien dat een andere FRB, FRB 200216, een RM heeft van  $\sim -1988 \text{ rad m}^{-2}$ , wat de hoogste waarde ooit gemeten zou zijn in een niet-herhalende FRB. Dit zou het gat kunnen overbruggen tussen de relatief lage RM's van niet-herhalende FRB's en de extreem hoge RM ( $10^4\text{--}10^5 \text{ rad m}^{-2}$ ) van de eerst ontdekte herhalende FRB: FRB 121102.

Aan de hand van modellen voor de dichtheid van dwergsterrenstelsels en massieve sterrenstelsels laten we zien dat de lokalisatiegebieden van de ALERT FRB's te groot zijn om de sterrenstelsels waar de flitsen vandaan komen te identificeren, tenzij één van de FRB's in de toekomst herhaalt. Apertif kan ook radiokaarten van een groot deel van de hemel maken. Er zijn minder radiopuntbronnen dan sterrenstelsels, waaruit we afleiden dat we niet verwachten deze bij toeval te vinden binnen de lokalisatiegebieden in de radiokaarten. Dit betekent dat Apertif in staat is om radiobronnen te identificeren die potentieel geassocieerd zijn met de ALERT FRB's.

ALERT ontdekt tot dusver gemiddeld elke vijf waarneemdagen een nieuwe FRB. In de nabije toekomst zal dus een aanzienlijk aantal FRB's gevonden worden. Dit markeert het begin van een nieuwe fase, waarin een steeds groter aantal flitsen gebruikt kan worden om ons heelal mee te onderzoeken en tevens te achterhalen wat de aard van de mysterieuze *Fast Radio Bursts* is.