



**UvA-DARE (Digital Academic Repository)**

**High precision radio pulsar timing**

Janssen, G.H.

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Janssen, G. H. (2009). High precision radio pulsar timing

**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: <http://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

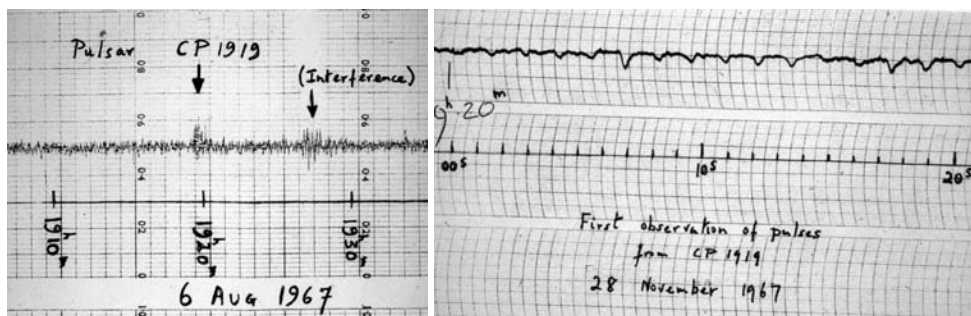
## Samenvatting

---

### 7.1 Radio pulsars

#### 7.1.1 De ontdekking van radio pulsars

In juli 1967 werd de eerste radio pulsar bij toeval ontdekt door promovenda Jocelyn Bell uit Cambridge, en haar begeleider Antony Hewish. Voor haar promotieonderzoek deed ze onderzoek naar quasars, ver weg gelegen melkwegstelsels in het heelal. Speciaal voor dit onderzoek was er een grote nieuwe radiotelescoop gebouwd, waarmee ze elke vier dagen het zichtbare gedeelte van de hemel observeerden om de hoekdiameter van de quasars te meten. De waarnemingen werden gedaan met een schrijver waar papier onderdoor werd geleid. Na ongeveer een maand viel het Jocelyn Bell op dat er af en toe een paar minuten een kleine storing te zien was. Na terugzoeken van de waarnemingen bleek dat deze storing gelijk liep met de positie van de sterrenhemel, en dat het dus geen interferentie van een aardse bron kon zijn. Fig. 7.1 laat het signaal zien. Door de snelheid van het papier onder de schrijver op te voeren konden ze de echte vorm van het signaal zien: het bleken korte pulsen te zijn die elkaar zeer regelmatig opvolgden. Het was meteen duidelijk dat dit een hele belangrijke ontdekking was: misschien waren het wel buitenaardse wezens die in contact met de aarde probeerden te komen. Maar al snel konden ze laten zien dat deze “kleine groene mannetjes” zich niet op een planeet bevonden die om een ster zou draaien, er was namelijk geen Doppler effect te vinden in het signaal. En toen in december 1967 de tweede bron werd gevonden op



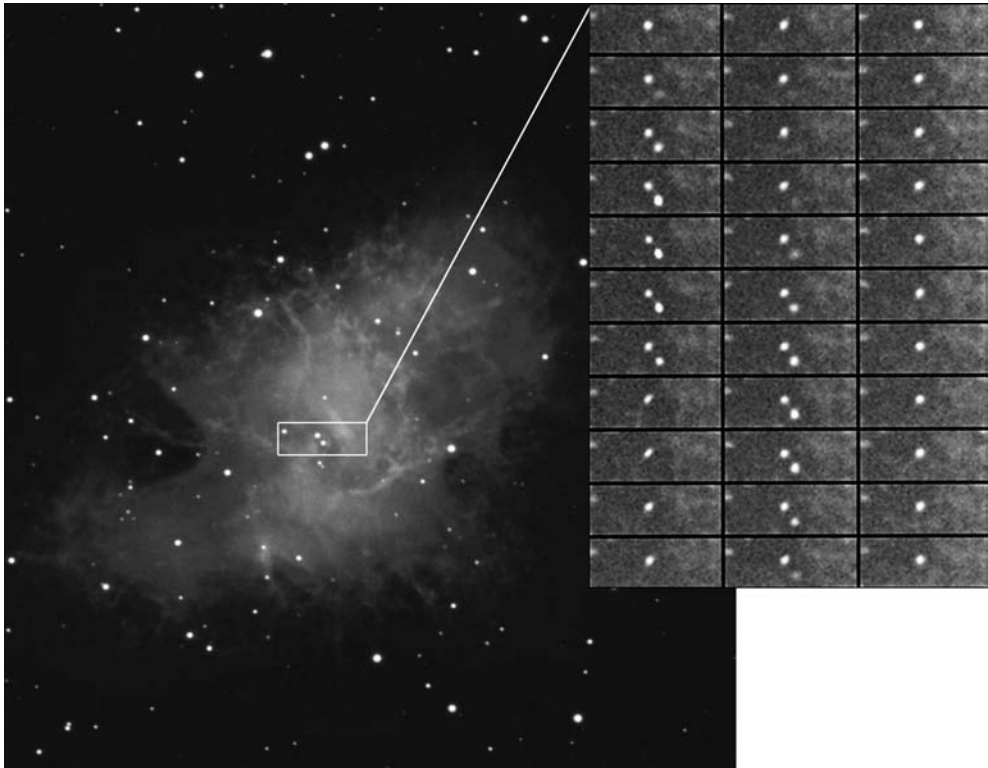
**Figuur 7.1:** De ontdekking van de eerste radio pulsar. Links is de originele detectie te zien, waarbij het papier te langzaam onder de schrijver door ging en het signaal op storing leek. Rechts een waarneming waarbij de papersnelheid was opgevoerd. Elke 1.3 seconde is nu een afzonderlijke puls te zien.

een hele andere positie aan de hemel was het duidelijk dat ze geen buitenaards leven, maar een nieuw soort ster gevonden hadden.

Het was moeilijk om een goede verklaring te vinden voor wat deze nieuwe sterren waren. De periode van het signaal was maar 1.3 seconde, wat betekent dat object heel klein moest zijn. Ruim 30 jaar eerder was het bestaan van een speciaal soort sterren al voorspeld: neutronensterren (Baade & Zwicky 1934a,b). Dit zouden de overblijfselen zijn van zware sterren die aan het eind van hun leven waren ontploft als een supernova. Dit bleek uiteindelijk de enige mogelijke verklaring te zijn voor de waargenomen radiobronnen. De naam werd verzonnen door een journalist: Pulsating Source of Radio - Pulsar.

## 7.1.2 Neutronensterren

Sterren worden gevormd uit een grote gaswolk, die onder zijn eigen zwaartekracht ineens stort. In de kern van de gaswolk wordt het gas samengedrukt en hierbij nemen de dichtheid, temperatuur en druk toe, net zolang totdat de eigenschappen zover zijn toegenomen dat er kernfusie kan plaatsvinden. Het meeste gas is waterstof, en dit wordt bij de kernfusie omgezet in helium. Hierbij komt energie vrij en dat is de straling die we van sterren waarnemen. De straling levert druk die voorkomt dat de ster verder instort. Afhankelijk van de hoeveelheid gas die in de wolk aanwezig was toen de ster gevormd werd, worden er in de kern van de ster verschillende fases van kernfusie doorlopen. Hoe zwaarder de ster was toen hij werd gevormd, hoe meer fases er bereikt kunnen worden, en hierbij worden steeds zwaardere elementen gevormd. Het zwaarste element dat voor kan komen is ijzer, aangezien het vormen van nog zwaardere elementen geen energie meer oplevert. Als een ster deze fase heeft bereikt wordt er geen energie meer gevormd in de kern, en is er ook geen stralingsdruk meer die de zwaartekracht van de omringende lagen van de ster in evenwicht houdt. Het gevolg is dat de ster in elkaar stort. Dit gaat samen met een enorme explosie: een supernova (Fig. 7.2). De ster is dan korte tijd net zo helder als alle sterren in een melkwegstelsel bij elkaar. De buitenlagen van de ster worden bij de supernova explosie het heelal in geslingerd, en het enige



**Figuur 7.2:** Een optische waarneming van de Krabnevel in het sterrenbeeld Stier. Links is het restant van de supernova explosie te zien waarbij de Krab pulsar is gevormd. Rechts een reeks tijdopnamen van de pulsar en een andere ster. Het gepulste signaal van de pulsar is duidelijk te zien.  
Credit: N.A. Sharp/NOAO/AURA/NSF.

wat overblijft is de kern van de oorspronkelijke ster, die in elkaar gestort is tot een kleine bol neutronen van ongeveer 20 km in doorsnee: een neutronenster. De neutronenster is nog steeds ongeveer 1.4 keer zo zwaar als de zon, en heeft een extreme dichtheid, zo groot dat het niet op aarde na te maken is. Sterren die bij hun ontstaan meer dan ongeveer 8 tot 10 keer zo zwaar waren als de zon worden een neutronenster, en sterren die oorspronkelijk nog veel zwaarder waren (vermoedelijk meer dan 25 maal de massa van de zon) storten zelfs helemaal in elkaar tot een zwart gat.

### 7.1.3 Pulsars

Omdat de kern van de ster bij het instorten zo klein is geworden en daarbij zijn impulsmoment heeft behouden, is hij heel snel gaan draaien en daardoor is het al aanwezige magneetveld van de ster extreem toegenomen (dynamo effect). Het resultaat is een kleine, snel roterende mag-

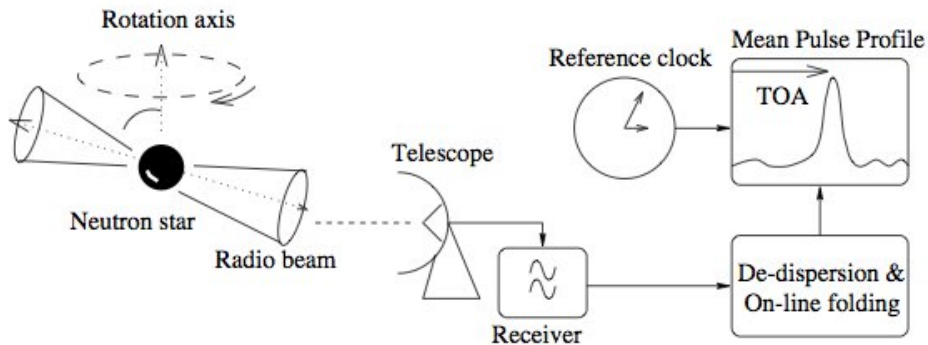
netische bol neutronen. Door de grote magnetische veldsterkte worden er bij de magnetische polen van de neutronenster deeltjes uit het oppervlak vrijgemaakt en versneld langs de magnetische veldlijnen het heelal ingestuurd. Voor de meeste neutronensterren is de magnetische as niet gelijk aan de rotatie as van de ster, en daarom is de bundel radiostraling die wordt gegenereerd te vergelijken met een vuurtoren. Elke keer dat de stralingsbundel over de aarde heen komt, kunnen we een puls meten van radiostraling afkomstig van de ster. De stralingsbundel is vrij klein in hoekdoorsnede, en als deze de aarde mist kunnen we de pulsar niet zien. Doordat pulsars zo klein en compact zijn, draaien ze heel erg stabiel om hun as, vergelijkbaar met een gyroscoop. De pulsen van de ster zijn dan ook met heel grote precisie te meten met de radiotelescopen op aarde.

Er zijn op dit moment ongeveer 1800 pulsars bekend. In Fig. 4.3 is te zien dat de meeste pulsars een rotatieperiode tussen de 0.1 en 5 seconde hebben. Door hun rotatie verliezen de pulsars energie en dat heeft als gevolg dat hun rotatiesnelheid langzaam afneemt. Deze periode-afgeleide is in Fig. 4.3 op de verticale as gezet. Aan de hand van de combinatie van rotatiesnelheid en de vertraging daarvan kunnen we verschillende dingen afleiden over pulsars, zoals hun leeftijd en de sterkte van het magnetisch veld. De pulsars met een vierkantje zijn de pulsars die zich in een supernova restant bevinden. Het figuur laat zien dat die pulsars, zoals verwacht, de jongste pulsars zijn. Linksonder in het figuur is een kleinere groep pulsars te zien met aparte eigenschappen. De rotatieperiode is veel kleiner, en deze pulsars worden daarom milliseconde pulsars genoemd. Ook de vertraging in de periode is heel klein en dit zijn dan ook de meest stabiele pulsars die we kennen.

Pulsars zijn hele interessante studieobjecten. Omdat hun dichtheid en magnetisch veld zo groot zijn, is het gedrag van de materie waar de pulsars uit zijn opgebouwd heel interessant voor de fundamentele natuurkunde. Pulsars kunnen ons leren hoe materie zich gedraagt bij dichtheden die veel groter zijn dan dichtheden in atoomkernen, en bij magneetvelden die miljoenen malen sterker zijn dan dat van de Aarde. Er treedt waarschijnlijk supergeleiding en supervloeibaarheid op, en pulsars zijn de enige objecten in het heelal waarbij het gecombineerde effect hiervan te meten is. De meeste pulsars zijn zichtbaar in radiostraling, maar sommige pulsars, zoals bijvoorbeeld de pulsar in de Krabnevel (Fig. 7.2) zijn ook zichtbaar op andere golflengtes, zoals in optisch licht of in röntgenstraling. Het mechanisme dat de straling van pulsars veroorzaakt is, hoewel we ongeveer begrijpen wat er gebeurt, niet tot in detail begrepen. En omdat de straling op verschillende golflengten waarschijnlijk op een andere manier gemaakt wordt dan de radiostraling, geeft dit andere informatie over de fysische processen die zich afspelen in en rond de ster.

## 7.2 Pulsar Timing

Behalve het bestuderen van de interessante eigenschappen van pulsars, zijn pulsars vanwege hun regelmatige rotatie ook als sterrenkundig instrument te gebruiken. Sommige milliseconde pulsars zijn zelfs zo stabiel, dat ze op tijdschalen langer dan een jaar kunnen worden vergeleken met de beste atoomklokken op aarde. We hebben hiermee de beschikking over een heleboel onafhankelijke klokken in alle richtingen van onze melkweg. Het onderzoek beschreven in dit proefschrift is gebaseerd op het heel nauwkeurig volgen van deze klokken.

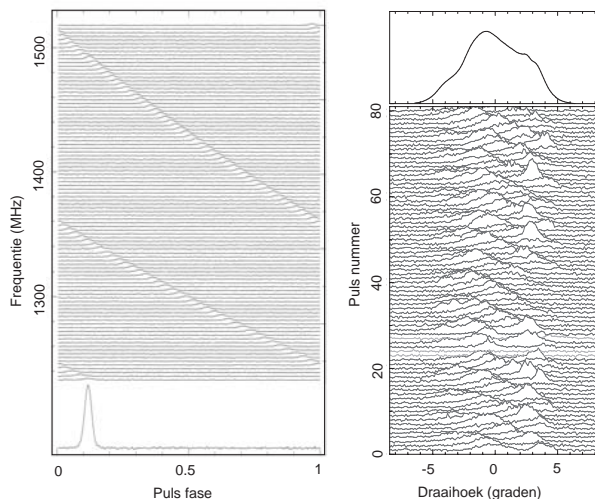


**Figuur 7.3:** Een schematische weergave van een pulsar timing meting.  
 Uit “The Handbook of Pulsar Astronomy” (Lorimer & Kramer 2005).

Hiermee kunnen we afleiden wat er met het signaal is gebeurd, van het moment van uitzenden door de pulsar tot het moment van waarnemen met de radiotelescoop; bijvoorbeeld veranderingen in de rotatiesnelheid van de pulsar, Doppler-effecten als gevolg van de beweging van een pulsar die samen met een andere ster een dubbelstersysteem vormt, of effecten die invloed hebben op het signaal terwijl het onderweg naar de aarde is.

Het meten van de pulsen is een ingewikkeld proces. Fig. 7.3 laat zien wat er met het signaal gebeurt voor het bruikbaar is om er metingen mee te doen. We meten het signaal van pulsars op radiofrequenties, en een radiotelescoop gebruikt altijd een bepaalde bandbreedte om waarnemingen te doen. Dit betekent dat er tegelijkertijd een continue band van frequenties wordt waargenomen, waardoor de telescoop een sterker signaal binnenkrijgt. Het gebruik van een brede band van frequenties heeft ook een nadeel bij het waarnemen van pulsars. Het signaal wordt namelijk beïnvloed door geladen deeltjes in het heelal (het interstellair medium), en dit effect is verschillend voor verschillende waarneemfrequenties. In Fig. 7.4 is te zien wat voor gevolg dit heeft op een pulsar signaal: de afzonderlijke pulsen komen ietsje later aan op lagere frequenties (langere golflengtes). Als we de hele bandbreedte bij elkaar op proberen te tellen zonder hiervoor te corrigeren, wordt de puls uitgesmeerd en is niet meer waarneembaar als een puls. We weten hoe dit effect, dat dispersie (versmering) genoemd wordt, afhankelijk is van frequentie en daarom is er relatief makkelijk voor te corrigeren. Er wordt een correctie toegepast op het signaal wat de telescoop ontvangt zodat de aankomsttijden per frequentie de goede vertraging hebben en de puls over de hele band kan worden opgeteld. Het resultaat is te zien in het onderste gedeelte van Fig. 7.4.

Zoals eerder beschreven is de rotatie van pulsars heel stabiel. Daarentegen zijn de afzonderlijke pulsen steeds verschillend. Al in de allereerste pulsarwaarneming (Fig. 7.1) is te zien dat niet alle pulsen even sterk zijn, en de rechter afbeelding in Fig. 7.4 laat dat duidelijker zien. Toch heeft elke pulsar zijn eigen “vingerafdruk”, die gevormd wordt door het gemiddelde pulsprofiel. Dit pulsprofiel ziet er altijd hetzelfde uit als we ongeveer 100 pulsen of meer bij elkaar optellen.



**Figuur 7.4:** Links: dispersie van een puls. De aankomsttijd van het signaal is vertraagd op langere golflengten (lagere frequenties). Voordat het signaal over de hele waarneembandbreedte kan worden opgeteld moet hiervoor worden gecorrigeerd. Figuur uit “The Handbook of Pulsar Astronomy” (Lorimer & Kramer 2005). Rechts: individuele pulsen van PSR B0818–13. Elke regel bevat een afzonderlijke puls. Bij deze pulsar is te zien dat de afzonderlijke pulsen zijn opgebouwd uit meerdere componenten (sub-pulsen), en dat deze een systematische verschuiving laten zien (drifting). Het totale pulsprofiel, de vingerafdruk van deze pulsar die verkregen wordt door de afzonderlijke pulsen op te tellen, is bovenaan geplot. Figuur uit Janssen & van Leeuwen (2004).

Bij een pulsar timing meting wordt voor een hele waarneming één aankomsttijd van de pulsen in die waarneming berekend. Nadat het signaal is gecorrigeerd voor dispersie worden de afzonderlijke pulsen van een hele waarneming bij elkaar opgeteld. Er wordt een aankomsttijd berekend door het totale pulsprofiel te correleren met een standaardprofiel voor de betreffende pulsar. Deze aankomsttijd wordt dan omgerekend naar een standaardtijd, gewoonlijk via UTC (Universal Coordinated Time) naar TT (Terrestrial Time). Voor elke waarneming die van een pulsar gedaan wordt houden we op deze manier één meetpunt over: de aankomsttijd (Engelse afkorting: TOA - Time of Arrival). Deze TOAs worden dan vergeleken met een model dat de rotatie, en eventuele baanbeweging van de pulsar beschrijft. Aan de hand van het model kunnen we het verschil uitrekenen tussen de gemeten en de verwachte aankomsttijd van de pulsen in de waarneming. Elke afwijking ten opzichte van het model geeft informatie over wat er ontbreekt in het model, en dit wordt daaraan aangepast. Zie Fig. 1.3 voor enkele voorbeelden.

We streven ernaar om de aankomsttijden van de pulsen zo goed mogelijk te voorspellen, en in het optimale geval leidt dat tot een minimaal verschil tussen het model en de waarnemingen.

### 7.3 Dit proefschrift

Elk hoofdstuk van dit proefschrift heeft een apart onderwerp. De combinatie van deze hoofdstukken geeft een goed beeld van wat er allemaal mogelijk is met pulsar timing. Hier volgt een korte omschrijving van de afzonderlijke hoofdstukken.

De meeste pulsars roteren heel stabiel, maar heel soms is er een kleine, plotselinge verandering te zien in de rotatiesnelheid van een pulsar. *Hoofdstuk 2* gaat over deze zogeheten “glitches”. Het is nog grotendeels onbekend waardoor glitches ontstaan. Er is lange tijd gedacht dat het een soort sterbevingen waren waarbij het oppervlak van de neutronenster werd vervormd. Dit kan nog steeds een verklaring zijn voor sommige kleinere glitches, maar voor sommige pulsars die vaak glitchen is deze verklaring niet toereikend. Waarschijnlijk heeft het ontstaan van een glitch te maken met de eigenschappen van het binnenste van de neutronenster. Door het meten van glitches kunnen we dan ook informatie verzamelen over het supergeleidende en supervloeibare binnenste van de ster. In dit hoofdstuk hebben we 30 nieuwe, vooral kleine glitches gemeten in 7 pulsars. Daarmee vinden we een aanwijzing dat het meten van deze kleine glitches vooral afhangt van de kwaliteit van de metingen. In totaal zijn er nu ongeveer 170 glitches gemeten, en de 30 glitches in dit hoofdstuk leveren een belangrijke bijdrage aan de statistiek die gedaan wordt met betrekking tot de grootte en aantallen glitches die voorkomen in pulsars.

Hoofdstuk 3 gaat over een pulsar in een dubbelstersysteem. De meeste sterren zijn niet alleen, maar hebben een andere ster als begeleider. Dat kunnen allerlei soorten sterren zijn, normale sterren, dwergsterren, of in een paar bijzondere gevallen een andere neutronenster. Afhankelijk van wat voor ster de begeleider is, en hoe zwaar beide sterren precies zijn, kunnen we afleiden hoe de evolutie van zo'n systeem gegaan is. Het meten van de massa van sterren is erg moeilijk, en is alleen mogelijk voor sommige sterren met een begeleider. Pulsars zijn daarbij essentieel; de Doppler-effecten in de aankomsttijden van de pulsen zijn een direct gevolg van de baanbeweging van de ster. Als een pulsar een dubbelster vormt met een andere compacte ster, bijvoorbeeld een andere neutronenster, zijn er soms zelfs relativistische correcties nodig om de baanbeweging te kunnen beschrijven. De pulsar die beschreven wordt in dit hoofdstuk vormt een dubbelster met een andere neutronenster. Wel zijn de relativistische correcties voor het systeem lastig te meten, omdat de baan van de sterren relatief breed is. Daarom hebben we datasets van vier verschillende Europese, en zelfs een Amerikaanse telescoop gecombineerd. Helaas was het nog steeds niet mogelijk om de massa's van de sterren afzonderlijk te bepalen, maar we hebben wel onder- en bovengrenzen kunnen vaststellen. Bovendien was het combineren van metingen van verschillende telescopen nog niet eerder op zo'n grote schaal gebeurd en het artikel is daarom een goed voorbeeld van wat op dat gebied mogelijk is.

Hoofdstuk 4 gaat over een zoektocht naar pulsars die is uitgevoerd met de telescopen in Westerbork. Westerbork heeft, vergeleken met de meeste andere radiotelescopen in de wereld een aparte constructie. Het is niet één grote schotel, maar bestaat uit 14 kleine schotels op een rij (array). Daardoor is de telescoop voornamelijk geschikt om plaatjes te maken op radiogolflengten, en in principe niet optimaal voor waarnemingen van puntbronnen die snel variëren, zoals pulsars. Voor standaard pulsar waarnemingen tellen we alle signalen van de



afzonderlijke telescopen bij elkaar op, met als gevolg dat het totale beeldveld van de combinatie erg klein is. Voor een zoektocht is dat niet handig, omdat je eigenlijk zo snel mogelijk een groot gedeelte van de hemel wilt afspeuren. Een paar jaar geleden is er een speciale manier ontwikkeld die de binnenkomende signalen van de array (die bij Westerbork in 8 afzonderlijke banden binnenkomt) op een specifieke manier samenvoegt met als resultaat een soort mozaiek die het grote beeldveld van een kleine schotel combineert met de resolutie van de hele array. Het combineren gebeurt met speciaal hiervoor ontwikkelde software, met de nieuwe pulsarmachine die begin 2006 in gebruik is genomen. We hebben in de eerste analyse van de survey drie nieuwe pulsars gevonden, en dit zijn de eerste pulsars die aan de hand van hun gepulste signaal met Westerbork zijn gevonden. Sinds de pulsars zijn ontdekt hebben we ook regelmatig de aankomsttijden van hun pulsen gemeten. Hieruit hebben we afgeleid wat voor pulsars het zijn. Een van de pulsars leek in een supernovarestant te staan, maar aan de hand van de eigenschappen van de pulsar, gecombineerd met die van de supernovarestant hebben we aangetoond dat dit hoogstwaarschijnlijk toeval is.

De Nederlandse Pulsar Groep leidt sinds 1999 een maandelijks programma van timing waarnemingen met de telescoop in Westerbork. In *Hoofdstuk 5* hebben we de resultaten van deze waarnemingen gepresenteerd voor vier milliseconde pulsars. Omdat deze pulsars allemaal vrij ver weg staan is het lastig om kleine veranderingen in de aankomsttijden te meten. Door het gebruik van een lange set waarnemingen, ook deze keer weer gecombineerd met waarnemingen van andere Europese telescopen, was het toch mogelijk om een goede oplossing voor deze pulsars te vinden. Aan de hand van optische archiefwaarnemingen hebben we geprobeerd of we de begeleiders van deze pulsars konden vinden. Omdat we de begeleiders niet konden detecteren in deze waarnemingen konden we de maximale helderheid, en daarmee de minimale massa van de begeleiders afleiden.

Zoals eerder uitgelegd is het meten van een aankomsttijd van een pulsar een ingewikkeld proces. Het is tegenwoordig steeds vaker aantrekkelijk om metingen van verschillende telescopen met elkaar te combineren om zo tot betere resultaten te kunnen komen. Het proces van uitvoeren en analyseren van de waarnemingen is bij elke radiosterrenwacht in grote lijnen hetzelfde, maar er komen wel kleine verschillen voor. Bij het combineren van de aankomsttijden van meerdere telescopen moet met die verschillen rekening gehouden worden. Dit kan het beste als we precies begrijpen wat de verschillen veroorzaakt zodat we ervoor kunnen corrigeren. *Hoofdstuk 6* beschrijft hoe we de verschillen kunnen vinden, en wat de voornaamste oorzaken zijn voor pulsars met verschillende eigenschappen. We hebben aan de hand van een paar voorbeelden laten zien hoe het combineren van grote hoeveelheden data het beste werkt. Dit is belangrijk voor het toekomstig gebruik van grote gecombineerde data sets van meerdere pulsars in een “Pulsar Timing Array”, waarmee hopelijk de eerste directe detectie van gravitatiestraling kan worden gerealiseerd.