

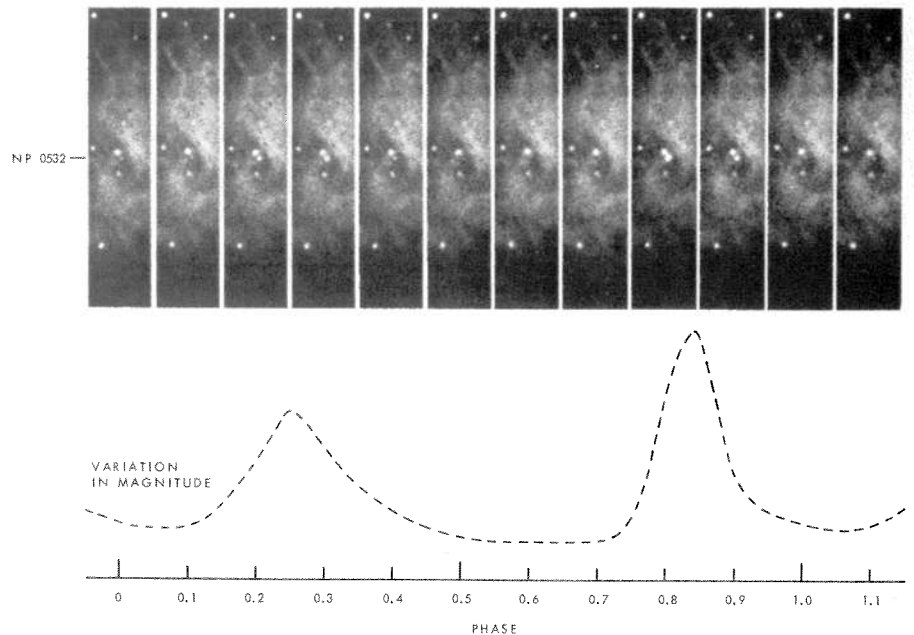
Tien jaar pulsars

Tien jaar geleden, in augustus 1967, ontdekten Anthony Hewish en zijn studente Jocelyn Bell de eerste pulsar als een vreemde storing in metingen met een geheel ander doel. Hij gebruikte een eenvoudige radiotelescoop welke voornamelijk bestond uit een weiland vol houten palen met antennedraden. Achteraf gezien bleek dit ontwerp juist geschikt voor het ontdekken van pulsars. Een echte toevalsontdekking, die Anthony Hewish in 1974 de Nobelprijs voor natuurkunde bezorgde, gedeeld met Martin Ryle. In dit nummer van *Zenit* staat ook Hewish' terugblik over de ontdekking; een nadere toelichting (met enige kritiek) vindt men in het artikel van George Miley en Frank Israel (referentie 1).

Het belang van de ontdekking werd snel duidelijk: een 'klok' in de kosmos, buiten het planetenstelsel, die met ongelofelijke regelmaat stootjes radiostraling uitzendt, roept natuurlijk vragen op! Als eerste de vraag of er geen buitenaardse intelligentie aan het seinen was — welke mogelijkheid serieus door Hewish en de zijnen werd overwogen. Het was voldoende reden om de Britse regering op de hoogte te stellen en de ontdekking geheim te houden. Maar al snel bleek men toch niet met 'Little Green Men' maar met een puur astrofysisch verschijnsel te doen te hebben: met dode sterren, de kompakte, opgebrande resten van zware sterren aan het einde van hun levensloop. Met grote waarschijnlijkheid zien we in de pulsars snel draaiende *neutronensterren*, welke vermoedelijk smalle bundels radiostraling uitzenden die als vuurtorenbundels onze (radio-)ogen voorbij zwiepen. Met deze identificatie werd theoretisch werk van decennia her op observationele poten gezet, en evenzo leverde deze ontdekking weer grond voor nieuwe theoretische analyses en speculaties. Laten we dit boeiende onderwerp in vleugelvlucht bezien, onder verwijzing naar de vele uitgebreidere eerdere artikelen in *Zenit* en in *Hemel en Dampkring*.

Theoretisch voorspeld

Reeds in de dertiger jaren werd het bestaan van neutronensterren geopperd als direct gevolg van de *kwantumtheorie*. Deze

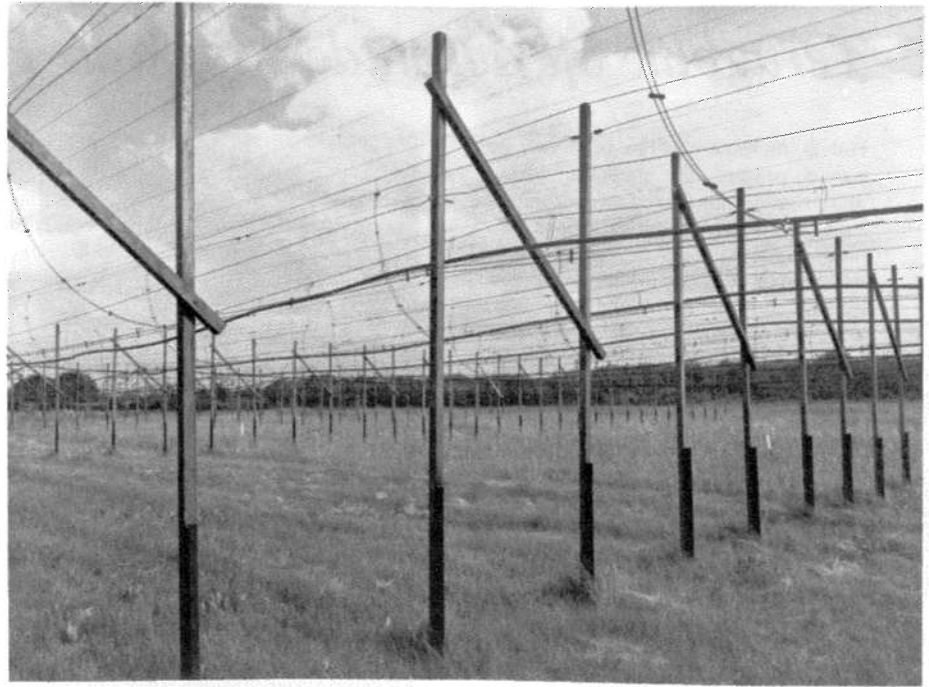


leverde een nieuwe mogelijkheid om de voortdurende ineenstorting door de zwaartekracht van sterren te weerstaan. Gewone sterren zijn immers slechts een tijdelijke fase (zij het gelukkig een langdurige) in de strijd tegen de eigen zwaartekracht, die vanaf het eerste begin van de ster als verdichting in een gaswolk verdere inkrimping veroorzaakt — tenzij een andere kracht weerstand biedt. In een gewone ster zoals de zon is dat de thermische druk van het gas: net als in een autoband is er voortdurend overal evenwicht tussen het drukkend gewicht en de tegenkracht van de botsende gasdeeltjes. Maar is er een lek, dan loopt de band leeg: zo moet de ster voortdurend van binnen uit de energie aanvullen die naar buiten wordt uitgestraald, anders blijven de temperatuur en de druk niet overal voldoende hoog. Is de nucleaire brandstof voor de kernreacties in het inwendige van de ster uitgeput, dan volgt onherroepelijk verdere ineenstorting. Bij zware sterren leidt dit tot de *supernova-implosie* van het inwendige, en *-explosie* van de buitendelen. Zo moet de best bekende supernovarest, de *Krabnevel*, in 1054 zijn ontstaan. Wat gebeurt er met het geïmplodeerde inwendige? Hier spelen de effecten van de kwantumtheorie een belangrijke rol. Bij de dan op-

Fig. 1. De radiopulsar in de Krabnevel blijkt ook optisch te pulseren, zoals deze serie opnamen laat zien. De aan-en-uit periode is echter zo kort (0,033s), dat het oog de pulsen niet kan volgen. Om de pulsen toch zichtbaar te maken past men een stroboscopische methode toe. De ster wordt daarbij steeds kort waargenomen na een tijdsinterval dat iets groter is dan het pulsinterval. De pulsperiode wordt dan 'uitgesmeerd' tot bijv. 1 of 2 seconden, wat wél waarneembaar is (foto Kitt Peak National Observatory).

trekende zeer grote dichtheden raakt de materie *gedegenereerd*. De deeltjesnelheden (in het gas), en dus de druk, worden dan niet meer bepaald door de temperatuur, maar slechts door de dichtheid. En als deze *kwantumdruk* opgewassen is tegen de zwaartekracht, dan blijft dat zo, ook al straalt de ster zijn laatste restje thermische energie uit: in dit *eindstadium* kan hij eeuwig blijven bestaan. Zo'n blijvend evenwicht is mogelijk voor slechts twee zeer verschillende soorten sterren. Allereerst de witte dwergen, met een massa tot 1,4 zonsmassa, zo groot als de aarde (een straal van ongeveer 10.000 km) en een dichtheid van 1000 kilogram per cm^3 . Hierin zijn alleen de lich-

Fig. 2. Het weiland met houten palen en antennedraden, waarmee in 1967 de eerste pulsarsignalen werden opgevangen (foto van A. Hewish).

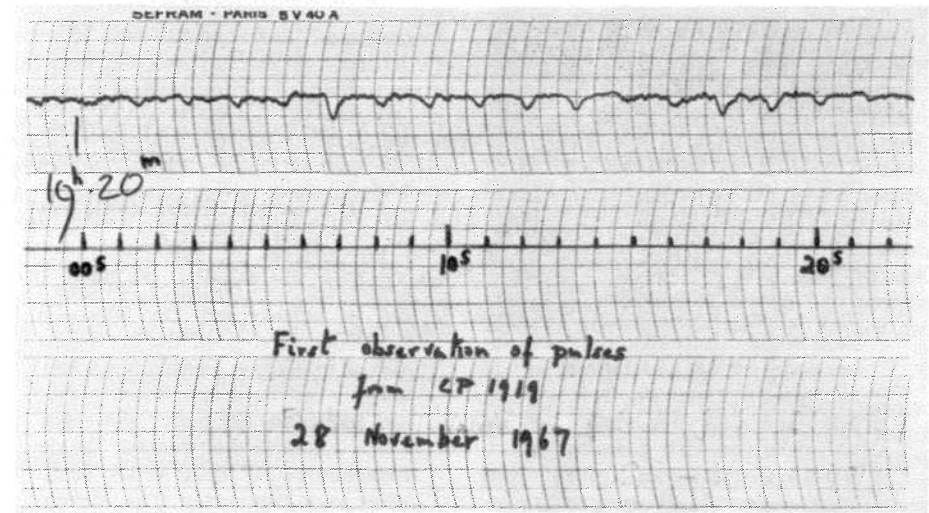


te *electronen* gedegeneerd. Bij weer veel grotere dichtheden degenereren ook de *atoomkernen*: de protonen uit de kernen en de electronen smelten tot neutronen samen en de ster bestaat grotendeels uit opeengepakte neutronen. Zo'n neutronenster heeft een straal van slechts 10 km, een massa tot ongeveer 3,2 zonsmassa, en een dichtheid van 10^{12} kg/cm³. (Hoeveel supertankers wegen evenveel als één kubieke centimeter neutronenster?) Andere mogelijkheden voor een stabiel eindstadium zijn er niet. Is de massa van een supernova-overblijfsel te groot, dan blijft de ster voortdurend in elkaar storten en onttrekt zich aan het gezicht in de vorm van een *zwart gat*. Ze onttrekt zich dan ook aan de nu bekende wetten der fysica en wellicht zelfs aan alle discussie, achter een 'kennishorizon' die even fundamenteel is als Heisenbergs onzekerheidsrelatie. Volgens Hawking: 'God *werpt* niet alleen dobbelstenen, soms gooit hij ze waar wij ze niet kunnen zien.'

Deze ideeën, nader beschreven in referenties 2, 3 en 4, werden pas ontwikkeld zestig jaar nadat de baanbeweging en de kleur van Sirius B hadden getoond dat deze witte dwerg een raadselachtig grote dichtheid moest hebben. Pas met de theorie over het gedegeneerde electronengas werd de structuur der witte dwergen verklaard (Fermi, Fowler, 1926). De stap naar sterren van gedegeneerde atoomkernen was klein: al in 1932 voorspelden Baade en Zwicky het bestaan van neutronensterren, en in 1934 rekenden Oppenheimer en Volkoff er gedetailleerde modellen voor uit.

Maar het duurde nog tot 1967 voor de eerste neutronenster daadwerkelijk gevonden werd – in de vorm van een pulsar. Wel was er eerder naar gezocht. Baade onderzocht in de donkere oorlogsnachten een zwak sterretje midden in de Krabnevel en interpreteerde het als overblijfsel van de supernova van 1054 op grond van haar rare lijnenloze spectrum. Later werd de uit de richting van de Krabnevel waargenomen röntgenstraling bij voorbaat toegeschreven aan een neutronenster – totdat bij een raketlancering (in 1964) tijdens een bedekking van de Krabnevel door de Maan bleek dat de hele nevel röntgenstraling uitzond, en niet slechts een puntbron er in.

Ondanks deze pogingen mag men echter vermoeden dat in al die jaren de meeste astronomen het bestaan van neutronensterren, en zeker van zwarte gaten, eerder als interessante speculatie dan als waarschijnlijk feit hebben beschouwd. Dat is nu niet meer het geval! Al vanaf het begin wezen de waarnemingen van de pulsars op compacte sterren (referentie 5): de grote energie-opbrengst en de grote regelmaat van de pulsen vereisen een grote massa, terwijl de snelle veranderingen in de pulsen wijzen op kleine afmetingen. En de voornaam-



ste verdere eigenschappen van de pulsars, zoals de waargenomen pulsperiodes, de langzame gestadige afname daarvan en de plotselinge abrupte toenames, zijn goed te verklaren uit het door Gold voorgestelde model van een snel draaiende neutronenster. Deze verliest (wellicht via een meedraaiende magnetosfeer) energie aan haar omgeving en wordt daardoor afgeremd – tot de daardoor ontstane vormverandering tot 'sterbevingen' leidt in de voorspelde kristallijne ijzeren mantel rondom de ster, welke tot plotselinge versnellingen en vertragingen van de omwenteling leiden.

Pulsars en supernovae

Er zijn nu zo'n tweehonderd pulsars bekend in ons deel van de Melkweg; in de gehele Melkweg moeten er duizenden zijn. Vele zullen we niet zien doordat ze niet actief meer zijn of doordat ze niet juist onze kant uitstralen. Ze zijn geconcentreerd naar het Melkwegvlak, en hun ontstaan bij supernova-explosies wordt fraai bevestigd door hun ruimtelijke dichtheid vergeleken met de supernovafrequentie, en bovenal

Fig. 3. De eerste waarnemingen van de radiopuls van CP 1919 op 28 november 1967. Duidelijk is te zien dat de signalen bestaan uit scherpe, in sterkte variërende pulsen met intervallen van iets meer dan 1 seconde (foto van A. Hewish).

natuurlijk door het feit dat de snel draaiende (en dus jongste) pulsars in supernova-overblijfsels staan. Bewijsmateriaal was ook de dramatische identificatie van Baade's sterretje met de radiopulsar in de Krabnevel in 1969: het sterretje flitste ook in het optische gebied dertig keer per seconde op (referentie 16) – en het energieverlies dat voor deze pulsar uit de waargenomen afremming wordt berekend dekt juist het vanouds bekende tekort in het energiebudget van de gehele Krabnevel. Men ziet zelfs structuurveranderingen in de Krabnevel, die lijken uit te gaan van de nevel (fig. 5). De op twee na snelste pulsar is de Velapulsar, die in de Gum-nevel staat. Op grond van zijn aanwezigheid neemt men aan dat deze nevel ook een supernova-overblijfsel is, van rond de 11.000 jaar oud

Terugblik op de ontdekking van Pulsars

Het is nu tien jaar geleden dat de eerste pulsar zijn zwakke sporen achterliet op onze registreerapparatuur te Cambridge en daardoor een nieuw hoofdstuk in de geschiedenis van de sterrenkunde inluidde. Zouden pulsars nog steeds onbekend zijn, wanneer we onze radiotelescoop niet hadden gebouwd? Het is gevaarlijk dit soort vragen te beantwoorden maar ik kan me geen waarnemingen voorstellen die duidelijk de aandacht op hun bestaan zouden hebben gevestigd. Tenslotte was de pulsar in de Krabnevel al langer dan 20 jaar als ster bekend, voordat een gedetailleerd onderzoek in 1969 aan het licht bracht dat deze ster zo'n 30 maal per seconde aan en uit gaat.

Ontdekking gegarandeerd

Door een gelukkig toeval maakte de 'sky survey' die ik in 1966 plande het vrijwel onmogelijk dat pulsars *niet* ontdekt zouden worden. De belangrijkste factoren waren: a) de telescoop had een grote gevoeligheid op de meter-golflengten waarop pulsars de meeste energie uitzenden; b) de registreerapparatuur was speciaal gevoelig voor snel fluctuerende signalen; c) de gehele hemel werd afgezocht naar fluctuerende bronnen. Deze nogal ongebruikelijke eisen waren nodig om het verschijnsel van de *interplanetaire scintillatie* te kunnen gebruiken voor het meten van de hoekmaat van verre radiosterrenstelsels. Deze scintillaties (twinkelingen) ontstaan door de afbuiging van radiogolven door wolken geïoniseerd gas in de zonnewind. Mijn laboratorium-logboek van 1965 bevat ontwerpschetsen van de radiotelescoop, kostenberekeningen en schattingen van de tijd die voor de 'sky survey' nodig zou zijn. De radiotelescoop was opgebouwd uit een lange rij van 2048 dipoolantennes, ondersteund door een bos van houten palen. De kosten waren laag en we konden het instrument helemaal zelf maken. De hele zomer van 1966 door hielpen studenten, en soms zelfs een professor, ons met het inslaan van de palen. In oktober 1965 had een aan-

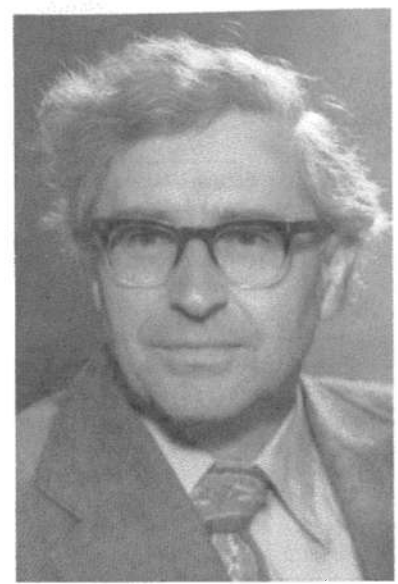


Jocelyn

komend studente, Jocelyn Bell (nu dr. S. J. Burnell), zich bij het project gevoegd en zij had de verantwoording voor het aanbrengen van de kabels voor de antennes. Ook zij leerde met de voorhamer omgaan! Tegen de lente van 1967 was het instrument gereed en begon het testen van de apparatuur. De telescoop functioneerde zo goed, dat het onderzoek al in juli kon worden beëindigd. Iedere week werd een strook papier van meer dan 100 meter aan registraties opgeleverd en Jocelyn had de ondankbare taak deze strook centimeter voor centimeter af te zoeken. Vaak werden ook storende signalen van aardse bronnen opgevangen. Maar aangezien elke week de gehele hemel weer werd afgezocht, konden de kosmische bronnen op den duur toch van de tijdelijke aardse bronnen worden onderscheiden.

Signalen!

Laat in die zomer (zowel Jocelyn als ik kunnen ons de precieze datum niet meer herinneren) toonde Jocelyn me een registratie waarop een zwakke bron tijdens het midden van de nacht vrij sterk bleek te scintilleren. Dit was



Anthony

vreemd, omdat sterke scintillaties 's nachts zelden optreden. We wachtten dus op een bevestiging en inderdaad bleek hetzelfde signaal weer terug te komen, maar niet altijd! Mijn eerste gedachte was dan ook dat we een *radio-slamster* hadden opgepikt.

De volgende stap was het meer in detail onderzoeken van de straling. Ik wist hoe de radiopulsen van zonnevlammen eruit zagen en was benieuwd of deze vreemde bron zich ook zo gedroeg. Gelukkig was er een snelle recorder beschikbaar en ik vroeg Jocelyn de bron met dit instrument te registreren.

Eerst had zij geen succes, want de bron verdween en tenslotte gaf ze haar pogingen op. Maar eind november kwam de bron plotseling terug en op de 28e vertelde Jocelyn me dat de signalen bestonden uit scherpe pulsen met intervallen van iets meer dan 1 seconde. Ik kon het bijna niet geloven, maar de volgende dag kon ik het met eigen ogen zien.

Mijn collega's John Pilkington, Paul Scott en Robin Collins begonnen direct met pogingen de bandbreedte van de signalen te meten, terwijl ik in mijn kamer op de universiteit exa-

(en zo dicht bij ons, dat de uitdijende nevel ons wellicht over 10.000 jaar zal bevatten (zie referentie 6). Recent werd de Velapulsar ook optisch waargenomen: het sterretje is zo zwak (25e magnitude), dat de pulsen gedurende twee nachten moesten worden opgesteld om het bestaan voldoende zeker vast te stellen (referentie 7).

Globaal is het beeld van de radiopulsars dus rond, maar de precieze invulling van de details is dat bij lange na niet. Waarom is de radiostraling zo gebundeld? Hoe wordt de draaiings-energie aan de omgeving overgedragen? Hoe lang blijft een pulsar actief? Waarom gedraagt de Velapulsar zich anders dan de Krab-pulsar (hij 'hikt' veel

meer, en zijn radiopuls is niet in fase met zijn optische en gamma-pulsen)? Worden in een mogelijke meedraaiende, spiraalsgewijs opgewonden magnetosfeer niet alleen radiogolven uitgezonden, maar ook grote aantallen atoomkernen? Zou dit proces de langgezochte bron van de *kosmische straling* zijn? Zulke vragen houden de

menwerk moest nakijken! Enkele dagen later was ik hiervan verlost en begon ik de pulsen van onze mysterieuze bron te vergelijken met de tijdsignalen van een zeer nauwkeurige klok van de MSF Rugby radio-tijdsdienst. Na enkele dagen vond ik tot mijn grote verbazing dat de tijdsduur tussen de pulsen tot binnen een miljoenste seconde constant bleef. Op dat moment overwoog ik serieus of we misschien hier de eerste aanwijzingen hadden van intelligente wezens uit de ruimte. Twee weken later liet ik deze gedachte echter weer vallen, aangezien voortgezette tijdmetingen hadden aangetoond dat de bron van de pulsen niet in een planeetaire baan om een ver verwijderde ster bewoog.

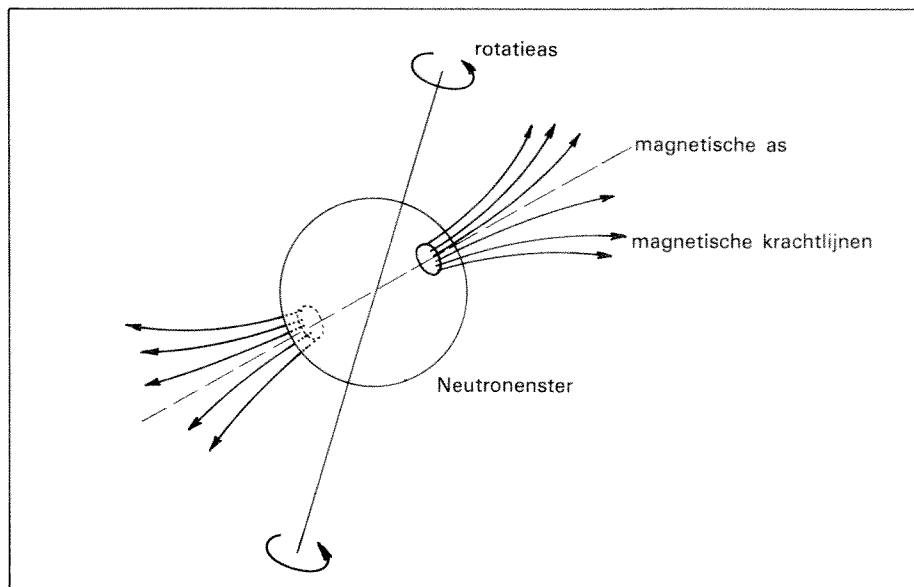
Méer pulsars

Het was inmiddels januari 1968 geworden en ik bereidde een schriftelijk bericht over onze ontdekking voor, veronderstellend dat we een trillende neutronenster hadden gevonden, of misschien een zeer compacte witte dwerg. Intussen zocht Jocelyn de vroegere registraties opnieuw af naar eventuele andere pulserende bronnen. Zij stuitte op verscheidene mogelijkheden, waaronder een die op 24 november was opgevlamd en een van de helderste scintillerende bronnen aan de gehele hemel was. Verdere waarnemingen toonden aan dat deze bron (PSR 0950) tezamen met twee andere inderdaad scherpe radiopulsen uitzond. In het bericht over onze ontdekking kon ik nog toevoegen dat er méer pulsars bestonden en dat zij wellicht vrij gewoon waren in het melkwegstelsel.

Onze aankondiging veroorzaakte een vloed van waarnemingen op sterrenwachten overal in de wereld, maar ook nu nog zijn pulsars mysterieuze objecten. Niemand twijfelt eraan dat roterende *neutronensterren* de regelmaat van de pulsen het best kunnen verklaren, maar waardoor de straling zo sterk gebundeld is weten we nog niet zeker.

A. Hewish

onderzoekers nu bezig. Maar omdat essentieel nieuwe ontdekkingen na de eerste jaren van pulsar-waarnemingen niet meer zijn gedaan, is de aanvankelijke stortvloed van artikelen over de pulsars opgedroogd. Het is stil geworden rond de pulsars, omdat voor gedetailleerdere modellen de gegevens nog te karig zijn.



Een uitzondering vormt de dubbelpulsar PSR 1913+16, ontdekt in 1975. Deze bestaat waarschijnlijk uit twee neutronensterren (waarvan één pulsar is), die in minder dan acht uur om elkaar heen draaien. Dit paar is vooral interessant voor het testen van gravitatie-theorieën: de pulsar vormt in feite een precisieklok geplaatst in een sterk zwaartekrachtsveld – precies wat de gravitatiefysicus verlangt. De lange as van de baan van de pulsar draait maar liefst vier graden per jaar (de baan van de planeet Mercurius 43 boogseconden per eeuw!) en de relativistische effecten zijn groot: de vertraging van de omlooptijd van de pulsar ten gevolge van uitgezonden gravitatiegolven, en tweede-orde Doppler effecten moeten op den duur goed te bepalen zijn.

Röntgen-dubbelsterren

Maar over het algemeen heeft het onderzoek aan eindstadia van sterren zich in de laatste jaren verlegd naar de röntgen-dubbelsterren (referenties 8 en 9). Er wordt ook in Nederland belangrijk onderzoek aan verricht, vooral door de groep van Van den Heuvel te Amsterdam (aan de radiopulsars is in Nederland weinig gedaan; de radiotelescoop te Westerbork is voor hun waarneming niet geschikt). Er zijn nu meer dan een dozijn van deze bronnen bekend; de eerste werden door de kleine maar zeer succesvolle Uhuru-satelliet gevonden. Ze zijn van verschillend type: negen zijn röntgen-pulsars, waarvan sommige heel langzaam; van de overige is de röntgenstraling onregelmatig. Van groot belang is dat het compacte objecten zijn die vaak om een min of meer gewone ster draaien waaraan ook optisch van alles te meten valt. De waargenomen baanbeweging geeft de massa (om de massa van een object te kunnen meten móet het ergens aan trekken!); zo lijkt de 'weging' van Cygnus X-1 te wijzen op een zwart gat in de Zwaan (referentie 10). En de interactie van de gewone ster met de compacte begeleider levert allerlei waarneembare en interpreteerbare verschijnselen op, waar-

Fig. 4. Het neutronenstermodel voor pulsars, zoals voorgesteld door Pacini en Gold in 1968. De pulsar bestaat uit een snel roterende neutronenster (straal van zo'n 10 km), met een zeer sterk magneetveld. De radio- en lichtstraling wordt uitgezonden door snelle elektronen, die bij de magnetische polen om de krachtlijnen van het magneetveld spiralisieren en daarbij energie afgeven. Deze straling wordt in ruwweg conische bundels uitgezonden, die als gevolg van de scheve stand van de magnetische as t.o.v. de rotaties een 'vuurtoreneffect' veroorzaken. Wanneer de aarde zich in of nabij het vlak van de magnetische as bevindt, ziet men de bundels voorbijkomen met een periode die gelijk is aan de rotatieperiode.*

* Gold had in juni 1968 een neutronenstermodel gepubliceerd op basis van pulsars. Pacini had enkele maanden eerder een model berekend voor sneldraaiende neutronensterren. Zij zouden in aangrenzende kamers in hetzelfde instituut hebben zitten werken, zonder dit van elkaar te weten!

onder de röntgenstraling zelf. De laatste ontstaat waarschijnlijk door aangroeiing (*accretie*, binnen korte tijd een magisch begrip geworden): materie, uitgestoten door de gewone ster, valt langs spiraalbanen op een neutronenster of in een zwart gat, met veel energie-uitstraling door de grote versnelling en door botsingen onderweg. Twee soorten sterren kunnen zo'n materiestroom leveren: nog jonge, zware sterren die massa verliezen in de vorm van een 'sterrewind', hetgeen blijkt uit recente spectroscopische studies van zulke sterren in het ultraviolet (o.a. te Utrecht), en ten tweede sterren die in de reuzenfase van hun evolutie belanden, groeien tot op de baan van hun begeleider en dan op de begeleider overkoken. Daarmee lijken twee waargenomen typen röntgen-dubbelsterren te corresponderen.

Bijzonder interessant is dat men bij zulke dubbelsterparen *evolutiescenario's* kan opstellen waaruit hun bestaan te begrijpen valt (referentie 11). De dramatische levens-

Fig. 5. Vier negatiefopnamen van het centrale deel van de Krabnevel, gemaakt in blauw licht. De opnamen a, b en d werden gemaakt door een polaroidfilter, opname c zonder filter. Ster A is de pulsar (vergelijk ook met fig. 1). Duidelijk zijn rechtsboven A rimpeltjes te zien, die in de loop der tijd sterk van vorm veranderen. Dit blijken plasmagolven te zijn, die zich door de nevel voortplanten met een voortplantingstijd van enkele jaren. De golven schijnen uit te gaan van een centrum in de buurt van de pulsar; er vindt dus energieoverdracht plaats van pulsar naar nevel (foto 5 meter Hale Telescoop).

loop van zware dubbelsterren, waarin de zwaarste ster het snelste evolueert, het eerste reus wordt, en als eerste tot neutronenster ineensloot welke later door massaverlies van de andere, langzamer evoluerende ster tot lichten wordt gebracht, kan uit de nu waargenomen eigenschappen worden afgeleid.

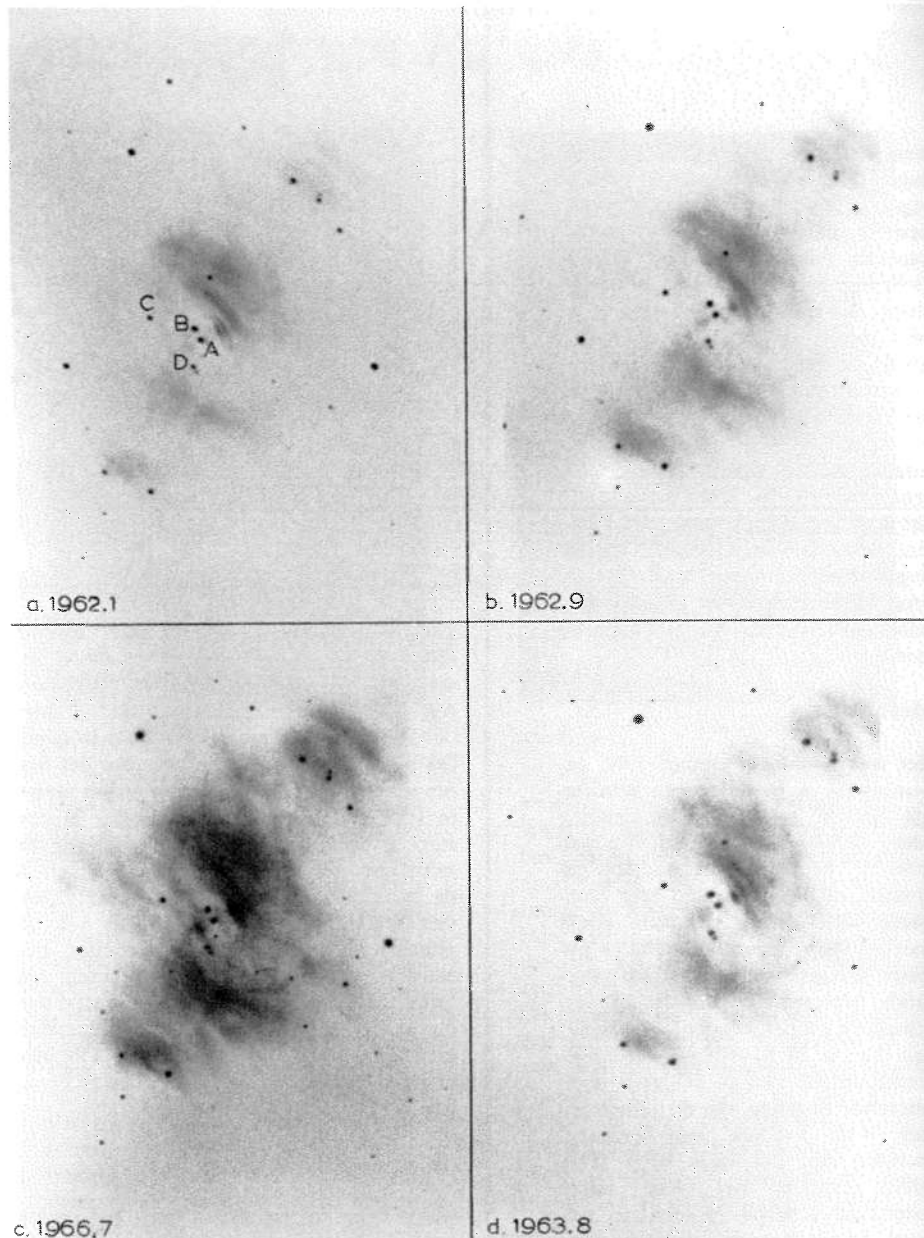
Tenslotte zijn er nog de door de ANS ontdekte 'röntgenbursters' (bronnen die stoten röntgenstraling uitzenden), deels in bolvormige sterhopen (referenties 12 en 13), en de raadselachtige gammastoten die reeds lang (maar eerst in het geheim) door Amerikaanse spionage-satellieten worden opgevangen (referentie 14). Zijn hier ook zware compacte objecten debet aan? We weten het nog niet — maar het is duidelijk dat met de ontdekking van de eerste radiopulsar, tien jaar geleden, en de komst van de röntgen-astronomie een nieuw tijdperk is ingeluid. De theoretische speculaties van voor de oorlog zijn bekroond met een zich zeer snel ontwikkelende 'astrofysica van compacte eindstadia van sterren'.

Een nieuwe astrofysica

Daarmee is ook een tijd van nieuwe speculaties gekomen — te vergelijken met de dertiger jaren. Nu vindt men artikelen over super-zware zwarte gaten (in het centrum van de Melkweg? — Oort: referentie 15), over mini-zwarte gaten (die volgens Hawking wellicht wél energie naar buiten kunnen lekken), over kwantumeffecten in de zwaartekracht, over aangroeiing bij quasars — kortom: een compleet nieuwe astrofysica, van extreme dichtheden en relativistische effecten, van singulariteiten en kennis-horizons — begonnen met de koppigheid van een Ierse studente, wier nieuwsgierigheid door het in de grond meppen van de houten palen van Hewish' radiotelescoop niet zo was afgestompt dat ze niet geïntrigeerd was door een onooglijk storinkje.

Referenties

1. G. Miley en F. Israel, Zenit 2, 124, 1975.
2. J. Heise, Hemel en Dampkring 68, 75, 1970 (Neutronensterren).
3. J. Heise, Hemel en Dampkring 69, 29, 1971 (Zwarte gaten).
4. P. Hut en J. Stollman, Zenit 1, 2, 1974, 1975 (Serie over zwarte gaten).



5. R. van de Nieuwenhof en J. Rosenberg, Hemel en Dampkring 67, 22, 1969.
6. C. de Jager, Zenit 1974, Nr. 12.
7. G. Beekman, Zenit 4, 91, 1977.
8. G. Hensberge, Zenit 1974, Nr. 7/8.
9. G. Hammerschlag-Hensberge en J. van Paradijs, Zenit 3, 3, 1976.
10. Tj. de Vries en E. P. J. van den Heuvel, Zenit 1974, Nr. 2.
11. C. de Loore, Zenit 2, 44, 1975.
12. J. Heise, Zenit 3, 168, 1976.
13. J. van Paradijs en E. Zuiderwijk, Zenit 3, 226, 1976.
14. C. de Jager, Zenit 1974, Nr. 3.
15. J. H. Oort, Natuur en Techniek 43, 781, 1975.
16. E. P. J. van den Heuvel, Hemel en Dampkring 67, 169, 1969.
17. F. G. Smith, Pulsars, Cambr. University Press, 1977.

Rectificatie

In het artikel Tijd en Tijdmetering in Zenit no. 4 is in het onderschrift van figuur 3 een storende fout geslopen. Het zinsdeel 'en doordat de zon niet langs de ecliptica beweegt, maar langs de hemelequator' moet luiden 'en doordat de zon niet langs de hemel-equator beweegt, maar langs de ecliptica.'