

## PULSARS

door

Drs. R. J. Rutten

Sinds enige jaren kent de sterrenkundige een nieuwe, interessante klasse hemellichamen: de pulsars. Eerst vond men bij toeval de radiopulsars, en meer recent de röntgenpulsars; beide blijken het zeer compacte sterachtige objecten, vermoedelijk in de vorm van neutronensterren of zelfs 'zwarte gaten': de evolutionaire eindprodukten van zware sterren. In dit artikel worden eerst de waarnemingen beschreven; vervolgens wordt dieper ingegaan op de theoretische aspecten van dergelijke compacte sterren.

### *Waarnemingen van radiopulsars*

De ontdekking van de radiopulsars is een schoolvoorbeeld van hoe men door vergaande specialisatie gericht op een nauw beperkt doel de voorwaarden kan scheppen voor de toevallige ontdekking van een volkomen onverwacht verschijnsel — een uitdaging voor doelgericht wetenschapsbeleid.

In 1967 kwam te Cambridge onder leiding van Hewish een vrij eenvoudige radiotelescoop gereed, bestaande uit 2048 dipoolantennes verspreid over een oppervlakte van anderhalve hectare. De telescoop was speciaal gebouwd voor het meten van snelle wisselingen in de radio-intensiteit van zwakke extragalactische puntbronnen, in een smal frequentiebandje op een tamelijk lage frequentie (81.5 MHz, dat is een golflengte van 3.7 meter). Hij was bedoeld om de interplanetaire scintillatie van dergelijke radiobronnen te meten teneinde hun afmetingen te bepalen. Het scintilleren van radiobronnen is te vergelijken met het scintilleren van de zichtbare hemellichamen: tengevolge van onregelmatige bellen in onze atmosfeer dansen en flonkeren de sterren, maar een planeet niet door zijn grote schijnbare diameter. De lichtstralen van de verschillende delen van de planeet gaan door verschillende bellen en middelen zo elkaars veranderingen uit. Op radiogolflengten zijn het niet de dichtheidsfluctuaties van onze atmosfeer maar dichtheidsfluctuaties in de stromen geladen deeltjes die de zon de interplanetaire ruimte

Naar een voordracht, gehouden voor de Koninklijke Maatschappij Diligentia op 4 maart 1974

inzendt die tot het flonkeren van voldoende kleine radiobronnen aanleiding geven. Met een snelle radiotelescoop (integratietijd < 1 sec) kan men dan uit het wel of niet flonkeren de hoekdiameter van een radiobron afleiden.

Het was op de registraties van deze telescoop dat de studente Jocelyn Bell in juli 1967 een kleine storing vond die steeds rond middernacht, als de scintillatie grotendeels afwezig is, terugkeerde. Hoewel het voor de hand lag dat de storing door menselijke activiteiten werd veroorzaakt bleef zij er toch aandacht aan besteden: zij gebruikte snelle registratie-apparatuur en vond dat de storing bestond uit kortdurende stootjes radiostraling die elkaar regelmatig om de seconde opvolgden. Toen echter bleek dat de storing iedere nacht net als de sterren vier minuten eerder door de meridiaan kwam en geen enkele verschuiving ten opzichte van de sterren vertoonde werd het duidelijk dat straling van buiten het zonnestelsel werd waargenomen. Inmiddels had men gevonden dat de tijdsduur tussen de stootjes, die zelf sterk in intensiteit wisselen, binnen een miljoenste seconde constant is. Men hield daarom eerst rekening met een buitenaardse intelligentie die op deze wijze berichten rondseint, stelde de Britse regering van dit vermoeden op de hoogte en hield de ontdekking geheim.

Maar in enkele maanden ontdekte men nog drie dergelijke pulserende radiobronnen waarbij in de intensiteitswisselingen van de stootjes geen enkele boodschap of codering te onderkennen was; ook vertoonde de zo constante tijdsduur tussen de stootjes niet de langzame verandering die men wegens het dopplereffect zou verwachten als zo'n intelligentie net als wij op een rond een ster draaiende planeet zou zitten. In plaats van LGM (Little Green Men) sprak men te Cambridge verder van 'pulsars' (pulsating radio sources, niet te verwarren met 'quasars': quasistellar radiosources).

Er zijn sindsdien over de honderd radiopulsars ontdekt. Ze vertonen allemaal hetzelfde patroon van kortdurende stootjes radiostraling van wisselende sterkte die elkaar met extreem grote regelmaat opvolgen. De tijdsduur tussen de stootjes varieert voor de verschillende pulsars van 0.03 tot 3 seconden; de duur van de puls zelf is slechts een tiende tot een honderdste van de pulsperiode. De periode is zo constant dat zij tot in acht cijfers pleegt te worden opgegeven, waarbij men voortdurend moet corrigeren voor de veranderingen die de beweging van de aarde veroorzaakt middels het dopplereffect: men geeft de 'heliocentrische' periode op. Naderhand bleek bij voortgezette vergelijking met atoomklokken dat de periode doorgaans heel langzaam groter wordt, met een relatieve toename die tussen  $10^{-12}$  en  $10^{-15}$  van de periode ligt. Algemeen blijkt deze toename relatief groter te zijn naarmate de

periode zelf korter is. Daarnaast is voor een tweetal pulsars naast de gelijkmatige langzame toename van de pulsafstand ook een plotselinge, incidentele afname geconstateerd: de z.g. 'pulsarhik'.

De stootjes radiostraling zelf vertonen een zeer wisselvallig karakter. De intensiteit wisselt sterk; vaak verdwijnt de bron voor langere tijd. Toch toont iedere pulsar gemiddeld een karakteristieke pulsform die ingewikkelder is naarmate de periode langer is en dan uit verscheidene subpulsen kan bestaan, waarop snel wisselende fijnstructuur is gesuperponeerd. Ook de polarisatie van de radiostraling (zowel lineair als circulair) kan binnen de puls sterk wisselen.

De verdeling van de pulsars aan de hemel vertoont een duidelijke concentratie naar het vlak van de melkweg zodat we blijkbaar met galactische objecten te doen hebben (in tegenstelling tot de quasars die de verst waarneembare objecten vormen). Dit wordt bevestigd door het verschijnsel van de frequentiedispersie: op grotere golflengte komen de pulsen wat later aan dan op kortere. De oorzaak hiervan is dat de voortplantingssnelheid van elektromagnetische straling in een medium afhangt van de brekingsindex, en deze is afhankelijk van de golflengte. Dus net zoals rood licht in glas sneller gaat dan blauw wordt de radiostraling door vrije elektronen tussen de sterren golflengte-afhankelijk vertraagd. Met een meting van de relatieve vertraging op meer golflengtes en een schatting van de interstellaire elektronendichtheid vindt men dat de afstanden van de pulsars uiteenlopen van 100 tot 1000 parsec (1 parsec = 3.26 lichtjaar =  $3 \times 10^{13}$  km). De diameter van het melkwegstelsel is rond 30 000 parsec en de zon staat op 10 000 parsec van het centrum: de pulsars die wij zien, staan dus in ons deel van de melkweg: er zullen er in de hele melkweg nog veel meer zijn. Uit de afstand volgt nu ook de in de pulsen uitgestraalde energie: die blijkt van dezelfde orde te zijn als de totale energie die de zon uitstraalt ( $10^{33}$  erg/sec =  $10^{26}$  watt).

Een opmerkelijke pulsar is NP 0532. De afkorting betekent: National Radio Astronomy Observatory pulsar met rechte klimming  $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}}$ . Sommige sterrenwachten kunnen naast de rechte klimming ook de declinatie van een radiobron meten en zijn daar dan zo trots op dat ze die erbij zetten, bijvoorbeeld AP 1541 + 09: Arecibo pulsar met  $\alpha = 15^{\text{h}}41^{\text{m}}$  en  $\delta = 9^{\circ}$ . De pulsar NP 0532 is namelijk de enige radiopulsar die ook in andere golflengtegebieden teruggevonden is: het blijkt een sterretje van de  $15^{\text{e}}$  magnitude te zijn in het centrum van de Krabnevel. Deze is het restant van de beroemde supernova-explosie van 1054 die door Oosterse astronomen werd beschreven. Aan

deze draderige gasnevel is reeds veel onderzoek gewijd (sommigen delen de sterrenkunde zelfs in in die van de Krabnevel en die van de rest!), vooral door en op instigatie van prof. Oort. Het is een sterke radiobron en ook een sterke bron van röntgenstraling welke kennelijk veroorzaakt wordt door de versnelde beweging van zeer snelle elektronen in een magnetisch veld (synchrotronstraling); tot dusver was de oorsprong van de snelle elektronen onverklaard. Daarnaast dijt de nevel snel uit en verandert de structuur die men ziet voortdurend, waarbij de veranderingen schijnen uit te gaan van het bewuste sterretje. Baade onderzocht dit sterretje reeds in 1942 met de Mount Palomar telescoop en vond dat het een lijnenloos spectrum heeft dat verschilt van alle bekende spectra. Op grond hiervan identificeerde hij het sterretje als overblijfsel van de supernova waaruit de nevel ontstond.

Dit sterretje blijkt in zichtbaar licht precies zo te pulsen als de pulsar in het radiogebied: als Baade indertijd dertig maal per seconde met zijn ogen had geknipperd had hij toen reeds de pulsar kunnen ontdekken. Synchroon met de pulsar knipperend had hij hem wél gezien, en als hij er juist naast was niet. Op deze wijze is in 1969 de identificatie gemaakt, zij het met een televisiecamera met een roterende onderbreker in de lichtweg. Sindsdien is dezelfde pulsar ook in het infrarood en van buiten de dampkring in het röntgengebied gedetecteerd, en ook in deze straling blijkt hij te pulsen met precies dezelfde periode en pulsstructuur.

#### *Waarnemingen van röntgenpulsars*

Op 12 december 1970 werd de Amerikaanse Explorer 42 gelanceerd vanaf een Italiaans lanceerplatform voor de kust van Kenya. Het was de eerste SAS (Small Astronomy Satellite) kunstmaan en ook de eerste kunstmaan gewijd aan het röntgenonderzoek van het heelal. De röntgenastronomie had het voorheen met raketten moeten doen; het percentage ruimtevaart-geld dat direct aan de sterrenkunde ten goede komt wordt vaak overschat! Dit satellietje, genaamd Uhuru (Swahili voor 'vrijheid') omdat hij juist op onafhankelijkheidsdag werd gelanceerd, heeft spectaculaire ontdekkingen gedaan: tientallen nieuwe bronnen in het energiegebied tussen 2 en 20 KeV (in golflengte 0.5 en 5 Ångström), waaronder extragalactische stelsels en röntgenpulsars. Intussen is het werk overgenomen door de Copernicus-satelliet (in Nature ziet men nu artikelen met titels als 'Copernicus ontdekt nieuwe röntgenbron'). De verwachting is dat ook de röntgentelescoop van het Utrechtse Laboratorium voor Ruimteonderzoek in onze eigen Nederlandse ANS satelliet die deze zomer gelanceerd zal worden, een belangrijke bijdrage tot het röntgenonderzoek zal leveren. Deze röntgendetec-

tor munt uit door een hoog tijdoplossend vermogen waarmee hij juist voor pulsarwaarnemingen heel geschikt is, en door zijn gevoeligheid in het zachte röntgengebied waardoor goed energiespectra bepaald kunnen worden.

Een belangrijke eigenschap van de nu ontdekte röntgenpulsars is dat ze veelal (op dit moment tenminste zeven stuks) deel uitmaken van een dubbelster-systeem: ze draaien met een min of meer normale ster samen rond het gemeenschappelijk zwaartepunt. Dat levert de mogelijkheid tot massabepaling: de massa van een voorwerp kan alleen gemeten worden als het ergens aan trekt. Zoals we zullen zien geeft de massa van een pulsar belangrijke informatie over zijn aard.

We kunnen de röntgendubbelsterren ruwweg in twee soorten indelen: bronnen die net als een radiopulsar extreem regelmatig röntgenstraling in de vorm van pulsen uitzenden, en andere die dat onregelmatiger doen.

We zullen hun eigenschappen behandelen aan de hand van de twee exemplaren waarvan nu het meest bekend is; er wordt echter snel vooruitgang geboekt zodat op korte termijn nog aanzienlijk meer gegevens te verwachten zijn.

Een voorbeeld van een regelmatig pulserende röntgenbron is Her X-1 (dat is de eerst ontdekte röntgen (X) bron in het sterrenbeeld Hercules).

De röntgenpulsen komen iedere 1.24 seconde aan, met kleine variaties in deze periode. Bovendien verdwijnen ze iedere 1.7 dag: kennelijk is het een bedekkingsveranderlijke, dat wil zeggen dat de röntgenbron met een andere ster samen ronddraait en periodiek door deze voor ons verduisterd wordt. Omgekeerd moet dan ook de andere ster regelmatig verduisterd worden door de röntgenbron. Daarmee werd optische identificatie van de pulsar eenvoudig. De richtingsgevoeligheid van röntgentelescopen is namelijk zo slecht dat veel optisch waarneembare sterren in de 'errorbox' zitten, zodat men niet kan zeggen welke de röntgenbron vertegenwoordigt. Maar met de voorkennis van de periodieke verduisteringen bleek het de ster HZ Her te zijn: een ster met schijnbare magnitude 13.2 (tijdens de verduistering 14.7: hij wordt dus maar gedeeltelijk door de pulsar afgeschermd) en spectraalklasse A9, die tenminste 2000 parsec van de zon verwijderd is. Er is geen radiostraling van dit dubbelsterpaar gedetecteerd.

Uit de benedengrens voor de afstand volgt een benedengrens voor de uitgezonden röntgenenergie van  $10^{30}$  watt, dus tienduizend maal zo veel als de zon uitzendt. HZ Her is voldoende helder voor spectrografisch onderzoek (omdat het licht in een spectrum wordt uiteen-gerafeld is er voor een spectrografische opname meer licht nodig dan voor een gewone foto). De spectraallijnen schuiven periodiek heen en weer wegens het dopplereffect: de ster beweegt immers beurtelings

naar ons toe en van ons af, terwijl hij rond het zwaartepunt van het dubbelsysteem draait. Uit de verschuivingen kan de baansnelheid bepaald worden; met de bekende periode is daarmee de grootte van de baan en daaruit de verhouding van de massa's van de beide componenten te bepalen (niet precies omdat men de helling van het baanvlak niet precies kent). Met de aanname dat HZ Her een voor zijn spectraaltype representatieve massa heeft volgt dan de massa van de – op optische golflengtes onzichtbare – röntgenpulsar: deze blijkt ongeveer één zonsmassa te bedragen.

Het beroemde voorbeeld van de tweede soort röntgendubbelster is Cyg X-1. Dit is géén bedekkingsveranderlijke: de onregelmatige pulsen worden niet periodiek verduisterd. Direkte identificatie met een optisch waarneembare ster is echter toch gelukt, dankzij het feit dat de bron ook radiostraling uitzendt: met behulp van de nauwkeurige Nederlandse apertuursynthese-radiotelescoop te Westerbork kon de errorbox voldoende verkleind worden om het optische zoeken succes te geven: de röntgenbron blijkt met de ster HDE 226868 een dubbelsterpaar te vormen. Het optische spectrum van deze superreus (9<sup>e</sup> grootte, spectraalklasse O 9.7) toont namelijk weer periodieke verschuivingen van de spectraallijnen die verklappen dat het toch een dubbelster is ('spectroscopische' dubbelster) ook al zien we geen verduisteringen: vermoedelijk kijken we van boven op het baanvlak. Deze ontdekking toont fraai hoezeer de diverse waarnemingsmethoden in de sterrenkunde elkaar aanvullen: de ontdekking in het röntgengebied werd door middel van radioastronomie gepreciseerd zodat de klassieke optische spectraal-diagnostiek beschikbaar werd.

Ook deze dubbelster staat minstens 2000 parsec van ons vandaan; op dezelfde wijze als bij Her X-1 volgen een benedengrens voor de uitgezonden energie van  $10^{29}$  watt en een schatting voor de massa van de röntgenbron: ongeveer 5 zonsmassa's, maar tenminste 3 zonsmassa's.

#### *Interpretatie: compacte sterren*

Zowel voor de radiopulsars als voor de röntgenpulsars kunnen we direct concluderen dat hun afmetingen heel klein moeten zijn wegens de snelle wisselingen in de intensiteit van de straling: de afmetingen van het stralende gebied kunnen niet groter zijn dan de afstand die het licht tijdens zo'n intensiteitsverandering aflegt. Voor zowel de radiopulsars als de röntgenbronnen vindt men zo een bovengrens van ongeveer honderd kilometer, dus kleiner dan de aarde (doorsnede 13000 km) en veel kleiner dan een gewone ster (zon:  $1.5 \times 10^6$  km).

De energieinhoud moet echter heel groot zijn: de uittredende energie

is op zichzelf al erg groot en deze zal, omdat de pulsperiodes zo constant zijn toch slechts een kleine fractie van de totaal beschikbare energie zijn. Dit impliceert dat er een aanzienlijke massa voorhanden moet zijn: de pulsars moeten uiterst compacte maar zware ster-achtige objecten zijn. De keus aan mogelijkheden die daarmee overblijft is heel beperkt maar wel zeer interessant: het kunnen witte dwergen zijn, neutronensterren of 'zwarte gaten'. Zoals we zullen zien moeten we de verklaring van de pulsars zoeken in de laatste twee spectaculaire en nog nooit eerder waargenomen objecten; eerst gaan we in op de aard van deze sterren.

Een gewone ster, zoals de zon, bestaat volledig uit heet gas waarbij op ieder punt in de ster het gewicht van de erbuiten gelegen lagen juist wordt opgeheven door de druk van het gas ter plaatse: de ster verkeert in 'hydrostatisch evenwicht'. Dit evenwicht houdt zichzelf nauwkeurig in stand: wanneer de druk ergens iets te klein zou zijn om tegen de gravitatiekracht op te wegen dan zou de zon daar snel krimpen, waardoor de dichtheid stijgt (en de temperatuur ook: de naar binnen vallende deeltjes winnen immers kinetische energie uit potentiële) zodat de gasdruk toeneemt tot zich een nieuw evenwicht instelt.

De tijdschaal waarop dit evenwicht zo wordt bijgesteld is slechts ongeveer een uur: vandaar dat de zon al miljarden jaren onveranderd schijnt (waarbij de uitgestraalde energie die in het centrum van de zon wordt opgewekt door de kernfusie van waterstof tot helium wel de massa van de zon doet afnemen, maar slechts met 0.01% per miljard jaar; toch zal het opraken van de waterstof in het inwendige van de zon het huidig evenwicht uiteindelijk definitief verstoren). De druk en de temperatuur lopen in de zon van buiten naar binnen op: in het centrum is de temperatuur 14 miljoen graden. Dat is zo hoog dat de atomen grotendeels geïoniseerd zijn: ondanks de hoge dichtheid (100 gram/cm<sup>3</sup>) kan men toch met de 'ideale gaswet' rekenen omdat de kale atoomkernen zoveel kleiner zijn dan de volledige atomen met complete elektronenschillen. Deze wet gaat echter niet meer op als men met veel grotere dichtheden in het centrum van de ster gaat rekenen. Dergelijke berekeningen zijn reeds in de dertiger jaren verricht door Landau, Oppenheimer en anderen voor hypothetische sterren met steeds grotere centrale dichtheid. Men ging hierbij uit van zware sterren aan het einde van hun evolutie, waarin geen kernreacties meer optreden zodat alleen de gravitatie als beschikbare energiebron is overgebleven. De materie in het inwendige zal dan in eerste instantie vooral uit ijzeratomen bestaan omdat ijzer het eindproduct is van de reeks kernfusiereacties die een ster tijdens zijn lange leven kan doorlopen. Bij ijzer bereikt het massatekort waarop de omzetting van massa in energie middels kernfusie of kernspijting is gebaseerd zijn maximale waarde;

voor nog zwaardere kernen kost kernfusie energie in plaats van die te leveren.

Verhoogt men nu in gedachten (of tegenwoordig: in een computer) de centrale dichtheid van zo'n uit-geëvolueerde ster, dan blijkt dat er voor iedere waarde van de centrale dichtheid één mogelijke combinatie van grootte en massa van de ster is waarbij de druk in de ster weer juist in staat is overal de eigen gravitatiekracht op te heffen, dus waarbij de ster niet door zijn eigen gewicht inéénzakt of door een te grote druk uiteen vliegt. In de figuur is de kromme uitgezet die deze mogelijke combinaties geeft met de centrale dichtheid als parameter.

De precieze waarden die de kromme aangeeft voor de massa en de straal van een ster in evenwicht bij die centrale dichtheid, zijn weliswaar enigszins afhankelijk van de theorie die men in de computer stopt en de gemaakte vereenvoudigingen (bijvoorbeeld: geen rotatie van de ster, geen magnetisch veld), maar de globale vorm van de kromme staat goed vast. Het is echter niet zo dat op ieder punt van deze kromme de dichtheid, massa en straal van een mogelijksterwijs bestaande ster valt af te lezen: alleen aan de eis van hydrostatisch evenwicht is langs de kromme voldaan. Op de gestippelde delen van de kromme zijn de evenwichtstoestanden echter niet stabiel voor pulsatie: verstoringen die de ster in bepaalde trillingen brengen worden niet weer uitgedoofd maar versterkt: de ster trilt uit elkaar. Er kunnen dus alleen sterren verwacht worden langs de voluit getrokken delen van de grafiek. Dit zijn de gebieden van de witte dwergen en de neutronensterren.

De dichtheden, afmetingen en massa's die in de grafiek zijn af te lezen laten zien dat we in deze gebieden wel met zeer bijzondere sterren te maken hebben! De grootte van de witte dwergen is vergelijkbaar met die van een kleine planeet als de aarde; de diameter van een neutronenster bedraagt niet meer dan enige tientallen kilometers; toch komen hun massa's overeen met die van de zon. De inwendige dichtheden zijn dan ook enorm: bij een witte dwerg rond  $10^7$  gram/cm<sup>3</sup>, voor een neutronenster maar liefst  $10^{14}$  gram/cm<sup>3</sup>. Een kubieke centimeter neutronenster materie weegt dus evenveel als een paar duizend volle supertankers samen! Het is duidelijk dat bij dergelijke dichtheden de ideale gaswet niet meer gebruikt kan worden: we krijgen te maken met een bijzondere toestand van materie die 'degeneratie' wordt genoemd. Hierin overheersen quantumeffecten, tengevolge van Pauli's uitsluitbeginsel, boven de temperatuur. Volgens Pauli moeten gelijksoortige deeltjes zich altijd in verschillende toestanden bevinden: binnen een bepaald volume-elementje kunnen zich geen twee deeltjes met dezelfde impuls (massa  $\times$  snelheid) bevinden (en ook geen zonder impuls: dat volgt uit Heisenberg's onbepaaldheidsrelatie). Bij de enorme dichtheden



waarvan hier sprake is, treden dan al grote deeltjessnelheden op alleen om aan dit verbod te voldoen. De snelheden (en dus de druk) worden bepaald door deze 'fermi-impuls' en niet meer door de thermische impuls, dus alleen door de dichtheid en niet door de temperatuur. Dit verschijnsel treedt bij toenemende dichtheid eerst op voor elektronen; de massa van een elektron is veel kleiner dan die van een proton of een neutron, dus zijn thermische impuls is ook geringer en wordt dus eerder overtroffen door de fermi-impuls. In een witte dwerg zijn de elektronen gedegenerereerd maar de atoomkernen (voornamelijk ijzerkernen) nog niet.

De druk wordt vooral door de zeer snel bewegende elektronen geleverd: het is dankzij de gedegenererde elektronen dat een stabiele evenwichtssituatie mogelijk is (men bedenke dat de gravitatiekracht omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand: de massa van de zon gepakt in het volume van een witte dwerg levert enorme gravitatiekrachten).

Bij de nog weer veel hogere dichtheden in neutronensterren zijn ook de neutronen grotendeels gedegenerereerd. Intussen zijn de fermi-impulsen van de elektronen dan zo groot geworden dat zij met de protonen in de atoomkernen reageren en neutronen vormen; dit is het omgekeerde proces van het bèta-verval dat bij gewone dichtheden optreedt: neutron  $\rightarrow$  proton + elektron. Het inwendige van een neutronenster bestaat daarom, zoals de naam al aangeeft, voornamelijk uit neutronen die zeer dicht opeen zijn gepakt en die weer door hun degeneratie over de grote energie beschikken die nodig is om voldoende tegendruk tegen de fantastische gravitatiekrachten te leveren.

Hierbij moet echter rekening gehouden worden met effecten van de algemene relativiteitstheorie: wegens de equivalentie van energie en massa ( $E = mc^2$ ) moet men aan de drukenergie ook massa toekennen. Deze levert dus nog een extra bijdrage op de gravitatiekrachten.

(Dit is de eerste keer dat de algemene relativiteitstheorie 'nodig' is in de natuurkunde, afgezien van kleine effecten als de kleine bijdrage tot de periheliumbeweging van de baan van Mercurius. Dit in tegenstelling tot de 'speciale' relativiteitstheorie die al op vele manieren bruikbaar gebleken is. Bij het rekenen bij deze dichtheden moet men dan ook expliciet vermelden of de (nog onbewezen) algemene relativiteitstheorie dan wel een alternatieve gravitatietheorie (bijvoorbeeld de scalar-tensortheorie) is gebruikt).

Bij grotere dichtheden gaat deze relativistische bijdrage van de druk aan de massa een overheersende rol spelen: als de gravitatiekracht groter is dan de druk krimpt de ster in, maar nu wordt niet, zoals bij een gewone ster, een evenwicht bereikt tussen druk en gravitatie omdat de

gravitatie bij het toenemen van de druk ook weer groter wordt: de druk kan de gravitatie niet meer inhalen.

We krijgen de gravitationele ineenstorting ('collapse'): door de gravitatie krimpt de ster; daardoor neemt de druk, maar ook de gravitatie toe; hij krimpt verder; etc.

Het object is nu zeer bijzonder geworden! Op velerlei wijze speelt de algemene relativiteitstheorie een rol: de enorme gravitatiekracht van de ineenstortende ster werkt in op de vorm van de ruimte rondom en ook op de tijd; de ineenstorting duurt van ons uit gezien maar heel kort: minder dan een seconde, maar voor een meevallende waarnemer op de ster zelf oneindig lang. Bovendien wordt de aantrekkingskracht aan het oppervlak zo immens dat zelfs het licht (dat ook een beetje massa heeft: het heeft immers energie) niet meer aan de ster kan ontsnappen. De ster wordt onzichtbaar: een 'zwart gat'.

Wat er verder mee gebeurt is onduidelijk: wellicht gaat de algemene relativiteitstheorie bij de verder toenemende dichtheid niet meer op (de kromtestraal van de ruimte wordt kleiner dan de doorsnede van een elementair deeltje!); wellicht is de gravitatie gequantiseerd en gaan ook nu quantumeffecten een rol spelen: het is onbekend.

Maar het is wel zo dat de ineenstortende ster met alles erop en eraan voor eeuwig aan ons oog wordt onttrokken.

Al deze theorieën, die in grote lijnen al voor de tweede wereldoorlog waren geformuleerd, samenvattend zien we dat er voor sterren drie eindstadia zijn waarin zij tot lengte van dagen kunnen vertoeven: witte dwerg, neutronenster of voortdurende zwaartekrachts-ineenstorting leidend tot een onzichtbaar zwart gat. Hoe kunnen dergelijke sterren gevormd worden, en hoe kunnen wij ze, zo ze al bestaan, waarnemen? De figuur geeft aan, dat neutronensterren en witte dwergen geen massa's hebben groter dan ongeveer 1.5 zonsmassa. Dit houdt in dat zwaardere sterren massa moeten verliezen om als een van deze objecten te kunnen eindigen. Zij doen dat door middel van een supernova-explosie: het catastrofale eindpunt in de thermonucleaire evolutie van een zware ster, waarbij de binnenste delen van de ster imploderen tot neutronenster of zwart gat, en de buitenste lagen van de ster worden weggeblazen en het interstellair medium verrijken met de tijdens de explosie gevormde zware elementen. Dit is alles theorie, zij het al in aanzienlijke mate tot in details uitgewerkt; de astronomie wacht al lang op een nieuwe supernova-explosie, liefst dichtbij van een goed bekende ster. Hoewel men schat dat er ongeveer iedere 30 jaar eentje in onze melkweg hoort plaats te vinden hebben we al sinds Kepler moeten wachten! Alleen zware sterren, voor welke de evolutie ook tijdens de langdurende fase van kernfusie anders en sneller verloopt dan voor lichte sterren, eindigen in een supernova, waarbij de zwaarste dan een

zwart gat kunnen produceren. De lichtere sterren (minder dan drie zonsmassa's) worden witte dwergen, waarschijnlijk via een stadium waarin zij planetaire ringniveaus afscheiden.

Witte dwergen zijn reeds ongeveer zestig jaar bekend: onze oudlandgenoot Luyten heeft er duizenden ontdekt. Uit de storingen die witte dwergen in een dubbelsterpaar (Sirius) op de baan van de begeleider leveren was hun grote compactheid al gemeten; het was een triomf voor de geschetste berekeningen aan evenwichtssituaties van sterren van gedegenererde materie dat daaruit hun bestaansrecht volgde.

Neutronensterren en zwarte gaten hebben echter sinds de dertiger jaren een strikt hypothetisch bestaan geleid als mogelijke eindstadia van zware en hele zware sterren, voorspeld maar nimmer waargenomen. In deze situatie wordt nu door de pulsars en de röntgendubbelsterren verandering gebracht.

Terug naar de pulsars: al in het eerste artikel stelden Hewish en de zijnen dat slechts witte dwergen en neutronensterren als verklaring in aanmerking kwamen. De pulsvormige radioemissie zou dan veroorzaakt kunnen worden door rotatie of pulsatie (dat is wisselend krimpen en uitdijen, welk gedrag we kennen van bijvoorbeeld de Cepheïden en de RR Lyrae-sterren). In dat eerste artikel kon nog geen keuze worden gemaakt tussen een witte dwerg of een neutronenster. Met de ontdekking van de zo kort periodieke Krab-pulsar werd een roterende witte dwerg onmogelijk: die zou bij zo'n grote rotatiesnelheid (dertig maal rond per seconde) uiteenspatten. Anderzijds is de grote spreiding in pulsperiodes en de geleidelijke afname daarin moeilijk met pulsatie te verklaren: het als werkhypothese aanvaarde model van een radiopulsar is een snel roterende neutronenster, waarbij door een nog onbegrepen mechanisme slechts in bepaalde richtingen straling wordt uitgezonden zodat net als bij een vuurtoren de rondzweepende bundel zich aan ons als flitsen manifesteert. De langzame afname van de pulsperiode duidt er dan op dat de rotatie langzaam geremd wordt door impulsoverdracht aan het omringende medium, waarschijnlijk door een meedraaiend intens magnetisch veld.

Kennelijk is dat de bron van energie en deeltjesversnelling die in de Krabnevel gemist werd; inderdaad blijkt de afname van de rotatie-energie van de neutronenster, gemeten uit de toename van de periode, in grootteorde overeen te komen met het gemiste bedrag.

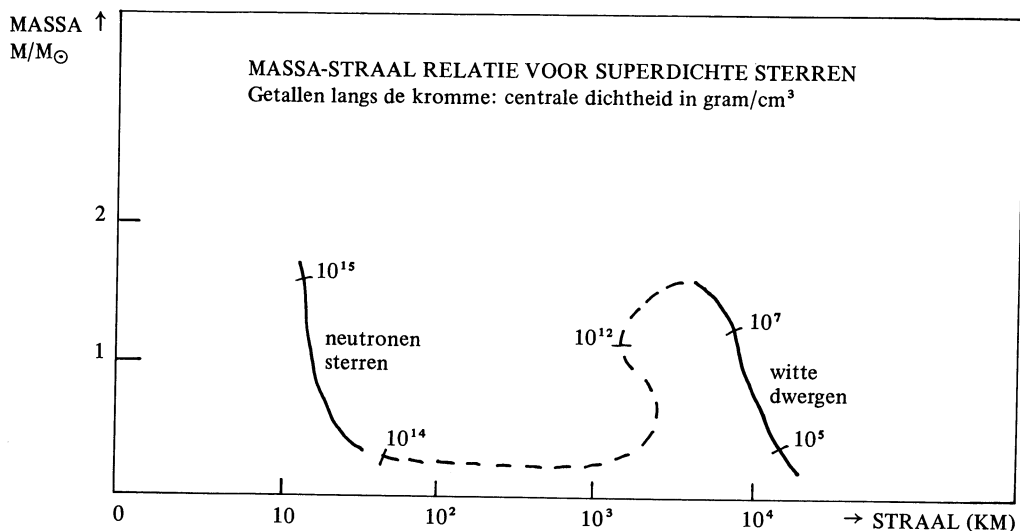
De ontdekking van de Krabpulsar lijkt dan schitterend het beeld te bevestigen van een bij een supernova-explosie gevormde neutronenster die rotatie-energie verliest aan zijn omgeving en zo langzamer draait naarmate hij ouder wordt. Zelfs de vermelde 'pulsar-hik' kan men verklaren: het lijkt waarschijnlijk dat een neutronenster wordt omgeven

door een laag kristallijn ijzer. Een kleine verschuiving daarin ('sterbeving') kan dan voldoende zijn om de rotatie plotseling te versnellen.

Bij de röntgendubbelsterren kan men de enorme aan röntgenstraling uitgezonden energie begrijpen aan de hand van het dubbelster karakter: waarschijnlijk verliest de normale ster (veelal een superreus) massa aan zijn compacte begeleider: materie valt van de ster op de neutronenster. Berekeningen laten zien dat het gas door de grote snelheid die het dan al vallend krijgt röntgenstraling zal uitzenden; slechts weinig materieoverdracht ( $\sim 10^{-9}$  zonsmassa/jaar) is reeds voldoende om de grote röntgenintensiteiten te verklaren. Massaoverdracht tussen de componenten van een dubbelster is overigens niets nieuws en volgt uit de berekeningen voor gewone sterevolutie toegepast op een nauw dubbelster paar: de zwaarste, snelst evoluerende ster zal het eerst het rode reuzen stadium bereiken waarin hij vele malen zo groot wordt. Dreigt hij dan uit de baan van zijn nog niet zo ver gevorderde begeleider te puilen dan tonen de berekeningen dat hij materie aan deze zal verliezen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij Algol. Een hier op lijkende evolutieberekening voor röntgendubbelsterren is gegeven door Van den Heuvel en Heise van het Utrechtse Sterrenkundig Instituut: een heel zware component van een dubbelster-paar is volledig uit-geëvolueerd en via een supernova-explosie tot een neutronenster of een zwart gat geworden; zijn wat lichtere begeleider is pas kort geleden (enige duizenden jaren?) uitgedijd en verliest nu materie welke aanleiding geeft tot de röntgenemissie.

Bijzonder boeiend is dan in het bijzonder Cyg X-1. Zoals we zagen bedraagt diens massa tenminste 3 zonsmassa's. Een stabiele neutronenster kan echter niet zwaarder zijn dan ongeveer 2 zonsmassa's omdat dan de drukenergie gelijk wordt aan de rustmassaenergie van de materie in de ster. Men concludeert daaruit dat deze bron waarschijnlijk een zwart gat vertegenwoordigt. Hoewel zelf onzichtbaar, manifesteert het zich door zijn aantrekkingskracht op zijn begeleider en de verhitting van de materie die het daarvan opslorpt. Deze materie is dus naderhand voor ons onzichtbaar; wij zien de röntgenstraling die op nog flinke afstand van het zwarte gat wordt uitgezonden.

Op dit moment kennen we reeds een tweede mogelijk zwart gat: de bron SMC X-1 die zich in de kleine Magelhaense wolk (een klein satelliet-melkwegstelsel van de melkweg) bevindt, zodat zijn afstand goed bekend is. Het is eveneens een röntgendubbelster met een superreus als zichtbare component en een massa die waarschijnlijk te groot is voor een neutronenster. En wellicht zal onze eigen ANS er nog verscheidene bij ontdekken.



De massa, straal en centrale dichtheid van hypothetische evenwichtsconfiguraties voor sterren met grote centrale dichtheid bij afwezigheid van thermonucleaire reacties.

De gestippelde delen van de kromme slaan op configuraties die niet stabiel zijn voor pulsatie. De massa (verticale as) is gemeten in zonsmassa's.

#### Literatuur

##### A. Wetenschappelijke overzicht artikelen met veel literatuurverwijzingen:

- theorie eindstadia: J. A. Wheeler 1966 *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 4, p 393.
- neutronensterren: A. G. W. Cameron 1979 *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 8, p 179.
- radiopulsars: A. Hewish 1970 *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 8, p 265; M. Ruderman 1972 *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 10, p 427.

##### B. Populair-wetenschappelijke artikelen in het Nederlands:

- alle onderwerpen: C. de Jager en E. P. J. van den Heuvel, boek: 'Ontstaan en levensloop van sterren.' 1973 Thieme, Zutphen.
- radiopulsars: R. van den Nieuwenhof en J. Rosenberg, 1969, *Hemel en Dampkring* 67, p 227.
- neutronensterren: J. Heise, 1970, *Hemel en Dampkring* 68, p. 75.
- zwarte gaten: J. Heise, 1971, *Hemel en Dampkring* 69, p. 29.
- Cyg X-1: Tj. de Vries en E. P. J. van den Heuvel, *Zenit*, februari 1974, p. 17



The following information is provided for your reference. It is intended to be a general overview of the project and does not constitute a contract. The project is a joint venture between the University of California, San Diego and the National Aeronautics and Space Administration. The project is a research and development effort to develop a new type of aircraft engine. The project is being funded by the National Aeronautics and Space Administration. The project is being managed by the University of California, San Diego. The project is being conducted at the University of California, San Diego. The project is being completed by the University of California, San Diego.

