

# Overzicht van het onderzoek aan bolvormige sterrenhopen (1)

## Een uitstervende soort

Frank  
Verbunt

Sterrenhopen zijn niet alleen mooi, ze spelen ook een belangrijke rol in de ontwikkeling van de moderne sterrenkunde. Drie voorbeelden worden in dit artikel besproken: de bepaling van de grootte van ons Melkwegstelsel uit de posities en afstanden van bolvormige sterrenhopen; de bevestiging van de theorie van sterevolutie; en de bevestiging dat het vroege heelal arm was aan zware elementen. In een volgend artikel zal worden besproken hoe modern onderzoek nog steeds grote verrassingen levert, zoals uit het onderzoek aan de bijzondere sterrenhoop  $\Omega$  Centauri blijkt. Een derde artikel behandelt de spectaculaire resultaten van röntgenwaarnemingen van bolvormige sterrenhopen met de Chandra-satelliet.

**H**oe groot is het heelal? De eerste moderne sterrenkundige die doelbewuste waarnemingen deed om deze vraag te beantwoorden was William Herschel (1738-1822). Samen met zijn zus Caroline (1750-1848) richtte hij de telescoop op een plek aan de hemel, en telde de sterren in het blikveld. De gedachte hierachter is eenvoudig: als we in een bepaalde richting veel sterren zien, is de rand van het heelal in die richting blijkbaar ver weg. Zien we weinig sterren, dan is de rand dichtbij.

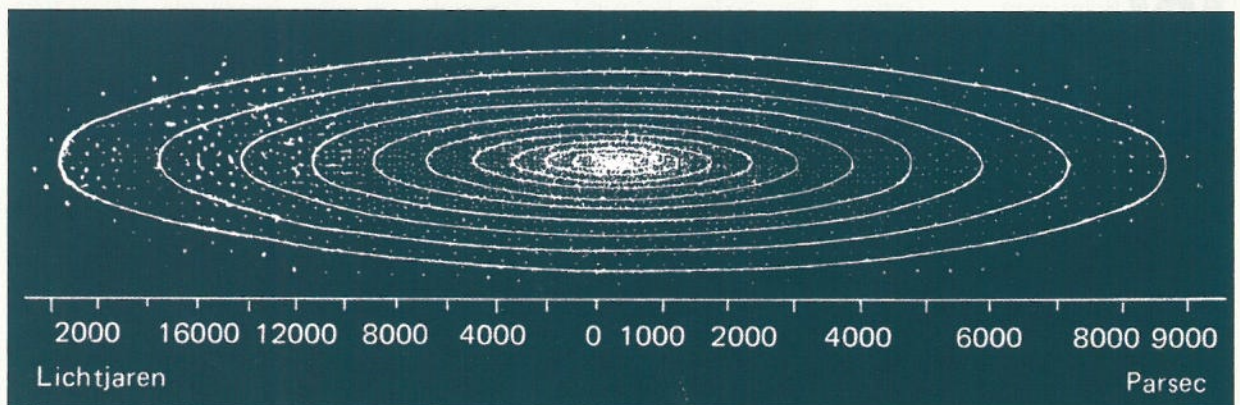
Op deze wijze maakten William en Caroline de kaart van het heelal die in figuur 1 is afgebeeld. In de richting van de Melkweg tellen we veel sterren, loodrecht op deze richting weinig. De Herschels concludeer-

den dan ook dat het heelal *in* het melkwegvlak een grote afmeting heeft en loodrecht daarop een kleine. Een soortgelijke conclusie was overigens al door de filosoof Immanuel Kant (1724-1804) getrokken, maar de Herschels waren de eersten die systematische waarnemingen deden. Omdat de afstanden van de sterren niet bekend waren, is de schaal van de kaart niet bekend. Met andere woorden: uit de figuur kun je concluderen dat het heelal in de richting van het melkwegvlak het grootst is, maar niet *hoe* groot.

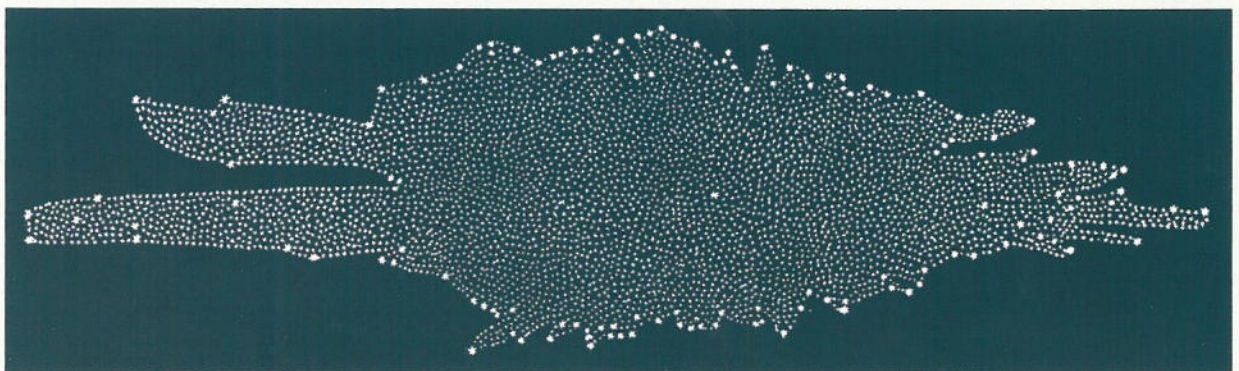
### Mist tussen de sterren

Een verfijning op het werk van de Herschels werd in het begin van de 20ste eeuw aangebracht door onze

landgenoot Jacobus Kapteyn (1851-1922). Deze realiseerde zich dat niet alle sterren even helder zijn: een schijnbaar zwakke ster aan de hemel kan een heldere ster op grote afstand zijn, maar ook een lichtzwak sterretje vlakbij. Kapteyn redeneerde dat we een ster die vlakbij (sterrenkundig gesproken, dus altijd nog vele lichtjaren...) de zon staat, gemakkelijk langs de hemel zien bewegen ten opzichte van de veel verder weg staande sterren. Nu hebben niet alle sterren dezelfde snelheid, maar statistisch gesproken zullen de sterren met een kleine beweging aan de hemel ver weg zijn, en die met een grote beweging dichtbij. Op deze wijze kon Kapteyn in verschillende richtingen aan de hemel bepalen hoe-



1. Vorm van het heelal zoals geschetst door William Herschel in 1785.



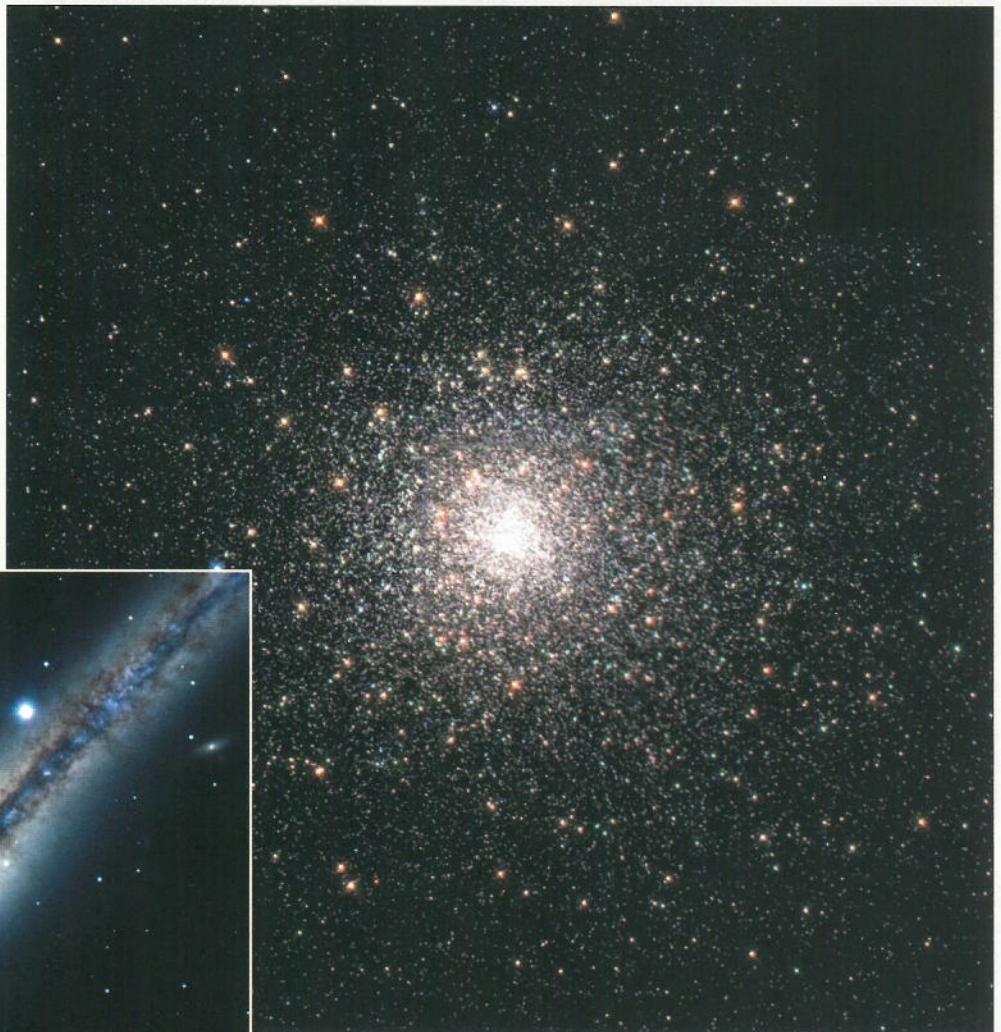
2. Vorm van het heelal zoals bepaald door Jacobus Kapteyn in 1920.



veel sterren er op toenemende afstanden van de zon zijn, en wat de verdeling over de helderheden op elke afstand is. Daarbij vond hij dat de aantallen sterren afnemen met de afstand. Kapteyn produceerde met zijn vele jaren durende werk een nieuwe kaart van het heelal (fig. 2). Omdat hij de afstanden van de sterren (uitgedrukt in lichtjaren) kende, kon Kapteyn ook afmetingen bij zijn kaart zetten.

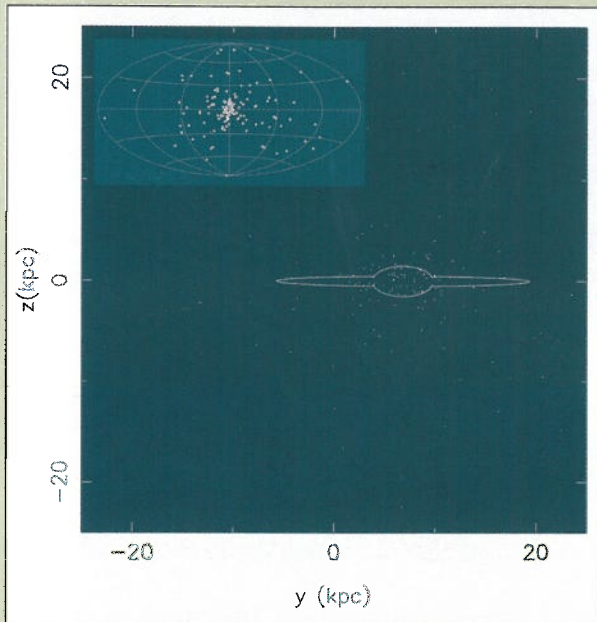
Het werk van Kapteyn maakte internationaal grote indruk, maar veel sterrenkundigen stonden toch ietwat wantrouwig tegenover het feit dat de zon volgens Kapteyn vrijwel in het centrum van het heelal stond. Zij hadden gelijk... De Herschels en Kapteyn waren er van uitgegaan dat alle sterren, tot aan de rand van het heelal toe, met hun telescopen zichtbaar waren. In het begin van de 20ste eeuw begon echter duidelijk te worden dat zich tussen de sterren gas en stof bevindt, dat het licht van de sterren absorbeert. Hoe verder een ster weg staat, des te meer het licht ervan geabsorbeerd wordt.

Om te begrijpen hoe dit de stertelingen beïnvloedt, kunnen we een vergelijking maken met een reiziger die in een bos staat. Deze kan – mits de bomen niet te dicht op elkaar staan – in elke richting kijken hoeveel bomen er te zien zijn, en op die manier de vorm van het bos en de eigen positie erin bepalen – als het helder weer is tenminste. Als het erg mistig is, ziet de reiziger in alle richtingen evenveel bomen, namelijk alleen de meest nabije. Dat de Herschels en

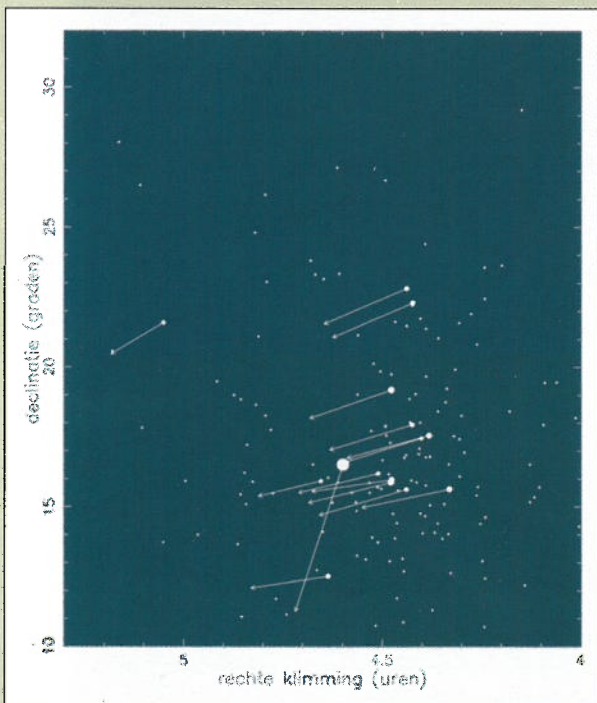


3. Twee bolvormige sterrenhopen (M13 en M80) en het spiraalstelsel NGC4891. Doordat we NGC891 van opzij zien, kunnen we vaststellen dat er donkere stofbanden in het vlak liggen. (Foto's: NOAO, STScI en NOAO)





4. De verdeling van de bolvormige sterrenhopen aan de hemel (inzet); de horizontale lijn is het vlak van de melkweg, het centrum ligt in het midden. Als we de afstanden van de sterrenhopen kennen, kunnen we uit de verdeling aan de hemel de ruimtelijke verdeling afleiden (de verdeling van de sterren is schematisch met een contour aangegeven).



5. De meeste met het blote oog zichtbare sterren in de kop van de Stier horen bij de sterrenhoop van de Hyaden. Ze zijn met stippen van verschillende grootte aangegeven; pijlen geven aan hoeveel ze in honderdduizend jaar bewegen. We zien dat de helderste ster, Aldebaran, in een andere richting beweegt; deze ster hoort niet bij de Hyaden. Leden van de Hyaden die niet met het blote oog zichtbaar zijn, zijn met kleine stippen aangegeven.

Kapteyn tot de conclusie kwamen dat de zon vrijwel in het midden van het heelal staat, is het gevolg van de aanwezigheid van gas en stof – ‘mist’ – tussen de sterren!

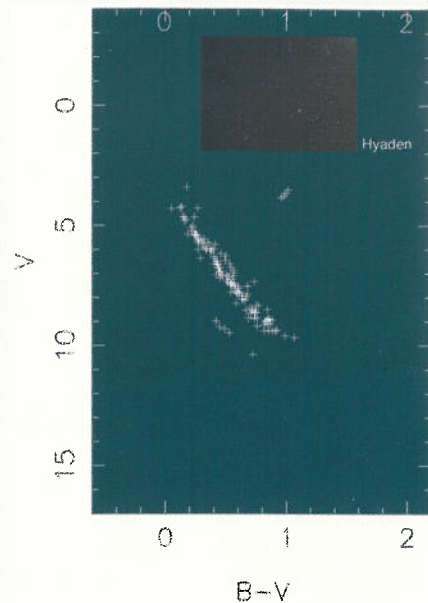
### Cepheiden

Met de toen moderne telescopen had men in het begin van de 20ste eeuw de bolvormige sterrenhopen als zodanig herkend, d.w.z. geconstateerd dat ze uit zeer grote aantallen sterren bestaan. De Amerikaanse sterrenkundige Harlow Shapley (1885-1972) onderwierp deze bolvormige sterrenhopen aan een onderzoek en probeerde hun afstanden te bepalen. Hij gebruikte hiervoor onder meer de net ontdekte cepheiden: uit de periode waarmee deze sterren in helderheid variëren kan hun absolute helderheid worden bepaald. En uit de schijnbare helderheid volgt dan hun afstand.

Shapley had al opgemerkt dat de bolhopen aan de hemel geconcentreerd zijn in de richting van het sterrenbeeld de Boogschutter. Uit zijn afstanden leidde hij nu af dat de bolhopen verdeeld zijn om een centrum, gelegen in de richting van dit sterrenbeeld, op de (sterk overschatte) afstand van 65.000 lichtjaar van de zon. Hij concludeerde dat dit centrum tevens het centrum van het heelal was.

Met het artikel van Shapley was een belangrijke stap gezet naar het goede begrip van de grootte van ons Melkwegstelsel, maar niet alles was hiermee duidelijk. Een voor de hand liggende vraag bijvoorbeeld was waarom het licht van de bolvormige sterrenhopen niet net zo zeer wordt geabsorbeerd door het interstellair gas en stof als het licht van sterren! Een andere kwestie die sterk in de belangstelling stond was de aard van de spiraalvormen die in deze tijd voor het eerst mooi werden gefotografeerd.

Pas toen Edwin Hubble ook in de Andromedanevel enkele cepheiden ontdekte, vielen alle stukjes van de puzzel op hun plaats. Spiraalvormen zijn melkwegstelsels op zeer grote afstanden. Hun afmetingen zijn vergelijkbaar met die van ons eigen Melkwegstelsel. De Herschels, Kapteyn en Shapley hadden dus niet de grootte van het heelal bepaald, maar de grootte van ons eigen Melkwegstelsel. De reden dat het licht van bolvormige sterrenhopen minder geabsorbeerd wordt, is dat het absorberende gas en stof in het melkwegvlak geconcentreerd



6. Hertzsprung-Russell-diagrammen van twee sterrenhopen: de Hyaden en (de veel oudere) M67.

is, terwijl veel bolhopen ver van dit vlak af liggen.

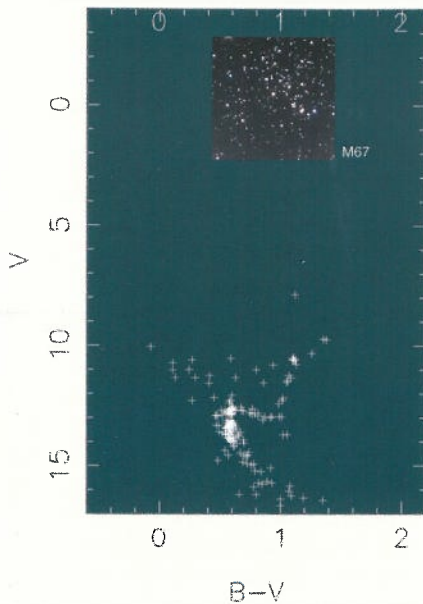
Zelfs nu, in de 21ste eeuw, is het nog moeilijk de precieze mate van absorptie van het licht van bolhopen te bepalen, vooral van juist die bolhopen die dicht bij het centrum van ons Melkwegstelsel liggen. In figuur 4 is de ruimtelijke verdeling van de thans bekende 147 bolhopen van ons Melkwegstelsel weergegeven, volgens de beste afstands-bepalingen. Deze figuur bevestigt de belangrijkste conclusies van Harlow Shapley.

### Open sterrenhopen

Behalve de bolvormige sterrenhopen zien we aan de hemel ook meer onregelmatig gevormde groepen van sterren, de open sterrenhopen. Met het blote oog zichtbare voorbeelden zijn de Hyaden (die de ‘kop’ van de Stier vormen; zie ook *Zenit*, december 2001) en de Pleiaden. Niet alle sterren die we in de richting van een sterrenhoop zien, horen ook bij die sterrenhoop. Er zijn twee methoden om uit te vinden welke sterren wél, en welke níét bij een sterrenhoop horen. De eerste is het bepalen van de beweging van de sterren langs de hemel, door met een grote tussenpoos de onderlinge posities van alle sterren te bepalen. De sterren die bij de hoop horen zullen alle dezelfde beweging hebben. Zoals geïllustreerd in figuur 5 kan op deze manier worden aangetoond dat Aldebaran geen lid is van de Hyaden.

De tweede methode bestaat uit het bepalen van de snelheid (van ons





af) van alle sterren van de sterrenhoop, die immers alle dezelfde snelheid zullen hebben. Als we op deze manier een lijst van betrouwbare leden van een sterrenhoop hebben bepaald, kunnen we de sterren in een Hertzsprung-Russell-diagram zetten, een diagram waarin de helderheid van de sterren als functie van hun kleur wordt weergegeven (voor voorbeelden zie fig. 6). De meeste sterren in een sterrenhoop liggen langs een lijn in dit diagram: de *hoofdreeks*. Voor nabije sterrenhoopen is de hoofdreeks helder, voor verlegene sterrenhoopen zwak.

We kunnen de diagrammen van verschillende sterrenhoopen bijeenbrengen door de helderheden te berekenen die de sterren zouden hebben als alle sterrenhoopen op dezelfde afstand zouden staan. Het is gebruikelijk hiervoor een afstand van tien parsec te nemen. Ook moeten we corrigeren voor de interstellare absorptie en het effect daarvan op de kleur. We zien in het resulterende diagram (fig. 7) dat alle hoofdreeksen nu samenvallen, maar ook dat sommige sterrenhoopen een lange hoofdreeks hebben, en andere – met name bolvormige sterrenhoopen zoals M3 – een korte. De verschillen hebben, zoals we zodadelijk zullen zien, te maken met de leeftijd van de sterrenhoopen.

### 'Elementaire' verklaring

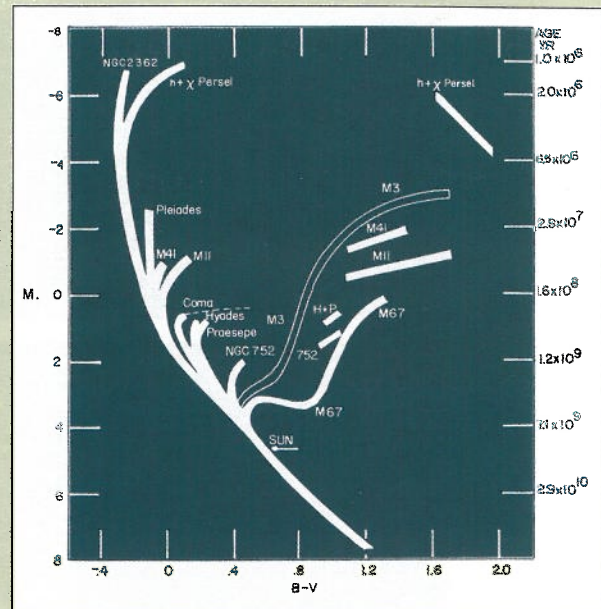
De grote verschillen tussen de sterbevolkingen van sterrenhoopen kunnen we pas verklaren sinds er meer inzicht is verkregen in de structuur en evolutie van sterren. Daardoor weten we dat zware sterren helderder zijn: in het centrum van een zware ster is de materie sterker op

elkaar geperst dan in het centrum van een lichte ster. Hierdoor verloopt de kernfusie van waterstof tot helium in een zware ster veel sneller dan in een lichte ster. En dit heeft weer tot gevolg dat de zware ster niet alleen zeer helder is, maar dat hij ook veel sneller door zijn waterstof heen is. Een ster die tien keer zo zwaar is als de zon, bevat bij geboorte ook tien keer zoveel waterstof, maar hij smelt per seconde ongeveer tienduizend keer meer waterstof tot helium samen dan de zon en leeft dus duizend keer zo kort. De zon zal gedurende tien miljard jaar waterstof fuseren en een hoofdreeksster blijven, een ster die tien keer zo zwaar is, doet dit gedurende slechts tien miljoen jaar! Anderzijds leeft een ster van een halve zonsmassa acht keer zo lang als de zon. Met gedetailleerde berekeningen kunnen we deze schattingen verfijnen en voor elke massa precies uitrekenen hoe lang een ster in zijn binnenste waterstof fuseert. Is die waterstof op, dan zal de ster in relatief korte tijd uitzetten tot een reus, en de buitenlagen afwerpen. Een lichte ster laat dan een witte dwerg achter; een zware ster stort in tot een neutronenster.

Het is dus begrijpelijk *waarom* de hoofdreeksen voor verschillende sterrenhoopen verschillend van lengte zijn. Blijkbaar worden alle sterren in een sterrenhoop tegelijk geboren, zowel de zware sterren als de lichte. In een jonge sterrenhoop zijn alle sterren nog aanwezig. Na tien miljoen jaar zijn alle sterren zwaarder dan tien zonsmassa's opgebrand: in een sterrenhoop van tien miljoen jaar zien we geen zware, blauwe sterren meer. Na honderd miljoen jaar zijn alle sterren zwaarder dan vijf zonsmassa's opgebrand, na een miljard jaar alle sterren zwaarder dan twee zonsmassa's en na vijf miljard jaar alle sterren zwaarder dan 1,25 zonsmassa. De hoofdreeks kalft daarmee langzaam maar zeker af, tot in de oudste sterrenhoopen – en dit blijken de bolvormige sterrenhoopen te zijn, die allemaal ongeveer 11 miljard jaar oud zijn – alleen sterren met een massa minder dan 0,8 zonsmassa nog op de hoofdreeks zitten. De variatie in lengte van de hoofdreeksen is dus een directe bevestiging van de theorie voor kernfusie en de levensloop van sterren.

### Wegrensterren

Het zou goed zijn als we een onafhankelijke bevestiging van boven-

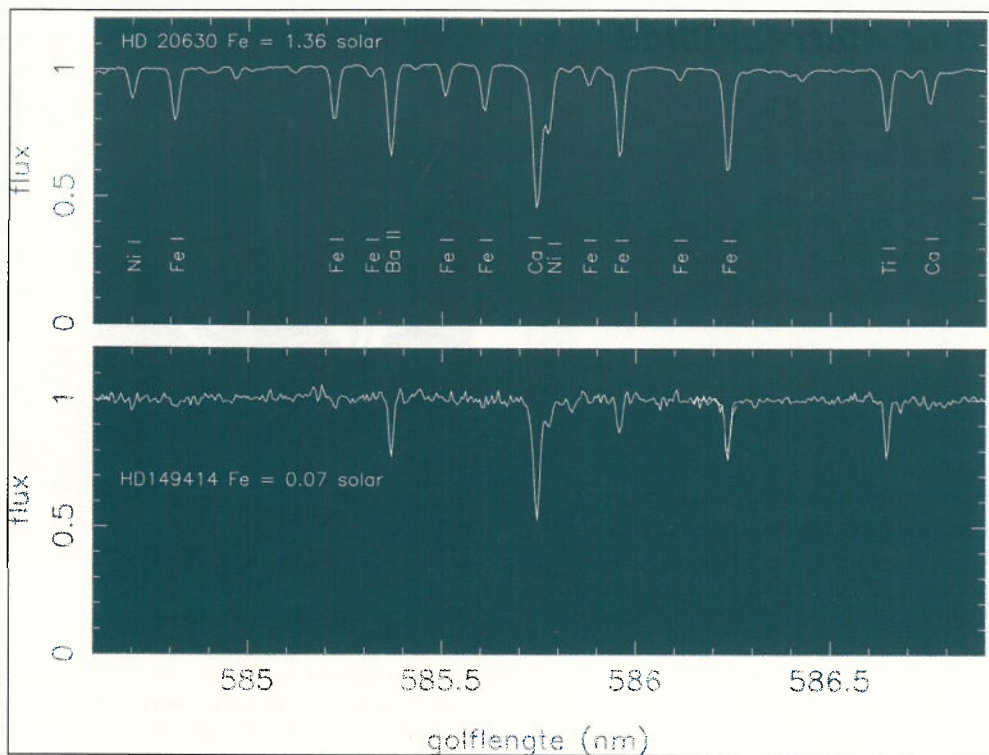


7. Wanneer we de Hertzsprung-Russell-diagrammen voor verschillende sterrenhoopen corrigeren voor interstellare absorptie en voor verschillende afstanden, krijgen we het gecombineerde diagram in deze figuur (afkomstig van Margaret Burbidge en collegae uit 1957). De plek waar de hoofdreeks linksboven eindigt, geeft voor elke sterrenhoop de leeftijd, zoals aan de rechteras is aangegeven.



8. De sterren AE Aurigae,  $\mu$  Colombae bewegen erg snel langs de bemel: de pijlen geven hun verplaatsing in 1 miljoen jaar weer. Als we terugrekenen in de tijd zien we dat deze twee sterren zo'n 2,5 miljoen jaar geleden uit het stervormingsgebied in het zwaard van Orion moeten zijn vertrokken. Mogelijk is ook de ster 53 Arietis uit Orion afkomstig; deze moet dan zo'n vier miljoen jaar geleden vertrokken zijn.





9. Kleine stukjes uit de spectra van twee sterren als de zon. HD20630 heeft een hoger metaalgehalte dan de zon, HD149414 een lager. Daardoor zijn de absorptielijnen van metalen in het spectrum van HD149414 veel zwakker.

staande redenering konden vinden, en die is er in de vorm van enkele zogenaamde wegrensterren bij de jonge sterrenhopen in Orion (fig. 8). De sterren AE Aurigae en  $\mu$  Colombae bewegen zich langs de hemel met grote snelheid van de stervormingsgebieden in het zwaard van Orion af. Dit is in de jaren vijftig al door Adriaan Blaauw opgemerkt, en recentelijk door de Leidse sterrenkundigen Hoogerwerf, de Bruijne en De Zeeuw nader onderzocht.

We kunnen uit de snelheid en de afstand tot Orion uitrekenen dat beide sterren ongeveer 2,5 miljoen jaar geleden uit het stervormingsgebied bij het Trapezium in de Orionnevel zijn weggeschoten. (Hoogerwerf en de Bruijne beargumenteren dat de oorzaak van dit wegschieten een botsing tussen twee dubbelsterren was!) Uit het Hertzsprung-Russell-diagram blijkt dat de sterrenhopen waar beide wegrensterren vandaan komen inderdaad een leeftijd heeft van twee à vijf miljoen jaar.

#### Van lichte elementen naar zware

Het onderzoek van de sterrenhopen heeft ons nog wat geleerd, namelijk dat er lang geleden, toen het heelal nog jong was, veel minder zware elementen waren dan nu. Met zware elementen bedoelen we hier alle elementen zwaar

der dan waterstof en helium. Gewone elementen als koolstof, zuurstof en stikstof zijn zware elementen, maar ook elementen als kiezel (silicium), ijzer, goud, tot aan uranium toe.

Om te weten te komen welke elementen in een ster voorkomen, bestuderen we het spectrum van een ster, waarin het sterlicht in de afzonderlijke golflengten is uiteengegafeld. Een klein stukje van zo'n spectrum zien we in figuur 9. Op een aantal golflengten is het licht van de ster zwakker dan op andere, doordat in de atmosfeer van de ster atomen zitten die het licht op die golflengten absorberen. In het voorbeeld van figuur 9 zien we absorptielijnen die voornamelijk worden veroorzaakt door ijzer, en ook nog wat nikkel-, calcium- en bariumlijnen. Het ijzer, nikkel en calcium is neutraal, dat wil zeggen dat deze atomen al hun elektronen nog hebben; het barium is een elektron kwijt. In haar proefschrift, dat wel het meest briljante proefschrift uit de geschiedenis van de sterrenkunde wordt genoemd, toonde Cecilia Payne (1900-1979) aan dat de sterkte van de lijnen vooral van de temperatuur van de steratmosfeer afhangt. Hierop voortbouwend lieten Marcel Minnaert (1893-1970) en Anton Pannekoek (1873-1960) zien hoe uit de sterkte van de verschillende lijnen kan worden afgeleid hoeveel ijzer, calcium enz. er in de steratmosfeer zit.

Het onderste spectrum in figuur 9

vertoont veel zwakkere lijnen dan het bovenste, hoewel de ster in kwestie dezelfde temperatuur heeft als de ster van het bovenste spectrum. De oorzaak voor de zwakte van de lijnen is dat de ster veel minder ijzer, calcium, nikkel en barium bevat: ongeveer twintig keer zo weinig als de ster van het bovenste spectrum.

Bij het onderzoek van bolvormige sterrenhopen is gebleken dat de sterren erin veel minder zware elementen bevatten dan de zon. Alle sterren in een bolhoop hebben hetzelfde 'metaalgehalte', maar dit gehalte is verschillend voor verschillende sterrenhopen, variërend van honderden keren minder tot tien keer minder dan de zon. We wisten al dat bolvormige sterrenhopen erg oud zijn en kunnen dus concluderen dat er vroeger, toen de bolvormige sterrenhopen gevormd werden, veel minder zware elementen in het heelal waren dan nu! (Sommige sterrenhopen vertonen ook interne verschillen in metaalgehalte, zoals  $\Omega$  Centauri die in het tweede deel van dit artikel zal worden besproken.)

Het onderzoek van bolvormige sterrenhopen bevestigt daarmee een voorspelling van de theorie voor het ontstaan van het heelal. Volgens deze theorie zijn in het prille begin alleen de lichtste elementen waterstof en helium ontstaan. De eerste sterren in het heelal bestonden dus uitsluitend uit deze beide elementen – overige elementen zijn in sterren aangemaakt. Bij elke generatie sterren komen er meer zware elementen bij.

Volgens de meest recente bepalingen hebben de bolvormige sterrenhopen van ons Melkwegstelsel allemaal een leeftijd van ongeveer elf miljard jaar. De leeftjdsverschillen tussen de bolhopen zijn klein, niet meer dan een paar miljard jaar. Sommige bolhopen hebben een metaalgehalte dat maar enkele keren lager is dan dat van de zon. Blijkbaar is de productie van zware elementen in het vroege heelal heel snel verlopen: binnen enkele miljarden jaren nam dit gehalte toe van nul tot een derde van de zon. Met andere woorden: het tempo waarin sterren worden gevormd uit het gas en stof tussen de sterren was in het vroege heelal veel groter dan nu. De oorzaak is simpel: het gas begint op te raken! In ons Melkwegstelsel bestaat nog maar zo'n tien procent van alle materie uit interstellair gas en stof; negentig procent ligt opgeslagen in sterren.



## Onderzoek aan bolvormige sterrenhopen (2)

# Krioelende sterren in omega Centauri

Frank Verbunt\*

Na in het eerste artikel de rol van bolvormige sterrenhopen in de 20ste-eeuwse sterrenkunde te hebben bekeken, nemen we in dit artikel de bolhopen zélf onder de loep. Hoe zit een bolhoop in elkaar? Hoe ontwikkelt een bolhoop zich?

**B**olvormige sterrenhopen zijn de troetelkinderen van theoretisch natuurkundigen: hun symmetrische vorm maakt een eenvoudige natuurkundige beschrijving mogelijk, waarmee de waargenomen eigenschappen redelijk verklaard kunnen worden. In de jaren zestig zorgde een preciezere beschouwing van de theorie voor opschudding: bolvormige sterrenhopen zijn instabiel en zouden in elkaar moeten storten, dan wel uiteenvliegen. Pas een decennium later kwam er een mogelijke oplossing, die de klaarblijkelijke stabiliteit van bolhopen – ze zijn ruim tien miljard jaar oud! – kan verklaren. Recente waarnemingen met de Hubble-ruimtetelescoop zorgen opnieuw voor opschudding. Sommige theoretische veronderstellingen blijken niet te kloppen... De waarnemingen laten ook zien dat sommige bolhopen heel anders zijn dan andere; een raadselachtig voorbeeld is de grootste sterrenhoop bij ons melkwegstelsel:  $\omega$  Cen (omega Centauri).

### Een beweeglijk evenwicht

Bolhopen bestaan uit een enorme weelde aan sterren, dicht op elkaar in het midden, minder dicht op elkaar aan de buitenkant. Een natuurkundige die naar een bolhoop kijkt, begrijpt meteen dat de sterren niet stil kunnen staan; zelfs al zouden ze

aanvankelijk stil staan, dan brengt de zwaartekracht ze in beweging. De sterren in een bolhoop bewegen dan ook door elkaar heen, en oefenen een aantrekkingskracht op elkaar uit, die sterker is naarmate de sterren dichter opeen staan. In het centrum van een bolhoop zullen de sterren elkaars aanwezigheid sterker voelen dan aan de rand.

De grootte van een bolhoop hangt af van de totale massa van de sterren en van hun snelheden. Dit is als volgt eenvoudig in te zien. Als de snelheden te klein zijn, zal de zwaartekracht de sterren naar elkaar toe trekken; zijn de snelheden te groot, dan kan de zwaartekracht een beweging naar buiten niet tegenhouden. Alleen als snelheden en zwaartekracht precies op elkaar zijn afgestemd is de straal van een bolhoop constant. In de praktijk betekent dit dat een bolhoop na haar ontstaan in grootte verandert tot de juiste straal is bereikt. Metingen van de snelheden en sterrenmassa's in een aantal bolvormige sterrenhopen zijn met deze theorie in overeenstemming, en vertellen ons meteen dat er geen grote hoeveelheid onzichtbare materie in bolhopen is.

De voortdurende wisselwerking tussen de sterren leidt er volgens de theorie toe dat de sterren na enige tijd allemaal min of meer dezelfde

### Correctie

In het eerste artikel over bolhopen (*Zenit*, februari, blz. 64 e.v.) zijn de eerste twee figuren verwisseld. In de figuur van het melkwegstelsel van Kapteyn is bovendien fout ingetekend; de schaal in parsec is correct. (FV)

bewegingsenergie hebben. Met name betekent dit dat zware sterren gemiddeld een wat kleinere snelheid hebben dan lichte sterren (een vier keer zwaardere ster heeft een twee keer geringere snelheid). Dit verschijnsel wordt *equipartitie* genoemd.

De snelheid van een ster in het midden van de bolhoop zorgt ervoor dat de ster naar buiten vliegt. Als de ster uit het midden is, probeert de zwaartekracht van alle andere sterren samen haar terug te trekken: de snelheid van de ster wordt kleiner, en uiteindelijk valt de ster weer terug naar het midden – om er aan de andere kant weer uit te schieten, waarna het spel zich herhaalt. Een ster met een kleine snelheid komt niet ver uit het midden; een ster met een grote snelheid wel. Omdat zware sterren gemiddeld een geringere snelheid hebben, bewegen ze zich alleen in het middendeel, en alleen de lichtere sterren kunnen de buitengebieden van een bolvormige sterrenhoop bereiken. Dit effect, dat *massasegregatie* wordt genoemd, zorgt ervoor dat de zware sterren in het midden van de sterrenhoop oververtegenwoordigd zijn, en de lichte sterren ondervertegenwoordigd.

### Het evenwicht verstoord

De bovenstaande overwegingen leken tot aan de jaren zestig een goede beschrijving van bolvormige sterrenhopen te leveren. Met name kunnen ze verklaren dat de sterren in het midden dichter op elkaar staan dan aan de rand; en de gemeten variatie in de snelheden van sterren klopt goed met de waargenomen totale massa van de bolvormige sterrenhoop.

In 1960 stak de Franse sterrenkundige Michel Hénon echter een

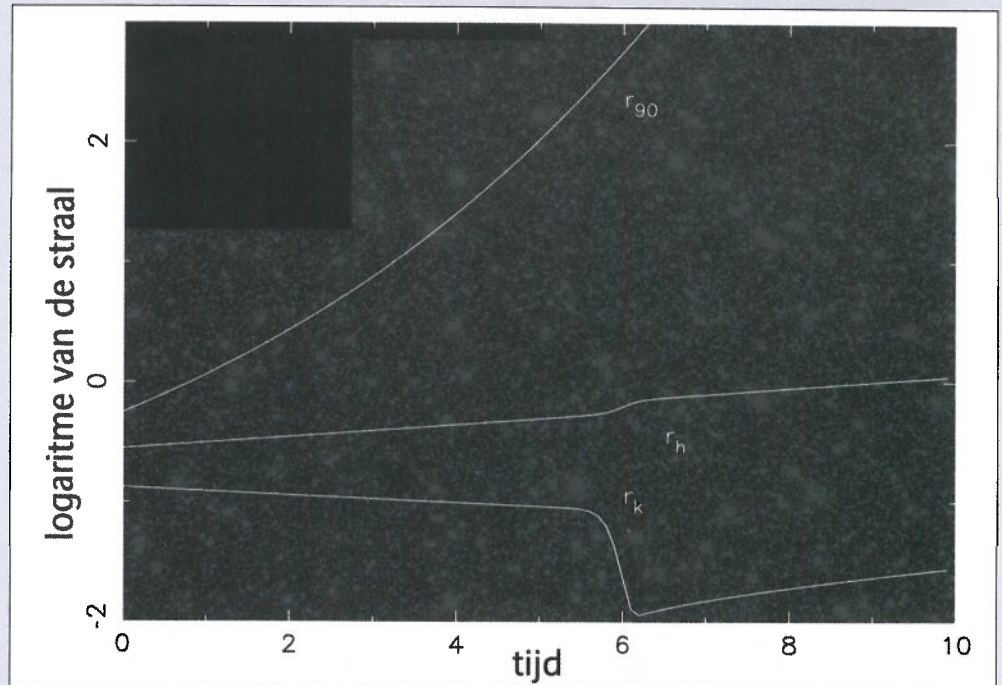
\* Frank Verbunt is hoogleraar sterrenkunde aan het Sterrenkundig Instituut van de Universiteit Utrecht.



1. Miljoenen sterren krioelen door elkaar in  $\omega$  Centauri (links) en in 47 Tucanae. Omega Centauri is een relatief open, weinig geconcentreerde sterrenhoop. 47 Tucanae daarentegen is sterk geconcentreerd. (Foto's: Loke Kun Tan (*StarryScapes*), Bill Keel)



spak in het wiel. Hij liet zien dat een bolvormige sterrenhoop niet stabiel is wanneer men de bovenstaande redenering doorzet. Ietwat vereenvoudigd is zijn argument als volgt. Als een ster nabij het midden van een sterrenhoop door wisselwerking met andere sterren een grote snelheid krijgt, zal de ster uit het midden wegvliegen en een hoger-dan-gemiddelde bewegingsenergie meenemen. De achterblijvende sterren nabij het midden hebben dan een te kleine bewegingsenergie voor hun onderlinge zwaartekracht. De zwaartekracht trekt de sterren dichter naar elkaar, *en daarbij wordt hun gemiddelde snelheid groter!* (Dit verschijnsel, dat de snelheid van een deeltje groter wordt als de totale energie afneemt, is een bijzondere eigenschap van de zwaartekracht. Een bekend voorbeeld is dat van een kunstmaan die door wrijving met de aardatmosfeer snelheid verliest, naar een lagere baan valt, en daarin een hogere snelheid heeft.) Spoedig zal er weer een ster ontsnappen, en in een steeds hoger tempo stort de kern van de bolhoop in. De hogesnelheidssterren die naar de buitengebieden van de bolhoop bewegen, laten deze juist uitzetten, en de instorting van de kern van een sterrenhoop gaat dus gepaard met een



uitdijing van de buitengebieden. Kortom, aldus Hénon, bolhopen zijn niet stabiel en kunnen niet eeuwig bestaan. Het tempo waarin de instabiliteit op gang komt hangt af van de afstanden tussen sterren in het centrum van de sterrenhoop: zijn die groot, zoals in  $\omega$  Cen, dan kan het op gang komen van de instorting langer duren dan de leeftijd van het heelal; we merken er niks van, en de oude theorie is nog steeds bruikbaar.

2. Tijdens de evolutie van een bolvormige sterrenhoop waarin dubbelsterren aanwezig zijn, stort de kern eerst in, om later weer uit te zetten (onderste lijn). De bol die de helft van de totale massa omvat, zet van het begin af aan uit, met een klein hikje tijdens de instorting van de kern (middelste lijn). De bol die 90% van de massa van de bolhoop bevat, zet al snel sterk uit (bovenste lijn). Deze figuur is schematisch, gebaseerd op sterk vereenvoudigde berekeningen.

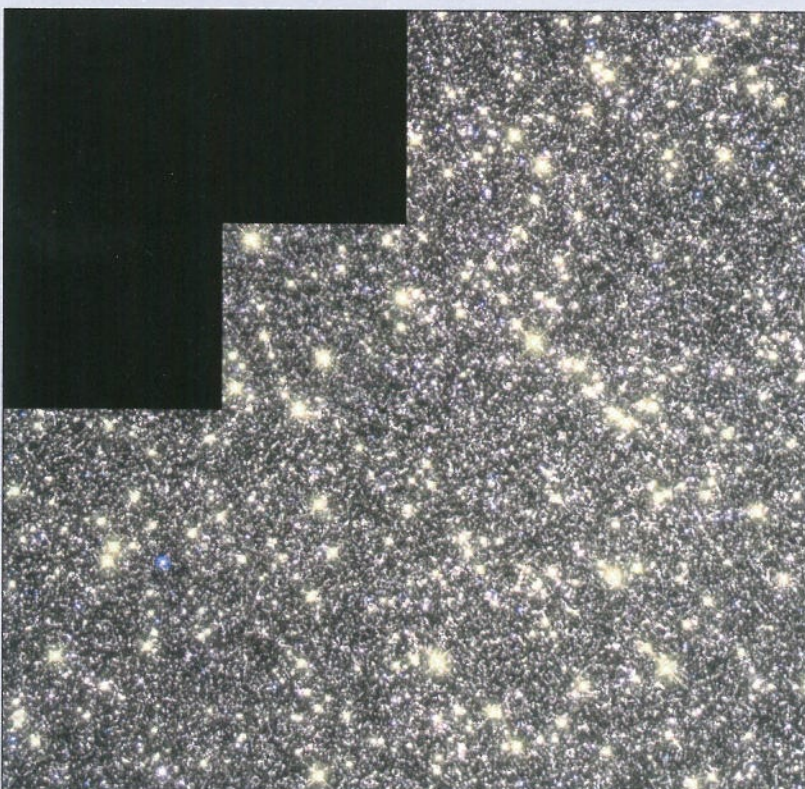
In bolhopen als 47 Tuc en M15 daarentegen is de afstand tussen sterren zó klein (ongeveer een dertigste lichtjaar) dat de kerninstorting al lang had moeten optreden.

Er trad nu een interessante situatie op voor de sterrenkundigen die bolhopen bestuderen. Enerzijds was er een eenvoudige theorie die de bouw van bolvormige sterrenhopen goed leek te beschrijven, anderzijds was er een sluitend bewijs dat die theorie niet goed kon zijn. In afwachting van een oplossing bleven de sterrenkundigen hun theorie voorlopig maar gebruiken.

Het werd nog erger. Uit nieuwe berekeningen bleek dat de massasegregatie, de concentratie van zware sterren naar de kern van de bolhoop, de ineenstorting van de kern dramatisch versnelt. De vinden van een oplossing werd nu wel erg noodzakelijk.

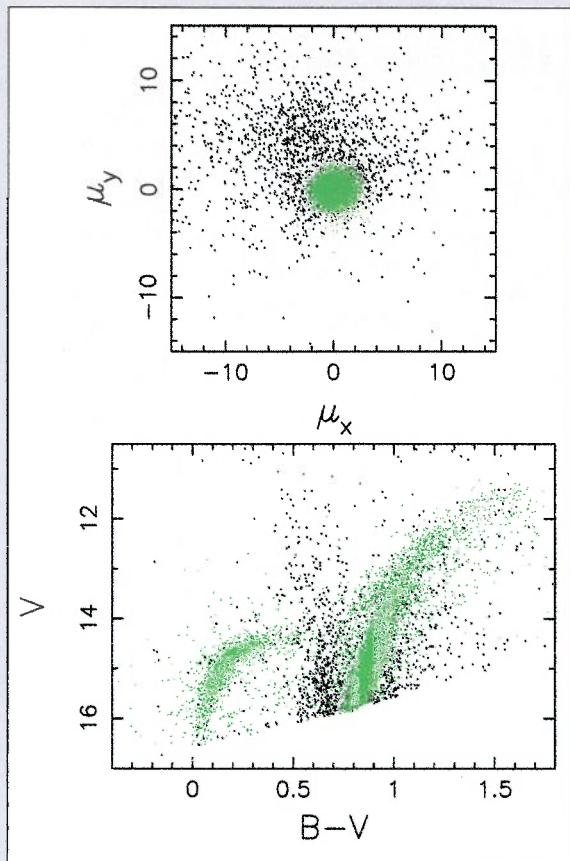
### Dubbelsterren bieden hulp

Dubbelsterren zijn zwaarder dan enkelvoudige sterren, en door de massasegregatie komen ze vooral in het centrum van bolhopen voor. Eerdere zoektochten naar dubbelsterren waren noodgedwongen beperkt tot de buitengebieden van bolhopen, en hadden geen succes. Met de komst van nieuwe tele-



3. Hubble-opname van het centrum van  $\omega$  Centauri. De gele sterren zijn rode (!) reuzen. Op basis van dit soort opnamen, met tussenpozen van enkele jaren, kan de onderlinge beweging van de sterren worden bepaald voor relatief zware, heldere en voor lichte, zwakke sterren.





4. Door vergelijking van foto's uit de jaren '30 en '80 konden Leidse onderzoekers de verplaatsing aan de hemel van de sterren in de richting van  $\omega$  Centauri meten. De bovenste figuur laat deze verplaatsingen zien, met groen gemerkt de sterren die lid van  $\omega$  Centauri zijn. De kleur (B-V) en helderheid (V) van dezelfde sterren zijn in het onderste plaatje afgebeeld. De rechterstrook wordt gevormd door de rode reuzen. De reuzen met een laag metaalgehalte staan aan de linkerkant van de strook, de reuzen met een iets hoger metaalgehalte naar rechts. Het baakje links wordt gevormd door de sterren van de horizontale tak, de linker bovenkant hiervan door de sterren met een laag metaalgehalte.

scopen (met name de Hubble-ruimtet telescoop) en nieuwe instrumenten achter die telescopen (met name ccd's) is het in de laatste twintig jaar mogelijk geworden de sterren in de centra van bolhopen te bestuderen, en daarbij zijn vele dubbelsterren gevonden. In de kern van een bolhoop verwachten we dat er regelmatig een ster dicht langs een dubbelster zal vliegen. Gemiddeld gesproken zullen de energieën van de drie sterren na de passage dicht bij elkaar liggen: zwaartekracht streeft naar equipartitie. In een wijde dubbelster bewegen sterren traag om elkaar; een sneller bewegende ster geeft bij een passage op korte afstand wat bewegingsenergie af aan de twee sterren in de dubbelster, die daardoor verder van elkaar gaan bewegen. In een nauwe dubbelster hebben de sterren juist grote snelheden; een passerende langzamer bewegende ster neemt energie af van de sterren in de dub-

belster, die daardoor dichtter bij elkaar gaan bewegen. Na vele passages zijn er vrijwel alleen nauwe dubbelsterren over; alle wijde dubbelsterren zijn ontbonden. De grens tussen krimpen en uitzetten ligt bij de baanperiode waarin de sterren met dezelfde snelheid om elkaar draaien als enkele sterren door de bolhoop bewegen.

Passages van sterren langs nauwe dubbelsterren leveren dus energie aan de beweging van die sterren. Daarmee kan de aanvankelijke instorting van de kern van een bolhoop worden tegengehouden, en zelfs worden omgekeerd! Dit komt doordat de sterren in een instortende kern van een bolhoop al maar dichtter op elkaar komen, zodat nauwe passages van enkele sterren steeds vaker optreden.

Hiermee is het door Hénon opgeworpen probleem opgelost, in grote lijnen althans, want van de details begrijpen we nog weinig. Zo weten we (nog) niet hoeveel dubbelsterren er in de kern van een bolhoop zijn, en treden er bij nabije passages allerlei processen op (zoals botsingen tussen sterren) die slecht begrepen worden.

Veel van de bolhoopcentra die volgens de theorie van Hénon al zouden moeten zijn ingestort, hebben dit inderdaad al gedaan, maar ze zijn dankzij de dubbelsterren aan volledige instorting ontsnapt, en al weer een beetje uitgezet. Een voorbeeld is M15. Van andere sterrenhopen, zoals 47 Tuc, weten we niet zeker of ze net vóór of net na een kerninstorting zijn. Volgens sommige (sterk vereenvoudigde) berekeningen is het zelfs mogelijk dat de kern van een sterrenhoop verschillende keren instort en weer uitzet.

#### Een ongewone sterrenhoop: $\omega$ Cen

Omega Centauri is de grootste van alle bolvormige sterrenhopen bij het Melkwegstelsel: hij bevat de meeste sterren en is daarmee ook het zwaarst. In juli 2001 werd in Cambridge (Engeland) een conferentie gehouden over deze bijzondere sterrenhoop, waar verschillende verrassende nieuwe resultaten werden bekendgemaakt.

Bij het onderzoek van een sterrenhoop is het van belang de sterren die echt bij de sterrenhoop horen te scheiden van andere sterren die in dezelfde richting staan. Zoals in het eerste artikel uiteengezet, kan dit gebeuren door de verplaatsing van de sterren aan de hemel, de eigenbeweging, te meten, en door de

snelheid van de sterren van ons af of naar ons toe, de radiële snelheid, te meten: alle bij een sterrenhoop horende sterren hebben (vrijwel) dezelfde eigenbeweging en radiële snelheid, terwijl sterren die per toeval in de richting van de sterrenhoop staan in het algemeen andere eigenbewegingen en snelheden zullen hebben.

Floor van Leeuwen van het Royal Greenwich Observatory en Rudolf le Poole uit Leiden bespraken foto's van  $\omega$  Cen genomen tussen 1931 en 1935 en tussen 1978 en 1983. Door de posities van ongeveer 40.000 sterren te vergelijken, kon uit de eigenbewegingen worden afgeleid dat er 9256 sterren lid van  $\omega$  Cen zijn. Doordat  $\omega$  Cen zo groot is, moest bij deze analyse rekening worden gehouden met enkele subtiele effecten – bovenop alle problemen die het werken met foto's altijd al met zich meebrengt! (Zie kader 'Wie zijn lid?').

Na jarenlang nauwkeurig werken heeft de Leidse groep nu een goed Hertzsprung-Russell-diagram van  $\omega$  Cen kunnen maken. In dit diagram staan de helderste sterren – de zwakere sterren zijn op de foto's niet meetbaar. Dit diagram toont enkele eigenaardigheden, die men vroeger al wel had gevonden, maar die nu veel beter zijn vastgelegd. In de eerste plaats zien we dat de reuzentak erg breed is – vergelijk dit met de reuzentak van 47 Tuc! De positie van de reuzentak in het Hertzsprung-Russell-diagram hangt af van het metaalgehalte van de reuzen. In 47 Tuc hebben alle reuzen (en waarschijnlijk alle sterren) hetzelfde metaalgehalte. De breedte van de reuzentak van  $\omega$  Cen wijst erop dat de sterren in deze bolhoop verschillende metaalgehalten hebben. Meer specifiek hebben de sterren aan de linkerkant van de reuzentak een laag metaalgehalte, en rechts hiervan een hoger gehalte.

Het is in het verleden wel voorgesteld dat  $\omega$  Cen is ontstaan door het samensmelten van twee bolvormige sterrenhopen. In dat geval zouden we echter twee afzonderlijke reuzentakken moeten zien, en niet één enkele brede. De breedte van de reuzentak wijst erop dat er een heel scala aan metaalgehalten in  $\omega$  Cen aanwezig is. Dit is bevestigd met spectra van de reuzen, waaruit blijkt dat het metaalgehalte varieert van 0,3% tot 30% van het metaalgehalte van de zon. Soortgelijke conclusies kunnen worden getrokken uit de breedte van de subreuzentak: de sterren aan de bovenkant hebben



een laag, de sterren aan de onderkant een hoger metaalgehalte. Vanwege de grootte van  $\omega$  Cen is ook wel gesuggereerd dat het niet een gewone sterrenhoop is, maar de overgebleven kern van een kapot gerukt sterrenstelsel. In dat geval verwachten we ook sterren met een extreem laag metaalgehalte, 0,1% van de zon. Dat zulke sterren niet zijn gevonden, bewijst dat  $\omega$  Cen wel degelijk als bolhoop is geboren. Het blijkt dat de metaalrijke sterren meer in het centrum van  $\omega$  Cen zitten, en ten zuiden daarvan. Ze roteren niet om het centrum van de sterrenhoop, in tegenstelling tot de metaalarme sterren. Het centrale deel van de bolhoop is wat afgeplat, de buitengebieden zijn rond. Deze verschillen tussen metaalrijke en metaalarme sterren zijn onverklaard.

Ivan King, van de Berkeley-universiteit, heeft  $\omega$  Cen waargenomen met de Hubble-ruimte-telescoop.  $\omega$  Cen is zo groot, dat alleen kleine stukken ervan in een enkele opname van de Wide Field Camera van de HST passen. Tegen dit nadeel weegt de unieke nauwkeurigheid van de waarnemingen op: uit opnamen die met slechts enkele jaren tussentijd zijn gemaakt, kan de eigenbeweging van de sterren al nauwkeurig worden gemeten. De nauwkeurigheid is zelfs zo groot dat de bewegingen van de sterren in  $\omega$  Cen ten opzichte van elkaar kunnen worden gemeten, en daaruit kwam een grote verrassing naar voren. De sterren met een hoge snelheid blijken niet in equipartitie

met de andere sterren, d.w.z. relatief zware sterren zijn hun snelheid niet kwijt geraakt aan de lichtste sterren. Achteraf gezien kunnen we dit wel begrijpen: de wisselwerking tussen sterren treedt vooral op in het centrale, dichtere gedeelte van de sterrenhoop. Sterren met een grote snelheid brengen echter het grootste deel van de tijd in de buitengebieden van de bolhoop door, waar de wisselwerking klein is: daardoor komen ze niet in evenwicht. Alle oude modellen voor de beweging van sterren in bolhopen zijn fout! Het is nog te vroeg om te zeggen hoe belangrijk het verschil is.

De theorie van de sterevolutie heeft wel een mooi succes geboekt bij de verklaring voor de spreiding in metaalgehalten. Verne Smith, uit Arizona, heeft opgemerkt dat zware elementen als europium in het heelal vooral in supernovae worden aangeemaakt, en elementen als barium, lanthaan en zirkonium vooral in lichtere sterren. Dit komt doordat de fusie van elementen in supernovae zeer snel gebeurt, goeddeels tijdens de explosie, maar langzaam in lichtere sterren, tijdens het gewone leven van de ster. Sterren in  $\omega$  Cen bevatten minder europium ten opzichte van ijzer dan andere oude sterren in het Melkwegstelsel. Wanneer we sterren in  $\omega$  Cen die 1% en 3% van het ijzergehalte van de zon hebben met elkaar vergelijken, zien we dat de sterren met het hogere ijzergehalte tien keer zoveel barium per ijzeratoom bevatten. Beide gegevens wijzen erop dat de metalen in  $\omega$  Cen niet uit supernovae komen, maar voornamelijk uit lichtere sterren. Een precieze analyse – op basis van zeer goede spectra – laat zien dat van alle elementen die door supernovae in  $\omega$  Cen werden geproduceerd, ongeveer 85% de cluster heeft verlaten, en slechts 15% door andere sterren is ingevangen – hetgeen te begrijpen is als we bedenken dat bij supernovae de materie met snelheden van meer dan tienduizend kilometer per seconde wordt weggeslingerd. Daarentegen zijn vrijwel alle in lichtere sterren geproduceerde elementen behouden; zulke sterren werpen hun buitenlagen met snelheden van enkele tientallen kilometers per seconde uit. Voor het eerst hebben we daarmee een gedetailleerde verklaring van de oorsprong van de elementen in  $\omega$  Cen.

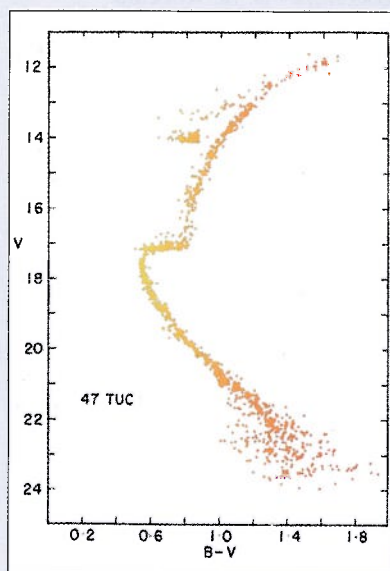
## Wie zijn lid?

Om de subtiliteiten in het bepalen van lidmaatschap van  $\omega$  Cen te begrijpen, maken we een vergelijking met een reiziger op het perron die een sneltrein ziet langsrijden. Als de trein nog ver weg is, komt hij vrijwel recht op de reiziger af: de eigenbeweging van de trein is klein, de radiële snelheid groot. Als de trein langs het perron rijdt, verandert de afstand tot de reiziger niet meer: de eigenbeweging is groot, de radiële snelheid vrijwel nul. De overgang tussen geen en grote eigenbeweging is geleidelijk, en ten gevolge hiervan heeft de voorkant van de trein als die nog buiten het station is een grotere eigenbeweging dan de achterkant!

Ook de overgang tussen grote en geen radiële snelheid is geleidelijk, en hierdoor komt de voorkant van een trein langzamer op de reiziger af dan de achterkant, wat wil zeggen dat de trein (in een zeer nauwkeurige meting) zal lijken te roteren! Op soortgelijke wijze zal de ene kant van een bolhoop, vergeleken met de andere kant, een ietwat grotere eigenbeweging en kleinere radiële snelheid hebben dan de andere kant. Bij kleine bolhopen kon dit effect verwaarloosd worden, maar de moderne metingen zijn zo nauwkeurig, en (de schijnbare afmeting van)  $\omega$  Cen is zo groot, dat het in rekening moet worden gebracht.

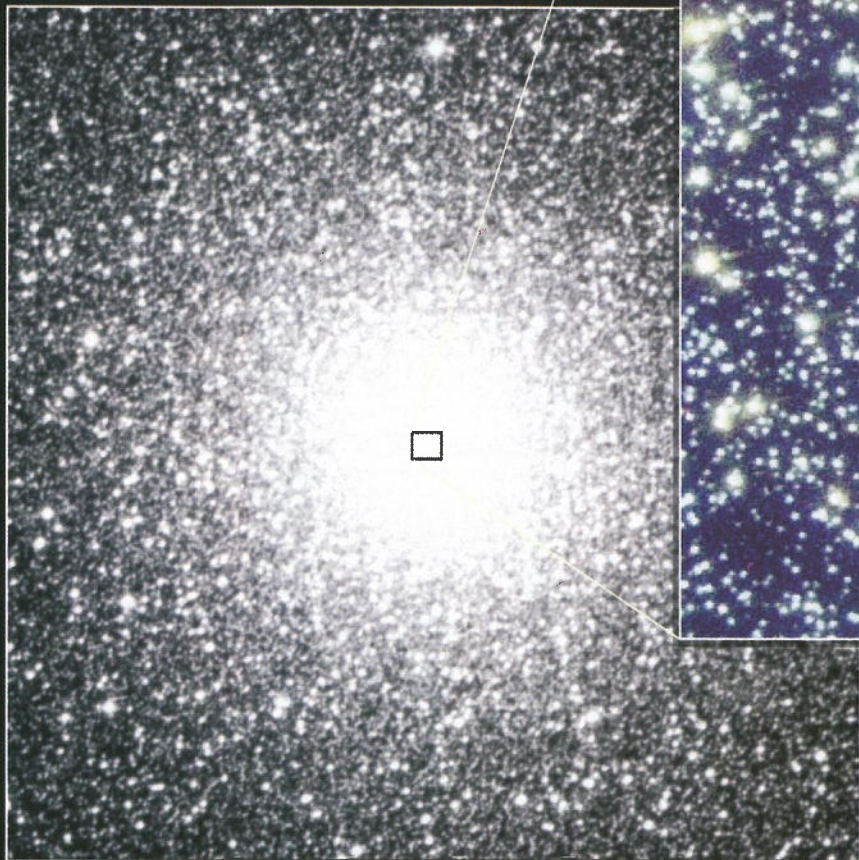
'Wie had kunnen denken dat onderzoek van het bariumgehalte zulke interessante resultaten zou opleveren!', aldus Smith.

Deze verklaring roept echter wel de vraag op waarom  $\omega$  Cen erin geslaagd is de in supernovae en lichte sterren geproduceerde zware elementen vast te houden, terwijl andere sterrenhopen, waarin alle sterren precies hetzelfde metaalgehalte hebben, dat niet konden. Wellicht is dit het gevolg van de grote massa van  $\omega$  Cen? Inmiddels is ontdekt dat  $\omega$  Cen in dezen niet uniek is: ook de bolhopen M54 en Mayall II (bij het sterstelsel M31) hebben verbrede reuzentakken.



5. Kleur-helderheidsdiagram van 47 Tuc. Behalve de reuzentak en de horizontale tak zien we hier ook de hoofdreeks. Merk op dat de reuzentak smal is, in tegenstelling tot die van  $\omega$  Centauri.





Met de Hubble-ruimtetelescoop kunnen zelfs in de kern van 47 Tucanae afzonderlijke sterren worden afgebeeld. De witgroene sterren zijn hoofdreekssterren, de oranje sterren rode reuzen, en de blauwe sterren zijn de blauwe achterblijvers.

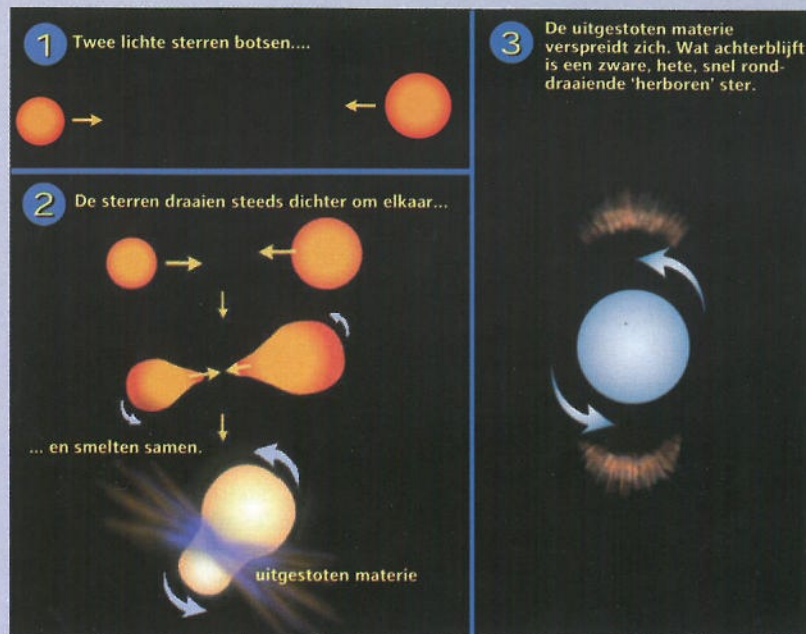
### Onderzoek aan bolvormige sterrenhopen (3)

# Botsingen tussen sterren: blauwe achterblijvers, röntgenbronnen en radiopulsars

In het centrum van een bolhoop krioelen de sterren dicht bij elkaar. Daarbij komen ze soms in botsing of bijna in botsing. Als twee sterren botsen, kunnen ze samensmelten tot een zwaardere ster. Bij een bijna-botsing kunnen neutronensterren of zwarte gaten een dubbelsterpartner vangen. Als een neutronenster of een zwart gat dicht langs een dubbelster komt, kan hij stuivertjewisselen met een gewone ster in een dubbelster. Deze processen verklaren de grote aantallen ongewone sterren in de centra van dichte bolhopen: de blauwe achterblijvers, de heldere en minder heldere röntgenbronnen en de radiopulsars.

\* Frank Verbunt is hoogleraar sterrenkunde aan het Sterrenkundig Instituut van de Universiteit Utrecht.





Als twee sterren met elkaar botsen kunnen ze smensmelten. De resulterende ster is een blauwe achterblijver.

zijn het gewone hoofdreekssterren van meer dan 0,8 zonsmassa. Maar zulke oude sterren met deze massa zouden de hoofdreeks allang verlaten moeten hebben. Er moet dus een bijzondere reden zijn waarom de gevonden sterren, die blauwe achterblijvers of *blue stragglers* zijn gedoopt, op de hoofdreeks zijn achtergebleven.

Een slimme verklaring werd gevonden in de theorie van dubbelsterren. Stel dat in zo'n bolhoop een ster van 1 zonsmassa een dubbelster vormt met een ster van 0,8 zonsmassa. Na vijf miljard jaar zijn alle sterren zwaarder dan 1,2 zonsmassa in de sterrenhoop uitgeblust en na tien miljard jaar zwellen alle sterren van 1 zonsmassa op tot rode reus. In de dubbelster leidt dit ertoe dat de buitenlagen van de ster van 1 zonsmassa overstromen naar de ster van 0,8 zonsmassa, die *daardoor zwaarder wordt!* Na afloop van deze fase is de aanvankelijk lichtste ster de zwaarste geworden en vice versa. De massaoverdracht kan bijvoorbeeld resulteren in een witte dwerg van 0,3 zonsmassa (de voormalige rode reus) en een begeleider van 1,5 zonsmassa. Zo kunnen we in een tien miljard jaar oude sterrenhoop een piepjonge ster van anderhalve zonsmassa aantreffen. Een aantal blauwe achterblijvers in de kern van een bolhoop als 47 Tuc is ongetwijfeld op deze manier ontstaan.

In de dichte kern van een bolhoop komt het echter ook voor dat sterren direct op elkaar botsen. De zwaartekracht helpt daarbij. Als sterren dicht bij elkaar in de buurt komen, wordt hun baan afgebogen door de zwaartekracht die ze op elkaar uitoefenen. Sterren die aanvankelijk op grote afstand van el-

kaar lijken te passeren, worden in hun baan zodanig afgebogen dat ze vlak langs elkaar vliegen. Dit effect wordt zwaartekrachtsfocusering genoemd. Het ligt voor de hand dat een deel van de blauwe achterblijvers in de kernen van bolvormige sterrenhopen het product van zulke directe botsingen zijn. Overigens is men er nog niet in geslaagd uit de waarnemingen een direct bewijs voor sterbotsingen te vinden.

### Heldere röntgenbronnen

In 1970 werd de eerste satelliet gelanceerd die geheel gewijd was aan het onderzoek van röntgenstraling uit het heelal. De leider van het onderzoek met deze satelliet was de tot Amerikaan genaturaliseerde Italiaan Riccardo Giacconi, die mede voor dit onderzoek in 2002 de Nobelprijs voor natuurkunde kreeg. Er werden in het Melkwegstelsel een paar honderd heldere bronnen van röntgenstraling ontdekt. Na enige tijd bleek dat een dozijn daarvan zich in bolvormige sterrenhopen bevond: zo'n vijf procent. Wanneer men bedenkt dat ons Melkwegstelsel zo'n honderd miljard sterren bevat, waarvan slechts een honderdste procent in bolvormige sterrenhopen, is het duidelijk dat bolvormige sterrenhopen een bijzondere omgeving vormen, waarin röntgendubbelsterren relatief vaak voorkomen.

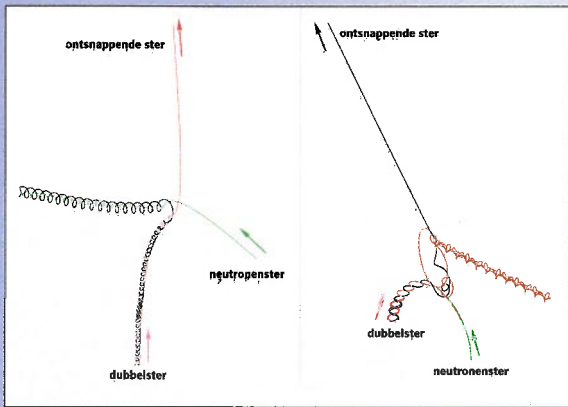
Men begreep al snel dat hierbij botsingen – of liever bijna-botsingen – tussen sterren een rol spelen. Wanneer een neutronenster een andere, gewone ster nadert, wordt deze ster door de zwaartekracht van de neutronenster vervormd, en de energie die daarvoor nodig is komt uit de baanbeweging van beide sterren. Als de sterren

Omdat zware sterren sneller door hun centrale voorraad waterstof heen zijn dan lichte, verwachten we in de oude bolhopen alleen nog lichte sterren te vinden. Alle zware sterren hebben hun leven al beëindigd en alleen hun kern achtergelaten – in de vorm van een zwart gat, een neutronenster of een witte dwerg. De ontdekking dat de hoofdreeks van bolvormige sterrenhopen ophoudt bij sterren van 0,8 zonsmassa bevestigt ons begrip van sterevolutie.<sup>1</sup> De Hubble-ruimtetelescoop heeft in de centra van enkele dichte sterrenhopen grote aantallen blauwe sterren opgespoord. Eerder waren zulke sterren al vanaf de grond waargenomen in oude open sterrenhopen als M67. Zo op het oog

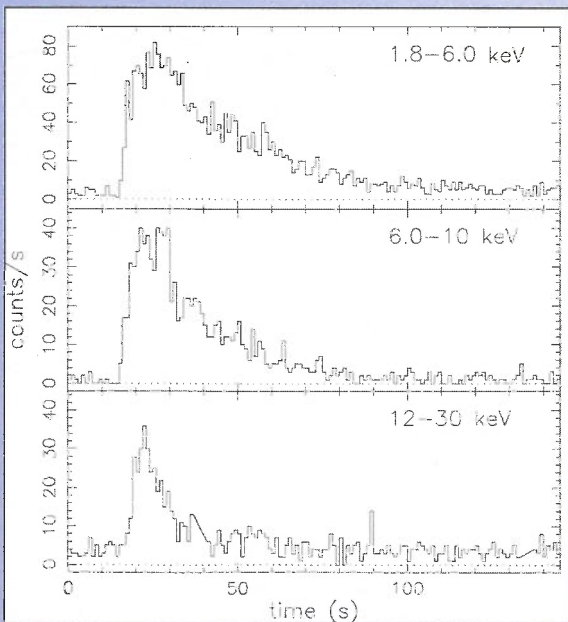
<sup>1</sup>Zie deel 1 van deze reeks artikelen, in het februari-nummer van dit jaar.



dicht genoeg bij elkaar komen, wordt zoveel energie aan de baanbeweging onttrokken dat de sterren niet meer aan elkaars zwaartekracht kunnen ontsnappen: ze vormen een dubbelster. Deze zogeheten *getijdenvangst* gebeurt als de neutronenster tot dichters dan ongeveer drie keer de straal van de gewone ster nadert. Volgens een ruwe schatting zal in een bolvormige sterrenhoop als 47 Tucanae ongeveer één keer per miljard jaar een neutronenster een gewone ster invangen. Als de gewone ster dan materie gaat overdragen naar de neutronenster, licht deze op als een heldere bron van röntgenstraling.



In deze voorbeelden van een directe uitwisselingsbotsing neemt een neutronenster de plaats in van één van de twee sterren van 0,8 zonsmassa in de oorspronkelijke dubbelster. In beide plaatjes is de inkomende neutronenster groen, de inkomende dubbelster van twee 0,8 zonsmassa-sterren is rood/zwart (berkenbaar omdat beide sterren een even grote beweging, in een cirkelvormige baan hebben). Het verloop van de ontmoeting kan verschillen, maar het resultaat is hetzelfde! (Deze figuren zijn gemaakt door Simon Portegies Zwart, Universiteit van Amsterdam.)



Röntgenflits uit NGC6440, waargenomen met BeppoSAX. Flitsen van dit type, die snel stijgen en langzamer dalen, tonen aan dat de bron van röntgenstraling een neutronenster is

Geheel onomstreden is de getijdenvangst overigens niet. Onmiddellijk na de vangst is de baan van de sterren om elkaar heen een zeer langgerekte. Elke keer als beide sterren in het punt van dichtste nadering, het periastron, komen, vervormt de neutronenster de gewone ster opnieuw. Daarbij wordt de ster sterk verhit, en als de vrijgekomen energie niet snel genoeg wordt uitgestraald, kan de ster geheel of gedeeltelijk verdampen. Het is daarom geenszins zeker dat getijdenvangst uiteindelijk in een dubbelster resulteert.

Gelukkig is er een andere manier om een neutronenster in een dubbelster te krijgen: de *uitwisselingsbotsing* tussen een enkele neutronenster en een gewone dubbelster. Na de eerste nadering van de neutronenster vormen de drie sterren gedurende korte tijd een drievoudig systeem, waarbij ze in ingewikkelde banen om elkaar bewegen. Zo'n systeem is niet stabiel, en eindigt ermee dat één van de drie sterren wegschiet, de andere twee in een dubbelster achterlatend. Meestal is het de lichtste ster die wordt weggeschoten, en omdat alle gewone sterren in een bolhoop lichter zijn (namelijk minder dan 0,8 zonsmassa) dan een neutronenster (ongeveer 1,4 zonsmassa), blijft de neutronenster, samen met een gewone ster, achter. Materieoverdracht van de gewone ster naar de neutronenster maakt van de laatste een heldere bron van röntgenstraling.

Uit foto's van bolhopen in zichtbaar licht weten we welke sterk geconcentreerd zijn en welke minder, en daarmee kunnen we voor elke bolhoop uitrekenen hoe vaak er een botsing met een neutronenster optreedt. Piet Hut (van het Institute of Advanced Studies te Princeton) en ondergetekende hebben laten zien dat er in de bolhopen die een heldere röntgenbron bevatten gemiddeld meer botsingen optreden dan in de andere, in overeenstemming met het idee dat zulke röntgenbronnen gevormd worden door de botsing van een neutronenster hetzij met een enkele ster, hetzij met een dubbelster.

Er zijn twee belangrijke verschillen tussen de getijdenvangst en de uitwisselingsbotsing. De getijdenvangst leidt tot dubbelsterren met een korte baanperiode – minder dan een dag –, terwijl de uitwisselingsbotsing het best werkt met wijde dubbelsterren en ook een wijde dubbelster achterlaat. Verder

heeft de dubbelster na een uitwisselingsreactie een snelheid gekregen in tegengestelde richting als waarin de enkele ster is weggeschoten.

In principe zou ook een zwart gat via een getijdenvangst of uitwisselingsbotsing in een dubbelster kunnen komen, maar van alle heldere röntgenbronnen (op één na) in bolhopen zijn inmiddels röntgenflitsen waargenomen: plotselinge, korte stijgingen in de helderheid van een röntgenbron. De groothoekcamera's van BeppoSAX spelen hierbij een belangrijke rol, omdat hiermee flitsen zijn ontdekt van een drietal bolhoopbronnen die slechts heel sporadisch een flits uitzenden. De röntgenflitsen zijn goed verklaard als de plotselinge fusie van helium en waterstof tot koolstof op het oppervlak van een neutronenster. Blijkbaar is geen van de heldere röntgenbronnen in de bolhopen bij ons Melkwegstelsel een zwart gat. In dit verband is de ontdekking interessant van een dubbelster met een zwart gat, XTE J1118+480, die met een snelheid van zo'n 150 km/s boven ons Melkwegstelsel beweegt. De ontdekkers vermoeden dat een zwart gat in een bolvormige sterrenhoop via een uitwisselingsbotsing in een dubbelster kwam, en dat de dubbelster daarbij zo'n grote reactiesnelheid kreeg dat hij uit de bolhoop is ontsnapt!

Met EXOSAT, de Europese satelliet voor röntgensterrenkunde die in de jaren tachtig actief was, werd voor de röntgenbron in de bolhoop NGC6624 een baanperiode van 685 seconden gevonden. Zo'n korte baanperiode kan alleen als beide sterren klein zijn, en de ster die de materie aan de neutronster levert een witte dwerg met een massa van een veertiende zonsmassa is. Mogelijk is zo'n dubbelster ontstaan toen een neutronenster direct op een rode reus knalde, en de botsingsenergie gebruikt werd om de buitenlagen van de reus af te werpen, waarna de kern van de reus in een baan om de neutronster kwam. De kern koelde af tot een witte dwerg, en werd door de zwaartekrachtsstraling langzaam naar de neutronenster gedreven, tot ze materie naar deze ging overdragen.

Dankzij de Chandra-satelliet hebben we sinds kort zeer precieze posities van heldere röntgenbronnen in bolhopen, en dankzij de Hubble-ruimtetelescoop kunnen we nagaan wat voor sterren er op die posities

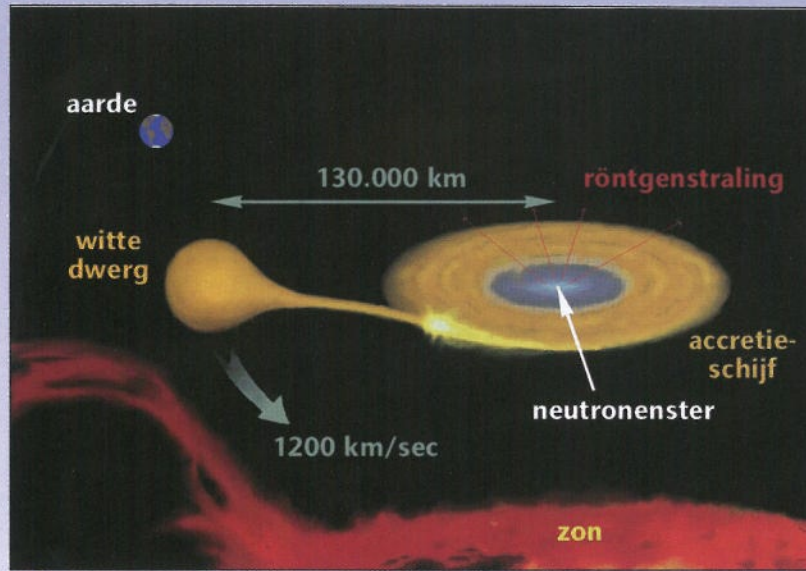


staan. In verschillende gevallen is gebleken dat de sterren in het zichtbare licht zo zwak zijn, dat de begeleider van de neutronenster een witte dwerg moet zijn. Een verrassende ontdekking van Chandra is dat er in de bolvormige sterrenhoop M15 niet één maar *twee* heldere röntgenbronnen vlak bij elkaar staan! Dankzij de gevoeligheid van Chandra kunnen nu ook bolvormige sterrenhopen bij andere sterrenstelsels worden waargenomen. Zo werden bij de elliptische stelsels NGC4697, NGC1399, en NGC4472 respectievelijk 7, 26 en 30 bolhopen als bron van röntgenstraling gedetecteerd. Interessant daarbij is dat sommige van deze bronnen zo helder zijn, dat het vrijwel zeker zwarte gaten in dubbelsterren betreft. Blijkbaar is het wel degelijk mogelijk zo'n dubbelster met een zwart gat in een bolhoop te houden.

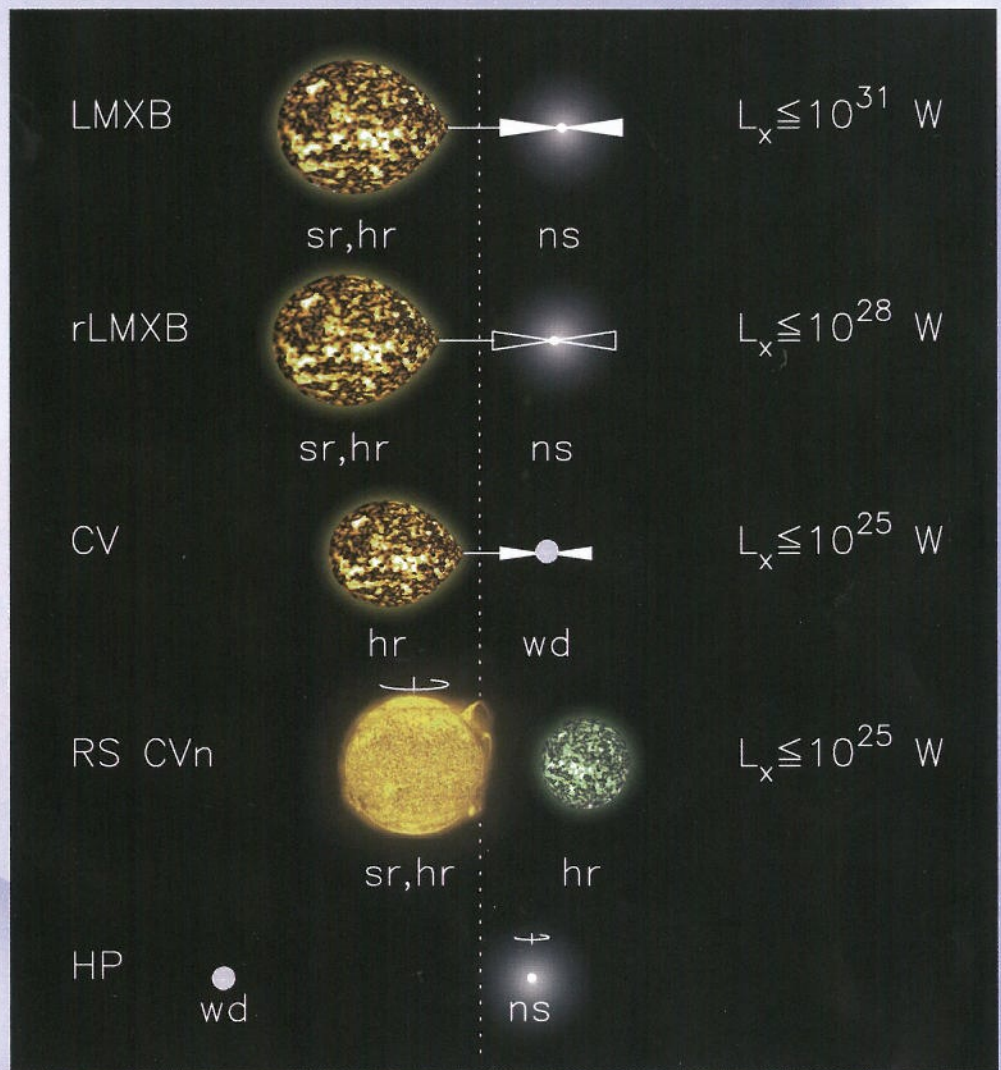
### Zwakke röntgenbronnen

Met de Einstein-satelliet werden in 1983 acht röntgenbronnen ontdekt in bolhopen die duizend keer zwakker zijn dan de heldere bronnen. De ontdekkers van deze bronnen, Joshua Grindlay en Paul Hertz van de Universiteit van Harvard, stelden voor dat dit dubbelsterren zijn waarin een witte dwerg materie van een begeleider invangt. Zulke dubbelsterren worden *cataclysmische variabelen* genoemd, en zijn in het Melkwegstelsel goed bestudeerd. Jan van Paradijs en ondergetekende merkten echter op dat de cataclysmische variabelen in het Melkwegstelsel veel minder röntgenstraling uitzenden dan de met Einstein ontdekte bronnen in bolhopen. We suggereerden dat de zwakke bolhoopbronnen neutronensterren zijn in een toestand van lage activiteit, waarin ze duizendmaal minder materie van hun begeleider ontvangen dan in de actieve toestand. En we lieten zien dat Centaurus X-4 een voorbeeld van zo'n *rustige röntgendubbelster* in het Melkwegstelsel is. Daarmee werd een heftige discussie geopend die vijftien jaar zou duren...

Een belangrijke rol daarin speelde de Duitse röntgensatelliet ROSAT. Deze in 1990 gelanceerde satelliet was nog veel gevoeliger dan de Einstein-satelliet en ontdekte een totaal van 57 zwakke röntgenbronnen verdeeld over 22 bolvormige sterrenhopen. Bovendien nam ROSAT vele bronnen in het Melkwegstelsel waar: rustige röntgendubbelsterren, cataclysmische

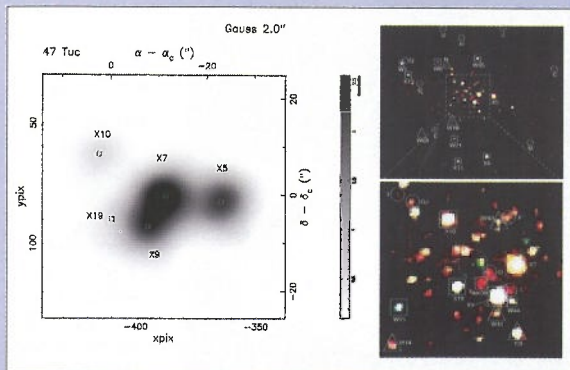


Tekening op schaal van de 11-minuten dubbelster die verantwoordelijk is voor de röntgenstraling uit NGC6624. Een witte dwerg draagt materie over aan (een schijf rond) een neutronenster. De afstand tussen de sterren is minder dan die tussen aarde en maan!



Verschillende typen röntgenbronnen die in bolvormige sterrenhopen voorkomen, met ernaast een aanduiding van de hoeveelheid energie die ze als röntgenstraling uitzenden. Van boven naar beneden: (LMXB) lage-massa röntgendubbelster, waarin een lage-massa subreus- of hoofdreeksster via een schijf materie overdraagt naar een neutronenster (of zwart gat); (rLMXB) rustige röntgendubbelster, waarin een lage-massa ster via een schijf in een zeer laag tempo materie overdraagt naar een neutronenster (of zwart gat); (CV) cataclysmische variabele, waarin een lage-massa ster via een schijf materie overdraagt naar een witte dwerg; (RS CVn) magnetisch actieve dubbelster, waarin lage-massa sterren zo snel roteren (meestal met de baanbeweging mee) dat sterke magnetische lussen uit hun oppervlak steken – het hete gas in die lussen is verantwoordelijk voor de röntgenstraling; (HP) herboren pulsars, waarin een opnieuw tot snelle rotatie gebracht neutronenster röntgenstraling uitzendt via het pulsarmechanisme – meestal in een dubbelster met een witte dwerg.





Links: de ROSAT-opname van het centrum van 47 Tucanae laat een onscherpe afbeelding van een vijftal bronnen zien. De berekende posities van deze bronnen is met vierkanten aangegeven. Rechts: in de Chandra-opname zijn de bronnen veel beter gescheiden. De kleur is een maat voor de gemiddelde energie van de waargenomen röntgenfotonen. Behalve de vijf ROSAT-bronnen vindt Chandra nog vele andere bronnen. X5 en X7 zijn rustige röntgendubbelsterren, met een neutronenster; de andere bronnen zijn cataclysmische variabelen (aangegeven met een vierkant), herboren pulsars (cirkels) of magnetisch actieve dubbelsterren (drieboeken)

variabelen, magnetisch actieve dubbelsterren en herboren radiopulsars. In de eerste plaats bevestigden de ROSAT-metingen aan ruim honderd cataclysmische variabelen in het Melkwegstelsel dat geen ervan zo helder is als de met Einstein ontdekte zwakke bolhoopbronnen; bovendien liet ROSAT zien dat een aantal rustige röntgendubbelsterren in het Melkwegstelsel precies zo helder zijn als deze Einstein-bronnen. De ROSAT-waarnemingen lieten verder zien dat cataclysmische variabelen, magnetisch actieve dubbelsterren en herboren radiopulsars alle in principe helder genoeg kunnen zijn om de zwakste met ROSAT in bolhopen ontdekte bronnen te verklaren. Uit de ROSAT-waarnemingen kon met veel kunst en vliegwerk worden aangetoond dat de röntgenstraling uit de kernen van 47 Tucanae en NGC6397 elk van minstens vijf zwakke röntgenbronnen afkomstig moet zijn.

Met de waarnemingen van Chandra aan een vijftal bolhopen is er nu duidelijkheid gekomen over de aard van de zwakke bronnen. Met Chandra kunnen de al bekende bronnen veel scherper worden afgebeeld, samen met een groot aantal nog zwakkere bronnen. Ook kan Chandra de energieverdeling van de röntgenfotonen bepalen voor de helderste bronnen in twee bolhopen – X5 en X7 in 47 Tuc en X13 in NGC6397 – en deze blijken overeen te komen met de energieverdeling van rustige röntgendubbelsterren. De helderste van de zwakke bronnen in  $\Omega$  Centauri is

eveneens een rustige röntgenbron. De hypothese van Van Paradijs en Verbunt uit 1986 is hiermee gedeels bevestigd. Toch hadden Grindlay en Hertz niet helemaal ongelijk: de bron X9 in 47 Tucanae is met de Hubble-ruimtetelescoop geïdentificeerd met een cataclysmische variabele, hoewel hij meer röntgenstraling uitzendt (in verhouding tot zijn optische helderheid) dan enig bekende cataclysmische variabele in het Melkwegstelsel.

De Chandra-waarneming aan 47 Tucanae bevestigde verder dat herboren radiopulsars als zwakke röntgenbron kunnen worden waargenomen: alle vijftien radiopulsars met een nauwkeurig bekende positie werden als röntgenbron gedetecteerd. Het onderzoek aan zwakke röntgenbronnen in bolvormige sterrenhopen volgt nu een tweeledig plan van aanpak. Met Chandra worden de bolhopen waargenomen om nauwkeurig het aantal en de posities van de zwakke röntgenbronnen vast te stellen. Resultaten zijn gepubliceerd voor vier bolhopen: voor 47 Tucanae, NGC6397, NGC6752, en NGC6440. In deze sterrenhopen zijn 108, 20, 19 en 24 zwakke röntgenbronnen ontdekt. Deze röntgenwaarnemingen worden gevolgd

door analyse van waarnemingen met de Hubble-ruimtetelescoop, om de sterren die verantwoordelijk zijn voor de röntgenstraling ook in zichtbaar licht te bestuderen. Daarbij is inmiddels duidelijk geworden dat veel van de zwakste met Chandra gemeten bronnen cataclysmische variabelen zijn, met verder nog herboren radiopulsars en mogelijk een paar magnetisch actieve dubbelsterren.

### Herboren radiopulsars

Een neutronenster die in een röntgendubbelster materie van zijn begeleider invangt, gaat sneller roteren. Wanneer de materieoverdracht ophoudt, kan de neutronenster net als toen hij jong was radiostraling uitzenden: het is een herboren radiopulsar. Dit gegeven leidt tot de voorspelling dat er in bolvormige sterrenhopen, die tenslotte relatief veel röntgendubbelsterren bevatten, wellicht herboren pulsars te vinden zouden zijn.

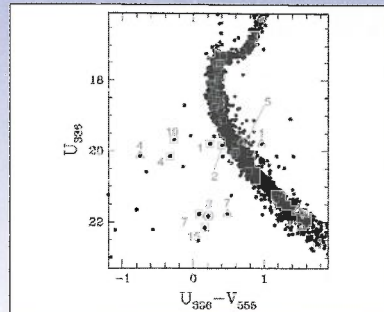
In 1987 kwam deze voorspelling uit. Andrew Lyne (Universiteit van Manchester) vond een radiobron in de bolhoop M28, mogelijk een radiopulsar; Shrinivas Kulkarni (California Institute of Technology) stelde voor, de waarnemingen ter analyse aan de specialist met een



supergrote computer te geven en deze, John Middleditch (Los Alamos), vond bij de eerste testberekening de pulsperiode van 3 milliseconde! Inmiddels zijn er ruim zestig pulsars in een twintigtal bolhopen gevonden. De recordhouder is 47 Tucanae, waarin maar liefst 22 pulsars zijn gevonden. De meeste hiervan zitten in dubbelsterren, vermoedelijk met een witte dwerg, zoals verwacht. Een zevental echter is enkelvoudig, dus zonder begeleider. Het kan zijn dat deze vroeger wel in een dubbelster hebben gezeten, maar dat de dubbelster door een passerende ster ontbonden is. Een andere mogelijkheid is dat een neutronenster direct op een gewone ster gebotst is, waarbij deze geheel vernietigd werd en in een schijf om de neutronenster terecht kwam. Deze schijf leegde zich vervolgens op de neutronenster, die daardoor sneller ging roteren; toen de schijf op was, sloeg de neutronenster aan als een herboren radiopulsar.

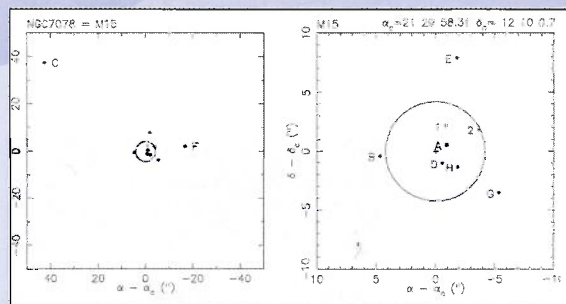
De aanwezigheid van veel radiopulsars in bolhopen is niet alleen een mooie bevestiging van onze ideeën over hun oorsprong in röntgendubbelsterren, de pulsars verschaffen ook een fraai middel om meer over bolhopen te leren. De (licht)snelheid waarmee de pulsar radiostraling door het heelal reizen is voor lange golflengten langzamer dan voor korte, omdat een deel van de waterstof in de interstellair ruimte geïoniseerd is tot losse protonen en elektronen – de interstellair ruimte is dus geen perfect vacuüm. Door het verschil in aankomsttijd van pulsen op 21 cm en 90 cm te meten, kunnen we bepalen hoeveel elektronen er tussen ons en de pulsar zijn. We noemen dit de *dispersiemaat* van een pulsar. In 47 Tucanae is gebleken dat de verschillende pulsars iets verschillende dispersiematen hebben. Dat betekent dat er in de bolhoop zélf geïoniseerd waterstofgas aanwezig is. Helemaal onverwacht is dit niet, want de rode reuzen in 47 Tuc verliezen allemaal materie in de vorm van sterrenwind, en dat gas kan door de straling van de röntgenbronnen geïoniseerd worden. Nochtans is dit de eerste keer dat de aanwezigheid van interstellair materie in een bolhoop kan worden aangetoond. Een nog interessantere toepassing van radiopulsars in een bolhoop is dat ze een meting van de totale zwaartekracht geven, en daarmee een meting van de

(zichtbare plus onzichtbare) massa. Dit werkt als volgt. Stel dat een pulsar met een constante snelheid richting aarde beweegt. Elke volgende puls hoeft dan minder afstand tot de aarde af te leggen en komt dus sneller aan: we meten op aarde een kortere pulsperiode dan de pulsar zelf heeft. We kunnen dit effect op geen enkele manier vaststellen, omdat we de echte periode niet kennen. Anders wordt het wanneer de snelheid van de pulsar verandert: dan verandert ook het verschil tussen de echte en de gemeten periode. Met andere woorden: de op aarde gemeten periode verandert. In een bolhoop wordt de pulsar door de zwaartekracht van de sterren naar het centrum getrokken, en verandert daarbij van snelheid. Van alle pulsars die we in het Melkwegstelsel kennen wordt de periode langer, doordat ze energie uitstralen die uit de rotatie komt. In bolhopen zijn echter pulsars gevonden waarvan de periode korter wordt. De verklaring hiervoor is dat deze pulsars in onze richting versneld worden. In M15 worden de waargenomen periodes van pulsars A en D langer. Sterl Phinney (California Institute of Technology) bepaalde hieruit de hoeveelheid massa die in de kern aanwezig is, en liet zien dat deze mooi verklaard kan worden door bij de zichtbare sterren (de hoofdreekssterren en rode reuzen) de witte dwergen op te tellen, met mogelijk nog wat neutronensterren. Het was daarom zeer



In het Hertzsprung-Russell-diagram (golflengten in nm) liggen de meeste sterren in NGC 6752 langs de hoofdreeks of op de (sub)reuzentak. De vierkanten geven alle sterren die dichtbij een röntgenbron staan. De voor de hand liggende identificaties zijn de blauwe sterren links van de hoofdreeks, in dit geval vermoedelijk allemaal catachysmische variabelen.

verrassend dat een met de Hubble-ruimteluscoop werkende groep sterrenkundigen op 16 september jl. aankondigde een zwart gat met een massa van 4000 zonsmassa te hebben gevonden in de kern van M15. Op 7 oktober gaf de groep toe een fout te hebben gemaakt: er is toch geen zwart gat... De pulsars geven nog steeds de nauwkeurigste bepaling van de massa van het centrale deel van deze bolhoop die we hebben.



Posities van de acht radiopulsars (A-H) en twee heldere röntgendubbelsterren (1, 2) in M15, ten opzichte van het centrum van deze sterrenhoop (+). C is een dubbele neutronenster die hoogstwaarschijnlijk na een uitwisselingsbotsing een hoge re-actiesnelheid kreeg en daardoor uit de kern is weggevlagen.