

Lichte röntgendubbelsterren in de Melkweg en hun ontstaan in bolvormige sterrenhopen

Frank Verbunt en Simon Portegies Zwart

Frank Verbunt is hoogleraar sterrenkunde aan de Universiteit van Utrecht.
Simon Portegies Zwart is hoogleraar sterrenkunde aan de Leidse Universiteit.

Terwijl een zestigtal lichte röntgendubbelsterren in het Melkwegstelsel altijd meer dan 250 maal de lichtkracht van de zon (dat is: meer dan 10^{29} Watt) uitzendt in de vorm van röntgenstraling, zijn er andere die alleen maar af en toe zo helder worden. Deze tijdelijk heldere, of 'voorbijgaande' bronnen (Engels: *transients*) bereiken vaak binnen enkele dagen een helderheid van meer dan 25.000 zonslichtkrachten in röntgenstraling, om dan in de loop van een maand weer af te zwakken (interessant is dat alle zwarte gaten met begeleiders met een lage massa, waarvan we er inmiddels tientallen kennen in ons Melkwegstelsel, zulke voorbijgaande bronnen zijn). Sommige voorbijgaande bronnen zijn al meerdere keren helder geweest,

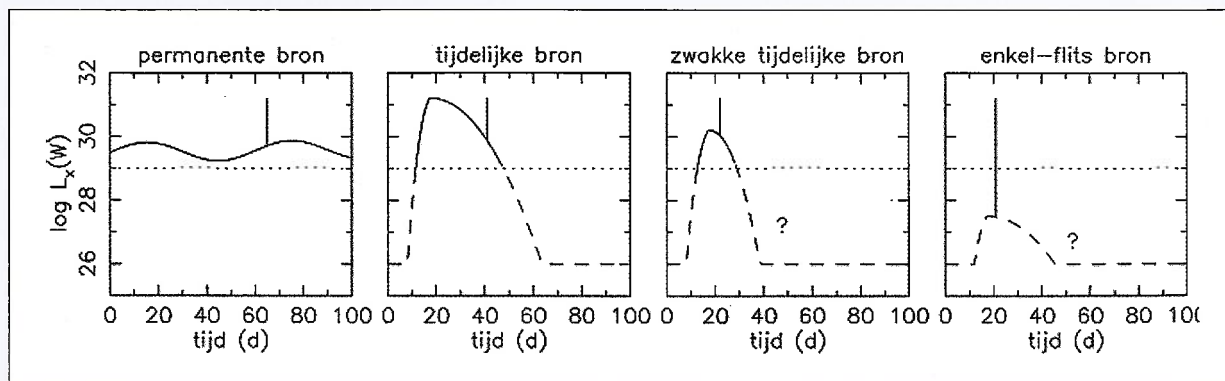
anderen pas één keer. Dit werpt de vraag op: 'hoeveel dubbelsterren met een neutronenster (of zwart gat) zijn er die tot nu toe nog nooit als een heldere bron zijn waargenomen?' Een andere vraag is of de bronnen, als ze niet meer helder zijn, echt helemaal verdwijnen of alleen maar erg zwak worden.

Het blikveld van een typische röntgentelescoop beslaat maar een zeer kleine fractie van de hemel. Zelfs het ongewoon grote blikveld van de Duitse röntgensatelliet ROSAT zag maar een veertigduizendste deel van de hemel; de meeste satellieten zien veel minder. Dit betekent dat zich van alles aan de röntgenhemel kan afspelen zonder dat we dit merken! Om die reden zijn er later speciale camera's gemaakt die een groot deel van de hemel bekijken, bijvoorbeeld door de camera's te laten ronddraaien: zo werden door de UHURU-satelliet en de Ariel V-satelliet eerste hemelkaarten in röntgenlicht gemaakt (figuur 2).

Zoals beschreven in het artikel van Johan Bleeker werd bij SRON onder leiding van Kees de Jager

vanaf 1979 een ander type camera ontwikkeld die een groot stuk van de hemel kan bekijken: de groothoekcamera. Twee van deze camera's, met een gezichtsveld van 40 bij 40 graden, werden geplaatst in de Italiaans-Nederlandse BeppoSAX-satelliet die op Koninginnedag 1996 werd gelanceerd. Zij leverden de beslissende doorbraak in de ontcijfering van de aard van de gammaflitsen en leidden tot belangrijke bijdragen in het onderzoek aan lichte röntgendubbelsterren.

Zoals te zien in Figuur 2 zijn de heldere lichte röntgenbronnen in ons Melkwegstelsel naar het centrum geconcentreerd. Dit houdt in dat de op dit centrum gerichte groothoekcamera – met zijn blikveld van 40 graden – meer dan de helft van alle lichte röntgendubbelsterren in ons Melkwegstelsel tegelijk in beeld heeft! John Heise besloot daarom een grote waarnemingcampagne te organiseren, gericht op het centrum van de Melkweg. Met de analyse van de enorme hoeveelheid data uit 7 miljoen seconden waarnemingsduur kreeg hij hulp van de Utrechtse astronomen Rémon Cornelisse,

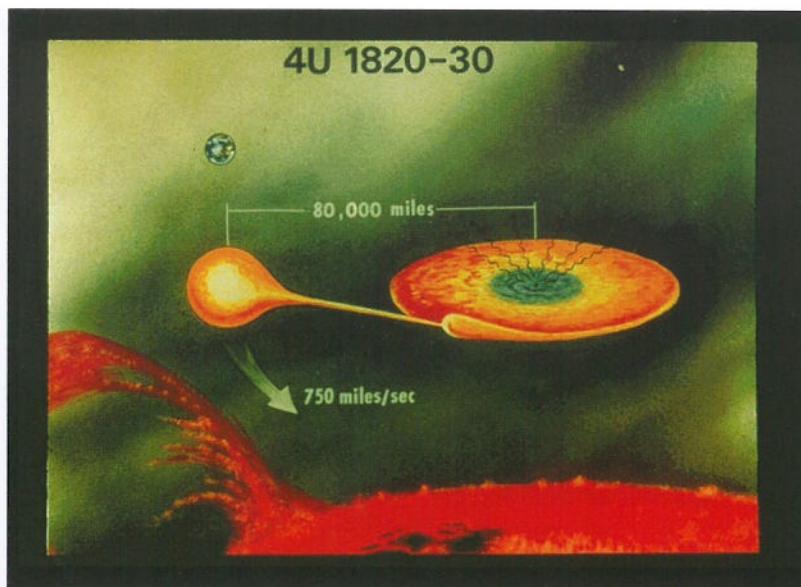


Figuur 10: variatie van de röntgenlichtkracht van verschillende typen lichte röntgendubbelsterren. De permanente en de tijdelijke bronnen werden al in de jaren 70 ontdekt; de zwakke tijdelijke en 'enkel-flitsbronnen' werden pas ontdekt met de groothoekcamera's van BeppoSAX.

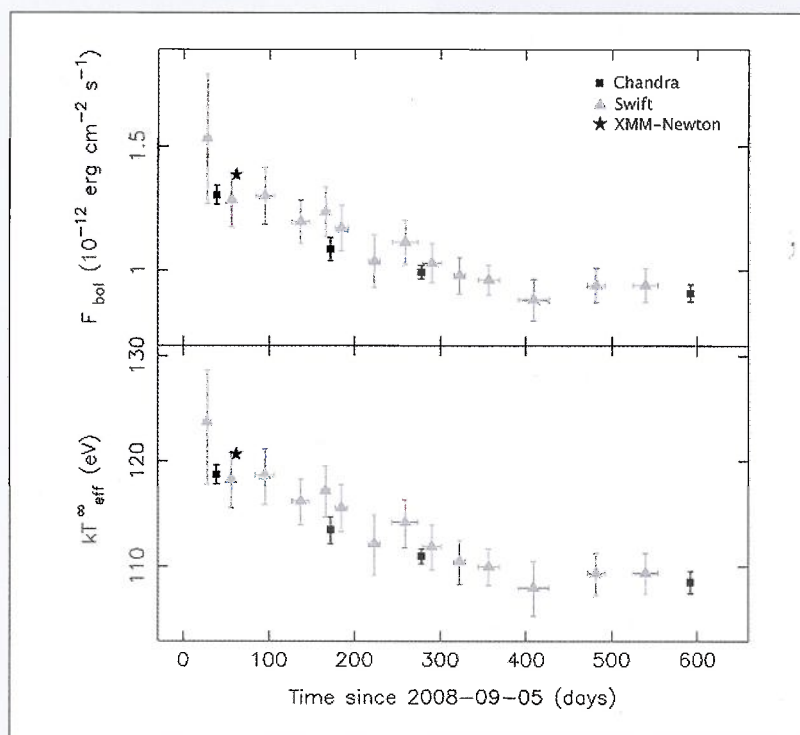
Jean in 't Zand en Frank Verbunt. De campagne leidde tot de ontdekking van de superflitsen (zie de bijdrage van John Heise), en tot de ontdekking van twee tot dan toe onbekende typen lichte röntgendubbelsterren: de zwakke tijdelijke bronnen, die niet helderder worden dan 2.500 zonslichtkrachten, en de 'enkel-flitsbronnen' (zie figuur 10). Een enorm aantal röntgenflitsen werd waargenomen: 1823 van 37 verschillende bronnen nabij het Melkwegcentrum. Van ruim de helft van die bronnen was nog nooit tevoren een flits gevonden. Het aantal flitsen is zeer ongelijk over de bronnen verdeeld.

Van de drie meest frequente flitsers werden respectievelijk 423, 339 en 260 flitsen waargenomen. Aan de andere kant zijn er 6 bronnen waarbij slecht één flits is gevonden en die buiten de flits zwakker zijn dan de waarneemlimiet: de zogenaamde enkel-flitsbronnen. Uit de verdeling van het aantal flitsen over de 37 bronnen kunnen we een zeer ruwe schatting maken van het aantal flitsers dat we zouden vinden als we tien keer zo lang zouden kunnen waarnemen: dit zijn er zo'n duizend. Een andere waarneming leidt tot een vergelijkbaar aantal. Dit betreft de bronnen in bolvormige sterrenhopen. Dankzij de groothoekcamera's van Beppo-SAX weten we dat minstens 12 hiervan flitsers zijn, en dus neutronensterren. Met steeds meer satellieten werden steeds meer zwakke bronnen ontdekt in bolhopen, en Jan van Paradijs en Frank Verbunt lieten zien dat de bronnen met helderheden tussen 2,5 en 25 zonslichtkrachten in röntgenstraling de rustende tegenhangers zijn van voorbijgaande bronnen. Anders gezegd: de voorbijgaande bronnen verdwijnen niet helemaal, ze worden alleen heel zwak, zodat ze alleen met de modernste satellieten kunnen worden gedetecteerd. In de bolhopen blijkt het aantal 'rustende' bronnen ongeveer tien keer zo groot te zijn als het aantal heldere bronnen. Als die verhouding ook nabij het centrum van de Melkweg geldt, schatten we het totale aantal röntgendubbelsterren met een lage massa, voorbijgaand en permanent, op zeshonderd.

De helderste bron in een bolvor-



Figuur 11: impressie van de ultracompacte röntgenbron in de bolvormige sterrenhoop NGC 6624, waarin een witte dwerg in 11 minuten om een neutronenster draait. De afmeting van de dubbelster is vergelijkbaar met de afstand van de aarde tot de maan.



Figuur 12: als een tijdelijke bron na een uitbarsting weer tot rust is gekomen, komt de röntgenstraling goeddeels van het oppervlak van de neutronenster. Het langzaam afkoelen van dit oppervlak leidt tot een langzame daling van de helderheid van de bron (figuur van Nathalie Degenaar, Universiteit van Amsterdam).

mige sterrenhoop – dezelfde waarin Heise in 1975 de eerste röntgenflitsen ontdekte – bleek een baanomloopstijd van 11 minuten te hebben! Via de derde wet van Kepler betekent dit dat de neutronenster en zijn begeleider ongeveer net zover van elkaar staan als de aarde en de maan (figuur 11). Dat betekent dat de begeleider kleiner moet zijn dan deze afstand: het is een

witte dwerg. Ongeveer de helft van de röntgenbronnen in bolvormige sterrenhopen is zo'n ultracompacte dubbelster. Een mogelijke verklaring hiervoor is een botsing van een neutronenster met een rode reus, waarbij de buitenlagen van de reus worden afgeworpen, en de kern ervan in een baan om de neutronenster komt. Die kern koelt dan af tot een witte dwerg. Inmiddels be-

gint het echter duidelijk te worden, dankzij het werk van de Utrechtse astronomen Peter Jonker en Jean in 't Zand en de Nijmeegse astronoom Gijs Nelemans, dat een fiks deel van de röntgenbronnen in de Melkweg ook ultracompact is. Omdat botsingen tussen sterren in de Melkweg vrijwel niet voorkomen (zie hierna), moeten die op een andere, tot nu toe onbekende manier gevormd zijn.

De waarnemingen aan de lichte röntgendubbelsterren worden inmiddels met de Chandra-satelliet voortgezet. De Amsterdamse astronomen Rudi Wijnands en Nathalie Degenaar hebben laten zien dat de röntgenstraling in rustende systemen goeddeels van het oppervlak van de neutronen-

ster kan komen. Hun waarnemingen zijn zo goed dat ze de koeling van de neutronenster tot in detail kunnen volgen (figuur 12).

Lichte röntgendubbelsterren en de dynamische evolutie van bolvormige sterrenhopen

In 1973 ontdekte Herbert Gursky met de UHURU-satelliet de eerste drie sterke röntgenbronnen in bolvormige sterrenhopen. Dit kwam als een volslagen verrassing, omdat dit erop wijst dat bolvormige sterrenhopen – de oudste objecten van ons Melkwegstelsel, die samen slechts 0,01 procent van de massa van het Melkwegstelsel bevatten – honderden malen meer sterke röntgenbronnen bevatten (per miljard zonsmassa's) dan het Melkwegstelsel als geheel. Later werden nog negen sterke röntgenbronnen in bolhopen ontdekt, zodat deze wel 1000 maal meer sterke röntgenbronnen bevatten dan het Melkwegstelsel als geheel. Hetzelfde ziet men ook in andere sterrenstelsels, zoals de Andromedanevel: ook daar vindt men een groot aantal sterke röntgenbronnen in bolvormige sterrenhopen. Dankzij de ontdekking in 1975 door John Heise en Josh Grindlay van de röntgenflitsen van bolhopen, werd duidelijk dat deze bronnen neutronensterren zijn in dubbelsterren, waarin de begeleidende ster lichter is dan onze zon. Een bolhoop bevat namelijk geen gewone sterren zwaarder dan ongeveer 0,9 maal de zon.

Het feit dat bolvormige sterrenhopen 1000 maal meer van deze lichte röntgendubbelsterren bevatten dan de Melkweg als geheel, wijst er op dat er in bolvormige sterrenhopen een zeer efficiënt vormingsproces van dergelijke dubbelsterren optreedt, dat kennelijk nergens anders in het Melkwegstelsel voorkomt. Het werd al snel duidelijk dat dit te maken moet hebben met de enorm hoge sterdichtheden in de centrale delen van bolvormige sterrenhopen. In het centrum van de dichtste bolhopen vindt men soms wel 10 000 tot 100 000 sterren per kubieke lichtjaar! Vergelijk dat eens met gemiddelde afstanden van enkele lichtjaren in de zonsomgeving binnen het Melkwegstelsel. Dit maakt dat sterren in bolhopen af en toe fysiek met elkaar kunnen botsen, of

elkaar zo rakelings kunnen passeren, dat ze elkaar 'vangen' en een dubbelster vormen. Dat een dergelijke vangst of botsing mogelijk is, heeft te maken met de relatief lage onderlinge snelheden tussen de sterren in een bolhoop (niet meer dan een tiental kilometers per seconde), wat veel lager is dan elders in het Melkwegstelsel, waar de onderlinge snelheden van de orde van 100 km/s zijn, en de sterdichtheden veel lager, zodat een vangst of een botsing daar vrijwel niet kan voorkomen. De ontdekking van de röntgendubbelsterren in de bolvormige sterrenhopen was een enorme stimulans voor de studie van de dynamische evolutie van sterrenhopen, thans internationaal uitgegroeid tot een belangrijk nieuw onderzoeksgebied waarin ook ons land – eerst in Amsterdam en thans in Leiden – een belangrijke bijdrage levert.

Op de foto in figuur 13 is de bolvormige sterrenhoop NGC6397 te zien, die er op het eerste gezicht uitziet als een vrij gewone sterrenhoop. De gemiddeld gelijke kleur van de helderste sterren toont dat deze iets lichter zijn dan de zon, wat duidt op een hoge leeftijd van meer dan 11 miljard jaar. In het midden van de sterrenhoop zitten de sterren dichter op elkaar gepakt dan aan de buitenkant. Dit is het gevolg van het feit dat in een sterrenhoop de zwaardere sterren geleidelijk, onder invloed van de onderlinge zwaartekrachtsaanrekening tussen de sterren, naar binnen zakken. Binnenin de sterrenhoop bewegen de sterren kriskras door elkaar. Hierbij zullen zwaardere sterren en minder zware sterren elkaar geregeld passeren. Tijdens een dergelijke passage vindt er uitwisseling van kinetische energie plaats, die equipartitie wordt genoemd. Hierbij zal een zwaardere ster bij de ontmoeting een beetje energie overdragen aan een minder zware ster, met als gevolg dat de zwaardere ster wat langzamer gaat bewegen, terwijl de lichtere juist aan snelheid wint. Dit leidt tot het naar het midden zakken van de zwaarste sterren, terwijl de lichtere sterren juist naar buiten worden geslingerd, alsof ze worden weggeschoten met een katapult. Daar neutronensterren gemiddeld een massa hebben van 1,4 maal de zon, en



Figuur 13: foto van de bolvormige sterrenhoop NGC6397 in het sterrenbeeld Ara. (de foto is gemaakt met het ESO FLAMES-UVES instrument).



Figuur 14: compositiefoto van de kern van NGC6397. De afmetingen van de sterren op deze foto zijn niet echt, maar het gevolg van overbelichting. (Foto genomen met ACS aan boord van de Hubble-ruimte-telescoop).

de gewone sterren in de hoop lichter zijn dan 0,9 maal de zon, zullen de neutronensterren – die ooit, meer dan 10 miljard jaar geleden in de sterrenhoop zijn gevormd uit sterren zwaarder dan 8 maal de zon – zich in het centrum van de bolhoop concentreren.

Deze opeenhoping van zware sterren in de kern van de sterrenhoop resulteert er vervolgens in dat de kans op een toevallige ontmoeting van drie sterren groot wordt. Bij een dergelijke ontmoeting zijn alle drie de sterren aan elkaar gebonden door de zwaartekracht, vooral omdat de ontsnappingssnelheid uit het 3-massasysteem groter is dan hun onderlinge relatieve snelheid.

Een dergelijk gebonden 3-delig systeem zal resulteren in wat men een 'resonante interactie' noemt, waarbij de drie sterren de onderlinge banen van elkaar sterk beïnvloeden. Wisselwerking tussen drie sterren (maar eigenlijk tussen iedere drie objecten die via de zwaartekracht met elkaar in wisselwerking zijn) zijn berucht om hun chaotische gedrag. Uiteindelijk zijn er voor een dergelijk systeem van drie sterren maar twee oplossingen; twee of drie sterren botsen op elkaar, of één ster ontsnapt met hoge snelheid, waarbij de twee overgebleven sterren in een dubbelster om elkaar heen blijven bewegen.

Beide oplossingen zijn van belang voor de evolutie van de sterrenhoop, maar alleen de laatste van de twee draagt bij aan de energieproductie binnen in de sterrenhoop. De wisselwerking, waarbij één van de sterren wordt weggeschoten, levert namelijk kinetische energie op (in de vorm van de snel bewegende ster, maar in mindere mate ook in de beweging van de nieuw gevormde dubbelster) die er voor zorgt dat de sterrenhoop minder snel in elkaar stort. De dubbelster zelf zorgt vervolgens weer voor een verdere 'verwarming' van de sterrenhoop. Dubbelsterren vormen namelijk een reservoir waaraan energie onttrokken kan worden, en dat nagenoeg onuitputtelijk is ten opzichte van de sterrenhoop. Door gestaag in een nauwere baan te komen bij elke ontmoeting met een passerende ster, zodat de passant een grotere snelheid krijgt, levert de dubbelster bewegingsenergie aan de andere ster-

ren in de sterrenhoop. Als je de vergelijking met een gaswolk zou maken, kun je zeggen dat de sterrenhoop door dit effect wordt opgewarmd (hogere snelheden betekenen een hogere temperatuur). Het gevolg voor de sterrenhoop is dat deze langzaam verdampt; sterren zullen geregeld uit de sterrenhoop ontsnappen.

Sterrenhopen zijn doorzichtig en we kunnen zodoende hun centrale delen, waarin de producten van nauwe passages te vinden zijn, nauwkeurig bestuderen. Op de foto in figuur 14 is te zien hoe de Hubble-ruimtetelescoop dwars door de kern van de bolvormige sterrenhoop NGC6397 heen kijkt. Zoals hierboven vermeld kan, als drie sterren elkaar dicht naderen, gemakkelijk tijdens de chaotische ontmoeting een botsing tussen twee van de sterren optreden, of heel soms tussen alle drie. Een botsing tussen twee sterren levert een nieuwe ster op met duidelijk afwijkende eigenschappen. Een van de mogelijke bewijzen voor botsingen tussen sterren worden gevormd door het bestaan van 'blauwe achterblijvers' (in het Engels: *blue stragglers*; een straggler is een treuzelaar/achterblijver). De eerste blauwe achterblijvers werden in 1954 gevonden door de sterrenkundige Alan Sandage in de bolvormige sterrenhoop M3. Het ziet er naar uit dat iedere bolvormige sterrenhoop en de meeste open sterrenhopen dergelijke achterblijvers bevatten. Ze worden achterblijvers genoemd, omdat ze veel zwaarder zijn dan de andere sterren in deze zeer oude sterrenhopen. Omdat zware sterren relatief kort leven, hadden ze allang weg moeten zijn, maar om de één of andere reden zijn ze als het ware achtergebleven in hun evolutie. De foto in figuur 15 toont de blauwe achterblijvers in de bolhoop NGC 6397. Deze bolhoop bevat, naast de enorme rijkdom aan achterblijvers, tevens een exemplaar dat meer dan drie keer zwaarder is dan welke andere waarneembare ster dan ook in de bolhoop; een dergelijke ster kan eigenlijk alleen maar zo zwaar zijn geworden door een botsing tussen minstens drie sterren.

Het bestaan van de blauwe achterblijvers, samen met het veel voorkomen van röntgendubbelsterren, vormt dus een mooie illustratie van de dynamische processen die

binnen in een sterrenhoop plaatsvinden. Sinds 1988 ontdekt men met radiotelescopie vele tientallen milliseconde radiopulsars in bolvormige sterrenhopen. Sommige sterrenhopen, zoals Terzan 5, bevatten er wel een stuk of dertig. Zoals eerder in dit artikel beschreven zijn dit de latere evolutieproducten van lichte röntgendubbelsterren waarvan de begeleidende gewone ster inmiddels een witte dwerg is geworden. Ook deze milliseconde radio pulsars zijn dus producten van dynamische ontmoetingen tussen sterren in de centrale delen van de sterrenhopen.

Tegenwoordig zijn de berekeningen van de dynamische evolutie van rijke sterrenhopen, die vroeger doorgaans werden uitgevoerd op speciale supercomputers, zelfs op thuiscomputers uitvoerbaar. Met name door slim gebruik te maken van de grafische kaart is het mogelijk berekeningen van de bewegingen van wel honderduizend sterren op een gewone pc uit te voeren. Het is dus vrij eenvoudig om zelfs thuis de theorie van de gravitationele thermodynamica in detail te bestuderen!



Figuur 15: De blauwe 'achterblijvers' in NGC6397. Deze sterrenhoop bevat zelfs een blauwe achterblijver die meer dan drie keer zwaarder is dan de andere gewone sterren in de sterrenhoop. Men kan er bijna niet omheen dat er drie sterren regelrecht met elkaar in botsing zijn gekomen! (Foto genomen met de Hubble-ruimtetelescoop.)