

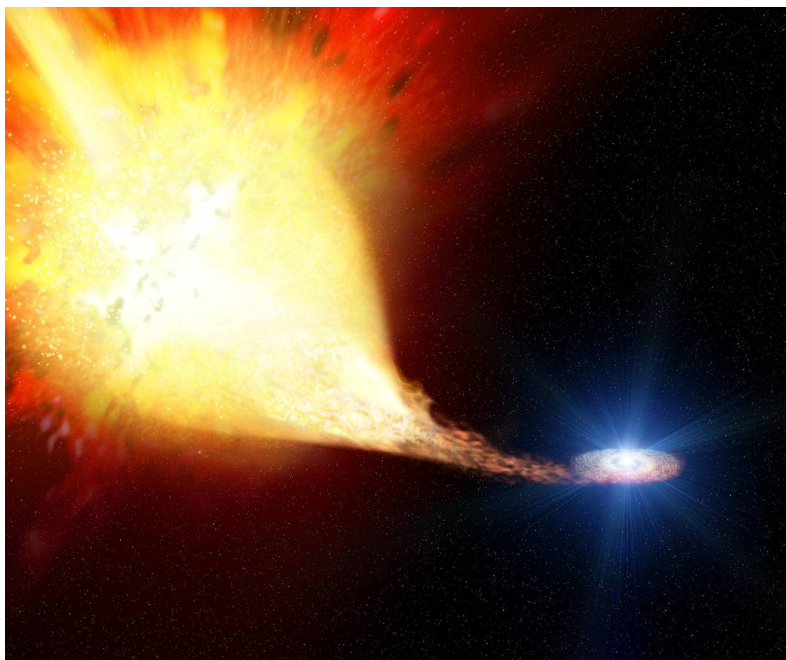


The Deaths of Massive Stars in Binary Systems
E. Zapartas

Nederlandse Samenvatting

Sterren die meer dan ongeveer 8 maal de massa van de zon vergaren terwijl ze vormen volgen een andere levensloop dan sterren met een lagere massa zoals de zon, en zullen uiteindelijk hun leven beëindigen als supernovae (SNe) door de implosie van hun kern. Veel van de elementen in het periodieke systeem, waaronder de elementen die essentieel zijn voor leven, zijn tijdens dit soort explosies van zware sterren ontstaan. Inderdaad, we zijn gemaakt van sterrenstof. Recente waarnemingen hebben aangetoond dat de meeste zware sterren zich in een dubbelstersysteem bevinden, met een begeleiderster die in een baan om hen heen draait. In de meeste gevallen is de afstand tussen de twee sterren zo klein dat ze elkaars evolutie kunnen beïnvloeden, waarbij zowel massa als impulsmoment uitgewisseld kunnen worden voordat de sterren exploderen. Deze interactie in een dubbelstersysteem heeft vaak zulke ernstige gevolgen dat het de verdere levensloop van beiden sterren fundamenteel verandert.

In dit proefschrift presenteren we een uitgebreide studie van de gevolgen van dubbelsterevolutie voor de eigenschappen supernovae en de zware sterren die zo hun leven eindigen. De levensloop van sterren in een dubbelster hangt sterk af van de begin-eigenschappen van de sterren, in het bijzonder van de massa's en de eigenschappen van de baan. De grote hoeveelheid mogelijke configuraties van dubbelstersystemen geeft aanleiding tot een grote verscheidenheid aan mogelijke levenslopen die de twee sterren kunnen ondergaan totdat ze een of meerdere supernovae veroorzaken. We onderzoeken het effect van dubbelsterevolutie op zware sterren die hun leven eindigen als supernova, vanaf het begin van fusie van waterstof in hun kern tot het einde van hun leven waarbij de kern mogelijk implodeert. Dit proefschrift volgt een theoretische aanpak en richt zich op de eigenschappen van een volledige populatie van sterren die hun leven als supernovae eindigen. De voornaamste methode die wij gebruiken is populatiesynthese, waarvoor we de code `binary_c` (Izzard et al. [2004b](#), [2006](#), [2009](#)) gebruiken. Met deze code kunnen we de levensloop van grote aantallen (d.w.z. miljoenen) systemen simuleren, waarbij de gehele parameterruimte zich uitstrekt over alle mogelijke enkel- en dubbelstersystemen die tenminste één of meerdere supernovae



Figuur A: Artistieke afbeelding van een ster die een supernova explosie ondergaat gedurende een massa overdrachtsfase naar zijn stellaire begeleider. Credit afbeelding: European Space Agency en Justyn R. Maund.

ondergaan als gevolg van implosie van de kern.

In hoofdstuk 2 richten we ons op de verdeling van de typische tijd tussen de vorming van een ster en de uiteindelijke explosie, wat ook wel de “vertragingstijd” genoemd wordt in de vakliteratuur. We vinden een belangrijk aantal “late” supernovae met vertragingstijden $\gtrsim 50$ Mjyr, wat de maximale vertragingstijd is voor een supernova met een enkele ster als oorsprong. Deze late explosies zijn meestal het gevolg van dubbelstersystemen die oorspronkelijk bestaan uit middelzware sterren. Deze sterren kunnen in massa toenemen door massaoverdracht of door samensmelten met hun begeleider, waarbij de kernmassa groot genoeg wordt om uiteindelijk te imploderen als supernova.

In veel gevallen zal de begeleider vlak voor de explosie nog steeds in omloop zijn rond de ster die gaat ontploffen. Wij maken theoretische voorspellingen voor de verwachte fractie en de eigenschappen van deze begeleidersterren van supernovae, waarbij we ons richten op zogenaamde ‘gestripte’ supernovae, die hun waterstofrijke mantel voor de explosie hebben verloren (hoofdstuk 3). We vinden dat een nog weinig geëvolueerde ster de meest waarschijnlijke begeleiderster is van gestripte supernovae. Dit is met name het geval in een omgeving met lage metalliciteit waar de begeleiderster meestal verantwoordelijk was voor het strippen van de buitenste lagen van

de stervende ster, aangezien masaverlies door sterwinden hier minder efficiënt zijn. We passen onze resultaten toe op afbeeldingen die na de explosie gemaakt zijn van dichtbijzijnde supernovae, verkregen met de Hubble telescoop in de zoektocht naar een overlevende begeleider van SN 2002ap (hoofdstuk 3) en van SN 1994I (hoofdstuk 4). Het gebrek aan detecties betekent hoogstwaarschijnlijk dat er geen overlevende begeleiderster is of dat deze ster niet zwaar genoeg is om gedetecteerd te worden.

De meeste hoofdreekssterren die in een baan draaien rondom een ster die uiteindelijk zal exploderen zullen naar verwachting uit het dubbelstersysteem worden gestoten. Dit komt voornamelijk door de “geboorte-schop” die het compacte restant verkrijgt op het moment van de explosie, veroorzaakt door asymmetrieën in het explosie-mechanisme. De hoeveelheid verbroken dubbelstersystemen en de kinematische eigenschappen van de uitgestoten begeleidersterren worden bestudeerd in hoofdstuk 5. Het grootste deel van de uitgestoten sterren zal een lage snelheid hebben (van een paar km s^{-1}). Alleen een klein deel van de uitgestoten sterren zal snelheden van meer dan 30 km/s bereiken en mogelijk kunnen worden geïdentificeerd met observaties als “wegrennende sterren”. Interessant is dat, hoewel onze theoretische voorspellingen robuust lijken en consistent met andere studies, de waarnemingen impliceren dat een veel groter deel van de uitgestoten sterren wegrennende sterren zouden moeten zijn.

In het laatste deel van het proefschrift richten we onze aandacht op waterstof-rijke, zogenaamde type II supernova. Van deze supernovae wordt meestal aangenomen dat ze een natuurlijke uitkomst zijn van de evolutie van een enkele ster. Echter, door rekening te houden met het aantal sterren dat oorspronkelijk in een dubbelstersysteem voorkomt, tonen wij aan dat interacterende dubbelstersystemen wellicht verantwoordelijk zijn voor tot bijna de helft van deze soort supernovae (hoofdstuk 6). Dit zou betekenen dat dubbelsterevolutie een belangrijke rol kan spelen voor het verklaren van de diversiteit binnen de type II supernovae. We bestuderen verder in hoofdstuk 7 de verdeling van kernmassa’s van deze oorspronkelijke sterren, waarbij we onze bevindingen in de context plaatsen van de uit waarnemingen afgeleide eigenschappen van gedetecteerde rode superreuzen die de voorgangers zijn van type II supernovae. We bespreken onze resultaten vanuit het perspectief van het “rode superreuzen probleem”: het schijnbare gebrek aan zware voorgangers van type II SNe (Smartt et al. 2009).

Onze resultaten kunnen gebruikt worden als een theoretisch kader om de rijkdom aan waarnemingen te verklaren die we zien in huidige en toekomstige surveys die deze explosies, hun voorgangers en potentiële begeleiderster op het moment van de explosie alsmede hun omgeving bestuderen. Deze nieuwe waarnemingen spelen ook een sleutelrol bij het verkrijgen van een dieper begrip van de fysische aannames in modellen voor de structuur en evolutie van sterren en dubbelster-interacties.

Een verbeterde kennis van de evolutie in een dubbelstersysteem kan ook verkregen worden met behulp van populatiesynthese-modellen, door de globale eigenschappen

te bestuderen van fases van sterevolutie voor een supernova – zoals zware dubbelstersystemen en over(contact) systemen – of na de supernova – zoals een uitgestoten begeleiderster, röntgendubbelstersystemen of bronnen van zwaartekrachtgolven. Waarneemgegevens van zulke systemen kunnen dienen als onafhankelijke limieten op de ontwikkeling van zware sterren to supernovae.

Ons werk en dat van vergelijkbare studies motiveren ons om de specifieke evolutionaire scenario's voor sterren die zich tot supernova ontwikkelen nader te bestuderen. Het gebruik van gedetailleerde stermodellen, geïnspireerd door de resultaten van populatiesynthese, spelen een beslissende rol in deze richting. Bovendien, zou het interessant zijn om de oorspronkelijke dubbelstersystemen – massa verliezers, massa verkrijgers en samensmeltingen – als input te gebruiken voor simulaties van de fotometrische en spectrale evolutie van een supernova en de geassocieerde nucleosynthese, alsmede als in de zelfconsistente modellen van het explosiemechanisme.

Het is duidelijk dat vele nieuwe en interessante wegen zich voor ons aan het openen zijn. Deze vooruitgang zal leiden tot een beter begrip van de energieke explosies die een cruciale rol spelen in ons Universum en onze oorsprong!