



*The properties of low-metallicity massive stars*  
F. Tramper

Dit proefschrift behandelt de studie van zware sterren in twee verschillende fasen van hun leven. In het eerste gedeelte van de thesis ligt de nadruk op hoofdreeks O-type sterren die zich in drie verschillende dwergmelkwegstelsels in de Lokale Groep bevinden: IC 1613, WLM and NGC 3109. De eigenschappen van deze sterren lijken op die van zware sterren in het jonge heelal, toen het gemiddelde metaalgehalte (metallischeiteit) veel lager was dan nu. In het tweede deel van de thesis verschuift de focus naar het eindstadium van de evolutie van zware sterren. In dit deel worden de mysterieuze zuurstof Wolf-Rayet (WO) sterren bestudeerd, in de tot nu toe meest gedetailleerde analyse.

### **O-type sterren met een laag metaalgehalte**

Het eerste deel van de thesis onderzoekt het massaverlies van zware sterren in de drie bovengenoemde melkwegstelsels. De evolutie van zware sterren wordt sterk beïnvloed door de hoeveelheid massa die zij gedurende hun leven verliezen. Het is daarom zeer belangrijk om het mechanisme waarmee deze massa wordt verwijderd te doorgronden. De huidige theorie voorspelt dat dit gebeurt door de stralingsdruk op electronovergangen in metaalachtige ionen in de steratmosfeer. Het wordt daarom verwacht dat de sterkte van de resulterende sterwind afhankelijk is van de metalliciteit. Deze afhankelijkheid is empirisch aangetoond voor sterren in de Melkweg en de Magellaanse Wolken, met andere woorden voor metaalgehaltes die variëren van solair tot ongeveer 20% van solair. Voor lagere metaalgehaltes is de relatie tot nu toe niet onderzocht.

In Hoofdstuk 2 wordt de eerste kwantitatieve analyse behandeld van O-type sterren die zich in melkwegstelsels verder dan de Magellaanse Wolken bevinden. Deze melkwegstelsels hebben een metalliciteit van ongeveer 15-20% van solair, ongeveer gelijk aan, of iets lager dan, die van de Kleine Magellaanse Wolk. De zes sterren die in Hoofdstuk 2 bestudeerd worden zijn waargenomen met de X-Shooter spectrograaf op de Very Large Telescope. De spectrale resolutie van X-Shooter is hoog genoeg voor een goede correctie voor nevelmissie en maakt een gedetailleerde spectroscopische analyse mogelijk. Om de spectra te onderzoeken wordt gebruik gemaakt van een genetisch algoritme dat synthetische lijnprofielen fit aan de geobserveerde spectraallijnen. Hiermee kunnen de eigenschappen van de ster en sterwind nauwkeurig

bepaald worden.

Deze eigenschappen worden vervolgens gebruikt om de sterwind verder te onderzoeken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het *modified wind momentum versus luminosity diagram*, waarin een maat voor de impuls van de sterwind uitgezet wordt tegen de lichtkracht van de ster. Hieruit volgt dat de sterren verrassend veel massa verliezen, met een windsterkte die meer lijkt op wat verwacht wordt voor sterren in de Grote Magellaanse Wolk in plaats van de lagere metalliciteit van de Kleine Magellaanse Wolk (of lager). Er zijn echter niet genoeg sterren waargenomen om tot een sterke conclusie te komen over de oorzaak van dit onverwachte resultaat.

In Hoofdstuk 3 wordt het probleem van de sterke sterwinden verder onderzocht. Er zijn nog vier sterren waargenomen met X-Shooter, en er zijn een aantal verbeteringen aangebracht in de fitmethode. Hierdoor kunnen de eigenschappen van de sterren en hun wind nog nauwkeuriger bepaald worden. Het volledige sample, dus inclusief de sterren die in Hoofdstuk 2 zijn geanalyseerd, zijn met deze verbeterde methode onderzocht. Het nieuwe modified wind momentum versus luminosity diagram laat zien dat de sterren inderdaad een windsterkte hebben die hoort bij de metalliciteit van de Grote Magellaanse Wolk. Nieuwe waarnemingen, met name in het ultraviolet, zijn nodig om deze sterwinden verder te onderzoeken.

Naast de sterwinden worden in Hoofdstuk 3 ook de overige eigenschappen van deze sterren onderzocht. De spectraaltype tegen effectieve temperatuur calibratie is gepresenteerd en vergeleken met wat gevonden wordt voor de Kleine Magellaanse Wolk. Er is geen significant verschil tussen de twee calibraties, wat in lijn is met de verwachting als de metaalgehalten van de verschillende melkwegstelsels ongeveer gelijk zijn. Verder worden de stereigenschappen vergeleken met evolutionaire modellen met behulp van BONNSAI. Hiermee wordt een schatting gemaakt van de massa en de leeftijd van de sterren.

## De zuurstof Wolf-Rayet sterren

In het tweede gedeelte van de thesis worden de mysterieuze WO sterren geanalyseerd. De groep van WO sterren wordt gebruikelijk gezien als een korte evolutionaire fase na de meer voorkomende koolstof Wolf-Rayet (WC) fase. Een alternatieve verklaring voor het WO fenomeen is dat deze sterren van hogere massa sterren afkomen. In Hoofdstuk 4 wordt de WO ster DR1 geanalyseerd, die zich bevindt in het dwergmelkwegstelsel IC 1613. De observaties zijn wederom gedaan met X-Shooter, die een golflengtebereik heeft van het nabije ultraviolet tot en met het nabije infrarood. Het spectrum van DR1 is geanalyseerd met de geavanceerde modelatmosfeercode CMFGEN. Omdat de eigenschappen van WO sterren in een nauwelijks onderzocht gedeelte van de parameterruimte liggen, worden de methodes en diagnostische lijnen

---

die gebruikt worden in detail beschreven.

Uit de analyse blijkt dat DR1 extreme eigenschappen heeft: met name de temperatuur van 150 kK is zeer hoog. De temperatuur van DR1 bevindt zich dicht bij het de te verwachten temperatuur die sterren hebben aan het eind van de helium hoofdreeks in het Hertzsprung-Russell diagram. De abundanties van helium, koolstof en zuurstof aan het steroppervlak lijken daarentegen erg op de waardes die gevonden worden voor WC sterren. Het lijkt er daarom op dat DR1 afstamt van een zwaardere ster dan de voorgangers van WC sterren, wat dan de oorzaak zou zijn voor de hoge temperatuur. De metalliciteit kan echter ook een rol spelen, en uit de analyse van DR1 op zichzelf kunnen nog geen conclusies getrokken worden over de aard van de WO sterren.

In het laatste hoofdstuk van deze thesis worden alle andere enkelvoudige WO sterren onderzocht die tot mei 2014 bekend waren. Het blijkt dat alle sterren extreem heet zijn, met temperaturen variërend van 150 kK tot 210 kK. Alle sterren hebben een lage heliumabundantie, met massafracties aan het oppervlak die voor het grootste gedeelte tussen 20 en 30% liggen, en voor één ster zelfs de extreem lage waarde van 14% bereikt. De positie in het Hertzsprung-Russell diagram wijst erop dat deze sterren waarschijnlijk in een post-helium fusie fase zijn.

Om tot een definitieve conclusie te komen over de aard van de WO sterren gebruiken we evolutionaire modellen voor (post-)heliumfusie sterren om de eigenschappen van deze sterren te modelleren. Deze modellen kunnen de waargenomen temperatuur, lichtkracht, en helium abundantie van alle enkelvoudige WO sterren reproduceren. Uit de modellen volgt dat de sterren inderdaad in een post-helium fusie fase zijn, en afstammen van sterren met een initiële massa van  $\approx 40 - 60M_{\odot}$ . De sterren zijn bijna aan het eind van hun leven, en zullen in minder dan 10 000 jaar ontploffen als een type Ic supernova.