

- Waters, L. B. F. M. & Molster, F. J.: 1999, in *Asymptotic Giant Branch Stars/ T. Le Bertre, A. Lèbre and C. Waelkens (ed.)*, pp 209–219
- Waters, L. B. F. M., Trams, N. R., & Waelkens, C.: 1992, *A&A* 262, L37
- Wesseling, P.: 1992, *An introduction to multigrid methods*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England
- Winters, J.-M., Dominik, C., & Sedlmayr, E.: 1994, *A&A* 288, 255
- Winters, J.-M., Le Bertre, T., Jeong, K. S., Helling, C., & Sedlmayr, E.: 2000, *A&A* 361, 641
- Woitke, P.: 2001, *Reviews in Modern Astronomy* 14
- Woodrow, J. E. J. & Auman, J. R.: 1982, *ApJ* 257, 247
- Xu, K.: 1998, *van Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series* 1998-03

NEDERLANDSE SAMENVATTING

Sterrenkundigen zijn soms echte hokjesdenkers. Ze sorteren sterren en sterrenstelsels op kleur, vorm, grootte en leeftijd en debatteren eindeloos om elkaar te overtuigen welke sorteermethode de beste is. De kleuterschool is dan ook een niet onbelangrijk deel van de opleiding van een sterrenkundige. Veel meer dan dat is als het goed is ook niet nodig om dit deel van dit proefschrift te begrijpen. Het is het verhaal van een rode reus, die in een witte dwerg verandert omdat hij bellen blaast.

DE ÉÉN Z'N DOOD...

Dit proefschrift gaat over sterren. Om sterren in hokjes te plaatsen lijkt niet meer nodig dan wat intuïtie, want ze gedragen zich precies zoals je zou verwachten. De lichtgewichten onder de sterren² leven hun leven heel rustig. Ze gebruiken weinig energie en kunnen tientallen miljarden jaren oud worden om vervolgens heel onopvallend te sterven. De zware jongens, die tien keer zo zwaar zijn als de zon (of nog veel zwaarder), leven een ruig en bombastisch leven. Ze bezitten al het goud en het uranium en staan erom bekend dat ze een enorme bende van hun omgeving maken. Ze worden slechts een paar miljoen jaar oud, dus zelfs de aarde is al duizend keer ouder. Tenslotte sterven ze een zéér gewelddadige dood, waar zelfs astronomen verlangend naar uitkijken.

Tussen deze uitersten bevindt zich de grote grijze (gele eigenlijk, in dit geval) middenklasse, waartoe ook onze zon behoort. Deze doodgewone sterren hebben de neiging om aan het einde van hun leven, als ze een jaartje of tien miljard oud zijn, wat in omvang toe te nemen. Dat hokjesdenkers het toch vaak bij het verkeerde eind blijken te hebben bleek al uit het relaas van Rupsje Nooitgenoeg en Het Lelijke Eendje (literatuur die een beetje kleuter er gelukkig in z'n vrije tijd bijleest). Ook voor de uitdijende middenmoot-sterren moeten alle vooroordelen overboord worden gezet: ze worden alleen maar mooier, spannender en nuttiger naarmate ze ouder worden.

OVER RODE REUZEN EN WITTE DWERGEN

Sterren ontstaan als gaswolken die bestaan uit voornamelijk waterstof en een beetje (10%) helium, samentrekken. De temperatuur in de samentrekkende gaswolk zal stijgen, omdat de onderlinge afstand tussen de gasdeeltjes in de krimpende wolk steeds kleiner wordt. Het temperatuurverschil met de omgeving wordt hierdoor groter en de wolk zal proberen dit proces tegen te gaan door 'warmte' uit te stralen. Dat helpt echter absoluut niet: door dit energieverlies is de ster niet langer in staat z'n eigen gewicht te dragen en zal hij zelfs verder moeten krimpen. Groot zijn kost immers meer energie dan klein zijn, probeer maar eens een paar minuten je armen gespreid op schouderhoogte te houden. De wolk bevindt zich nu in een vicieuze cirkel: hij zal steeds kleiner en heter worden. Als de temperatuur echt hoog wordt is de redding echter nabij: in het centrum van de ster zullen kernfusiereacties gaan plaatsvinden, waarbij waterstof tot

²Tóch nog altijd 10^{29} kilo zwaar en dus twintig duizend keer zwaarder dan de aarde, maar tien keer lichter dan de zon.

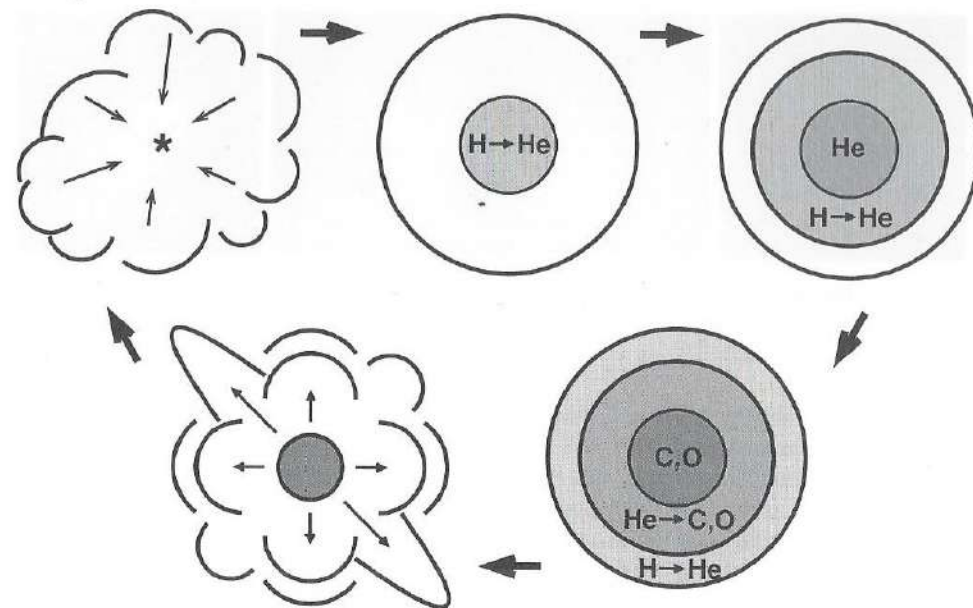
helium fuseert. Bij deze reacties komt energie vrij, zodat de wolk, die nu een ster is geworden, niet langer hoeft te krimpen om te compenseren voor z'n energieverlies door straling. Omdat hij niet verder krimpt zal hij ook niet verder opwarmen en daardoor niet harder gaan stralen. De stabiele levensfase die de ster nu doormaakt noemen we de hoofdreks-fase. Tijdens deze fase heeft de ster dus een onveranderlijke temperatuur en lichtkracht (dat is de hoeveelheid straling die per seconde wordt uitgezonden). De zon is zo'n hoofdreksster, al zo'n vijf miljard jaar en zal dat nog eens vijf miljard jaar blijven.

De kernfusiereacties in de kern zijn niet alleen essentieel voor de energievoorziening van de ster. Toen het heelal nog heel jong was, en er nog geen sterren waren, bestonden er slechts twee gassen: waterstof en helium, iets ogenschijnlijk zo doodgewoon als zuurstof was er nog niet. Gas bestaat uit minuscule deeltjes, atomen. We kennen tegenwoordig meer dan honderd verschillende soorten atomen, maar in het jonge heelal bestonden dus alleen nog waterstofatomen en heliumatomen. Verschillende atoomsoorten onderscheiden zich door hun massa. Waterstof is het lichtste atoom, en helium het op één na lichtste. Zwaardere atoomsoorten ontstaan door het samensmelten (fuseren) van lichtere. Dit gebeurt eigenlijk alleen maar op grote schaal in sterrenkernen. Alle atoomsoorten anders (lees: zwaarder) dan waterstof en helium (bijvoorbeeld zuurstof, koolstof, stikstof, ijzer) zijn dus gevormd in sterren.

Na totaal 10 miljard jaar te hebben geleefd als hoofdreksster komt er een einde aan het rustige leven van de zon als hoofdreksster omdat alle waterstof in de kern is omgezet in helium. Wat verder naar buiten toe is nog wel waterstof aanwezig, maar de temperatuur daar is niet zo hoog dat hierin kernfusie-reacties kunnen plaatsvinden. De bruikbare brandstof (waterstof in de kern) is dus op en de energievoorziening stopt. De ster is echter nog wel erg heet, en verliest dus nog steeds energie in de vorm van straling. Door dit energieverlies kan hij zich niet permitteren groot te blijven en zal hij opnieuw moeten krimpen. De waterstoflaag rondom de heliumkern wordt daardoor naar het hete centrum van de ster toegetrokken. Hierdoor wordt de temperatuur in deze laag zo hoog dat hij zal ontbranden. De energievoorziening is opnieuw veilig gesteld. De buitenste lagen van de ster gaan uitzetten en de energie die vrijkomt in de schil waar waterstofverbranding plaatsvindt wordt zeer efficiënt naar buiten getransporteerd. Hierdoor is de lichtkracht van de ster erg hoog, maar z'n temperatuur relatief laag. Net als een gasvlam kleurt een ster blauwer naarmate hij heter is, en rood als hij relatief koel is. Omdat de ster nu groot en rood is wordt hij een *Rode Reus* genoemd.

Omdat de verbranding in een schil om de heliumkern heen plaatsvindt, zal deze zelf nog verder blijven samentrekken. De temperatuur loopt daar in korte tijd op tot zo'n honderd miljoen graden. Bij die temperatuur zal helium explosief ontbranden en worden zuurstof en koolstof gevormd. Na de 'helium flits' wordt de ster tijdelijk weer wat kleiner en minder lichtkrachtig.

Maar ook de helium voorraad in het centrum van de ster raakt op den duur op en de fusiereacties stoppen weer zodra de hele kern van de ster uit koolstof bestaat. De geschiedenis herhaalt zich, want net als de eerste keer toen de ster tijdelijk zonder brandstof zat zullen fusiereacties in een schil om de kern het weer overnemen. Ditmaal zal daarbij helium fuseren. Iets verder naar buiten, in de eerder gevormde schil, wordt nog altijd waterstof in helium omgezet. Omdat opnieuw alleen de schillen actief zijn wordt de ster lichtkrachtiger, koeler en groter, net zoals gebeurde toen hij voor de

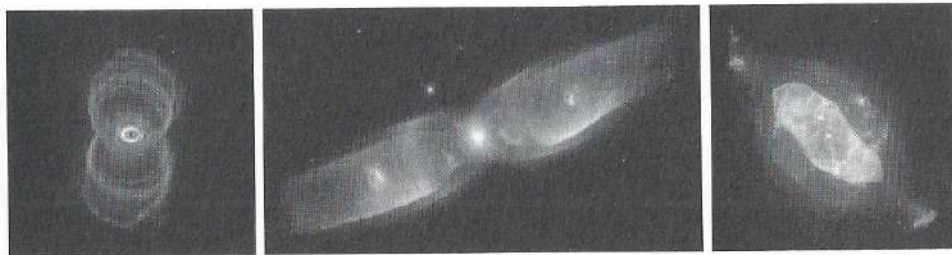


FIGUUR 1: De levenscyclus van een zon-achtige ster. 1. Een gaswolk trekt samen, wordt warmer, begint te stralen, krimpt verder, enzovoort, totdat de kern zo dicht is dat fusiereacties beginnen. 2. De ster is gedurende 10 miljard jaar een hoofdreksster, die in zijn kern waterstof (H) in helium (He) omzet. 3. De rode-reuzenfase; de kern bestaat uit helium, in een schil er omheen wordt waterstof omgezet in helium. 4. Een AGB-ster heeft een kern van koolstof (C) en zuurstof (O) en in schillen om de kern reageert helium tot koolstof en zuurstof tot helium. 5. De AGB-ster blaast zijn schillen weg, de kern verandert in een witte dwergster en verlicht de schil (planetaire nevel). De weggeblazen materie komt in de interstellaire ruimte en wordt gebruikt voor de vorming voor een nieuwe generatie sterren.

eerste keer in de Rode-Reuzen-fase terecht kwam. Deze tweede reuzenfase wordt de *Asymptotische Reuzenfase* genoemd, kortweg AGB, naar het engelse *Asymptotic Giant Branch*. Gedurende deze fase vindt ruwweg iedere tienduizend jaar een explosieve verbrandingsfase plaats (thermische puls).

Tegelijkertijd worden de buitenste lagen van de ster weggeblazen, dit heet de sterrenwind. Hoe en waarom dat gebeurt is het werkelijke onderwerp van dit proefschrift en komt iets verder in deze samenvatting aan bod. Dat de sterrenwind van deze reuzensterren eerder een orkaan is dan een zacht briesje blijkt uit het feit dat het massaverlies zo groot kan worden dat de ster in tienduizend jaar de helft van z'n massa kwijtraakt. Dat lijkt langzaam, maar in verhouding tot z'n leeftijd van tien miljard jaar is dat toch echt een heel 'Big Diet'. Ter vergelijking, als een mens in verhouding net zo snel zou willen afvallen zou hij in een uur tijd de helft van z'n gewicht moeten kwijtraken.

Door de thermische pulsen tijdens de AGB-fase worden helium, koolstof en zuurstof door de buitenste lagen heen gemengd. Deze stoffen worden dus in de wind naar buiten geblazen, samen met heel veel waterstof. Precies dat maakt de ogenschijnlijk saaie sterren zoals de zon zo ontzettend nuttig! Immers, wijzelf bestaan voor een heel groot deel uit water (dat een combinatie van waterstof en zuurstof is) en koolstof (spieren) en



FIGUUR 2: Planetaire nevels: vuurwerk na een onopvallend leven van zo'n tien miljard jaar. Deze afbeeldingen, gemaakt met de Hubble ruimtetelescoop zijn nog veel mooier in kleur, zie <http://www.stsci.edu/>.

leven op een rotsachtige (silicium) planeet met een dampkring van stikstof en zuurstof. Alle essentiële bouwstenen voor ons leven zijn ooit geproduceerd in de kernen van sterren. Vervolgens zijn ze door sterrenwinden de interstellaire ruimte in geblazen en terecht gekomen in de gaswolk waaruit vervolgens ons zonnestelsel is gevormd. Deze kringloop van materie voor het ontstaan en sterven van sterren is geschetst in figuur 1. Maar, zoals gezegd helemaal aan het begin van dit verhaal: zonnen-op-leeftijd zijn niet alleen nuttig, maar ook erg mooi. Als de ster z'n hele schil heeft weggeblazen blijft alleen de kale kern over. Die kern is klein en heet, witheet zelfs, en wordt een *Witte Dwerg* genoemd. Het witte dwergsterretje zelf is niet van een betoverende schoonheid, maar het is in staat de weggeblazen gasschil te verlichten. En dat kan er spectaculair uitzien. Zulke verlichte gasschillen worden planetaire nevels genoemd. Dit omdat ze, toen ze voor het eerst werden waargenomen met kleine telescopen, er rond en groenig uitzagen en dus aan een nevelachtige planeet deden denken. Met de enorme telescopen van tegenwoordig zien we pas echt hoe mooi de planetaire nevels zijn. We zien nu ook dat de oorspronkelijk bolvormige nevel in sommige gevallen vervormd is tot een zeer complexe structuur van schillen en soms zelfs heel langgerekt is geworden. Figuur 2 toont een paar planetaire nevels, maar eigenlijk komen ze in zwart-wit niet helemaal tot hun recht. Op de kaft van dit proefschrift staan er nog twee (de onderste twee figuren), maar hun weliswaar zeer fraaie kleuren pasten niet in het ontwerp.

Tenzij we tijdig een veilig heenkomen zoeken, bij voorkeur een eindje buiten het zonnestelsel, zullen we niet meemaken dat de zon op bovenbeschreven wijze z'n tien-miljardste verjaardagsfeestje viert. De aarde zal dan al opgeslokt zijn door de uitdijende zon. (Met reuzenster wordt dus inderdaad een *reus*achtige ster bedoeld.) Voordat dat gebeurt is de zon echter al zo groot en nabij dat de oceanen verdampen en de kleibodem van de Beemster en de Purmer als een schilfertje terracotta van het aardoppervlak springt. Want de rode reus is voor een ster dan wel koel, naar aardse maatstaven is hij met z'n 2500 graden nog altijd behoorlijk heet.

ZWARE JONGENS EN NOG MEER WITTE DWERGEN

Alvorens over te gaan naar wat er nu echt in dit proefschrift wordt beschreven gaan we nog even terug naar de allerlichtste en de zeer zware sterren. Want doen die laatste nu echt alleen maar kwaad? Hoe zwaarder een ster is, hoe hoger de temperatuur in de kern

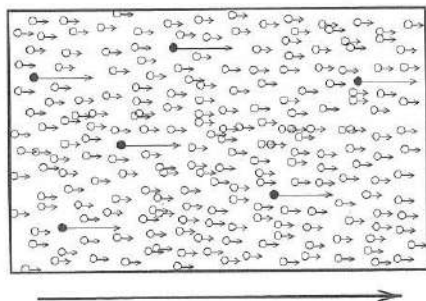
kan oplopen en hoe meer verschillende chemische elementen (atomen) er geproduceerd worden. Alle sterren kunnen waterstof omzetten in helium. Zon-achtige sterren (tot acht keer zo zwaar als de zon) kunnen die helium vervolgens weer omzetten in koolstof en zuurstof. Nog zwaardere sterren hebben een kern waarin de temperatuur zo hoog wordt dat daaruit vervolgens magnesium, silicium en ijzer voortkomen. Dat zijn de echt zware jongens, en een probleem hebben ze wel degelijk. Het produceren van atomen zwaarder dan ijzer levert namelijk geen energie op, maar kost juist energie. Een ster die zojuist z'n kern van silicium heeft omgezet in ijzer zal weer even zonder brandstof zitten en dus gaan krimpen, net als hij deed toen z'n kern van helium was. Maar omdat kernfusiereacties met eindprodukten zwaarder dan ijzer geen energie meer opleveren is krimpen ook het *enige* wat hij nog kan doen om in z'n energiebehoefte te voorzien. Met catastrofale gevolgen: de kern van de ster zal ineens storten en onmiddellijk uiteen knallen. Dit heet een supernova explosie. Hierbij kan de kern van de ster veranderen in een zwart gat, een opeenhoping van materie die klein is, maar toch zo zwaar dat zelfs het licht er niet aan kan ontsnappen. De buitenlagen van de ster spatten met grof geweld uiteen. Daarbij wordt de interstellaire ruimte dus 'vervuild' met veel nuttig materiaal, zoals zuurstof, koolstof enzovoort, maar nu dus ook magnesium, silicium en ijzer en zelfs de echt zware metalen als uranium en plutonium die kunnen ontstaan omdat er bij de explosie heel veel energie vrijkomt. De zware jongens zijn dus best ergens goed voor. Dat ze bij hun gewelddadige dood naburige sterren een flinke dreun kunnen uitdelen vergeven we ze dus maar. Voor hetzelfde geld raken ze immers een wolk met gas, die daardoor ineens stort en een nieuwe ster wordt....

De ware uitvreeters onder de sterren blijken de lichtgewichten te zijn, zij die op het eerste gezicht zo onschuldig en stil leken. Ze leven lang, maar dragen in die tijd nauwelijks bij aan de verfraaiing en ontwikkeling van hun omgeving. Ze maken immers geen koolstof, zuurstof enz. maar houden wel als een stelletje oude vrekken het waterstof en helium gas, waarmee zwaardere sterren nuttig werk hadden kunnen verrichten, lang bij zich. Uiteindelijk blazen ook zij hun buitenlagen weg, en wordt de kern een witte dwerg.

NIET SAAI MAAR WEL STOFFIG

Terug naar de zon-achtige-middenklassers-op-leeftijd. In hun buitenlagen is de temperatuur zo laag (ongeveer tweeduizend graden) dat moleculen kunnen ontstaan uit de koolstof-, stikstof- en silicium-atomen die in de kern geproduceerd zijn en die door de thermische pulsen door de buitenlagen heen gemengd zijn. Hoe lager de temperatuur, hoe groter de moleculen die kunnen ontstaan. De moleculen klonteren vervolgens samen tot kleine deeltjes vaste stof. Deze deeltjes zijn ongeveer een micrometer groot en worden door sterrenkundigen simpelweg stof genoemd. Zo kan uit koolstof roet gevormd worden en uit silicium glas. De vorming van dit stof is van groot belang voor de verdere ontwikkeling van de ster. En voor ons, omdat wij van het stof dat daar gemaakt wordt onze potloden en ramen maken.

De hoeveelheid stof die ontstaat is niet zo heel groot: slechts één procent van het het gas rondom de ster condenseert tot vaste stof. De invloed van het stof op het gas is echter enorm. Dat komt omdat het stof de straling (licht) van de ster heel



FIGUUR 3: Uitverkoop of stralingsdruk geeft aanleiding tot een kracht in de richting van de pijl. Hardlopers of stofdeeltjes (zwarte bolletjes) zijn gevoelig voor die kracht en slepen de rest van de massa (witte bolletjes) mee. Daarbij is het goed mogelijk dat er een snelheidsverschil is tussen de hardlopers (het stof) en het publiek (gas) dat ze meeslepen.

efficiënt kan absorberen. Een deel van de geabsorbeerde stralings-energie wordt door het stofdeeltje omgezet in bewegingsenergie. De straling oefent dus een kracht uit op het stof, we noemen dat stralingsdruk. Stof dat bestraald wordt zal daardoor bij de lichtbron vandaan bewegen. Het resterende deel van de energie wordt opnieuw uitgestraald. Omdat een deel van de energie al gebruikt was om te versnellen is het opnieuw uitgestraalde licht roder (minder energierijk, koeler) dan het licht dat door de ster werd uitgezonden. De aanwezigheid van de stoflaag om de ster zal er dus toe leiden dat de ster nog roder wordt dan hij al was en infrarode straling gaat uitzenden. Dat maakt het lastig dit soort sterren waar te nemen, want het menselijk oog is niet gevoelig voor infrarood licht, bovendien laat de dampkring van de aarde weinig infrarode straling door. Met speciale telescopen en vanuit de ruimte is het inmiddels wel mogelijk om stervende zonnen te bekijken.

EEN FRISSE WIND

Stofdeeltjes die versneld worden door de straling van de ster bewegen bij de ster vandaan en botsen onderweg naar buiten op de aanwezige gasdeeltjes die ze daardoor meesleuren. De gasdeeltjes zijn zelf nauwelijks gevoelig voor de straling en zouden in afwezigheid van het stof niet naar buiten bewegen. Zodra er gas wegstroomt van de ster spreken we daadwerkelijk van een sterrenwind. Het stof is dus verantwoordelijk voor de aandrijving van de sterrenwind³. De snelheden waarmee gas en stof naar buiten bewegen zijn allebei ruwweg 20 kilometer per seconde.

Tot nu toe werd vaak aangenomen dat het stof en het meegesleurde gas precies dezelfde snelheid hebben. Dat dat helemaal niet zo hoeft te zijn is eenvoudig in te zien. Stel dat zich in een winkelcentrum 1000 mensen bevinden waarvan er 10 (1%) graag nieuwe gymmen willen kopen. Zodra er omgeroepen wordt dat de gymmen op de sportafdeling in de aanbieding zijn trekken deze 10 mensen een sprintje die kant op. De

³Sterrenwinden kunnen ook op andere manieren worden aangedreven dan door stof. Onder andere omstandigheden kan het gas wel gevoelig zijn voor de straling van de ster en direct versneld worden. Ook kunnen bewegingen aan het steroppervlak (sterpulsaties) ervoor zorgen dat het gas wordt gelanceerd.

sportafdeling oefent duidelijk een kracht uit op deze mensen. De sportievelingen onder de kooplustigen behoren dus net als het stof rondom de ster tot de 1% van de massa die gevoelig is voor deze specifieke kracht. Door te gaan rennen, met een snelheid van zo'n 15 kilometer per uur, zijn botsingen met de rest van het publiek onvermijdelijk. Daardoor zullen enerzijds de hardlopers wat worden afgeremd, en anderzijds de overige mensen een kleine snelheid in de richting van de sportafdeling krijgen. We kunnen daarbij aannemen dat iedereen uit het overige publiek ongeveer dezelfde snelheid krijgt. Omdat er erg veel mensen rondlopen zal iedereen die met een hardloper in botsing is gekomen, en daardoor een hogere snelheid heeft gekregen dan de rest van de menigte, snel zelf botsen met iemand anders. Op die manier wordt de snelheid die door de hardlopers wordt overgedragen aan aanvankelijk een paar mensen uit de menigte heel snel gelijkmatig verdeeld over iedereen. Het snelheidsverschil tussen de hardlopers en het overige publiek blijft echter bestaan en hangt af van een aantal factoren. Hoe meer publiek er is, hoe moeilijker het voor de hardlopers wordt om snel te lopen. Ook de grootte van de hardlopers is van belang, twintig rennende kinderen kunnen sneller door de menigte lopen dan tien volwassenen, die samen net zo groot (en zwaar) zijn. Dat komt omdat de kinderen kleiner zijn, en daarom minder vaak botsen.

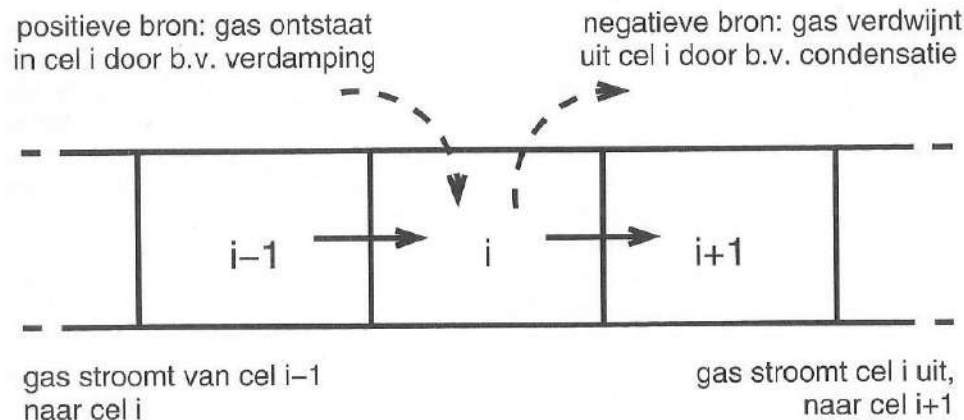
De hardlopers en het wandelende publiek, of het stof en het gas, kunnen beschouwd worden als twee 'vloeistoffen'. Er is een sterke kracht (uitverkoop of stralingsdruk) die er voor zorgt dat de ene vloeistof gaat stromen in de richting van de kracht. Doordat de versnelde, stromende deeltjes van die vloeistof in botsing komen met de deeltjes van de andere vloeistof (wandelend publiek of gas) gaat ook deze stromen in de richting van de kracht. Met de aanname dat het gas en het stof uiteindelijk dezelfde snelheid krijgen worden berekeningen aan dergelijke stromingen een stuk eenvoudiger, maar is er wel het risico dat interessante effecten over het hoofd worden gezien.

BEREKENINGEN

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift draait om stromingsberekeningen (vloeistof-, of gasdynamica, *hydrodynamica*) voor het gas en het stof in de wind van AGB-sterren. We (onderzoek doe je niet alleen) hebben onderzocht wat de invloed van het stof op de aandrijving van de wind is als *niet* wordt aangenomen dat gas en stof voortdurend met dezelfde snelheid bewegen. In stromingsberekeningen wordt de ruimte (in dit geval een schil om de ster heen) in kleine cellen opgedeeld en de tijd in stapjes. Vervolgens wordt voor iedere tijdstap, in iedere cel berekend (zie figuur 4):

1. Hoeveel gas de cel in stroomt in de tijdstap (*flux-in*).
2. Hoeveel gas de cel uit stroomt (*flux-uit*).
3. Hoeveel gas er bijkomt in de cel op andere manieren dan door instroming, bijvoorbeeld door het verdampen van stof dat aanwezig was in de cel (*positieve 'bronnen'*).
4. Hoeveel gas er verdwijnt op andere manieren dan door uitstroming, bijvoorbeeld door condensatie van gas tot vaste stof (*negatieve 'bronnen'*).

Hetzelfde wordt gedaan voor het stof. Op deze manier kan voor ieder tijdstip, op iedere plaats worden bepaald hoeveel gas en stof aanwezig is. Op vergelijkbare manier wordt bepaald hoe op ieder tijdstip de snelheid van gas en stof is. Bij dat laatste houden we



FIGUUR 4: Het principe van hydrodynamica berekeningen. Voor iedere cel, hier voor cel i , wordt bepaald hoeveel er instroomt vanuit de stroomafwaarts gelegen buurcel ($i - 1$) en hoeveel er uitstroomt naar de volgende cel ($i + 1$). Ook de toevoer en afvoer door de bronnen wordt in rekening gebracht.

ook rekening met de botsingen tussen beide, waarin het stof snelheid overdraagt aan het gas.

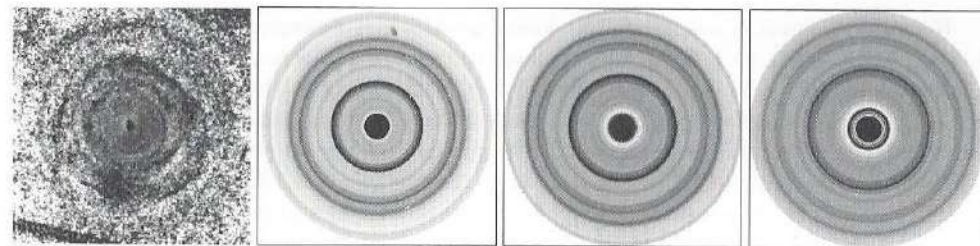
Tevens berekenen we voortdurend de chemische samenstelling van het gas (hoeveel koolstof is er, en hoeveel waterstof, komt koolstof voornamelijk voor in atomaire vorm, of zijn er moleculen?). Daaruit berekenen we weer hoeveel gas er condenseert tot stof of hoeveel stof er verdampt en weer gasvormig wordt. Daarnaast wordt de temperatuur van gas en stof bepaald uit de intensiteit van de straling en de verdeling van de materie (dichtheid) rondom de ster.

Al met al moet er heel wat berekend worden en het is onmogelijk dat uit het hoofd of op papier te doen. Dit onderzoek bestond dan ook voor een groot deel uit het schrijven van een computerprogramma dat al deze berekeningen uitvoert. Het programma is zo ontworpen dat, na het invoeren van de temperatuur, massa, lichtkracht en chemische samenstelling van de ster (en eventueel de sterkte van de pulsaties aan het oppervlak), alles vanzelf gaat. Dat betekent dat verder geen aannamen gemaakt dienen te worden over bijvoorbeeld de grootte van het stof en de plaats waar het vormt en dat de ontwikkeling van de wind dus heel natuurgetrouw nagebootst wordt.

BELLEN BLAZEN...

Toen het hydrodynamica programma klaar was⁴ en we er de schil om de ster IRC +10216 (in het sterrenbeeld Leeuw) mee simuleerden, zagen we tot onze stomme verbazing dat de wind soms sterk was en dan weer zwak. De tijdschaal van de variaties in de uitstroming was een paar honderd jaar. We zouden onmiddellijk op zoek zijn gegaan naar de fout in ons programma als niet ongeveer tegelijkertijd waarnemingen

⁴Eigenlijk is zo'n computer-programma nooit klaar, want het is een model, en als wetenschappers het over een model hebben bedoelen ze een *versimpelde weergave van de werkelijkheid*. En een versimpeling is per definitie niet volledig.



FIGUUR 5: Linker figuur: de schillen rond de ster IRC+10216 zoals waargenomen door Maun & Huggins in 1999. Overige figuren: onze simulatie van deze schillen op drie verschillende tijdstippen tijdens de AGB-fase.

van deze ster gedaan waren die een schilstructuur om de ster lieten zien. Deze kan ontstaan als er afwisselend veel en weinig gas bij de ster vandaan stroomt, dus als de wind afwisselend dicht en ijl is. De schillen die de waarnemers zagen bleken zeer veel gelijkenis te tonen met de schillen die geproduceerd worden door onze variabele wind, ze waren ongeveer net zo dik en ook de onderlinge afstand klopte (zie figuur 5). Omdat bekend is dat de uitstroming met een snelheid van tien tot twintig kilometer per seconde plaatsvindt, kan uit de afstand tussen de schillen worden afgeleid hoeveel tijd er zit tussen de vorming van twee achtereenvolgende schillen. Deze was, net als in onze model berekeningen een paar honderd jaar. Het leek er dus op dat een of andere instabiliteit in de hydrodynamica de oorzaak was van de schillen. Maar meer dan dat wisten we ook niet. We hadden in ons computermodel immers maar een paar gegevens van de ster ingevoerd waarna de ontwikkeling van de wind zonder verder ingrijpen werd berekend.

Toch blijkt hier het nut van computersimulaties. Het is immers moeilijk experimenteren met sterren. Tegen een ster zeggen: "Hé doe dat nog eens, ik snap nog niet hoe het werkt." is weinig zinvol, maar een computersimulatie start doe je gewoon even opnieuw. Door goed te kijken hoe gas en stof bewogen en van samenstelling veranderden kwamen we tot de volgende verklaring voor de wind-variaties.

Stel dat het gas een hoge dichtheid heeft, dan zijn er veel gasdeeltjes aanwezig en het versnelde stof zal dus vaak in botsing komen met gas. Het stof beweegt dan langzaam door het gas en blijft relatief lang dichtbij de ster. Daar is de dichtheid van het gas hoger dan verder naar buiten en is het gebied waar stofdeeltjes efficiënt kunnen groeien (door gas dat neerslaat op hun oppervlak). Een stof-deeltje dat langzaam door de groeizone beweegt zal dus groot (een paar micrometer) kunnen worden. De stofbevolking zal daarom bestaan uit relatief weinig, maar grote stofdeeltjes. De gezamenlijke oppervlakte van dit stof is veel kleiner dan de oppervlakte van een gelijke stofmassa die verdeeld is over heel veel kleine deeltjes. Precies zoals het schillen van een kilo grote aardappelen veel minder werk is dan het schillen van een kilo kleintjes: minder oppervlak per massa-eenheid. Ons langzame stof dat de neiging heeft groot te worden heeft dus bovendien een vrij klein totaal oppervlak, en zal daarom betrekkelijk weinig straling van de ster onderscheppen en niet heel erg versneld worden. Dus: *langzaam stof wordt groter, en groot stof wordt langzamer*. Het langzame stof zorgt echter wel voor een heel efficiënte versnelling van het gas, dat in grote hoeveelheden bij de ster vandaan stroomt.

Het andere geval is ook mogelijk: kleine stofdeeltjes bewegen snel door het gas en blijven klein, want ze hebben niet genoeg tijd om te groeien. Het stof bestaat dan uit kleine deeltjes, die een groot oppervlak in verhouding tot hun gewicht hebben en efficiënt worden versneld maar minder vaak botsen met gas, omdat ze kleiner zijn. In dit geval vinden relatief weinig botsingen tussen stof en gas plaats en het gas wordt minder hard meegesleurd door het stof. Omdat het stof maar 1% van de totale materie was, is de wind op dit moment erg ijl. De kleine stofdeeltjes kunnen echter niet eeuwig kleiner en sneller worden. Immers, hoe sneller ze gaan, hoe vaker en hoe krachtiger de botsingen zullen zijn. Omdat de hoge snelheid de botsings-efficiëntie op twee manieren beïnvloedt, zal dit effect uiteindelijk sterker zijn. Alsof ze hun parachutes openen zullen de stofdeeltjes onmiddellijk afremmen, heel efficiënt het gas meeslepen en groter worden. De overgang van snel en klein stof en een zwakke wind naar de fase van groot en langzaam stof en een sterke wind is daarmee een feit.

Onopgemerkt wordt door die overgang ook al de volgende overgang (naar opnieuw een ijle wind met snel en klein stof) ingezet. Omdat de stofdeeltjes plotseling heel veel gas bij de ster vandaan slepen neemt de hoeveelheid gas in de laagste lagen van de schil af. Een verdunningsgolf beweegt daardoor naar de ster toe. Wanneer de verdunning van het gas door de stofvormingszone trekt worden de condities voor stofgroei daar ongunstiger. De hoeveelheid gas die kan condenseren neemt immers af. Een nieuwe generatie stof zal daarom weer uit kleine deeltjes bestaan, die snel door het gas bewegen, enzovoort. Op deze manier wisselen periodes van dichte en ijle wind elkaar af. Dit gebeurt overal rondom de ster, en dus zien we schillen of bellen met veel gas en en met weinig gas.

Hiermee is de cirkel rond. De tijdschaal waarop de windvariëaties plaatsvinden wordt blijkbaar bepaald door de tijd die de verdunningsgolf nodig heeft om het stofvormingsgebied te doorkruisen. Essentieel voor het optreden van windvariëaties is het feit dat het stof groter of kleiner kan worden, afhankelijk van de omgeving waarin het zich bevindt en de mogelijkheid dat het stof een andere snelheid heeft dan het gas. Ons programma was het eerste model waarin deze aspecten gecombineerd zijn, daarom waren voorheen geen windvariëaties gevonden in modellen.

... DOE JE ALLEEN ALS JE JONG BENT

Hoewel om steeds meer planetaire nevels schillen worden gevonden, zijn er ook waar ze zeker niet zijn waargenomen. Blijkbaar treden modulaties dus lang niet altijd op en is de wind vaak ook 'glad'. Ook is het opvallend dat de schillen altijd aan de buitenkant van de planetaire nevel zitten.

Wij hebben onderzocht voor welke AGB-sterren er modulaties in het massaverlies optreden, en voor welke niet. Daartoe hebben we berekeningen gedaan voor sterren met verschillende massa, temperatuur en lichtkracht.

Eerder is al aan bod gekomen dat sterren in de AGB-fase steeds koeler en lichtkrachtiger worden. Daarnaast neemt hun massa af, omdat ze door hun wind materie verliezen. Uit onze modelberekeningen volgt dat de koelste, lichtste en lichtkrachtigste en dus de oudste reuzen relatief weinig variaties in hun wind kennen. Hun massaverlies is constant hoog. Bij de iets jongere reuzen treden de modulaties in de wind wel op.

Hun gemiddelde massaverlies is lager. In de allerjongste reuzen, die nog relatief heet, zwaar en weinig lichtkrachtig zijn blijkt het stof nauwelijks in staat het gas mee te slepen.

Deze resultaten komen overeen met wat er is waargenomen. Uit het feit dat de schillen steeds aan de buitenkant van de nevel gevonden worden valt af te leiden dat een ster op 'jonge' leeftijd een wind met modulaties heeft en pas daarna een gladde wind ontwikkelt.

EN VERDER?

Hoe het de reuzenster vergaat nadat hij bellen heeft geblazen in z'n schil is bekend. Hij wordt een witte dwerg met een planetaire nevel eromheen. De restanten daarvan worden keurig gerecycled in de interstellair ruimte, en wellicht ooit opnieuw samengeperst tot een ster uit een volgende generatie.

Dat voor de astronomen hiermee de kous af is, is een illusie. Al het hierboven beschreven onderzoek is slechts een model, waaraan nog jarenlang details toegevoegd kunnen worden om het nog realistischer te maken. De huidige versie van het programma kan bijvoorbeeld slechts de ontwikkeling van bolvormige structuren om AGB-sterren berekenen. Als de AGB-ster z'n schillen uitblaast vormt dat geen beperking, want waarnemingen tonen aan dat die schillen inderdaad bolvormig zijn. Maar de planetaire nevel, die bestaat uit het gas dat tijdens de laatste, gladde en zeer dichte windfase is uitgeblazen, is meestal niet bolvormig, zie figuur 2. Het is de bedoeling het programma hieraan aan te passen. Een andere beperking van het huidige programma is dat het slechts een heel klein deel van de AGB-fase modelleert. Door steeds de massa, temperatuur en lichtkracht aan te passen kunnen we nu wel een beetje nagaan hoe de ster zich op de lange termijn ontwikkelt, maar eigenlijk zouden we liever veel langere berekeningen doen, waarbij dit tussentijds ingrijpen niet meer nodig is.