

Numerieke Studies van het interstellair medium op galactische schaal

(Samenvatting)

Het bestaan van op koolwaterstoffen gebaseerde levensvormen als U en ik en van de aarde als geheel is mogelijk doordat sterren en het gas tussen de sterren deel uit maken van een complexe cyclus van geboorte, vernietiging en wedergeboorte.

Alle elementen zwaarder dan helium, “metalen” in sterrenkundig jargon, worden gevormd in de gigantische drukvaten die we sterren noemen. In het centrum van alle sterren vinden onder het gewicht van de bovenliggende gaslagen en de extreme temperaturen die er heersen (meer dan 10 miljoen graden Celsius) kernreacties plaats. Nadat een ster gevormd is uit een samentrekkende gaswolk, is deze het grootste deel van haar bestaan bezig met het omzetten van het eenvoudigste en meest veelvoorkomende element, waterstof, in het op-één-na eenvoudigste en op-één-na meest veelvoorkomende element, helium. Uit deze reactie putten sterren de energie die verdere ineenstorting tegenhoudt en zo kunnen zij miljoenen of zelfs miljarden jaren een precair evenwicht in stand houden.

Het opraken van het waterstof luidt het einde van de levensloop van de ster in. Wat er vervolgens gebeurt hangt af van de totale massa van de ster. Na 10 miljard jaar zal een middelgrote ster als onze zon, het onvermijdelijke einde enigszins rekkend door de fusie van helium tot koolstof, krimpen tot een gedegenereerde dwergster. Daarbij zwellen de buitenlagen van de ster op tot een rode reuzen ster. Uiteindelijk zullen deze ontsnappen en zich verspreiden door het omliggende gas. Voor zware sterren (zwaarder dan ongeveer $8 \times$ de massa van de zon) komt het einde sneller, na ongeveer 10 miljoen jaar, en verlopen de terminale fases complexer: doordat grotere verhitting en druk mogelijk zijn kunnen uiteindelijk alle elementen gevormd worden, tot aan ijzer toe. Hierna kan geen energie meer geproduceerd worden uit kernfusie en stort het centrum van de ster ineen tot een neutronenster of zwart gat. Als gevolg van de schokgolf die dit teweegbrengt ontploft de rest van de ster als supernova. Zo'n supernova explosie is enkele weken lang even helder als een heel melkwegstelsel en het omliggende gas wordt heftig verstoord. Echter, ook voordat dit gebeurt hebben

zware sterren al een grote invloed op hun omgeving: ze vormen een krachtige bron van UV stralen welke de belangrijkste bron van verhitting is voor het gas tussen de sterren, en ze zijn tijdens hun levensloop al bezig het grootste deel van hun massa, inclusief een deel van de zware elementen die de ster gevormd heeft, weg te blazen met enorme snelheden, tot 2000 kilometer *per seconde*.

Groepjes van zulke zware sterren zijn het meest opvallende kenmerk van stervormende melkwegstelsels. Ze verhitten het omliggende gas door UV straling, en de gezamenlijke effecten van de gasstromen en supernova explosies, vaak aangeduid als de mechanische helderheid van de cluster, zorgen voor de vorming van een cocon van heet gas om de cluster. Deze bel heet gas expandeert en het omliggende gas wordt heftig verstoord. Zo heftig, in feite, dat de vorming van sterren door de afkoeling en samentrekking van gaswolken in de omgeving van een jonge cluster sterren onmogelijk wordt. Edoch, het kan zijn dat zich op de rand van deze groeiende bel zoveel gas ophoopt dat dit gas onstabiel wordt en dat er later in deze gaswolken nieuwe sterren worden gevormd, in gas dat verrijkt is met metalen uit de vorige generatie sterren.

De hoeveelheid en plaats van stervorming in een melkwegstelsel liggen dus niet van tevoren vast. Ze worden bepaald door het ingewikkelde samenspel van de koelingseigenschappen van het gas, de werking van de zwaartekracht, verhitting door jonge sterren en de dynamische reactie op krachtige gasstromen en explosies die het gevolg zijn van stervorming.

Welnu, dit proces van stervorming en terugkoppeling is het onderwerp van dit proefschrift! Het onderzoek dat hier gepresenteert wordt is een poging de complexe processen die plaatsvinden in melkwegstelsels te volgen met behulp van computer modellen. Deze modellen moeten de evolutie beschrijven van de verdeling van gas en sterren in een melkwegstelsel, dat wil zeggen in gebieden van tienduizenden lichtjaren groot. Door dit te doen kunnen we onderzoeken wat in werkelijkheid honderden miljoenen jaren of zelfs miljarden jaren nodig heeft om te gebeuren.

Resultaten van dit proefschrift

In hoofdstuk 2 presenteren we een model voor het gas tussen de sterren, het interstellair medium. Dit model is realistischer dan voorgaande modellen doordat het, behalve de thermische evolutie, ook de ionisatie van het interstellair gas berekent en doordat het rekening houdt met de effecten van geladen stof op de UV verhitting en met kosmische straling. Dit model passen we toe in onze simulatie code, die, behalve deze aspecten van gasfysica en de bewegingen van gas en sterren onder invloed van de zwaartekracht ook berekent waar stervorming plaats zal vinden. Zo verkrijgen we een programma dat zeer flexibel is en waarmee we het gedrag van uiteenlopende types melkwegstelsels kunnen onderzoeken en aldus inzicht kunnen krijgen in hun ontwikkeling.

Het is redelijk precies bekend hoeveel licht een gegeven cluster sterren produceert en wat de mechanische helderheid is. Deze mechanische helderheid kan in principe als een gewone verhittingsbron worden beschouwd bij het berekenen van de lokale temperatuursveranderingen van het gas. Echter, hierbij doet zich een probleem voor: namelijk het feit dat de supernova ontploffingen zeer klein beginnen en zich dan snel

ontwikkelen. Deze ontwikkeling is niet goed te volgen met een code die op grote schalen werkt. Als we de supernova energie gebruiken om het gas te verhitten, zal deze snel weer verloren gaan doordat het gas energie verliest door straling uit te zenden. In hoofdstuk 3 presenteren we twee nieuwe methoden om het effect van de mechanische verhitting op het interstellair medium in de berekening op te nemen, die dit probleem niet hebben.

Vervolgens passen we in Hoofdstuk 4 het model voor het interstellair medium en de supernovas toe in een model van een dwergstelsel. Zulke dwergstelsels zijn ongeveer 100 keer zo klein als ons eigen melkwegstelsel, en over het algemeen vertonen ze niet de spiraalstructuren die zo kenmerkend zijn voor stelsels als ons eigen melkwegstelsel. Dit maakt deze stelsels ideaal om stervorming te bestuderen. In normale spiraal stelsels wordt de stervorming namelijk voor een groot deel bepaald door deze spiraal structuur. In dwergstelsels is de stervorming in zijn meest eenvoudige vorm te bestuderen. Voor onze model dwerg vinden we een kenmerkend patroon van regelmatige variaties: de stervorming verloopt in uitbarstingen die zich elke 160 miljoen jaar herhalen. Het feit dat stelsels, die verder vrijwel identiek zijn, toch verschillend stervormingsgedrag kunnen vertonen zou dan verklaard kunnen worden door aan te nemen dat deze stelsels tijdens verschillende stadia in hun cyclus worden waargenomen.

In hoofdstuk 5 onderzoeken we wat de invloed is van de massa verdeling van een dwergstelsel op de stervorming. We laten zien dat de kenmerken van een speciaal type onregelmatige dwergstelsels, de zogenaamde blauwe compacte dwergstelsels (BCDs) het resultaat zijn van hun bijzondere bouw. De waarnemingen lijken namelijk uit te wijzen dat deze stelsels gemiddeld compacter gebouwd zijn en bijvoorbeeld hogere centrale gas (oppervlakte) dichtheden hebben. Voor het eerst laten we nu zien dat het karakteristieke stervormingspatroon van dit type stelsel, namelijk een heftige uitbarsting in het centrum, inderdaad volgt uit de waargenomen structurele kenmerken. Verder blijkt uit het tijdsverloop van de stervorming in deze stelsels dat de BCD geen duidelijke periodes van verminderde stervorming kennen. Hieruit volgt dat deze stelsels relatief jong zijn, omdat de waargenomen stervormingsintensiteit het reservoir aanwezige gas snel (dat wil zeggen in enkele miljarden jaren) uit zal putten.

We voegen in hoofdstuk 6 een belangrijke component toe aan ons computermodel, namelijk moleculair waterstof gas. Vorming van dit gas is de directe voorloper van stervorming en waarnemingen van moleculair gas vormen een zeer belangrijke onderdeel van observationele studies van eigenlijk alle soorten stervormende melkwegstelsels. Het is dan ook zeer wenselijk om de hoeveelheid moleculen H_2 theoretisch te kunnen bepalen, echter dit is zeer lastig om te doen, door de complexiteit van de natuurkundige processen die hierbij spelen. We hebben een methode bedacht om dit toch te doen door gebruik te maken van simpele oplossingen voor de balans tussen de vorming van waterstof moleculen op stofdeeltjes en de vernietiging van deze moleculen door UV fotonen voor eenvoudige structuren en deze te generaliseren door gebruik te maken van de waargenomen relatie tussen de grootte en gemiddelde dichtheid van wolken. We laten zien dat het model goede resultaten geeft bij toepassing op het probleem van de verdeling van moleculair gas in dwergstelsels.

Als laatste presenteren we in hoofdstuk 7 een alternatief voor de methode om gasdynamica uit te rekenen die we tot nu toe hebben gebruikt. De methode die

we gebruiken rekt het gedrag van gassen uit door de beweging te volgen van een beperkte set deeltjes. Om dit te kunnen doen heb je een methode nodig om uit de eindige hoeveelheid deeltjes een schatting te maken voor de gas dichtheid die deze deeltjesverdeling representeert. Dit wordt normaal gesproken gedaan door de deeltjes te zien als een soort onscherp bolletje. De massa van de deeltjes wordt dan uitgesmeerd volgens wat in mathematische termen een drager functie heet. De losse deeltjes geven dan de indruk van een aaneengesloten geheel, ongeveer zoals een pointillistisch schilderij van een afstandje volledig beschilderd lijkt. De nieuwe methode maakt in plaats van een drager functie gebruik van de zogenaamde Delaunay triangulatie, hierbij wordt de dichtheid op deeltjes positie bepaald door de massa van het deeltje verdeeld te zien over het gebied afgebakend door de dichtstbijzijnde deeltjes. We laten zien dat een dergelijke dichtheidsschatting in potentie zeer grote voordelen biedt boven de normale schatting.