



Universiteit
Leiden
The Netherlands

The Great Collapse

Caputo, D.P.

Citation

Caputo, D. P. (2015, January 22). *The Great Collapse*. PhD Thesis. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/31710>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/31710>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/31710> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Caputo, Daniel P.

Title: The Great Collapse

Issue Date: 2015-01-22

CHAPTER 7 Samenvatting

De ster is de fundamentele eenheid in sterrenkunde, al het sterrenkundig onderzoek is, zoals de naam al zegt, op één of andere manier gerelateerd aan sterren en hun fysische processen. In dit proefschrift is dit niet anders. Om specifiek te zijn, in dit werk focus ik me op verschillende vormen van ineenstorting gerelateerd aan sterren en groepen van sterren.

De meeste sterren worden geboren in groepen en sommige van deze groepen bestaan uit vele duizenden sterren en kunnen ongelooflijk zwaar zijn. Tijdens de vorming van een groep van sterren, ook wel sterrenhoop genoemd, kan het gebeuren dat de sterrenhoop begint te krimpen, of zelfs ineenstort, en het ineenstorting van deze sterrenhopen kan interessante systemen opleveren. Tijdens het ineenstorten van de sterrenhoop gaan de sterren steeds sneller bewegen en komen ze dicht bij elkaar. Het feit dat de sterren dicht bij elkaar komen heeft vele gevolgen bijvoorbeeld: er ontstaan dubbelsterren, ook wel binaire sterren genoemd, of zelfs systemen die bestaan uit meer dan twee om elkaar draaiende sterren, sterren kunnen uit de sterrenhoop worden gekatapulteerd en het is zelfs mogelijk dat sterren op elkaar botsen.

Een ster heeft niet het eeuwige leven en als aan het eind van zijn leven alle nucleaire brandstof verbruikt is zijn er nog maar een paar dingen die met de ster kunnen gebeuren. Als de ster lichter is dan 8 tot 10 zonnemassa's¹ dan zal de ster op een gegeven moment periodisch gaan pulseren en het meeste van wat er nog van de ster over is zal worden weggeblazen door sterke winden. Als de ster zwaarder is dan 10 zonnemassa's zal het meeste van het materiaal verdwijnen in een alles overwelmende explosie, een zogenaamde supernova. Als het een zeer zware ster is, van meer dan 20 zonnemassa's, dan kan er een zwart gat gevormd worden na de supernova. Dit soort zwarte gaten noemen we stellaire zwarte gaten², omdat verwacht wordt dat ze een gewicht hebben dat tussen een paar

¹Eén zonnemassa is gelijk aan het gewicht van de zon.

²Er bestaan ook andere soorten zwarte gaten: Superzware zwarte gaten, deze zijn meer dan een miljoen keer zwaarder dan de zon en zijn veelvuldig geobserveerd in het centrum van sterrenstelsels. Als het gewicht van het zwarte gat tussen de honderd en een miljoen zonnemassa's

zonnemassa's en enkele tientallen zonnemassa's ligt.

Hoofdstukken 2 en 3 van dit proefschrift gaan over het gedrag van sterren die geboren worden in sterrenhopen, terwijl hoofdstukken 4 en 5 als thema het overlijden van grote sterren hebben.

In de eerste twee onderzoek ik wat er gebeurt met sterrenhopen vlak nadat de sterren geboren zijn; hoe waarschijnlijk is het dat sterrenhopen krimpen als ze net gevormd zijn, en als het waarschijnlijk is dan willen we graag weten hoeveel ze precies krimpen. Tegelijkertijd onderzoek ik hoe de sterren zichzelf binnen deze sterrenhopen ordenen. Vaak zien we dat in jonge sterrenhopen de zwaarste sterren zich in het centrum bevinden en in dit proefschrift hebben we de meest waarschijnlijke oorzaak hiervoor geïdentificeerd.

In de laatste hoofdstukken laat ik zien wat er gebeurt als in een systeem van drie sterren één van deze sterren een supernova wordt. Verder benader ik het aantal middelzware zwarte gaten dat we kunnen verwachten in een gebied van 325 miljoen lichtjaar rond de Aarde.

Sterrenkunde wordt vaak geassocieerd met 's avonds naar de sterren kijken om te zien wat er met ze gebeurt, maar dat is niet de primaire onderzoeksmethode die in dit proefschrift gebruikt wordt, maar in plaats daarvan wordt een computer gebruikt om te simuleren hoe zwaartekracht en andere fysische processen de sterren beïnvloeden. Maar waarom zouden we simulaties gebruiken als er zoveel sterren zijn waarop we onze telescopen kunnen richten?

7.1 De rol van simulaties

Stelt u zich eens voor dat er buitenaardse wezens zijn die de Aarde bestuderen en met hun geavanceerde technologie in staat zijn om een foto te maken met daarop elke levende mens.

Met behulp van deze foto zullen de aliens instaat zijn om te concluderen dat de meeste mensen tussen de 20 en 60 (aard-) jaren oud zijn. Verder zullen ze met behulp van de foto, slimme metingen en theorieën, waarschijnlijk ontdekken dat de jonge mensen uiteindelijk uit zullen groeien naar mensen van middelbare leeftijd en de mensen van middelbare leeftijd zullen groeien naar een oudere leeftijdsklasse.

Hoewel de buitenaardse wezens van dat ene moment, gevangen in de foto, veel over de mens kunnen leren is het vanzelfsprekend dat ze nog zoveel meer kunnen leren van een film die het leven van alle mensen en hun activiteiten gedurende de lengte van de film laat zien. Hoe langer de film hoe meer geheimen

ligt dan wordt het een middelzwaar zwart gat genoemd—echter er is tot nu toe geen definitieve observatie van een dergelijk zwart gat gedaan. Op dit moment is HLX-1 de belangrijkste kandidaat om als middelzwaar zwart gat geïdentificeerd te worden, dit object wordt in meer detail besproken in Hoofdstuk 4.

de aliens kunnen ontdekken, wat hun in staat stelt om niet alleen te bestuderen hoe mensen ouder worden en hoe ze gegroepeerd zijn, maar ook hoe ze zich verplaatsen van de ene naar de andere plaats en, als de film lang genoeg zou zijn, zelfs hoe beschavingen ontstaan, groeien en weer ten onder gaan.

Sterrenkundige (althans de menselijke) hebben hetzelfde probleem. Door gebruik te maken van telescopen hebben we foto's gemaakt (en data verzameld) van de vele sterren om ons heen, en met behulp van deze informatie hebben we de verbazingwekkende geschiedenis van het heelal kunnen achterhalen.

Zo hebben we bijvoorbeeld geleerd dat sterren geboren worden, vaak tegelijkertijd met broers en zussen, in een gewelddadige omgeving, waarna ze tijdens hun middelbare leeftijd een lange periode van relatieve rust kennen. Maar uiteindelijk komen ze in hun nadagen, welke weer zeer dynamische en gewelddadig zijn en tenslotte sterven ze op een vaak spectaculair mooie manier. We hebben geleerd over sterrenstelsels, kosmische leegtes, zwarte gaten, supernova's, etc., enkel door gebruik te maken van foto's. Maar we kunnen een film maken door gebruik te maken van simulaties. Door computers te gebruiken, geprogrammeerd met de wetten van de fysica, kunnen we simulaties uitrekenen om te bepalen hoe een sterrenstelsel er een miljoen of zelfs een miljard jaar geleden uitzag. Ze stellen ons in staat om te kijken naar het verleden van het heelal, iets wat op geen enkel andere manier mogelijk is, en te extrapoleren hoe het heelal in de toekomst zal veranderen, iets wat eigenlijk miljoenen jaren van observaties zou vereisen.

Het is niet gegarandeerd dat simulaties correct zijn en we moeten ze zorgvuldig en weloverwogen gebruiken. Maar, met gedegen uitgangspunten en een zorgvuldige benadering kunnen we bepalen wat er in het heelal, zowel dichtbij als ver weg, in het verleden gebeurt is en in de toekomst nog gaat gebeuren. Simulaties zijn voor sterrenkundigen een krachtig hulpmiddel en met behulp van deze theoretische methoden heb ik het werk, zoals beschreven in dit proefschrift, kunnen uitvoeren.

7.2 Instortende sterrenhopen

In Hoofdstukken 2 en 3 beschrijf ik de resultaten van meer dan 500 simulaties van sterrenhopen.

De begin snelheid waarmee we de sterren in de modellen initialiseren is in elke simulatie anders; in sommige simulaties was de snelheid, ook wel kinetische energie genoemd, van de sterren zo hoog dat het grootste deel van de sterren het systeem uit vloog—ze bewogen zo snel dat de gezamenlijke zwaartekracht van de andere sterren in het systeem niet sterk genoeg was om deze sterren vast te houden.

In andere simulaties hebben we de sterren precies de snelheid gegeven die

7.2 *Instortende sterrenhopen*

ervoor zorgt dat ze niet uit het systeem vliegen. In plaats daarvan bewogen de sterren in die systemen langs banen waarbij het lijkt alsof ze altijd in een dergelijke baan bewogen hadden, dit is een zogenaamd viriaal systeem. In weer andere simulaties, die we koude systemen noemen, hadden de sterren een snelheid die een fractie was van de sterren in een viriaal systeem. In onze laatste set van simulaties hadden de sterren helemaal geen begin snelheid en in deze simulaties begonnen de sterren, als gevolg van de zwaartekracht, meteen naar het centrum van de sterrenhoop te vallen. Dergelijke systemen noemen we ineenstortende sterrenhopen.

7.2.1 De temperatuur van een sterrenhoop bepalen

In Hoofdstuk 2 laat ik zien dat de keuze van de begin snelheid, kinetische energie, een dramatisch effect heeft op de manier waarop een sterrenhoop zich ontwikkeld.

De simulaties hebben ons laten zien dat de keuze van de initiële snelheid van de sterren een bepalend effect heeft op de evolutie van de sterrenhoop. Daardoor wordt het mogelijk om de initiële snelheid van sterren in een jonge sterrenhoop te bepalen als we deze sterrenhoop in detail hebben geobserveerd.

In de Grote Magelhaense Wolk (Large Magellanic Cloud), een naburig sterrenstelsel, bevindt zich een erg jonge sterrenhoop genaamd R136. Door zijn leeftijd, en het feit dat R136 veelvuldig is geobserveerd, is dit een ideale observationele kandidaat voor dit theoretische werk. We hebben de straal van de kern, de distributie van sterren, de ratio van de kinetische en potentiële energie en de leeftijd van de sterrenhoop vergeleken. Daardoor waren we in staat om te bepalen dat toen R136 gevormd werd, de snelheid van de sterren waarschijnlijk tussen de 0.4 en 0.5 keer de snelheid was van sterren in een vergelijkbaar viriaal systeem.

Nadat deze analyse was uitgebreid met 15 andere jonge sterrenhopen bleek dat de meest voorkomende initiële snelheid tussen de 0.6 en 0.7 keer de begin snelheid van viriale systemen lag. Als andere sterrenhopen vergelijkbaar zijn met de sterrenhopen die we hier onderzocht hebben dan hebben we geleerd dat in de natuur sterrenhopen wel koel, maar niet koud ontstaan.

Echter, om een volledig begrip te krijgen van de fysica in sterrenhopen moeten we de simulaties uitbreiden; we moeten bijvoorbeeld ook de fysica van gas en stof in de sterrenhopen meenemen, en weten hoeveel sterren er nou geboren worden als dubbelsterren. Naarmate we meer en meer complexiteit aan onze simulaties toevoegen zullen we meer en meer details achterhalen over hoe de natuur werkt en worden de films van de buitenaardse systemen steeds realistischer.

7.2.2 Waarom klonten alle grote sterren samen?

In Hoofdstuk 3 staat één vraag centraal: wat zorgt ervoor dat de zwaarste sterren in jonge sterrenhopen zich bij elkaar groeperen?

Van jonge sterrenhopen is bekend dat er massa segregatie plaats vindt, dat betekent dat de zwaardere sterren samenklonten, maar hoe het komt dat dit zo snel gebeurt, is nog niet bekend. In dit hoofdstuk worden er twee mogelijke scenario's voorgesteld. In het eerste scenario krimpen jonge sterrenhopen en worden daardoor erg compact. Doordat alle sterren zich vlak bij elkaar bevinden zal het sneller gebeuren dat de meest zware sterren in contact komen met andere zware sterren en als gevolg van de zwaartekracht zullen ze ook dicht bij elkaar blijven. In het tweede voorgestelde scenario worden er meerdere kleine sterrenhopen gevormd terwijl de sterrenhoop krimpt. In deze kleine sterrenhopen tredt vervolgens erg snel massa segregatie op, omdat ze zo klein zijn. En als uiteindelijk alle kleine sterrenhopen weer zijn samengesmolten tot één enkele sterrenhoop zou in dit scenario het massa segregatie effect behouden gebleven moeten zijn.

De simulaties die we voor dit hoofdstuk hebben gedraaid hebben zoveel te onderzoeken data geproduceerd dat bestaande onderzoeksmethoden niet langer geschikt waren. Daarom moesten we een nieuwe, snellere methode ontwikkelen om te meten of er sprake was van massa segregatie in een sterrenhoop en zo ja in welke mate. Dit is uiteindelijk gelukt en de nieuwe methode is orders van grote sneller dan de vorige methoden en bovendien zijn de resultaten van betere kwaliteit.

Met deze nieuwe methode was ik in staat om een experiment te ontwerpen waarmee ik van een systeem, tijdens de simulatie, continue de massa segregatie kon meten. Daarna, nadat de simulatie voor een korte periode opnieuw gedraaid was, deed ik de gewichten van de sterren willekeurig herverdelen hierbij er voor zorgend dat de massa en snelheid niet werden aangepast. Na de herverdeling werd de simulatie hervat en werd uitgevoerd tot de eindtijd van de simulatie. Deze herverdeling hebben we op verschillende tijdstippen uitgevoerd. Twee keer deed ik de herverdeling van de gewichten tijdens de ineenstorting van de sterrenhoop, twee keer deed ik de herverdeling nadat de sterrenhoop ineengestort was en één keer vond de willekeurige herverdeling plaats op het moment dat sterrenhoop het meest compact was.

Als de mate van massa segregatie na de herverdeling van de massa's niet noemenswaardig was veranderd, tijdens en na de ineenstorting van de sterrenhoop, dan was er of iets mis met onze methode of geen van beide voorgestelde scenario's is correct. Dit bleek echter niet het geval te zijn.

Als we de gewichten herverdelen voordat het systeem ineengestort is en aan het einde van de simulatie zou blijken dat de massa segregatie *significant* anders was dan in de oorspronkelijke simulatie, dan is het tweede scenario de juiste.

Omdat in dat geval het belangrijk is waar de zwaarste sterren zich bevinden voor de ineenstorting. Echter als de massa segregatie *niet significant* veranderd is aan het einde van de simulatie dan betekent het dat de massa segregatie plaatsvindt terwijl het systeem aan het ineenstorten is en dan is het eerste scenario de juiste. De resultaten van de simulaties laten zien dat het eerste scenario het meest waarschijnlijk is. Als de gewichten door elkaar gegooid zijn voordat het systeem ineenstort dan zien we nauwelijks verschil in de uiteindelijke massa segregatie van het systeem. Dat betekent dat het meest belangrijke moment voor massa segregatie is op het moment dat het systeem het meest dicht en compact is en op dat moment heeft ons tweede scenario amper invloed.

7.3 Ineenstortende Sterren

Als zware sterren doodgaan, zullen ze ineenstorten met als gevolg een supernova en, als ze zwaar genoeg zijn, storten ze daarna nog een keer in en vormen dan een zwart gat. In Hoofdstuk 5 kijk ik naar de effecten die een supernova heeft op een systeem van drie of meer sterren. Als een ster een supernova ondergaat verliest deze het grootste deel van zijn massa, hierdoor wordt de zwaartekracht die de andere sterren in het systeem voelen verminderd, wat er vervolgens toe kan leiden dat sterren niet langer door de zwaartekracht met elkaar gebonden zijn. In Hoofdstuk 4 benader ik het aantal middelgrote zwarte gaten, MGZG, dat aanwezig moet zijn in het nabije heelal.

7.3.1 Supernova

Het is niet ongebruikelijk om sterren te vinden die zich vanwege de zwaartekracht in groepen van twee, drie of meer bevinden. Als één, of meerdere, van de sterren in deze kleine sterrenhopen zwaar genoeg is om een supernova te vormen dan zal er een significante en snelle reductie optreden in de massa van deze sterrenhoop. Dit grote verlies in massa kan een stabiele sterrenhoop veranderen in een onstabiele sterrenhoop, doordat door de gewichtsverandering de zwaartekracht tussen de sterren anders wordt.

In Hoofdstuk 5 onderzoeken we systemen bestaande uit drie sterren waarbij twee sterren zich vlak bij elkaar bevinden en de derde ster relatief ver weg is, dit wordt ook wel een hiërarchisch drieling systeem genoemd. Voor de buitenste ster kunnen we de twee sterren die zich vlak bij elkaar bevinden representeren als een enkele ster. Door gebruik te maken van deze representatie bepaal ik welke condities vereist zijn om te zorgen dat het systeem na een supernova stabiel blijft, en andersom welke condities zullen leiden tot een systeem van sterren dat niet langer door zwaartekracht gebonden is.

Door wederom gebruik te maken van de bovenstaande representatie heb ik simulaties gedraaid om uit te zoeken of het mogelijk is dat de geobserveerde

millisecondepulsar³ J1903+0327 gevormd is in een systeem van drie sterren dat onstabiel geworden is na een supernova. Ik was in staat om te bepalen dat het systeem inderdaad op deze manier gevormd kan zijn en wat de meeste waarschijnlijke massa's van de sterren waren voor de supernova. Wederom, door gebruik te maken van simulaties (een film van een deel van het heelal) waren we in staat om veel meer te leren dan wanneer we enkel gebruik gemaakt hadden van observaties (foto's).

7.3.2 Middelgrote Zwarte Gat

Ondanks dat we veel dingen begrijpen in het heelal zijn er nog veel meer dingen die we niet begrijpen. Een voorbeeld van iets wat we niet begrijpen zijn middelgrote zwarte gaten (MGZG). Deze objecten zouden een gewicht hebben van tussen de 100 en een miljoen zonnemassa's, maar tot nu toe zijn er geen definitieve observaties van een MGZG, terwijl er wel lichtere en zwaardere zwarte gaten zijn gedetecteerd. Echter, er is geen goede theorie over waarom de natuur niet instaat zou zijn om dit soort zwarte gaten te vormen dus we blijven verwachten ze ooit te vinden.

In het verleden zijn er verschillende kandidaten geweest maar elke keer bleek dat het toch om een ander soort object ging. Op dit moment lijkt HLX-1 de meest geschikte kandidaat om te worden geclassificeerd als MGZG, op de voet gevolgd door M82 X-1. Door deze twee kandidaten te gebruiken als prototype, en daarbij de aanname te doen dat het inderdaad MGZGs zijn, maak ik in Hoofdstuk 4 een schatting van hoeveel MGZGs er statistisch gezien zouden moeten zijn. Gebaseerd op het feit dat we deze twee kunnen observeren. In andere woorden, hoeveel MGZGs moeten er in het nabije heelal zijn willen we er twee detecteren.

Deze schatting maakt gebruik van aannames waarom deze zwarte gaten zichtbaar zijn, en de waarschijnlijkheid dat dit soort detecteerbare systemen juist op dit moment vormen. Ik vond dat, gegeven onze aannames, er rond de 100 miljoen MGZGs zijn binnen een gebied van 325 miljoen lichtjaar. Dat betekent dat er ongeveer 1000 MGZGs per sterrenstelsel zijn, mits er in elk sterrenstelsel even veel zouden zijn.

³Een millisecondepulsar is een ster die elke paar milliseconden (een milliseconde is één duizendste van een seconde) om zijn as draait. Dit soort sterren zijn, om verschillende redenen, belangrijk onder andere omdat ze gebruikt kunnen worden als een zeer precieze klok.

