
Nederlandse Samenvatting

Sterrenstelsels zijn als exotische eilanden in de uitgestrekte en lege oceaan van de kosmos, die langzaam gas omzetten in sterren, planeten, en mensen. Ze omringen ons aan alle kanten, in verschillende vormen, maten, en kleuren. Ons eigen sterrenstelsel, de Melkweg, biedt plaats aan miljarden sterren, met daaronder ook onze Zon en de Aarde vanwaar we op het universum uitkijken. Om te leren wat onze plek is in de Melkweg, en ook wat de plek van de Melkweg is in het universum, moeten we bestuderen hoe sterrenstelsel vormen en evolueren.

Een van de beste manieren om theorieën over de formatie en evolutie van sterrenstelsels te testen is het draaien van numerieke simulaties van een representatief deel van het Universum waarin sterrenstelsels vormen en evolueren in een kosmologische context. De sterrenstelsels die in zo'n simulatie vormen kunnen dan worden vergeleken met de sterrenstelsels die we om eens heen zien. Hoewel het bemoedigend is als ze overeenkomen (want dan doen we iets goed), is het het meest interessant als ze niet overeenkomen, want dan klopt onze theorie niet en moeten we deze aanpassen, wat ons in staat stelt om onze theorie te verbeteren en daardoor een beetje meer te weten te komen over hoe het Universum werkt. In dit proefschrift bestudeer ik grote statistische ensembles van sterrenstelsels die gegenereerd zijn in zulke simulaties om de extra "monsterlijke" hoeveelheden materie te begrijpen die recentelijk zijn ontdekt diep in de centrale regionen van echte sterrenstelsels.

Hoofdstuk 2: Monsterlijke zwarte gaten

Zwarte gaten zijn ballen materie met een hoge dichtheid die zo klein en zo massief zijn dat zelfs licht er niet aan kan ontsnappen. Ze vormen normaal gesproken uit de overgebleven kern van een hoge-massa ster (meer dan 8 keer de massa van de zon) wanneer die aan het eind van zijn leven explodeert als een supernova. Er wordt aangenomen dat alle sterrenstelsels in hun centrum een zogeheten "superzwaar" zwart gat bevatten, met massa's die wel een miljoen tot een miljard keer groter zijn dan de massa van de zon. Hoe een zwart gat zo superzwaar wordt is nog niet bekend, maar we weten al wel dat de massa van een zwart gat groter is als het het sterrenstelsel een grotere massa heeft: zwaardere sterrenstelsels bevatten zwaardere zwarte gaten. De achterliggende fysica voor dit verband is echter nog onduidelijk.

Recentelijk hebben astronomen enkele sterrenstelsels ontdekt waar de zwarte gaten een veel hogere massa hebben dan werd verwacht op basis van de massa van het sterrenstelsel. Als we deze "uitschieters" kunnen begrijpen kan dat hints geven over

de oorsprong van het verband tussen de massa's van zwarte gaten en de sterremassa van sterrenstelsels. In **Hoofdstuk 2** onderzocht ik of sterrenstelsels met “monsterlijke” zwarte gaten verwacht worden in mijn ensemble van gesimuleerde sterrenstelsels zoals voorspeld door de huidige formatie en evolutie theorieën van sterrenstelsels. Stelsels met zulke superzware zwarte gaten worden inderdaad verwacht, en ze vormen via twee kanalen.

Het eerst kanaal heet “getijde-verscheuring”. Wanneer een sterrenstelsel een satelliet wordt van een zwaarder sterrenstelsel ervaart het getijde-krachten, dezelfde krachten die op Aarde verantwoordelijk zijn voor de getijden van de zee: de maan trekt sterker aan het water dan de Aarde, en probeert het water letterlijk van de aarde weg te scheuren. Gelukkig voor ons zijn de getijde krachten van de Maan niet sterk genoeg om dit te doen. Satelliet stelsels zijn niet zo gelukkig, en kunnen worden verscheurd door de getijde krachten van het zwaardere stelsel. Omdat de buitenste delen van het satelliet stelsel eerst worden weggescheurd gaat de sterremassa van het satelliet stelsel omlaag, waardoor de sterremassa relatief klein is vergeleken met de massa van superzware zwarte gat in het centrum, dat onverstoord in het centrum van het satelliet stelsel staat.

Het tweede kanaal heeft te maken met de formatietijd van het sterrenstelsel. Zwarte gaten groeien door het omringende gas op te zuigen. Als het centrum van een sterrenstelsel veel gas bevat, zal het zwarte gat dat opzuigen en naar een hoge massa groeien. Echter, om het gas naar het zwarte gat te krijgen moet het erin vallen, tijdens die val zal het gas een schijf vormen, zoals water in een badkuip een draaikolk vormt terwijl het wegloopt. De wrijving in deze stofschiif verhoogt de temperatuur zo erg dat de energie het gas uit het sterrenstelsel kan blazen, waardoor het zwarte gat niet verder kan groeien. De maximale massa van een zwart gat wordt dus bepaald door zijn vermogen om te voorkomen dat het gas er te snel in valt. In het begin had het universum, en dus ook de sterrenstelsels, een hoge dichtheid. Voor stelsels van de zelfde massa was het toen dus moeilijker het gas weg te houden, vergeleken met de lagere dichtheid van nu. Stelsels met dezelfde massa moesten vroeger dus een veel zwaarder zwart gat vormen om te voorkomen dat gas naar binnen viel dan nu. Dat betekent dus dat sterrenstelsels die vroeg vormen en daarna niet meer veranderen een “monsterlijk” superzwaar zwart gat moeten bevatten.

Hoofdstukken 3, 4, en 5: Sterpopulatie monsters

De sterrenkunde is een van de weinige wetenschappen waar we de objecten die we bestuderen niet kunnen aanraken. Bijna alles wat we over sterrenstelsels weten, komt van het ontleden van het licht dat we van de stelsels ontvangen. Zelfs zoiets fundamenteels als de massa van een stelsel kan lastig te meten zijn, omdat dit afhangt van hoe je de lichtkracht van een sterrenstelsel omzet naar massa. Deze omzetting wordt gewoonweg gedaan door de helderheid van het stelsels te vermenigvuldigen met verhouding tussen massa en licht die verwacht wordt voor het stelsel. Dit is echter niet zo eenvoudig omdat de verhouding tussen massa en licht voor individuele sterren afhangt van de massa van de ster (en ook van de leeftijd). Sterren met een lage massa (ongeveer 10 procent van de massa van de Zon), zijn vrij zwak en hebben een hoge

massa-licht verhouding, terwijl sterren met een hoge massa heel helder zijn (en een lagere massa-licht verhouding hebben). De verdeling van sterren van verschillende massa die gevormd worden in een sterrenstelsel (de “initiële massa functie”, of IMF) bepaalt dus de conversie van helderheid naar massa voor dat stelsel, en is de meest onzekere factor voor de massa bepaling.

Voor de Melkweg is het relatief eenvoudig om de IMF te meten door simpelweg sterren van verschillende massa’s te tellen. Voor sterrenstelsels die verder weg staan is het echter niet zo makkelijk omdat de sterren overlappen, wat het onmogelijk maakt om ze individueel te tellen. Daarom nemen de meeste astronomen aan dat de IMF in andere sterrenstelsels hetzelfde is als in de Melkweg. Recentelijk hebben enkele astronomen echter ontdekt dat massa licht-verhouding die gebruikt wordt voor het centrum van de zwaarste stelsels meer dan twee keer zo hoog is als in de Melkweg. Dit zou kunnen betekenen dat er meer dwergsterren met lage massa’s bestaan dan werd gedacht, en die te zwak zijn om te detecteren, of dat er veel meer zwarte gaten met een massa vergelijkbaar met die van sterren bestaan, de overblijfselen van de supernova explosies van hoge massa sterren.

Het huidige model voor de formatie en ontwikkeling van sterrenstelsel dat ik in hoofdstuk 2 gebruikte neemt aan dat alle sterrenstelsels een universele, Melkweg-achtige, IMF hebben. Met de recente ontdekking dat de aanname van zo’n universele IMF misschien niet correct is, heb ik de simulatie-code aangepast zodat de IMF van de gesimuleerde stelsels afhangt van de omgeving waarin de sterren vormen. Omdat zwaardere sterrenstelsels sterren vormen onder hogere druk, hebben we de IMF afhankelijk gemaakt van de druk op zo’n manier dat het waargenomen overschot in de massa-licht verhouding, ten opzichte van de Melkweg-achtige IMF (het MLO, die vaak wordt gebruikt als meting van de IMF), en de massa’s van de sterrenstelsels werden gereproduceerd. We deden een simulatie waar we de massa-licht verhouding verhoogden door het aantal lage-massa dwergsterren dat door de simulatie geproduceerd wordt te verhogen, terwijl we in een andere simulatie het aantal hoge-massa sterren verhoogden, zodat er meer zwarte gaten ontstaan en de massa-licht verhouding hoger wordt. We draaiden deze simulaties om te zien wat voor effect deze veranderingen hadden op de sterrenstelsels die in de simulaties vormden, en wat het effect is op de omzetting van waarnemingen (e.g. lichtkracht) naar fysieke grootheden (zoals massa) en om te bepalen wat voor voorspellingen we konden doen om een onderscheid te maken tussen deze twee scenario’s.

Hoofdstuk 3 beschrijft de twee simulaties in detail. Ondanks de variaties in de IMF blijken de sterrenstelsels die zich in de simulaties vormen dezelfde fundamentele eigenschappen te hebben, zoals lichtkracht, afmeting, en de massa van het centrale zwarte gat. Echter, de simulatie met meer hoge-massa sterren bevatte een veel groter aandeel van metalen, en ook veel meer energetische supernova explosies, waardoor de sterrenstelsels groter waren en snellere stervorming dan wat in het echt wordt waargenomen.

Hoofdstuk 4 laat zien dat het massa-licht overschot afhangt van een aantal fysieke eigenschappen van de sterrenstelsels. Deze verbanden kunnen afwijken van de verwachting, en deze afwijking is sterk afhankelijk van hoe de stelsels geselecteerd

worden. We demonstreren ook dat het MLO sterker afhangt van de leeftijd van de sterpopulatie dan de IMF in sommige gevallen. Stelsels met te zware zwarte gaten hebben vaak ook een hoger MLO, wat betekent dat sterpopulatie monsters waarschijnlijk ook monsterlijke zwarte gaten bevatten.

In **Hoofdstuk 5** onderzoeken we hoe de IMF varieert als functie van de straal binnen de stelsels, en ook hoe de IMF varieert als functie van tijd. Het blijkt dat, omdat de druk waarbij sterren worden gevormd hoger is naarmate we dichterbij het centrum van het sterrenstelsel komen, de IMF zwaarder wordt in het centrum van het stelsel, wat resulteert in een overgang van een hoge massa-licht verhouding in het centrum naar een lagere massa-licht verhouding aan de rand van het stelsel. Dit resultaat kan grote gevolgen hebben voor de omzetting van lichtkracht naar massa, gezien normaal wordt aangenomen dat de massa-licht verhouding in het hele stelsel hetzelfde is. We laten ook zien dat het verband tussen de MLO en de hoeveelheid metalen verschilt tussen de twee simulaties, wat een mogelijke manier biedt om deze twee IMF mogelijkheden van elkaar te onderscheiden.

In het algemeen zijn geen van de twee simulaties voldoende om alle waarnemingen gerelateerd aan de IMF te verklaren. Mogelijk is de combinatie van de twee scenario's, waarin we dus het aandeel van zowel lage- als hoge-massa sterren verhogen in aanwezigheid van hoge druk, een veelbelovende manier om variaties in de IMF verder te onderzoeken.