

## Samenvatting

(Summary in Dutch)

Onlangs hebben waarnemingen met de Amerikaanse COBE (Cosmic Background Explorer) satelliet bevestigd dat 90% van het heelal uit onzichtbare materie bestaat. De hoeveelheid onzichtbare materie (ook wel donkere materie ofwel dark matter genoemd) en de verdeling ervan spelen waarschijnlijk een grote rol bij de vorming van sterrenstelsels. In dit proefschrift wordt onderzoek beschreven naar de verdeling van donkere en zichtbare materie in sterrenstelsels zoals wij ze nu zien.

Sterrenstelsels (galaxies) zijn verzamelingen van ongeveer honderd miljard sterren die door de zwaartekracht bijeen worden gehouden. Ze komen in een aantal soorten en vormen voor. De twee belangrijkste soorten zijn elliptische en spiraalstelsels. In dit proefschrift wordt alleen aandacht besteed aan spiraalstelsels. Ook wij bevinden ons in een spiraalstelsel, de Melkweg genaamd. (Daarom worden spiraalstelsels vaak melkwegstelsels genoemd.) Een spiraalstelsel heeft de vorm van een sterk afgeplatte schijf (als een grammofoonplaat) soms met een verdikking in het centrum (bulge). Bekijken we de schijf (disk) van boven, dan zien we dat het licht, afkomstig van miljarden sterren, geconcentreerd is in spiraalarmen. Naast de sterren bevat de schijf ook koele wolken van gas en stof, waarin de sterren gevormd worden. De zon is ook in zo'n wolk geboren en wij bevinden ons in één van de spiraalarmen van de Melkweg. Spiraalstelsels worden onderverdeeld in zogenaamde Hubble-types (Sa, Sb, Sc, Sd en Sm-stelsels), afhankelijk van de verdikking in het centrum en de duidelijkheid van de spiraalarmen.

Gedurende de laatste vijftien jaar is het duidelijk geworden dat in spiraalstelsels, naast de zichtbare sterren en het gas, ook materie aanwezig is die niet direct waargenomen kan worden: donkere materie. Hoe kan de aanwezigheid van donkere materie worden bepaald, als het niet direct waargenomen kan worden? Het principe is zeer eenvoudig, namelijk, door de totale massa (hoeveelheid materie) van een spiraalstelsel te bepalen en hiervan de massa van de zichtbare materie af te trekken.

De totale massa van een spiraalstelsel kan berekend worden aan de hand van de bewegingen van het gas en de sterren. In een spiraalstelsel bewegen de sterren en het gas zich in nagenoeg cirkelvormige banen rond het centrum onder invloed van de naar het centrum gerichte zwaartekracht, de centripetale kracht. (De vergelijking met een ronddraaiende grammofoonplaat gaat nog steeds op, alleen draait een spiraalstelsel iets sneller: ongeveer 200 kilometer per seconde.) Newton heeft reeds aangetoond dat er een verband bestaat tussen de snelheid waarmee een gaswolk of een ster rond het centrum draait en de centripetale kracht, terwijl de sterkte van deze kracht volgens de zwaartekrachtwet van Newton afhankelijk is van de massa die zich binnen de cirkelvormige baan bevindt. Met andere woorden, men kan uit de snelheid waarmee een ster of een gaswolk op een bepaalde

straal (d.w.z. afstand tot het centrum) roteert afleiden wat de totale massa binnen die straal is. Hoe sneller een object ronddraait, hoe groter de hoeveelheid ingesloten materie.

In de afgelopen jaren zijn met de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT) waarnemingen gedaan aan verscheidene sterrenstelsels. Met deze telescoop kan de verdeling en de snelheid van waterstofgas worden gemeten en via computerberekeningen kan de rotatiesnelheid waarmee het gas om het centrum van een spiraalstelsel cirkelt worden berekend. Het bleek dat de rotatiesnelheid overal in een sterrenstelsel (behalve vlakbij het centrum) gelijk is. Dit wordt vaak geïllustreerd door middel van een zogenaamde rotatiekromme, die het verband weergeeft tussen de rotatiesnelheid van het gas en de afstand tot het centrum. Bijna alle rotatiekrommen bleken nagenoeg dezelfde vorm te hebben: ze stijgen snel naar een maximum en blijven dan vlak, onafhankelijk van de straal.

Dit is absoluut niet wat men zou verwachten op grond van de verdeling van het licht en het gas. Uitgaande van de hoeveelheid zichtbare materie zou de snelheid voorbij de rand van de zichtbare schijf moeten afnemen: de rotatiekromme zou moeten dalen. Het verschil tussen deze voorspelde kromme en de waargenomen rotatiekromme kan alleen worden verklaard door aan te nemen dat er meer materie is dan de zichtbare. Grote hoeveelheden donkere materie in de buitendelen van spiraalstelsels kunnen er voor zorgen dat de rotatiekrommen vlak blijven.

Het doel van dit proefschriftonderzoek was het leggen van verbanden tussen de hoeveelheid en de verdeling van donkere materie en andere eigenschappen van sterrenstelsels, zoals de lichtkracht, de grootte en het Hubble-type (Sa, Sb etc.). Hiertoe moesten de beschikbare gegevens uitgebreid worden met Westerbork-waarnemingen van een aantal stelsels met een grote variatie aan eigenschappen: van kleine dwergstelseltjes tot zeer grote, massieve sterrenstelsels.

Een probleem bij dit soort onderzoek is dat niet alle spiraalstelsels geschikt zijn om de verdeling van donkere materie te bepalen. Zoals reeds aangegeven bevindt donkere materie zich voornamelijk buiten het zichtbare deel van de schijf. Om de verdeling van donkere materie af te kunnen leiden, moet men dus de rotatiesnelheid van het waterstofgas kunnen meten voorbij de rand van de zichtbare schijf. Dit vereist dat er genoeg gas in de buitendelen van een stelsel zit. Daarom werd de Westerbork-telescoop eerst gebruikt om van een groot aantal (vijftig) sterrenstelsels de afmetingen van de gasschijf te bepalen. Normaal duurt een waarneming met de WSRT minimaal twaalf uur. Echter, in verband met de hoeveelheid beschikbare waarneemtijd werd ieder stelsel slechts twee uur "bekeken". Met de meetresultaten van deze korte waarnemingen, die beschreven worden in hoofdstuk 2, is bepaald hoe ver het gas zich uitstrekt voorbij de zichtbare rand van ieder stelsel. In hoofdstuk 3 wordt een statistische analyse van de waterstofverdeling in de vijftig spiraalstelsels gepresenteerd.

Met behulp van de korte waarnemingen zijn een dozijn stelsels geselecteerd die een uitgebreide en regelmatige gasverdeling hebben. Vervolgens zijn deze stelsels weer waargenomen met de WSRT, maar nu met een waarneemtijd van minimaal twaalf uur per stelsel. De meetresultaten van acht van deze stelsels worden gepresenteerd in de hoofdstukken 5 tot en met 8. Er worden beschrijvingen gegeven van de verdeling van het waterstofgas, en de rotatiekromme van ieder stelsel wordt afgeleid. Aan de hand van de rotatiekromme en de verdeling van het licht (gemeten met optische telescopen, zoals beschreven is in hoofdstuk 4) is voor ieder stelsel getracht de hoeveelheid en de verdeling

van de donkere materie.

In hoofdstuk 10 worden gegevens van andere sterrenstelsels duidelijk verband tot en de maximale rotatiesnelheid tot het laatst gemeten rotatiekrommen. Verder is aanwezig is. Echter, lichtzwakke stelseltjes (dwergstelsels) worden de hoeveelheid materie w

Helaas kan uit sterrenstelsels bestaan geen of erg weinig lichtgaten. De onzichtbare deeltjes die door natuurlijke WIMP's etc. Deze deermate grote hoeveelheden deeltjes door ieder materie in sterrenstelsels

Tenslotte wordt sterrenstelsels besproken zwaartekrachtwet van (grote) schaal van sterren een modificatie van de destijds waargenomen vereisen. Voor een aan hoofdstuk 9 een vergelijking op Newtons zwaartekracht conclusies is dat een r verschillende vormen v de implicaties van MO structuren in het heelal

van de donkere materie te bepalen.

In hoofdstuk 10 worden alle resultaten vergeleken en gecombineerd met gepubliceerde gegevens van andere spiraalstelsels. Niet alle rotatiekrommen zijn vlak. Er blijkt een duidelijk verband te bestaan tussen de vorm van de rotatiekromme en het type sterrenstelsel en de maximale rotatiesnelheid. Dwergstelsels hebben een rotatiekromme die blijft stijgen tot het laatst gemeten punt; grotere stelsels hebben vlakke of zelfs enigszins dalende rotatiekrommen. Verder blijken alle rotatiekrommen aan te geven dat er donkere materie aanwezig is. Echter, de hoeveelheden verschillen nogal van stelsel tot stelsel. Kleine, lichtzwakke stelseltjes hebben relatief meer donkere materie dan zwaardere, grote stelsels. Dwergstelsels worden volledig gedomineerd door de onzichtbare materie: soms is die hoeveelheid materie wel vijf tot tien keer zo groot als de hoeveelheid zichtbare materie.

Helaas kan uit dit onderzoek niet worden afgeleid waaruit de donkere materie in sterrenstelsels bestaat. Er zijn vele mogelijkheden: sterren met een hele kleine massa, die geen of erg weinig licht uitstralen of restanten van sterren zoals bruine dwergen of zwarte gaten. De onzichtbare materie zou ook kunnen bestaan uit één van de soorten exotische deeltjes die door natuurkundigen zijn ontdekt of voorspeld, zoals neutrino's, photino's, WIMP's etc. Deze deeltjes hebben misschien een zeer kleine massa, maar ze komen in dermate grote hoeveelheden voor in het heelal (per seconde vliegen er miljarden van deze deeltjes door ieder mens heen!) dat de gezamenlijke massa de hoeveelheid onzichtbare materie in sterrenstelsels kan verklaren.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 9 nog een alternatief voor de donkere materie in sterrenstelsels besproken. Alle berekeningen in dit proefschrift zijn gebaseerd op de zwaartekrachtwet van Newton, maar deze zou misschien niet meer geldig zijn op de (grote) schaal van sterrenstelsels. Ongeveer 10 jaar geleden werd door enkele astronomen een modificatie van de standaard zwaartekrachtwet ontworpen (MOND genoemd) die de destijds waargenomen vlakke rotatiekrommen verklaart zonder onzichtbare materie te vereisen. Voor een aantal stelsels met zeer nauwkeurig gemeten rotatiekrommen wordt in hoofdstuk 9 een vergelijking gemaakt tussen massamodellen van sterrenstelsels, gebaseerd op Newtons zwaartekrachtwet en modellen gebaseerd op de MOND-theorie. Eén van de conclusies is dat een relatief simpele verandering van de zwaartekrachtwet inderdaad de verschillende vormen van rotatiekrommen kan verklaren. Het is echter nog onduidelijk wat de implicaties van MOND zijn voor objecten kleiner dan sterrenstelsels en voor de grootte structuren in het heelal.