

NEDERLANDSE SAMENVATTING

STERSYSTEMEN

HET heelal ontstond in een 'oerknal', waarna het begon uit te drijven. Op plekken met net iets meer donkere materie dan in de nabije omgeving zorgde de zwaartekracht ervoor dat de donkere materie zich samentrok en daarbij gas verzamelde, waaruit zich sterren vormden. Deze eerste sterren kwamen terecht in systemen van verschillende grootte en vorm, afhankelijk van de verdeling van de donkere materie. De sterren in deze systemen evolueren: de meeste sterren doven aan het einde van hun leven uit, maar de zwaarste sterren exploderen en uit hun resten worden weer nieuwe sterren geboren. Ook de systemen zelf evolueren door onderlinge interactie en samensmelting. Dit alles leidt tot de volgende vraag: kunnen we voor de verschillende stersystemen achterhalen hoe ze zijn geëvolueerd vanaf de oerknal tot nu?

Een mogelijke onderzoeksstrategie is het waarnemen van objecten die op grote afstand staan. Doordat het licht tijd nodig heeft om afstanden af te leggen, zien we deze objecten 'terug in de tijd'. Door steeds dieper het heelal in te kijken, kunnen we dus als het ware de vorming en evolutie van deze objecten in 'omgekeerde volgorde' bekijken. Echter, met toenemende afstand wordt het licht van deze objecten snel zwakker, zodat heel grote telescopen nodig zijn, die niet alleen technisch moeilijk te realiseren zijn maar bovenal heel kostbaar zijn. Een andere manier is nabije stersystemen te bestuderen en, net als een archeoloog, op zoek te gaan naar de 'fossiele resten' van hun ontstaan en evolutie. We kunnen dan bijvoorbeeld denken aan de aanwezigheid van kleine centrale schijven, ontkoppelde kernen en tegendraads roterende schijven, welke het gevolg kunnen zijn van het samensmelten van verschillende stersystemen. Omdat de stersystemen dichtbij staan, kunnen we de bewegingen en samenstelling van de sterren in deze systemen tot in groot detail waarnemen. Door middel van het fitten van theoretische modellen (gebaseerd op de zwaartekrachtwet van Newton) aan deze waarnemingen kunnen we dan proberen deze stersystemen te reconstrueren. Hierna kunnen we als het ware stersystemen 'van binnenuit bekijken' en in hun structuur en interne bewegingen op zoek gaan naar overblijfselen, oftewel 'fossielen', die gerelateerd zijn aan hun vormingsgeschiedenis.

De geschiktste stersystemen om op zoek te gaan naar 'fossiele resten' zijn diegene waarvoor het zicht op de sterren niet bemoeilijkt, of zelfs geheel ontnomen wordt door de aanwezigheid van gas en stof, en diegene die niet 'vervuild' zijn door recente stervorming. Bolhopen zijn in dit opzicht de 'schoonste' stersystemen met in de orde van een miljoen zeer oude sterren, die zijn ontstaan uit dezelfde materie die zich samentrok vlak na de oerknal. Bovendien zijn het simpele, bijna ronde objecten, die we ook nog eens van relatief dichtbij kunnen waarnemen, omdat ze zich in onze eigen Melkweg bevinden. In deze bolhopen kunnen we (veel van) de sterren afzonderlijk waarnemen en hun individuele snelheden langs de gezichtslijn en zelfs in het vlak van de hemel bepalen. Deze laatste zogenaamde eigenbewegingen worden verkregen door heel nauwkeurig de positieverandering van de sterren in de tijd te meten. Momenteel zijn zulke metingen van de kinematica van individuele sterren alleen goed mogelijk

voor de nabijste stersystemen en voor sterren in de Melkweg zelf. Omdat wij zelf deel uitmaken van de Melkweg, is ons zicht helaas sterk vertroebeld door het aanwezige gas en stof.

In het begin van de negentiende eeuw werd duidelijk dat de Melkweg slechts één van de 'nevels' is die aan de hemel te zien zijn. Fotografische waarnemingen lieten zien dat deze sterrenstelsels in verschillende soorten voorkomen. Dit zette Hubble in 1936 aan de orde te verdelen in vier verschillende groepen naar aanleiding van hun waargenomen vorm. In het resulterende Hubble diagram (of Hubble stemvork) behoort de Melkweg tot de stelsels met een grote schijf, ook wel *spiraalen* genoemd vanwege de prominent aanwezige spiraalarmen. Aan het andere uiteinde van het diagram vinden we de *elliptische* stelsels met een (zeer) eenvoudig uitziende structuur. Tussen beide uiteindes in vinden we de *lensvormige* stelsels met een schijf en een sferoïdale verdeling van de sterren, maar geen (prominente) spiraalarmen. De vierde groep bestaat uit stelsels zonder een regelmatige vorm en deze worden dan ook heel toepasselijk *onregelmatige* stelsels genoemd. Toentertijd dacht men dat de complex uitziende spiraalstelsels evolueerden uit de schijnbaar eenvoudige elliptische stelsels. Ondanks dat we tegenwoordig weten dat de vorming en evolutie van stelsels juist in omgekeerde volgorde is, worden de spiraalstelsels nog steeds laat-type stelsels genoemd en worden de elliptische en lensvormige stelsels ook wel aangeduid als vroeg-type stelsels.

De laat-type stelsels, waartoe dus ook de Melkweg behoort, bevatten flinke hoeveelheden gas en stof en er vindt regelmatig (of zelfs continu) intensieve stervorming plaats die de omgeving als het ware 'schoonveegt', waardoor het erg lastig wordt de ontstaansgeschiedenis te achterhalen. Daarentegen bevatten vroeg-type stelsels over het algemeen weinig gas en stof en vertonen geen recente stervorming, zodat ze ideaal zijn voor het bestuderen van de vorming en evolutie van sterrenstelsels. Voor de 'nabije' (< 300 miljoen lichtjaar) vroeg-type stelsels kunnen we de fossiele resten van hun vorming in detail bestuderen. In het algemeen kunnen we de individuele sterren niet onderscheiden, maar desondanks kunnen we hun gezamenlijke licht (fotometrie) en bewegingen (kinematica) langs de gezichtslijn nauwkeurig meten.

LICHTVERDELING

De waargenomen (twee-dimensionale) lichtverdeling van vroeg-type stelsels kan in het algemeen goed beschreven worden door een set van ellipsen, ieder met hun eigen helderheid, die volgens een eenvoudige functie afneemt naarmate de straal van de ellipsen toeneemt. Hoewel de fotometrie van vroeg-type stelsels dus redelijk eenvoudig is, betekent dit niet dat ook de intrinsieke (drie-dimensionale) structuur eenvoudig achterhaald en beschreven kan worden.

De conversie van een lichtverdeling gemeten aan de hemel naar een intrinsieke lichtverdeling is in het algemeen niet uniek. Voor bolvormige objecten is deze zogenaamde deprojectie wel uniek, maar er zijn maar heel weinig stelsels die er rond uitzien en zelfs dan hoeven ze intrinsiek niet bolvormig te zijn. In het geval van afgeplatte objecten die symmetrisch zijn rond één as is de projectie alleen uniek als we zo'n *axisymmetrisch* stelsel bekijken vanuit het vlak loodrecht op de symmetrie-as. Zo'n zij-aanzicht wordt vaak aangeduid met een inclinatiehoek van 90 graden. Echter, een stersysteem in evenwicht kan net zo goed een intrinsieke vorm hebben die verschillend is langs alle drie de assen. In het geval van zo'n *triaxiaal* stelsel is de deprojectie in hoge mate niet uniek. Voor de kijkrichting zijn nu twee hoeken nodig.

Bovendien kan, in tegenstelling tot axisymmetrische objecten, de oriëntatie van de ellipsen die de lichtverdeling beschrijven, veranderen met straal. Heel snel nadat men zich dit realiseerde werd dit effect inderdaad waargenomen in elliptische stelsels, wat aantoonde dat deze stelsels niet axisymmetrisch maar waarschijnlijk triaxiaal zijn.

In het geval van axisymmetrische stelsels kan de afplatting (gedeeltelijk) veroorzaakt worden door rotatie, net als de afplatting van de Aarde. Naast deze geordende beweging, kan in een stersysteem ook de willekeurige beweging van sterren zo'n afplatting in stand houden. Deze willekeurige beweging, gemeten als de gemiddelde afwijking van de sterren van hun gemiddelde snelheid, oftewel snelheidsdispersie, gedraagt zich als een soort tegendruk die kan variëren met richting en positie binnen een stersysteem. We zeggen dan dat zo'n stersysteem anisotroop is, in tegenstelling tot een isotroop systeem waarin de dispersie overal hetzelfde is. Ondanks dat anisotropie een bepaalde vorm kan ondersteunen zoals axisymmetrie of zelfs triaxialiteit, hoeven anisotropie en vorm niet (volledig) gekoppeld te zijn. Zo kan een bolvormig systeem bijvoorbeeld ook een anisotrope snelheidsverdeling hebben.

Anisotropie en andere dynamische eigenschappen kunnen niet bepaald worden uit fotometrie alleen, maar vergen ook kinematische metingen. Toen in de midden jaren zeventig en de vroege jaren tachtig van de vorige eeuw de rotatie en de dispersie van vroeg-type stelsels werd gemeten, was één van de belangrijke conclusies dat vroeg-type stelsels in het algemeen te langzaam roteren om de afplatting volledig te kunnen verklaren. Verdere waarnemingen lieten zien dat terwijl de lichtzwakkere elliptische en de lensvormige stelsels schijfvormig zijn met duidelijke rotatie, de grote elliptische stelsels ovaler van vorm zijn met vaak nauwelijks enige rotatie. Deze tweedeling werd toegeschreven aan verschillende onderliggende dynamische structuren, waarbij de zwakkere vroeg-type stelsels isotrope roterende axisymmetrische systemen zijn en de heldere vroeg-type stelsels anisotrope triaxiale systemen zijn.

Echter, recente (N-deeltjes) simulaties van samensmeltende stelsels lijken het tegenovergestelde te suggereren voor de anisotropie: zwakkere anisotrope en heldere isotrope vroeg-type stelsels. Op basis van de intrinsieke dynamische structuur die volgt uit dynamische modellen van een serie van vroeg-type stelsels, komen wij tot dezelfde conclusies. Het is duidelijk dat zulke gedetailleerde simulaties en dynamische modellen van stelsels cruciaal zijn om hun ontstaansgeschiedenis te achterhalen. Zo'n verbetering in de bepaling van de intrinsieke dynamische structuur zou niet mogelijk zijn zonder de toevoeging van twee-dimensionale kinematische waarnemingen en realistische dynamische modellen, die hierna beide nader worden toegelicht.

TWEE-DIMENSIONALE KINEMATISCHE WAARNEMINGEN

Vroeg-type sterrenstelsels kunnen in het algemeen beschouwd worden als botsingsloze stersystemen in evenwicht. Alleen in het centrum kan de dichtheid van de sterren hoog genoeg worden zodat ze elkaars banen gaan beïnvloeden. Elders vormen de sterren een botsingsloos systeem en bewegen ze onder invloed van het gemiddelde zwaartekrachtsveld van alle andere sterren. Met uitzondering van mogelijk de buitenste delen van een stersysteem is sinds het ontstaan van het systeem genoeg tijd verstreken voor de sterren om in dynamisch evenwicht te komen. Deze aannames gelden veelal ook voor bolhopen behalve in hun kernen die vaak niet botsingsloos zijn. Als een stersysteem botsingsloos en in evenwicht is dan wordt zijn dynamische toestand volledig beschreven door de distributie functie (DF) van de sterren in de

zes-dimensionale fase-ruimte van posities en snelheden.

Van sterren in de Melkweg en die in de nabije stersystemen zoals bolhopen, kunnen we de snelheid langs de gezichtslijn en de eigenbewegingen meten als functie van hun positie aan de hemel. We missen dan alleen nog de afstand, waarvan de bepaling in het algemeen erg lastig en onzeker is. Vertroebeling door gas en stof gecombineerd met beperkt ruimtelijk en snelheids oplossend vermogen van de meetinstrumenten, zorgen er bovendien voor dat waarnemingen niet compleet zijn. Desondanks zullen toekomstige ruimtemissies zoals GAIA naar verwachting voor een groot deel van de Melkweg en omgeving de zes dimensies in kaart brengen.

Al na een relatief kleine toename in afstand (in de orde van enkele duizenden lichtjaren) kunnen we geen individuele sterren meer waarnemen (althans niet met de huidige telescopen). We kunnen dan nog wel de geprojecteerde lichtverdeling en voor nabije systemen ook de gezamenlijke snelheidsverdeling van de sterren langs de gezichtslijn meten. In de meting van deze snelheidsverdeling is de laatste jaren een grote stap voorwaarts gemaakt van (één-dimensionale) spleetspectrografen naar twee-dimensionale spectrografen. Terwijl een spleetspectrograaf het licht afkomstig van een rij posities aan de hemel via een spleet verstrooit in verschillende golflengten, gebeurt dit in het geval van twee-dimensionale spectrografen via een matrix van allemaal kleine lensjes, een bundel van glasvezels of een rij van aaneengesloten spleten. Op deze manier leveren twee-dimensionale spectrografen dus een spectrum van posities in twee dimensies aan de hemel. Uit de verschuiving en de vorm van de lijnen in elk spectrum kan dan vervolgens de snelheidsverdeling van sterren en gas, tezamen met eigenschappen zoals gemiddelde leeftijd en samenstelling van de sterren, bepaald worden op verschillende plaatsen in het stelsel.

DYNAMISCHE MODELLEN

Twee-dimensionale spectroscopie heeft (letterlijk) een nieuwe dimensie toegevoegd aan de waarnemingen van vroeg-type stelsels. De resulterende kinematische kaarten geven drie-dimensionale informatie over de DF. We moeten wel rekening houden met de onzekerheden in de kaarten door de onvermijdelijke ruis. Bovendien hebben we te maken met een onbekende kijkrichting, een in het algemeen niet unieke deprojectie van de lichtverdeling, die we vervolgens ook nog moeten omzetten naar een massaverdeling via een onbekende massa-lichtkracht verhouding om de interne structuur te kunnen bestuderen. Tenslotte is er de mogelijke aanwezigheid van donkere materie, die we niet direct kunnen zien, maar wel effect heeft op de kinematica van de sterren. Dit alles beschouwend lijkt het een hopeloze zaak om de DF in de zes-dimensionale fase-ruimte te reconstrueren. Gelukkig hangt voor stersystemen in evenwicht de DF in het algemeen af van minder dan zes parameters.

INTEGRALEN VAN BEWEGING

De stelling van Jeans zegt dat de DF een functie is van de integralen van beweging. In een stationair stersysteem is de energie E altijd een integraal van beweging. Een ster met een bepaalde energie zal een baan kunnen beschrijven die reikt tot een maximale afstand vanaf het centrum van het stersysteem opgelegd door de grootte van E . Op eenzelfde manier kan behoud van hoekimpuls L verdere beperkingen opleggen. Als voor deze ster bijvoorbeeld ook de component van de hoekimpuls L_z parallel aan de z -as een integraal van beweging is, dan zal hij roterend rond de z -as een baan

beschrijven die ingeperkt is tussen een minimale en maximale straal.

In een sferische gravitationele potentiaal zijn naast E de drie componenten L behouden, maar in het geval dat ook de DF sferisch is, alleen de grootte L , omdat de richting er dan niet toe doet. De sterbanen zijn rosettes ingeperkt tussen schillen met een minimale en maximale straal in een vlak. In een axisymmetrische potentiaal voldoen de meeste sterbanen aan drie integralen van beweging: E , L_z parallel aan de symmetrie z -as en een derde integraal van beweging I_3 , waarvan de precieze uitdrukking in het algemeen onbekend is. Terwijl E en L_z er voor zorgen dat de rond de z -as roterende sterbanen zich kunnen bewegen in een volume dat de vorm heeft van een torus, zorgt I_3 voor een verdere inperking van dit volume. In het triaxiale geval zijn er naast E nog twee integralen van beweging, I_2 and I_3 , die in het algemeen beide onbekend zijn. Er is een grote variatie aan mogelijke sterbanen die bovendien kunnen roteren om ofwel de korte ofwel de lange as.

Alhoewel complexe sterbanen mogelijk zijn in de zes-dimensionale fase-ruimte, hangt de DF in het algemeen dus slechts af van drie integralen van beweging. Door nu een functionele vorm voor de DF te kiezen, kunnen alle dynamische eigenschappen van een stersysteem worden uitgerekend en vergeleken met de waargenomen lichtverdeling en kinematica. In het algemeen is de gekozen DF een functie van de bekende integralen van beweging, zoals een functie van E en L_z in het axisymmetrische geval. Deze 'twee-integraal' modellen hebben significant bijgedragen aan ons begrip van de dynamische structuur van stersystemen, maar voor meer realistische modellen moeten we ook de derde integraal van beweging meenemen. Dit is niet gemakkelijk omdat deze derde integraal in het algemeen onbekend is. Het maken van triaxiale modellen met in het algemeen twee onbekende integralen van beweging is zelfs nog gecompliceerder.

Een uitzondering hierop is de speciale familie van modellen met een gravitationele potentiaal van Stäckel vorm, waarvoor alledrie de integralen van beweging expliciet bekend zijn. Er is een grote vrijheid in de massaverdeling, maar een sterke piek in centrum van het stelsel is niet toegestaan, zodat deze modellen ongeschikt zijn voor het beschrijven van de centrale delen van sterrenstelsels met een heel zwaar zwart gat. Desondanks zijn de kinematische eigenschappen van deze modellen net zo rijk als waargenomen in vroeg-type stelsels. Verscheidene DFs zijn dan ook geconstrueerd voor deze Stäckel modellen en ze kunnen worden gebruikt om realistische modellen van sterrenstelsels te construeren, waarvan de kinematica overeenkomt met die volgend uit waarnemingen met twee-dimensionale spectrografen (Hoofdstuk 4).

SNELHEIDSMOMENTEN

Een manier om de in het algemeen onbekende integralen van beweging te omzeilen is door het oplossen van de continuïteitsvergelijking en de Jeans vergelijkingen voor de snelheidsmomenten van de DF. De continuïteitsvergelijking relateert de drie eerste momenten $\langle v_x \rangle$, $\langle v_y \rangle$ en $\langle v_z \rangle$, en de Jeans vergelijkingen relateren de negen tweede momenten, $\langle v_x^2 \rangle$, $\langle v_x v_y \rangle$, \dots , $\langle v_z^2 \rangle$, direct aan de sterdichtheid en de gravitationele potentiaal, zonder dat we de DF hoeven te kennen. Jammer genoeg zijn er in bijna alle gevallen minder vergelijkingen dan snelheidsmomenten, zodat extra aannames over de anisotropie gemaakt moeten worden.

Dit is niet nodig in het geval van Stäckel modellen in zogenaamde confocale ellipsoïdale coördinaten. In deze coördinaten geldt voor elke sterbaan in een Stäckel potentiaal dat slechts één eerste moment niet nul is, zodat de continuïteitsvergelij-

king vrij eenvoudig opgelost kan worden. Omdat alle gecorreleerde tweede momenten verdwijnen, vormen de Jeans vergelijkingen een gesloten systeem met evenveel vergelijkingen als tweede momenten. Terwijl voor het axisymmetrische geval de oplossing al enige tijd bekend is, wordt die voor het triaxiale geval afgeleid in Hoofdstuk 5.

We zijn al veel te weten gekomen over de dynamische structuur van stersystemen door hun waargenomen lichtverdeling en kinematica te modelleren met oplossingen van de continuïteitsvergelijking en Jeans vergelijkingen. Toch moeten we voorzichtig zijn omdat de oplossingen voor de snelheidsmomenten niet garanderen dat de onderliggende DF positief en dus fysisch is.

BEWEGINGSVERGELIJKINGEN

We kunnen modellen met een mogelijke niet-fysische DF vermijden, zonder de DF zelf te definiëren, door in een gegeven gravitationele potentiaal de bewegingsvergelijkingen direct op te lossen en de daaruit volgende dichtheids- en snelheidsverdeling te fitten aan de waargenomen lichtverdeling en kinematica. Analytisch is dit alleen mogelijk voor (zeer) speciale keuzes van de potentiaal, of door middel van het (linear) benaderen van de bewegingsvergelijkingen (zie Hoofdstuk 3 voor een voorbeeld). Een heel krachtige numerieke methode is afkomstig van (en vernoemd naar) Schwarzschild en is gebaseerd op het optellen van sterbanen. De methode begint met het creëren van een representatieve bibliotheek van sterbanen door de bewegingsvergelijkingen numeriek te integreren in een willekeurige potentiaal met mogelijke bijdragen van donkere materie. Daarna worden gewichten toegekend aan de sterbanen, zodanig dat de gecombineerde en geprojecteerde dichtheids- en snelheidsverdeling het beste de waargenomen lichtverdeling en (twee-dimensionale) kinematica fit. De zo gevonden verdeling van (positieve) baangewichten representeert de DF, die dus gegarandeerd overal positief is.

De afgelopen jaren hebben verschillende groepen onafhankelijke numerieke axisymmetrische implementaties van Schwarzschild's methode ontwikkeld en gebruikt om massa's van zwarte gaten, massa-lichtkracht verhoudingen, de verdeling van donkere materie en ook de DF van vroeg-type stelsels te bepalen door het in detail fitten van hun waargenomen lichtverdeling en snelheidsverdeling langs de gezichtslijn. Door ook eigenbewegingen in het vlak van de hemel toe te voegen wordt het mogelijk de afstand en dynamische structuur van nabije bolhopen te bepalen (Hoofdstuk 2). Met een (zeker niet eenvoudige) uitbreiding van Schwarzschild's methode naar triaxiale geometrie (zie o.a. Hoofdstuk 4), wordt het mogelijk elliptische stelsels te modelleren die niet-axisymmetrische kenmerken vertonen in hun waargenomen lichtverdeling (draaiing van de ellipsen) en kinematica (bijvoorbeeld om verschillende assen roterende componenten).

DYNAMISCHE STRUCTUUR EN EVOLUTIE

Hierboven hebben we drie manieren beschreven om stersystemen te modelleren, achtereenvolgens gebaseerd op een gekozen DF als functie van (bekende) integralen van beweging, op de continuïteitsvergelijking en Jeans vergelijkingen opgelost voor de snelheidsmomenten, en op de bewegingsvergelijkingen (numeriek) geïntegreerd. In deze volgorde neemt de vrijheid en flexibiliteit van de aanpak toe, maar tegelijkertijd ook de moeite (en computertijd) om het best fittende model te vinden. Vooral voor het modelleren van triaxiale stersystemen kunnen de eerste twee methoden erg nuttig

zijn om de grote parameterruimte in te perken, alvorens de algemenere maar computerintensievere Schwarzschild methode toe te passen. Een dergelijke combinatie van modelleertechnieken vormt een krachtig gereedschap om in nabije bolhopen en vroeg-type stelsels te zoeken naar fossiele overblijfselen van hun ontstaansgeschiedenis.

Voor alle dynamische modellen vormt de gravitationele potentiaal de basis. In het algemeen wordt deze verkregen uit de lichtverdeling via deprojectie en conversie van licht naar massa, voor een gegeven kijkrichting en massa-lichtkracht verhouding. Zoals we zagen is de deprojectie in het algemeen niet uniek, de kijkrichting onbekend, net zoals de massa-lichtkracht verhouding die bovendien ook nog eens niet constant hoeft te zijn bij de aanwezigheid van donkere materie. Alhoewel de gereconstrueerde potentiaal dus kan afwijken van de werkelijke, suggereren verscheidene tests dat de dynamische structuur teruggevonden wordt, mits er genoeg en nauwkeurige waarnemingen zijn (zie ook Hoofdstuk 2 en 4).

Een unieke manier om direct houvast te krijgen op de potentiaal is via (sterke) gravitatielenzen. Het licht van een verafgelegen heldere bron wordt afgebogen door een sterrenstelsel, resulterend in meerdere en versterkte afbeeldingen van de bron rondom het lensstelsel. De relatieve positie en lichtkracht van de beelden hangen af van de massaverdeling (inclusief mogelijk donkere materie) van het lensstelsel en leggen daarmee de gravitationele potentiaal (voor een groot deel) vast. Vervolgens kunnen we door een dynamisch model van het lensstelsel te maken en deze te vergelijken met de waargenomen lichtverdeling en kinematica, de donkere materie in het lensstelsel bestuderen. Slechts enkele van de tot nu toe bekende lenssystemen staan dichtbij genoeg om voldoende fotometrische en (twee-dimensionale) kinematische metingen te vergaren voor een gedetailleerde dynamische studie (Hoofdstuk 6).

Op grotere afstanden kunnen we alleen nog de globale eigenschappen van stelsels meten. En dan hebben we vaak alleen nog de fotometrische eigenschappen zoals lichtkracht, kleur en grootte tot onze beschikking, omdat kinematische metingen via spectra erg lastig worden met de sterk afnemende helderheid. Sterke gravitatielenzen zorgen hier voor een uitweg: omdat de snelheidsdispersie van een lensstelsel is gerelateerd aan zijn massa, kunnen we de (centrale waarde van de) dispersie schatten uit de onderlinge afstand van de beelden van de verafgelegen heldere bron. Als de globale eigenschappen van verschillende stelsels eenmaal bekend zijn, dan kunnen we deze stelsels met elkaar vergelijken en hun evolutie bestuderen door gebruik te maken van schalingsrelaties zoals de *Fundamental Plane* relatie. Deze nauwe relatie tussen de dispersie, grootte en lichtkracht van vroeg-type stelsels verandert met de tijd doordat de sterren in stelsels uitdoven. Door deze verandering te meten kan de massa-lichtkracht evolutie van het stelsel achterhaald worden (Hoofdstuk 7). Door zulke metingen aan de veranderingen van de globale eigenschappen van stelsels te vergelijken met gedetailleerde bepalingen van de eigenschappen van nabije stelsels, wordt het mogelijk een beter inzicht te verwerven in de dynamische structuur en evolutie van stersystemen vanaf de oerknal tot aan het heden.

DIT PROEFSCHRIFT

In HOOFDSTUK TWEE bepalen we de afstand D , inclinatie i , massa-lichtkracht verhouding M/L , en intrinsieke dynamische structuur van de bolhoop ω Centauri in onze Melkweg. Hierbij maken we gebruik van eigenbewegingen in het hemelvlak en snelheden langs de gezichtslijn van duizenden sterren in de bolhoop. We corrigeren

de gemeten snelheden voor de beweging van de bolhoop als geheel. Verder bevatten de eigenbewegingen een rotatiecomponent veroorzaakt door de relatieve draaiing van de fotografische platen waarvan ze gemeten zijn. We laten zien dat deze kunstmatige rotatie verwijderd kan worden zonder enige modellering en dat enkel de aanname van axisymmetrie volstaat. Dit levert tevens een nauwkeurige bepaling van $D \tan i$ op. De gecorrigeerde gemiddelde snelheidsvelden zijn consistent met axisymmetrische rotatie en de snelheidsdispersies duiden op significante afwijkingen van isotropie.

We modelleren vervolgens ω Centauri met een axisymmetrische implementatie van de Schwarzschild methode, die nauwkeurig de lichtverdeling fit, geen aannames maakt over de anisotropie in de bolhoop en bovendien variatie in M/L toestaat. We middelen de individuele snelheidsmetingen om effectief de parameterruimte te kunnen doorzoeken. We voeren verscheidene tests uit met een analytisch model, waaruit blijkt dat met deze methode de afstand gemeten kan worden met een nauwkeurigheid van ongeveer 6 procent. Toepassing van de methode op ω Centauri laat zien dat M/L niet varieert met straal. Het best fittende model heeft een massa-lichtkracht verhouding (in de V -band) van $M/L_V = 2.5 \pm 0.1 M_\odot/L_\odot$ en een inclinatie van $i = 50^\circ \pm 4^\circ$, wat overeenkomt met een gemiddelde intrinsieke assenverhouding van 0.78 ± 0.03 . De gevonden afstand $D = 4.8 \pm 0.3$ kpc (afstand modulus van 13.75 ± 0.13 mag) is significant groter dan die volgt uit simpele sferische of constante-anisotropie modellen en is consistent met de canonieke waarde van 5.0 ± 0.2 kpc gemeten met behulp van fotometrische methoden. De totale massa van de bolhoop is $(2.5 \pm 0.3) \times 10^6 M_\odot$. Het best fittende model is binnen een straal van 10 boogminuten vrijwel isotroop, maar wordt naar buiten toe steeds meer tangentieel anisotroop met toenemende rotatie. Het is goed mogelijk dat deze fase-ruimte structuur veroorzaakt wordt door getijde-effecten van de Melkweg. Tenslotte laat het model in een gebied tussen 1 en 3 boogminuten een afzonderlijke schijf-achtige structuur zien, met ongeveer 4% van de totale massa.

In HOOFDSTUK DRIE analyseren we kinematische kaarten van de binnenste delen van het nabij gelegen vroeg-type spiraalstelsel NGC 5448, verkregen uit waarnemingen met de twee-dimensionale spectograaf SAURON aan de 4.2 meter William Herschel Telescoop op La Palma. De verstoorde structuur en kinematica van het gas wijzen op duidelijke afwijkingen van simpele rotatie langs cirkels. De kinematica van de sterren is veel regelmatiger en duidt op de aanwezigheid van een kleine schijf-achtige component in een grote roterende structuur. We delen het snelheidsveld van het gas op in verschillende componenten en laten zien dat de voornaamste eigenschappen consistent zijn met een eenvoudig model met een roterende balk. Dit model is verkregen uit de analytische oplossing van de lage orde lineaire termen van de bewegingsvergelijkingen voor het geval van een zwakke roterende balk. Een aantal van de afwijkingen tussen dit model en de data worden mogelijk veroorzaakt door de asymmetrische verdeling van stof in NGC 5448.

In HOOFDSTUK VIER construeren we axisymmetrische en triaxiale modellen met een DF die afhangt van lineaire combinaties van de drie exacte integralen van beweging in een separabele Stäckel potentiaal. Voor deze zogenaamde Abel modellen kunnen we de dichtheid en snelheidsmomenten op een efficiënte manier uitrekenen en we laten zien dat ze veel van de rijke interne dynamica van vroeg-type stelsels kunnen beschrijven. We gebruiken deze modellen om de kinematische kaarten na te bootsen die volgen uit waarnemingen met twee-dimensionale spectrografen zoals SAURON. We fitten deze gesimuleerde waarnemingen met axisymmetrische en triaxiale modellen gemaakt met onze numerieke implementatie van de Schwarzschild methode.

de, terwijl we de intrinsieke vorm en kijkrichting veranderen. We concluderen dat de Schwarzschild methode ons in staat stelt de interne structuur van vroeg-type stelsels te bepalen en nauwkeurig de massa-lichtkracht verhouding te meten, maar dat extra informatie nodig is om de kijkrichting beter in te perken.

In HOOFDSTUK VIJF zetten we onze analyse van modellen met separabele potentialen voort en leiden we de algemene oplossing van de Jeans vergelijkingen af. Deze vergelijkingen relateren de tweede orde snelheidsmomenten aan de dichtheid en potentiaal van een stersysteem, zonder verder aannames over de DF. Voor algemene drie-dimensionale stersystemen zijn er drie vergelijkingen en zes onafhankelijke momenten, maar in een triaxiale Stäckel potentiaal verdwijnen de gecorelleerde momenten in confocale ellipsoïdale coördinaten. De drie Jeans vergelijkingen en drie overgebleven momenten vormen een gesloten systeem van drie symmetrische gekoppelde eerste orde partiële differentiaalvergelijkingen in drie variabelen. Meer dan 40 jaar nadat Lynden-Bell ze afleidde, geven we in dit hoofdstuk de oplossing.

We lossen allereerst de Jeans vergelijkingen in de axisymmetrische limiet op met een nieuwe methode gebaseerd op het optellen van particuliere oplossingen. Deze twee-dimensionale oplossingen passen we toe op (elliptische) schijven, oblate en prolate sferoïden en op de schaalvrije triaxiale limiet. Daarna breiden we onze methode uit naar triaxiale modellen en vinden de algemene oplossing. Deze kan uitgedrukt worden in termen van (hyper)elliptische integralen die op een efficiënte manier numeriek geëvalueerd kunnen worden. De oplossing geeft de volledige set van tweede momenten die een triaxiale dichtheidsverdeling in een separabele potentiaal kunnen ondersteunen.

In HOOFDSTUK ZES onderzoeken we de totale massaverdeling in de binnendelen van het gravitationele lensstelsel QSO 2237+0305, beter bekend als het *Einstein Cross*. In dit systeem wordt het licht afkomstig van een veraf gelegen quasar afgebogen door een vroeg-type spiraal stelsel op een roodverschuiving van $z = 0.04$, oftewel op een afstand van bijna 500 miljoen lichtjaar. We leiden de intrinsieke lichtverdeling van het lensstelsel af door de gemeten lichtverdeling aan de hemel te deprojecteren. Vervolgens construeren we een lensmodel dat nauwkeurig de posities en relatieve lichtkracht van de vier afbeeldingen van de quasar fit. Dan bouwen we een realistisch afgeplat dynamisch model van het lensstelsel dat voldoet aan de voorlopige kinematische waarnemingen gedaan met de twee-dimensionale spectrograaf GMOS aan de 8.2 meter Gemini Noord Telescoop op Mauna Kea. We vinden dat de gemeten snelheidsdispersie van $167 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ in het gebied omsloten door de quasar afbeeldingen in overeenstemming is met de voorspelde waarde uit ons en eerdere lensmodellen. Ook de massa in dit gebied dat volgt uit het model dat het beste bij de waarnemingen past is consistent met de onafhankelijk bepaalde waarde uit ons lensmodel. Tenslotte vertoont ook de vorm van geprojecteerde dichtheid van het lens model veel gelijkenis met de waargenomen lichtverdeling van het lensstelsel. Echter, verdere verbeteringen aan de voorlopige kinematische waarnemingen zijn nodig, alvorens we definitieve conclusies kunnen trekken over de total massaverdeling in het lensstelsel.

In HOOFDSTUK ZEVEN beschouwen we naast het *Einstein Cross* nog 25 andere gravitationele lenssystemen met roodverschuiving tot $z \sim 1$. Op dergelijke grote afstanden zijn we beperkt tot het bestuderen van de globale (dynamische) eigenschappen van deze lensstelsels. Ze zijn representatief voor vroeg-type veldstelsels, dat wil zeggen in een omgeving van relatief lage dichtheid aan stelsels in tegenstelling tot cluster stelsels. De *Fundamental Plane* relatie van deze lensstelsels op verschillende roodverschuivin-

gen maakt het mogelijk om de evolutie van hun massa-lichtkracht verhouding M/L te bestuderen. Als we aannemen dat de M/L van vroeg-type stelsels evolueert als een machtswet, vinden we voor de lensstelsels een evolutie $d \log(M/L)/dz = -0.62 \pm 0.13$ in de B -band. Dit betekent dat de sterren gemiddeld gevormd zijn op een roodverschuiving van $\langle z_* \rangle = 1.8_{-0.5}^{+1.4}$.

Er rekening mee houdend dat op hogere roodverschuiving laat-type stelsels mogelijk nog evolueren (door samensmelting) tot vroeg-type stelsels, geldt voor sterren in cluster stelsels $\langle z_*^{cl} \rangle = 2.0_{-0.2}^{+0.3}$. Dit is niet significant anders dan de lensstelsels, in tegenstelling tot voorspellingen door de huidige theoriën van de vorming van sterrenstelsels. Als we echter aannemen dat stelsels van dezelfde leeftijd gelijke M/L hebben, vinden we dat de sterpopulaties in lensstelsels gemiddeld 10–15% jonger zijn dan die in clusterstelsels. Verder vertonen zowel de M/L waarden als de kleuren van de lensstelsels een significante spreiding. Terwijl ongeveer de helft van de lensstelsels consistent zijn met een oude sterpopulatie zoals in clusterstelsels, zijn andere lensstelsels veel blauwer met jongere sterpopulaties die mogelijk pas gevormd zijn op $z_* \sim 1$. Bovendien is de spreiding in kleur gerelateerd aan die in de M/L . We zien dit als bewijs voor een significante spreiding in de leeftijden van de sterpopulaties in lensstelsels, in tegenstelling tot de oude populaties in clusterstelsels die in dezelfde periode gevormd lijken te zijn.

TOEKOMSTPERSPECTIEVEN

Een belangrijk deel van het werk gepresenteerd in dit proefschrift betreft de uitbreiding van axisymmetrische naar triaxiale modellen voor sterrenstelsels. Dit is vooral belangrijk voor de zware elliptische stelsels, waarvan vele duidelijke afwijkingen van axisymmetrie vertonen in hun kinematica gemeten met behulp van twee-dimensionale spectrografen zoals SAURON. Triaxiale modellen van deze zware elliptische stelsels, tezamen met axisymmetrische modellen van twee dozijn andere elliptische en lensvormige stelsels die al geconstrueerd zijn, zullen het mogelijk maken de fossiele overblijfselen in deze ‘schone’ vroeg-type stelsels in detail te bestuderen.

Omdat SAURON typisch de heldere binnendelen van stelsels waarneemt, hebben we extra informatie nodig om onderzoek te doen naar de uitgestrekte donkere materie verdeling zoals voorspeld door de huidige theoriën over de vorming van stelsels. We hebben gezien dat gravitatielenzen informatie verschaffen over de donkere materie, maar slechts enkele lensstelsels staan dichtbij genoeg om in detail te modelleren. Momenteel onderzoeken we het gebruik van het relatief grote waarnemingsveld van SAURON om alsnog kinematische metingen te doen in de lichtzwakke buitendelen van stelsels. Overige kinematische metingen komen voort uit waarnemingen van neutraal waterstof en van Röntgen straling, als ook de snelheden van bolhopen en planetaire nevels in de buitendelen van deze stelsels. We zijn begonnen met het uitbreiden van onze modelleer software om ook zulke discrete waarnemingen mee te kunnen nemen. Deze toevoeging is ook belangrijk met betrekking tot het modelleren van de individueel waarneembare sterren in de Melkweg en in de omliggende stersystemen.

Voor nabij gelegen bolhopen zoals ω Centauri zullen we dan in staat zijn de waargenomen snelheden van individuele sterren (in drie dimensies) direct te fitten, met eventueel zelfs de toevoeging van metingen van hun leeftijd en samenstelling. Op deze manier kunnen verschillende populaties van sterren in de fase-ruimte gescheiden worden, waarna hun structuur en dynamica afzonderlijk bestudeerd kunnen worden.

Door bovendien direct de eigenbewegingen in het centrum van bolhopen, gemeten met behulp van de *Hubble Space Telescope*, te fitten, kunnen we het mogelijke bestaan van zwarte gaten in bolhopen onderzoeken.

Het modelleren van de sterren in de Melkweg wordt sterk bemoeilijkt door de aanwezigheid van stof en een roterende balk. Dit laatste vereist een zeker niet vanzelfsprekende uitbreiding van onze (statische) modelleer software. In een inleidend onderzoek hebben we de zeer nauwkeurige snelheidsmetingen van meer dan duizend sterren gebruikt om aan te tonen dat met zo'n uitbreiding het binnenste van de Melkweg gemodelleerd kan worden met direct bewijs voor het bestaan van een balk. Verder zal deze uitbreiding het mogelijk maken andere roterende stelsels (met mogelijk een balk) te modelleren, waaronder de vroeg-type spiraalstelsels waargenomen met *SAURON*, en een link te leggen tussen de kinematica van het sterren en het gas.

De grote hoeveelheid fotometrische en kinematische data die inmiddels al beschikbaar is, zal snel toenemen met de bestaande en toekomstige instrumenten en missies, zoals *RAVE*, *GAIA* en *SIM*, die data van miljoenen sterren zullen opleveren, als ook *VIMOS*, *SINFONI*, *MUSE* en andere twee-dimensionale spectrografen, die ons zullen voorzien van twee-dimensionale data van vele nabije stelsels. Tegelijkertijd maken de snelle ontwikkeling van telescopen en de grootte van hun spiegels een steeds diepere blik in het heelal mogelijk, met een direct zicht op de evolutie en zelfs vorming van stersystemen. Het werk gepresenteerd in dit proefschrift betekent een stap vooruit in de ontwikkeling en toepassing van dynamische modellen om uit deze rijkdom aan data te achterhalen hoe stersystemen zich ontwikkeld hebben vanaf de oerknal tot de dag van vandaag.