



Universiteit
Leiden
The Netherlands

On the nature of early-type galaxies

Krajnović, D.

Citation

Krajnović, D. (2004, October 12). *On the nature of early-type galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/575>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/575>

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

Nederlandse samenvatting

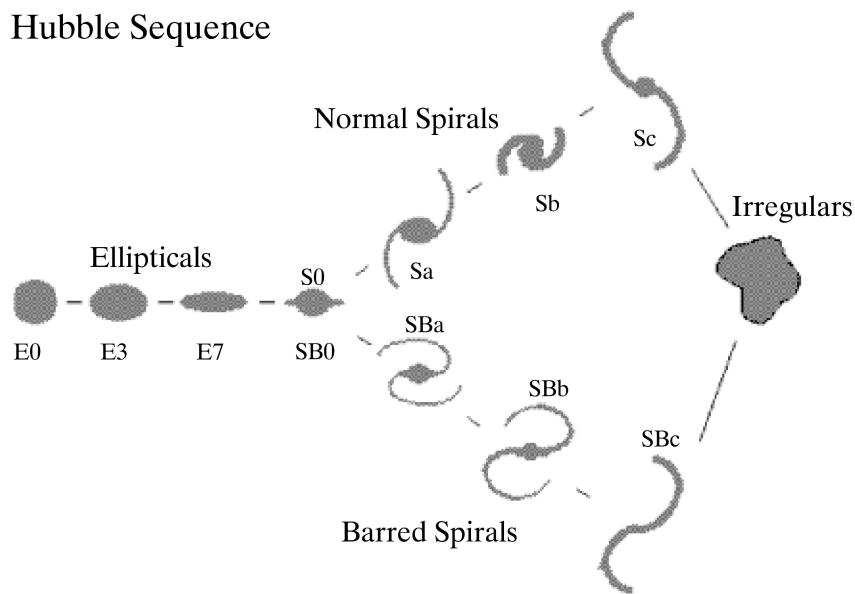
Het begrijpen van de wereld

DE drang om de wereld te begrijpen en te beschrijven is karakteristiek voor mensen. Een gedenkwaardig voorbeeld van deze drang is op de omslag van dit proefschrift te zien. Dit keramisch vat, met een geordende volgorde van verschillende symbolen, is ongeveer 4500 jaar oud. Het is door een handwerksman van de *Vučedol* cultuur gemaakt en is opgegraven in 1978 in de stad Vinkovci in Oost-Kroatië. De klassieke *Vučedol* cultuur is in de tijd van het Europese Neolithicum ontwikkeld door het nieuw opkomende Indo-Europese volk. Deze wijd verspreide cultuur is genoemd naar zijn archeologisch centrale lokatie gelegen aan de rivier de Donau. De betekenis van de symbolen op het vat was tot voor kort een mysterie, totdat de archeoloog Aleksander Durman een verband ontdekte. De symbolen vertonen de dominerende sterrenbeelden aan de Europese hemel van vijfduizend jaar geleden. Dit halfgebroken vat is waarschijnlijk de oudste Europese kalender, gebruikt door de mensen van *Vučedol* voor de organisatie van hun alledaagse leven.

Vijfduizend jaar geleden keken veeboeren van de Panonische vlakte naar de nachtelijke hemel. Ze ontdekten regelmatigheden en ontwikkelden een ingewikkeld systeem voor het meten van tijd. Op deze manier konden ze een belangrijk aspect van de wereld beschrijven, met het gebruik van primitieve maar directe sterrenkundige waarnemingen. Vandaag is de sterrenkunde een wetenschap, die de weg heeft afgelegd van het *voorspellen van de toekomst* door de eerste astrologen tot het *verklaren van de feiten* door astronomen, geholpen door het waarnemen met moderne telescopen en instrumenten en het gebruik van natuurkundige wetten. In het hart van de sterrenkunde als wetenschap ligt dezelfde wens die de *Vučedol* mensen leidde: beschrijven, begrijpen en temmen van de wereld rondom ons.

Onze methoden zijn verder ontwikkeld, maar ook de astronomische thema's zijn veranderd. De sterrenkunde had een kenmerkende invloed op de mensen van de *Vučedol* cultuur, en schonk hen de kalender. Het was een bron van belangrijke informatie voor het leven. In tegenstelling tot sommige andere wetenschappen heeft de sterrenkunde tegenwoordig geen directe invloed op ons alledaagse leven meer. Het moderne sterrenkundig onderzoek is gericht op de processen die het Heelal vorm geven: van de Zon, haar burens, de Melkweg en andere sterrenstelsels, tot de verre quasars en de overblijfselen van de Oerknal. In bredere zin is de sterrenkunde vandaag een geïdealiseerde zoektocht naar de kennis van het Heelal. In aanvulling hierop legt de sterrenkunde de menselijke perceptie van de wereld vast. De vooruitgang in de sterrenkunde reflecteert zich in de veranderingen in de filosofie en cultuur.

In de jaren zestig van de vorige eeuw veranderde de grootte van het Heelal bijna ieder dag met de ontdekkingen van verre quasars. Het is nu alleen nog een kwestie van



Figuur 1 — Het Hubble diagram. Het diagram is een classificatie van sterrenstelsels op basis van hun vorm. Aan de linker kant liggen de elliptische stelsels, die verschillende afplattingen (ellipsvormen) hebben: van de ronde E0 tot de platste E7. Daarna volgen lensvormige stelsels, die de overgang naar schijfvormige sterrenstelsels kenmerken. Schijfvormige stelsels hebben indrukwekkende spiraalarmen (rechtsboven), maar er zijn ook schijven met een balk tussen de spiralen (linksonder). Aan het einde van het diagram ligt een groep van alle andere sterrenstelsels, zonder een bepaalde vorm.

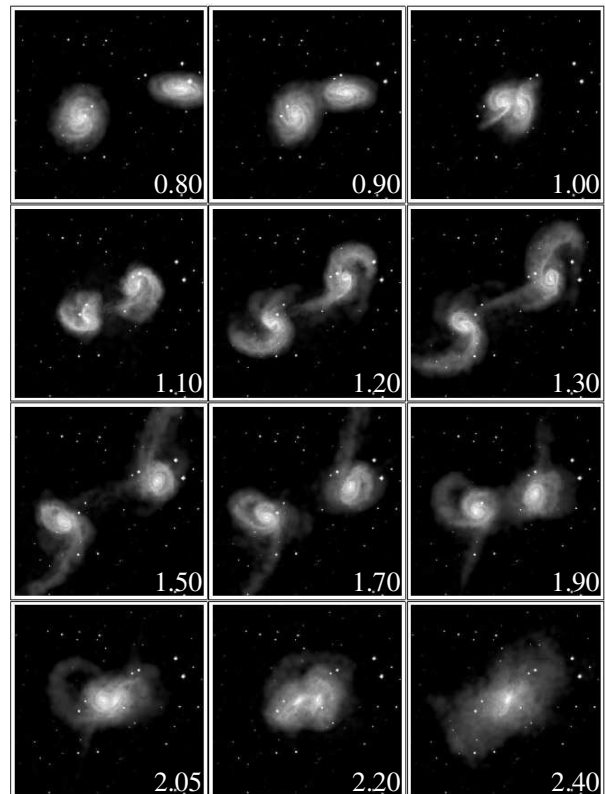
tijd tot de eerste planeet vergelijkbaar met de Aarde ontdekt zal worden¹. De volgende stap is de zoektocht naar leven op zo'n planeet. De sterrenkunde is ons venster naar de complexiteit van het Heelal. Dit proefschrift richt zich op een speciaal thema binnen de sterrenkunde: de vorming en evolutie van sterrenstelsels.

De “vroeg-type” sterrenstelsels

Sterrenstelsels zijn het elegantste beschreven door Immanuel Kant in de 18de eeuw als “eilanden universa”. Noch hij noch iemand anders wist destijds wat deze “eilanden universa” waren: ze lijken op nevels aan de hemel, maar waarvan ze gemaakt zijn en hoe ver ze van de Aarde af staan was onbekend totdat de sterrenkundigen van de 20ste eeuw nieuwe ontdekkingen deden. De waarnemingen met de 100 inch telescoop op Mount Wilson toonden aan wat de nevels werkelijk waren. Ze zijn opgebouwd uit sterren en bevinden zich op grote afstand van ons eigen “eiland universum”, de Melkweg. Er zijn veel verschillende soorten sterrenstelsels en ze worden meestal geclassificeerd in vier groepen op basis van hun schijnbare vorm (Figuur 1). De classificatie werd geïntroduceerd door Edwin Hubble in het jaar 1936 en is vandaag bekend als het Hubble diagram (Hubble reeks of Hubble's stemborkdiagram zijn ook vaak gebruikte uitdrukkingen). Het diagram begint met *elliptische* sterrenstelsels, die er eenvoudig uit zien. Aan de andere kant liggen de schijfvormige sterrenstelsels, met hun indrukwekkende spiraalstructuren. Ze worden daarom vaak spiraalstelsels

¹Meer dan honderd planeten vergelijkbaar met Jupiter zijn al gevonden rond andere sterren.

Figuur 2 — Een tijdserie van de simulatie van een botsing van twee gelijke schijfstelsels. De tijd (in miljarden jaren) is rechtsonder van de beelden geprint. Toen de stelsels voor de eerste keer dicht bij elkaar kwamen, zorgde de zwaartekracht voor de opvallend open spiralen. Na de ontmoeting zijn de sterren en het gas van de schijven uitgeworpen in de vorm van getijdestaarten. Aan het einde van de botsing zijn de schijven vernietigd en het stelsel vormt een bolvormige verdeling van gas en sterren die er bijna als een elliptisch sterrenstelsel uitziet. Met dank aan V. Springel, MPA.



genoemd. De *lensvormige* stelsels (aangeduid met S0) liggen tussen de elliptische en spiraalstelsels in. Ze hebben een prominente schijf, zonder de kenmerkende spiraalstructuur, verzonken in een bolvormige verdeling van sterren. De vierde groep van sterrenstelsels bestaat uit de stelsels zonder bepaalde vorm: de *onregelmatige* stelsels. Hubble interpreteerde het diagram in termen van evolutie: de spiraalstelsels, met hun gecompliceerde en duidelijk zichtbare structuur, waren de logische kandidaten voor ingewikkelde en ontwikkelde systemen, terwijl de elliptische stelsels voorbeelden waren van eenvoudige systemen. De lensvormige stelsels waren een tussenvorm van deze twee soorten sterrenstelsels. Alhoewel deze verklaring niet meer aannemelijk is en de evolutie van sterrenstelsels waarschijnlijk in de andere richting van het Hubble diagram “verloopt”, worden de elliptische en lensvormige stelsels nog steeds “vroeg-type” stelsels genoemd en zijn de spiraalstelsels bekend als “laat-type” stelsels.

Sterrenstelsels zijn niet alleen uit sterren opgebouwd. Ze bevatten ook gas en stof in verschillende hoeveelheden, afhankelijk van het Hubble type: de vroeg-type stelsels hebben minder gas en stof dan de laat-type stelsels. In de zeventiger jaren van de twintigste eeuw werd een nieuw bestanddeel van spiraalstelsels ontdekt: deze sterrenstelsels zijn omringd door donkere materie. Men neemt aan dat alle sterrenstelsels omgeven zijn door halo’s van donkere materie, maar de waarnemingen voor het bewijs van donkere materie rondom elliptische stelsels geven nog geen uitsluitsel. De samenstelling van donkere materie is nog steeds niet bekend, maar de waarnemingen wijzen erop dat het de dominante vorm van materie in het Heelal is. Een theorie van de vorming en evolutie van sterrenstelsels moet alle waargenomen feiten kunnen verklaren.

Helaas is de leeftijd van een sterrenkundige veel korter dan de evolutietijd van sterrenstelsels. De sterrenkundigen werken dus als detectieven op zoek naar aanwijzingen van de processen die een rol spelen in de vorming en evolutie van sterrenstelsels. De vroeg-type stelsels zijn belangrijk, want ze bevatten maar kleine hoeveelheden van gas en stof en vormen geen nieuwe sterren: ze hebben de blauwdrukken van hun vorming bewaard.

Een korte gids over de vorming en evolutie van sterrenstelsels

Sterrenstelsels zijn ontstaan uit schommelingen in de dichtheid van de donkere materie in het vroege Heelal. Gebieden met een grotere dichtheid verzamelen door hun zwaartekracht stof en vormen kleine objecten. Door botsingen van de kleine objecten vormen zich grotere structuren. De donkere materie domineert deze systemen, die vaak schijven van gas in hun middelpunt hebben. Onder bepaalde voorwaarden vormt het gas sterren, die het Heelal verlichten en de nieuwe sterrenstelsels zichtbaar maken.

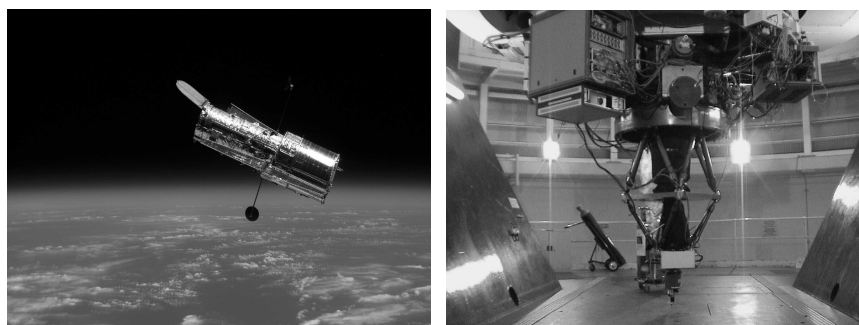
Het botsen van de kleine sterrenstelsels gaat door en als twee schijfstelsels dicht genoeg bij elkaar komen, kunnen ze versmelten en een elliptisch stelsel vormen. Figuur 2 toont een simulatie van een botsing van twee schijfstelsels. Het eindresultaat, na 2.5 miljard jaar, is een elliptische verdeling van gas en sterren. De elliptische stelsels zijn niet het eind van de evolutie. Een elliptisch stelsel kan weer een schijfstelsel worden als zij genoeg intergalactisch gas invangt, dat opnieuw een schijf van sterren kan maken. Dit spel tussen botsing en invangen wisselt vaak, maar dat zijn niet alle mogelijke processen die de evolutie van sterrenstelsels beïnvloeden. In sterrenstelsels vinden ook langzamere processen plaats ("secular processes"). Deze processen zijn het resultaat van een specifieke toestand in de sterrenstelsels, zoals hun vorm, vorm van hun zwaartekracht potentiaal (de vorm van de donkere materie halo), de hoeveelheid gas en de wisselwerking met aangrenzende (en kleinere) stelsels. De vorming van spiraalstructuren, balken, ringen van gas en jonge sterren zijn typische gevolgen van deze langzame evolutie.

Het waarnemen van vroeg-type sterrenstelsels

Sterrenkunde is een observationele wetenschap die verschilt van andere wetenschappen, omdat de astronomische objecten niet aangepast kunnen worden voor experimenten en het niet mogelijk is ze van alle kanten te bekijken.

Gelukkig zijn er ontelbaar veel sterrenstelsels in het Heelal en met waarnemingen van ver weg gelegen stelsels kijken we naar het verleden, naar een jonger Heelal. Dit betekent dat met onderzoek van een groter aantal sterrenstelsels het mogelijk is om hun vorming en evolutie te verklaren. Om dat te doen is het belangrijk veel gegevens te verzamelen van verschillende bronnen. Voor een onderzoek naar de structuur en dynamica van elliptische sterrenstelsels bijvoorbeeld, zijn gegevens over de verdeling, kinematica en soorten van sterren nodig, evenals de verdeling van gas en stof. Daarom is dit proefschrift gebaseerd op veel verschillende waarnemingen, vanaf de grond en vanuit de ruimte, van radio tot optische golflengten.

De verdeling van sterren kan bepaald worden door het afbeelden van sterrenstelsels. Eind 19de eeuw veroorzaakte het foto toestel een revolutie binnen de sterrenkunde.



Figuur 3 — Links: Hubble Space Telescope (HST) in zijn baan. De instrumenten van HST werden in dit proefschrift gebruikt (hoofdstukken 2 en 3). Rechts: SAURON, de twee-dimensionale spektrograaf, gemonteerd onder het focus van de 4.2m William Herschel Telescope op La Palma. De waarnemingen met SAURON werden in hoofdstuk 4 en 5 van dit proefschrift gebruikt. Met dank aan NASA en het SAURON team.

Ook de verschijning van digitale detectors, zoals CCD's in de jaren zeventig van de 20ste eeuw, heeft een enorme vooruitgang van onderzoek naar de objecten in het Heelal mogelijk gemaakt. Maar de grootste stap in het onderzoek naar sterrenstelsels was de lancering van de Hubble Space Telescope (HST) in een baan rondom de Aarde. Figuur 3 toont de HST in de ruimte. Het licht dat is verzameld met de spiegel van de HST gaat niet door de atmosfeer, die de baan van het licht verstoort en de informatie van de hemellichamen filtreert.

Waarnemingen met de HST hebben ons beeld van de “eenvoudige” elliptische stelsels drastisch veranderd: ze hebben gecompliceerde structuren met ontkoppelde kernen en schijfjes van stof en sterren in hun centra.

De bewegingen en soorten sterren in een sterrenstelsel worden onderzocht met waarnemingen van hun spectra. De sterren produceren het licht van een sterrenstelsel. Maar alleen in de dichtstbijzijnde (op minder dan 3 miljoen lichtjaar²) sterrenstelsels is het mogelijk waarnemingen aan individuele sterren te doen. Dat betekent dat het licht van sterrenstelsels het gezamenlijke licht van alle sterren langs de gezichtlijn is. We kunnen daarom alleen de gemiddelde eigenschappen van grote aantallen sterren meten. Het is ook nodig om te weten waar in een stelsel het waargenomen spectrum vandaan komt. De moderne technologie heeft het fabriceren van speciale twee-dimensionale spectrografen mogelijk gemaakt. Deze spectrografen nemen de spectra waar en registreren ook de plaats aan de hemel waar het licht vandaan komt. Het eind resultaat is een drie-dimensionale dataset met informatie over de ruimtelijke positie en de golflengte (x, y, λ). SAURON (Figuur 3) is zo'n spectrograaf. Hij bevindt zich aan de William Herschel Telescoop op het Canarische eiland La Palma en wordt gebruikt voor onderzoek naar de structuur en kinematica van vroeg-type sterrenstelsels en de soorten van sterren waaruit ze bestaan.

²Een lichtjaar is de afstand die het licht in een jaar aflegt, en komt overeen met tienduizend miljard km. Sterrenkundigen gebruiken vaak de eenheid parsec: $1\text{pc} \sim 3.3$ lichtjaar.

Gids door dit proefschrift

De theorie van de vorming en evolutie van sterrenstelsels is ingewikkeld en bestaat uit veel stukken die begrepen moeten worden en in een samenhangend geheel moeten worden gegoten. Ieder hoofdstuk van dit proefschrift legt zich toe op een onderdeel van de theorie van de vorming en evolutie van sterrenstelsels. Het onderzoek beschreven in dit proefschrift concentreert zich op de activiteit, structuur, kinematica en dynamica van nabije³ vroeg-type sterrenstelsels.

Actieve sterrenstelsels

De kernen van veel vroeg-type sterrenstelsels zenden straling uit die niet van sterren afkomstig is. Deze kernen worden *actieve kernen* genoemd. De theorie van de activiteit in deze kernen is op het *zwarte gaten* paradigma gebaseerd. Volgens dit paradigma bevindt zich in de kernen van (bijna) alle sterrenstelsels een massief object: een zwart gat, met zo veel massa dat niets, zelfs niet het licht, kan ontsnappen aan de invloed van zijn zwaartekracht. In het verre Heelal liggen krachtige actieve kernen: quasars en radio sterrenstelsels zijn voorbeelden hiervan. Daarentegen vertonen de kernen van nabije sterrenstelsels geen, of in ieder geval niet veel, activiteit. Als we bedenken dat de nabije “slapende” kernen nakomelingen zijn van “wakkere” verre sterrenstelsels, dan moeten nabije sterrenstelsels ook in hun kernen zwarte gaten herbergen⁴. Eén van de mogelijke redenen van het ontbreken van activiteit in de nabije sterrenstelsels is dat er geen materiaal (brandstof) is, die in de zwarte gaten (machine) valt en de activiteit op gang brengt.

Activiteit in nabije sterrenstelsels wordt onderzocht in **hoofdstuk twee** van dit proefschrift. Een groep sterrenstelsels met en zonder stof is waargenomen met de Very Large Array radio interferometer en met de HST. Het resultaat van de waarnemingen is dat, hoewel de sterrenstelsels met stof vaker actief zijn, de sterrenstelsels zonder stof ook actieve kernen hebben. Dat betekent dat de aanwezigheid van stof, dat waarneembaar is met de HST, niet nodig is voor het bestaan van actieve kernen in nabije sterrenstelsels.

Nucleaire stellaire schijfjes

De waarnemingen met de HST tonen het bestaan van stellaire schijfjes in de centrale delen van nabije vroeg-type sterrenstelsels aan. Deze schijfjes zijn extra dun (30 pc vergeleken met de 300 pc van de dunne schijf in onze eigen Melkweg) en soms op

³Nabij is een heel relatieve term in de sterrenkunde. De Andromedanevel, een sterrenstelsel lijkend op onze Melkweg, ligt op een afstand van circa 3 miljoen lichtjaar. De sterrenstelsels in dit proefschrift, die “nabij” worden genoemd, bevinden zich op een afstand van 20 tot 100 miljoen lichtjaar. De sterrenkundigen gebruiken deze term ook voor objecten die zich 10 keer verder weg bevinden. Hierachter begint het verre Heelal.

⁴Zwarte gaten zijn indirect ontdekt in zo’n 30 nabije sterrenstelsels op basis van hun invloed op de beweging van het gas en de sterren in hun nabijheid. De massa van het zwarte gat blijkt gerelateerd aan de grootte van het sterrenstelsel, en tot nu ontdekte massa’s zijn tussen de miljoen en een paar miljard zonsmassa’s. Er bestaan ook stellaire zwarte gaten van slechts enkele zonsmassa’s, die uit exploderende sterren zijn ontstaan. Het is niet bekend hoe de zwaarste zwarte gaten in de kernen van sterrenstelsels ontstonden.

een bepaalde manier verbonden met grotere schijven die ook kunnen voorkomen. Nucleaire sterschijfjes zijn heel interessante structuren, die ons informatie over centrale dichtheden, mogelijke zwarte gaten en over de evolutie van sterrenstelsels kunnen opleveren.

Er zijn twee mogelijke scenario's die beschrijven hoe de stersschijfjes ontstaan zijn. Eén is verbonden met de botsing van twee sterrenstelsels, waarvan één veel groter is dan de andere. Dan valt het gas van het kleine stelsel in de put van de zwaartekracht potentiaal, dus tot in de kern van het grotere stelsel, en onder gunstige condities wordt een schijf gevormd. In de wisselwerking met het centrale zwarte gat stabiliseert het schijfje zich en vormt het sterren. In het tweede scenario kunnen stersschijfjes het resultaat zijn van één van de langzame processen, bijvoorbeeld als gevolg van een instabiliteit van de veel grotere schijf, waar gas uit de buitendelen van het sterrenstelsel naar binnen wordt getransporteerd. Het is ook mogelijk dat een combinatie van de processen de nucleaire stellaire schijfjes vormt. In ieder geval, als de evolutie van de schijfjes anders is dan in de rest van het sterrenstelsel, kunnen we verwachten dat er verschillen zijn in de chemisch structuur en leeftijd van de sterren.

Het **derde hoofdstuk** beschrijft waarnemingen van vier nabije sterrenstelsels met bekende nucleaire stellaire schijfjes (NGC 4128, NGC 4570, NGC 4621 en NGC 5308). De sterrenstelsels werden met twee instrumenten op de HST waargenomen. Het resultaat zijn spectra en afbeeldingen met de grootste resolutie tot nu toe ($0''.05$ en $0''.0455^5$ respectievelijk). De waarnemingen hebben verschillende en enigszins onverwachte structuren in de kernen ontdekt, die niet noodzakelijk met de schijfjes zijn verbonden. De sterren in de onderzochte sterrenstelsels zijn oud, maar met een verschillende chemische samenstelling. Het is waarschijnlijk dat stersschijfjes zich vormen als een combinatie van zowel snelle als langzame processen. In beelden van sterrenstelsel NGC 4128 is een tijdelijk verschijnsel ontdekt. Dit is misschien de eerste supernova beschreven voor NGC 4128, maar de werkelijke oorsprong blijft onbekend.

Twee-dimensionele kinematische kaarten

Als er zich geen objecten voor en achter het waargenomen sterrenstelsel bevinden, is het mogelijk met spectroscopische waarnemingen de kinematische eigenschappen vast te stellen. De snelheid van een ster is met spectraalanalyse vast te stellen, maar de gemeten spectra van sterrenstelsels bestaan uit spectra van vele sterren langs de gezichtslijn. Deze sterren hebben verschillende snelheden en het gevolg is dat de spectraallijnen veel breder zijn dan die van een enkele ster. Dat betekent dat het gezamenlijke spectrum van de sterren langs de gezichtslijn de informatie over de verdeling van snelheden bevat.

Twee-dimensionele kinematische kaarten zijn de resultaten van waarnemingen met twee-dimensionale spectrografen. Deze kaarten laten zien hoe een kinematische parameter, zoals snelheid, verandert met de positie in het sterrenstelsel geprojecteerd aan de hemel. De kaarten zijn indrukwekkend, maar het is ook nodig ze goed te analyseren. In het **vierde hoofdstuk** van dit proefschrift wordt een methode voor

⁵Een handbal balancerend op de torenspits van de kathedraal van Zagreb, gezien vanaf een terrasje in Leiden, heeft een afmeting van ongeveer $0''.04$.

de analyse van twee-dimensionele kinematische kaarten beschreven. De methode is gebaseerd op de harmonische analyse van de kaarten langs concentrische ringen en lijkt op de methoden van oppervlakte helderheid fotometrie en op de analyse van de snelheidskaarten van radio waarnemingen. Op grond hiervan is het *kinemetry* genoemd. De methode is voor modellen en echt gemeten kinematische kaarten (van SAURON waarnemingen) beschreven, getest en gebruikt. Het verrassende eerste resultaat is dat de twee-dimensionale snelheidskaarten van elliptische sterrenstelsels heel veel lijken op de snelheidskaarten van sterren die zich in schijven bewegen, hoewel de sterren in elliptische sterrenstelsels zich niet in schijven bevinden.

Dynamische modellen

Het compleet begrijpen van de intrinsieke vormen en structuren van sterrenstelsels is alleen mogelijk door gedetailleerd dynamisch modelleren. Het maken van dergelijke modellen is een theoretische onderneming, die op natuurkundige wetten is gebaseerd en ideeën en veronderstellingen omvat over de te onderzoeken objecten (of processen). Alle modellen die waarnemingen reproduceren kunnen beschouwd worden als fysisch. De theoretische samenstellingen worden alleen begrensd door de menselijke fantasie, maar de wereld rondom ons is uniek. Om die te verklaren, moet de theorie kloppen met de waarnemingen.

Het **vijfde hoofdstuk** van dit proefschrift presenteert de gedetailleerde dynamische studie van sterren en gas in elliptische sterrenstelsel NGC 2974. De waarnemingen bestaan uit metingen met grond- en ruimtetelescopen en met de SAURON spectrograaf. Ze worden gebruikt voor het bouwen en het controleren van de theoretische modellen. NGC 2974 is een ongewoon elliptisch sterrenstelsel, omdat ze grote hoeveelheden gas bevat, dat geïoniseerd is door de straling van de sterren. De dynamische modellen van het gasbestanddeel zijn gebaseerd op de veronderstelling dat het gas zich in een dunne schijf bevindt, die onder een bepaalde hoek wordt waargenomen. Het gas beweegt in hetzelfde zwaartekrachtsveld als de sterren en het resultaat kan vergeleken worden met de resultaten van de modellen van de sterbewegingen.

De waargenomen verdeling van sterren in het sterrenstelsel NGC 2974 is consistent met een drie-dimensionale structuur met axiale symmetrie. De modellen van het sterrenstelsel moeten dan ook axisymmetrisch zijn. Een elegante methode voor het bouwen van sterrenstelsels is de Schwarzschild methode van superpositie van sterbanen. In deze methode worden de sterrenstelsels opgebouwd als een verzameling van sterbanen, die zich onafhankelijk gedragen, en niet als een verzameling van sterren die bewegen door onderlinge zwaartkrachtsinvloeden. De banen beschrijven dan de beweging van verzamelingen van sterren en in plaats van 10^{11} sterren is een sterrenstelsel opgebouwd uit 10^4 sterbanen. Gebruik makend van kinematische waarnemingen van NGC 2974 worden Schwarzschild modellen voor de bewegingen van sterren gebouwd. De resultaten van deze dynamische modellen kloppen met de resultaten van de gasmodellen, maar er is ontdekt dat de modellen niet precies de inclinatie van het sterrenstelsel kunnen vaststellen.

Deze studie wordt ook voor het gedetailleerd testen van de Schwarzschild methode gebruikt. De tests worden aan een theoretisch sterrenstelselmodel gedaan waarvan alle eigenschappen bekend zijn. De methode is succesvol, omdat het mogelijk is alle

parameters van het model te reproduceren, ook de interne structuur en de verdeling van de sterbanen. Maar de testen hebben laten zien dat de inclinatie van sterrenstelsels met de huidige waarnemingen niet met zekerheid kan worden vastgesteld.

Blik naar de toekomst

De fundamentele concepten van de vorming en evolutie van sterrenstelsels, alsook hun kosmologische achtergrond, kunnen we als bekend beschouwen. Ze zijn in een nieuw paradigma van de moderne sterrenkunde vastgelegd. Maar er zijn nog veel onopgeloste raadsels, die ons uitdagen en op ons antwoord wachten.

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift heeft een basis gelegd voor het toekomstige werk aan twee-dimensionale kinematische kaarten. De volgende stap is het toepassen van kinometrie en dynamische modellen op een grotere verzameling van sterrenstelsels om hun structuur en eigenschappen, die het gevolg zijn van evolutie processen, te analyseren.

In het algemeen is vooruitgang mogelijk in zowel de waarnemingen als in het bouwen van theoretische modellen. De modellen van sterrenstelsels gebruiken nu de informatie van de positie en kinematica, maar niet van de soort van sterren. De sterrenstelsels zijn verzamelingen van sterren met verschillende leeftijden en chemische samenstellingen. Deze informatie moet ook in de modellen gebruikt worden om precies de evolutie van de sterrenstelsels te bevatten. Aan de andere kant zullen de modellen ook sterrenstelsels met triaxiale symmetrie gaan beschrijven. De leden van het SAURON team zijn al begonnen aan deze ideeën te werken.

Gezien vanuit de observationele kant openen de opkomst van 8 - 10m telescopen met technologie van adaptieve optiek, die de invloed van de atmosfeer corrigeert, en ook een breed gebruik van twee-dimensionale spektrografen nieuwe waarneem mogelijkheden. Deze gaan nieuw licht werpen op de structuur, kinematica en de soorten van sterren in nabije sterrenstelsels, en ook inzicht in de eigenschappen van verre kosmologisch objecten waaruit sterrenstelsels zijn ontstaan.