

# Nederlandse samenvatting

## Spiraalstelsels

Het heelal wordt bevolkt door sterrenstelsels die elk uit miljarden sterren bestaan. Er zijn verschillende soorten sterrenstelsels. In het huidige heelal zien we vooral elliptische sterrenstelsels en spiraalstelsels. Elliptische sterrenstelsels hebben de vorm van een rugbybal of mandarijn en bestaan uit oude sterren. Spiraalstelsels bestaan uit een zogenaamde bulge van voornamelijk oude sterren in het centrum en daar omheen een dunne schijf van sterren en gas. In deze schijf worden nog steeds nieuwe sterren gevormd. Spiraalstelsels danken hun naam aan de spiraalarmen in de schijf. Het bekendste voorbeeld van een spiraalstelsel is onze Melkweg. Dit proefschrift gaat over spiraalstelsels.

Spiraalstelsels roteren, en wel allemaal op min of meer dezelfde manier. In de binnendelen draaien ze net zoals een CD in een CD-speler: elke ster in de schijf heeft dezelfde omlooptijd. Een ster die twee keer zo ver van het centrum ligt, heeft dus een twee keer zo grote snelheid. In de buitendelen van de schijf heeft elke ster echter dezelfde snelheid. Een ster die twee keer zo ver van het centrum ligt, doet dus dubbel zo lang over één omloop.

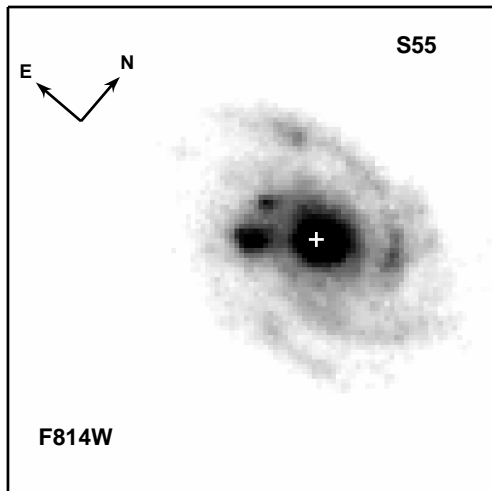
Spiraalstelsels draaien dan wel allemaal op ongeveer dezelfde manier, maar hun maximale snelheid varieert. Sommige hebben een maximum snelheid van minder dan  $100 \text{ km s}^{-1}$ , andere draaien sneller dan  $400 \text{ km s}^{-1}$ . De massa van spiraalstelsels bepaalt hun rotatiesnelheid. Dit kun je vergelijken met de valsnelheid van astronauten op de maan en op aarde. Astronauten op de maan dalen na een sprong langzamer dan op aarde, omdat de aarde zwaarder is dan de maan.

## Rotatiekrommen en snelheidsvelden

Voor een CD geldt: alle punten op dezelfde afstand van het centrum hebben dezelfde snelheid. De rotatie-eigenschappen van een CD kunnen we dus samenvatten als een verband tussen afstand tot het centrum en snelheid. Voor spiraalstelsels geldt ook dat rotatiesnelheid alleen afhangt van afstand tot het centrum.

Het verband tussen de snelheid en afstand tot het centrum geven sterrenkundigen weer in een zogenaamde rotatiekromme. De rotatiekrommen van een CD en van een spiraalstelsel staan in Figuur 2. De rotatiekromme van een CD blijft constant stijgen. De rotatiekromme van een spiraalstelsel stijgt eerst op dezelfde manier als die van de CD, gaat dan minder snel stijgen en wordt uiteindelijk vlak. Tenminste, als de waarnemingen zich uitstrekken tot grote afstand van het centrum van het spiraalstelsel.

Aan de hemel staan geen rotatiekrommen. Met het menselijk oog kun je helemaal geen bewegingen in sterrenstelsels zien. Dit kan zelfs niet met de beste telescopen. De afstanden tot en binnen sterrenstelsels zijn zo enorm groot dat je individuele sterren



**Figuur 1** — Een voorbeeld van een spiraalstelsel. Rond het centrum (aangegeven met een plusteken) is de heldere bulge zichtbaar. In de schijf zijn enkele spiraalarmen te zien. Op enkele plaatsen worden veel nieuwe sterren gevormd, dit zijn de kleine heldere gebieden verspreid over de schijf.

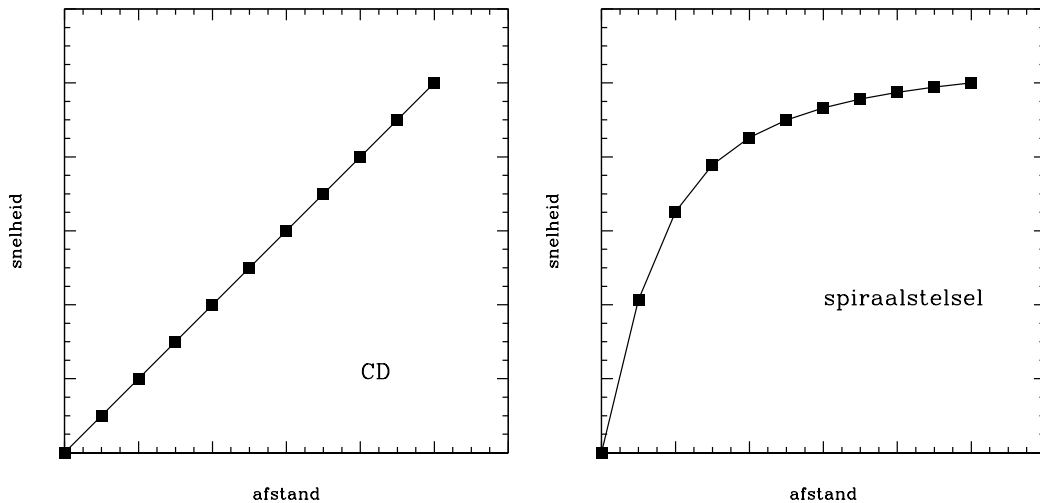
zich niet kunt zien verplaatsen (behalve in onze eigen Melkweg, en dan nog duurt het enkele jaren voordat de positie van sterren meetbaar veranderd is). De enige meetbare snelheid van sterren in een sterrenstelsel is de snelheid langs de gezichtslijn, dat wil zeggen: de snelheid waarmee sterren naar de waarnemer toe of van de waarnemer af bewegen. Hierbij maken we gebruik van het zogenaamde Doppler-effect: de frequentie van licht neemt toe naarmate de ster die het licht uitzond sneller naar de waarnemer toe beweegt en neemt af naarmate de ster sneller van de waarnemer af beweegt. Een vergelijkbaar effect treedt op bij geluid: het geluid van een naderende ambulance klinkt hoger dan het geluid van een zich verwijderende ambulance.

De gemeten snelheden op verschillende plaatsen van het sterrenstelsel vormen samen het waargenomen snelheidsveld. Een voorbeeld van zo'n snelheidsveld staat in Figuur 3, opnieuw voor een CD en voor een spiraalstelsel. In een snelheidsveld wordt de snelheid van elk punt weergegeven door middel van kleur: rood betekent dat het punt van de waarnemer af beweegt, groen betekent dat het punt ten opzichte van de waarnemer niet beweegt, en blauw betekent dat het punt naar de waarnemer toe beweegt.

Het waargenomen snelheidsveld is een projectie van de rotatiesnelheid op elke positie in de schijf. Door middel van een model worden de projectie-effecten opgeheven en de rotatiesnelheid op elke positie bepaald. Hieruit bepalen we dan de rotatiekromme.

## De Tully-Fisher relatie

In 1977 ontdekten Tully en Fisher een nauw verband tussen de rotatiesnelheid van spiraalstelsels en hun helderheid (lichtkracht). Hoe sneller een stelsel roteert, hoe helderder het licht dat het uitstraalt. Dit verband staat nu bekend als de Tully-Fisher



**Figuur 2** — Rotatiekrommen van een CD (links) en van een spiraalstelsel (rechts).

relatie.

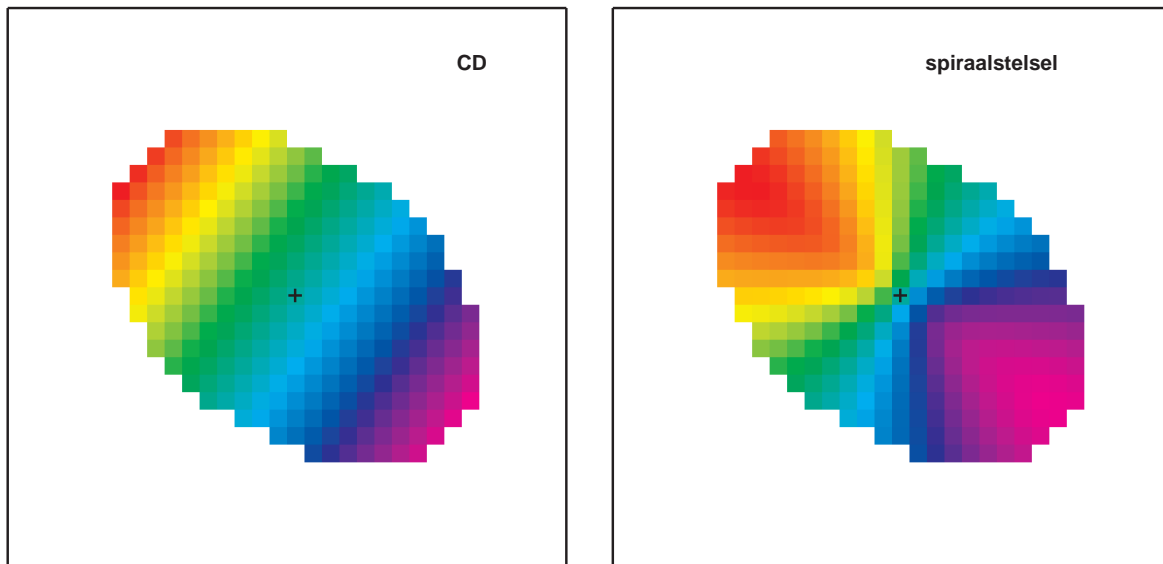
Daarop volgende studies vonden dat dit verband nog nauwer wordt wanneer men de spiraalstelsels bekijkt bij nabij-infrarode golflengtes (licht met een iets langere golflengte dan de kleur rood die het menselijk oog ziet). De lichtkracht bij nabij-infrarode golflengtes wordt namelijk minder beïnvloed door jonge, zeer heldere sterren en absorptie door stof.

Omdat licht wordt uitgezonden door sterren, verwacht je ook een verband tussen de hoeveelheid sterren in een spiraalstelsel (uitgedrukt in de totale massa van alle sterren samen) en de rotatiesnelheid. Deze relatie wordt de stellaire massa Tully-Fisher relatie genoemd. Deze relatie geeft aan hoe de verhouding tussen de totale massa (rotatiesnelheid!) en stellaire massa is, voor stelsels met verschillende totale massa.

De Tully-Fisher relatie is om verschillende redenen een zeer interessante relatie. In dit proefschrift gaat onze interesse uit naar de betekenis van de Tully-Fisher relatie voor het ontstaan en evolutie van sterrenstelsels. Modellen voor het ontstaan en evolutie van sterrenstelsels zijn er tot op heden niet in geslaagd om alle parameters van de Tully-Fisher relatie tegelijkertijd te verklaren.

## Evolutie van spiraalstelsels

Licht reist met een enorme maar eindige snelheid door het heelal. Hoe verder een sterrenstelsel van ons verwijderd is, hoe langer het licht erover doet ons te bereiken. Door de uitdijing van het heelal ontvangen wij licht van een ver weg gelegen sterrenstelsel bij langere golflengtes ('rodere kleuren') dan het werd uitgezonden. Dit effect is groter naarmate het licht langer naar ons onderweg is geweest. Deze roodverschuiving is dus een maat voor de afstand van een sterrenstelsel. Hoe hoger de roodverschuiving, hoe langer het licht erover gedaan heeft ons te bereiken en hoe jonger het heelal was toen het licht werd uitgezonden dat wij nu zien. Door sterrenstelsels op verschillende roodverschuiving te bestuderen, kijken we terug in de tijd en kunnen we onderzoeken hoe de eigenschappen van sterrenstelsels, zoals de Tully-Fisher relatie, veranderen in



**Figuur 3** — Snelheidsvelden van een CD (links) en van een spiraalstelsel (rechts). Hoe sneller een punt naar de waarnemer toe beweegt, hoe paarser de kleur. Hoe sneller een punt van de waarnemer af beweegt, hoe roder de kleur. We gebruiken deze kleuren om de verschillende snelheden voor het oog makkelijk zichtbaar te maken - ze hebben niets te maken met de werkelijke kleuren van het sterrenstelsel. De kruisjes geven het centrum van het sterrenstelsel aan.

de tijd.

Het meten van de Tully-Fisher relatie op hoge roodverschuiving is erg moeilijk. Door hun grote afstand zijn de sterrenstelsels zeer lichtzwak. Daardoor kunnen de snelheidsvelden alleen gemeten worden met de grootste telescopen en de modernste instrumenten. Zelfs dan heb je daar liefst twee tot zeven uur waarneemtijd per stelsel nodig! Ook is het pas sinds een paar jaar mogelijk om de helderheid bij nabij-infrarode golflengtes te bepalen voor grote aantallen sterrenstelsels op hoge roodverschuiving.

Het waarnemen van snelheidsvelden op hoge roodverschuiving vergt ook een andere techniek dan in het nabije heelal. Daar kunnen snelheidsvelden tot op grote afstand van het centrum van sterrenstelsels eenvoudig worden waargenomen door de snelheid van het gas te meten. Dit is (nog) niet mogelijk voor sterrenstelsels op hoge roodverschuiving. We moeten daarom gebruik maken van een andere methode, die de snelheid van het hete gas verhit door jonge sterren meet. Omdat de stellaire schijf minder groot is dan de gasschijf, kan met deze methode het snelheidsveld minder ver van het centrum gemeten worden. Hierdoor is het niet altijd mogelijk om het vlakke deel van de rotatiekromme te meten. Een ander probleem bij het waarnemen van snelheidsvelden op hoge roodverschuiving, is dat de schijnbare grootte van de sterrenstelsels aan de hemel erg klein is. Hierdoor is het aantal meetpunten veel kleiner dan in het nabije heelal en daalt de nauwkeurigheid waarmee je de rotatiekromme kunt bepalen.

Verschillende modellen voor evolutie van sterrenstelsels doen verschillende voorspellingen over de evolutie van de Tully-Fisher relatie. Evolutie in de nabij-infrarode

Tully-Fisher relatie vertelt je hoe de sterpopulaties van spiraalstelsels van verschillende massa evolueren. Evolutie in de stellaire massa Tully-Fisher relatie vertelt wanneer de sterren zijn gevormd in spiraalstelsels van verschillende totale massa.

## Dit proefschrift

In dit proefschrift onderzoeken we de mogelijkheden voor het meten van Tully-Fisher relaties op hoge roodverschuiving. **Hoofdstuk 2** is daarvoor een eerste verkenning aan de hand van een aantal stelsels van het 'NICMOS grism sample' met roodverschuiving 0.8 tot 1.6 (7 tot 9 miljard jaar geleden). Dit zijn stelsels die gekenmerkt worden door relatief veel recente stervorming. De beschikbare gegevens over deze stelsels blijken te beperkt om een betrouwbare Tully-Fisher relatie te bepalen. We leren dat we voor het meten van Tully-Fisher relaties bij hoge roodverschuiving ons moeten richten op zware stelsels. Het meten van rotatiesnelheid met het licht van zeer jonge sterren heeft als nadeel dat dit alleen mogelijk is als het stelsel genoeg jonge sterren heeft. Te veel van deze sterren is echter ook niet goed: hun licht domineert dan de totale helderheid van het stelsel. Dit bemoeilijkt de vergelijking tussen stelsels met sterpopulaties van verschillende leeftijden.

In **Hoofdstuk 3** bestuderen we een sterrenstelsel op roodverschuiving 2.03 (dit licht is 10 miljard jaar naar ons onderweg geweest). Het uiterlijk en de grootte van dit stelsels lijken zeer op die van nabije spiraalstelsels. De leeftijd van de sterpopulatie van dit sterrenstelsel is echter geschat op ongeveer 160 miljoen jaar - voor sterrenstelsels is dit zeer jong. We hebben het snelheidsveld van dit sterrenstelsel waargenomen en hieruit de rotatiekromme afgeleid. Het snelheidsveld is zeer regelmatig en lijkt op die van nabije spiraalstelsels. Ook de rotatiekromme lijkt zeer op de rotatiekrommen van nabije spiraalstelsels: een snelle stijging in het binnenste deel en verder van het centrum vlak (zie Figuur 3.7 in Hoofdstuk 3). Dit stelsel is wellicht het beste voorbeeld van een roterend schijfstelsel dat bekend is op deze roodverschuiving. We hebben dit stelsel vergeleken met de nabij-infrarode Tully-Fisher relatie en de stellaire massa Tully-Fisher relatie. Vergeleken met sterrenstelsels met dezelfde rotatiesnelheid in het nabije heelal, heeft dit stelsel dezelfde helderheid bij nabij-infrarode golflengtes. De stellaire massa is in vergelijking iets kleiner, maar we kunnen het verschil niet nauwkeurig genoeg bepalen om dit met zekerheid te kunnen zeggen.

Vervolgens hebben we geprobeerd om de Tully-Fisher relatie te bepalen van zware sterrenstelsels op hoge roodverschuiving. We hebben gekozen voor zware stelsels vanwege de redenen beschreven in Hoofdstuk 2. Om geen waarneemtijd te verspillen moesten we vóóordat we gingen waarnemen een manier vinden om zware stelsels uit te kiezen. Uit eerder onderzoek was gebleken dat stelsels op roodverschuiving  $\sim 0.7$  (6 miljard jaar geleden) die helder infrarood licht (golflengte 15 micrometer) uitzenden zware stelsels zijn. Uiterlijk lijken deze stelsels ook op nabije spiraalstelsels. Sommige vertonen ook spiraalstructuur. Eén van de stelsels is het stelsel afgebeeld in Figuur 1. We hebben drie van deze sterrenstelsels waargenomen en de resultaten van dit werk staan beschreven in **Hoofdstuk 4**.

De waarnemingen waren succesvol voor twee van de drie stelsels. De stelsels blijken inderdaad met hoge snelheid te roteren. Twee andere groepen onderzoekers heb-

ben ook van dit soort stelsels waargenomen. Voor het bepalen van de Tully-Fisher relatie van heldere 15 micrometer stelsels op roodverschuiving  $\sim 0.7$  hebben we de resultaten van hun waarnemingen ook gebruikt. Het blijkt dat zowel de nabij-infrarode als de stellaire massa Tully-Fisher relatie 6 miljard jaar geleden inderdaad al bestonden, zoals we ook verwachtten op grond van andere onderzoeken. Vergeleken met de nabije nabij-infrarode Tully-Fisher relatie zijn deze stelsels iets minder helder bij dezelfde rotatiesnelheid, maar het verschil is niet significant. De stellaire massa Tully-Fisher relatie bestudeerden we met twee verschillende meetmethoden voor de stellaire massa. Voor beide methodes vinden we inderdaad een stellaire massa Tully-Fisher relatie. Vergeleken met spiraalstelsels in het nabije heelal hebben de 15 micrometer stelsels een kleinere stellaire massa bij dezelfde rotatiesnelheid. Echter, hoe groot het verschil is hangt af van de manier waarop de stellaire massa is bepaald. We vermoeden dat dit komt omdat het ene model meer ruimte laat voor een populatie van oude sterren, die weinig licht uitstralen maar wel een grote bijdrage doen aan de totale stellaire massa. We zullen dus meer inzicht moeten krijgen in de beste manier voor het bepalen van de stellaire massa's om precies te kunnen vaststellen hoeveel de stellaire massa Tully-Fisher evolueert. De verkregen Tully-Fisher relatie laat zien dat onze selectiemethode geschikt is voor dit type onderzoek.

Tenslotte richten we ons in **Hoofdstuk 5** op zware sterrenstelsels op roodverschuiving 2 (10 miljard jaar geleden). We selecteren nu stelsels die helder zijn bij licht met een golflengte van 24 micrometer. Dit komt neer op hetzelfde selectie criterium als voor de sterrenstelsels van Hoofdstuk 4. Daarnaast hebben we nog enkele stelsels waargenomen die voldoen aan hetzelfde selectie criterium als het stelsel van Hoofdstuk 3. In totaal hebben we acht stelsels kunnen waarnemen. Voor drie daarvan (plus het stelsel van Hoofdstuk 3) hebben we snelheidsvelden kunnen bepalen. Daarnaast hebben we nog gegevens van twee (op andere wijze geselecteerde) stelsels gebruikt die op dezelfde roodverschuiving staan en door andere onderzoekers zijn waargenomen.

In tegenstelling tot roodverschuiving 0.7, vinden we voor roodverschuiving 2 ook snelheidsvelden die erop wijzen dat de sterren zich niet in cirkelbanen om het centrum bewegen. Voor twee stelsels kunnen we het snelheidsveld voor een gedeelte van het stelsel niet bepalen omdat in die gedeeltes te weinig nieuwe sterren worden gevormd. We vinden ook geen duidelijke Tully-Fisher relaties. Dit laatste kan komen door de afwijkende snelheidsvelden en door het kleine aantal waargenomen stelsels. Het lijkt er dus op dat de Tully-Fisher relatie op roodverschuiving 2 nog niet bestaat, maar om daar zekerheid over te krijgen zijn goede waarnemingen van meer stelsels nodig.