

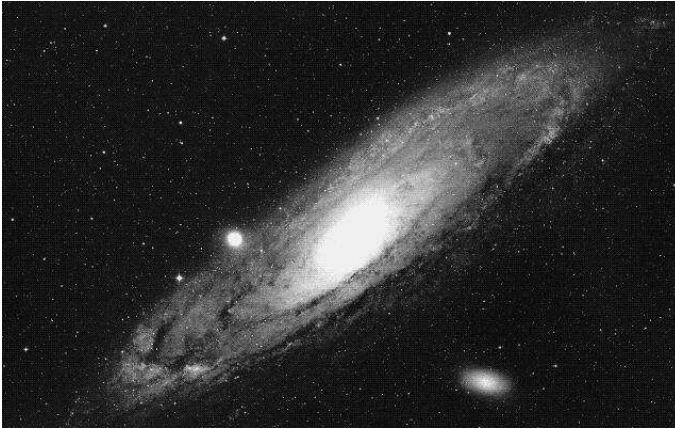
# Nederlandse Samenvatting

**H**ET doel van de sterrenkunde is het beschrijven en, op basis van natuurkundige wetten, begrijpen van het heelal. Over het algemeen lukt dat heel aardig. De levensloop van de sterren en de samenstelling en structuur van de melkweg zijn bekend. Zelfs de oorsprong van het heelal denken we te begrijpen. Maar de moderne sterrenkunde kampt met een toch wel zeer frustrerend probleem. We weten namelijk dat we zo'n 90% van alle materie in het heelal (nog) niet kunnen waarnemen. Omdat we deze materie dus niet kunnen zien, noemen we het 'donkere materie'. Ook weten we niet waaruit deze materie bestaat. In dit proefschrift proberen we bewijs te vinden voor het bestaan van één mogelijke vorm van deze mysterieuze materie.

## Het onzichtbare heelal

Het bepalen van de massa van objecten in het heelal is geen gemakkelijke opgave. Het zal duidelijk zijn dat het niet mogelijk is om bijvoorbeeld een ster op een weegschaal te leggen. Slechts in sommige gevallen is het mogelijk om een ster te 'wegen'. Het beste voorbeeld is de dichtstbijzijnde ster die er is, namelijk de zon. De aarde draait in één jaar precies één rondje om de zon. Maar een object dat in een cirkel beweegt, wil eigenlijk in een rechte lijn wegvliegen. Denk bijvoorbeeld aan de kogel die door een kogelslingeraar wordt weggeslingerd. En hoe sneller de kogel rondgeslingerd wordt, hoe groter de snelheid waarmee hij weg wil vliegen. Net als de kogel van een kogelslingeraar wil de aarde ook eigenlijk in een rechte lijn van de zon wegvliegen. De reden waarom dat niet gebeurt is dat de zon en de aarde elkaar aantrekken door middel van de zwaartekracht. De zwaartekracht is de kracht waarmee alle objecten met massa elkaar aantrekken, waarbij geldt: hoe groter de massa, hoe groter de zwaartekracht. Omdat we weten hoe ver de aarde van de zon staat en hoe lang een rondje om de zon duurt kunnen we de zwaartekracht berekenen die nodig is om te zorgen dat de aarde in zijn baan blijft, en dat geeft de massa van de zon. Deze manier van massabepaling met behulp van de bewegingen van objecten, wordt dynamische massabepaling genoemd en is in principe heel betrouwbaar.

Een andere manier van massabepaling berust op het afleiden van de massa van een object op basis van hoe het er uit ziet. Deze methode wordt vooral gebruikt voor het bepalen van de massa van melkwegstelsels en clusters van melkwegstelsels. Melkwegstelsels zijn enorme



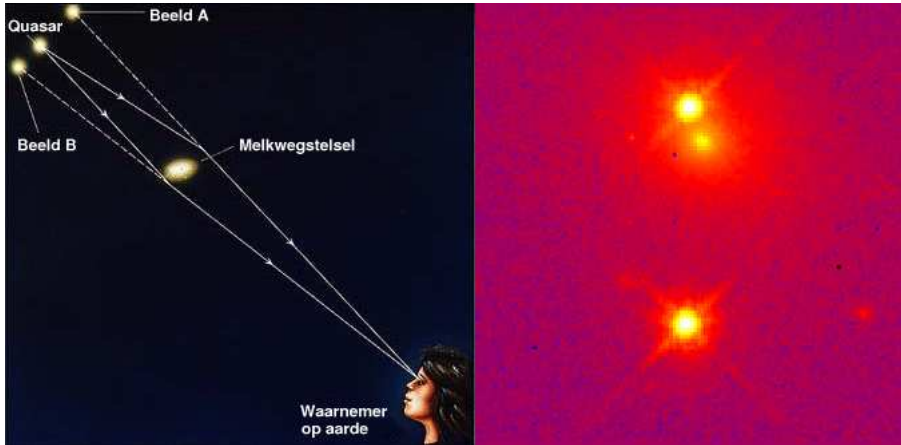
Figuur 7.1 – Het Andromeda melkwegstelsel, het dichtstbijzijnde grote melkwegstelsel. Net als onze eigen Melkweg bestaat het Andromeda stelsel uit een schijf met in het midden een bolvormige concentratie van sterren. Alle sterren, gas en stofwolken in de schijf draaien om het centrum heen.

verzamelingen van sterren, die door hun onderlinge zwaartekracht bij elkaar blijven. Zulke stelsels kunnen miljarden sterren bevatten. De Melkweg, het melkwegstelsel waarin wij ons bevinden (en alle andere sterren die 's nachts zichtbaar zijn) telt bijvoorbeeld naar schatting 100 miljard sterren. Clusters zijn weer verzamelingen van melkwegstelsels, die uit duizenden melkwegstelsels kunnen bestaan. De totale hoeveelheid licht die een melkwegstelsel uitstraalt, is de som van het licht van alle sterren en dus kan de helderheid vertaald worden naar de hoeveelheid sterren in dat stelsel. Als je dan weet hoe zwaar sterren gemiddeld zijn, kan de massa van het stelsel geschat worden. Hetzelfde principe kan gebruikt worden voor clusters.

In de dertiger jaren was de Amerikaanse sterrenkundige Zwicky de eerste die de massa van de dichtstbijzijnde cluster van melkwegstelsels bepaalde met behulp van beide methodes. Deze relatief nabije cluster is overigens nog zo ver weg dat de melkwegstelsels erin alleen met een grote telescoop zichtbaar zijn. Uit de bewegingen van de melkwegstelsels in de cluster, leidde Zwicky af dat de cluster veel zwaarder was dan uit de hoeveelheid uitgestraald licht bleek. Kennelijk bevatte de cluster een heleboel materie die geen licht uitstraalde en die we dus niet kunnen zien! En zo werd de term 'missende materie' geboren. Tegenwoordig spreken we meestal van 'donkere' materie, omdat het om materie gaat die er wel is, maar die we niet kunnen zien.

Dat niet alleen clusters zwaarder zijn dan ze lijken, maar ook melkwegstelsels zelf, werd later duidelijk. Een heleboel melkwegstelsels, inclusief onze eigen Melkweg, hebben de vorm van een spiraal. In figuur 7.1 is het Andromeda melkwegstelsel te zien, het dichtstbijzijnde grote melkwegstelsel en ook een spiraalstelsel. Alle materie, zoals sterren en gas, in deze melkwegstelsels draait rond het centrum van het stelsel, net als de aarde om de zon draait. Als je kunt meten hoe snel het stelsel draait, kun je dus de massa van het melkwegstelsel bepalen. In de jaren 80 van de twintigste eeuw werd het mogelijk om de beweging van het gas te meten met grote radiotelescopieën zoals die in Westerbork. Toen bleek dat ook melkwegstelsels veel zwaarder zijn dan ze lijken. Ook melkwegstelsels bevatten dus onzichtbare materie!

Tegenwoordig weten we dat sommige melkwegstelsels wel tien keer zoveel onzichtbare materie bevatten als zichtbare materie. In clusters van melkwegstelsels kan het wel honderd keer zoveel zijn! Er is dus veel meer materie die we *niet* zien, dan die we *wel* zien. Tot op heden is ook nog niet duidelijk wat die donkere materie is. Eén mogelijkheid is het bestaan van elementaire deeltjes die we nog niet ontdekt hebben. Theoretisch natuurkundigen



Figuur 7.2 – Links: een zwaar object als een melkwegstelsel kan als een soort lens werken. Als een melkwegstelsel precies tussen ons en een verder weg gelegen object in zit, kunnen meerdere afbeeldingen gevormd worden van het verre object. Rechts: de eerste “dubbele quasar” die werd ontdekt, in 1979. De twee helderste objecten zijn twee afbeeldingen van dezelfde quasar (Q0957+561). De quasar is een enorm helder object dat heel ver weg staat, veel verder dan het melkwegstelsel, het zwakkere, meer uitgespreide object. Bron: Falco et al. (CASTLE), NASA.

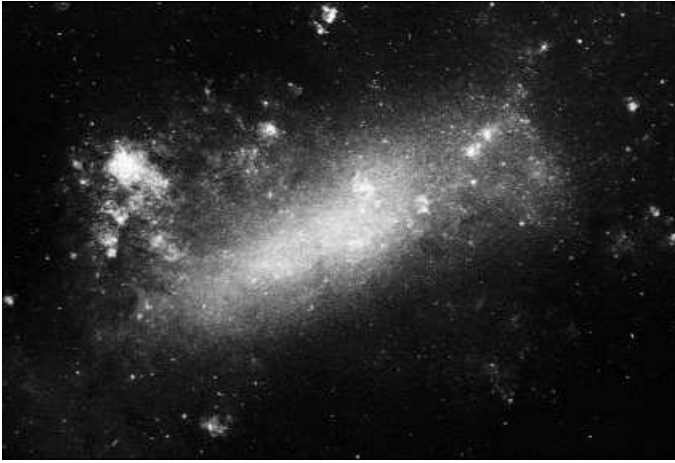
zijn met grote deeltjesversnellers druk op zoek naar deze zogenaamde ‘exotische’ deeltjes. Een andere, meer sterrenkundige, mogelijkheid is de aanwezigheid van een grote hoeveelheid compacte objecten die weinig of geen licht uitstralen. Dit zouden zwarte gaten kunnen zijn, of de restanten van heel oude, gestorven sterren. Er is ook geopperd dat de donkere materie helemaal niet bestaat, maar dat de zwaartekrachtswetten van Newton en de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein wellicht aangepast moeten worden.

Voor dit proefschrift hebben we onderzoek gedaan naar de meest sterrenkundige optie, namelijk het bestaan van een grote hoeveelheid donkere, compacte objecten. Omdat over het algemeen wordt aangenomen dat de donkere materie zich in een soort halo rondom een melkwegstelsel bevindt, worden deze objecten Massieve Astrofysische Compacte Halo Objecten (MACHO’s) genoemd. Ondanks dat de MACHO’s (vrijwel) geen licht uitstralen, kunnen we ze toch waarnemen door middel van het zogenaamde *gravitatielenseffect*.

## Zwaartekracht als telescoop

Dat lichtstralen afgebogen of gereflecteerd kunnen worden door bijvoorbeeld lenzen en spiegels, weet eigenlijk iedereen. Maar heel zware objecten in de ruimte blijken ook lichtstralen af te buigen door hun zwaartekracht. “Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its rays?” vroeg Isaac Newton (1642-1727) zich in 1704 in zijn boek “Opticks” al af. Voor de juiste berekening van dit effect zijn Newtons zwaartekrachtswetten echter niet voldoende, daarvoor is Einsteins Algemene Relativiteitstheorie nodig. Objecten die door hun zwaartekracht het pad van lichtstralen meetbaar beïnvloeden, worden *gravitatielenzen* genoemd.

In 1919 werd dit effect voor het eerst gemeten tijdens een zonsverduistering. Albert



Figuur 7.3 – De Grote Magellaanse Wolk is een zogenaamd dwergmelkwegstelsel, vlakbij de Melkweg. Ondanks dat het klein is voor een melkwegstelsel, bevat het nog altijd honderden miljoenen sterren. Het is relatief gemakkelijk om veel sterren in de Grote Magellaanse Wolk te monitoren en zo naar microlenzen te zoeken.

Einstein (1879-1955) had voorspeld dat de zon zwaar genoeg moest zijn om een lichtstraal die vlak langs de zon gaat zoveel af te buigen dat het gemeten kon worden. Omdat normaal gesproken de sterren niet zichtbaar zijn als de zon schijnt, zette Arthur Eddington (1882-1944) een expeditie op touw om tijdens een zonsverduistering de positie van een ster te bepalen die vlak naast de zon aan de hemel stond. Inderdaad bleek de ster iets verschoven te zijn ten opzichte van zijn normale positie!

De zon kan dus als gravitatielenzen optreden, maar zwaardere gravitatielenzen kunnen veel spectaculairdere effecten geven. Het heeft echter tot 1979 geduurd voordat de eerste *sterke gravitatielenzen* ontdekt werd. In figuur 7.2 is dit systeem te zien, waarin een melkwegstelsel het licht van een achterliggende quasi-ster (quasar) zo vervormt, dat er twee afbeeldingen van gevormd worden. Tegenwoordig zijn er vele gevallen bekend waar melkwegstelsels en clusters van melkwegstelsels sterke gravitatielenzen veroorzaken. Een belangrijke toepassing is het 'wegen' van de melkwegstelsels en clusters door de sterkte te meten van het gravitatielenzeneffect dat ze veroorzaken.

Een speciaal geval van gravitatielenzen wordt gevormd door sterren die een achterliggend object dubbel afbeelden. Want ondanks dat sterren veel minder zwaar zijn dan melkwegstelsels, kunnen ze toch een sterk gravitatielenzeneffect hebben. De omstandigheden moeten echter wel heel uitzonderlijk zijn: de ster en het achterliggende object moeten heel precies achter elkaar liggen en de afstand tussen ons en de ster moet veel groter zijn dan tussen ons en de zon. Maar omdat een ster veel minder zwaar is dan een melkwegstelsel, is het gravitatielenzeneffect veel zwakker, waardoor de twee afbeeldingen veel dicht bij elkaar staan dan in figuur 7.2. De beelden staan zelfs zo dicht bij elkaar dat we ze niet apart kunnen zien, zelfs niet met de grootste telescopen. Daardoor zien we dus nog steeds maar één beeld, maar wel één dat helderder is geworden, omdat het licht versterkt wordt. Deze speciale gevallen van gravitatielenzen worden *microlenzen* genoemd, omdat een relatief klein object als een ster als de lens fungeert.

## MACHO's als microlenzen

Zoals eerder opgemerkt, zou (een deel van) de donkere materie uit compacte, donkere objecten kunnen bestaan. Deze zogenaamde MACHO's zouden zich dan in halo's rond melkwegstelsels bevinden, maar doordat ze geen of vrijwel geen licht uitstralen niet te zien zijn. Maar als zo'n MACHO precies voor een verder weg gelegen ster staat, zal hij door zijn zwaartekracht als *microlens* fungeren en het licht van de ster versterken. In de jaren 80 realiseerden sterrenkundigen zich dat dankzij dit effect deze anders onzichtbare MACHO's indirect toch gedetecteerd zouden kunnen worden.

Alle sterren en andere objecten in het heelal zijn constant in beweging, al is dit meestal niet te zien door de enorme afstanden. Daarom is het microlenseffect tijdelijk. Als een zwaar object als een MACHO precies voor een ster staat en het licht van die ster versterkt, duurt dat niet lang, omdat beide in beweging zijn. Omdat de lichtversterking groter is als de uitlijning preciezer is, lijkt de helderheid van de verre ster te veranderen. Als de ster en de lens dichter bij elkaar komen, neemt de helderheid van de ster toe en daarna neemt de helderheid weer af als ze weer van elkaar af bewegen.

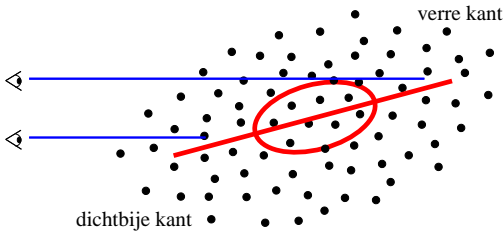
De kans dat we een microlens zien is heel klein, omdat de uitlijning zo ontzettend precies moet zijn. Om toch een redelijke kans te hebben om het te zien, moeten een heleboel sterren tegelijk in de gaten gehouden worden. Gelukkig is er een plek aan de hemel, die ideaal is voor het detecteren van microlenzen veroorzaakt door MACHO's, namelijk twee kleine melkwegstelseltjes die in een baan rond de Melkweg draaien. Ze zijn vanaf het zuidelijk halfrond te zien en lijken wel wat op wolken als ze 's nachts aan de hemel staan, vandaar hun namen, de Kleine en Grote Magellaanse Wolk. In figuur 7.3 is de grootste van de twee te zien. De sterren in de Magellaanse Wolken staan heel dicht bij elkaar aan de hemel en zijn daarom relatief gemakkelijk tegelijk in de gaten te houden met een telescoop. Bovendien zitten er tussen ons en de Magellaanse Wolken erg weinig sterren. Als we een microlens zien in één van de Magellaanse Wolken, is de kans dus groot dat het veroorzaakt wordt door een MACHO die zich in de halo rond de Melkweg bevindt.

Twee groepen onderzoekers hebben jarenlang de helderheid van miljoenen sterren in de Magellaanse Wolken gemeten. De oogst bestaat uit een dertigtal microlenzen. Een eenduidige conclusie over de hoeveelheid MACHO's is er helaas nog niet. Eén van de problemen is dat een microlenseffect ook veroorzaakt kan worden doordat twee sterren in de Magellaanse Wolken voor elkaar langs bewegen. Als alle waargenomen microlenzen veroorzaakt zijn door MACHO's, bestaat ongeveer 20% van de donkere materie in de Melkweg uit kleine, compacte objecten. Als een deel van de microlenzen eigenlijk sterren in de Magellaanse Wolken zijn, is het echter minder.

## Hoe Andromeda helpt

Voor een definitief antwoord op de vraag of (en zo ja, hoeveel) donkere materie uit MACHO's bestaat, zijn de Magellaanse Wolken dus niet genoeg. Gelukkig zijn er meer mogelijkheden. Het Andromeda spiraalstelsel (figuur 7.1) is het dichtstbijzijnde grote melkwegstelsel en de sterren in dit stelsel kunnen we ook gebruiken om microlenzen te detecteren. Behalve dat objecten in de halo van onze eigen Melkweg als microlens kunnen optreden, heeft het Andromeda stelsel zelf ook een donkere materie halo waarin zich MACHO's kunnen bevinden.

Natuurlijk kunnen sterren in het Andromeda stelsel ook als microlens optreden, net als in de Magellaanse wolken. Maar toch zouden we het duidelijk moeten zien als MACHO's



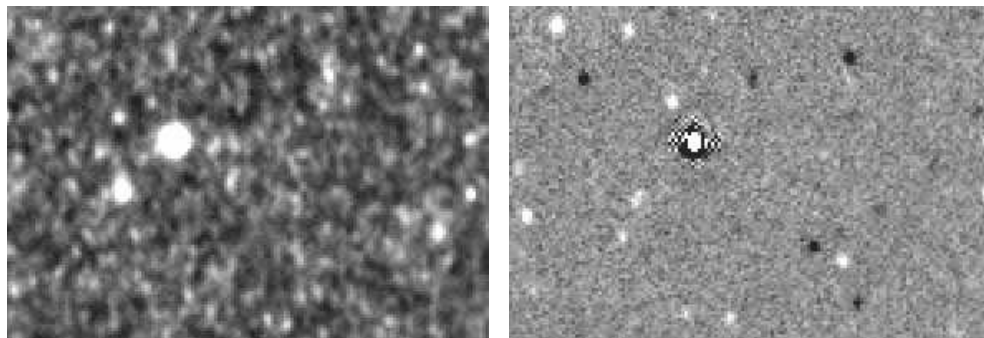
Figuur 7.4 – De hoek tussen de loodlijn op de schijf van het Andromeda melkwegstelsel en onze gezichtslijn naar het stelsel is zo'n 80 graden. Hierdoor kijken we door veel meer halo heen als we naar de verre kant van de schijf kijken dan als we naar de dichtbije kant kijken. Als de halo echt uit MACHO's bestaat, zullen we aan de verre kant veel meer microlenzen zien.

veel microlenzen veroorzaken. Dit komt doordat we onder een hoek van ongeveer 80 graden naar de schijf van het Andromeda stelsel kijken. Het volgende argument wordt geïllustreerd in figuur 7.4. Als rond het Andromeda stelsel een halo vol MACHO's zit, dan is de kans dat er één precies voor een ster staat veel groter als we naar de verre kant van de schijf kijken dan als we naar de nabije kant kijken. De hoeveelheid microlenzen veroorzaakt door sterren is hetzelfde aan beide kanten, maar de MACHO's zullen aan de verre kant veel meer microlenzen veroorzaken dan aan de nabije kant. Als de verdeling van microlenzen dus asymmetrisch is, met veel meer microlenzen aan de verre kant dan aan de nabije kant, dan is dat dus een teken van de aanwezigheid van donkere materie in de vorm van MACHO's.

Er is echter een praktisch probleem met het detecteren van microlenzen in Andromeda. Het mag dan het dichtstbijzijnde grote melkwegstelsel zijn, maar desondanks is het ontzettend ver weg. Zo doet het licht dat de sterren in Andromeda uitstralen er zo'n 2,5 miljoen jaar over om ons te bereiken. Door deze grote afstand staan de sterren in Andromeda zo dicht bij elkaar aan de hemel dat we ze niet afzonderlijk kunnen onderscheiden, en dus ook niet de helderheid van individuele sterren kunnen meten. Er is echter een methode om in de brei van sterren in Andromeda sterren te detecteren en te monitoren die van helderheid veranderen.

De methode berust op een heel simpel idee, namelijk het van elkaar aftrekken van twee foto's. Aangezien grote telescopen tegenwoordig zijn uitgerust met digitale camera's is het vrij eenvoudig om met de computer twee foto's van elkaar af te trekken. Als de twee foto's identiek zijn, blijft er niks over, maar als de foto's verschillend zijn natuurlijk wel. Om microlenzen te detecteren hebben we daarom jarenlang foto's gemaakt van dezelfde twee gebieden in Andromeda. Door van die foto's steeds eenzelfde referentiefoto af te trekken, houden we foto's over die alleen wat ruis bevatten, behalve op plaatsen waar een ster van helderheid is veranderd ten opzichte van de referentiefoto. Op die plaatsen blijft een zogenaamd residu over en door de helderheid van zo'n residu te meten, weten we hoeveel de ster in kwestie van helderheid veranderd is. Door de gemeten helderheid in een grafiek uit te zetten tegen de tijd, maken we zogenaamde "lichtkrommes", die we kunnen gebruiken om de grootte van de helderheidsveranderingen en de manier waarop dit gebeurt gemakkelijk te analyseren. Natuurlijk is deze methode in de praktijk niet zo eenvoudig als het op het eerste gezicht lijkt. De foto's zijn namelijk nooit precies hetzelfde, zelfs al zouden alle sterren dat wel zijn. Er zijn namelijk een heleboel effecten die te maken hebben met de telescoop en de atmosfeer die de foto's beïnvloeden en waarvoor gecorrigeerd moet worden. Dat de methode toch werkt, is te zien in figuur 7.5.

Een ander "probleem" is dat vrijwel alle sterren die in helderheid veranderen geen microlenzen zijn, maar sterren die van zichzelf variabel zijn. Deze sterren worden, niet geheel



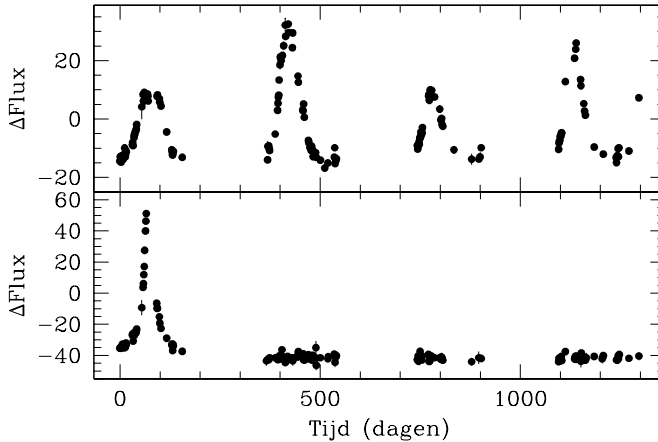
Figuur 7.5 – Links: een heel klein deel van een foto van Andromeda. Alleen de helderste sterren zijn echt te onderscheiden. Rechts: dezelfde foto als links, nadat de referentiefoto ervan is afgetrokken. Wat resteert is ruis, met lichte en donkere residuen waar sterren helderder, respectievelijk zwakker zijn dan in de referentiefoto. Voor heel heldere sterren, zoals de helderste in dit voorbeeld (eigenlijk een voorgrondster in onze eigen Melkweg) werkt de methode niet goed en blijft troep zitten.

verrassend, variabele sterren genoemd. Deze sterren zijn zelf ook heel interessant en vormen dus een mooi bijproduct van dit onderzoek. Het maakt het echter wel moeilijk om tussen al die variabele sterren de microlenzen te vinden. De manier waarop we dat doen berust hoofdzakelijk op het feit dat in het geval van microlenzen de ster maar één keer van helderheid verandert en bovendien op een heel specifieke manier. Variabele sterren veranderen daarentegen voortdurend van helderheid. In figuur 7.6 laten we twee lichtkrommes zien, één van een microlens en één van een variabele ster.

## Dit proefschrift

Met het onderzoek in dit proefschrift hebben we geprobeerd om microlenzen in het Andromeda melkwegstelsel te detecteren om zo te kijken of een aanzienlijke hoeveelheid van de donkere materie in compacte objecten opgesloten zit. Hoofdstuk 1 is een wetenschappelijke introductie over donkere materie, gravitatielenzen en het detecteren van microlenzen in Andromeda en volgt in grote lijnen de voorgaande pagina's. In hoofdstuk 2 worden de gebruikte data beschreven en worden de methodes die gebruikt zijn om deze te analyseren in detail beschreven.

Hoofdstuk 3 is het resultaat van de analyse van de data die we gedurende twee jaar verzameld hebben met de Isaac Newton Telescoop op La Palma. Deze analyse resulteerde in de detectie van 14 mogelijke microlenzen. Er waren aanwijzingen dat de microlenzen meer aan de verre kant van de schijf voorkomen dan aan de nabije kant, wat een teken is dat er MACHO's in de halo van Andromeda zitten. Helaas is dit aantal microlenzen vrij klein en bovendien waren we op het moment dat we dit hoofdstuk als wetenschappelijk artikel publiceerden nog niet zover dat we een gedetailleerde analyse met modelberekeningen konden doen, zodat het nog niet mogelijk was om een duidelijke conclusie te trekken. De belangrijkste conclusie van hoofdstuk 3 was dan ook dat onze methode in principe werkt en dat we microlenzen kunnen detecteren, maar dat we meer data moeten gebruiken en onze methode moeten perfectioneren om duidelijke resultaten te krijgen.



Figuur 7.6 – Twee “lichtkrommes”: de helderheid van een ster uitgezet tegen de tijd. De bovenste lichtkromme is van een variabele ster die periodiek van helderheid verandert. De onderste lichtkromme is van een microlens, die maar één keer piekt en verder constant blijft.

Zoals eerder opgemerkt zijn er een heleboel sterren die uit zichzelf van helderheid veranderen. In hoofdstuk 4 bestuderen we deze variabele sterren in meer detail. De meeste variabele sterren worden in een vast ritme helderder en zwakker en de tijd tussen twee opeenvolgende pieken in helderheid noemen we de “periode” van de variabele ster. Door te kijken naar de periode, de grootte van de helderheidsveranderingen en de vorm van de lichtkromme kunnen we variabele sterren classificeren in verschillende soorten. In hoofdstuk 4 laten we zien dat onze data van meer dan voldoende kwaliteit zijn om de belangrijkste klassen van variabele sterren te herkennen. We kunnen ook zien waar de variabele sterren zich in Andromeda bevinden. Er werd altijd aangenomen dat de hoeveelheid variabele sterren aan de verre en de nabije kant van de schijf hetzelfde zou zijn. Dit blijkt echter niet zo te zijn: aan de verre kant zien we meer dan aan de nabije kant. Dit is een groot probleem, want het betekent dat als we meer microlenzen zien aan de verre kant van de schijf, dit misschien niet wordt veroorzaakt door MACHO’s, maar doordat er meer sterren zijn aan de verre kant waarvan het licht versterkt kan worden! Maar deze asymmetrie in de verdeling van de variabele sterren wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt doordat grote stofwolken in Andromeda het licht van achterliggende sterren verzwakken, waardoor we ze niet zien. Als we op de juiste manier met dit effect van het stof rekening kunnen houden, hoeft het geen onoverkomelijk probleem te zijn.

Het belangrijkste hoofdstuk in dit proefschrift is hoofdstuk 5. Hierin analyseren we de volledige verzameling waarnemingen die we gedurende vier jaar hebben gedaan met de Isaac Newton Telescoop. Net als in hoofdstuk 3 resulteerde dit in 14 mogelijke microlenzen, maar dit is toeval, want het zijn niet allemaal dezelfde. Van de 14 eerder gevonden kandidaten, bleken er 4 toch variabele sterren te zijn toen we ze met deze grotere data set bestudeerden. Ook vonden we 4 nieuwe kandidaten. Door kunstmatige microlenzen in de foto’s van Andromeda te stoppen en te kijken hoeveel ervan we detecteren met onze analysemethodes, hebben we bepaald hoe gevoelig onze methode voor het detecteren van microlenzen is. Dit maakte het mogelijk om onze resultaten te vergelijken met modelvoorspellingen, waarin we onder andere ook rekening houden met het effect van stof. Van de 14 mogelijke microlenzen zitten er inderdaad veel meer aan de verre kant dan aan de nabije kant, maar volgens de modelberekeningen veroorzaakt het stof ook zo’n asymmetrie. Uit onze analyse blijkt dat er geen



MACHO's nodig zijn om het aantal door ons gevonden microlenzen te verklaren. Om de asymmetrie in de verdeling van de microlenzen te verklaren hoeven we waarschijnlijk ook geen beroep te doen op de aanwezigheid van MACHO's. Onze conclusie is dus dat we geen bewijs hebben gevonden voor het bestaan van MACHO's in de halo van Andromeda.

Tenslotte kijken we in hoofdstuk 6 naar de mogelijkheid om microlenzen te detecteren in het melkwegstelsel Centaurus A, dat nog veel verder weg staat dan Andromeda. Gebruik makend van onze foto's van Andromeda simuleren we hoe deze foto's eruit zouden zien als Andromeda net zo ver weg zou staan als Centaurus A, vijf keer zo ver. Onze methode blijkt nog steeds te werken, maar alleen bijzonder heldere microlenzen zouden te zien zijn. Onze conclusie is dan ook, dat het alleen de moeite waard is om dit te doen met hele grote telescopen, of een telescoop in de ruimte, zoals de Hubble ruimtetelescoop.

## Conclusies

Dat wetenschappelijk onderzoek meestal meer vragen oplevert dan beantwoordt, is een cliché. Maar ook in het geval van dit proefschrift zijn er tijdens de duur van het onderzoek veel nieuwe problemen ontdekt en nieuwe mogelijkheden voor meer onderzoek blootgelegd. Het probleem van het effect van stof op de waargenomen verdeling van variabele sterren en ook van microlenzen is een goed voorbeeld. En de variabele sterren zelf vormen weer een enorme informatiebron voor verder onderzoek.

Toch kan de centrale vraag van dit proefschrift nu wel degelijk beantwoord worden. Dankzij dit microlensproject weten we nu dat de bijdrage van donkere, compacte objecten aan de donkere materie klein is. Onze resultaten laten ruimte voor een kleine hoeveelheid van deze MACHO's in Andromeda, maar het is duidelijk dat MACHO's niet de oplossing zijn voor het mysterie van de donkere materie. Dit betekent natuurlijk wel dat de vraag wat de donkere materie dan wél is, nog steeds open is.

