

University of Groningen

Gravitational lenses as probes of dark matter

Breimer, Tibert Gerwin

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1993

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Breimer, T. G. (1993). *Gravitational lenses as probes of dark matter*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting in het Nederlands

In deze Nederlandse samenvatting zal ik voor degenen, die niet vertrouwd zijn met de Natuurkunde, heel beknopt uitleggen waar dit proefschrift over gaat. In de inleiding behandel ik bondig een aantal simpele begrippen, waarvan kennis noodzakelijk is voor het begrijpen van de inhoud van de samenvatting. Vervolgens zal ik trachten uit te leggen wat het grote probleem is waarvoor men een oplossing zoekt. Uiteindelijk beland ik dan bij het natuurkundige verschijnsel, het zogenaamde gravitationele lenseffect, dat in dit proefschrift gebruikt zal worden ten einde dat probleem op te lossen.

1 Inleiding

Wie op een zeer heldere avond naar de hemel kijkt, zal het opvallen dat er naast de sterren ook een band van zwak licht zichtbaar is. Dit licht is afkomstig van de Melkweg. De Melkweg is de verzameling van sterren waarin wij ons bevinden. Studie van de verdeling van deze sterren heeft ons geleerd dat ze verdeeld zijn in een plat vlak. De Melkweg lijkt dan ook nog het meest op een zeer platte schijf. Aangezien wij ons ergens in die schijf bevinden, vertoont de Melkweg zich aan ons als een band aan de hemel. De Melkweg bevat zo'n 100 miljard sterren, waar de zon er één van is. De Melkweg is niet het enige sterrenstelsel dat wij kennen. Wij weten inmiddels dat er miljarden van dit soort sterrenstelsels in het Heelal zijn. Ofschoon deze sterrenstelsels op immens grote afstanden van ons staan, zijn we in de loop der tijd toch heel wat over ze te weten gekomen. Het feit dat deze sterrenstelsels, in tegenstelling tot onze eigen Melkweg, van allerlei kanten kunnen worden waargenomen heeft hierbij een belangrijke rol gespeeld. Zo hebben sterrenstelsels die wij van bovenaf kunnen bekijken, ons geleerd dat het licht meestal geconcentreerd is in spiraalarmen. Dit is de reden waarom sterrenstelsels met een platte schijf spiraalstelsels worden genoemd. Uit studies van spiraalstelsels die wij van de zijkant kunnen bekijken, weten we dat de sterren (zeer waarschijnlijk onder invloed van de zwaartekracht) rond het centrum van de schijf draaien. Uit onderzoek naar voor onze ogen niet zichtbaar "licht", zoals infrarode straling en radiostraling, is gebleken dat spiraalstelsels niet alleen sterren bevatten, maar ook veel gas en stof. Dit gas en stof wordt meestal aangetroffen in de vorm van wolken. Door samentrekking

onder invloed van de zwaartekracht ontstaan er uit deze wolken van gas en stof nieuwe sterren.

Naast het spiraalstelsel blijkt er nog een geheel ander type sterrenstelsel te bestaan. Aan de hemel zien deze er uit als ellipsen, vandaar dat ze elliptische sterrenstelsels worden genoemd. We weten nu dat in tegenstelling tot spiraalstelsels deze elliptische sterrenstelsels niet afgeplat zijn tot een schijf, maar dat de sterren verdeeld zijn in drie richtingen. Ze blijken, een enkele uitzondering daargelaten, weinig gas en stof te bevatten. Als gevolg van die afwezigheid van gas en stof worden er in deze elliptische sterrenstelsels vrijwel geen nieuwe sterren meer gevormd.

Het blijkt dat niet alleen de sterren zijn samengeklonterd tot sterrenstelsels, maar dat ook de sterrenstelsels zelf weer samenklonteren tot groepen van sterrenstelsels. Het aantal sterrenstelsels in zulke groepen kan variëren van twee tot enkele duizenden. Wanneer er meer dan 50 sterrenstelsels zijn samengeklonterd spreekt men van een cluster van sterrenstelsels. De meeste sterrenstelsels in grote clusters zijn elliptisch.

Ik heb reeds verteld, dat in spiraalstelsels het gas en de sterren rondom het centrum roteren. Door bestudering van de straling afkomstig van die sterren en dat gas, vooral het waterstofgas speelt hierbij een belangrijke rol, kan men de snelheden meten waarmee de materie rondom het centrum roteert. Door nu voor een groot aantal posities in het sterrenstelsel de snelheden te meten kan men de snelheden in kaart brengen. Met behulp van de natuurkunde (de wetten van Newton) kan dan de totale massa en de verdeling ervan bepaald worden. De op deze manier afgeleide massa's van spiraalstelsels blijken veel groter te zijn, dan men zou verwachten op basis van de hoeveelheid waargenomen licht. Men neemt nu aan dat dit veroorzaakt wordt doordat er zich in de spiraalstelsels een massa component bevindt die wij niet direkt kunnen waarnemen. Deze massa wordt meestal aangeduid met de term donkere materie, een term voor het eerst gebruikt door J.C. Kapteyn in 1922. In feite is de naam donkere materie onjuist, men zou beter kunnen spreken van onzichtbare materie. We weten nu dat de donkere materie in spiraalstelsels zich vooral in de buitengebieden bevindt.

In elliptische sterrenstelsels is het niet zo gemakkelijk om het al dan niet aanwezig zijn van donkere materie te bepalen. Ten eerste roteren de sterren niet om het centrum van het sterrenstelsel, maar bewegen ze kris-kras door elkaar. Met behulp van deze kris-kras snelheden kan men echter alleen de hoeveelheid materie bepalen in de binnengebieden, waar er net als in spiraalstelsels weinig donkere materie aanwezig blijkt te zijn. Wat betreft de aanwezigheid van donkere materie in de buitengebieden van elliptische sterrenstelsels leveren de kris-kras snelheden ons nauwelijks informatie. Belangrijker is echter nog dat, zoals wij reeds zagen, er geen gas in elliptische sterrenstelsels is. De afwezigheid van gas maakt het onmogelijk om een betrouwbare bepaling van de totale massa's van elliptische sterrenstelsels te doen. Over de aanwezigheid van donkere materie in de buitengebieden van elliptische sterrenstelsels is dan ook nagenoeg niets bekend.

In clusters is de situatie iets minder gecompliceerd. De sterrenstelsels in een cluster bewegen, net als de sterren in een elliptisch sterrenstelsel, kris-kras door elkaar. Echter in tegenstelling tot elliptische sterrenstelsels kan voor clusters uit deze kris-kras snelheden wel de totale massa bepaald worden. Hieruit is gebleken dat er zich in

deze clusters enorm veel donkere materie moet bevinden. Er is echter nog zeer weinig bekend over de verdeling van deze donkere materie. Men weet dus niet of de donkere materie gekoppeld is aan de individuele sterrenstelsels of dat zij over de gehele cluster verdeeld is.

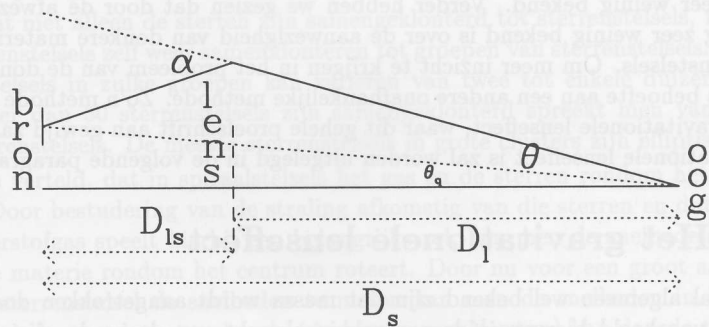
Uit het bovenstaande zal het duidelijk zijn geworden, dat er zich in spiraalstelsels en clusters van sterrenstelsels veel meer materie bevindt dan wij direkt kunnen waarnemen. Deze onzichtbare materie hebben we donkere materie genoemd. Wat betreft de spiraalstelsels hebben we inmiddels enig inzicht gekregen in de verdeling van die donkere materie. Daarentegen is over de verdeling van de donkere materie in clusters nog zeer weinig bekend. Verder hebben we gezien dat door de afwezigheid van gas er nog zeer weinig bekend is over de aanwezigheid van donkere materie in elliptische sterrenstelsels. Om meer inzicht te krijgen in het probleem van de donkere materie is er dus behoefte aan een andere onafhankelijke methode. Zo'n methode is bijvoorbeeld het gravitationele lenseffect, waar dit gehele proefschrift aan gewijd zal zijn. Wat het gravitationele lenseffect is zal worden uitgelegd in de volgende paragraaf.

2 Het gravitationele lenseffect

Het zal algemeen wel bekend zijn dat massa wordt aangetrokken door massa. Het beste voorbeeld hiervan is de aantrekkingskracht van de aarde, die er bijvoorbeeld voor zorgt dat een omhoog gegooide bal weer op de grond terecht komt. Wat echter minder bekend zal zijn, is dat ook licht door massa wordt aangetrokken. Het gevolg is dat lichtstralen door de aantrekkende massa kunnen worden afgebogen, waardoor het licht uit een andere richting lijkt te komen. Deze richtingsverandering van lichtstralen lijkt veel op het principe van een glazen lens, maar er is een belangrijk verschil. Bij een glazen lens, zoals een loep, ligt de oorzaak in de breking van het licht aan het oppervlak van de lens waar het licht overgaat van het ene medium (glas) naar het andere medium (lucht). Bij de buiging van het licht door een massa is de oorzaak echter de gravitatiekracht (synoniem voor zwaartekracht) en daarom spreekt men van een gravitatielens. Het verschil tussen een gewone glazen lens en een gravitatielens zit hem dus eigenlijk alleen in de oorzaak van de afbuiging van de lichtstralen.

In het dagelijks leven merken we niets van het gravitationele lenseffect. Dit komt doordat de massa's van aardse objecten veel te klein zijn om waarneembare effecten te kunnen veroorzaken. Anders wordt dit echter voor hemellichamen, zoals sterren, sterrenstelsels en clusters. Deze hebben dusdanig grote massa's dat ze merkbare gevolgen kunnen hebben voor bronnen die zich achter zulke zware objecten bevinden. Figuur 1 illustreert ter verduidelijking wat er precies gebeurt.

De afbuigingshoek, in figuur 1 aangeduid met α , werd door Einstein in het begin van de twintigste eeuw berekend met behulp van de door hem ontwikkelde relativiteitstheorie. In 1919 kon tijdens een zonsverduistering zijn berekende waarde getest worden. Door de verplaatsing te meten van sterren die zich achter de zon bevonden kon men namelijk de afbuigingshoek meten. Deze bleken nauwkeurig overeen te komen met de door Einstein voorspelde waarde. Men kan dus zeggen dat het gravitationele lenseffect voor het eerst is waargenomen in 1919.



Figuur 1: Het gravitationele lenseffect. Lichtstralen van een ver weg gelegen bron worden door de gravitatiekracht van een object (de lens), dat zich tussen ons en de bron bevindt, afgebogen. Als de lens niet aanwezig zou zijn geweest, zou de bron worden waargenomen in de richting θ_q (het licht zou de stippellijn hebben gevolgd). Het licht wordt echter afgebogen onder een hoek α , waardoor de bron wordt waargenomen in de richting θ (het licht volgt de doorgetrokken lijn). D_s is de afstand van de waarnemer tot de bron, D_l is de afstand van de waarnemer tot de lens en D_{ls} is de afstand van de lens tot de bron.

Reeds in 1964 had men beredeneerd dat het theoretisch mogelijk moest zijn, dat er als gevolg van het gravitationele lenseffect dubbele afbeeldingen kunnen ontstaan van één en dezelfde achtergrondbron. Dit zal gebeuren in het geval de achtergrondbron zich vrijwel precies achter de voorgrondbron (de lens) bevindt. Men realiseerde zich echter al snel, dat de kans op zo'n toevallige samenloop van omstandigheden wel

bijzonder klein is. Zo klein zelfs, dat men betwijfelde of dit verschijnsel ooit zou kunnen worden waargenomen. Speurtochten leverden dan ook steeds niets op. In 1979 kwam echter de doorbraak, toen een ver weg gelegen bron, een zogenaamde quasar, een begeleider bleek te bezitten, die identiek bleek te zijn aan de quasar zelf. Toen uit later onderzoek aan het licht van deze begeleider bleek, dat deze zich op precies dezelfde afstand bevond als de quasar, begon men te vermoeden dat het hier om een gravitatielens kon gaan. Toen later ook nog eens een sterrenstelsel werd gevonden, dat zich tussen ons en de quasar bleek te bevinden, en dus geïnterpreteerd werd als de lens, wist men het zeker: de eerste gravitatielens was gevonden. Het mooie van deze dubbele quasar is dat hij variabel is, dat wil zeggen dat zijn intensiteit verandert met de tijd. Aangezien het licht van afbeelding A een andere weg heeft doorlopen dan het licht van afbeelding B, zal een veranderde intensiteit van de quasar eerst in de ene afbeelding worden waargenomen en vervolgens pas in de andere. Dit komt doordat de weglengte van de ene lichtstraal langer is dan die van de andere. Dit is nu ook precies wat er in de dubbele quasar wordt waargenomen. Alle veranderingen in de ene afbeelding bleken zich na verloop van tijd te herhalen in de andere afbeelding, wederom een bewijs leverend voor de lensinterpretatie. Voor deze dubbele quasar, inmiddels zeer befaamd geworden onder de naam QSO0957+561, is het waargenomen tijdsverschil bepaald op 1 jaar en ongeveer 1 maand.

Inmiddels zijn er meerdere systemen gevonden, waarvan men denkt dat er sprake is van dubbele of zelfs viervoudige afbeeldingen van één en dezelfde quasar. Van deze laatste categorie is het Einsteinkruis verreweg de bekendste: als gevolg van de lensende werking van een spiraalstelsel vormen 4 afbeeldingen van één quasar in combinatie met het voorgrondstelsel een kruis. De vraag dringt zich op wat het belang is van dit soort waarnemingen? Het antwoord op deze vraag schuilt in het feit dat men de posities van de afbeeldingen kan narekenen. Met een duur woord heet dat simuleren of modelleren. Met behulp van dit soort simulaties kan men meer te weten komen over de massa en de verdeling ervan in de lens.

Quasars zien wij als puntbronnen, dat wil zeggen dat de bron zo klein is dat wij hem als een punt aan de hemel waarnemen. Er zijn echter ook bronnen bekend, waarin wij wel structuur kunnen zien. Als zo'n bron zich precies achter de lens bevindt, dat wil zeggen dat geprojecteerd aan de hemel de lens en de bron elkaar overlappen, dan zal ieder punt van die bron dubbel worden afgebeeld: één punt aan de ene kant ten opzichte van de lens en één punt aan de andere kant. Gezamenlijk vormen die punten een ring. Einstein had reeds in 1936 dit verschijnsel voorspeld, vandaar dat zo'n ring dan ook Einsteinring wordt genoemd. Net als bij de vorming van dubbele beelden van een quasar, is de kans op de vorming van een Einsteinring bijzonder klein. Zoals de eerste dubbelquasar toevallig gevonden is, zo is ook de eerste Einsteinring min of meer toevallig ontdekt. In 1988 vond men met een Amerikaanse radiotelescoop een eigenaardig ringvormig object waarvoor men in eerste instantie geen fysische interpretatie kon vinden. Al snel vermoedde men dat het hier om een Einsteinring kon gaan. Dit vermoeden werd bevestigd toen men binnen de ring een sterrenstelsel ontdekte, waarvan men nu aanneemt dat het de lens is. Accurate modellen hebben inmiddels bevestigd dat dit inderdaad het geval moet zijn. Ook deze Einsteinringen leveren ons

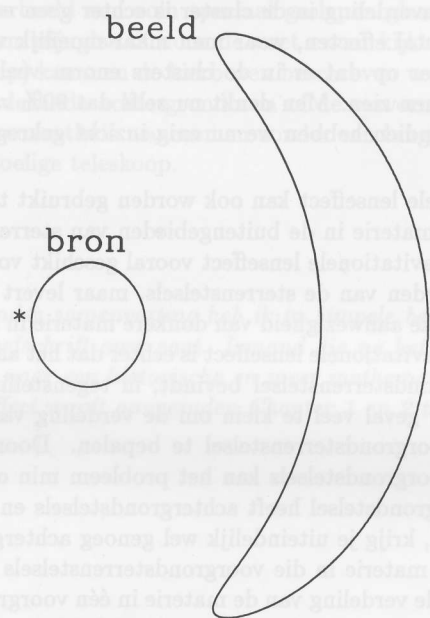
informatie op over de massa en de verdeling ervan in de lens.

In 1986 werd er in een cluster van sterrenstelsels (met de naam A370) een zwak zeer langgerekt object waargenomen. Aanvankelijk wist men niet met wat voor soort verschijnsel men te doen had. Toen echter bleek dat het object zich op een veel grotere afstand bevond dan de cluster zelf, was men er snel uit. Wat er precies gebeurt is schematisch geschetst in figuur 2. Een achtergrondbron, die zich vrijwel precies achter het centrum van een cluster bevindt, zal ten gevolge van de gravitationele lenswerking van die cluster worden vervormd tot een lange boog, een zogenaamde "arc". Deze "arcs" lijken veel op de hierboven beschreven Einsteinringen. Een verschil is echter dat een "arc" slechts een relatief klein deel van een cirkel is, terwijl een Einsteinring vrijwel een gehele cirkel omvat. Een belangrijk ander verschil is dat "arcs" worden waargenomen in clusters van sterrenstelsels, terwijl de Einsteinringen worden waargenomen rond sterrenstelsels. Verder worden "arcs" waargenomen in het zichtbaar licht, terwijl de Einsteinringen meestal zijn ontdekt in radiostraling. Met behulp van de straal van de "arc" kan men een bepaling doen van de hoeveelheid massa die zich in de cluster bevindt. Deze massa blijkt in het algemeen veel groter te zijn dan de hoeveelheid massa, die men direkt kan waarnemen, hetgeen wederom een bewijs levert voor het bestaan van donkere materie in die clusters van sterrenstelsels. Wat betreft de verdeling van deze donkere materie leveren de "arcs" echter weinig informatie op.

Het hierboven beschreven verschijnsel, waarbij meerdere afbeeldingen ontstaan van één achtergrondbron of een achtergrondbron heel erg sterk vervormd wordt, wordt in het algemeen het sterke gravitationele lenseffect genoemd. Bestudering ervan heeft als voornaamste resultaat opgeleverd, dat de binnengebieden van de sterrenstelsels, die de afbuiging veroorzaken, weinig donkere materie bevatten. Ze geeft echter niet al te veel informatie over de verdeling van de materie in de buitengebieden van die sterrenstelsels, waar men juist vermoedt dat er veel donkere materie is. Bovendien hebben de "arcs" in clusters alleen maar bevestigd wat we al wisten, namelijk dat er zich in die clusters veel meer materie bevindt dan wij kunnen zien, terwijl wij juist geïnteresseerd zijn in de verdeling van die materie. Ten slotte dient te worden opgemerkt dat het sterke gravitationele lenseffect een bijzonder zeldzaam verschijnsel is: er zijn op het moment slechts zo'n zeven meervoudige quasars bekend, vijf Einsteinringen en zo'n dertien "arcs".

De vraag dringt zich dus op wat er nog meer kan gebeuren met achtergrondbronnen ten gevolge van het gravitationele lenseffect. Het antwoord op deze vraag heeft te maken met de vorm van die achtergrondbronnen. Het gravitationele lenseffect kan namelijk achtergrondbronnen schijnbaar vervormen. Dit verschijnsel noemen we het zwakke gravitationele lenseffect. In figuur 2 zagen we al wat er gebeurt met een bron, die zich vrijwel precies achter een cluster bevindt. In principe wordt elke achtergrondbron op deze manier vervormd. Het grote verschil is echter dat als de achtergrondbron zich wat verder van de lens bevindt, de vervorming minder catastrofaal is dan in figuur 2 is aangegeven. Iedere bron zal echter worden uitgerekt in een richting die loodrecht staat op de verbinding tussen het centrum van de lens en de bron. Dit noemt men tangentiële vervorming.

...aanwezigheid van donkere materie in de buitengalactische ruimte. Zoals we reeds zagen is het sterke gravitationele lenseeffect voor de bepaling van de massa en de verdeling ervan kennis is vereist van de werkelijke vorm van de bron, dat wil zeggen de vorm zoals de bron zou zijn waargenomen als er geen lens aanwezig zou zijn. Helaas hebben we die kennis niet, we zien immers slechts de verstoorde bron. Eén enkele vervormde bron is dus onbruikbaar. Gelukkig is er echter een oplossing. Dat is namelijk handig gebruik te maken van de verstoring van meerdere achtergrondbronnen. Het gebrek aan kennis over de werkelijke vorm van de bronnen kan dan namelijk worden gecompenseerd door maar genoeg achtergrondbron-



Figuur 2: Vervorming van een achtergrondbron als gevolg van het gravitationele lenseeffect. Links is een cirkelvormige bron afgebeeld, die zich vrijwel precies achter een cluster bevindt. Rechts is aangegeven hoe deze bron er zal uit zien ten gevolge van de gravitationele lenswerking van deze cluster. De positie aangeduid met * geeft het centrum van de cluster aan. De bron zal worden uitgerekt in een richting, die loodrecht staat op de verbinding van de bron met het centrum van de cluster. Dit noemen we tangentiële vervorming.

De voornaamste reden waarom het zwakke gravitationele lenseeffect zo belangrijk is, schuilt in het feit dat het niet beperkt is tot verschijnselen die zeer zeldzaam zijn, zoals de vorming van meervoudige afbeeldingen of "arcs". Nadeel is echter dat voor de bepaling van de massa en de verdeling ervan kennis is vereist van de werkelijke vorm van de bron, dat wil zeggen de vorm zoals de bron zou zijn waargenomen als er geen lens aanwezig zou zijn. Helaas hebben we die kennis niet, we zien immers slechts de verstoorde bron. Eén enkele vervormde bron is dus onbruikbaar. Gelukkig is er echter een oplossing. Dat is namelijk handig gebruik te maken van de verstoring van meerdere achtergrondbronnen. Het gebrek aan kennis over de werkelijke vorm van de bronnen kan dan namelijk worden gecompenseerd door maar genoeg achtergrondbron-

nen waar te nemen. Vooral voor clusters van sterrenstelsels is dit een zeer geschikte methode. Het omzetten van de waargenomen verstoringen in de achtergrondbronnen in een profiel voor de massaverdeling in de cluster is echter geen eenvoudige klus. Er zijn namelijk een groot aantal effecten, waar men maar moeilijk vat op kan krijgen. Desalniettemin wijst alles er op dat er in de clusters enorm veel materie aanwezig moet zijn, die wij niet kunnen zien. Men denkt nu zelfs dat 90% van de totale massa in clusters donker is. Bovendien hebben we nu enig inzicht gekregen in de verdeling van die materie.

Het zwakke gravitationele lenseffect kan ook worden gebruikt ter bepaling van de aanwezigheid van donkere materie in de buitengebieden van sterrenstelsels. Zoals we reeds zagen is het sterke gravitationele lenseffect vooral geschikt voor de bepaling van de massa in de binnengebieden van de sterrenstelsels, maar levert het vrij weinig informatie op over de mogelijke aanwezigheid van donkere materie in de buitengebieden. Probleem bij het zwakke gravitationele lenseffect is echter dat het aantal sterrenstelsels dat zich achter een voorgrondsterrenstelsel bevindt, in tegenstelling tot een cluster, bijzonder klein is. In ieder geval veel te klein om de verdeling van de materie in de buitengebieden van het voorgrondsterrenstelsel te bepalen. Door echter gebruik te maken van een heleboel voorgrondstelsels kan het probleem min of meer worden opgelost. Immers, ieder voorgrondstelsel heeft achtergrondstelsels en door maar genoeg voorgrondstelsels te nemen, krijg je uiteindelijk wel genoeg achtergrondstelsels om te bepalen of er zich donkere materie in die voorgrondsterrenstelsels bevindt. Men kan dan weliswaar niet precies de verdeling van de materie in één voorgrondstelsel bepalen, maar wel een uitspraak doen over de algemene aanwezigheid van donkere materie in de voorgrondstelsels. Dit soort onderzoek heeft als ietwat verrassend resultaat opgeleverd, dat de waargenomen verstoringen in de achtergrondbronnen het meest consistent zijn met de afwezigheid van donkere materie in sterrenstelsels, al moet hier wel aan worden toegevoegd dat er een aantal effecten zijn die van invloed kunnen zijn op dit resultaat.

Een geheel andere toepassing van het gravitationele lenseffect vindt plaats in de cosmologie. De cosmologie beschrijft het ontstaan en de evolutie van het Heelal. Men neemt tegenwoordig aan dat het Heelal ontstaan is uit een oerknal, ook wel Big Bang genoemd. Sinds de Big Bang dijt het Heelal uit. Dat wil zeggen dat het Heelal groter en groter wordt. Deze uitdijning van het Heelal kan beschreven worden met behulp van drie parameters. Afhankelijk van de grootte van deze drie cosmologische parameters kan worden bepaald wat de toekomst van het Heelal is: blijft het eeuwig uitdijen of zal het eens weer gaan inkrimpen? Het gravitationele lenseffect kan bij de bepaling van de waarden van deze parameters van dienst zijn. De onnauwkeurigheid van de afgeleide waarden van de parameters is echter dusdanig groot, dat een definitief antwoord op deze vraag nog niet kan worden gegeven.

Voordat ik deze samenvatting afsluit zou ik nog willen opmerken, dat je de verschijnselen die optreden bij het gravitationele lenseffect ook zonder de hulp van moderne telescopen met zeer gevoelige CCD's kunt waarnemen. Zoals reeds gezegd zit hem het verschil tussen een gewone glazen lens en een gravitatielens in de oorzaak van de afbuiging van de lichtstralen. Als gevolg hiervan heeft een gravitatielens hele

andere eigenschappen dan een gewone glazen lens. Echter men kan een glazen lens dusdanig slijpen, dat hij ongeveer dezelfde eigenschappen gaat vertonen als een gravitatielens. Een voorbeeld van zo'n speciaal geslepen glas is een wijnglas. Als men van bovenaf door een wijnglas of door de voet ervan kijkt naar een lichtbron (zoals bijvoorbeeld een lamp) kan men de hierboven beschreven verschijnselen, zoals dubbele beelden van één en dezelfde achtergrondbron of de vervorming van een lichtbron tot een Einsteinring, gewoon thuis waarnemen zonder een lange waarneemreis te moeten maken naar een gevoelige teleskoop.

Introduction

In deze Nederlandse samenvatting heb ik in simpele bewoordingen getracht uit te leggen, waar dit proefschrift over gaat. Iemand die na het lezen van deze samenvatting nieuwsgierig is naar een historische en meer mathematische beschrijving van het gravitationele lenseffect wordt aangeraden Chapter 1 en 2 te lezen.

an invisible mass component in the Universe. The presence of this mass, which is unseen in all electromagnetic wavebands, is inferred from its influence on the dynamics of galaxies and clusters of galaxies. For example, detailed studies of the rotation of neutral hydrogen in spiral galaxies (Roberts and Whitehurst 1975; Bosma 1978; Begeman 1987; Broels 1992) have revealed a significant discrepancy in the outer regions between the dynamical and luminous mass. It is generally assumed that this discrepancy is due to dark matter distributed in a spheroidal halo.

Due to the absence of HI in most ellipticals, reliable rotation curves for ellipticals are very rare, although those ellipticals with measured rotation curves also indicate a discrepancy similar to that found in spirals (van Gorkum et al. 1986; van Gorkum et al. 1990). The thermal X-ray emitting gas surrounding ellipticals is in principle a powerful tracer of the mass distribution, and studies of this kind (Forman et al. 1985; Fabian et al. 1986) reveal the possible presence of dark matter in ellipticals. However, the derived masses are uncertain, because the temperature profile of the X-ray emitting gas is unknown and irregular shapes call into question the usual assumption of hydrostatic equilibrium. Moreover, as Canizares et al. (1987) point out, some fraction of the X-ray emission may not be thermal, as assumed by Forman et al. (1985) and Fabian et al. (1986), but may arise in an extended distribution of discrete sources (such as compact X-ray binaries). If this is the case, then the X-ray emission is useless for a determination of the mass distribution in elliptical galaxies.

The existence of a mass discrepancy in clusters of galaxies has been known since the pioneering work of Zwicky (1933). More recent investigations (Merritt 1987; The and White 1986) confirm the reality of this discrepancy, but highlight the uncertainties – both in the total mass and its distribution – due to the unknown factors such as the degree of isotropy in the velocity distribution of galaxies. Use of the X-ray emitting gas as a tracer involves the same problems as for elliptical galaxies.

On the largest scale, there is a cosmic mass discrepancy. Inflationary scenarios predict that the density of the Universe in terms of the critical density for closure, Ω_c ,