



# Nederlandse samenvatting

## Summary in Dutch

### Mysterieuze nevels

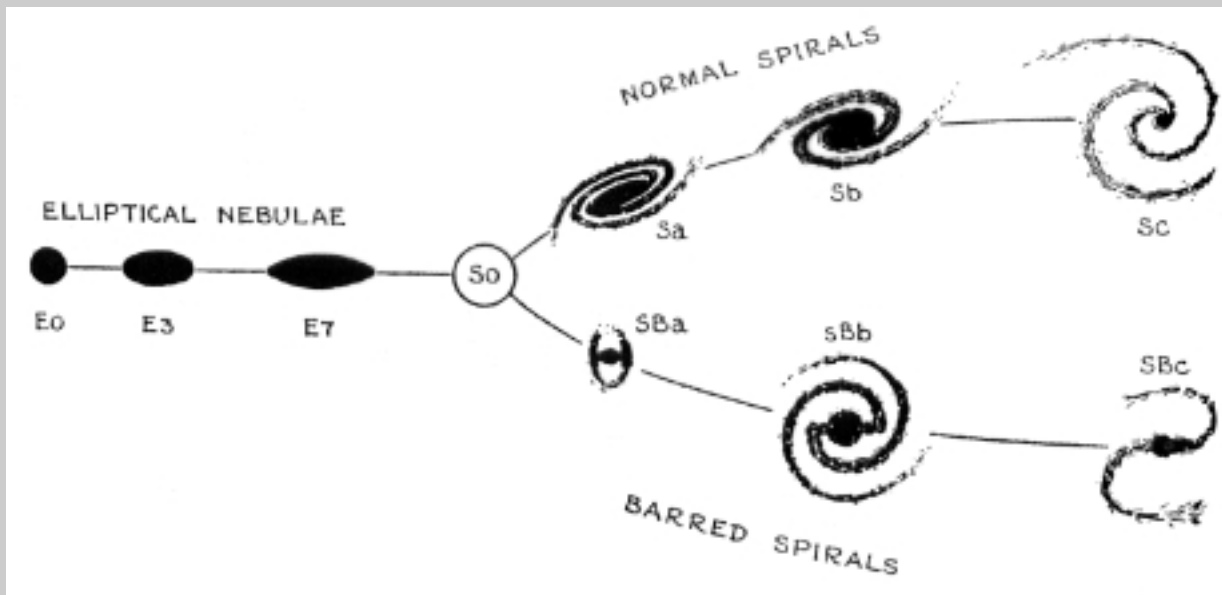
Astronomen zijn al een paar eeuwen op de hoogte van het bestaan van nevels tussen de sterren. Kleine, wazige vlekjes, die in bijna alle gevallen alleen door een telescoop te zien zijn. Tegen het eind van de 18<sup>e</sup> eeuw waren deze nevels eigenlijk alleen maar lastig. Astronomen waren toen voornamelijk geïnteresseerd in het vinden van kometen. De nevels vormden daarbij een probleem, omdat een gemiddelde komeet er óók uitziet als een wazig vlekje, net zoals de nevels. Gelukkig is er echter een groot verschil tussen het wazig vlekje van een komeet en dat van een nevel. De komeet beweegt langs de hemel en de nevel blijft op dezelfde plek staan. Om te voorkomen dat een nevel steeds weer opnieuw als komeet werd aangezien, maakte een van de eerste kometenjagers, Charles Messier, een lijst van alle nevels die hij met zijn telescoop kon zien. Zijn lijst bevat zo'n honderd nevels, die ook vandaag de dag nog bekend zijn als de Messier nevels. Door de lijst die Messier publiceerde, raakte William Herschel ook geïnteresseerd in de nevels. Omdat hij een betere telescoop had, kon hij veel meer nevels zien. Na twintig jaar lang de hemel afgespeurd te hebben, had hij ongeveer 2500 nevels gevonden.

Een grote stap voorwaarts in de sterrenkunde werd gemaakt met de introductie van de fotografie. Tot dan toe werden astronomische waarnemingen met het oog gedaan, en in een tekening weergegeven. Fotografie had twee belangrijke voordelen. Eén ervan was dat men nu niet meer afhankelijk was van de artistieke kwaliteiten van de waarnemer. Maar het tweede voordeel was veel belangrijker. Met het blote oog zien we ongeveer tien beeldjes per seconde. Daardoor kunnen we beweging zien. Maar dat betekent ook dat we dus maar ongeveer een tiende seconde belichten. Als een object heel weinig licht uitstraalt, kunnen we het dus niet zien, zelfs niet met een telescoop. Maar met de komst van de fotografie werd het mogelijk om veel langer te belichten, soms zelfs enkele uren achter elkaar. Een belichting van drie uur duurt al honderd duizend keer langer dan de tiende seconde van het oog. Dankzij de fotografie werden er nieuwe objecten gevonden die tot dan toe onzichtbaar waren gebleven. Bekende objecten konden in veel groter detail worden bestudeerd. Zo werd ontdekt dat er verschillende soorten nevels waren, zoals wolkvormige en ringvormige nevels. Een groot deel van de nevels zagen eruit als draaikolken. Deze nevels werden spiraalnevels genoemd.

Met deze ontdekkingen was het nog steeds niet duidelijk wat voor objecten deze nevels waren. Aan het begin van de twintigste eeuw bestonden er twee belangrijke theorieën. De ene theorie ging ervanuit dat de spiraalnevels een soort draaikolken van gas waren, die zich in ons eigen melkwegstelsel bevinden. Misschien waren het wel planetenstelsels in vorming, en zo zou het bestuderen van die nevels meer inzicht kunnen geven in de vorming van de aarde en andere planeten. De andere theorie was verstrekkender, en veronderstelde dat de spiraalnevels aparte melkwegstelsels waren. Net zoals onze melkweg zouden de spiraalnevels ook uit vele miljarden afzonderlijke sterren bestaan, maar door hun grote afstand konden de afzonderlijke sterren niet gezien worden. Aanvankelijk was deze theorie niet populair, omdat het zou betekenen dat het heelal veel en veel groter zou zijn dan toen werd gedacht.

De spanningen tussen de voorstanders van de verschillende theorieën liepen steeds hoger op, en de twee partijen kwamen geen stap dichterbij elkaar. Om te proberen uit deze impasse te komen, werd door de Amerikaanse Nationale Academie van Wetenschappen in 1920 een debat georganiseerd tussen twee voorstanders van beide theorieën. De deelnemers aan dit 'grote debat', zoals het genoemd werd, waren Heber Curtis, voorstander van de theorie dat de spiraalnevels aparte melkwegstelsels zijn, en Harlow Shapley, voorstander van de andere theorie. Het debat was geen succes. Op de eerste plaats was het eigenlijk geen debat, want beide heren staken een monoloog af over hun eigen gelijk. Op de tweede plaats hielden ze ieder voet bij stuk. Dus moesten de feiten spreken, en niet de koppige wetenschappers.

De doorbraak kwam in 1924, toen op een foto van één van de spiraalnevels, de Andromedanevel, afzonderlijke sterren konden worden gezien. Helemaal duidelijk werd het toen Edwin Hubble de afstanden tot een aantal van de nevels kon bepalen met behulp van variabele sterren. Hij vond afstanden die de spiraalnevels ver buiten onze eigen melkweg plaatsten. De spiraalnevels bleken melkwegstelsels te zijn net zoals het onze.



**Figuur 1.** Hubble's oorspronkelijke classificatie van melkwegstelsels (Hubble, *Realm of the Nebulae*, 1936).

## Het uiterlijk van melkwegstelsels

Nu men wist dat de nevels melkwegstelsels waren, stonden deze objecten ineens in het middelpunt van de belangstelling. De eerste stap op weg naar het begrip van deze melkwegstelsels was proberen systematiek te ontdekken in de vele verschijningsvormen van melkwegstelsels, zoals vastgelegd in duizenden foto's. Edwin Hubble heeft zich daar intensief mee bezig gehouden. Al in 1917 schreef hij zijn proefschrift over de classificatie van melkwegstelsels. Zijn werk resulteerde in 1923 in een classificatieschema, dat nog steeds in gebruik is in de moderne sterrenkunde. Dit schema is afgebeeld in figuur 1, en wordt ter ere van Hubble de Hubble classificatie genoemd. Hubble maakte onderscheid tussen regelmatige en onregelmatige melkwegstelsels. De onregelmatige gooide hij op één hoop en deze staan niet vermeld in figuur 1. De regelmatige stelsels verdeelde hij onder in drie typen: elliptische stelsels, normale spiraalstelsels en balkspiraalstelsels.

De verdeling van melkwegstelsels in verschillende typen is gebaseerd op het uiterlijk van de spiraalstelsels. In figuur 2 zijn een aantal voorbeelden van melkwegstelsels weergegeven. De spiraalstelsels zijn duidelijk te herkennen aan hun spiraalarmen, vooropgesteld dat ze van bovenaf gezien worden zoals links in figuur 2. Maar binnen de spiraalstelsels bestaan er ook verschillen, zoals schematisch is weergegeven in figuur 1. Sommige stelsels hebben strak opgewonden spiraalarmen, terwijl anderen hele losse spiralen hebben. Een ander verschil



**Figuur 2.** Hierboven staan van links naar rechts een spiraalstelsel dat van bovenaf gezien wordt, een spiraalstelsel dat vanaf de zijkant gezien wordt, en een elliptisch stelsel. De sterren in de foto's zijn voorgrondsterren die in onze eigen melkweg staan.

is dat sommige een hele grote kern hebben, en anderen juist een hele kleine. Hubble vond dat deze eigenschappen hand in hand gaan. Spiraalstelsels met strak gewonden spiraalarmen hebben een grote kern, en stelsels met losse spiraalarmen hebben een kleine kern. Kijken we verder in figuur 1, dan zien we naast de normale spiraalstelsels ook nog spiraalstelsels met een balk in het centrum. Afgezien van hun balk zien ze er uit als normale spiraalstelsels. Verder is in figuur 2 in het middelste paneel te zien hoe een spiraalstelsel op zijn kant eruit ziet: als een platte schijf. Ook is goed te zien dat het centrale deel van het melkwegstelsel wat dikker is dan de omliggende schijf. De spiraalstelsels zien er dus min of meer uit als twee spiegeleieren die tegen elkaar zijn geplakt.

De elliptische stelsels zien er heel anders uit. Bij deze stelsels maakt het eigenlijk niet zo gek veel uit vanaf welke kant je kijkt. Vanaf elke kant zien ze eruit als een wazige ellips. Dat komt omdat deze stelsels een vorm hebben die uiteenloopt van sigaarvorming tot bolvorming en alles wat daartussen ligt. Tussen de elliptische stelsels en de spiraalstelsels ligt nog een soort overgangsklasse van melkwegstelsels die geen spiraalarmen hebben, en dus eigenlijk geen spiraalstelsels zijn, maar die ook niet elliptisch van vorm zijn. Dit zijn de zogenaamde S0 stelsels (spreek uit: es-nul).

Dan blijft er nog een type melkstelsel over dat Hubble niet in zijn classificatie heeft opgenomen. Dat zijn de onregelmatige stelsels. Een voorbeeld van zo'n onregelmatig stelsel is gegeven in figuur 3. Het is wel duidelijk waar ze hun naam vandaan halen. In tegenstelling tot de spiraalstelsels hebben ze geen duidelijk centrum, en de sterren lijken redelijk willekeurig verdeeld. Ondanks het feit dat deze onregelmatige stelsels er behoorlijk anders uitzien als de spiraalstelsels, hebben ze een belangrijke eigenschap gemeenschappelijk. De onregelmatige stelsels zien er namelijk ook uit als een afgeplatte schijf indien ze vanaf de zijkant worden gezien. Het onregelmatige stelsel in figuur 3 wordt van bovenaf gezien.

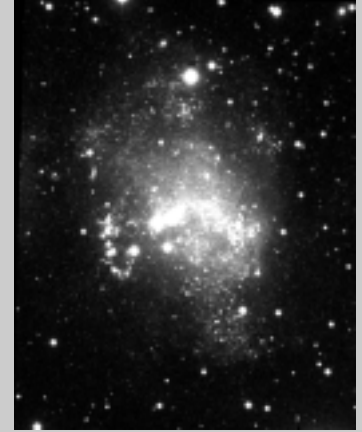
Tegenwoordig is er veel meer bekend over de onregelmatige stelsels. Er zijn eigenlijk twee soorten onregelmatige stelsels. De eerste soort zijn melkwegstelsels waar iets mee aan de hand is, bijvoorbeeld spiraalstelsels die in een kosmische botsing met een ander melkwegstelsel uiteengereten worden en niet meer lijken op de melkwegstelsels uit de Hubble classificatie. Een voorbeeld van zo'n botsing is afgebeeld in figuur 4.

Het andere type onregelmatig stelsel is van een heel andere aard. Dat blijken kleine melkwegstelsels te zijn, die maar een tiende van de afmeting hebben van de grote spiraalstelsels, en maar ongeveer een duizendste van het licht uitzenden van de grote spiraalstelsels. Deze kleine stelsels worden ook wel dwergstelsels genoemd. Een voorbeeld van zo'n dwergstelsel is te zien in figuur 3. Het zijn deze dwergstelsels die het onderwerp zijn van dit promotieonderzoek.

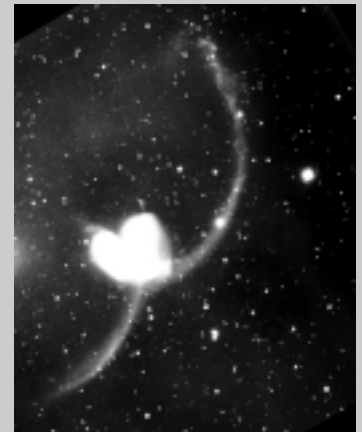
Hubble dacht dat de onregelmatige stelsels relatief zeldzaam waren. Hij had gelijk wat betreft de botsende stelsels, die zijn inderdaad zeldzaam. Maar later onderzoek heeft aangetoond dat er heel veel dwergstelsels bestaan. Omdat deze dwergstelsels zo klein en lichtzwak zijn, heeft Hubble er veel over het hoofd gezien. Tegenwoordig weten we dat er voor elk groot stelsels tientallen dwergstelsels zijn.

## De bouw en samenstelling van melkwegstelsels

Melkwegstelsels bestaan uit vier hoofdbestanddelen: sterren, gas, stof en donkere materie. De verhouding van deze bestanddelen verschilt van stelsel tot stelsel. Elliptische stelsels bestaan hoofdzakelijk uit sterren, en hebben bijna geen gas en stof. Spiraalstelsels bestaan voor het grootste deel uit sterren, maar hebben ook een behoorlijke hoeveelheid gas en stof. Dat is goed te zien in het middelste plaatje van figuur 2, waar een spiraalstelsel op zijn kant te zien is. Midden over het stelsel is een donkere band te zien. Die wordt veroorzaakt door gas- en stofwolken die zich tussen de sterren bevinden en het licht van de achterliggende sterren tegenhouden. De dwergstelsels, tenslotte, bestaan voor een ongeveer even groot deel uit sterren als uit gas. Waarschijnlijk bevatten dwergstelsels relatief weinig stof, maar daar is maar weinig over bekend.



**Figuur 3.** Een voorbeeld van een onregelmatig stelsel



**Figuur 4.** Een kosmische botsing

En hoe zit het dan met donkere materie? Daar is weinig over bekend. Van sterren weten we dat ze hoofdzakelijk uit waterstof bestaan, net zoals het gas tussen de sterren, en van het stof weten we dat het vooral uit silicaten (vergelijkbaar met verpulverd zand) en koolstofverbindingen (vergelijkbaar met roet) bestaat. Maar over donkere materie is niet meer bekend dan dat het er moet zijn.

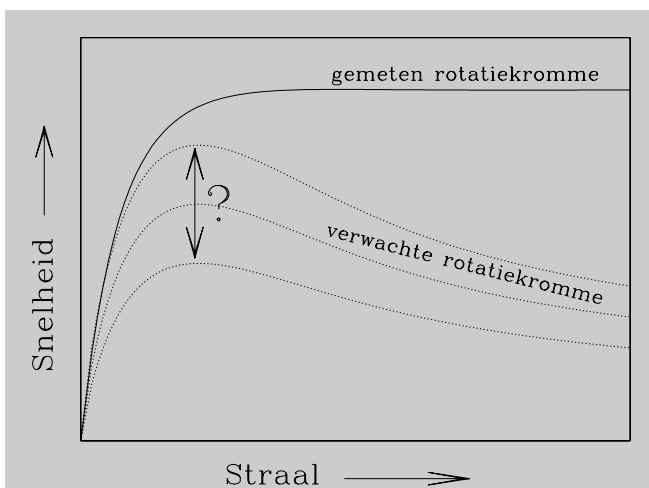
## De ontdekking van donkere materie

Het is lang een raadsel geweest hoe zwaar melkwegstelsels eigenlijk zijn. Met kon wel een ruwe schatting maken, omdat uit de hoeveelheid licht kan worden afgeleid hoeveel sterren er ongeveer in een melkwegstelsel zijn. Maar hoe zwaar is een gemiddelde ster? En hoeveel gas en stof bevindt zich in een melkwegstelsel?

In de jaren dertig werd het mogelijk snelheden in de spiraalstelsels te meten. Daarmee kon de massa van de melkwegstelsels bepaald worden, met behulp van de wet van de zwaartekracht. De zwaartekracht is de kracht die melkwegstelsels bij elkaar houdt. Net zoals hij ons bij de aarde houdt. Als we heel erg ons best doen, kunnen we misschien een meter omhoog springen. Een topatleet komt wat hoger, die haalt iets meer dan twee meter, maar voor iedereen geldt dat we onvermijdelijk weer naar beneden komen. Er is echter wel een manier om een flink stuk hoger te komen, namelijk door gebruik te maken van bijvoorbeeld de space shuttle. Astronauten komen met behulp van de space shuttle in een baan om de aarde, op zo'n 500 km hoogte. Het vereist wel precisiewerk om exact in de goede baan te komen. De snelheid die nodig is om in die baan om de aarde te komen en te blijven is heel precies bepaald. Als de space shuttle net iets te langzaam gaat, dan valt hij weer terug naar de aarde; gaat hij te snel, dan schiet hij door het heelal in. Kortom, er is maar één goede snelheid. Die wordt bepaald door de massa van de aarde en de hoogte van de baan van de space shuttle. Maar dit kan ook omgekeerd worden. Als de snelheid en de hoogte van de space shuttle bekend zijn, dan kan daarmee de massa van de aarde bepaald worden!

Iets vergelijkbaars is ook mogelijk bij een melkwegstelsel. Net zoals de space shuttle zijn rondjes om de aarde draait, zo roteert in een melkwegstelsel het gas en de sterren rond het centrum van het melkwegstelsel. Maar er is een belangrijk verschil tussen de aarde en een melkwegstelsel. De aarde is een bol met een duidelijke rand, namelijk de grond waar wij allemaal op rondlopen. In een melkwegstelsel is dat anders. Als een denkbeeldige astronaut met een raket zou vertrekken vanuit het centrum van een melkwegstelsel, op weg naar de rand van het melkwegstelsel, dan blijft hij almaar nieuwe sterren en gaswolken tegenkomen. Kortom, naarmate hij verder naar buiten reist, neemt de massa tussen hem en het centrum steeds verder toe. Als hij dus besluit ergens zijn rondjes te gaan draaien rond het centrum van de melkweg, moet hij precies weten hoe de massa verdeeld is om de goede snelheid uit te kunnen rekenen. Ook dit kan weer omgedraaid worden. Als de astronaut na lang proberen de goede snelheid heeft gevonden om in de goede baan te blijven, dan kan hij uitrekenen hoeveel massa er tussen hem en het centrum is. Dit kan nog een stap verder worden gevoerd: als de snelheid voor elke afstand tot het centrum bekend is, kan daaruit zelfs de verdeling van de massa worden uitgerekend.

In de sterrenkunde wordt dankbaar gebruik gemaakt van deze mogelijkheid. Het is namelijk vrij makkelijk om de snelheden te meten, zoals we in de volgende paragraaf zullen zien. Een meting van de snelheid voor elke afstand tot het centrum in een melkwegstelsel wordt een rotatiekromme genoemd. Toen de eerste rotatiekrommen werden gemeten, stonden de sterrenkundigen versteld! Natuurlijk hadden ze al uitgerekend hoe rotatiekrommen er ongeveer uit zouden moeten zien. De verdeling van de sterren en het gas was immers al bekend, dus kon de vorm van de rotatiekromme worden berekend. Maar omdat men niet wist wat de gemiddelde massa van een ster was, kon men alleen een schatting maken van de precieze rotatiesnelheid. Die schattingen zijn weergegeven in figuur 5 als de stippellijnen. Hoe zwaarder de sterren zijn, hoe hoger de verwachte snelheden. De verschillende schattingen hebben een duidelijke overeenkomst. Alle verwachte rotatiekrommen hebben ongeveer dezelfde vorm,



**Figuur 5.** De verwachte rotatiekromme als stippellijn is onzeker omdat de massa van de gemiddelde ster onzeker is. De gemeten rotatiekromme is de getrokken lijn.

met een sterke stijging vlakbij het centrum, en een langzame daling bij grote afstanden tot het centrum. Maar de gemeten rotatiekromme zag er heel anders uit dan de rotatiekromme die verwacht werd. De gemeten rotatiekrommen lieten helemaal geen daling zien, die bleven gewoon constant! De verwachte rotatiekromme, uitgerekend op basis van de materie die zichtbaar is, kon de waargenomen rotatiekromme dus niet verklaren. De conclusie is dus dat er nog meer massa moet zijn, die niet zichtbaar is, maar die er wel voor zorgt dat de waargenomen rotatiekromme vlak wordt. Deze geheimzinnige, missende massa werd donkere materie genoemd. Het enige wat tegenwoordig bekend is over donkere materie, is dat het er is. Wat het is, waaruit het bestaat, waar het is, dat is allemaal onbekend. Misschien zijn het zwarte gaten, misschien zijn het minuscule deeltjes. Maar wat het ook is, de donkere materie laat zijn aanwezigheid duidelijk merken door de zwaartekracht.

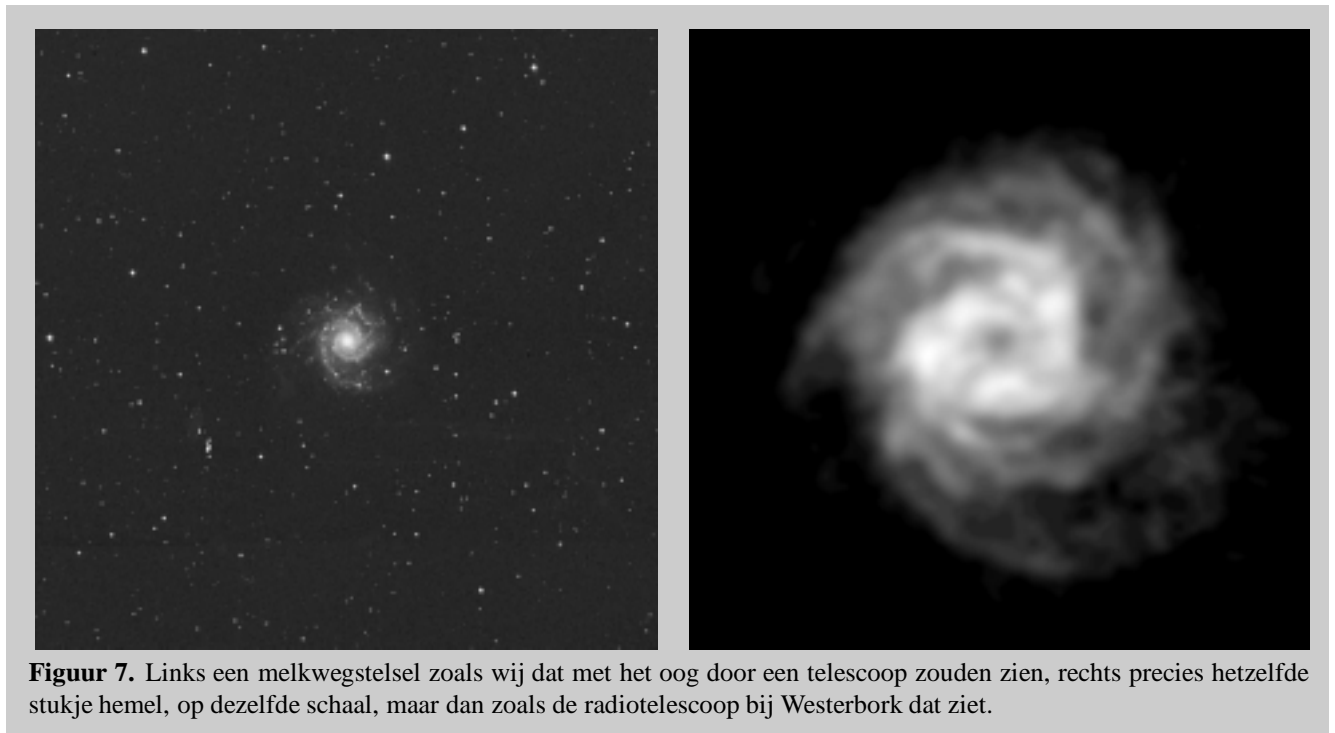
## Het meten van rotatiekrommen

Het meten van rotatiekrommen is tegenwoordig vrij eenvoudig. Meestal wordt daarvoor gebruik gemaakt van radiotelescopieën. Een van de krachtigste radiotelescopieën ter wereld is de radiotelescoop bij het Drentse plaatsje Westerbork. Daar staan veertien radiotelescopieën van ieder 25 meter doorsnee op een rij, en samen vormen ze een grote telescoop met een doorsnee van drie kilometer. In figuur 6 is een foto afgebeeld van deze radiotelescoop.

In 1945 had de Nederlandse sterrenkundige Henk van de Hulst voorgesteld dat neutraal, atomaire waterstofgas, waaruit het gas tussen de sterren voor het grootste deel bestaat, radiostraling uitzendt. Zes jaar later werd de radiostraling voor het eerst waargenomen, en sindsdien nemen waarnemingen van het waterstofgas in melkwegstelsels met radiotelescopieën een onmisbare plaats in de sterrenkunde. In figuur 7 is afgebeeld hoe de verdeling van waterstofgas in een melkwegstelsel eruit ziet. Links is een melkwegstelsel afgebeeld zoals wij dat zouden zien door een telescoop. Rechts is hetzelfde stukje hemel afgebeeld op dezelfde schaal, maar nu zien we de verdeling van waterstofgas zoals waargenomen met de Westerbork radiotelescoop. Hoewel in beide plaatjes hetzelfde melkwegstelsel te zien is, lijken



**Figuur 6.** De radiotelescoop bij Westerbork



**Figuur 7.** Links een melkwegstelsel zoals wij dat met het oog door een telescoop zouden zien, rechts precies hetzelfde stukje hemel, op dezelfde schaal, maar dan zoals de radiotelescoop bij Westerbork dat ziet.

ze bijna niet op elkaar. Het melkwegstelsel is veel groter in waterstofgas dan in zichtbaar licht, en in plaats van een heldere kern, zoals te zien is in het zichtbaar licht, is er een gat in het midden van de waterstofverdeling. Een ander verschil is dat de afbeelding van de waterstofverdeling veel onscherper is dan het afbeelding in zichtbaar licht. De waterstofverdeling ziet er uit als een waterverfschilderij waar weer water op is gekomen, zodat het versmeerd is. Dit is een eigenschap van waarnemingen met een radiotelescoop, en zelfs met een moderne telescoop als die bij Westerbork is het niet mogelijk een afbeelding te maken die net zo scherp is als een gewone foto. Naast deze verschillen, is er ook een overeenkomst te zien tussen beide afbeeldingen. De spiraalarmen die in het zichtbaar licht zo duidelijk zijn, zijn ook zichtbaar in het waterstofgas.

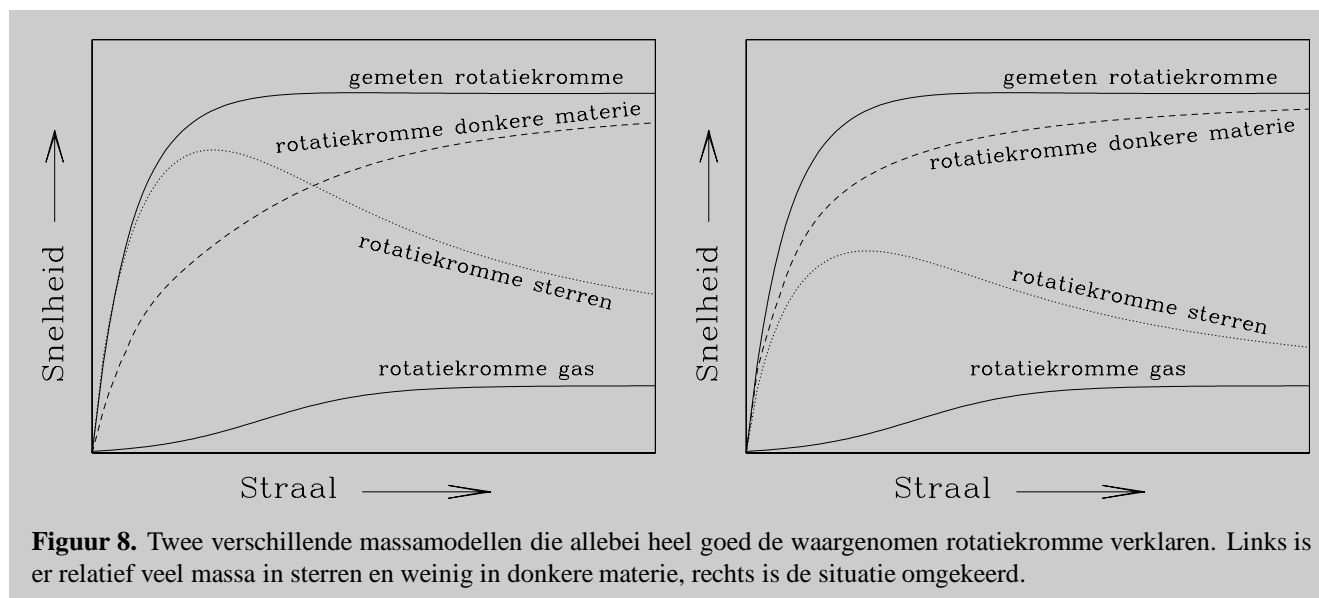
De waarnemingen van het waterstofgas bevatten echter nog meer informatie. Niet alleen de verdeling van het gas wordt waargenomen, maar ook de snelheid. Met één waarneming kan een sterrenkundige dus onderzoeken waar het gas zich bevindt in een melkwegstelsels, en hoe het beweegt. Uit deze bewegingen van het gas kan dan de rotatiekromme van het melkwegstelsel worden bepaald, en als die bekend is, kan worden berekend hoe zwaar het melkwegstelsel is, hoe de massa verdeeld is en hoeveel donkere materie zich in het melkwegstelsel bevindt, zoals we zullen zien in de volgende paragraaf.

Er zit echter een addertje onder het gras. Zoals we net gezien hebben, is het beeld van het waterstofgas dat met een radiotelescoop wordt waargenomen een beetje onscherp. Zo iets gebeurt ook met de snelheden die worden waargenomen, die worden ook wat onscherp. Dit effect wordt bundelversmering genoemd. Het is belangrijk dat bij het bepalen van de rotatiekromme rekening wordt gehouden met deze bundelversmering. Wordt dat niet gedaan, dan wordt waarschijnlijk een verkeerde rotatiekromme gevonden.

## Massamodellering

Met de rotatiekromme in de hand is het nu mogelijk te bepalen hoe de massa in het melkwegstelsel verdeeld is. Een sterrenkundige doet dat door een massamodel te maken. Een massamodel is niets anders dan een optelsom van de verdeling van massa in sterren, gas, stof, en donkere materie. Het principe achter de massamodellering is dat deze optelsom precies de waargenomen rotatiekromme moeten verklaren. Als dat het geval is, dan zal het massamodel wel overeenkomen met de werkelijke massaverdeling. Helaas is het in de praktijk wat minder eenvoudig. In figuur 5 hebben we al gezien dat de bijdrage van de sterren aan de rotatiekromme erg onzeker is, omdat de gemiddelde massa van de sterren niet bekend is. Dit maakt de massamodellen ook onzeker. Gelukkig is de massa van het gas is heel goed bekend. De bijdrage van het stof is heel klein, en die wordt dus voor het gemak verwaarloosd. Wat overblijft moet dus donkere materie zijn.

Ter illustratie van de onzekerheid in de massamodellen zijn in figuur 8 twee massamodellen van hetzelfde stelsel afgebeeld. In het linker massamodel is de rotatiekromme van de sterren relatief hoog, wat wil zeggen dat er veel massa in sterren is. Samen met het gas en de donkere materie kan de waargenomen rotatiekromme uitstekend verklaard worden. Rechts in figuur 8 is de massa en dus de rotatiesnelheid van de sterren veel lager.

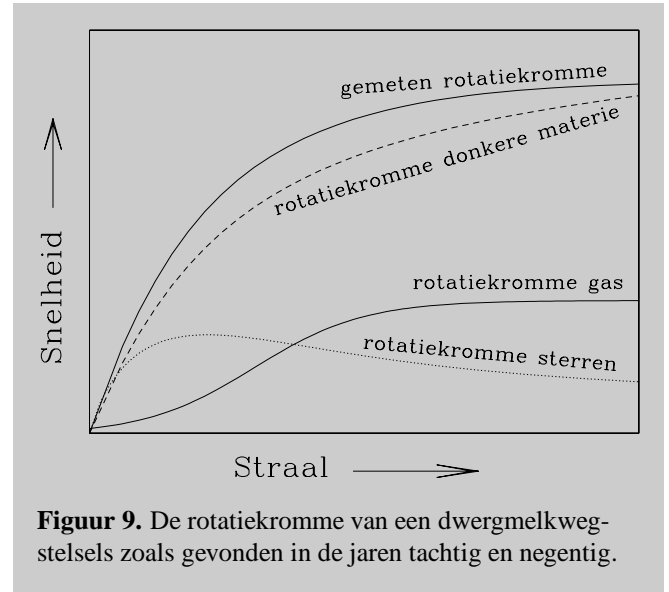


**Figuur 8.** Twee verschillende massamodellen die allebei heel goed de waargenomen rotatiekromme verklaren. Links is er relatief veel massa in sterren en weinig in donkere materie, rechts is de situatie omgekeerd.

Maar toch kan de waargenomen rotatiekromme nog uitstekend verklaard worden, als er maar meer donkere materie is. Figuur 8 laat daarmee heel goed zien wat het probleem met donkere materie is. Het is duidelijk dat het er moet zijn, want met het gas en de sterren alleen kan de waargenomen rotatiekromme niet verklaard worden. Maar omdat niet bekend is wat de gemiddelde ster weegt, kan de precieze hoeveelheid van donkere materie, laat staan de verdeling, niet nauwkeurig bepaald worden.

## Donkere materie in dwergmelkwegstelsels

Toen in het midden van de jaren tachtig voor het eerst de donkere materie in een dwergmelkwegstelsel werd bestudeerd, vond men een opvallend resultaat. De rotatiekromme van dwergmelkwegstelsels zag er heel anders uit dan die van de spiraalstelsels. Zoals we in figuren 5 en 8 hebben gezien, stijgen de rotatiekrommen van spiraalstelsels snel, en worden daarna vlak. Maar de rotatiekrommen die men voor dwergmelkwegstelsels vond, zagen er heel anders uit. Een voorbeeld is gegeven in figuur 9. Daarin is te zien dat de rotatiekromme langzaam stijgt, en voortdurend blijft stijgen. De massamodellen die op basis van deze rotatiekrommen werden gevonden, waren ook heel anders. Bij spiraalstelsels vond men dat de rotatiekromme van de sterren de gemeten rotatiekromme bij kleine afstanden tot het centrum goed kon verklaren, zoals heel mooi te zien is in figuur 5. Maar bij dwergen is dat helemaal niet het geval. Daar kan de rotatiekromme van de sterren de vorm bij kleine afstanden tot het centrum helemaal niet verklaren. De enige manier om de gemeten rotatiekromme te verklaren, is met een massamodel waarin donkere materie overal overheerst. Dit is goed te zien in figuur 9.



**Figuur 9.** De rotatiekromme van een dwergmelkwegstelsels zoals gevonden in de jaren tachtig en negentig.

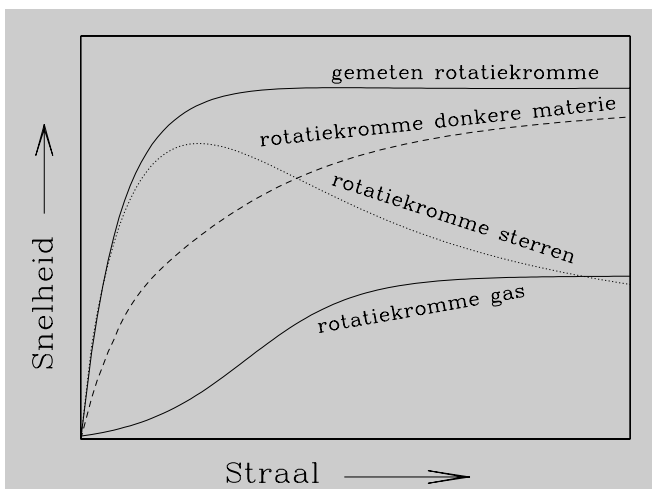
De conclusie die toen in de jaren tachtig werd getrokken en die ook tegenwoordig nog algemeen geaccepteerd is, was dat dwergstelsels dus helemaal overheerst worden door donkere materie. De massa die zichtbaar is, is maar ongeveer een tiende van de totale massa. Net alsof je eens in de spiegel kijkt, en inschat dat je zo'n 70 kilo weegt. Vervolgens stap je op de weegschaal, en die geeft dan aan dat je 700 kilo weegt!

## Mijn promotieonderzoek

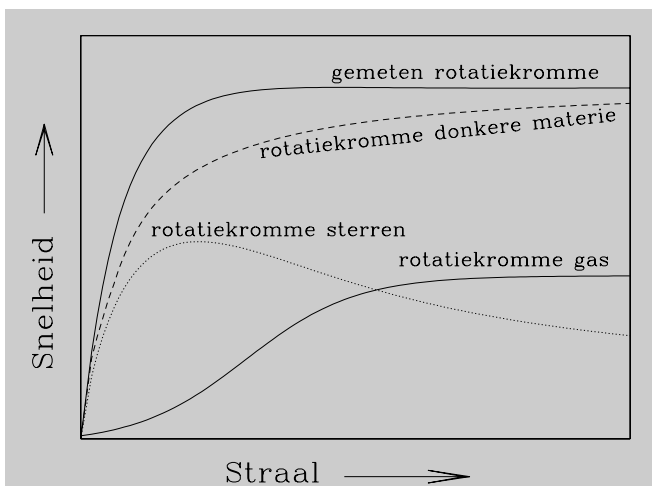
Ten tijde van het begin van mijn onderzoek was er nog maar relatief weinig onderzoek gedaan op het gebied van donkere materie in dwergstelsels. Zoals hierboven beschreven waren er al een paar dwergstelsels bestudeerd, maar dat waren er maar een handjevol. Bovendien waren die onderzoeken gedaan door verschillende onderzoekers, met verschillende telescopen, en de waarnemingen werden op verschillende manieren bewerkt. Kortom, er was nog geen systematisch onderzoek gedaan naar donkere materie in dwergstelsels.

Het doel van mijn promotieonderzoek was deze tekortkoming oplossen en de rotatiekrommen en de donkere materie eigenschappen van de dwergstelsels systematisch bestuderen. Tijdens mijn promotieonderzoek heb ik 75 dwergstelsels bestudeerd die zijn waargenomen met de radiotelescoop bij Westerbork, en met optische telescopen op La Palma, een van de Canarische Eilanden. Al deze waarnemingen zijn dus met dezelfde telescopen waargenomen, en op dezelfde manier verwerkt. Dat maakt deze verzameling dwergstelsels ideaal voor een systematisch onderzoek naar de rotatiekrommen en donkere materie eigenschappen van dwergstelsels.

Een van de eerste ontdekkingen in mijn onderzoek was dat de effecten van bundelversmering, het feit dat de waarnemingen met de Westerbork radiotelescoop wat wazig zijn, onderschat waren in veel vorige studies. Dit heeft verstrekkende gevolgen. Eerst heb ik een methode bedacht om rotatiekrommen te bepalen die wel rekening houdt met de effecten van bundelversmering. Met deze methode vind ik andere rotatiekrommen en donkere materie eigenschappen dan men voorheen vond in dwergstelsels.



**Figuur 10.** Een typische rotatiekromme met massamodel zoals gevonden voor de dwergstelsels in mijn promotieonderzoek.



**Figuur 11.** Dezelfde rotatiekromme als in figuur 10, maar nu met een lagere bijdrage van de sterren aan de rotatiekromme.

In figuur 10 is een voorbeeld gegeven van de rotatiekrommen die ik vind voor dwergstelsels. De rotatiekromme stijgt snel vlakbij het centrum, en blijft daarna vlak. Met andere woorden, ik vind dus dat de rotatiekrommen van dwergstelsels en spiraalstelsels dezelfde vorm hebben. Ondanks dezelfde vorm zijn de rotatiekrommen trouwens wel verschillend, omdat dwergstelsels kleiner zijn en lagere rotatiesnelheden hebben. De rotatiekrommen van dwergstelsels zijn verkleinde versies van die van spiraalstelsels.

Door deze nieuwe vorm van de rotatiekrommen worden de massamodellen ook anders. Het algemeen geaccepteerde beeld is dat donkere materie overheerst in dwergstelsels, zoals afgebeeld in figuur 9. Maar met de nieuwe rotatiekromme zien de massamodellen er heel anders uit. De rotatiekromme van de sterren kan de gemeten rotatiekromme voor kleine afstanden tot het centrum uitstekend verklaren, net zoals bij spiraalstelsels. Het enige verschil met spiraalstelsels is dat de rotatiekromme van het gas een hogere snelheid bereikt, omdat dwergstelsels relatief meer gas hebben dan spiraalstelsels.

Een andere overeenkomst tussen dwergstelsels en spiraalstelsels is dat ook in dwergstelsels de gemiddelde massa van de sterren onbekend is. Het zou dus zo kunnen zijn dat de rotatiesnelheid van de sterren lager is, net zoals we gezien hebben in figuur 8 voor spiraalstelsels, en dat er dus meer donkere materie is. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 11.

Zo blijkt dus dat in dwergstelsels dezelfde onzekerheid in donkere materie eigenschappen bestaat als in spiraalstelsels: het is duidelijk dat er donkere materie moet zijn in deze stelsels, maar hoeveel, en hoe het is verdeeld, is onbekend.

## Conclusies

De belangrijkste conclusie van mijn onderzoek is dat het algemeen geaccepteerde beeld dat dwergstelsels

overheerst worden door donkere materie niet waar hoeft te zijn. Uit mijn onderzoek blijkt dat de rotatiekrommen van dwergstelsels verkleinde versies zijn van die van spiraalstelsels. Ook de massamodellen van dwergstelsels zien er uit als die van spiraalstelsels. Het zou dus heel goed kunnen zijn dat dwergstelsels gewoon kleine spiraalstelsels zijn.

Tegenwoordig zijn er veel astronomische theorieën die de oude waarnemingen van dwergstelsels proberen te verklaren, en dus manieren bedenken waarom dwergstelsels veel, en spiraalstelsels weinig donkere materie hebben. Dat zou moeten komen door verschillen in het ontstaan of verschillen in de evolutie tussen dwergstelsels en spiraalstelsels. De waarnemingen in mijn promotieonderzoek laten zien dat spiraalstelsels en dwergstelsels helemaal niet zo verschillend hoeven te zijn, en dat dwergstelsels en spiraalstelsels wellicht eenzelfde verleden hebben.

Helaas is dat allemaal nog niet zeker. Zoals in het voorgaande duidelijk is gebleken, is het ontbreken van kennis van de gemiddelde massa van sterren een spelbreker. Zonder die kennis is het niet mogelijk de donkere materie eigenschappen van dwerg- en spiraalstelsels te bepalen. Zoals zo vaak in de wetenschap, levert dit onderzoek niet alleen antwoorden op, maar ook vele nieuwe vragen. Het onderzoek gepresenteerd in dit proefschrift is slechts een momentopname. Het onderzoek zal doorgaan, mede geïnspireerd door de vragen die in dit proefschrift worden opgeroepen. In ieder geval zal ik er de komende jaren nog met plezier aan verder werken.