# Waterstof: een klein atoom met een grote rol in de sterrenkunde

Oratie uitgesproken op 8 januari 2002 door J.M. van der Hulst,

hoogleraar in de galactische en extra-galactische radiosterrenkunde

**Kapteyn Institute**

*Department of Astronomy*

RuG

Rijksuniversiteit Groningen

# Waterstof: een klein atoom met een grote rol in de sterrenkunde

Mijnheer de Rector Magnificus,
Mijnheer de voorzitter van het College vanBestuur
Zeer gewaardeerde toehoorders,

De keuze van het onderwerp voor deze oratie heeft me weinig hoofdbrekens gekost. Mijn interesse, onderzoekservaring en ook de leeropdracht wezen allemaal in dezelfde richting: een voordracht over de 21-cm lijnstraling van neutraal atomair waterstof met een overzicht van de geschiedenis, maar vooral de toekomst van radioastronomisch onderzoek op dit gebied.

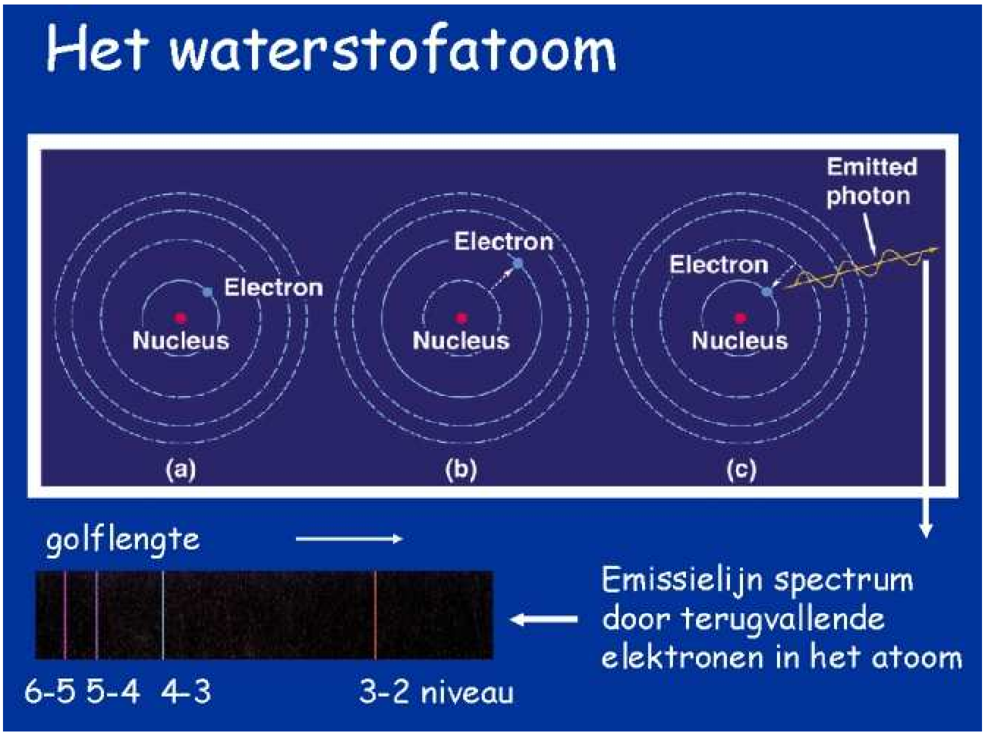
Wat meer hoofdbrekens heeft gekost is de vraag al dan niet gebruik te maken van audiovisuele hulpmiddelen. De omgeving van deze aula is niet het meest geschikt voor een theatershow en leent zich beter voor een ongeïllustreerde voordracht. De fascinerende schilderingen van Matthijs Röling die de achterwand van deze aula sieren, worden nu door projectieschermen deels aan uw oog onttrokken. Ik heb toch besloten u niet de beelden te onthouden die mijn verhaal ondersteunen. Immers: “a picture can say more than a thousand words”. Excuses aan de vakgenoten, omdat het verhaal is afgestemd op de niet-sterrenkundige. Hopelijk kan ik ook hen toch boeien.

## Atoomstructuur

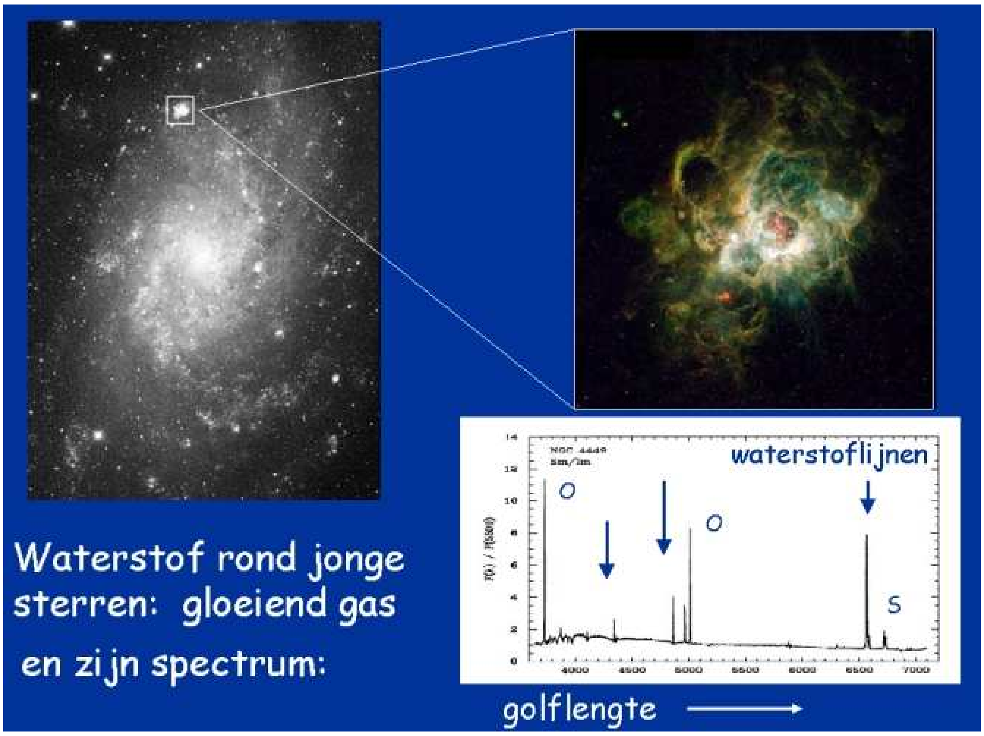
Eerst een beetje theorie. Het heelal zit vol met waterstof, het simpelste element dat we kennen. Het bestaat uit een proton met een massa van $1.7\ 10^{-24}$ gram en een positieve elektrische lading, en een bijna tweeduizend maal lichter elektron met een negatieve lading, dat in een baan rond het proton beweegt. De elektrostatische aantrekkingskracht tussen het proton en het elektron zorgt ervoor dat het rondsnellende elektron niet onder invloed van de centrifugale kracht wegvliegt. Het is precies als de baan van een satelliet rond de aarde, alleen zorgt in dat geval de zwaartekracht voor de balans. Of als de bewegingen van de planeten rond de zon en de bewegingen van individuele gaswolken rond het centrum van een melkwegstelsel. Later in mijn verhaal komt dit natuurkundig principe, de balans tussen de zwaartekracht en de centrifugale kracht, weer ter sprake.

Omdat het waterstofatoom zo simpel is en slechts uit twee deeltjes bestaat is het mogelijk precies uit te rekenen hoe dit atoom zich gedraagt onder allerlei fysische omstandigheden. In de kwantumfysica is het waterstofatoom dankbaar lesmateriaal omdat het niet al te moeilijk is de verschillende energietoestanden van het atoom te berekenen. Nu is alleen van belang te weten dat het elektron zich slechts in bepaalde banen kan bevinden. Welke deze banen precies zijn wordt door de kwantumfysica beschreven. Een hogere baan van het elektron impliceert een hogere energietoestand voor het atoom. Zoals overal in de natuur zal ook het waterstofatoom in de laagste energietoestand willen blijven. Als een electron van een hogere naar een lagere baan terugkeert gaat dit gepaard met de afgifte van energie in de vorm van straling, Deze heeft een golflengte die omgekeerd evenredig is met de hoeveelheid vrijgekomen energie: hoe groter het energieverschil tussen twee toestanden van het atoom, des te korter de golflengte.

Omdat er honderden elektronbanen mogelijk zijn kan waterstofatoom straling afgeven bij een reeks van golflengtes en een zogenoemd lijnenspectrum geven. Straling bij alleen die discrete golflengtes die volgens de kwantumfysica overeenkomen met de energieverschillen tussen de

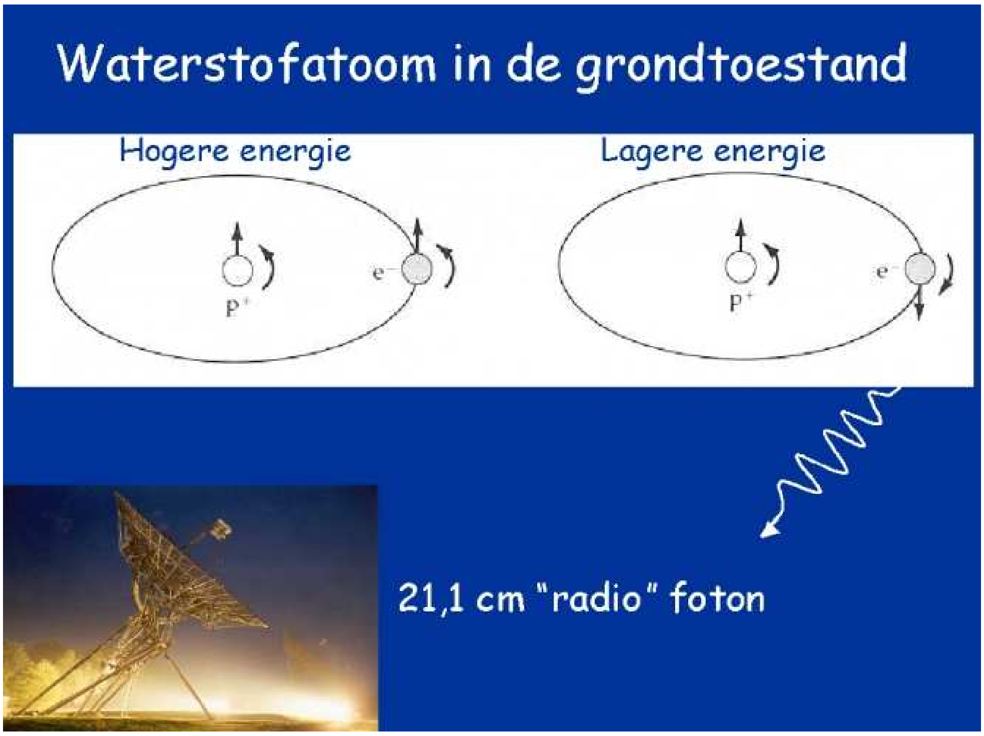



verschillende banen van het elektron. Dit lijnenspectrum begint in het gebied van de ultraviolette straling en strekt zich via het golflengtegebied van zichtbaar en infrarood licht uit tot in het gebied van de radiogolven. Het proces dat ik net geschetst heb heeft betrekking op waterstof dat veel energie toegevoerd krijgt. Meestal gebeurt dit onder invloed van een sterk stralingsveld,



bijvoorbeeld in de omgeving van massieve, hete sterren. Metingen van dit lijnenspectrum in het optische, infrarode en radiogolflentegebied geven informatie over fysische eigenschappen van dit gas zoals temperatuur, dichtheid en druk. Ik wil het vandaag echter niet over dit hete (zo'n 10000 graden celcius) waterstofgas hebben maar over het koelere deel van het interstellaire gas, gas met een temperatuur van -250 tot 0 graden celcius.

Als we het waterstofatoom niet blootstellen aan intense straling zal het zich in de laagste energietoestand bevinden, de grondtoestand. Er zijn echter ook hier twee toestanden mogelijk afhankelijk van de richtingen waarin het proton en het elektron om hun eigen as tollen. Het proton en elektron draaien net als zon en aarde elk om hun as, en de laagste energietoestand is die waarin de draairichting tegengesteld is. Het atoom zal ten allen tijde proberen in deze toestand terug te vallen. Door botsingen tussen atomen onderling zal een deel in de hogere energietoestand komen. Het terugvallen in de lagere energietoestand duurt helaas heel lang: ongeveer elf miljoen jaar. Er zijn echter zoveel waterstofatomen in de interstellaire ruimte (een typische gaswolk in de Melkweg bevat meer dan $10^{60}$ waterstofatomen) dat er op elk moment voldoende naar de laagste energietoestand terugvallen dat we een waarneembaar signaal krijgen. Het energieverschil tussen deze twee toestanden is klein, dus is de golflengte van de geproduceerde straling lang: 21,1 cm. Dit zijn radiogolven en de corresponderende radiofrequentie is 1420,405752 MHz. Dit is het frequentiegebied van bijvoorbeeld lange afstandsradar.




**De 21-cm lijn**

Het was Jan Oort die in de nadagen van de tweede wereldoorlog Henk van de Hulst ertoe bewoog te berekenen of het mogelijk zou zijn om de radiostraling van waterstofatomen in de grondtoestand te meten. Van de Hulst kwam tot de conclusie dat de 21-cm lijn van waterstof waarneembaar moest zijn en publiceerde in 1944 zijn bevindingen in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. Sinds die belangrijke ontdekking werd op drie plaatsen in de wereld hard gewerkt aan apparatuur om dit ook proefondervindelijk te bevestigen: in Kootwijk, met behulp van een 7.5 meter radarantenne uit de tweede wereldoorlog, op Harvard in de Verenigde Staten en in Sydney, Australië. Dit leidde in1951 tot publicaties in Nature van de Nederlandse en Amerikaanse groepen (Oort en Muller en Ewing en Purcell), met een addendum van de Australische groep (Pawsey, Christiansen en Hindman). Sinds die tijd heeft het 21-cm lijnwerk een enorme vlucht genomen en zijn we tot op de dag van vandaag nog steeds niet uitgekeken op wat dit eenvoudige atoom ons aan informatie verschaft.

Henk van de Hulst bespreekt de 21-cm lijn op de Leidse Sterrenwacht

Met behulp van de Kootwijk telescoop hebben van de Hulst, Muller en Oort (1954) de eerste kaart gemaakt van de waterstof in de Melkweg, voor zover deze zichtbaar is vanaf het noordelijk halfrond. Dit werd later aangevuld met metingen van de zuidelijke hemel door Frank Kerr en medewerkers wat leidde tot de publicatie van de zogenoemde Leiden/Sydney survey door Oort, Kerr en Westerhout in 1958. Dit soort werk is met enige regelmaat herhaald om met meer detail en grotere precisie de waterstof in de Melkweg in kaart te brengen. De laatste van deze surveys was tevens het laatste grote project met de Dwingeloo radiotelescoop, ooit de grootste radiotelescoop ter wereld: de Leiden/Dwingeloo survey van Hartmann en Burton (1997)

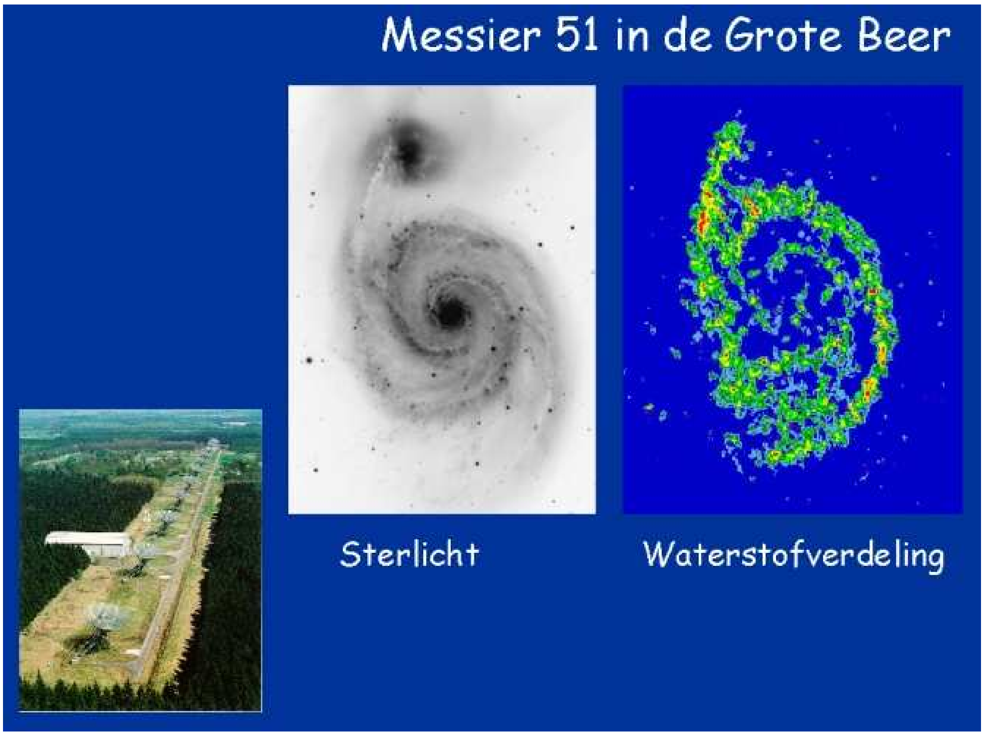
Oort realiseerde zich dat de 21-cm lijn van neutraal waterstof niet alleen informatie geeft over de hoeveelheid gas in de Melkweg, maar ook over de bewegingen van de gascomplexen dankzij het Doppler effect. Door dit effect verandert de golflengte van het waargenomen signaal als het stralende object zich ten opzichte van de waarnemer beweegt. Als de gaswolken zich van de waarnemer afbewegen wordt de golflengte van de waargenomen straling langer. Komt het gas op de waarnemer af dan wordt de golflengte korter en de relatieve verandering is recht evenredig met de snelheid. Hierdoor kunnen we de snelheden van het gas in de Melkweg meten. Dit blijkt netjes in cirkelbanen rond het centrum van de Melkweg te bewegen. We kunnen dit op dezelfde manier interpreteren als de bewegingen van de aarde en planeten in het zonnestelsel, namelijk als een logisch gevolg van het zwaartekrachtsveld van de Melkweg dat in balans is met de centrifugale krachten van de snel ronddraaiende gasschijf. Dit betekent dat we uit de snelheden van de ronddraaiende gasschijf af kunnen leiden wat de sterkte is van het zwaartekrachtsveld en dus wat de verdeling is van alle massa in de Melkweg.


**De structuur en dynamica van melkwegstelsels**

Ik maak nu een sprong naar de zeventiger jaren, toen de Westerbork Synthese Radio Telescoop gereed kwam. De Westerbork telescoop was in het begin niet geschikt voor 21-cm lijnwerk. Met een ingenieuze ingreep werd het ontvangersysteem geschikt gemaakt voor 21-cm lijnwerk (Allen, Hamaker en Wellington, 1974). Dit was het begin van een belangrijke periode voor het Kapteyn Instituut waarin grote nadruk lag op het gebruik van de Westerbork telescoop voor het in kaart brengen van de verdeling en de bewegingen van neutraal waterstofgas in nabije melkwegstelsels. Het is in deze periode dat ik zelf bezig was met de eindfase van mijn studie en begon aan een promotieonderzoek. Het was een tijd waarin staf, studenten en promovendi samenwerkten om de finesses van spectrale lijn synthesewaarnemingen te doorgronden. De expertise die sinds die tijd is opgebouwd bleek een goed fundament voor de reputatie die het Kapteyn Instituut op dit gebied heeft. De eerste lijnwaarnemingen van nabije melkwegstelsels gaven een groot aantal nieuwe gezichtspunten, waarvan ik er een paar wil noemen.

**De gasverdeling**

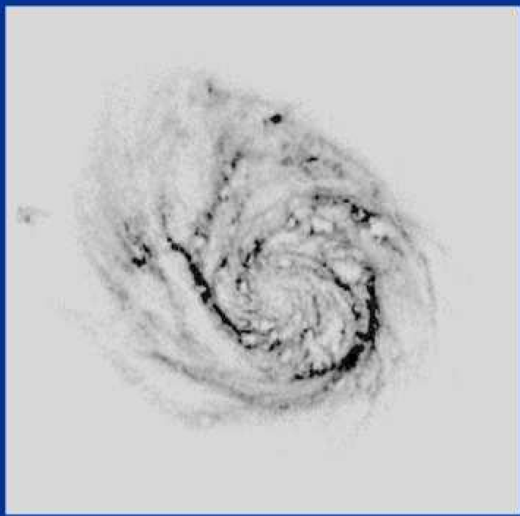
De verdeling van het waterstofgas bleek anders dan die van het licht van de sterren. De grootste overeenkomst bestond hieruit, dat de spiraalstructuur die het licht van de voornamelijk jonge sterren in veel melkwegstelsels laat zien, ook in het waterstofgas zichtbaar is. Voor het overige is de waterstofverdeling minder sterk geconcentreerd naar het centrum en in het algemeen veel uitgestrekter dan de lichtverdeling. Pas later bleek dat een deel van de waterstof ook in moleculaire vorm aanwezig is met een verdeling die meer lijkt op de lichtverdeling van de sterren. Dit kunnen we op een indirecte manier meten aan de hand van de lijnstraling van CO



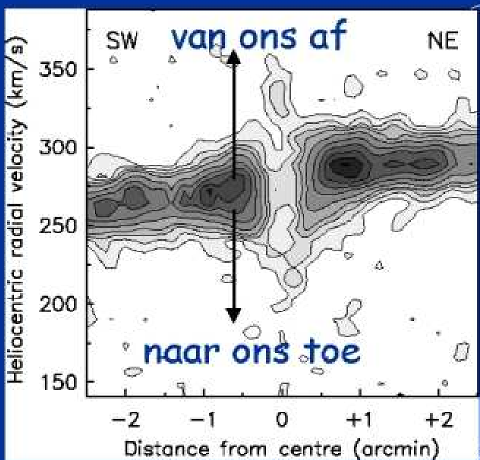

moleculen die door botsingen met waterstofmoleculen worden geëxciteerd. Deze CO lijnen bevinden zich in het mm-golflengtegebied. Er is een globale relatie tussen gebieden met de grootste gasdichtheid en de plaatsen waar massieve sterren vormen. Ruwweg gesproken heeft men kunnen afleiden dat sterren vormen als de gasdichtheid boven een kritische grens is. Deze grens is een globaal af te leiden dynamisch criterium voor de stabiliteit van een gasschijf dat we in melkwegstelsels met behulp van de radiowaarnemingen kunnen testen.

Kijken we in meer detail naar de structuur van het interstellaire waterstofgas dan blijkt deze in nabije stelsels, waar de waarnemingen voldoende scherpte (oplossend vermogen) en gevoeligheid hebben, nogal complex te zijn. Het doet een beetje denken aan de structuur die we soms zien in de bewolking in de aardatmosfeer. Naast grote, goed gedefinieerde wolken is er vaak ook een netwerk van filamenten en schil- en bolvormige structuren zichtbaar. Er zijn langzamerhand steeds meer concrete aanwijzingen dat er een wisselwerking is tussen het gas waaruit de sterren vormen en de sterren zelf. Vooral de grote, zware sterren, die slechts kort maar heftig leven, produceren tijdens de laatste fase van hun bestaan sterke sterrenwinden en exploderen uiteindelijk als supernova. De grote hoeveelheid energie die hierdoor in het interstellair gas wordt gedeponeerd, blaast het gas weg van de plaats waar de massieve sterren zijn gevormd. Deze lege plekken in de gasverdeling zijn duidelijk te zien in waarnemingen en in een paar gevallen hebben we ook aan kunnen tonen dat het gas weggeblazen wordt, soms met snelheden van meer dan honderdduizend kilometer per uur.

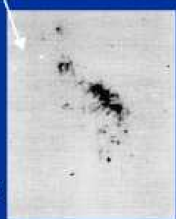
## M 101 : in zichtbaar licht en in de 21-cm lijn van atomair waterstof



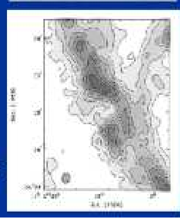
## Waterstof beweegt uit het melkwegvlak:



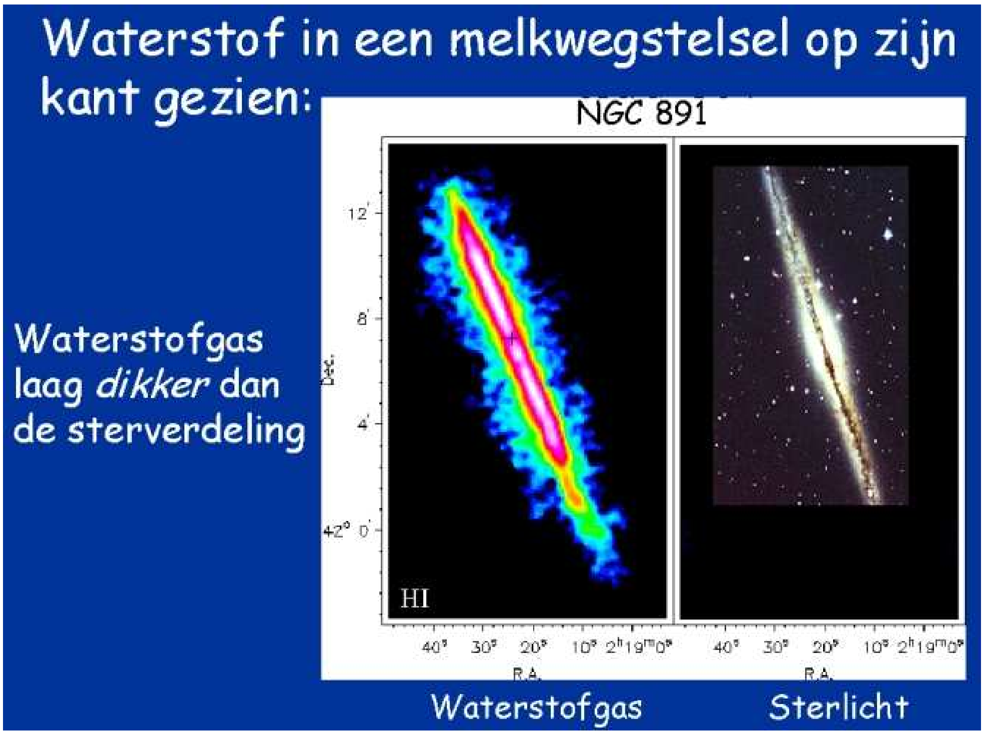

Heet waterstof



Koel waterstof



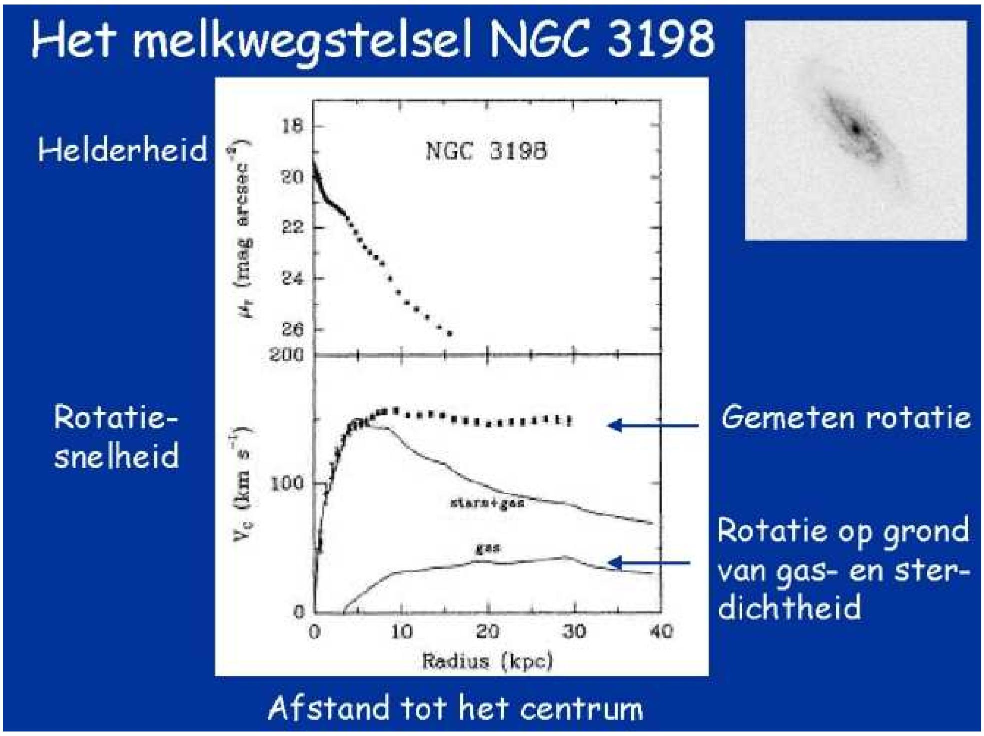
In waarnemingen van een melkwegstelsel op zijn kant zien we dan ook dat een deel van het waterstofgas zich ver boven het vlak van het afgeplatte melkwegstelsel bevindt, vermoedelijk eruit gedreven door de massieve sterren en supernovae. De snelheden zijn niet hoog genoeg om aan het zwaartekrachtsveld van het stelsel te ontsnappen en dit gas zal weer langzaam terugvallen in de schijf. Waar precies en wanneer weten we niet. Het lijkt op een soort van gestage gasfontein in melkwegstelsels. Er zijn wel modellen gemaakt die deze gasstromen beschrijven, maar er zijn nog onvoldoende waarnemingen om ze mee te vergelijken. Met de verhoogde gevoeligheid van de Westerbork telescoop zijn we nu pas in staat dit gas in meer detail te bestuderen en daar is ook nu lopend promotieonderzoek op gericht.




Wat betreft de hoeveelheid waterstof in melkwegstelsels blijkt er een grote variëteit te zijn die afhangt van het type melkwegstelsel. De kleine, en vaak onregelmatige, stelsels zijn in het algemeen gasrijk en hebben 20 – 30 % van hun totale massa in de vorm van gas. De melkwegstelsels met grote centrale sterconcentraties, vaak grote stelsels, zijn minder gasrijk, met slechts 10 – 20 % van hun massa in de vorm van interstellair gas. Extreem gasarm zijn de elliptische stelsels, zo genoemd omdat hun lichtverdeling een ellipsoidale vorm heeft. Deze stelsels hebben weinig gas en stof (minder dan 5% in massa), zij het dat de inzichten hier de laatste tien jaar ook sterk veranderd zijn. Ik kom hier straks nog op terug.

**De donkere materie**

Omdat de neutrale atomaire waterstof veel uitgestrekter is dan de lichtverdeling, kunnen we door de Dopplerverschuiving van de 21-cm lijn de rotatiesnelheden meten tot ver naar buiten. Omdat de snelheden een maat zijn voor de gravitatiekracht kunnen we ze gebruiken om de massa van melkwegstelsels te bepalen. De grootste verrassing eind zeventiger jaren was dat de rotatiesnelheid in de buitendelen van melkwegstelsels nauwelijks bleek af te nemen, iets wat op grond van de lichtverdeling van melkwegstelsels wel werd verwacht. Het eerste Groningse werk op dit gebied is het promotieonderzoek van Bosma (1978) gevolgd door de latere en meer gedetailleerde studies van Wevers (1984), Begeman (1987) en Broeils (1992). De meeste melkwegstelsels bleken tenminste tweemaal zoveel massa in hun buitendelen te hebben dan er in de vorm van gas en sterren werd gevonden. Dat wil zeggen, als we de bewegingen van het gas toeschrijven aan de klassieke wet van Newton die het zwaartekrachtsveld van een massaverdeling beschrijft. Dit is de zogenoemde donkere materie. Waaruit deze bestaat is tot op heden



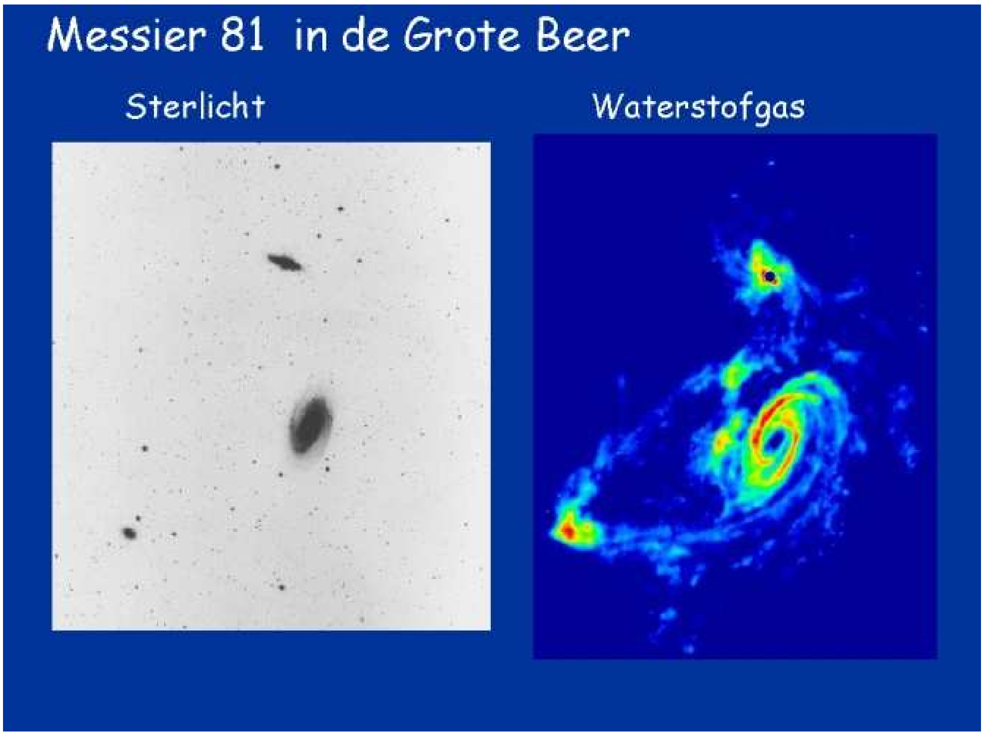

onduidelijk. Wel is duidelijk dat deze donkere materie, vermoedelijk een min of meer bolvormige verdeling van onzichtbare massa rond de sterren en het gas, een belangrijke rol is gaan spelen in de kosmologische theorieën die nu het meest in trek zijn. Het donkere materie probleem is nog onopgelost en inspireert nog steeds nieuw onderzoek. Met name alternatieve methodes om de massadichtheid in objecten te meten zijn belangrijk in aanvulling op de klassieke methode zoals hier geschetst. Een succesvolle nieuwe aanpak is om gebruik te maken van het feit dat licht in een sterk zwaartekrachtsveld afbuigt en een melkwegstelsel of een groep melkwegstelsels werkt als een lens op het licht van achterliggende objecten, een gravitatielens. Door de vervorming van de lichtweg te meten is het mogelijk de massa af te schatten die voor het afbuigen zorgt.

Eind zeventiger jaren werd de aanwezigheid van donkere materie weliswaar aangetoond, maar er is nog steeds geen goed algemeen beeld van de verdeling van de donkere materie en de relatie tot de lichtende materie. Om een goed idee te krijgen van de systematiek bleek het nodig om de massaverdeling in een groot aantal melkwegstelsels in kaart te brengen. Er was een representatieve steekproef nodig. In 1992 begon in Groningen onder leiding van collega van Albada een groot Westerbork project, WHISP genaamd, dat tot doel had vele honderden nabije melkwegstelsels met de Westerbork telescoop in kaart te brengen in de 21-cm lijn. De waarnemingen zijn nu gedaan en de balans is dat we voor 380 objecten van verschillend type en een grote range in helderheid, goede 21-cm lijngegevens beschikbaar hebben.


Voor een subklasse van deze stelsels, de gasrijke, kleine stelsels die meer dan 20% van hun massa in de vorm van waterstof hebben, zijn de donkere materie eigenschappen al goed bekeken (Swaters 1999). De minder gasrijke melkwegstelsels, met name de stelsels die in hun centrale delen gedomineerd worden door grote sterconcentraties, worden nu onder de loep genomen. Om deze goed te kunnen waarnemen hebben we gewacht tot een paar jaar geleden, toen de Westerbork telescoop nieuwe ontvangers kreeg. De gevoeligheidsverbetering van een factor voor lijnmetingen bracht deze minder gasrijke melkwegstelsels binnen bereik. Het onderzoek is dus nog in volle gang en de uiteindelijke antwoorden laten nog een paar jaar op zich wachten. Inmiddels is wel duidelijk dat de kleine, gasrijke stelsels veel donkere materie bevatten, maar dat deze voornamelijk in de buitendelen een overheersende rol speelt.

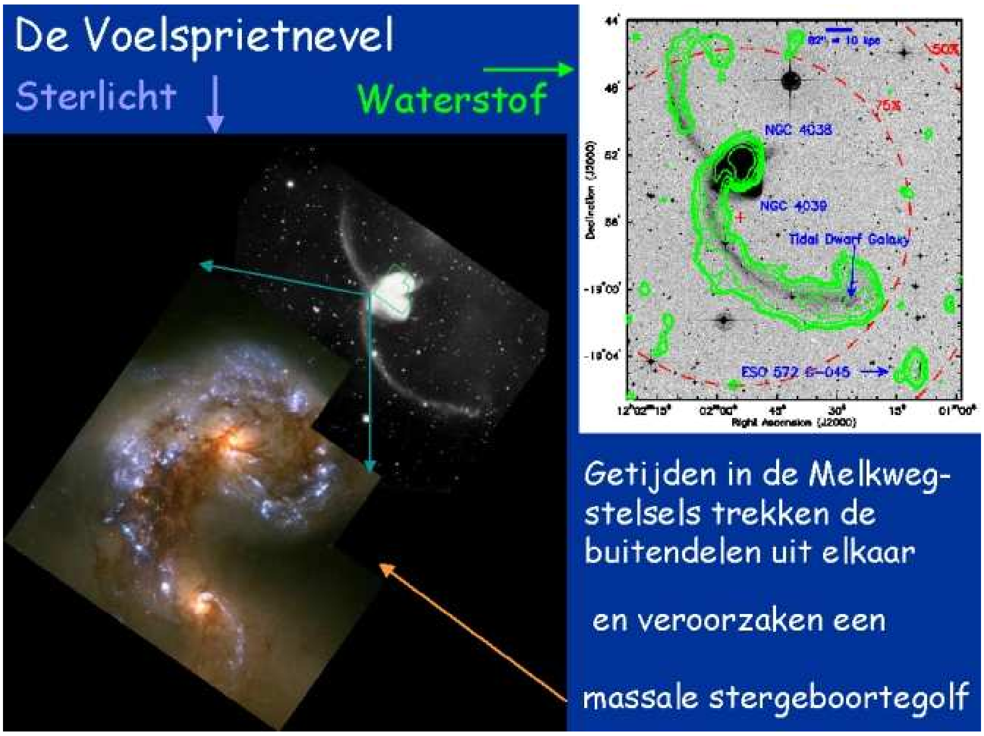
**Getijden in en het samensmelten van melkwegstelsels**

Omdat de melkwegstelsels zo uitgestrekt zijn in waterstof, is het ook een bij uitstek geschikte component om de effecten van stelsels op elkaar te bestuderen. Melkwegstelsels die relatief dicht bij elkaar staan, zullen elkaar beïnvloeden en getijden veroorzaken in elkaars gasverdelingen, net zoals de getijden van de oceanen op aarde onder de invloed van de zwaartekracht van de maan. Een buitengewoon goed voorbeeld is het nabije melkwegstelsel Messier 81 in het sterrenbeeld de Grote Beer dat drie begeleiderstelsels heeft die een enorme chaos veroorzaakt hebben in de gasverdeling (Yun 1992). Het noordelijke stelsel heeft als gevolg van deze getijdenwerking een enorme stergeboortegolf in zijn centrum, die een gigantische uitstoot van materiaal veroorzaakt. Dit melkwegstelsel staat model voor dit soort verschijnselen in verre melkwegstelsels. Er blijkt namelijk een klasse van objecten te zijn met hele heldere centra ten gevolge van dergelijke massale stergeboortegolven. In veel gevallen blijkt dat het dan gaat om melkwegstelsels die niet slechts getijdenwerking op elkaar uitoefenen, maar stelsels die door hun onderlinge nabijheid samengesmolten zijn, met alle gevolgen van dien.




Ook dit samensmelten van melkwegstelsels kan bij uitstek worden bestudeerd aan de hand van de verdeling en de bewegingen van het waterstofgas is zulke systemen. Baanbrekend werk op dit gebied is gedaan door de Amerikaanse sterrenkundige Hibbard (1996). Hij maakte een uitgebreide studie van een dozijn samensmeltende melkwegstelsels in verschillende stadia van dit proces. Daarnaast bestudeerde hij met zijn medewerkers ook een zevental van de eerder genoemde melkwegstelsels met hele heldere centra en toonde aan dat deze twee groepen in veel opzichten op elkaar lijken. Zonder de hulp van de radiowaarnemingen van het waterstofgas had dit niet vastgesteld kunnen worden.

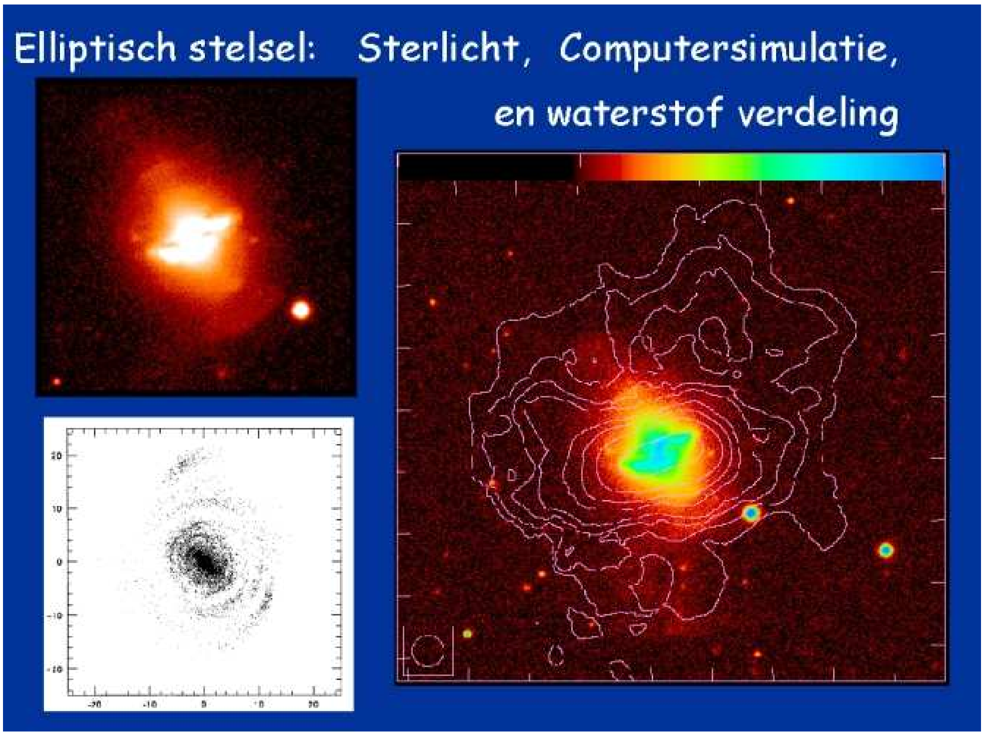
Nu de gedetailleerde verdeling en bewegingen van het gas bekend zijn kunnen ze worden vergeleken met geavanceerde computermodellen van melkwegstelsels. We kunnen nagaan wat voor eigenschappen de model-melkwegstelsels moeten hebben om de waargenomen verschijndelen te kunnen verklaren. Wat is bijvoorbeeld de rol van de donkere materie bij het proces van interactie en samensmelten? Alles wordt immers in dit proces gedomineerd door de zwaartekracht en de modellen hebben ook voornamelijk de zwaartekracht redelijk goed in rekening genomen. Effecten van gasdynamica, stervorming, etc. zijn in de modellen tot nu toe slechts in primitieve vorm geïmplementeerd. Dit is wel aan verandering onderhevig en de waarnemingen kunnen hier een goede leidraad vormen. Het zal uiteindelijk heel informatief zijn als we erin slagen goede modellen van melkwegstelsels te maken en daar mee in de computer kunnen "spelen".




Een ander interessant gegeven uit de eerste jaren van 21-cm lijnwerk in melkwegstelsels is dat in sommige gevallen de gaslaag niet recht is maar in de buitendelen ombuigt, zoals ezelsoren aan de rand van een veelgelezen bladzijde in een boek. De technische term is het engelse woord “warp”. Deze “warps” blijken volgens een zeer recent promotieonderzoek in Groningen (Garcia-Ruíz, 2001) regelmatig voor te komen. Sterker nog: ieder melkwegstelsel waarin de waterstofverdeling uitgestrekter is dan de lichtverdeling, vertoont een “warp” buiten de waarneembare sterschijf. Blijkbaar is daar de gaslaag nogal los. Er blijkt een verband met de grootte van de “warp” en de mate van asymmetrie en de aanwezigheid van andere melkwegstelsels in de buurt. Ook hier getijdenwerking?

Ook wil ik hier nog even terugkomen op wat ik eerder zei over de hoeveelheid gas in elliptische melkwegstelsels. Er is een klasse van elliptische stelsels die wél redelijke hoeveelheden waterstof hebben, tenminste een paar procent van hun totale massa. Het beeld dat de laatste vijf jaar is ontstaan, is dat zeker een kwart van de bekende elliptische stelsels waterstof heeft gestolen van kleine begeleiderstelsels. Dat blijkt uit het feit dat zulke gasrijke elliptische stelsels vaak iets speciaal hebben, zoals de aanwezigheid van stof, zwakke en onregelmatige optische structuren rond het elliptische stelsel, mogelijk de overblijfselen van de opgeslokte begeleiders. Computermodellen, zoals eerder beschreven, laten ook zien dat dergelijke structuren kunnen vormen door het opslokken van een begeleider. Ook hier weer helpt het in kaart brengen van de waterstof om de historie van deze stelsels beter te begrijpen. De omgeving blijkt steeds een bepalende rol te spelen. Nieuwe projecten met de grotere gevoeligheid van de Westerbork telescoop zijn dan ook vaak gericht op het beter bepalen van de omgeving van melkwegstelsels.

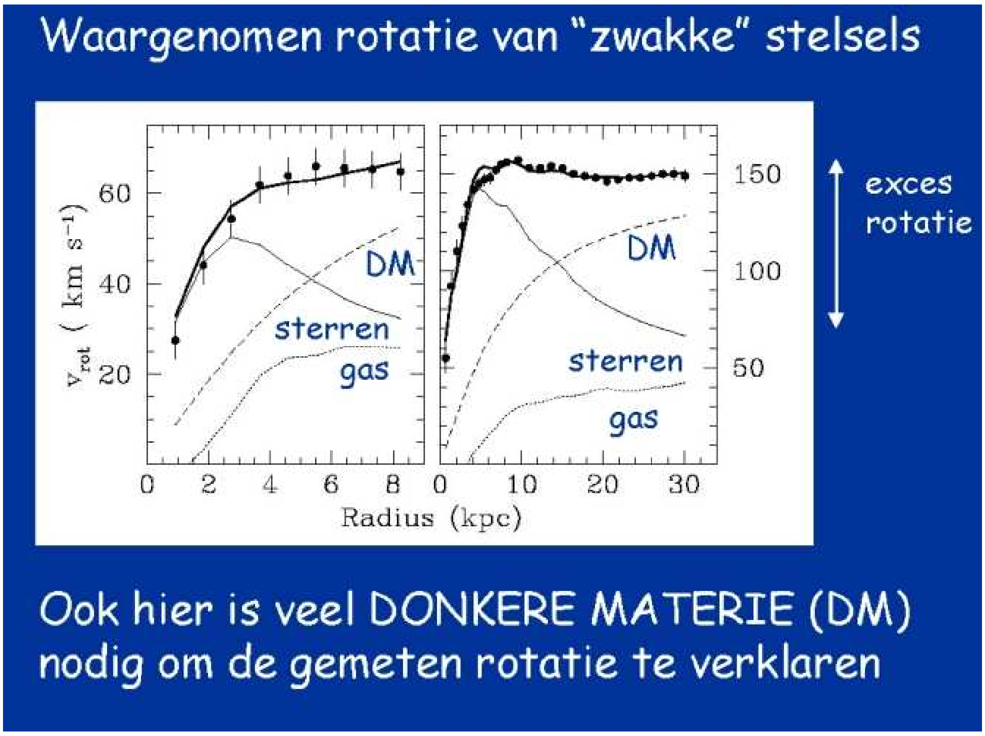
Met name de vraag hoe het precies zit met kleine, gasrijke begeleiders is nog steeds niet goed beantwoord. Over een aantal jaren hebben we hopelijk een beter beeld.




**Onderontwikkelde melkwegstelsels?**

Sinds eind tachtiger jaren is het aantal bekende melkwegstelsels explosief gegroeid. Dit is voornamelijk te danken aan groots opgezette surveys van de hemel. Oorspronkelijk op fotografisch materiaal, maar nu ook met behulp van grote elektronische camera's. Een klasse melkwegstelsels die hierbij letterlijk gesproken aan het licht kwam waren objecten met een hele lage oppervlaktehelderheid. Melkwegstelsels die zo lichtzwak zijn dat de door de oudere surveys niet werden ontdekt. De studie van het gas in deze melkwegstelsels is in Groningen begonnen en ik heb daar een aandeel in mogen hebben. Deze melkwegstelsels bleken in allerlei opzichten een achterstand te hebben in hun ontwikkeling. Er waren diverse aanwijzingen dat deze objecten minder sterren gevormd hebben dan de heldere tegenhangers die tot tien jaar geleden de hoofdmoot van diverse studies vormden. Ze hadden relatief veel waterstofgas en uit optische spectroscopie bleek dat het interstellaire gas niet erg rijk was aan zuurstof, een element waarvan we vrij makkelijk de concentraties kunnen meten. Zuurstof en ook de andere elementen zwaarder dan waterstof worden in sterren gemaakt die aan het eind van hun leven deze producten weer afstaan aan het omringende medium. Dus was de conclusie dat deze lichtzwakke stelsels minder actief sterren hadden gevormd. Er is nog een heleboel gas over en ook de gemiddelde gasdichtheid bleek aan de lage kant te zijn in vergelijking met de dichtheid die nodig is om grootschalige instabiliteiten, en dus de voortdurende vorming van sterren, in de gasschijf te onderhouden (de Blok 1997).


De hamvraag blijft waarom dit zo is. Wat bepaalt of een melkstelsel zich normaal ontwikkeld of daarin achterblijft, zoals deze stelsels met lage oppervlaktehelderheid. Welk van de twee is nu normaal? Er is een vage aanduiding dat dit met de omgeving te maken kan hebben. De laatstgenoemde stelsels komen meer voor in delen van het heelal waar de lokale dichtheid van



stelsels aan de lage kant is. Dit betekent dat er minder verstoringen door begeleiderstelsels zijn geweest. Omdat dit soort verstoringen, zoals we hebben gezien, aanzet tot verhevigde stervorming, is het goed denkbaar dat een meer geïsoleerd melkwegstelsel een rustiger ontwikkeling doormaakt.

Ook deze melkwegstelsels hebben donkere materie. Hun donkere materiehoeveelheid is in het algemeen groter dan dat in de heldere tegenhangers. De verdeling van de donkere materie is nog onvoldoende bekend, evenals inde heldere stelsels, zodat we nog geen vergelijking tussen de twee groepen kunnen maken en geen flauw idee hebben of er verschillen zijn (bijvoorbeeld in centrale concentratie van de donkere materie), laat staan uitspraken kunnen doen over de rol die de donkere materie speelt bij de evolutie van melkwegstelsels. Misschien dat de ontwikkeling van melkwegstelsels door én de donkere materieverdeling én de omgeving wordt bepaald. Ook hier ligt nog veel werk voor de toekomst.

**De toekomst**

Er zijn zeker meer voorbeelden te geven van 21-cm lijnwerk, maar gezien de tijd heb ik me beperkt tot een aantal hoogtepunten. Ik hoop duidelijk gemaakt te hebben dat de mogelijkheid om met behulp van een radiotelescoop de neutrale waterstof in melkwegstelsels waar te nemen een stukje onmisbare informatie geeft, die ons helpt om de eigenschappen, het ontstaan en de evolutie van melkwegstelsels te begrijpen. Het zal duidelijk zijn dat we tot nu toe slechts een goed beeld hebben gekregen van de melkwegstelsels in het nabije heelal. Omdat de reistijd van de straling die we meten navenant kort is geweest (hooguit een paar honderd miljoen jaar, terwijl het heelal

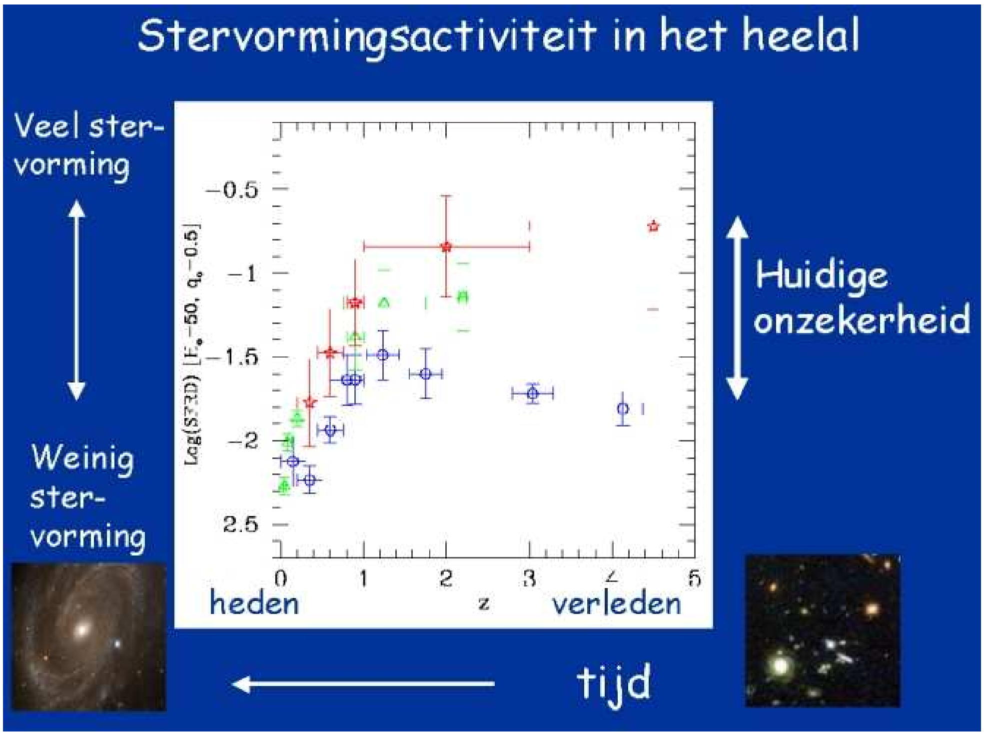

en de oudste sterren zo’n 15 miljard jaar oud zijn) kijken we naar oude melkwegstelsels. Om jonge melkwegstelsels te vinden moeten we “verder weg” kijken, dat wil zeggen: verder terug in de tijd. Immers, door de eindige snelheid waarmee straling door de ruimte reist, kijken we altijd terug in de tijd: 1 seconde naar de maan, 8 minuten naar de zon, 4 jaar naar de meest nabije ster, 2 miljoen jaar naar meest nabije melkwegstelsels aan de noordelijke hemel enzovoorts. Dus als we hele jonge melkwegstelsels willen bestuderen moeten we steeds verder kijken, zo ver mogelijk naar de grens van het waarneembare heelal.

Wat betekent dit nu in de praktijk? Het heelal ondervindt de naweeën van de Big Bang en dijt nog steeds uit. Zoal het zich nu laat aanzien mogelijk zelfs voor eeuwig. Het gevolg is dat de melkwegstelsels zich van elkaar af bewegen en wel op zo'n manier dat de relatieve snelheid groter is als de onderlinge afstand groter is. Met andere woorden, dank zij de regelmatige uitdijing van het heelal kunnen we de afstand tot verre melkwegstelsels bepalen, gewoon door de snelheid te meten waarmee ze zich van ons afbewegen. Ook hier komt het Doppler effect ons weer van pas. Door de verschuiving van spectraallijnen naar langere golflengtes te bepalen kunnen we de relatieve snelheid en dus de afstand meten. Voor de 21-cm lijn betekent dit dat we naar steeds langere golflengtes of lagere frequenties moeten gaan en dit levert beperkingen op. Een van de beperkingen is dat we moeten gaan meten in een gebied van het radiospectrum waar geen radiostilte heerst en allerlei aards gebruik van radiogolven wordt gemaakt (TV, communicatie, gsm, radar) wat voor de radiosterrenkunde alleen maar storend is. Ook wordt de hemelachtergrond op lagere frequenties steeds helderder, zodat het moeilijker wordt de zwakke signalen van melkwegstelsels te detecteren. Met de vernieuwde systemen in Westerbork kunnen we nu een factor drie gevoeliger kijken en daardoor ook ietsje verder weg. Er zijn al een aantal projecten gestart om deze nieuwe mogelijkheden te benutten en de waterstof in melkwegstelsels op afstanden van een paar honderd miljoen tot twee miljard lichtjaar te bestuderen. Deze projecten zijn een eerste verkenning, heel interessant, maar uiteindelijk door gebrek aan gevoeligheid beperkt.

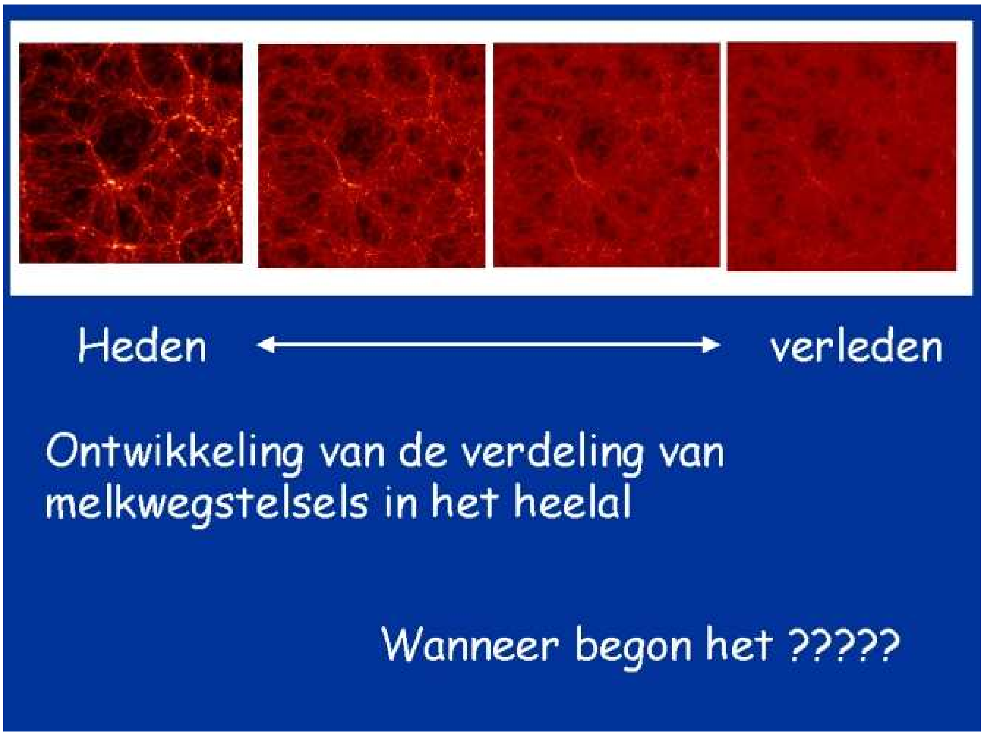
Hoe dan verder? De technologische ontwikkelingen op het gebied van gevoelige ontvangers zijn nu zo ver gevorderd dat niet meer de ontvangers de beperking zijn maar de ruisbijdrage van de hemelachtergrond. Om grotere gevoeligheid te kunnen halen zit er niets anders op dan het oppervlak van de telescoop te vergroten om op die manier meer straling op te kunnen vangen. Het oppervlak van de 14 telescopen van de Westerbork radiosterrenwacht is ongeveer 6800 vierkante meter. Om een honderdmaal betere gevoeligheid te halen is het nodig een telescoop te bouwen met een oppervlak van 1 miljoen vierkante meter, een vierkante kilometer. Plannen voor zo'n telescoop ontstonden meer dan tien jaar geleden en inmiddels is een internationaal consortium tot stand gekomen dat op allerlei fronten voorbereidingen treft voor het ontwerpen en bouwen van zo'n grote radiotelescoop. Deze zal in staat zijn het signaal van de neutrale waterstofatomen tot aan de grenzen van het heelal te meten. De realisatie van deze telescoop, die nog geen andere naam heeft dan de "vierkante kilometer telescoop" (de Square Kilometer Array, afgekort als SKA) ligt nog ver in de toekomst.

Toch is er wereldwijd al veel activiteit. In Nederland speelt de stichting ASTRON, die haar hoofdkwartier heeft in Dwingeloo en ondermeer de Westerbork telescoop exploiteert, hierin een belangrijke rol door te werken aan nieuwe technologie. Ik kom daar nog op terug. Het wetenschappelijk onderzoek dat door zo'n grote telescoop mogelijk wordt gemaakt bestrijkt een groot deel van de sterrenkunde. Ik wil me hier beperken tot twee onderwerpen die aansluiten bij het 21-cm lijn werk dat ik tot nu besproken heb en mijn persoonlijke belangstelling hebben.

Uit een groot aantal optische studies, onder meer met de Hubble ruimtetelescoop en de grote nieuwe optische telescopen, is duidelijk geworden dat er een periode is geweest, ongeveer 5 miljard jaar geleden, waarin er heel veel stervormingsactiviteit in melkwegstelsels was. Het heelal was toen ongeveer 10 miljard jaar oud. Dit is misschien ook een periode geweest waarin veel




grote melkwegstelsels zijn gevormd door het samensmelten van kleinere objecten. Een wijd verbreid idee over de vorming van melkwegstelsels is, dat er heel vroeg in het bestaan van het heelal heel veel kleine objecten zijn gevormd die na verloop van tijd zijn samengesmolten tot grotere melkwegstelsels: het zogenoemde hiërarchische vormingsscenario. Op dit moment

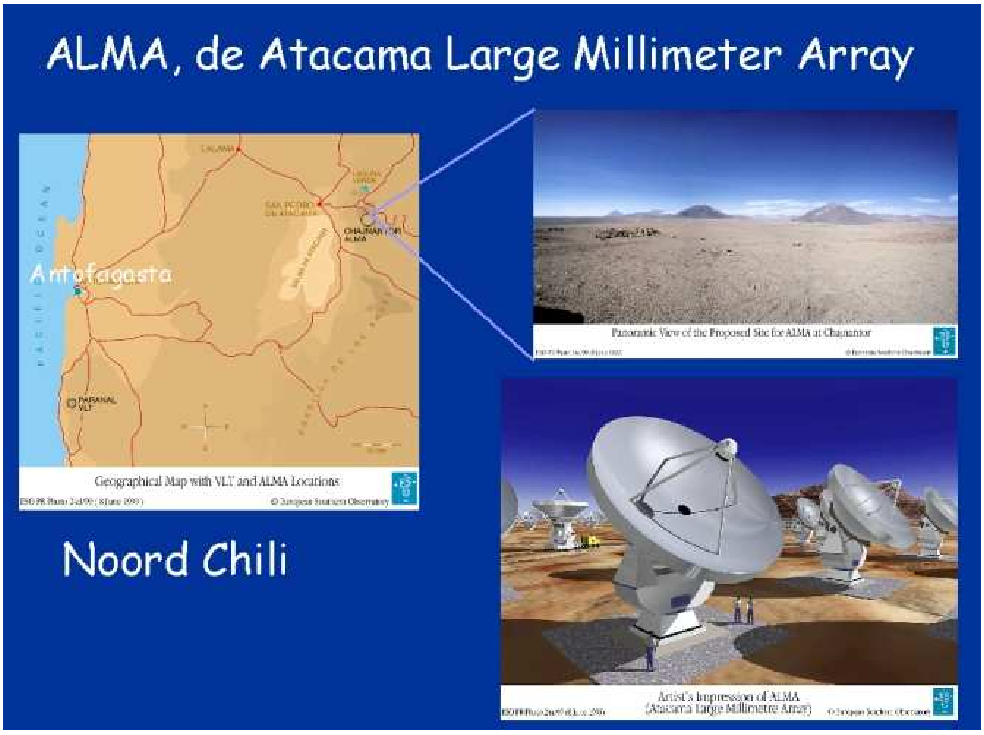


kunnen we in de 21-cm lijn niet verder terug kijken dan 2 miljard jaar. Met de vierkante kilometer telescoop zullen we wel verder terug kunnen kijken, zelfs voorbij die periode van actieve stervorming en wordt het mogelijk om te bepalen hoe en wanneer de melkwegstelsels hun gasvoorraad aanspreken en in sterren omzetten. Er is geen enkele andere manier om dit waar te nemen dan met een grote radiotelescoop. Het is een fascinerend idee om zo'n volkstelling van melkwegstelsels te kunnen houden tussen nu en het moment niet lang nadat de eerste melkwegstelsels zijn gevormd en de evolutie van melkwegstelsels in de tussenliggende periode te ontrafelen. Zullen de ideeën over de hiërarchische vorming kloppen?

Een tweede fascinerend idee is om echt de grens van het waarneembare heelal te verkennen. Om het moment dat de eerste sterren en melkwegstelsels vormen te bepalen. Dit is een belangrijk moment dat tot op heden nog niet is vastgesteld en dit kan alleen maar met een radiotelescoop. Het principe is niet erg ingewikkeld, hoewel de metingen technisch erg veeleisend zijn. In het vroege heelal bestaat de waarneembare materie voornamelijk uit waterstof. Deze waterstof is in stralingsevenwicht met zijn omgeving en daarom niet waarneembaar. We kunnen immers alleen objecten waarnemen als ze een andere helderheid hebben dan hun omgeving. Zijn ze helderder dan zien we het contrast met de omgeving. Als ze minder helder zijn dan kunnen we dit contrast natuurlijk ook zien, denk aan de donker lijkende zonnevlekken op het oppervlak van de zon. Als nu de eerste sterren en sterrenstelsels vormen zullen deze lokaal het waterstof een hogere temperatuur te geven dan de omgeving en dit signaal, mits sterk genoeg, kunnen we met een radiotelescoop waarnemen. Dit is als het ware het eerste "licht" in de duisternis van het vroege heelal. We weten niet precies op welk moment dit gebeurt, en ook niet op hoe grote schaal dit gebeurt. Maar met de vierkante kilometer telescoop zullen we dit te zijner tijd precies vast kunnen leggen.

Is de constructie van de vierkante kilometer telescoop nog ver weg, in de tussentijd zijn er wel twee andere radiotelescoopprojecten op gang gekomen.

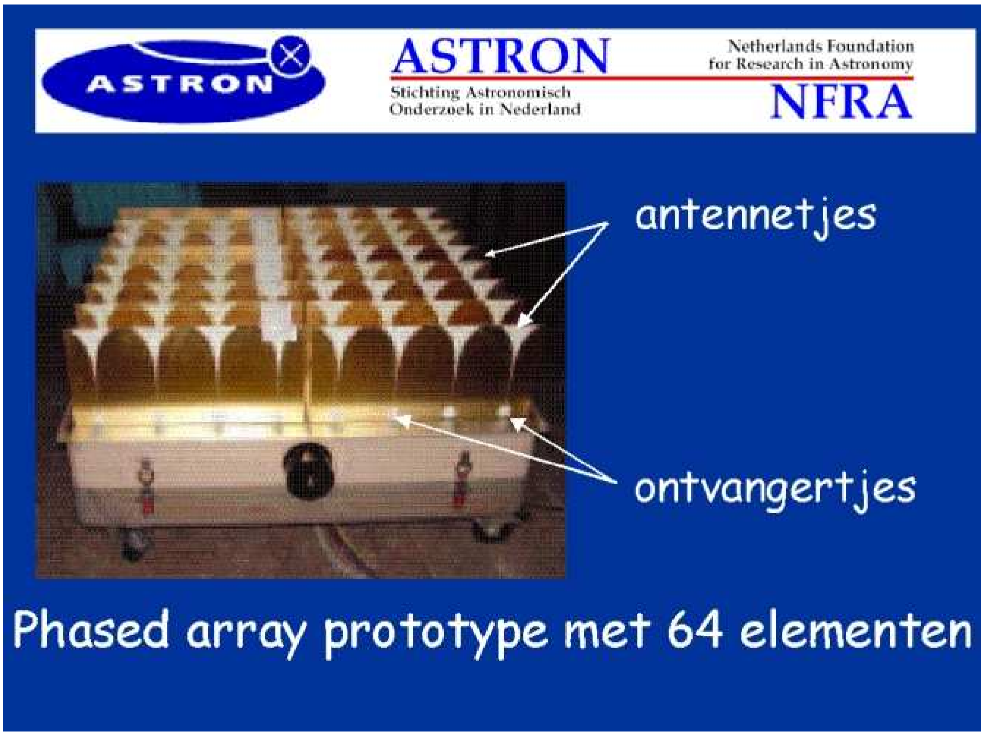
De eerste is de Atacama Large Millimeter Array, ALMA. Dit is een radiotelescoop die gebouwd gaat worden in een samenwerkingsverband tussen de Verenigde Staten, de European Southern Observatory, een samenwerking van 9 Europese landen waaronder Nederland, en mogelijk Japan. Deze telescoop zal het gebied van de hele korte golflengtes bestrijken, van 10 mm tot 0,3 mm en gebouwd worden op een hoge, droge vlakte inde Andes in noord Chili. Hoog en droog om zo




weinig mogelijk last te hebben van water en andere moleculen in de atmosfeer. Op deze hele korte golflengtes wordt het spectrum gedomineerd door lijnstraling van een enorme diversiteit aan moleculen en dat is ook één van de hoofddoelen van dit project: het bestuderen van moleculaire wolken in de interstellaire ruimte: de plekken waar sterrren en planeten vormen en waar de meest complexe verbindingen tot stand komen. Dit is het terrein van de astrochemie. ALMA zal bestaan uit 64 telescoopjes, elk met een diameter van 12 meter, uitgespreid over een gebied van 10 kilometer. ALMA is een synthese telescoop zoals de Westerbork telescoop, en zal een scherpte halen die beter is dan die van de Hubble ruimtetelescoop. Het zal met ALMA mogelijk zijn om in de Melkweg structuren met de afmeting van ons zonnestelsel in kaart te brengen. Ook zal ALMA het veel voorkomende CO molecuul kunnen meten in melkwegstelsels tot dichtbij de grenzen van het heelal. Zoals eerder genoemd kunnen we met CO indirect de hoeveelheid moleculair waterstof in de interstellaire ruimte bepalen. Omdat sterren vormen uit hele dichte gaswolken, waar de waterstof hoofdzakelijk in moleculaire vorm bestaat, is ALMA een uitstekend instrument om na te gaan waar stervorming op het punt staat uit te breken, of mogelijk al aan de gang is.

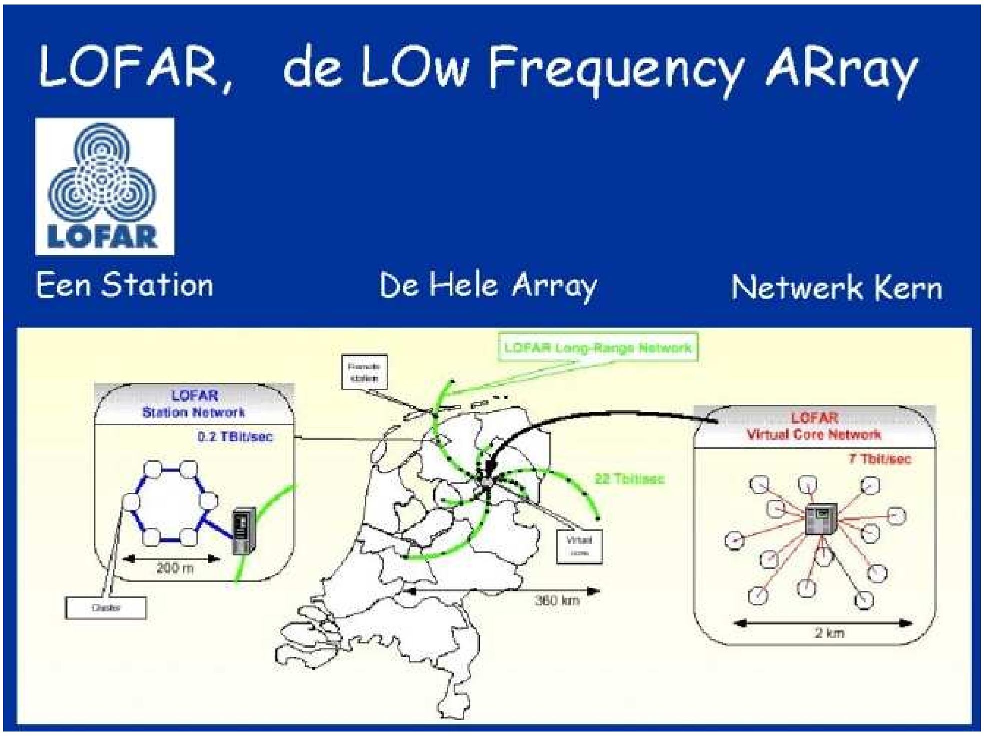

Het tweede project is LOFAR, de LOw Frequency ARray. Dit project is ontstaan uit een samensmelting van astronomische ideeën en technologische ontwikkelingen in het kader van de vierkante kilometer telescoop. De stichting ASTRON heeft de afgelopen vijf jaar gewerkt aan de zogenoemde "phased array" technologie, een methode die het mogelijk maakt om goedkoop een grote telescoop te maken. Het idee is als volgt: je construeert een oppervlak met een matrix van kleine antennetjes, bijvoorbeeld dipooltjes die elk hun eigen ontvangersysteempje hebben en je combineert de signalen van de individuele ontvangertjes elektronisch zoals bij een synthese telescoop. Bij het combineren de signalen van de individuele ontvangertjes is het mogelijk te bepalen in welke richting de complete matrix van antennetjes gevoeligheid heeft en in welke richtingen niet. Hoe meer antennetjes in de matrix, hoe beter dit kan. Zo kan ook elektronisch de richtingsgevoeligheid worden bijgestuurd en kunnen objecten aan de hemel worden gevolgd. Het grote voordeel van zo'n constructie is dat je geen bewegende delen hebt en dus minder onderhoud. Bovendien is honderd vierkante meter oppervlak van zulk materiaal aanzienlijk goedkoper dan een klassieke telescoop zoals de telescopen van de Westerbork array. Dit is belangrijk als je een telescoop van een vierkante kilometer wil bouwen.

De eerste kleine telescoopjes die van deze techniek gebruik maken zijn inmiddels gereed. Het gaat hier om kleine prototypes van een vierkante meter. De volgende stap is om een grotere telescoop te bouwen als prototype en daar ook sterrenkundig onderzoek mee te gaan doen. Deze volgende stap is LOFAR, een telescoop die zal werken in het laagfrequente deel van het spectrum tussen 10 en 240 MHz. Het gaat dan om radiogolven met lengtes tussen 1,25 en 30 meter. LOFAR is een samenwerking tussen de stichting ASTRON, de US Naval Research Laboratory en Haystack Observatory, vallend onder het Massachuchetts Institute of Technology. De oorspronkelijke sterrenkundige motivatie voor LOFAR kwam van de Leidse hoogleraar Miley die een aantal jaren geleden voorstelde om een telescoop t bouwen om de hemel bij hele lage frequenties in kaart te brengen, iets wat tot op heden nog niet gebeurd is. Beide initiatieven samen




hebben geleid tot het LOFAR project dat inmiddels goed op de rails staat. Een onlangs verworven subsidie van M€ 6,8 voor fase 2 ontwerpstudies zal hopelijk leiden tot de bouw van de telescoop.

LOFAR is technologisch een enorme uitdaging, vooral op het gebied van de gegevensverwerking en datacommunicatie infrastructuur. De telescoop zal bestaan uit een honderdtal elementen uitgespreid over een gebied van ongeveer 500 km. Elk element is dan een configuratie van antennes over een oppervlak van enkele tientallen meters. Het preciese ontwerp ligt nog niet vast.




Als het hart van de telescoop in noord-Nederland komt te liggen zou hij zich uitstrekken tot in noord- en midden-Duitsland. Het is de bedoeling dat LOFAR in 2006 gereed is. Ik noemde al dat LOFAR met name op het gebied van de informatietechnologie een grote uitdaging is. Dat betekent ook dat niet alleen de sterrenkundigen maar ook andere geïnteresseerden, ik denk aan de informatica, faciliterende diensten zoals het rekencentrum enzovoorts, in LOFAR mogelijkheden zullen hebben om hun specifieke interesses te herkennen en het project te gebruiken als proeftuin voor vergroting van kennis en het uitproberen van de nieuwste methodes en ideeën.

In het licht van mijn betoog over de 21-cm lijn van waterstof is het vermeldenswaard dat LOFAR in staat moet worden geacht de eerste tekenen van het oplichten van waterstof in het vroege heelal te kunnen detecteren. Een spannend vooruitzicht en misschien een eerste antwoord over vijf jaar.

## Dankwoord

Graag wil in tenslotte een kort dankwoord uitspreken. Allereerst dank ik het College van Bestuur, het Bestuur van de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen en de benoemingscommissie voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik hoop de komende jaren waar te kunnen maken wat van mij wordt verwacht.

Ik heb daar alle vertrouwen in omdat ik me gesteund weet door de collegae van het Kapteyn Instituut en in den lande, door medewerkers op het instituut, promovendi, studenten. Mijn speciale dank gaat dan ook uit naar hen allen. De immer stimulerende interactie met hen is altijd een grote steun en drijfveer geweest en zal dat in de toekomst ook blijven. Zonder hen zal het niet gaan.

Dames en heren studenten en promovendi. Met name jullie zullen de toekomst van de Nederlandse sterrenkunde een gezicht gaan geven. Het is voor een groot deel ook jullie enthousiasme en inzet waarop het onderzoek in de sterrenkunde drijft. Het onderwijs is aan verandering onderhevig. De invoering van de bachelor/master lijkt zijn eigen weg te gaan, gestuurd door de politiek. Binnen de kaders die daarvoor worden gesteld blijft het gelukkig nog steeds mogelijk goede sterrenkundigen op te leiden en het inzicht en de vaardigheid in, en het enthousiasme voor natuurwetenschappelijk onderzoek bij te brengen. Het doet er niet toe of jullie uiteindelijk een carrière in de sterrenkunde volgen of elders werk vinden. De algemene, wetenschappelijke vorming geeft een goed uitgangspunt voor allerlei carrièrepaden en het verheugt mij zeer dat de belangstelling voor de sterrenkunde de laatste jaren merkbaar is toegenomen. De dynamiek van dit onderzoeksgebied wordt blijkbaar breed erkend.

Ik dank iedereen met wie ik heb samengewerkt in de bijna 25 jaar sinds mijn promotie, hier op deze universiteit. In Charlottesville, Minneapolis, Westerbork, Dwingeloo en Groningen hebben veel collegae bewust en onbewust bijgedragen aan mijn vorming als wetenschappelijk onderzoeker, en mijn interesses en werk gestuurd en beïnvloed.

Tenslotte wil ik heel graag benadrukken dat ik hier niet zou staan zonder de onvoorwaardelijke steun, stimulans en enthousiasme van Brigit en de kinderen. Dank jullie wel uit de grond van mijn hart.

Ik heb gezegd.

**Literatuur**


Allen, R.J., Hamaker, J.P. & Wellington, K.J. 1974, Astron. & Astrophys. **31**, 17.
Begeman, K. 1987, "Rotation Curves of Spiral Galaxies" , proefschrift R*u*G.
de Blok, W.J.G. 1997, "The Properties and Evolution of Low Surface Brightness Galaxies", proefschrift R*u*G.
Bosma, A, 1978, "The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types", proefschrift R*u*G.
Broeils, A.H. 1992, "Dark and visible matter in spiral galaxies", proefschrift R*u*G.
Ewen, H.I. & Purcell, E.M. 1951, Nature, **168**, 356.
García-Ruiz, J.M. 2001, "Warps in disk galaxies", profschrift R*u*G.
van Gorkom, J.H. & Schiminovich, D., 1997, in "The Nature of Elliptical Galaxies", ASP. Conf. **116**, ed. M. Arnaboldi; G. S. Da Costa; and P. Saha , p.310
Hartmann, D. & Burton, W.B. 1997, "Atlas of galactic neutral hydrogen", Cambridge University Press.
Hibbard, J.E. 1995, "The Fate of Gas in Merging Disk Galaxies", proefschrift, Columbia Univ.
Hibbard, J.E. & van Gorkom, J.H. 1996, "HI, HII, and R-Band Observations of a Galactic Merger Sequence", Astron. Journal **111**, 655.
van de Hulst, H.C. 1945, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, **11**, 201.
van de Hulst, H.C. 1953, The Observatory, **73**, 129.
van de Hulst, H.C., Muller, C.A. & Oort, J.H. 1954, Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands, **12**, 117.

van der Hulst, J.M. 1996, “Bubbles and Holes in the Insterstellar Medium”, in “Minnesota lecture series on HI in the Universe”, ed. E.D. Skillman, ASP. Conf Series. **106**, p.47.
van der Hulst, J.M. 1994, “WHISP, het Westerbork HI survey project”, Zenit, **21**, 278.
van der Hulst, J.M. 2000, “Kijken met radio-ogen”, Zenit, **27**, 206.
van der Hulst, J.M., van Albada, T.S. & Sancisi, R. 2001, “The Westerbork HI Survey of Irregular and Spiral Galaxies, WHISP”, in “Gas and Galaxy Evolution”, ASP Conf. 240, ed. J.E. Hibbard, M. Rupen & J.H. van Gorkom, p. 451.
Kamphuis, J.J. 1993, proefschrift, R*u*G.
Kamphuis, J.J., Sancisi, R. & van der Hulst, J.M. 1991, Astron. & Astrophys. **244**, L29
Kerr, F. J., Hindman, J. V. & Carpenter, M.S. 1956, Astron.Journal **61**, 7.
Muller, C.A. & Oort, J.H. 1951, Nature, **168**, 357.
Oort, J.H., Kerr, F.J. & Westerhout, G. 1958, Monthly Notices Royal Astronomical Society, **118**, 379.
Schiminovich, D. van Gorkom, J.H., van der Hulst, J.M., Oosterloo, T. & Wilkinson, A. 1997, in “The Nature of Elliptical Galaxies”, ASP. Conf. **116**, ed. M. Arnaboldi; G. S. Da Costa; & P. Saha , p.362
Swaters, R.A. 1999, “Dark matter in late-type dwarf galaxies”, proefschrift R*u*G.
Swaters, R.A., Sancisi, R. & van der Hulst, J.M. 1997, Astrophys. Journal **491**, 140.
Wevers, B.M.H.R. 1984, “The Palomar - Westerbork Survey of Galaxies”, proefschrift R*u*G.
Yun, M.S. 1992, “Study of tidal interactions in M81-M82-NGC3077 system”, proefschrift, Harvard University.

### Websites

Atacama Large Millimetre Array: http://www.eso.org/projects/alma/
European Southern Observatory: http://www.eso.org
Groningse Proefschriften: http://www.astro.rug.nl/Theses/Theses.html
Kapteyn Instituut: http://www.astro.rug.nl
Low Frequency Array: http://www.lofar.org
Low Frequency Array (NL site): http://www.lofar.nl
National Radio Astronomy Observatory: http://www.nrao.edu
Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie: http://www.astronomy.nl
Space Telescope Science Institute: http://www.stsci.edu
Square Kilometer Array: http://www.skatelescope.org
Square Kilometer Array (NL site): http://www.astron.nl/skai
Stichting Astron: http://www.astron.nl
Westerbork Survey of Spiral and Irregular Galaxies: http://www.astro.rug.nl/~whisp

### Boeken

“The Westerbork Observatory, continuing adventure in radio astronomy” ed. Raimond,E. & Genee, R. Kluwer Acad. Publ. ASSL 208, ISBN: 0792341503
“Perspectives on radio astronomy: science with large antenna arrays”, ed. M.P. van Haarlem, published by ASTRON, ISBN 90-805434-1-1, (http://www.astron.nl/conf/science_index.htm)

### Figuren

De illustraties bij deze oratie zijn samengesteld uit resultaten van eigen werk en ontleend aan illustraties op de websites van de stichting ASTRON, de European Southern Observatory, de National Radio Astronomy Observatory, en de LOFAR en SKA consortia. Met bijzondere dank aan Rob Swaters, Jurjen Kamphuis, Min Su Yun, Peter Shaver en Erwin de Blok.