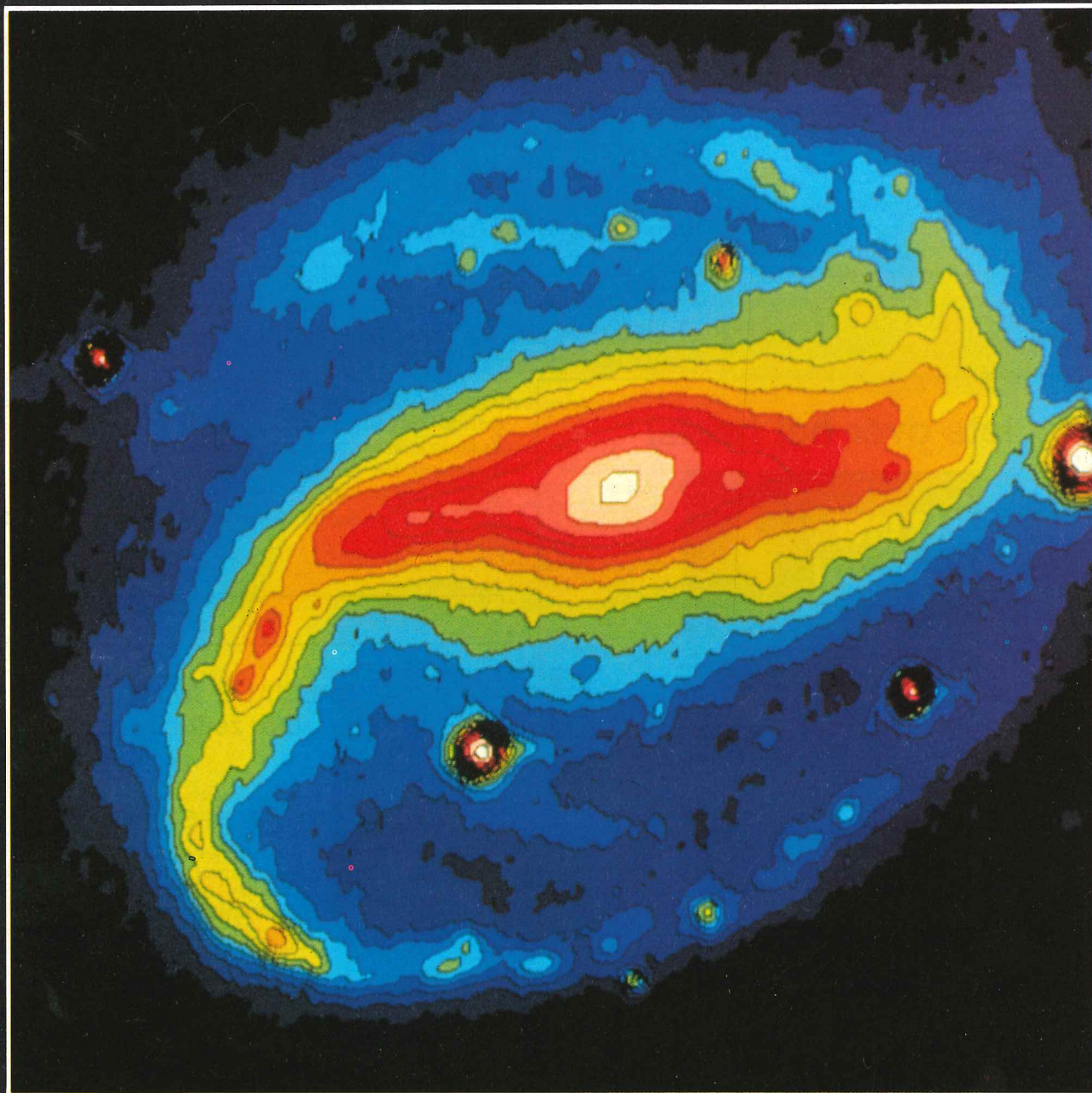


ZENIT



'HORIZONNEN'
OZON IN DE STRATOSFEER
KLEINBEELDOPTIEK





LEIDEN UNIVERSITY
FACULTY OF MATHEMATICAL AND NATURAL SCIENCES

LEIDEN OBSERVATORY

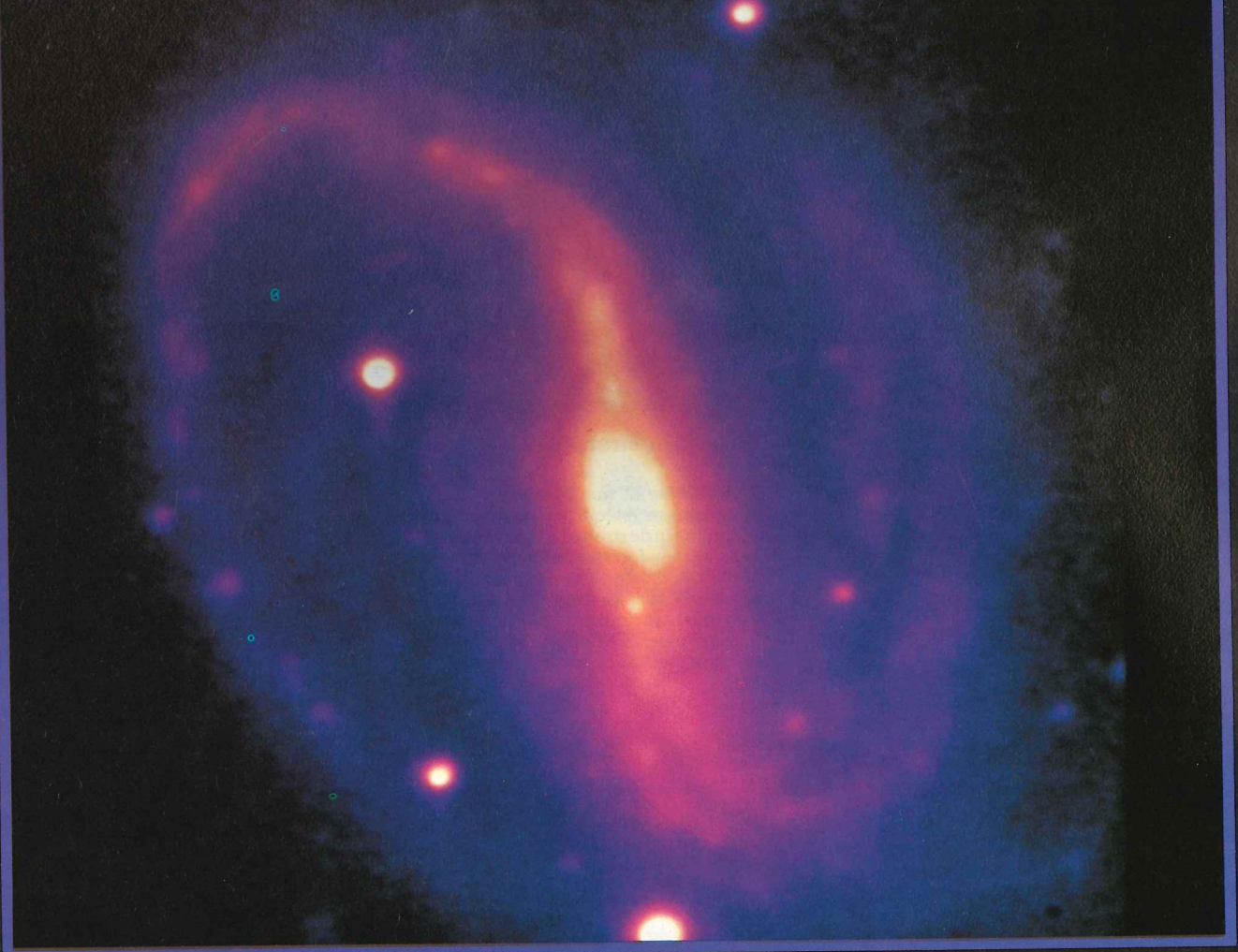
Leiden, 21 mei 1989.

Ingesloten stuur ik je een nummer van Zenit waarin de Nederlandse vertaling staat van de lezing die ik in Kyoto hield. Aan het slot wordt de horizon bereikt; hij blijkt onbegrijpbaar te zijn.

Hartelijke groet

Jan

Horizonnen



Als kinderen hebben we aan het strand gekeken naar schepen die geleidelijk verdwenen als ze verder en verder weg voeren. We zagen eerst het schip zelf verdwijnen, terwijl de masten zichtbaar bleven. Terwijl ze verder voeren, doken tenslotte ook de toppen van de masten onder de 'horizon'. Als kinderen fantaseerden we over die horizon. Wat lag er achter? Volwassenen hadden een zelfde nieuwsgierigheid. Zij voeren naar de horizon en zagen dat er nieuwe horizonnen achter lagen en dat dit zich bijna eeuwig herhaalde. Totdat zij tenslotte beseften dat ze de Aarde rond gevaren waren en de hele wereld ontdekt hadden. Maar er bleef de ruimte boven ons: het rijk van Zon, Maan en sterren. Vanaf de vroegste tijden waaruit geschriften tot ons gekomen zijn, is gedacht dat de hemellichamen de buitenste grens van het heelal vormden. Omdat er geen ruimteschepen bestonden, waren ze onbereikbaar. Niemand kende hun afstand en aard....

Griekse wijsgeren hebben wereldmodellen ontworpen die ook de hemel omvatten. Zij begrepen dat maansverduisteringen veroorzaakt werden doordat de Maan in de schaduw van de Aarde kwam. De waarneming dat deze schaduw rond was, leerde hun dat de Aarde een bolvorm moest hebben. Zij gebruikten waarnemingen van deze schaduw ook om de afstand tot de Maan te meten. Omdat de Maan zo snel beweegt, in een maand de hemel rond, terwijl de Zon hiervoor een jaar nodig heeft, werd algemeen (en terecht) gedacht dat de afstand van de Zon veel groter moest zijn dan die van de Maan. De schaduw van de Aarde moest dan over de betrokken afstand vrijwel een cylinder zijn, met een straal gelijk aan die van de Aarde. Door de straal van de aardschaduw in hoekmaat te bepalen, kon men daarom de afstand tot de Maan vinden zodra de straal van de Aarde bekend was.

J.H. Oort

De straal van de Aarde was bepaald door Eratosthenes uit een combinatie van de lineaire afstand tussen Syene in Egypte en Alexandrië en de hoekafstand tussen de sterren die op deze twee plaatsen door het zenit gaan. De zo gevonden afstand tot de Maan was zestig maal de straal van de Aarde, of 400.000 kilometer: de eerste meting van een afstand in de ruimte! Dit was een geweldige stap. Bijna 2000 jaar zouden verstrijken voor de volgende sprong, naar de afstanden van de planeten en de Zon, gemaakt kon worden.



Het Griekse wereldbeeld

De Griekse astronomen hadden een model van de wereld ontworpen, waarin alle hemellichamen bevestigd waren aan roterende sferen. De buitenste sfeer, het 'primum mobile', bevatte de vaste sterren. Hierbinnen bevond zich een andere bol met de planeet Saturnus, die om een eigen as roteerde die was bevestigd aan de buitenste bol. Daarna kwam de Jupiter-bol, wiens as bevestigd was aan de bol van Saturnus, maar weer zijn eigen rotatie had. Enzovoorts voor Mars, de Zon, Venus, Mercurius en de Maan. In het midden stond de onbeweeglijke Aarde. De bollen waren van kristal en doorzichtig, zodat de binnenste het uitzicht op de buitenplaneten niet belemmerden. Dit model was uitvoerig beschreven en voor latere generaties bewaard door Ptolemaeus, in zijn beroemde werk de *Almagest*, dat gedurende vele eeuwen het standaardwerk van de sterrenkunde bleef.

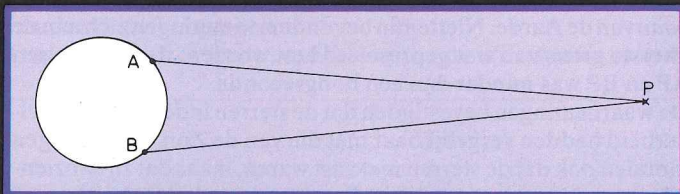
Afstanden en banen van de planeten

Pas in de 16^e eeuw werd het systeem van Ptolemaeus ernstig aangevochten door Nicolaus Copernicus. Deze redeneerde dat het

waarschijnlijker was dat de dagelijkse omwenteling van de sterren slechts een schijnbare beweging was: het is de Aarde die roteert, terwijl de sterren vast staan en bovendien beschrijft de Zon geen baan om ons, maar beschrijven wij een baan om de Zon. Zo werd een heel nieuw model van het planetensysteem geconstrueerd door Copernicus en zijn opvolgers



Tycho Brahe, Johannes Kepler en Galileo Galilei. Door verfijningen en de hartstochtelijke toewijding van onderzoekers als Brahe en Kepler werd in die periode tevens een tweede enorme sprong gemaakt in het meten van afstanden in het Heelal. Deze grote sprong werd bereikt door de positie van een planeet te meten vanuit twee verschillende plaatsen. Tengevolge van de draaiing van de Aarde draait het waarnemingspunt en zal men de planeet telkens in een enigszins andere richting zien. Daar de waarnemer de straal van de Aarde kent, weet hij ook de afstand



Het bepalen van afstanden binnen het planetensysteem (voor beschrijving zie tekst).

tussen A en B (zie tekening). Een nauwkeurige meting van de hoek tussen de twee richtingen AP en BP maakt het hem mogelijk om de driehoek APB te construeren en daardoor de afstanden AP en BP te bepalen. Dit was een enorme prestatie: de hoek tussen AP en BP, die essentieel was voor de meting, was minder dan een boogminuut.

Op deze manier werd tenslotte de afstandschaal van het planetensysteem bekend en werd de grondslag gelegd voor de ontdekking van de gravitatiewet, waarmee Newton een heel nieuwe weg opende om de wereld te begrijpen.

Afstand tot de 'vaste' sterren

Maar wat kon men zeggen over de vaste sterren? Juist door het feit dat zij vast stonden moesten zij verder weg staan dan de planeten. Maar hoeveel verder? Enkele originele denkers hadden er al over gespeculeerd dat zij dingen zouden zijn van dezelfde aard als de Zon. Als dat zo zou zijn, dan moesten hun afstanden miljoenen malen groter zijn dan die van de Zon, veel groter ook dan de afstand die in Keplers tijd nog gemeten kon worden. Net als in de tijd van Tycho Brahe, drie eeuwen eerder, was het opnieuw een enorme vooruitgang in precisie, voortgekomen uit technische ontwikkelingen, en vooral door de bouw van grote telescopen (de 'ruimteschepen' van die dagen), die de mens in staat stelden de afstanden tot de vaste sterren te meten. Evenals in het geval van de planeten, was de meting gebaseerd op trigonometrie. Maar in dit geval was de basis van de driehoek niet de diameter van de Aarde, maar de 25.000 maal grotere diameter van de

Lezing gehouden bij de uitreiking van de Kyotoprijs 1987 en van de daarbij behorende medaille door de Inamori Foundation te Kyoto op 10 november 1987. In verband met de doelstelling van de Inamori Stichting en de Kyoto Prijs was mij gevraagd bijzondere aandacht te geven aan mijn eigen wetenschappelijke loopbaan.



Jacobus Cornelius Kapteyn

baan van de Aarde. Niettemin bevonden de metingen zich aan de uiterste grens van wat gepresteerd kon worden: de hoek tussen AP en BP was minder dan een boogseconde.

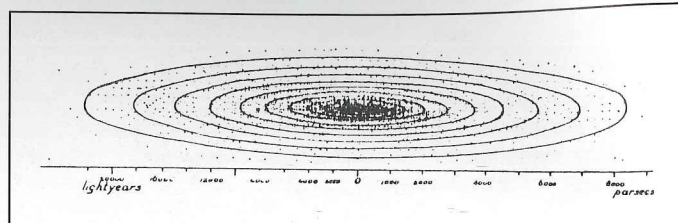
De waarnemingen bevestigden dat de sterren inderdaad een helderheid hadden vergelijkbaar met die van de Zon. De metingen toonden ook dat de sterren niet vast waren, maar dat zij aanzienlijke bewegingen vertoonden. Een jonge Nederlandse sterrenkundige, J.C. Kapteyn uit Groningen, had ontdekt dat de sterren systematische bewegingen hadden, die bekend werden als 'sterstromen'. Het was de eerste ontdekking van de *sterdynamica*. Een reusachtige nieuwe wereld lag open voor exploratie. Die exploratie werd met kracht op een paar plaatsen ter hand genomen; één daarvan was de Universiteit van Groningen.

Exploratie van het Melkwegstelsel

Men had al lang ingezien dat de wereld van de sterren zich niet oneindig ver uitstreckte, maar het was nog onbekend *hoe* ver deze wereld zich uitstreckte en wat voor een vorm zij had. Kapteyn had zich tot doel gesteld om dit uit te vinden. Tevens wilde hij de bewegingen van de sterren onderzoeken en de krachten die hen samenbinden.

Het was in dit vroege stadium van het verkennen van het Melkwegstelsel, zoals de ons omringende sterzwerm genoemd werd, dat ik mijn studie aan de Universiteit begon. Naar Groningen getrokken door de roem van Kapteyn, werd ik al spoedig gefascineerd door de inspiratie die zijn colleges uitstraalden. Zo zeer zelfs dat ik in mijn eerste jaar mijn medestudenten, die merendeels rechten of medicijnen studeerden, iets van die inspiratie wilde laten meevoelen. Wat een geluk voor een student om op te groeien in een omgeving waar door hard werken en enthousiasme de eerste sporen van een nieuwe wereld geopenbaard werden.

Deze wereld omvatte zo'n groot aantal leden (inderdaad enige honderdduizenden miljoenen), dat het onmogelijk was ze allemaal te bestuderen. Daarom had Kapteyn voorgesteld om de waarnemingen te concentreren op een tweehonderdtal kleine velden, die over de hele hemel verdeeld waren en waarin waarnemingen gedaan moesten worden tot de meest lichtzwakke zichtbare sterren. Hij slaagde erin zijn enthousiasme over te dragen op zijn collega's en hij overreedde een aantal over de hele wereld verspreide sterrenwachten om deel te nemen aan dit 'Plan of Selected Areas'. In Groningen had men geen telescoop, hun bijdrage bestond uit het meten van fotografische platen die op andere sterrenwachten opgenomen waren. Maar de staf van de Gro-



Het Kapteynstelsel (1922).

ningse afdeling was te klein om de grote aantallen metingen doeltreffend aan te kunnen. Kapteyn was echter onversaagd en vond een oplossing door toestemming te vragen en te krijgen om gevangenen te laten deelnemen aan het werk.

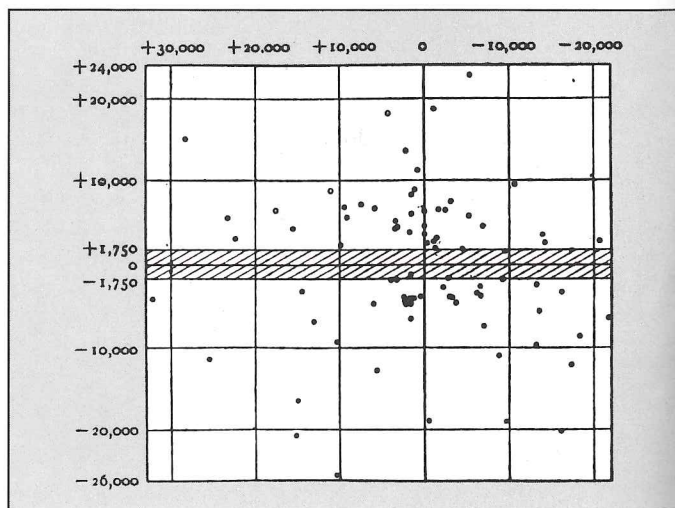
In mijn studentenjaren had dit grote project al tot een voorlopig beeld van de ons omringende sterzwerm geleid. In dit stoutmoedige eerste model van het zogenaamde 'Kapteynstelsel' was aangenomen dat de Zon niet ver van het centrum zou staan van een sferoïdaal sterrenstelsel, dat een buitendiameter had van ongeveer 15000 lichtjaren en een dikte van een vijfde daarvan. Het equatoriale vlak van het stelsel viel samen met het vlak van de Melkweg; het werd daarom Melkwegstelsel genoemd. Natuurlijk waren er geen abrupte grenzen. De sterdichtheid nam geleidelijk naar buiten toe af. Bij de genoemde afstanden was de dichtheid ongeveer een tiende van die bij het centrum.

Mijn eigen werk gedurende het eerste jaar in Groningen was gericht op de *bewegingen* van sterren. Een medestudent had mij gewezen op een artikel dat een merkwaardige tendens beschreef in de bewegingen van sterren die een uitzonderlijk hoge snelheid hadden. Dit verschijnsel bleek interessant te zijn. Het onderzoek leidde tot mijn eerste artikel in een astronomisch tijdschrift en vormde later de grondslag van mijn dissertatie.

Natuurlijk was ik ook betrokken bij het denken over het Kapteynstelsel en zijn plaats in het *Heelal*. In de 'school' van Kapteyn was de grote zwerm van sterren rondom ons *het Heelal*. Het Heelal eindigde bij het buitenoppervlak van het Kapteynstelsel.

Shapley

In deze zelfde tijd werd het Heelal op een geheel andere manier onderzocht door een jonge astronoom, Harlow Shapley, op de Mount Wilson sterrenwacht in Californië. Deze concentreerde zich geheel op de zogenaamde bolvormige sterrenhopen. Dit zijn dichte groepen van sterren met elk een paar honderdduizend leden. Door een speciaal soort veranderlijke sterren in de sterhopen te bestuderen, en ook op verschillende andere manieren, slaagde Shapley er in hun afstanden te bepalen. Het bleek dat deze heel groot waren: enige tienduizenden lichtjaren. Als dit juist was, zouden de bolhopen ver buiten het Kapteynstelsel lig-



De bolvormige sterrenstelsels en de Melkweg (Shapley).



Harlow Shapley

gen. De omstreeks honderd bekende bolhopen vormden een zwerm, net als Kapteyns sterzwerm, maar van ongeveer vijf maal grotere afmeting. De zwerm bolhopen was geconcentreerd naar een middelpunt dat op een afstand van ongeveer 20.000 lichtjaren lag: ver buiten het Kapteynstelsel. Merkwaardig was dat dit verre centrum precies in het vlak van Kapteyns schijf lag, dus in het vlak van de Melkweg!

Shapley dacht dat het werkelijke Melkwegstelsel omlijnd werd door de bolhopen en dat het Kapteyn 'heelal' slechts één van een grote groep eilanden was, die verspreid lagen door de veel grotere zwerm sterhopen. Destijds leek deze voorstelling verre van bevredigend: Waarom zagen we de andere eilanden niet, en waarom lag het centrum van dit grote systeem precies in het schijfvlak van ons eigen eiland?

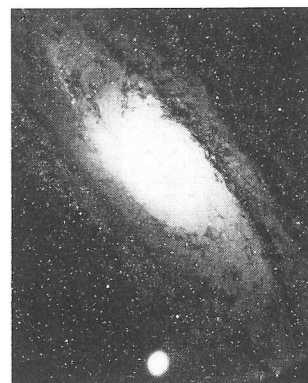
De uiteindelijke oplossing kwam iets later, toen men zich realiseerde dat de werkelijke wereld heel verschillend was van hetgeen de Kapteyngroep, zowel als Shapley zich hadden voorgesteld. *Ze strekte zich wel uit over de gehele diameter van de zwerm van sterhopen, maar ze leek er niet op.* Terwijl de bolhopen een bijna sferisch systeem vormden, was de *werkelijke sterzwerm* in hoofdzaak een dunne schijf, waarvan de dikte niet meer dan een honderdste van de diameter was. Op het eerste gezicht leek dit model in tegenspraak met de onderzoeken in Groningen, maar in werkelijkheid is dit niet het geval. De Groningse astronomen hadden hoofdzakelijk hun 206 gebieden onderzocht, die regelmatig over de hemel verdeeld waren. Door zich te concentreren op deze kleine velden, hadden zij de dunne band van het schijfsysteem praktisch over het hoofd gezien. Een belangrijke andere factor die hun model beïnvloed had, was dat het grootste deel van de schijf verborgen was ten gevolge van de absorptie door interstellaire wolken, waarvan het overheersend belang in die tijd niet onderkend werd, doordat de wolken geheel geconcentreerd waren in de dunne schijf.

De ware, complexe structuur van de Melkweg werd pas geleidelijk onderkend. Gedeeltelijk werd zij zichtbaar doordat niet alle bevolkingsgroepen in de schijf liggen. Het Melkwegstelsel bestaat uit een mengsel van bevolkingen met verschillende concentraties naar de schijf; de uiterste waren de bolvormige sterrenhopen die bijna helemaal geen concentratie naar de schijf lieten zien.

Galactische rotatie

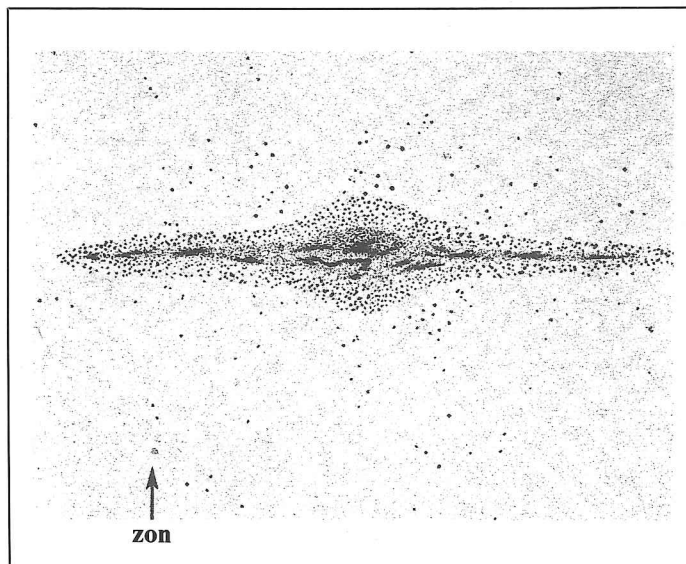
De verschillen tussen de bevolkingen waren ook zichtbaar in hun bewegingen. Hierin begonnen zich de eigenaardige bewe-

gingen van de hogesnelheidsterren, die ik in mijn Groningse jaren onderzocht had, in te passen. Maar ik was nog te veel beïnvloed door het Kapteynstelsel om de stap te nemen naar een model waarin alle sterren deel zouden zijn van een veel groter, continu schijfsysteem. Deze stap werd in 1925 gezet door de Zweedse astronoom Bertil Lindblad, die opperde

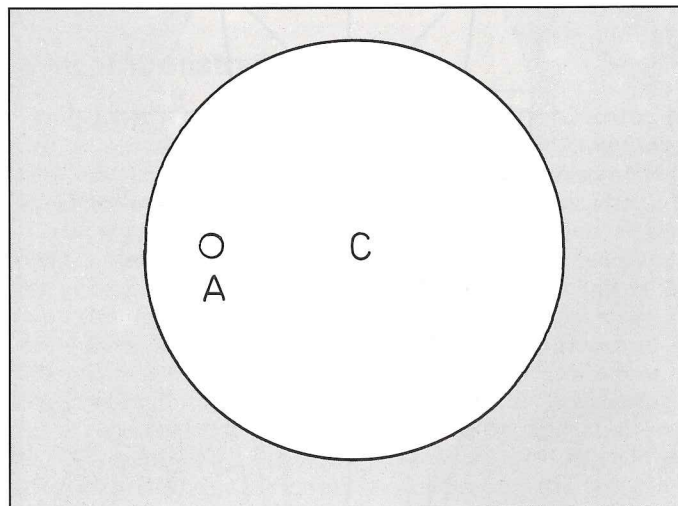


dat alle langzaam bewegende sterren in onze omgeving deel zouden nemen aan een snel roterende beweging rond het centrum van het systeem van bolvormige sterrenhopen. Lindblad dacht aan een rotatie als van een vast lichaam. Ik realiseerde me echter dat, omdat de massa van het Melkwegstelsel geconcentreerd was naar zijn middelpunt, de hoeksnelheid van de rotatie toe zou moeten nemen naar het centrum, net als bij de bewegingen van de planeten in het zonnestelsel. Ik had al eerder gevonden dat ver weg liggende sterren in de Melkweg onverklaarbaar systematische bewegingen hadden en ik vermoedde nu dat deze bewegingen juist zo waren als de bewegingen die men zou verwachten in een roterend sterstelsel, waarvan de binnenste delen sneller roteren dan de buitenste delen.

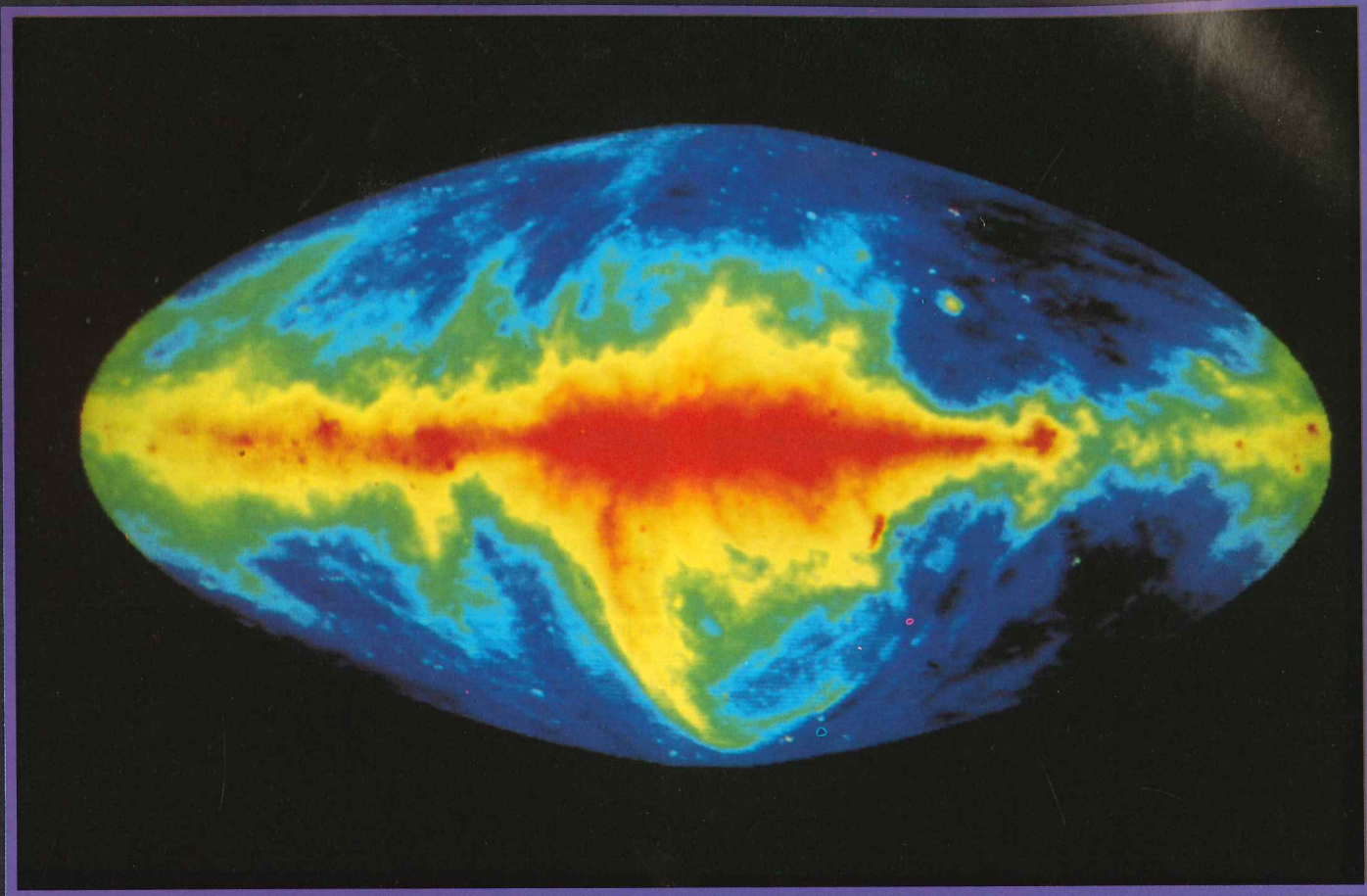
Dit leidde in 1927 tot de ontdekking van de *differentiële galacti-*



Schematische figuur die de dunne schijf van het Melkwegstelsel laat zien, en de verdeling van de bolvormige sterrenhopen.



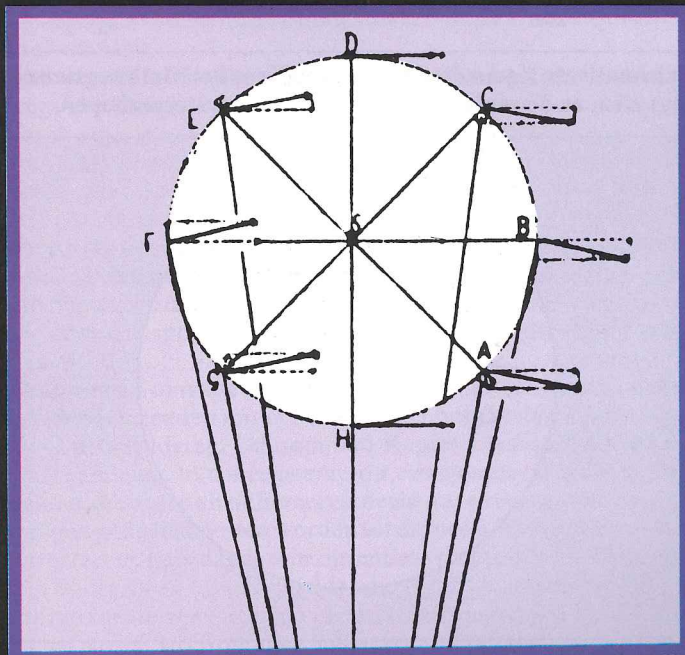
Vergelijking van de omvang van het Melkwegstelsel (grote cirkel) en het optisch waarneembare gebied (klein cirkeltje A).



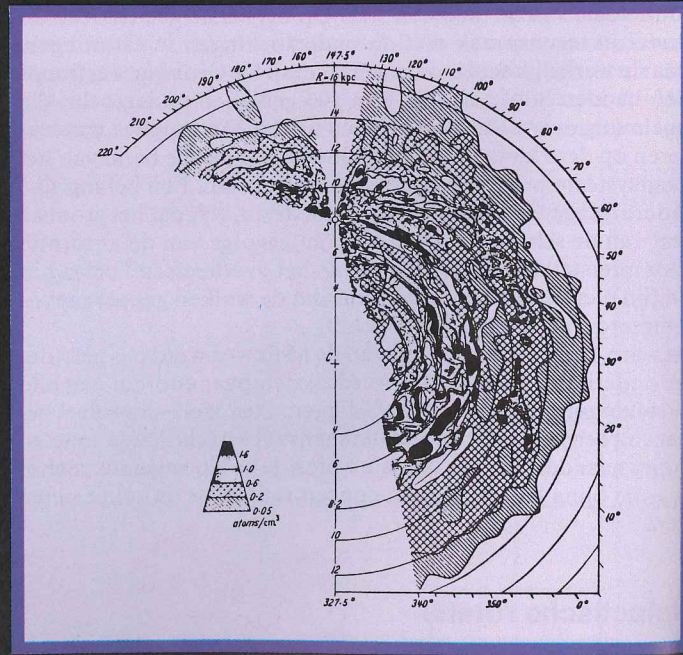
Radiokaart van de sterrenhemel. (Foto: MPI für Radioastronomie)

sche rotatie. De bewegingen bevestigden ook dat het punt waarom het systeem roteerde in Sagittarius lag, in een bijzonder helder gedeelte van de Melkweg en precies samenviel met het centrum van het stelsel van bolvormige sterrenhopen. Het was een opzienbarende ontdekking: zij toonde aan dat dezelfde gravitatiewet die zoveel succes had gehad in het verklaren van de bewegingen van de planeten in het zonnestelsel, ook van toepassing was op het miljoenen malen grotere Melkwegstelsel, en dat er een sterke gelijkenis was tussen de twee stelsels. In de volgende paar jaar werden de meeste eigenschappen van

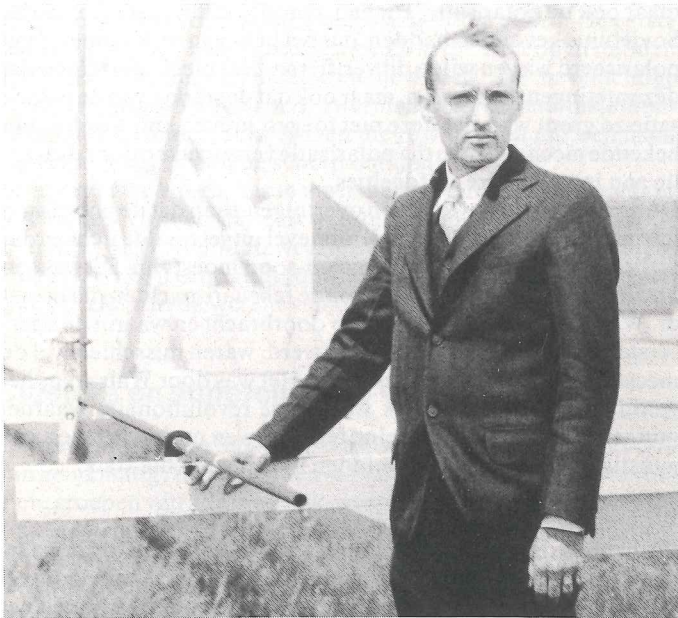
de structuur van de Melkweg en de inwendige bewegingen van de Melkweg begrepen. Er restte echter een ernstige onvolledigheid: het grootste deel van de schijf bleef achter de absorberende interstellaire wolken verborgen. We konden het centrum niet waarnemen, het centrum dat later de zetel van veel bijzondere, interessante verschijnselen bleek te zijn. Ook konden we niet zien of de schijf enige grote-schaal structuur had, zoals die welke de spiraalvormen vertoonden. Het was pas door de opkomst van de *radioastronomie*, bijna twintig jaar later, dat de ontrafeling van deze streken mogelijk werd.



Differentiële rotatie van het Melkwegstelsel.



De eerste kaart van de spiraalstructuur in het Melkwegstelsel, waargenomen in Kootwijk (1954).



Karl G. Jansky

Spiraalnevels

Maar lang vóór die tijd, gedurende de eerste exploraties van de Melkweg, begon een vraag van veel groter omvang op te komen, namelijk die naar de aard van de spiraalnevels. William en John Herschel hadden bij hun beroemde exploratie van de hemel met hun grote telescopen gevonden dat er behalve sterren en sterhopen een groot aantal objecten bestonden die er uit zagen als nevels. Omdat vele daarvan een opvallende spiraalstructuur vertoonden, werden ze gewoonlijk spiraalnevels genoemd. Er was veel twijfel over hun aard. Een aantal astronomen, waaronder Shapley, dacht dat het objecten waren in ons Melkwegstelsel. Anderen, die tenslotte gelijk bleken te hebben, plaatsten deze objecten op veel grotere afstanden en beschouwden ze als individuele sterrenstelsels ('eiland heelallen') van dezelfde aard als ons eigen Melkwegstelsel. Ze zouden zo ver weg liggen dat men zelfs met de grootste telescopen geen individuele sterren kon onderscheiden, wat hun nevelachtig aanzien verklaarde. Al in de dagen dat ik nog studeerde was ik ervan overtuigd dat dit de werkelijkheid was en dat de wereld van de spiraalnevels onze ogen opende voor een nieuw Heelal. Laat ik echter eerst het verhaal van ons eigen Melkwegstelsel voltooien.

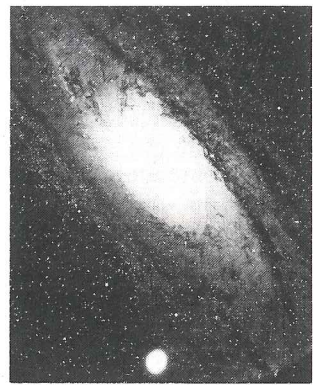
De opkomst van de radioastronomie

Heel onverwachte methoden voor de exploratie van ons Melkwegstelsel ontstonden door de opkomst van de radioastronomie. Een ingenieur van de Bell Telephone Company, Karl Jansky, die in 1933 naar de oorzaak van de verstorende ruis in radio-ontvangers zocht, ontdekte dat de ruis veroorzaakt werd door iets dat samenhang met de positie van de Zon en ook met de richting van de Melkweg, in het bijzonder met het centrum van de Melkweg. Doordat Jansky zijn ontdekking in een radio-technisch tijdschrift gepubliceerd had en de astronomen onbekend waren met de problemen van de radiotechniek, drong de betekenis van het onderzoek dat Jansky in 1933 gedaan had niet direct door tot de astronomen. Er verliepen tien jaren vóór zij zich de betekenis van Jansky's ontdekking voor de exploratie van het Heelal begonnen te realiseren.

Het eerste sterrenkundig onderzoek kwam van een andere ingenieur van de Bell Company. Omstreeks 1945 bouwde Grote Reber in zijn eigen tuin de eerste radiotelescoop voor onderzoek van de Melkweg. De voordelen van het gebruik van radiogolven voor het onderzoek van de structuur van het Melkwegstelsel waren duidelijk. Want straling bij golflengten van meters en deci-

meters dringt ongehinderd door de stofwolken die ons uitzicht op de schijf van de Melkweg versperren. Bij dergelijk lange golflengten zijn echter telescopen met een grote opening nodig om het benodigde oplossend vermogen te krijgen.

Grote Rebers resultaten waren zo veelbelovend dat de Nederlandse astronomen, die zo intensief betrokken waren geweest bij de eerste exploratie van de Melkweg, direct plannen maakten om een radiotelescoop te bouwen die voldoende groot zou zijn voor een goed onderzoek van de structuur van de gehele Melkweg. We bereidden daartoe een voorstel voor om een radiotelescoop te bouwen met een opening van 25 meter, die ons in staat zou stellen de structuur van de verst verwijderde delen van onze Melkweg bij een golflengte van 21 centimeter op te lossen.



De 21 cm waterstoflijn

Er was een speciale reden om die golflengte te kiezen. De Nederlandse sterrenkundige Van de Hulst had aangetoond dat atomaire waterstof, die naast helium het voornaamste element in de ruimte tussen de sterren is, straling bij deze golflengte moest uitzenden. Nauwkeurige waarnemingen van de interstellaire waterstofwolken bij deze golflengte zouden ons in staat stellen niet slechts hun dichtheid, maar ook hun snelheid te bepalen. De radiotelescoop zou kunnen doordringen tot de verborgen streken dicht bij het centrum en de rotatiesnelheid in deze gebieden kunnen meten.

De grote telescoop was pas in 1958 voltooid, maar we hadden het geluk om, met hulp van de PTT, de beschikking te krijgen over één van de 7,5 meter radartelescopen die de terugtrekkende Duitse troepen in de duinen hadden achtergelaten en die de PTT opnieuw had opgebouwd bij hun zendstation in Kootwijk. In 1952 werd met de waarnemingen begonnen en in 1954 was een voorlopige kaart van de dichtheid en de snelheid van de waterstof over het hele Melkwegstelsel, voor zover dat vanuit Nederland zichtbaar was, gereed gekomen. Dit was de eerste kaart van de schijf van het Melkwegstelsel en zij was bijzonder goed gelukt. Het werk werd grotendeels gedaan door studenten die, elkaar door hun enthousiasme inspirerend, er dag en nacht aan werkten.

De kaart toonde een opvallende spiraalvormige structuur, die de gelijkenis tussen ons Melkwegstelsel en de spiraalnevels nogmaals bevestigde.

Synchrotronstraling

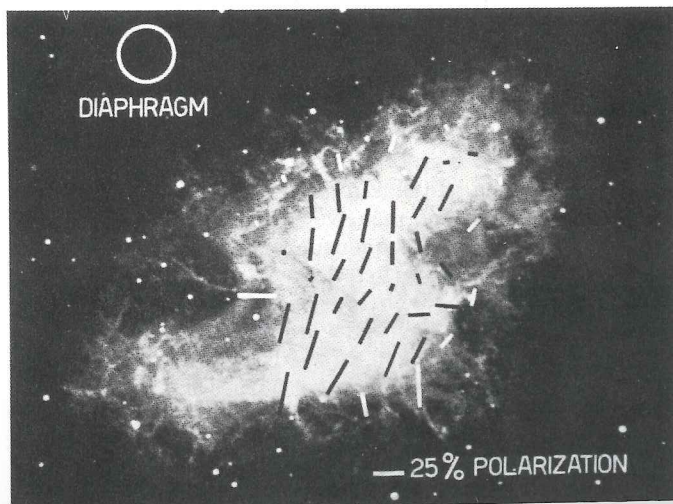
Hoe belangrijk de 21 cm waterstofstraling ook was, de radiostraling uit ons Melkwegstelsel had nog andere, heel nieuwe dingen voor ons in petto: Een groot deel van de radiostraling komt niet uit kleine trillingen van elektronen in atomen, zoals het licht waarmee wij omringd zijn, maar wordt uitgestraald door elektronen die met hoge snelheid banen met een straal van vele lichtjaren in het magnetisch veld van het Melkwegstelsel beschrijven. Dit soort straling was al eerder bekend uit waarnemingen met grote deeltjesversnellers, die gebruikt worden om de structuur van de atoomkernen te onderzoeken, en werd daarom *synchrotronstraling* genoemd. Een belangrijke eigenschap van deze straling is dat zij gepolariseerd is: de lichttrillingen zijn beperkt tot één richting, in tegenstelling tot gewoon licht, waar de trillingen in alle mogelijke richtingen plaatsvinden. Synchrotronstraling was nog nooit in de natuur waargenomen.

Door een merkwaardige reeks gebeurtenissen was ik betrokken geraakt in de vroege geschiedenis van de ontdekking van deze

straling buiten een versneller. Dat kwam door waarnemingen van de Krabnevel, waarschijnlijk het meest merkwaardige object aan de hemel. De Krabnevel werd geboren op 4 juli 1054 door de explosie van een zwak, onbekend sterretje in het sterrenbeeld Stier. Gedurende het eerste jaar na de explosie werd zij zo helder, dat zij in het volle daglicht gezien kon worden. De ster was bijna helemaal uiteengespat. De fragmenten werden met hoge snelheid uitgeworpen en groeiden na enkele eeuwen aan tot een zodanige grootte dat zij waargenomen konden worden als een nevelachtig object. In 1954 vroeg ik dr. Walraven in Leiden te meten hoe snel de helderheid van de nevel afnam door zijn uitdijning. Dr. Walraven, die een genie is in het doen van verfijnde waarnemingen, deed meer dan dat: hij mat niet alleen de helderheid,



De Krabnevel. Het overblijfsel van de supernova van het jaar 1054, opgenomen door Walther Baade met de 5-meter Hale telescoop op Mount Palomar omstreeks 900 jaar na de uitbarsting. Boven: in emissie-lijn; onder: continuüm (synchrotronstraling).



Walravens metingen van de polarisatie van het licht van de Krabnevel in 1954.

maar ook de polarisatie. Hij had gehoord dat waarnemers in de Sovjetunie gevonden hadden, dat het licht van de Krabnevel gepolariseerd was en wilde dit verifiëren. Het bleek niet alleen dat deze metingen juist waren, maar ook dat de sterkte van de polarisatie zo groot was, dat deze niet toegeschreven kon worden aan bekende mechanismen die polarisatie veroorzaken door diffractie aan interstellair stofdeeltjes.

De nieuwe metingen toonden overtuigend aan dat de polarisatie intrinsiek was in het door de Krabnevel uitgestraalde licht en dat dit licht daarom van de synchrotron-soort moest zijn. Dit was een opwindende ontdekking! De koude februari-nachten die ik met dr. Walraven achter de telescoop doorbracht en waarin de allereerste synchrotronkaart gemaakt werd, waren misschien wel de meest interessante tijd in ons leven. Het was door Walravens beaafdheid dat het mogelijk werd deze revolutionaire waarnemingen te doen met een kleine telescoop en onder de meest ongunstige omstandigheden midden in een verlichte stad.

We keren terug naar de exploratie van de wereld.

We hebben de grenzen onderzocht van de grote sterzwerm waarin wij leven en we hebben gevonden dat noch het 'Kapteyn-heelal', noch Shapley's grotere stelsel van bolvormige sterhopen het complete heelal kunnen vormen. Zij zijn slechts een eiland in een oceaan die zich veel verder uitstrekt: een oceaan waarin zich vele eilanden bevinden.

Het Heelal van de spiraalnevels

De spiraalnevels zijn zulke eilanden en ze zijn talrijk. Duizenden nevels waren gedurende de twee voorgaande eeuwen al gevonden door William Herschel en zijn zoon John. De nevels, of melkwegstelsels, zoals wij ze van nu af zullen noemen, zijn tenminste even talrijk als de sterren in onze Melkweg. Bijgaande illustratie toont een reproductie van een langbelichte plaat, genomen met de 5-meter Hale telescoop op Mount Palomar in Zuid-Californië. We zien hierop twee soorten beeldjes: vele die



Langeblichte opname van een veld waarin sterren en sterrenstelsels naast elkaar te zien zijn. (Zie tekst)

scherp omlind zijn en andere met wazige omtrekken. De eerste zijn beeldjes van *sterren* zoals onze Zon, die zich op afstanden van enkele duizenden lichtjaren bevinden. De nevelachtige beeldjes zijn *melkwegstelsels*, zwermen die elk tenminste honderdmiljard zonnen bevatten, en die ruwweg een miljoen maal verder weg liggen dan de scherp omlindende sterren.

Hoe verder we kijken, des te meer melkwegstelsels we zien. Is er een einde? Vormen de melkwegstelsels een zwerm, net als de sterren in ons eigen Melkwegstelsel, maar dan van een grotere orde? Er is nooit een aanduiding hiervan gevonden. Er lijkt geen einde te zijn aan de wereld van de melkwegstelsels.

Clusters en superclusters

De verdeling van de melkwegstelsels in de ruimte is echter verre van gelijkmatig: ze hebben een sterke neiging om groepen te vormen, groepen van alle mogelijke grootten, variërend van twee tot duizenden melkwegstelsels. De onderstaande afbeelding van de verdeling van de 1300 helderste melkwegstelsels geeft een indruk van de ingewikkeldheid van de structuur. Deze figuur toont naast vele kleine groepen één groot conglomeraat, de Virgo-cluster, die echter te groot is om hier volledig afgebeeld te worden.

De rijke clusters zijn over het algemeen min of meer bolvormig, met diameters in de orde van 10 miljard lichtjaren. Er bestaan nóg grotere structuren, met honderd maal grotere diameters, de zogenaamde *superclusters*. Deze hebben ingewikkelde vormen: soms zijn ze bijna lineair, maar meestal zijn ze heel onregelmatig. De asymmetrische structuur van de superclusters suggereert dat er geen belangrijke menging heeft plaatsgevonden sinds hun geboorte, tien à vijftien miljard jaar geleden. Blijkbaar zien wij hen in het stadium van hun vorming. Dit is heel opwindend: het onderzoek van superclusters zou ons iets kunnen leren over de wijze waarop grote structuren ontstaan zijn. Gedurende de laatste vijf jaar ben ik nauw betrokken geweest bij het onderzoek ervan. Intussen heeft onze kennis van het Heelal een radicale verandering ondergaan. De technische ontwikkelingen in het bouwen van telescopen en spectrografen had ons al in het begin van deze

De verdeling van de extragalactische nevels helderder dan de 13^e fotografische magnitudo. De 291 nevels die helderder zijn dan de 12^e magnitudo zijn aangegeven met open cirkeltjes; stippen duiden de 734 nevels tussen de 12^e en 13^e magnitudo aan. De centrale lijn van de Melkweg is aangegeven.

eeuw in staat gesteld om spectra van melkwegstelsels te krijgen, die van voldoende kwaliteit waren om de Dopplerverschuivingen te meten en hun snelheden te bepalen.

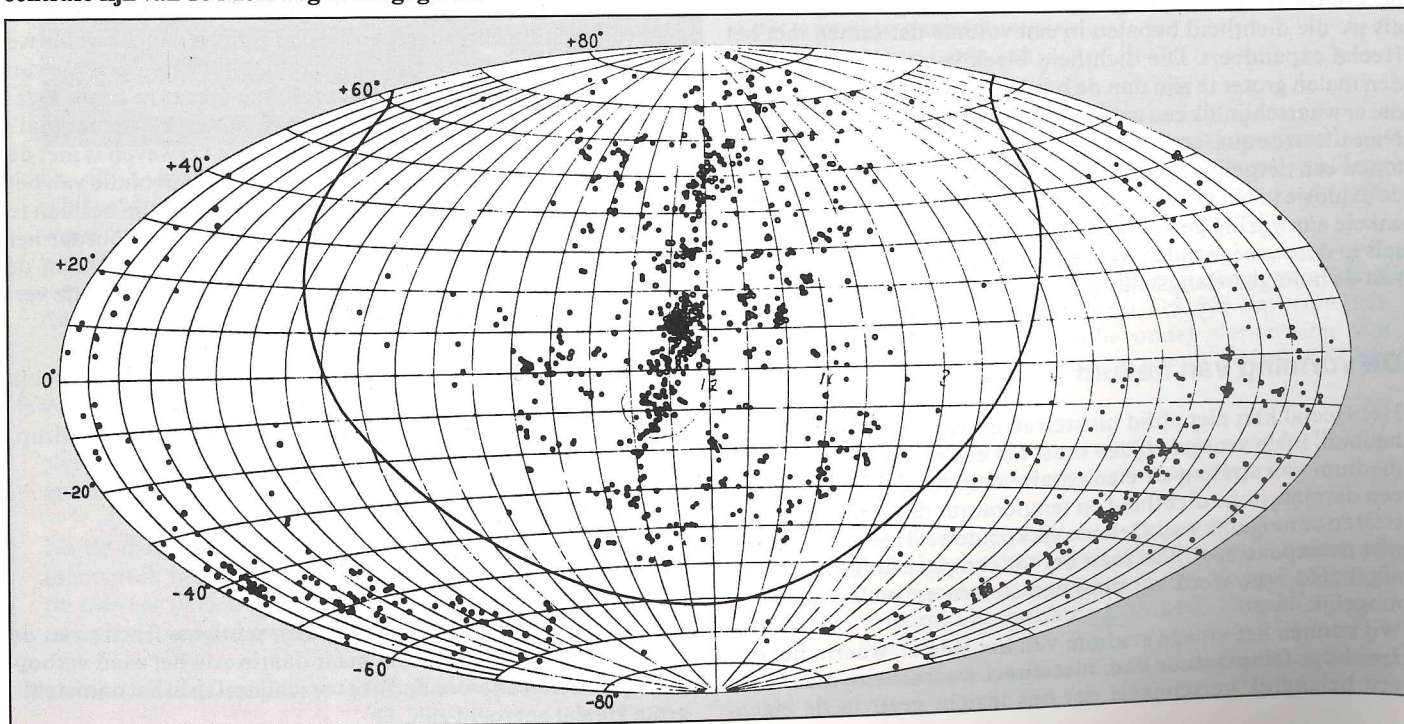
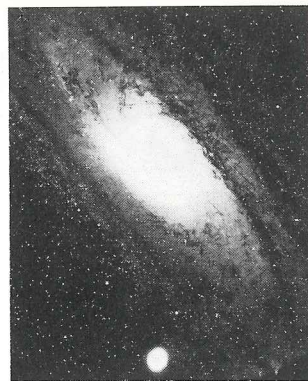
Expansie

De radiële snelheden van de melkwegstelsels toonden iets heel merkwaardigs: de stelsels bewegen allemaal van ons weg met snelheden, hoger dan alle snelheden die tot nu toe in ons Melkwegstelsel gemeten waren. De snelheden waren bovendien hoger naarmate de melkwegstelsels verder weg stonden. Hubble slaagde er in aan te tonen dat de snelheden evenredig toenemen met de afstanden. Dit toonde aan dat die stelsels niet alleen van *ons* weg bewegen, maar ook van elkaar: *het Heelal bleek te expanderen*. Dit merkwaardige verschijnsel werd ten volle bevestigd door latere waarnemingen; het wordt aangeduid met de naam *Hubble-expansie* en de expansiesnelheid per megaparsec afstand wordt *Hubble-constante* genoemd.

De melkwegstelsels moeten in vroeger tijden dichter bij elkaar gestaan hebben en er moet een tijdstip zijn geweest waarop zij allemaal uit één punt startten. Als de expansiesnelheid constant was geweest, dan zou dit ongeveer 20 miljard jaar geleden geweest zijn (de zogenaamde Hubble-tijd). In werkelijkheid kan de expansiesnelheid niet constant geweest zijn. Zij moet in de loop van de tijd afgenomen zijn door de wederzijdse aantrekking van de melkwegstelsels. De expansie moet dus in het verleden sneller zijn geweest en de tijd die verlopen is sinds het begin, moet korter zijn. Huidige schattingen stellen deze tijd op ongeveer 13 miljard jaar. Dit is *de leeftijd van het Heelal*.

De 'oerknal' horizon

Bij het waarnemen van objecten die *ruimtelijk* ver weg liggen, kijken wij ook ver terug in de *tijd*. Maar er is een grens waar voorbij we niet kunnen kijken. Die grens is verbonden met de leeftijd van het Heelal en bevindt zich op 13 miljard lichtjaren. Dit is een nieuwe horizon, van een andere soort dan die waarachter schepen verdwijnen als zij van de kust wegvaren, een horizon die





Edwin P. Hubble

slechts overschreden kan worden door *geduld*. Over een miljard jaar kunnen wij het licht waarnemen dat door melkwegstelsels uitgezonden wordt, die een miljard lichtjaren verder weg staan dan de verste stelsels die wij nu waarnemen. Het aantal waarneembare melkwegstelsels neemt dus voortdurend toe.

Laten we nu de andere kant uit kijken en ons afvragen hoe het heelal er uitzag in het verleden. Om zo ver mogelijk in het verleden door te dringen moeten we natuurlijk de objecten met de sterkste lichtkracht kiezen. Zulke objecten kunnen dikwijls herkend worden aan hun uitzonderlijk sterke radio-emissie. Bijzonder machtige objecten voor de bestudering van de evolutie van het Heelal zijn de zogenaamde *quasars*. Deze zijn zo helder en staan dikwijls zo ver weg, dat de lichtgolven die wij nu van hen ontvangen, uitgezonden werden toen het Heelal tussen vijf en tien maal *kleiner en jonger* was dan op dit ogenblik.

Uit de tellingen van quasars op deze epochen zien we dat een heel sterke evolutie plaats gevonden heeft in de quasardichtheid, als we die dichtheid bepalen in een volume dat samen met het Heelal expandeert. Die dichtheid bleek verscheidene honderden malen groter te zijn dan de huidige dichtheid, waaruit volgt dat er waarschijnlijk een gelijke toename in hun geboortetal was. Niet alleen de quasars, maar ook de krachtigste radiostelsels vertonen een dergelijke toename. Er is geen goede verklaring voor de explosie in het geboortetal in het verleden. Ook is er nog geen enkele aanwijzing gevonden voor het ontstaan van nieuwe stelsels in deze vroege tijden. Dit onderwerp staat in het brandpunt van de huidige belangstelling.

De vorming van helium

Het Heelal kan niet altijd uit sterren en sterrenstelsels bestaan hebben. In de vroegste tijden moet het een min of meer continu medium van straling en elementaire deeltjes geweest zijn, met een dermate hoge dichtheid en temperatuur dat condensatie tot sterren onmogelijk was. Geleidelijk koelde het Heelal, evenredig met de expansie, af. Pas toen het tot een paar duizend graden afgekoeld was, werd vorming van sterren en melkwegstelsels mogelijk.

Wij kunnen het vroege stadium van het Heelal, waarin het een zeer hoge temperatuur had, niet direct waarnemen, maar er is een belangrijk verschijnsel dat ons inzicht geeft in de eigen-

schappen van het heel vroege Heelal, namelijk de abundantie van helium ten opzichte van waterstof.

Fysici die elementaire deeltjes bestuderen, verzekeren ons dat heliumkernen slechts gevormd kunnen worden onder extreme omstandigheden van druk en temperatuur. Deze komen in het algemeen niet voor in het huidige Heelal, zelfs niet in het binnenste van de sterren. De enige plaats waar temperatuur en druk van die orde en grootte waren die benodigd waren om de 25% helium te maken die op dit moment bestaat, was in het Heelal kort na zijn schepping door de oerknal. Volgens de 'standaardtheorie' was de temperatuur van het medium 3 minuten na de oerknal ongeveer 1000 miljoen graden en waren dichtheid en temperatuur zodanig dat heliumkernen gevormd konden worden. Tengevolge van de snelle uitdijing namen de dichtheid en de temperatuur heel snel af, zodat het tijdsinterval waarin de omstandigheden passend waren, kort was. De huidige hoeveelheid heliumkernen wordt bepaald door de lengte van dit interval en de temperatuur en dichtheid van het Heelal in die tijd.

De achtergrondstraling

Als gevolg van een heel merkwaardige ontdekking kunnen deze drie grootheden berekend worden uit huidige metingen. De waargenomen heliumabundantie geeft ons een glimp van het Heelal toen het drie minuten oud was.

De temperatuur (of de stralingsdichtheid) bleef na het 3-minuten epoche afnemen evenredig met de expansie. Heden ten dage, ongeveer 13 miljard jaar na de oerknal, is de heelal-temperatuur gedaald tot drie graden boven het absolute nulpunt. Het is een van de grote triomfen van de wetenschap dat de astronomen deze temperatuur hebben kunnen meten. In 1964 slaagden Penzias en Wilson, van de Bell Telephone Company, er in aan te tonen dat het Heelal inderdaad gevuld is met straling van 3 ° Kelvin en dat daarom op de leeftijd van drie minuten de temperatuur 1000 miljoen ° Kelvin moet zijn geweest, precies de temperatuur die nodig was voor de vorming van helium.

De waarneming van de 3 ° Kelvin straling was een van de belangrijkste ontdekkingen van de kosmologie. Samen met de heliumabundantie kregen wij daardoor een inzicht in het drie minuten oude Heelal. Maar door dit succes moeten wij onze ogen niet sluiten voor de grote raadselen die onopgelost zijn gebleven. Bijvoorbeeld: waar komen de heel grote structuren die wij op het ogenblik in het Heelal waarnemen vandaan? Hoe kunnen wij begrijpen dat de drie graden achtergrondstraling, die we uit een gegeven richting ontvangen, zo precies gelijk is aan die welke we uit de tegenovergestelde richting opvangen, als (ten gevolge van de expansie) deze twee streken nooit met elkaar in contact geweest kunnen zijn? En tenslotte: wat veroorzaakte de oerknal? Het is interessant te zien hoe de kosmologie verweven is met de deeltjesfysica. Fysici hebben ons geleerd om de evolutie van het Heelal in de eerste onderdelen van seconden van zijn bestaan te begrijpen. Omgekeerd heeft het uitdijend Heelal, doordat het energiegebieden doorlopen heeft ver voorbij die welke in de grootste versnellers te bereiken zijn, belangrijke informatie verschaft over materie bij deze extreme omstandigheden.

In het eerste begin was het hele waarneembare Heelal vervat in een minieme ruimte, niet groter dan een dauwdruppel, die wellicht de oplossing van alle raadselen bevatte, zoals de dauwdruppel in Issa's haiku

*Een wereld van vergankelijke dauw,
En in die dauwdruppel,
Welk heftig twisten!*

Het werkelijke Heelal zou slechts een minieme fractie van de dauwdruppel omvat hebben, maar daarin zou het zaad verborgen zijn waaruit alle wonderlijke verschijnselen in het onmetelijk grote Heelal gegroeid zijn. □