

David Baneke

Toen astronomie sterrenkunde werd

Astronomie ging eeuwenlang vooral over planeten; pas in de negentiende eeuw gingen astronomen zich serieus met sterren bezighouden. Dat leidde tot een grondige verandering van het heelalbeeld, die tussen de Copernicaanse Revolutie en de Oerknaltheorie vaak over het hoofd wordt gezien.

De Copernicaanse revolutie geldt als de ultieme omwenteling in ons wereldbeeld. De mens op Aarde was niet langer het centrum van de schepping, maar bewoner van een van de (toen nog) zes planeten die om de zon draaiden. Uit astronomisch oogpunt was het echter een lokale affaire. Goed, het zonnestelsel bleek iets anders in elkaar te zitten dan aanvankelijk gedacht, maar aan de rest van het universum veranderde niets. De zon, aarde en andere planeten draaiden hun rondjes in een gesloten heelal, omringd door ‘vaste sterren’ waar verder weinig over te zeggen viel (ze stonden wel veel verder weg dan in de Ptolemeïsche kosmos). De sterren fungeerden vooral als achtergrond waartegen de beweging van planeten af te meten was. Astronomie betekent weliswaar ‘sterren-kunde’, maar tot in de negentiende eeuw ging het vooral over planeten, manen en kometen, niet over sterren (net als astronauten geen sterrenreizigers zijn). Sterrenkunde speelde zich voor het overgrote deel af binnen het zonnestelsel.

Tegenwoordig is ‘solar system astronomy’ slechts een klein onderdeel van de sterrenkunde; op Nederlandse astronomische instituten wordt er zelfs vrijwel niet aan gewerkt. Astronomen houden zich bezig met sterren, sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels. Ze werken in een heel ander heelal dan het ‘moderne’ heelal van Copernicus en Galilei. Sterrenkunde wordt vaak omschreven als de ‘oudste wetenschap’, maar een groot deel van ons huidige heelalbeeld is juist heel jong. Ik heb het hier niet alleen over de Oerknaltheorie uit de jaren veertig en vijftig van de twintigste eeuw, de bekendste recente revolutie in ons wereldbeeld. Het idee dat het heelal een begin heeft, en dat we daar iets zinnigs over kunnen zeggen, was een indrukwekkende doorbraak. Echter in de eeuw daarvoor was het beeld

van het universum ook al grondig veranderd. Over die tijd wil ik het hier vooral hebben: de onbekende astronomische revolutie van de negentiende eeuw – de periode waarin astronomie sterrenkunde werd.

De afstand tot de sterren

De reden dat astronomen zich weinig met de vaste sterren bezighielden was eenvoudig: er viel weinig over te zeggen. Net als historici kunnen astronomen hun onderzoeksobjecten niet aanraken, ondervragen of aan experimenten onderwerpen. Licht is het enige dat we van de sterren hebben; observeren is het enige dat we kunnen doen. Tot de negentiende eeuw beperkten astronomen zich tot het nauwkeurig meten van de plaats van sterren aan de hemel ('astrometrie'). Uit die metingen concludeerde Edmond Halley (1656 – 1742) in de zeventiende eeuw dat de vaste sterren niet helemaal vast waren: uit vergelijkingen met oude waarnemingen bleek dat sommige sterren in de loop van de eeuwen een klein beetje verschoven waren. Een andere observatie was dat niet alle sterren even helder waren en dat van sommige sterren de helderheid varieerde.¹

Het gesloten heelal van Aristoteles en Copernicus, met een schil van vaste sterren, werd in de loop van de zeventiende eeuw vervangen door een open universum waarin sterren door de hele ruimte verspreid stonden als evenzoveel zonnen.² Hoe ver weg ze stonden, een van de meest fundamentele vragen, was echter nog steeds onbekend. Pogingen om dat te meten werden uiteraard ondernomen. De belangrijkste methode was de parallax, onder meer beschreven door Galilei. Stel je eens voor dat je door een bos fietst, dan zie je dat bomen die dicht langs het pad staan sneller voorbij schieten dan bomen die verder weg staan. Datzelfde gebeurt als de aarde door de ruimte vliegt in haar baan om de zon. Dichtbij gelegen sterren zouden moeten verschuiven ten opzichte van verder weg gelegen sterren.

Astronomen probeerden die verschuiving (de 'parallax') te meten. Dat lukte niet, maar dat negatieve resultaat was niet zonder betekenis: je kon er een minimumafstand uit opmaken. Kennelijk waren ook de dichtstbijzijnde sterren zo ver van ons verwijderd dat de gebruikte instrumenten niet nauwkeurig genoeg waren om de parallax te meten. Christiaan Huygens (1629-1695) gebruikte een andere methode. Hij vergeleek de helderheid van Sirius – de helderste ster – met die van de zon. Ervan uitgaande dat Sirius evenveel licht uitzond als de zon, en alleen minder helder leek vanwege de

grotere afstand, concludeerde hij dat de ster bijna 28.000 keer zo ver weg stond als de zon. Anderen kwamen zelfs op nog grotere afstanden uit.³ Het heelal bleek groter dan menigeen dacht.

Voor astronomen in de zeventiende en achttiende eeuw viel er aan de sterren weinig eer te behalen. Roem was vooral weggelegd voor ontdekkers van nieuwe hemellichamen – kometen, manen van Jupiter of Saturnus, of het allermooiste: een nieuwe planeet – of het nauwkeurig berekenen van de banen van die objecten. Dat laatste was niet alleen een bewijs van de wiskunstige capaciteiten van de astronoom, maar ook van de perfectie van de Newtoniaanse hemelmechanica en daarmee van Gods schepping. Nergens waren de natuurwetten zo nauwkeurig te aanschouwen als in de hemel. De Haarlemse landmeter Dirk Klinkenberg (1709 - 1799) verwierf in het midden van de achttiende eeuw internationale roem met de vele kometen die hij ontdekte, onder meer vanaf het Stadhoudersrijke observatorium op een van de torens van het Binnenhof.⁴

Bij het zoeken naar kometen deed zich een probleem voor. Kometen zien eruit als vlekjes aan de hemel, maar er bleken ook andere ‘nevels’ te zien te zijn die niet bewogen. De Franse astronoom Charles Messier (1730-1817) bracht ze in kaart, om verwarring tijdens zijn zoektocht naar kometen te voorkomen.⁵ Geleidelijk werden die nevels echter een onderzoeksobject op zichzelf. Wat waren ze? Waren het groepjes sterren die te ver weg stonden om individueel gezien te kunnen worden? Sommige nevels bleken met een telescoop inderdaad uit sterren te bestaan. Bij andere nevels lukte dat niet – omdat ze te ver weg stonden, of omdat ze echt uit nevelachtige materie bestonden? De Duits-Britse astronoom William Herschel (1738-1822), die in 1781 wereldfaam verwierf als ontdekker van een nieuwe planeet (‘[King] George’s star’, later Uranus genoemd), bouwde zijn grootste telescopen vooral om dit raadsel op te lossen – hoewel ook hij graag kometen wilde ontdekken, samen met zijn zus Caroline, die er ten minste vijf op haar naam schreef. Herschel probeerde de nevels ook te classificeren in soorten, in de hoop iets te kunnen zeggen over hun ontwikkeling in de tijd. Volgens zijn biograaf Michael Hoskin was hij een van de eersten die sterrenkunde benaderde als natuurlijke historie en niet alleen als wiskundige wetenschap. Mogelijk had dit ook te maken met zijn opleiding, of eigenlijk het ontbreken daarvan: hij begon zijn carrière als professioneel musicus. Voor dit verhaal is het echter vooral van belang dat hij zich als een van de weinigen bezighield met objecten buiten het zonnestelsel.⁶ In de negentiende eeuw werd sterrenkunde steeds nadrukkelijker een nationale zaak. Elke zichzelf respecterende natie

stichtte een koninklijke of keizerlijke sterrenwacht, waar astronomen de beschikking kregen over de beste telescopen en werden bijgestaan door kamers vol gespecialiseerde rekenaars (Engels: computers). De Tsaristische sterrenwacht van Pulkovo bij Sint-Petersburg was het grote voorbeeld, met prachtige faciliteiten en een vrijwel onbeperkt budget.⁷ Hemelmechanica, het berekenen van de banen van planeten en kometen, stond nog steeds hoog aangeschreven, maar de sterren kregen ook meer aandacht. Dat hing samen met de negentiende-eeuwse hang naar nauwkeurigheid en naar compleetheid bij het in kaart brengen van de wereld. Niet alleen de continenten en de wereldzeeën werden door ontdekkingsreizigers



Fig. 1 De sterrenwacht van Pulkovo bij Sint-Petersburg, het voorbeeld voor veel sterrenwachten. Foto uit een fotoalbum die Hendrik van de Sande Bakhuizen bij zijn emeritaat in 1908 cadeau kreeg. Het bevindt zich nu in de Universiteitsbibliotheek Leiden.

opgemeten, ook de sterrenhemel werd opnieuw in kaart gebracht. Dat gebeurde met behulp van steeds betere instrumenten, maar vooral ook met steeds striktere procedures. Alle metingen moesten eindeloos worden herhaald en gecorrigeerd voor afwijkingen. De Duitse wiskundigen Friedrich Bessel (1784-1846) en Leonhard Euler (1707-1783) ontwikkelden nieuwe methodes om uit talloze metingen de beste waarde te destilleren. Dat was uiterst arbeidsintensief – vandaar de kamers voor rekenaars, die volgens een gestandaardiseerd proces data verwerkten. Het streven naar precisie leidde zo ook tot professionalisering van het astronomische bedrijf.⁸

De nieuwe methodes hadden resultaat: in de jaren 1830 publiceerde Bessel de eerste algemeen geaccepteerde parallax, oftewel de eerste direct gemeten afstand tot een ster: ruim 650.000 keer de afstand aarde-zon, of ruim tien lichtjaar.⁹ Een enorme afstand, terwijl het om een van de dichtstbijzijnde sterren moest gaan. Om deze meting te doen moest Bessel een hoek bepalen, vergelijkbaar met de afstand tussen de neus en de staart van een wesp, gezien op een afstand van twee kilometer.

In Nederland duurde het overigens lang voordat er een moderne sterrenwacht kwam. Onder Willem I werden wel plannen gemaakt voor een Koninklijke Sterrenwacht, maar die kwam uiteindelijk in Brussel, en tegen de tijd dat hij werd geopend was hij Koninklijke Sterrenwacht van het onafhankelijke België geworden.¹⁰ De jonge Frederik Kaiser (1808-1872), astronoom aan de Leidse universiteit, begon een lobby voor een nieuwe sterrenwacht. Hij appelleerde vooral aan nationalistische motieven: Nederland kon als zeevarende natie toch niet achterblijven bij Groot-Brittannië of Rusland. Het religieuze argument dat de perfectie van Gods schepping in de sterrenhemel te zien is, speelde bij hem nauwelijks meer een rol.¹¹ De regering was overigens niet erg onder de indruk van zijn argumenten. Pas na een eigen inzamelingsactie kreeg hij de regering zo ver om zijn initiatief te ondersteunen. De nieuwe Leidse Sterrewacht, gemodelleerd naar Pulkovo maar veel kleiner, werd in 1861 geopend.¹²

Kaiser omschreef zichzelf nadrukkelijk als de eerste professionele astronoom van Nederland. Daarmee bedoelde hij: de eerste astronoom die aan de negentiende-eeuwse eisen van methodische nauwkeurigheid voldeed. Samen met een handvol assistenten – zijn budget was te klein voor grote aantallen rekenaars – stortte hij zich op astrometrie, met behulp van een *state-of-the-art* meridiaankijker, het centrale instrument van de negentiende-eeuwse sterrenkunde. Een van de doelen was om parallaxen en ‘eigenbewegingen’ (de eigen beweging van sterren door de ruimte) te meten. Dat verliep langzaam; tegen het einde van de eeuw was slechts van ruim honderd sterren de afstand bekend.¹³ Geleidelijk werd nauwkeurigheid echter een doel op zich. Kaisers opvolger Hendrikus Gerardus van de Sande Bakhuyzen (1838-1923) stond erom bekend dat hij zo veel tijd besteedde aan het corrigeren van zijn instrumenten en metingen, dat hij vrijwel geen resultaten meer publiceerde.¹⁴

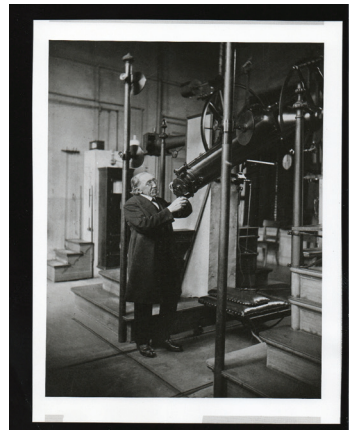


Fig.2 Hendrik van de Sande Bakhuyzen bij de meridiaankijker in Leiden, rond 1908.¹⁵

‘Volwassen wetenschap’

Aan het einde van de negentiende eeuw kregen astronomen de beschikking over een belangrijk nieuw hulpmiddel: fotografie. Het duurde even voordat fotografische platen gevoelig genoeg waren voor sterrenkundige toepassingen, maar toen dit eenmaal het geval was ging het snel. Een doorbraak kwam toen David Gill, de Britse ‘Royal Astronomer at the Cape of Good Hope’ in Zuid-Afrika, in 1882 een foto maakte van een komeet met een lange sluitertijd. Hij zag dat de achtergrond van de foto misschien wel interessanter was dan de komeet. Er stonden allerlei sterren op die door de telescoop niet te zien waren geweest. Omdat de foto een precieze afbeelding van de hemel was, kon je de plek van die sterren op de foto net zo goed meten als direct aan de hemel. Dat maakte astrometrie een stuk efficiënter, want je kon ’s nachts foto’s maken die je overdag verder verwerkte. Een ander voordeel was dat de hemel duurzaam werd vastgelegd, zodat latere onderzoekers de metingen nog eens konden overdoen. Dat beantwoordde aan de strengste negentiende-eeuwse idealen van nauwkeurigheid en controleerbaarheid. Volgens sommige moderne astronomen werd sterrenkunde hiermee pas echt een ‘volwassen’ wetenschap – maar dat wordt net zo goed gezegd over de Copernicaanse revolutie, de uitvinding van de telescoop in 1608 of Newtons hemelmechanica.¹⁶

Fotografie maakte grootschalige onderzoeksprojecten mogelijk, ook voor astronomen zonder toegang tot een goede telescoop, zoals de jonge professor Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) in Groningen. Hij was tot hoogleraar benoemd om onderwijs te geven, maar kreeg geen onderzoeksfaciliteiten. Er waren immers al twee sterrenwachten in Nederland: in Leiden en Utrecht. Daarom mat Kapteyn tussen 1886 en 1892 honderdduizenden sterren op foto’s die David Gill vanuit Zuid Afrika opstuurde. Kapteyns interesse ging echter verder dan plaatsbepaling alleen. Hij wilde weten hoe de sterren over de ruimte verdeeld waren (het ‘siderische probleem’, zoals hij het



Fig. 3 Deze foto maakte Sir David Gill, Royal Astronomer at the Cape of Good Hope, in 1882.¹⁷

noemde).¹⁸ Sinds de zeventiende eeuw was weliswaar geaccepteerd dat ze op verschillende afstanden van de aarde stonden, maar waren die verschillen willekeurig of zat er systeem in? Voor deze vragen had Kapteyn niet genoeg aan het handjevol parallaxen dat bekend was. Hij moest gebruik maken van speculatieve aannames en statistische methodes. Anders dan bij Bessel en Kaiser gebruikte hij statistiek dus niet alleen om metingen te corrigeren, maar ook om grotere conclusies te trekken.

Het interessante aan Kapteyn was dat hij niet alleen keek naar de verdeling van sterren, maar ook naar hun beweging. Zijn belangrijkste doorbraak was de ontdekking van twee ‘sterstromen,’ groepen sterren die dezelfde kant op bewogen. Het melkwegmodel waar hij aan werkte was dus *dynamisch*, het veranderde in de tijd. Dat was weer een stap verder verwijderd van het idee van ‘vaste sterren.’ De hemel was veranderlijk, zij het extreem langzaam.

Kapteyn keek niet alleen verder dan het zonnestelsel, hij onderzocht expliciet een grotere structuur: het Melkwegstelsel. Het is belangrijk om daarbij te bedenken dat het nog niet duidelijk was of het melkwegstelsel alle sterren in het universum omvatte. Dit was gerelateerd aan de oude vraag van Herschel naar de aard van ‘nevels’: waren dat extreem ver weg gelegen sterhopen, en zo ja, hoe ver en hoe groot dan? Waren het misschien aparte melkwegstelsels (*‘island universes’*, in de prachtige negentiende-eeuwse terminologie)? Of waren het kleinere, dichterbij gelegen sterrenhopen, of zelfs ‘echte’ nevels die niet uit sterren maar uit andere materie bestonden (*‘true nebosity’*)?¹⁹

Het Melkwegmodel van Kapteyn had een ongemakkelijk kenmerk: de zon bevond zich vrijwel in het midden. Dat was sinds Copernicus verdacht, het leek te wijzen op menselijk egocentrisme. Kapteyn erkende dit, maar kon er weinig aan veranderen. Pas later bleek dat zijn beeld vertekend was doordat licht van verder weg gelegen sterren deels geabsorbeerd wordt door interstellair stof, waardoor de afstandmetingen werden beïnvloed.

De meningen binnen de astronomische gemeenschap waren verdeeld, en als er consensus ontstond hield die nooit lang stand. Rond 1900 waren de meeste astronomen het erover eens dat er maar één groot Melkwegstelsel bestond, maar tien jaar later lag de discussie weer open. Pas in de jaren twintig ontstond er weer consensus, nu over het feit dat er meerdere Melkwegstelsels waren. Kapteyns leerling Jan Oort (1900-1992) rekende in 1927 definitief af met het Copernicaanse probleem. Hij beschreef hoe het

Melkwegstelsel om zijn as draait, met de zon in een van de buitenste delen. De zon had geen bijzondere plek in het sterrenstelsel.



Fig. 4 Portret van J.C. Kapteyn door Jan Veth, nu in de Kapteynkamer van het Kapteyn Instituut in Groningen. Foto auteur.

Classificatie

Zoals gezegd moest Kapteyn werken met aannames, bijvoorbeeld over de helderheid van sterren. Staan de helderste sterren allemaal dichtbij, of zijn er sterren die van zichzelf zo veel licht uitstralen dat ze ook op grotere afstand nog helderder zijn dan dichtbij gelegen sterren? Hij moest dus weten of er verschillende soorten sterren bestaan. Daarbij kon hij gebruik maken van spectrografie.

In het midden van de negentiende eeuw werd ontdekt dat je uit het lichtspectrum van een vlam (en dus ook van een ster) de chemische samenstelling van de bron kan afleiden. Daarvoor hoefde je het licht alleen maar te breken, bijvoorbeeld met een prisma. De 'handtekening' van de materie is te zien als lichte of donkere lijnen in het spectrum. Het interpreteren van spectra bleek niet eenvoudig, maar de eerste resultaten waren veelbelovend. Voor het eerst werd bijvoorbeeld bewezen dat sterren uit chemische elementen bestonden die ook op aarde voorkwamen. Bovendien

kon worden aangetoond dat sommige nevels dezelfde spectraallijnen hadden als sterren, en dus vermoedelijk uit ver weg gelegen sterren bestonden, terwijl andere een totaal ander spectrum vertoonden. Dat konden dus 'echte' nevels zijn. Het raadsel van de aard van de nevels had niet één antwoord.

In de meeste geschiedenisboeken wordt spectrografie beschreven als de doorbraak die het mogelijk maakte om de fysica van sterren te ontrafelen (ook weer een moment waarop sterrenkunde een 'volwassen' wetenschap werd). Dat gebeurde echter pas echt in de jaren twintig en dertig van de twintigste eeuw, toen het ontstaan van spectraallijnen met de nieuwe kwantummechanica werd opgehelderd. Tot die tijd hielden de meeste astronomen zich met andere vragen bezig.²⁰ Van de Sande Bakhuyzen zei in 1872 dat spectrografie weliswaar heel spannend was, maar hij verwachtte dat de hype niet lang zou duren. Zodra de eerste opwinding voorbij was, zouden astronomen zich weer met het klassieke handwerk moeten bezighouden: astrometrie. Daar was misschien weinig roem te verdienen, maar de vooruitgang van de wetenschap was volgens Bakhuyzen het meest gediend met precisiewaarnemingen.²¹

Bakhuyzen, Kapteyn en hun tijdgenoten vroegen dus niet, zoals moderne astrofysici, hoe sterren werken maar wat voor soort sterren zijn er? Hoe ver weg staan ze? Hoe bewegen ze zich door de ruimte? Daarvoor kwam spectrografie overigens wel van pas, ook zonder dat je fysica ervan hoefde te begrijpen. Je kon immers spectra van sterren vergelijken. Dat gebeurde bijvoorbeeld op grote schaal op de sterrenwacht van Harvard, waar een groep vrouwelijke astronomen, onder wie Annie Jump Cannon (1863-1941) en Antonia Maury (1866-1952), honderdduizenden sterren classificeerde aan de hand van hun spectra.²²

De Deens-Duitse astronoom Ejnar Hertzsprung (1873-1967) en de Amerikaan Henry Norris Russell (1877-1957) gingen een stap verder. Zij ontdekten systematische relaties tussen verschillende kenmerken van sterren. Ze vergeleken bijvoorbeeld de spectraalklasse ('kleur') van sterren met hun intrinsieke helderheid (indien bekend), in wat later het Hertzsprung-Russell diagram is gaan heten.²³ Een van hun vondsten was dat er rode reuzensterren bleken te bestaan. Interessant genoeg kon je die relatie ook weer gebruiken om afstanden te schatten: als je van een bepaalde klasse sterren de gemiddelde helderheid kent, kan je aan de hand van hun schijnbare helderheid vanaf de aarde schatten hoe ver weg ze staan ('spectroscopische parallax'). Zo werd het aantal bekende afstanden vanaf ongeveer 1910 ineens veel groter.²⁴

Een andere methode van afstandmeting werd uitgewerkt door

Hertzsprung en Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). Sommige sterren zijn variabel: hun helderheid verandert. Bij sommige sterren gaat dat volgens een regelmatig patroon, variërend van uren tot weken of maanden. Die variatie bleek ook weer samen te hangen met hun lichtkracht. Daarmee werd dit type variabele sterren (Cepheïden genoemd) bruikbaar voor afstandsbeoordeling: als je de periode van variatie weet, ken je de absolute helderheid en dus hun afstand. Het was deze methode waarmee de vraag over de aard van nevels definitief werd opgelost. Met een grote nieuwe telescoop op Mount Wilson (nabij Los Angeles) kon Edwin Hubble (1889-1953) een Cepheïde zien in de Andromedanevel. Hij bepaalde de afstand op 900.000 miljoen lichtjaar, ruim buiten zelfs de grootste schattingen van onze Melkweg.²⁵ De Andromedanevel moest een sterrenstelsel van vergelijkbare grootte als ons eigen Melkwegstelsel zijn. Het heelal bleek weer groter dan gedacht, en de plaats van de mens minder uniek. De aarde was niet het middelpunt van het heelal, de zon was geen unieke ster, en zelfs het Melkwegstelsel was niet enig in zijn soort.

Astrofysica

De sterrenkunde die we tot nu toe beschreven lijkt op geografie en natuurlijke historie: tellen, meten en categoriseren. Op het eerste gezicht weinig spannend, vergeleken met de ontwikkeling in de eeuw daarna.

Vanaf de jaren twintig ging sterrenkunde echter steeds meer op natuurkunde lijken. Nieuwe theorieën als de thermodynamica, kwantummechanica en plasmafysica maakten het mogelijk om de interne werking van sterren te beschrijven (astrofysica). De lijnen in het spectrum bleken veel informatie te bevatten, niet alleen over de chemische samenstelling van sterren maar ook over hun temperatuur, druk, magnetisch veld, ionisatiegraad, enzovoorts. In de jaren dertig gaven kernfysici antwoord op het raadsel van de energiebron van sterren: kernfusie.

Vanaf 1945 veranderde het vak weer, dit keer vooral door technische ontwikkelingen. Tot die tijd keken astronomen alleen naar zichtbaar licht, met een golflengte van ongeveer 400-700 nanometer. Na de Tweede Wereldoorlog kwamen er nieuwe telescopen beschikbaar die ook radiostraling, ultraviolet licht, infrarood licht en röntgenstraling konden zien. Aan het einde van de twintigste eeuw konden astronomen straling waarnemen met golflengtes variërend van enkele picometers (10-12 m, een miljardste millimeter) tot

tientallen meters. Het 'meetraam' van de sterrenkunde was vele malen groter geworden, zei Henk van Bueren (1925-2012) in zijn oratie als hoogleraar astrofysica in Utrecht in 1965. Hij voegde eraan toe dat de verbreding van het denkraam daarbij nog achterbleef.²⁶

Die nieuwe waarnemingen, bijna allemaal voortbouwden op militaire technologie (radar, infraroodkijkers, röntgendetectors in satellieten) onthulden een nieuw heelal. Onzichtbaar interstellair gas werd zichtbaar en er werden exotische objecten als quasars (door de geëmigreerde Nederlandse astronoom Maarten Schmidt) en pulsars ontdekt. Veel van die objecten zonden enorm veel radio- en röntgenstraling uit. Er moesten uiterst gewelddadige processen aan de gang zijn in het heelal, met extreem hoge temperaturen, druk en magnetische velden. Het heelal bleek dynamischer en gevarieerder dan gedacht. De eminente Nederlandse astronoom Jan Oort (1900-1992) zei ooit: 'Voor de komst van radioastronomie hadden astronomen zich niet gerealiseerd hoeveel zaken in het universum een explosieve aard hebben.'²⁷

Die explosieve aard betrof niet alleen astronomische objecten, maar ook het universum als geheel. Al sinds de jaren dertig waren astronomen het erover eens dat het heelal uitdijt, maar over een mogelijk begin durfde niemand iets te zeggen. Eind jaren veertig kwam een groepje kernfysici onder leiding van George Gamow (1904-1968) met een theorie over hoe de eerste atomen waren ontstaan tijdens het explosieve begin van het heelal. In de jaren vijftig werd hun 'big bang-theorie' gemeengoed, hoewel niet alle astronomen meteen overtuigd waren.²⁷ Voor de meeste wetenschappers werd het pleit echter beslecht toen in 1965 de kosmische achtergrondstraling werd ontdekt.

Al deze nieuwe ontwikkelingen trokken veel aandacht, zowel van astronomen als van het bredere publiek. Astronomen werkten met nieuwe telescopen, en ze verwerkten hun waarnemingen met behulp van geavanceerde natuurkundige modellen. Sterrenkunde werd astrofysica. Astrometrie, het klassieke meten van sterposities, was stoffig en ouderwets geworden. Er viel geen eer meer te behalen. Dat die klassieke methodes in de negentiende - en vroege twintigste eeuw een stille omwenteling in ons wereldbeeld hadden veroorzaakt werd vergeten.

Sinds kort maakt astrometrie overigens een comeback. Telescopen in de ruimte, buiten de verstorende Aardse atmosfeer, kunnen metingen doen die vele malen nauwkeuriger zijn dan vanaf de aarde. Interessanter nog: die metingen kunnen worden geautomatiseerd. Tussen 1989 en 1993 mat de ESA-satelliet Hipparcos de positie van meer dan 2,5 miljoen sterren. De in

2013 gelanceerde satelliet GAIA zal naar verwachting een miljard objecten meten, met een grotere precisie dan Kaiser of Kapteyn ooit hadden kunnen dromen. Dat zijn er genoeg om een driedimensionaal model van een groot deel van het Melkwegstelsel mee te maken. Daarmee kan je bijvoorbeeld de evolutie van het Melkwegstelsel onderzoeken en het mechanisme achter de typische spiraalvorm. Wie weet kan astrometrie, het saaiste onderdeel van de sterrenkunde, opnieuw ons heelalbeeld veranderen.

Noten

1. Michael Hoskin, "The Astronomy of the Universe of Stars," in: *The Cambridge Concise History of Astronomy*, ed. Idem (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), 168-218.
2. Alexander Koyré, *From the Closed World to the Infinite Universe* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1957) is nog steeds een klassieker. Er zijn veel populaire boeken over de geschiedenis van de kosmologie. De beste historische werken zijn nog altijd John D. North, *The Fontana history of astronomy and cosmology* (London: Fontana Press, 1994) en Helge S. Kragh, *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe, A History of Cosmology* (Oxford: Oxford University Press, 2013).
3. Hoskin, "The Astronomy of the Universe of Stars," 179. De moderne waarde is ongeveer 200 keer zo groot als die van Huygens.
4. Huib J. Zuidervart, *Van 'Konstgenoten' en Hemelse Fenomenen: Nederlandse Sterrenkunde in de Achttiende Eeuw* (Rotterdam: Erasmus Publishing, 1999), 133-137; idem, "Dirk Klinkenberg: een kometenjager en zijn gepassioneerde 'konstgenoten,'" in: *De telescoop, erfenis van een Nederlandse uitvinding*, ed. D. van Delft et.al. (Amsterdam: Bert Bakker, 2008), 27-32.
5. De helderste nevels zijn nog steeds bekend onder hun Messiernummer; de Krabnevel is M1.
6. Michael Hoskin, *Discoverers of the Universe: William and Caroline Herschel* (Princeton: Princeton University Press, 2011); de Herschels zijn ook mooi beschreven door Richard Holmes, *The Age of Wonder: how the Romantic generation discovered the beauty and terror of science* (London: HarperCollins, 2008), hoofdstuk 4.
7. *National Observatories Issue, Journal for the History of Astronomy* 22, no. 1 (1991); Steven J. Dick, "Pulkovo Observatory and the National Observatory Movement: an historical overview," in: *Inertial Coordinate Systems on the Sky*, ed. J.H. Lieske en V.K. Abalakin (Dordrecht: Springer, 1990), 29-38; Mari E. Williams, "Astronomical Observatories as Practical Space: the case of Pulkowa," in: *The Development of the Laboratory: Essays on the Place of Experiment in Industrial Civilization*, ed. F.A.J.L. James (London: Palgrave, 1989), 118-136.
8. Robert W. Smith, "A national observatory transformed: Greenwich in the nineteenth century," *Journal for the History of Astronomy* 22 (1991): 5-20; cf. Simon Schaffer,

- “Astronomers mark time: discipline and the personal equation,” *Science in context* 2 (1988): 115-145
9. F.W. Bessel, “On the parallax of 61 Cygni,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (1838): 152-161.
 10. A.G. Velghe, “Adolphe Quetelet, stichter en eerste directeur van de Koninklijke Sterrenwacht,” *Mededelingen van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, klasse der Wetenschappen XXXVII* no. 2 (1975): 5-14; André Koeckelenbergh, “De sterrenkunde en de externe geofysica,” in: *Geschiedenis van de wetenschappen in België 1815-2000* deel 1, ed. Robert Halleux, Carmélia Opsomer en Jan Vandersmissen (Brussel: Gemeentekrediet / Dexia 2001), 143-146.
 11. Frans van Lunteren, “‘God is groot en wij begrijpen Hem niet’: Kaisers populaire sterrenkunde en het einde van de fysiko-theologie,” *Studium* 4 (2011): 85-104.
 12. *Frederik Kaiser (1808-1872), schepper van de ‘nieuwe’ Leidse Sterrewacht*, themanummer *Studium* 4:1 ed. Huib J. Zuidervaart et.al (2011); David Baneke, *De ontdekkers van de hemel: de Nederlandse sterrenkunde in de twintigste eeuw* (Amsterdam: Prometheus Bert Bakker 2015).
 13. Willem de Sitter, *Kosmos* (Cambridge, MA: Harvard University Press 1932), 57.
 14. Baneke, *De ontdekkers van de hemel*; Frans van Lunteren, “Hendricus Gerardus van de Sande Bakhuyzen,” in: *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*, ed. Th. Hockey et al. (New York 2007), 1171-1172.
 15. Meridiaankijkers waren de belangrijkste instrumenten van de negentiende-eeuwse sterrenkunde. De sterrenwacht was letterlijk om het instrument heen ontworpen. Deze telescoop bevindt zich nu in de collectie van Museum Boerhaave. Fotoarchief Sterrewacht Leiden.
 16. David Baneke, “Sterrenkunde, de oudste wetenschap?,” *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 81 (2015): 276-278; de opmerking over fotografie als volwassenwording werd onder meer gemaakt door Claus Madsen, *The Jewel on the Mountaintop: The European Southern Observatory through Fifty Years* (Garching: ESO, 2012), 125; over de geschiedenis van astronomische fotografie: John Lankford, “The impact of photography on astronomy,” in: *The General History of Astronomy*, vol. 4A: *Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950*, ed. Owen Gingerich (Cambridge: Cambridge University Press 1984), 16-39.
 17. Behalve de komeet bleken er ook onverwacht veel sterren op de foto te staan. De foto was niet alleen een mooi plaatje, maar ook een weergave van de hemel waarop je sterposities kon meten. Fotoarchief Sterrewacht Leiden.
 18. Pieter C. van der Kruit, *De inrichting van de hemel: een biografie van astronoom Jacobus C. Kapteyn* (Amsterdam: Amsterdam University Press, 2016); *The legacy of J. C. Kapteyn. Studies on Kapteyn and the development of modern astronomy*, ed. Pieter C. van der Kruit en Klaas van Berkel (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2000); Erich Robert Paul, *The Milky Way Galaxy and Statistical Cosmology 1890-1924* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993).
 19. Robert W. Smith, “Beyond the Big Galaxy: the structure of the stellar system,” *Journal for the History of Astronomy* 37 (2006): 307-342; idem, “Beyond the Galaxy:

- the development of extragalactic astronomy 1885-1965," *Journal for the History of Astronomy* 39 (2008): 91-119 en 40 (2009): 71-107; idem, *The Expanding Universe: astronomy's 'Great Debate', 1900-1931* (Cambridge: Cambridge University Press, 2009).
20. Cf. John Lankford, "Amateurs and Astrophysics: a neglected aspect in the development of a scientific specialty," *Social Studies of Science* 11, no. 3 (1981): 275-303.
 21. H.G. van de Sande Bakhuyzen, *De methode welke thans bij de beoefening der sterrenkunde moet gevolgd worden* (oratie Leiden, 1872).
 22. David DeVorkin, "Community and Spectral Classification in Astrophysics: The Acceptance of E. C. Pickering's System in 1910," *Isis* 72, no. 1 (1981):29-49; idem, "Stellar evolution and the origin of the Hertzsprung-Russell diagram," in *The General History of Astronomy*, vol. 4A, 90-108; Pamela E. Mack, "Strategies and Compromises - Women in Astronomy at Harvard College Observatory 1870-1920," *Journal for the History of Astronomy* 21 (1990): 65-76.
 23. DeVorkin, "Stellar evolution."
 24. Smith, "Beyond the Big Galaxy."
 25. Smith, "Beyond the Galaxy" part 2, 72. De moderne waarde is ongeveer 2 miljoen lichtjaar: in de jaren vijftig is de Cepheidemethode herijkt, waardoor veel afstanden verdubbelden.
 26. H.G. van Bueren, *Laboratorium-astrofysica* (oratie Utrecht 1965).
 27. Interview van Jan Oort met Woodruff T. Sullivan III, 1978; opname in het archief van het National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, VA.
 28. Helge Kragh, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe* (Princeton: Princeton University Press, 1997).