

over de evolutie om te schakelen: de nevelvlekken, die eerst als verre melkwegen aan het eind van de ontwikkelingsreeks hadden gestaan, worden nu aan het begin geplaatst. Zij zijn lichtgevende oermaterie, waaruit zich door condensatie de sterren hebben gevormd; zoals hij het in 1811 uitdrukte: „... dat, in het voortgaan der tijden deze nevels, die zich reeds in zo „gecomprimeerde toestand bevinden, nog verder zullen condenseren en tot „werkelijke sterren worden”. Tegelijk gaat ook het samenballen van de sterrescharen voort, en wordt de melkweg, oorspronkelijk een gelijkmatige laag, steeds meer in heldere fragmenten en condensaties opgebroken.

Het waren de hoogste en wijdeste problemen van de bouw van het heelal, die hier voor het eerst in het oog gevat werden. Maar daar tussendoor werden ook andere verschijnselen van de vaste sterren door HERSCHEL opgemerkt en behandeld. Reeds in 1783 had hij uit de eigen bewegingen van een dozijn heldere sterren afgeleid, dat deze voor een deel de reflex waren van een voortgaande beweging van ons zonnestelsel door de ruimte, in een richting ongeveer naar de ster λ Herculis toe. Ook begonnen toen de helderheidsveranderingen van sommige vaste sterren de aandacht te trekken. In 1782 had JOHN GOODRICKE de regelmatige verandering van de ster Algol in Perseus in een periode van 2d 21u vastgesteld, en er een verklaring voor gegeven als telkens terugkerende verduisteringen door een in die periode om Algol rondlopend donker lichaam. Twee jaar later ontdekte GOODRICKE de regelmatige veranderlijkheid van δ Cephei en van β Lyrae, terwijl zijn vriend PICOTT in 1785 de ster η Aquilae en naderhand een klein sterretje in het Schild als veranderlijk onderkende. HERSCHEL was tegelijkertijd begonnen met systematisch de helderheden der sterren met elkaar te vergelijken, en hun kleine helderheidsverschillen door een stelsel van bepaalde tekens uit te drukken. Daarbij ontdekte hij in 1795 de veranderlijkheid van de rode ster α Herculis; de door hem bedachte methode van helderheidsvergelijkingen is lang onopgemerkt gebleven en eerst veel later door ARGELANDER nader ontwikkeld en uitgewerkt.

Zo was nu de wereld der vaste sterren voorgoed binnen het gebied van de werkdadige sterrekunde getrokken. Dat HERSCHEL dit heeft kunnen volbrengen was wel grotendeels het gevolg daarvan, dat hij als autodidact van buiten af in de wetenschap was gekomen. Niet bezwaard met de vracht der traditie, die voor de in het vak opgeleiden veelal het gebied van de plichtmatige en erkende objecten van studie omgrenzen, kon hij daarbuiten onbetreden wegen inslaan. In de geschiedenis van de sterrekunde is zo iets dikwijls voorgekomen. Nu was het een bekroning van het opbouwend sterrekundig onderzoek van twee eeuwen, dat de poorten naar het wijde gebied van de sterrenwereld waren opengeworpen, en de wegen gebaad, waarop de wetenschap in de volgende eeuw zou voortgaan.

VII. DE EEUW DER WETENSCHAP

32. PRECISIE-TECHNIEK

„Wij mogen ons niet vleien”, aldus in 1782 de welbepaalde geschiedschrijver der sterrekunde BAILLY, die later als president van de Constituante in de Franse revolutie een rol speelde, „dat de instrumenten, zelfs als ze „nog geperfectioneerd worden, ons zullen veroorloven nog verder te gaan en „de nauwkeurigheid tot voorbij één seconde te drijven. Het zou best kunnen „zijn, dat BRADLEY daarin de grenzen van onze kennis heeft vastgelegd”. Bewondering voor de bereikte hoogte — 1" is inderdaad zeer weinig, vertewoordigt $\frac{1}{100}$ mm op een cirkel van 2 meter straal — is hier gepaard aan de naïviteit van de achttiende-eeuwse burger, die met de nu bijna bereikte heerschappij van de menselijke rede en van het inzicht in een natuurlijke wereldorde de geestelijke — en weldra ook de politieke — ontwikkeling van de mensheid voltooid achtte. Wie kon toen vermoeden, dat dit alles slechts voorbereiding voor een onafzienbare, steeds snellere maatschappelijke ontwikkeling zou zijn, die een even onbegrensde ontwikkeling van de wetenschap in steeds sneller tempo zou meebrengen?

In het laatst van de 18de eeuw was in Engeland de industriële revolutie begonnen met haar diep ingrijpende maatschappelijke gevolgen, en breidde zich in de loop van de 19de eeuw over de naburige landen, over de Verenigde Staten van Noord-Amerika, en ten slotte over de gehele wereld uit. Haar grondslag was de groei der techniek; het oude kleine handwerkstuig werd verdrongen door de veel productievare vernuftig geconstrueerde machines, weldra door de stoommachine als machtige beweegkracht gedreven. Uit handwerk en kleinbedrijf groeide de kapitalistische grootindustrie op, die steeds meer het economisch leven beheerste en ten slotte het gehele aspect van de aarde heeft omgewoeld. En daarmee veranderden ook de mensen; de scherpe concurrentiestrijd van de ondernemers bracht nieuwe spanning en joeg niet hen alleen op in rusteloze energie. Uit de na-middeleeuwse, min of meer absolutistische, door grondbezit en handel beheerste wereld van Europa kwam nu een krachtige burgerklasse omhoog als het leidende element van de nieuwe maatschappij. In felle revoluties (als in Frankrijk) of in diepgaande hervorming (als in Engeland) bouwde zij haar politieke macht en

maatschappelijke invloed op. Haar principes van persoonlijk initiatief en van onbelemmerde vrijheid van bedrijf, van denken en handelen vervulden steeds meer het maatschappelijk leven.

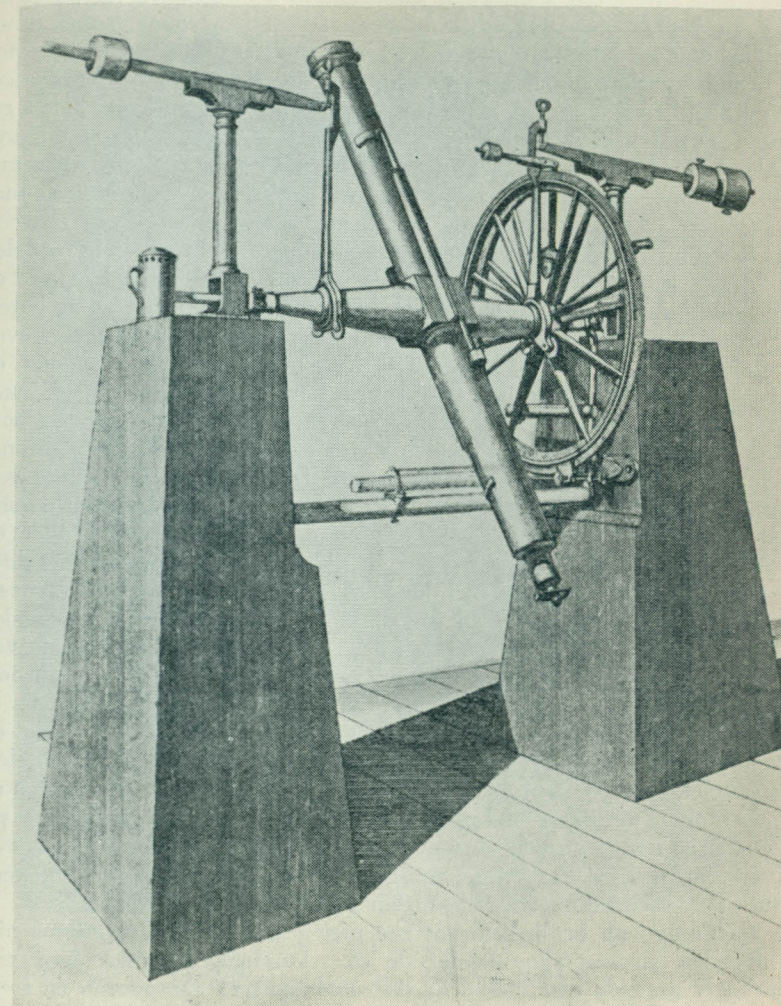
In deze economische ontwikkeling werd de natuurwetenschap in steeds hoger mate de grondslag van nieuwe techniek. De oude traditionele arbeidsmethoden werden gaandeweg door toepassingen van de natuurwetenschap vervangen. De opkomende burgerklasse voelde, dat zij de wetenschap nodig had, dat kennis der natuur goed en heilzaam voor haar was; en zij bevorderde deze studie door de stichting van universiteiten en laboratoria. En dit was niet enkel vanwege het praktische voordeel, als middel tot opvoering van de productiviteit van de arbeid. De wetenschap deed een nieuwe vrijere denkwijze in haar opgroeien, tegenover de gebondenheid van de oude tradities; zij werd een bezielende geestelijke macht van kennis en ontwikkeling, waarin steeds bredere lagen van de bevolking deelden. Vooruitgang en „Aufklärung”, verlichting, werden de leuzen van de nieuwe tijd.

Dat de ondersteuning van en de belangstelling in wetenschap niet enkel of zelfs voornamelijk de directe praktische nuttigheid golden blijkt wel duidelijk in het grote aandeel dat daarin de sterrekunde ten goede kwam. De sterrekunde, toen nog steeds met de wiskunde de hoogst ontwikkelde onder de wetenschappen, en dus het hoogst in aanzien, was het aangewezen terrein voor het onbaatzuchtig zoeken naar zuivere kennis. De stichting van telkens nieuwe sterrewachten, als persoonlijke liefhebberij van rijke burgers, of als enigste „research”-instituten verbonden aan grotere universiteiten, kan als toonbeeld gelden van de voorname plaats die de wetenschap in de nieuwe gedachtenwereld van de negentiende-eeuwse mensen innam.

De opkomst van de machinale industrie schiep de technische basis ook voor een vooruitgang van de sterrekunde. De vervaardiging van de machines nodig voor de fabrieken en voor het toenemend snelverkeer eiste een eigen nieuwe techniek, eiste ijzer- en staalbewerking van hoge volkomenheid; men moest precies passende onderdelen en zuiver ronde assen voor het snelle draaien der raderen kunnen vervaardigen. Deze geperfectioneerde metaaltechniek, de basis van de 19de eeuwse industrie, werkte terug op alle techniek, en heeft het mogelijk gemaakt om ook de sterrekundige instrumenten uit hun vroegere onvolkomenheid van handwerk tot steeds groter volmaaktheid op te voeren. Nu treden instrumentmakers naar voren, bekwame technici, die met zorg en liefde er naar streven om met de nieuwe technische materialen in hun werkplaatsen zorgvuldig afgewerkte meetinstrumenten te bouwen. Nog steeds blijven daarin de Engelse firma's: RAMSDEN, CARY, en naderhand TROUGHTON en SIMMS hun naam handhaven; maar nu beginnen ook Duitse constructeurs mede te dingen. In de algemene geestelijke opleving van Duitsland in het laatst van de achttiende eeuw, die zich in een opbloei van literatuur, van toonkunst, van filosofie openbaart, maar zich eerst een halve eeuw later in een economische en politieke ontplooiing voortzet, deelt ook de natuurwetenschap, waarin het weldra een gelijkwaardige plaats naast Engeland en Frankrijk inneemt. En al dadelijk treedt Duitsland naar voren in de vernieuwing en verfijning van de precisie-techniek. Instrumentmakerswerkplaatsen worden gesticht: in Hamburg de werkplaatsen van J. G. REPSOLD (in 1802), die van vader op zoon overgaand de gehele 19de eeuw mee aan de spits blijft, en in München (in 1804) door G. VON REICHENBACH. Vaak

begonnen zulke werkplaatsen met kleiner werk, theodolieten e.d., waarnaar vraag was voor het landmeten, en waagden ze zich gaandeweg aan steeds groter taken.

Voor de plaatsbepaling van de sterren komt nu van uit de Duitse werkplaatsen een nieuw type van instrument in gebruik, dat verkregen werd door



Meridiaancirkel van REICHENBACH.

op de as van een doorgangsinstrument, een meridiaankijker, een verdeelde cirkel te bevestigen voor het meten van de declinaties; zo werd dit tot „meridiaancirkel”. Nu konden de oude muurkwadranten vervallen, die steeds enigszins logge toestellen waren geweest, waarvan de fouten in de opstelling en in de verdeling moeilijk te bepalen waren, en die daarom maar zoveel

mogelijk vast en zwaar waren gemaakt. In plaats daarvan werd bij de meridiaancirkel op symmetrie in de gehele bouw, op zuivere afwerking, en tegelijk op lichte bepaalbaarheid van alle overgebleven fouten gewerkt. Terwijl men vroeger voor de declinaties de nauwkeurigheid in de cirkelaflezing had trachten te verzekeren door de straal van de cirkel zeer groot te nemen en daarvan dan alleen een kwart, een kwadrant te nemen, werd nu de straal kleiner en kleiner genomen, dus minder vervormbaar door temperatuurverschillen en door buiging onder de werking van de zwaartekracht. De fouten in de complete cirkels, die met de kijker meedraaiden en door vaste microscopen werden afgelezen — het tegendeel van wat bij de muurkwadranten gebeurde — waren kleiner en gemakkelijker te elimineren. De grotere nauwkeurigheid werd verkregen, doordat scherp gegraveerde deelstrepen met microscopen bekeken, ingesteld en afgelezen werden, eerst nog met een nonius, later met een schroefmicrometer; doorgaans correspondeerde één schroefomwenteling met 1' op de cirkelrand, en indien dan de schroefkop in 60 delen verdeeld was, geschiedde de aflezing zonder moeite tot 0,1". Tegelijk werd de waarnemingskijker verbeterd die in het midden rechthoekig op de as bevestigd was. Het achromatisch objectief van 10 cm middellijn of meer, even zuiver afgewerkt als voor kijkers om te kijken, gaf niet alleen mooier en zuiverder sterbeelden, die uiterst nauwkeurig konden worden ingesteld, maar gaf ze ook zoveel helderder, dat zwakke sterren, tot de 9de grootte toe, zonder moeite in een verlicht veld konden worden waargenomen. In het brandpunt van de kijker bevonden zich een horizontale draad en een aantal verticale; door een fijne schroefbeweging werd de kijker zo gesteld, dat de ster precies over de horizontale draad liep; en dan werd de cirkel door de microscopen afgelezen. Tevens werden de tijdstippen, waarop de ster, door de sterke vergroting zichtbaar snel door het gezichtsveld lopend, de verticale draden passeerde, naar de tikken van de klok in tiende delen van seconden genoteerd. In latere tijd, sinds 1844, kwam van uit Amerika in plaats van het gelijktijdig kijken naar de ster en luisteren naar de tikken (oog- en oormethode), de methode van het registreren van de doorgangen steeds meer in gebruik; de waarnemer volgde alleen maar de ster met het oog, en sloot op het ogenblik dat de ster de draad passeerde, een in de hand gehouden electrisch contact, dat op een Morse-strook een teken indrukte naast de rij van de door de klok bewerkte seconde-indrukken. Dit maakte het waarnemen gemakkelijker en nauwkeuriger; de toevallige fout van zulk een tijdstip was niet meer dan omstreeks 0,06 seconde, en in het gemiddelde van vele draden werd de fout in de rechteklimming vele malen geringer.

De verfijning van het instrument zou niet gebaat hebben, trouwens niet eens mogelijk geweest zijn, zonder de sterrekundige, die juist door zijn steeds hoger gestelde detail-eisen de instrumentmakers aanspoorde en soms aan hun werk richting gaf. De baanbreker op het terrein van de nauwkeurig metende sterrekunde was in het begin van de 19de eeuw de Koningsberger astronoom FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784—1846). Hij was, als zovele eerste rangs sterrekundigen, van buitenaf in het vak gekomen. Als klerk op een handelskantoor in Bremen ging hij, omdat hij cargadoor wilde worden en zeereizen doen, boeken over plaatsbepaling op zee bestuderen, en verdiepte zich vandaar uit steeds verder in sterrekundige theorie en practijk. Even begaafd in wiskundige theorie als volhardend in practisch meten en



FRIEDRICH WILHELM BESSEL.

rekenen, voerde hij van af het eerste begin al zijn werk door met een zorgvuldige grondigheid van theoretische opbouw en nauwkeurigheid in berekening, die ver uitging boven de betrekkelijk ruwe kwaliteit van het voorhanden materiaal. Zijn meesterstuk, waarmee hij zijn leidende plaats in de sterrekundige wereld innam, was de bewerking van de waarnemingen van BRADLEY, van wie de dagboeken enige tijd te voren in volle uitvoerigheid waren gepubliceerd. Dit was het beste materiaal uit de gehele achttiende eeuw, door de zorgvuldigheid waarmee de waarnemer de fouten van zijn instrumenten had bepaald, of er de gegevens voor had genoteerd. BESSEL echter moest niet alleen deze fouten, maar ook alle benodigde sterrekundige grootheden, zoals aberratie, nutatie, refractie, die voor de herleiding nodig waren, uit BRADLEY's waarnemingen zelf halen; zo zeer overtroffen deze alles wat in de halve eeuw daarna was verricht. Daarom ook mocht hij zijn in 1818 uitgegeven werk „*Fundamenta Astronomiae*” (Fundamenten der sterrekunde) noemen. En door zijn zelfs boven dit materiaal uitgaande nauwkeurigheid van herleiding stelde hij een nieuwe, hogere standaard op, zowel voor de constructeurs van nieuwe instrumenten als voor de sterrekundigen die er mee werkten. In 1818 verwierf hij voor zijn nieuw opgerichte sterrewacht in Koningsbergen een meridiaancirkel van REICHENBACH, in 1843 een groter met tal van moderne verbeteringen toegerust instrument van REPSOLD; hiermee kon hij zelf het voorbeeld geven.

BESSEL stelde het beginsel op, dat een sterrekundig meetinstrument, daar het nooit volkomen aan zijn wiskundig-abstract ideaal beantwoordt, alleen door de nauwkeurige bepaling van alle afwijkingen — mits het maar stevig en dus standvastig is — en aanbrengeing van correcties daarvoor, resultaten kan geven, alsof deze met een volmaakt of foutenloos instrument waren verkregen. „Ieder instrument”, zegt hij, „wordt op deze manier tweemaal „gemaakt, eerst in de werkplaats van de kunstenaar uit messing en staal, en „dan voor de tweede maal door de astronoom op papier, door de lijsten van „de nodige correcties, die hij door zijn onderzoek vindt”. Deze kan scherper meten dan de ander kan construeren; dus moet hij alle grootheden, die het instrument karakteriseren, alle kleine afwijkingen van de ideale bouw, zorgvuldig bepalen, om ze door correcties aan de metingsuitkomsten in rekening te kunnen brengen. De optische as van de kijker staat niet precies loodrecht op de draaiingsas, die zelf niet zuiver horizontaal Oost-West ligt; de stalen tappen, waarmee de as op de pannen rust, zijn niet precies even dik en zelfs niet volmaakt rond. De verdelingsstrepen staan niet absoluut op de goede plaats, hoe klein de afwijkingen bij cirkels uit de beste werkplaatsen ook mogen zijn. Er blijven overal spelingen van honderdsten of duizendsten van millimeters. Een aantal van deze afwijkingen veranderen met temperatuur, weersgesteldheid en tijd; dus moeten de waarnemingen zo ingericht worden, dat zij er steeds uit te bepalen of te elimineren zijn. Dan moeten ten slotte nog correcties aangebracht worden, die uit veranderingen aan de hemel ontstaan, voor praecessie, nutatie, aberratie; om dit werk te vergemakkelijken, en opdat deze door ieder waarnemer op dezelfde wijze met dezelfde constanten konden worden aangebracht, gaf BESSEL sinds 1830 jaarlijks zijn „*Tabulae Regiomontanae*” (Koningsberger tafels) uit, die voortaan door ieder bij de reducties gebruikt werden en mettertijd een vast bestanddeel van de sterrekundige almanakken vormden.

Op deze wijze gebouwd en gehanteerd heeft de meridiaancirkel de metende sterrekunde van de negentiende eeuw beheerst. Op de vele nieuw opgerichte sterrewachten, op de kleinere in haast elke academiestad zowel als op de grote centrale instituten, zoals Greenwich, Poelkowa, Parijs, Washington, vormde hij het hoofdinstrument, waarmee min of meer doorlopend gewerkt werd. Bij vele dozijnen verschijnen de telkenmalige samenvattingen van vele jaren van dit werk in de vorm van catalogi van rechte-klimmingen en declinaties; de standaard van precisie is daaraan te zien, dat in de eindwaarden de declinaties tot de honderdste boogseconde 0,01", en de rechteklimmingen tot de daarmee ongeveer gelijkwaardige duizendste tijdseconde 0,001s worden opgegeven. BRADLEY, die te voren in BESSEL's bewerking de beste waarden voor alle sterrekundige grootheden had moeten leveren, was sinds het midden van de 19de eeuw alleen nog maar nodig om, in een nieuwe (in 1838 gepubliceerde) bewerking door A. AUWERS, als de beste oudste, zij het ook niet geheel gelijkwaardige bron voor de honderd jaar vroegere plaatsen, de eigen beweging der sterren te doen kennen. En in het begin van de 20ste eeuw was ook dat niet meer nodig; want toen kon LEWIS BOSS voor een zorgvuldige afleiding van de eigen bewegingen gebruik maken van zich over een eeuw lang uitstreckende plaatsbepalingen van de nieuwe, hogere kwaliteit. Engeland, dat in de 18de eeuw vooraanging, volgde nu langzamer de ontwikkeling van het vasteland; eerst in 1833, toen G. B. AIRY aan het hoofd kwam, kreeg Greenwich een meridiaancirkel naar Duits model. Hier werd de mindere kwaliteit vergoed door de ononderbroken continuïteit van het waarnemingswerk, dat niet alleen de sterren maar ook vooral de zon, de maan en de planeten omvatte. Greenwich was als een oude gevestigde zaak met oude, vaak conservatieve routine en vaste klandizie: de behoeften van de Engelse zeevaart; daarin mettertijd door Kaapstad aangevuld, en door de nieuwe Amerikaanse marine-sterrewacht te Washington gesecondeerd.

Taak en program van al dit meridiaanwerk, de basis van de gehele moderne preciese kennis van het heelal, waren de plaatsen der sterren; en dit ging naar hoofdzakelijk twee richtingen. Enerzijds de bepaling, met de uiterste nauwkeurigheid, van een kleiner aantal fundamentele sterren — dit aantal wisselde van 36 allerfundamenteelste, tot 400 in de almanakken opgenomen sterren, of ten slotte tot alle 3000 Bradley-sterren — waarbij niets van elders overgenomen en alles uit zichzelf van de basis uit opgebouwd werd. Anderzijds de plaatsbepaling van veel grotere aantallen telescopische sterren, door aansluiting aan de reeds bekend geachte fundamentele sterren. Aan het eerste, het moeilijkste, was het meeste werk van de beste waarnemers in de 19de eeuw gewijd. Maar het belang van een goede kennis van de bewegingen ook juist van de tienduizenden zwakke sterren had reeds BESSEL er toe gebracht, een groot deel van de tijd van zijn meridiaancirkel, tussen 1821 en 1833, hieraan te besteden: z.g. zône-werk, omdat de sterren die op ongeveer gelijke hoogte na elkaar de meridiaan passeren en daarbij gepakt worden, in een gordel of zône van bepaalde declinatie liggen. Ook reeds vóór hem was zulk werk op zwakke sterren met primitievere middelen door LALANDE te Parijs verricht, in 1788—1803; en hij werd door anderen nagevolgd. Maar de sterren, die zo te hooi en te gras konden genomen worden, vormden geen volledig geheel. Dit is eerst gekomen, toen in 1871 de „*Astronomische Gesellschaft*” de zaak op coöperatieve basis aanvatte. Daarbij kregen 13 sterre-

wachten (later vermeerderd tot 16) ieder een bepaalde zône te bewerken (tussen 5° en 10° , tussen 10° en 15° declinatie, enz.), om daarin volgens gelijke methode en volgens vooraf klaargemaakte lijsten van alle sterren tot de 9de grootte de plaats te bepalen. Het heeft tientallen jaren geduurd, voor dit meer dan 100.000 sterren omvattende program tot een goed einde was gebracht — en daarna kwam nog de uitbreiding over de Zuidelijke hemel. Voor een aantal onder deze sterren, die vroeger al door LALANDE of BESSEL waren waargenomen, konden nu de eigen bewegingen afgeleid worden; maar de grondgedachte was toch, dat men werkelijk goede waarden voor de beweging van allemaal zou krijgen, als in de 20ste eeuw dit werk volgens dezelfde methode herhaald zou zijn.

Natuurlijk bleven de methoden van het meridiaanwerk in het verloop van de 19de eeuw niet enkel op de eens bereikte hoogte staan. De verwezenlijking van het ideaal der zuivere nauwkeurige plaatsbepaling stuitte af op talloze moeilijkheden; maar dit dwong de sterrekundigen tot steeds voortgaande onderzoekingen en verbeteringen. Waar men gemeend had, volgens de kleine verschillen der afzonderlijke uitkomsten, een hoge nauwkeurigheid te hebben bereikt, gemeten door enige honderdsten van seconden, deed men weldra de teleurstellende ervaring op, dat vergelijking met de resultaten van andere sterrewachten veel grotere afwijkingen toonde, van tiende delen en soms van gehele seconden. Deze afwijkingen, in elk der coördinaten, hadden een geleidelijk systematisch verloop over de hemel; en eerst als men elke catalogus door geleidelijk verlopende correcties op een gemiddelde of op een als standaard aangenomen catalogus reduceerde, kwam de detailnauwkeurigheid in de overeenstemming der afzonderlijke uitkomsten voor den dag. Maar wie kon zeggen of de aangenomen standaard of het gemiddelde juist was? Men was geheel onzeker of daarin niet ook systematisch verlopende fouten van dezelfde orde van grootte aanwezig waren.

Bronnen van zulke fouten, die bij verschillende waarnemers, zij het ook op gelijksoortige wijze, toch met verschillend bedrag inwerkten, waren al spoedig te ontdekken. Bij de rechte-klimmingen was men geheel afhankelijk van het zuiver lopen van het uurwerk. Een sterrekundige klok dient niet om te kijken hoe laat het is, maar is een meetinstrument waarmee de verlopende tijd, dus de wenteling van de hemelbol, gemeten wordt. Bekwame uurwerkmakers hebben de gehele 19de eeuw door met de grootste zorgvuldigheid gewerkt om aan de sterrewachten steeds regelmatigere lopende klokken te verschaffen. Maar temperatuur en luchtdruk, vooral temperatuurverschillen in het werk en langs de slinger, zowel als kleine overigens onmerkbare storingen, onregelmatige schokjes of wrijvingen, hebben invloed op de gang, en een uiterst gering gangverschil tussen dag en nacht kan sterke systematische fouten in de rechte-klimmingen bewerken. Om ze te verminderen wordt het standaard-uurwerk op een sterrewacht aan een vaste diep-gefundeerde pijler gehangen, vaak in een kelder met constante temperatuur of in een luchtledig gepompte kast. De uurwerken zelf zijn ook voortdurend verbeterd, voornamelijk door de slinger zo veel mogelijk vrij te maken van de storende invloeden van het overige door hem gereguleerde werk. Het volkomenst is dit verwezenlijkt in de sinds 1924 in gebruik gekomen door SHORTT geconstrueerde klok, waar een geheel vrij slingerende slinger (de meester-klok) niet anders doet dan een tweede slingerwerk (de hulpklok) in de pas te houden,

terwijl deze door kleine regelmatige impulsjes de eerste in gang houdt.

Een andere bron van systematische verschillen in rechte-klimming vormen de reeds door BESSEL opgemerkte z.g. persoonlijke fouten. Ieder waarnemer schat of registreert het ogenblik, waarop een voortlopende ster een draad passeert, steeds op dezelfde manier verkeerd, de meesten te laat, sommigen ook te vroeg; hoe geoefender hij wordt, des te meer krijgt hij een vaste manier, dus geen kleiner maar wel een standvastiger fout. Deze fout, die tot vele tiende delen van tijdseconden kan oplopen, zoals uit proeven en waarnemingen met kunstmatige sterren bleek, is doorgaans sterk veranderlijk met de helderheid van de ster, met de snelheid van haar voortlopen en met andere omstandigheden. En daaruit vloeiden dan systematische, met declinatie en helderheid verlopende fouten in rechte-klimming voort. Voornamelijk om dit euvel te verhelpen werd door REPSOLD omstreeks 1890 de zelfregistrerende lopende draad in gebruik gebracht: de waarnemer volgt de ster met een door hem voortbewogen draad, die hij aldoor precies midden op het sterbeeld houdt, en de montuur van deze draad maakt de elektrische contacten, die naderhand op de Morse-strook worden afgelezen. Ook hierbij is men niet geheel vrij van persoonlijke fouten; ieder waarnemer plaatst ook in geval van rust een draad op een lichtpuntje altijd iets te veel rechts of links; maar deze fouten zijn tien- en meermalen kleiner dan bij de oude manier. En ook hun variaties met helderheid en snelheid zijn dan van een veel kleinere orde van grootte, een enkel honderdste van een tijdseconde. Zo zijn voor de rechte-klimmingen de bronnen van stelselmatige fouten en onzekerheden nu wel in hoofdzaak onschadelijk gemaakt.

Veel moeilijker is dit bij de declinaties gebleken. Wanneer de kijker bij zijn draaien de gehele meridiaan, van het Zuidpunt door het zenith naar het Noordpunt beschrijft, staat hij voor elke andere declinatie in een andere stand schuin t.o.v. zwaartekracht en aardbodem. Door onregelmatigheden in de metalen onderdelen treden verschillende buigingen op, van de kijkerbuis zowel als van de cirkels, die uit aparte metingen met hulptoestellen in horizontale of verticale richting slechts onvolkomen zijn af te leiden. Erger nog is de invloed van de refractie, de straalbuiging in de atmosfeer, die in alle vroegere eeuwen reeds het struikelblok voor een goede plaatsbepaling van de sterren was geweest. Bekwame wiskundigen hebben in de negentiende eeuw de theorie van de straalbuiging steeds nauwkeuriger ontwikkeld en het bedrag, zoals het met de hoogte van de ster verloopt, berekend; maar speciaal op geringere hoogte boven de horizon bleven grote onzekerheden bestaan, vooral doordat men niet precies wist hoe de temperatuur, en dus ook de dichtheid, in de hoogste ontoegankelijke luchtlagen verloopt. Wat dit betekent, moge uit het voorbeeld blijken, dat op 30° hoogte, waar niemand aarzelt om declinaties te meten, de straalbuiging $160''$ bedraagt, dus dat, wil men van deze aan te brengen correctie tot op $0,01''$ zeker zijn, de waarde tot op een 16000ste nauwkeurig berekend moet kunnen worden. Daaruit is te begrijpen wat een bron van systematische fouten in de declinaties hier ontspringt. En toch is dit nog niet het ergste; veel verderfelijker zijn de onregelmatigheden, die men niet kent en niet in rekening kan brengen; soms liggen de luchtlagen scheef of worden de luchtlagen naar boven warmer in plaats van kouder, zoals vaak bij helder vriesweer 's winters voorkomt. Ook is veelal de temperatuur binnen de waarnemingszaal iets hoger dan in de bui-

tenlucht, ondanks het pogen ze gelijk te krijgen, waarbij een onbekend grensvlak dat enigszins muren en dak van de zaal volgt, ze scheidt. Dit alles werkt bij elke sterrewacht, op verschillende hemelbreedte gelegen, op verschillende wijze; maar nergens zijn die invloeden afwezig. En men verwondert zich niet meer, dat niet alleen de zorgvuldigst afgeleide catalogi grote systematische verschillen vertonen, maar dat ook het aangenomen standaardstelsel nog aanmerkelijke fouten blijkt te hebben. En men begrijpt de verzuchting van KAPTEYN in 1922, kort voor zijn dood: „ik ken in de „gehele sterrekunde niets zo neerdrukkends, als wanneer men van de be- „schouwing van de toevallige fouten der sterplaatsen overgaat naar die van „hun systematische fouten. Terwijl vele van onze meridiaan-instrumenten zo „volmaakt zijn, dat zij door een enkele waarneming de coördinaten bepalen „met een waarschijnlijke fout van niet meer dan 0,2'' of 0,3'', kan het beste „totaalresultaat uit 1000 waarnemingen van onze beste sterrewachten tesamen „genomen, nog in werkelijkheid 0,5'' en meer fout zijn”.

Dat het aangenomen standaardstelsel van L. Boss, dat toen als het beste werd beschouwd, inderdaad nog grote fouten bezat, had KAPTEYN zelf waarschijnlijk gemaakt, doordat de daaruit afgeleide eigen bewegingen der sterren voor sommige declinatiegebieden gemiddeld te veel naar het Noorden, voor andere te veel naar het Zuiden waren gericht. Een nieuw systeem, dat door KOPFF op het Berlijnse Astronomische Rekenbureau uit de beste moderne waarnemingsreeksen werd afgeleid, week daarin ook inderdaad van Boss af. Om deze kwestie uit te maken was een geheel nieuw soort waarnemingen nodig, zodanig, dat kijkerbuiging en refractie in de bepaling van de declinatie helemaal geen rol spelen. Voor een waarnemer op de evenaar, waar de hemelpolen in de horizon liggen, liggen de sterren van alle declinaties maar van dezelfde rechte klimming, naast elkaar in of iets boven de horizon; hun verschillende declinatie is daar te meten met een horizontale cirkel als verschil in azimuth, dus geheel vrij van refractie-invloed. Naar deze gedachten-gang zijn door de Leidse sterrewacht in 1931—33 twee waarnemers naar Kenya in Centraal-Afrika gezonden, om met een nauwkeurig azimuthinstrument declinaties te meten. Hun uitkomsten tonen, dat het standaardstelsel inderdaad systematische correcties van de verwachte aard en grootte nodig had (+0,6'' bij 50° Zuidelijke, 0'' bij 10°, en +0,3'' bij 30° N.-declinatie), en dat het Berlijnse systeem veel dichter bij de waarheid komt. Natuurlijk kwamen ook hier instrumentale moeilijkheden voor den dag, die verbeterde herhalingen nodig maken; maar de weg naar een stelsel van declinaties der sterren, dat vrij is van zulke systematische fouten, is naar het lijkt nu toch geopend.

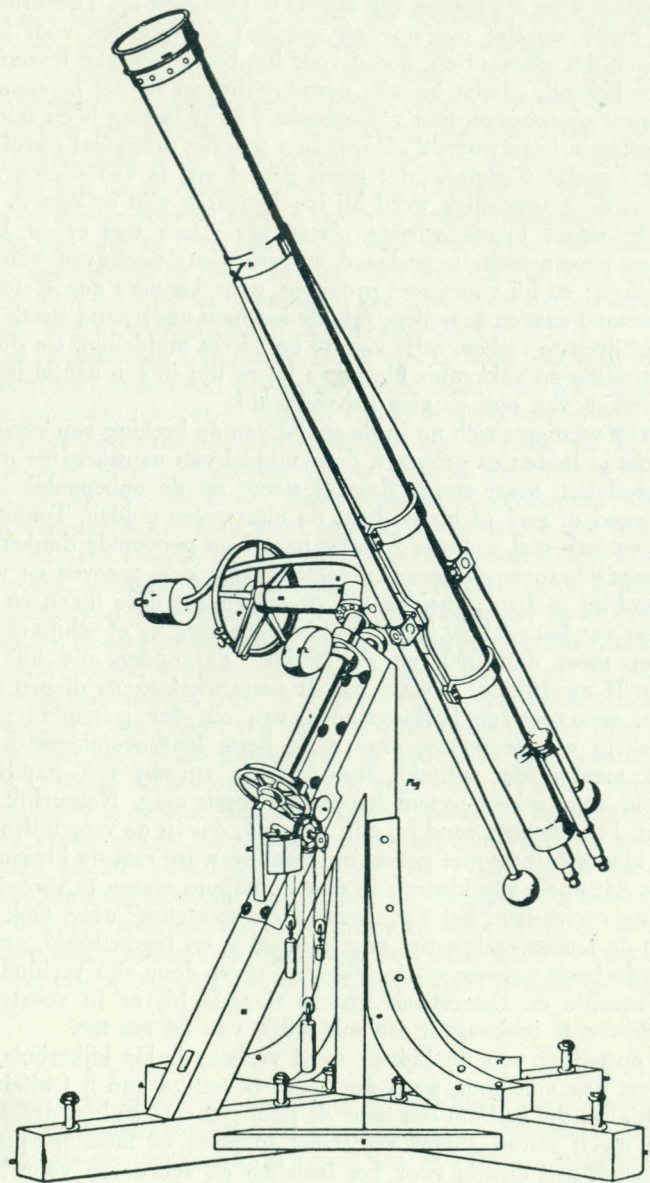
Keren we nu terug naar het begin van de 19de eeuw om de vooruitgang van de techniek op andere gebieden der sterrekunde te beschouwen. Dit betreft in de eerste plaats de optiek zelf, de lenzen van de kijkers. DOLLOND's invoering van het achromatische lenzenstelsel had wel in de meetinstrumenten dadelijk een grote verbetering gebracht; maar door de onvoldoende glastechniek duurde het tot in de 19de eeuw vóór de kijkers zelf in kracht en vermogen toenamen. Dit was vooral het werk van de begaafde Beierse autodidact JOSEPH FRAUNHOFER (1787—1826). Hij trad in 1806 in dienst bij de werk-

plaats van UTZSCHNEIDER en REICHENBACH, waar hij naderhand leider van het optische werk werd, en richtte in 1817 bij een splitsing van de firma, met de eerste, een rijk financier met grote wetenschappelijke belangstelling, een Optisch Instituut voor het maken van kijkers te München op. Tweeërlei onvolkomenheid moest daarbij overwonnen worden: de waarden voor het brekingsvermogen der glassoorten, nodig voor het berekenen van lenzen, waren zeer onzeker bekend, „zodat bij alle nauwkeurigheid in het berekenen van „achromatische objectieven, hun volkomenheid twijfelachtig is en zelden aan „de verwachtingen beantwoordt”. Bovendien was het materiaal onvoldoende, speciaal het Engelse flintglas, „dat nooit geheel vrij is van slieren”. In de geheimen van de glastechniek werd hij ingeleid door zijn collega P. L. GUNNAND, een bekwaam Frans-Zwitsers glaswerker. Deze was er in 1799 na twintig jaren proefnemen in geslaagd zuivere flintglasschijven van 10 tot 15 cm te maken; en bij voortgezet proberen, door kleinere goede stukken in gewekte toestand aaneen te wellen, gelukte het hem naderhand steeds grotere goede glasschijven te maken, zelfs van 30 en 35 cm middellijn. De door hem gevestigde traditie en vakkennis bleven in latere tijd in een aantal beroemde Franse fabrieken van optisch glas gehandhaafd.

FRAUNHOFER verdiepte zich nu in de studie van de breking van verschillend gekleurd licht in lenzen en prisma's, door middel van nauwkeurige metingen met een theodoliet, maar stuitte daarbij steeds op de onbepaaldheid, voor welk soort rood of geel of blauw licht de uitkomsten golden. Totdat hij bij het experimenteren met zonlicht de later naar hem genoemde donkere lijnen in het prismatisch zonnenspectrum ontdekte. „Door vele proeven en wijzigingen” schreef hij in 1817, „heb ik mij overtuigd dat deze lijnen en strepen „in de natuur van het zonlicht liggen en niet door buiging of schijn ontstaan”. Hij telde er meer dan 500, en de sterkste daaronder, die hij met de letters A tot H aanduidde, konden nu als vaste merktekens dienen voor de lichtsoorten, waarvoor de brekingsindex van elk der gebruikte glassoorten nauwkeurig was te meten, om zo de beste lenzencombinaties vast te stellen. Zo maakte de optische industrie de sprong van handwerkers-bekwaamheid naar scherp-wetenschappelijke berekening. Natuurlijk niet in absolute zin. FRAUNHOFER vond bij zijn proeven, dat in de verschillende glassoorten de kleurschifting niet geheel op dezelfde wijze met de brekingsindex verliep, dus dat nooit alle kleuren in één brandpunt waren te verenigen; er bleven kleine verschillen, het z.g. „secundaire spectrum” over. Ook was de theorie van de lenzencombinaties nog te moeilijk en ingewikkeld, om zuiver theoretisch de beste vormen uit te rekenen; maar door zijn verbinding van practische intuïtie en theoretisch inzicht slaagde hij er in voortreffelijke kijkerobjectieven te maken, tot een middellijn van 24 cm toe.

Ook de opstelling van de kijkers werd verbeterd. De kijkerbuis, bij de kleinere eerst nog van hout, werd draaibaar bevestigd aan het uiteinde van een declinatie-as, die zelf om een naar de pool gerichte as kon draaien. Alle raderen en assen waren zuiver afgewerkt in staal of messing, precies in elkaar grijpend, met cirkels voor het instellen en schroeven voor het fijne bewegen. In alle opzichten vormde dit kijkertype een hoger stadium van voortreffelijkheid en gemakkelijke behandeling tegenover de logge spiegel-telescopen van de vorige periode met hun ruwe opstellings- en bewegings-mechanisme van touwen en balken. De objectieven gaven kleine scherpe

sterbeeldjes, mooi blijvend over een groter veld, en lieten daardoor, ondanks de geringe opening, zwakke sterren haast even duidelijk zien als de telescopen, terwijl ze de fijne details van maan- en planetenoppervlakken scherper



Kijker van FRAUNHOFER te Dorpat.

en zuiverder aftekenden. Het 19de-eeuwse kijkertype — refractor genoemd in tegenstelling tot reflector — trad hier op als toepassing van hoog ontwik-

kelde metaaltechniek, verfijnd in de precisie van liefdevol behartigde instrumentmakerskunst. Nog een belangrijke, zelfs noodzakelijke verbetering bracht FRAUNHOFER aan deze kijkers aan: hij voorzag ze van een drijfwerk, dat de declinatie-as in langzame draaiing om de poolas voortbewoog, zo geregeld dat de kijker de sterren in hun dagelijkse rotatie nauwkeurig volgde, zodat de sterren in het veld van de kijker schenen stil te staan. Naast FRAUNHOFER werkten in deze zelfde tijd in Duitsland andere constructeurs als STEINHEIL in dezelfde richting, terwijl Engelse instrumentmakers als RAMSDEN en TROUGHTON geleidelijk de oude types van kijkers verbeterden. Daarnaast bleef hier en daar de spiegeltelescoop zich handhaven door zijn groot lichtopzamelend vermogen; zo bouwde WILLIAM PARSONS (Lord ROSSE), na twintig jaar experimenteren, in 1845 op zijn landgoed Birr-Castle te Parsonstown in Ierland een telescoop van bijna 2 meter (182 cm) opening, waarmee hij voor het eerst de spiraalstructuur van enige nevelvlekken ontdekte.

Maar de refractor bleef toch favoriet. Nu de baan eenmaal open was, slaagden de werkplaatsen er in de afmetingen van de objectieven en daarmee de grootte van de kijkers verder op te voeren. Nadat de kijker van 24 cm opening, toen als een reus beschouwd, die in 1820 aan de sterrewacht te Dorpat geleverd was, door het dubbelsterrenwerk van WILHELM STRUVE zijn kwaliteiten had getoond, werden verscheidene Duitse en Russische sterrewachten met dit type uitgerust. In 1839 werd door FRAUNHOFER's opvolger MERZ een kijker met 38 cm opening geleverd aan de nieuw gebouwde sterrewacht op de heuvel Poelkowa bij St. Petersburg, die daar op last van Tsaar NIKOLAAS I uit onbekrompen beurs als centraal wetenschappelijk instituut werd opgericht.

In de volgende decennien werden vele sterrewachten in Europa van dit type van kijkers voorzien; maar de grens van grootte scheen nu toch bereikt te zijn. In Duitsland bleef de kunst op het bereikte peil staan, en werd na 1870 door GRUBB in Engeland overvleugeld. Intussen was nu echter een Amerikaanse lenzenlijper opgetreden, ALVAN CLARK te Washington, die lenzen van te voren ongekende afmetingen vervaardigde. Zijn eerste werkstuk, dat boven alle vroegere uitging, was een 18 inch objectief (43 cm), waarmee al dadelijk bij een controleproef ter beoordeling van de zuiverheid der beelden, in 1862 door zijn zoon de begeleider van Sirius ontdekt werd. Toen zijn naam door de gebleken kwaliteit van de lenzen gevestigd was, hebben niet enkel Amerikaanse maar ook Europese sterrewachten kijkers van CLARK verworven, welke telkens door nog grotere objectieven hun voorgangers overtroffen; zo kreeg Washington in 1871 een 25-inch (66 cm), waarmee ASAPH HALL in 1877 de manen van Mars ontdekte, en Poelkowa in 1885 een 30-inch (76 cm). Dit grootte-type tussen 20 en 30 inch begon zich toen evenzo op de sterrewachten te verbreiden als in FRAUNHOFER's tijd het type tussen 20 en 30 cm opening. Trouwens, nu volgen andere constructeurs hem op de hielen; GRUBB had voor Cambridge een 25-inch gemaakt, en de gebroeders HENRY te Parijs maakten in 1886 voor Nice een 76 cm en voor Meudon een 83 cm refractor.

In Amerika gold, naar Engelse traditie en in tegenstelling tot het overige Europa, de leer, dat wetenschap geen regeringszaak is, dus ook sterrewachten niet als aanhangsels van de universiteit door de staat opgericht maar als vrije stichtingen van particulieren in het leven geroepen werden. Zo hadden

groepen van burgers in Cambridge (Mass) bij Boston reeds in 1844 de sterrewacht van Harvard College gesticht met een Fraunhofer-kijker, die Poelkowa nog overtrof. Dan komen in het laatst van de negentiende eeuw de millio-nairs op, die zich meester weten te maken van de nog onontgonnen natuurschatten van een groot continent, mettertijd door hun monopolies meester over de productiemiddelen in de groeiende grootindustrie worden, en steeds meer het maatschappelijk leven beheersen. Een deel van hen treedt nu op als begunstigers van de wetenschap; zij doteren de universiteiten, stichten bibliotheken en laboratoria, en natuurlijk ook sterrewachten, die met de kostbaarste instrumenten worden toegerust. Daar hierbij het motief veelal roemzucht was, was dan een reuzenkijker nodig, die alle vroegere overtrof. Dit was het geval bij een wilsbeschikking van een rijk Californisch speculant, JAMES LICK; toen na zijn dood een college van deskundige „trustees” vrije beschikking over zijn vermogen kreeg, werd dit gebruikt om in de eerste plaats een 36-inch kijker te laten maken, maar dan als hoofdinstrument van een alzijdig goed uitgerust instituut, de in 1838 op Mt. Hamilton bij San Francisco gestichte Lick-sterrewacht. Toen het naderhand bleek dat MANTOIS te Parijs, die het glas had geleverd, tegelijk een nog iets groter stel goede glasschijven had gemaakt, die te koop geboden en, ook door de CLARK's, tot een 40-inch objectief (102 cm) geslepen waren, werd daarvoor in 1897 de Yeskes-sterrewacht te Williamsbay (Wisc.) gesticht, en toegevoegd aan de universiteit van Chicago. Deze reuzenkijkers zijn volgens hetzelfde type gebouwd als de kleinere Europese van FRAUNHOFER, in dezelfde zorgvuldige mechanische uitvoering. Ze vertonen dezelfde slanke sierlijke bouw (de lengte is 20 maal de opening) en hebben dezelfde opstelling, maar alles naar evenredigheid kolossaler, dus zwaarder; toch licht hanteerbare kunststukken van constructief vernuft. De vergelijking van deze instrumenten met die in het begin van de eeuw toont een beeld van de groei van de 19de eeuw in techniek en wetenschap: in het gieten van glas, het slijpen van lenzen, het construeren van montringen, het beheersen van mechanismen, het organiseren van instituten. Amerika neemt nu technisch, en daarmee ook praktisch-sterrekundig, steeds meer een leidende plaats in de wereld in.

Het spreekt vanzelf dat speciaal deze krachtige ontwikkeling van sterrekundige optiek steunde op de glastechniek als haar grondslag. Omgekeerd waren het de steeds hogere eisen welke het natuuronderzoek aan de optische instrumenten stelde, die de glastechniek tot steeds voortgaande vervolmaking aandreef. In Frankrijk waren het de later verbonden werkplaats van MANTOIS en de fabriek te St. Gobain, die er in slaagden steeds grotere en betere glasschijven te gieten. In Duitsland trad nu onder de vele instrumentmakerswerkplaatsen de door ERNST ABBE gestichte Carl-Zeiss-Werke te Jena naar voren door haar grondige wetenschappelijke basis — en haar door ABBE ontworpen sterk sociaal karakter —; in de daarmee verbonden glasfabriek van SCHOTT werd vooral geëxperimenteerd met nieuwe glassoorten met speciale voor de instrumenten gewenste eigenschappen. Hoewel niet in de wedloop van grootte meedoende heeft de Zeiss-werkplaats een aantal moderne grote kijkers met allerlei nieuwe constructies aan sterrewachten over de gehele wereld geleverd.

Maar nu was inderdaad de grens bereikt. Lenzen van een meter middellijn zijn zo dik, dat de lichtabsorptie in het glas een ernstige rol gaat spelen; en

ze zijn zo zwaar, dat ze door hun eigen gewicht gaan doorbuigen. Dus al zou men nog grotere homogene glasschijven kunnen gieten, ze zouden op deze wijze niet gebruikt kunnen worden. Wilden de astronomen hun reuzenogen nog verder volmaken, dan moesten zij andere wegen inslaan.

Wij moeten nu nog eens terug naar het begin van de 19de eeuw, naar de werkplaats van FRAUNHOFER. Nog belangrijker dan zijn verbetering van het optische deel, de kijkers zelve, was het, dat hij deze kijkers tot de beste en fijnste meetwerktuigen wist te maken. Kleine afstanden van dicht bijeen gelegen sterren, of afmetingen van kleine planetenschijven, zijn uiteraard nauwkeuriger te meten dan de coördinaten van ieder voorwerp afzonderlijk; want allerlei bronnen van fouten, die naburige punten gemeen en gelijk hebben, vallen weg in hun afstand of afmeting. Daartoe dienen de micrometers. FRAUNHOFER voorzag elk van zijn kijkers van een dradenmicrometer, die nu ook door zorgvuldige bouw en afwerking in ieder onderdeel tot een meetinstrument van de grootste nauwkeurigheid was omgevormd. Een zuivere en fijne schroef verplaatst een bewegelijke draad t.o.v. een vast dradenkruis over nauwkeurig op de schroefkop af te lezen afstanden; doordat dit alles in een ring zit, die om de kijkeras draaibaar is, kan tegelijk op een cirkel de richting afgelezen worden, zodat dan de relatieve ligging van twee dicht bijeen staande objecten door twee coördinaten, afstand en positiehoek, bepaald is. Voor dit gebruik als meetinstrument was een precies meelopen van de kijker met de sterren volstrekt nodig; directe micrometermeting van afstanden zou onmogelijk zijn, als de sterren in het veld van de kijker niet onbeweegelijk op hun plaats bleven staan. Bij deze metingen was de tweede decimaal van de hoogste orde geen luxe getal of enkel resultaat van middelen; de honderdste seconde was nodig als eenheid, waar de directe meetfouten slechts een matig veelvoud van die eenheid bedroegen. Bij alle latere kijkers van dit type, tot de Amerikaanse reuzenkijkers toe, behoorde de dradenmicrometer tot de onmisbare bestanddelen, die aan de kijker eerst zijn bruikbaarheid gaven.

Deze zelfde nauwkeurigheidsmaat geldt ook voor nog een ander type van meetinstrument. Indertijd had BOUGUER voor het meten van de zonsmiddellijn de „heliometer” verzonnen, twee naast elkaar geplaatste gelijke lenzen, waarvan de afstand gemeten werd, als de door hen gevormde zonsbeelden elkaar aanraakten. Deze was door RAMSDEN aldus verbeterd, dat twee helften van een lens, die elk natuurlijk een volledig beeld gaven, langs elkaar, dus de beelden over elkaar schoven; zo konden ook kleine afstanden gemeten worden. FRAUNHOFER vatte dit denkbeeld weer op, zette de twee helften van een middendoorgezaagd goed objectief in langs elkaar schuivende monturen, waarbij de verplaatsing door microscopen op een zuiver verdeelde millimeterschaal werd afgelezen. Zo heeft hij voor de sterrewacht in Koningsbergen onder de blijvende naam van heliometer een eerste-rangs meetinstrument geconstrueerd, geschikt niet enkel, als de dradenmicrometer, voor kleine afstanden binnen het veld van de kijker, maar ook voor veel grotere afstanden, tot een graad toe. Eerst drie jaar na zijn dood, in 1829, kon het afgeleverd worden. Doordat BESSEL het, in zijn eerste bepaling van een sterparallaxe, aan een theoretisch en praktisch even grondig onderzoek onderwierp, verkreeg het

burgerrecht op de sterrewachten; en het is daarna door vele lateren, tot het einde van de 19de eeuw toe, voor tal van metingen van de relatieve ligging van sterren en van planeten bij matig grote afstanden gebruikt.

Toen echter is het meer en meer door een intussen opgekomen andere sterrekundige praktijk verdrongen. Sinds het midden van de 19de eeuw werd de fotografie steeds meer op de hemellichamen toegepast. Eerst vooral op de zon en de maan, waar zij in een korte expositietijd alle details in ligging en vorm van zonnevlekken en maanbergen verschaft, die anders uren en dagen meten en onafzienbare jaren van tekenen en karteren hadden geëist. Daar de voor visueel licht geachromatiseerde objectieven, tengevolge van het secundaire spectrum, geen scherp beeld voor het fotografisch werkzame blauwe licht gaven, construeerde in 1864 L. M. RUTHERFURD in New York voor het eerst een speciaal fotografisch objectief, van 29 cm opening. Daarmee kreeg hij in 1865 de eerste bruikbare foto's van de sterrenhemel. Elke vooruitgang in fotografische methoden werkte nu direct terug op de sterrekundige toepassing; zo vooral de vervanging, in 1871, van het natte collodionproces door de veel gevoeliger droge broomzilvergelatine-platen, waardoor zwakke, zelfs telescopische sterren zich in korte tijd op de plaat aftekenden. En weldra, toen het bleek dat de mooie symmetrisch-ronde beelden op de platen, hoewel groter, toch gemakkelijker en nauwkeuriger waren uit te meten, dan de onregelmatig trillende sterpuntjes in de kijker zelf, trad het opnemen en dan daarna rustig in de werkkamer uitmeten van platen steeds meer in de plaats van directe metingen aan de kijker.

Drie voordelen bracht, naast deze winst in nauwkeurigheid, de fotografische werkwijze. Ten eerste, de massaalheid van het aantal sterren, dat door één opname tegelijk op de plaat wordt vastgelegd. Dit is bovenal van belang uit statistisch oogpunt, om ze met zekerheid allemaal compleet te hebben en ze ruwweg te kunnen uitmeten voor het catalogiseren. Men kan trouwens met uitmeten ook wachten tot men de plaatsen nodig heeft, en de platen zelf zolang bewaren. Ten tweede de grotere kracht en duidelijkheid van de sterbeelden, die door verlenging van de expositietijd was te bereiken, waardoor nu het effect van het steeds hoger opvoeren van de lichtsterkte, dus van de opening der kijkers nog versterkt werd. En ten derde, op opnamen met instrumenten met grote hoekopening, d.i. met relatief korte brandpuntsafstand t.o.v. de opening: een kolossale toename van oppervlakte-intensiteit van uiterst flauwe, bijna of geheel onzichtbare nevelvormen, zoals melkwegvlekken en kometenstaarten, die nu voor het eerst aan het menselijk oog hun ingewikkelde structuur onthulden.

De sterrekunde profiteerde hierbij van de precisie-techniek der optische lenzenstelsels, die zich ten behoeve van de fotografie vanaf haar uitvinding in 1839 ontwikkeld had. Moeizame theoretische berekeningen als die van SEIDEL en van PETZVAL, verbonden met praktische vindingskunst van constructeurs als CHEVALIER, STEINHEIL, BRASHEAR, ZEISS, schiepen geleidelijk steeds volmaakter en veelsoortiger typen van portretlenzen, d.w.z. lenscombinaties. Het was een worsteling met het probleem, hoe voor elk punt van een uitgebreid voorwerp alle daarvan uitgaande stralen overal over een groot plat veld en voor alle kleuren in één punt tot een scherp beeld konden worden samengebracht. Aan alle eisen, van en grote lichtsterkte, en uitgebreid veld, en foutenvrije afbeelding, kon niet tegelijk worden voldaan; al naar het doel

domineerde of de ene of de andere eis, en zo kwamen verschillende typen van lenzencombinaties op, beginnend met tripletten, tot systemen van 6 of 8 lenzen toe. Portretobjectieven met grote hoekopening, om grote lichtsterkte te krijgen, zijn bij honderdduizenden in camera's van amateur-fotografen over de wereld verspreid. Met een openingsverhouding 1 op 5 of 4 zijn ze door tal van astronomen gebruikt; en in grotere afmetingen speciaal voor sterrewachten geconstrueerd vormden ze daar naast de kijkers een nieuw type van instrumenten, dat geheel nieuwe aspecten van hemelobjecten heeft ontsloten.

Wil men de plaatsen der sterren met de uiterste nauwkeurigheid bepalen door meting op een fotografische plaat, dan stuit men op het bezwaar, dat een gewone achromatische dubbellen de buitenwereld enigszins verwrongen afbeeldt. Dit is te verhelpen door een daartoe zorgvuldig berekend optisch systeem van meerdere lenzen te gebruiken. Toen men daarop nog niet bedacht was, in het begin van de geestdrift over wat de gebroeders HENRY te Parijs met de fotografische methode hadden bereikt, werd in 1839 op een conferentie te Parijs ietwat haastig een groots plan in elkaar gezet om de gehele hemel tot de 14de grootte te fotograferen en alle sterren tot de 12de grootte uit te meten — de z.g. „Carte du Ciel” onderneming, een coöperatie van een dozijn sterrewachten, alle van volkomen gelijke fotografische kijkers voorzien. Daar de platen niet groter dan 2° in het vierkant waren, hinderde de vervorming practisch niet; maar het aantal te nemen platen was nu zo groot, dat na tientallen jaren het einde nog niet in het zicht was. Een kwart eeuw later, (1928) toonde SCHLESINGER aan, dat uit veel grotere zich over 5° uitstrekkende platen, met de goede optische systemen opgenomen, de plaatsen der sterren even nauwkeurig zijn af te leiden als met een meridiaan-cirkel. Trouwens, de *Astronomische Gesellschaft* had reeds besloten om een herhaling van de reeds vermelde in 1871 opgezette A.G.-catalogus niet door meridiaanwaarnemingen, maar door zulke fotografische opnamen te doen plaats hebben.

Naast al deze nieuwe veelzijdige waarnemingsmogelijkheden bleef het streven naar meer licht, naar groter opening. Objectieven van meer dan een meter middellijn waren niet te gebruiken; hier was de grens bereikt. Om toch licht van nog groter oppervlak te verzamelen is men aan het eind van de 19de eeuw weer overgegaan naar de spiegeltelescopie. Een spiegel, waar de lichtstralen niet doorheen lopen, maar alleen aan het oppervlak teruggekaatst worden, kan door ondersteuning op vele punten van de achterzijde, tegen vormverandering door doorbuiging beschermd worden. Door aan de spiegel een zuiver parabolische vorm te geven, kunnen alle lichtstralen van alle kleuren precies in het brandpunt verenigd worden. Wel worden de beelden daarbuiten weldra slechter, het veld is klein; maar dit hindert niet waar het gaat om onderzoek der afzonderlijke sterren; en het onderzoek van het spectrum van elke ster afzonderlijk neemt in de moderne sterrekunde een steeds belangrijker plaats in. Bovendien kan men naar een vinding van ROSS door een in bepaalde vorm geslepen glazen plaat in de stralengang tussen spiegel en fotografische plaat in te schuiven, over een veel groter veld goede scherpe beelden krijgen.

Sinds het begin van de 20ste eeuw worden nu steeds meer en steeds grotere spiegeltelescopen gebouwd; instrumenten van 40-inch, dus een meter, opening zijn al bij dozijnen verspreid, en daarboven gingen weldra telescopen van 60, 70, 80 inch uit. De eerste plaats neemt in deze rij door zijn afmeting en constructie zowel als door de veelheid en kwaliteit van het daarmee verrichte werk de door RITCHEY gebouwde en geslepen 100 inch op de Mt. Wilson sterrewacht in, die in 1919 in gebruik werd genomen. De daarmee opgedane ervaring heeft toen het plan doen rijpen tot een alles overtreffende onderneming, het vervaardigen van een 200 inch telescoop, dus met een spiegel van 5 meter middellijn, waarvan de geleidelijke verwezenlijking, langs tal van steeds nieuwe te overwinnen moeilijkheden, zich laat lezen als een technisch epos van grootindustriëel-wetenschappelijk avontuur.

De moderne ontwikkeling van sterrekundige instrumenten was niet mogelijk geweest zonder de groei van de grootindustriële techniek van de 19de eeuw, die ook het gehele aspect van de maatschappij heeft gewijzigd. De precisie, die een eeuw geleden in zorgvuldig fijn werk van bekwame constructeurs nieuwe sterrekundige werktuigen van hoge volmaaktheid schiep, ging nu als inherent bestanddeel over op de steeds kolossaleren machinerie van de moderne reuzenkijkers. Hier, als in zovele industriële machines, gaat fijnheid van afwerking gepaard met zware machtigheid van dimensie. In de vitale details eist ook nu de zuivere vormgeving van lens- en spiegeloppervlak beheersing en behandeling van enkele duizendste millimeters, waartoe trouwens de technische physica tal van moderne hulpmiddelen biedt. Maar niet meer kon nu als triomf van afwerking gelden, dat de zware instrumenten aan de lichte druk van een vinger gehoorzaamden. Nu worden de staal- en glasmassa's van duizenden kilo's door elektrische motoren bewogen; en de astronoom, lichamelijk nauwelijks bemerkbaar in de kleine cabine nabij het brandpunt, als het ware het kleine hersenorgaan van dit stalen organisme, dirigeert van daaruit door contactknoppen alle bewegingen van het monstermechanisme. Precisietechniek in elektrische beheersing van reusachtige instrumenten vormt de stoffelijke grondslag van de moderne sterrekunde.

33. AFMETINGEN EN AFSTANDEN

Voor juiste voorstellingen omtrent het heele is kennis van de afstanden en de afmetingen als grondslag nodig. Het einde van de 18de eeuw bezat zulk een, zij het ook nog wat ruwe kennis van de afstand van de zon, dus van de afmetingen van het zonnestelsel, uitgedrukt in de zonsparallaxe. Maar van de afmetingen van de sterrenwereld, van de jaarlijkse parallaxe der vaste sterren, wist men ondanks HERSCHEL's werk nog niets.

De grote meetnauwkeurigheid, die de precisie-techniek van de negentiende eeuw bracht, stelde nu als eerste taak wat men een landmeting van de wereldruimte zou kunnen noemen. Men stond daar voor hetzelfde landmeetkundig probleem als wanneer men van af een heuveltop of een torenplat van

een paar vierkante meter de afstand van alle in de verte zichtbare torens en andere punten moet bepalen. Daartoe moeten parallaxen gemeten worden. Eerst toen parallaxen tot in kleine onderdelen, tot in honderdsten van seconden gemeten konden worden, opende zich de mogelijkheid om door het bepalen van afstanden de structuur van de buitenwereld vast te stellen.

De negentiende eeuw begon met de hoge standaard, die zij stelde, tot uitdrukking te brengen door een zorgvuldiger bewerking van wat de vorige eeuw aan beste en belangrijkste waarnemingsgegevens had nagelaten. Zoals BESSEL de plaatsbepaling van de sterren van BRADLEY nieuw bewerkte, zo nam JOHANN FRANZ ENCKE (1791—1865), toen op de Seeberg bij Gotha, later in Berlijn, de waarnemingen van de Venus-overgangen voor de zonsparallaxe onder handen. Op de Seeberg was in 1788 door hertog ERNST van Gotha een sterrewacht gesticht — hier stond de wetenschap in gunst zo als terzelfdertijd aan het naburige hof in Weimar de literatuur — die tot een soort centrum van de opkomende Duitse sterrekunde werd; dat in 1796 zelfs een sterrekundig congres bijeen riep, en onder de huiselijke naam „Monatliche Correspondenz” een eerste sterrekundig tijdschrift uitgaf. Hier werkte ENCKE waarnemend en rekenend tot hij in 1825 te Berlijn beroepen werd om de sterrewacht te moderniseren.

Bij zijn in 1822 en 1824 gepubliceerde discussie van de Venus-overgangen vond meteen een nieuw beginsel van wiskundige behandeling der natuurverschijnselen toepassing. In vroegere eeuwen zocht de astronoom uit zijn vele metingen de beste uit en gebruikte die — wat licht aanleiding gaf om vooropgevatte gedachten mee te laten spreken, of om zulke waarnemingen uit te zoeken, die ondanks hun natuurlijke onzekerheid op een onnatuurlijk preciese manier klopten. Het was niet zulk een onnatuurlijke gedachtengang, dat wat achteraf het best bleek uit te komen, ook het beste moest zijn. Men herinnere zich hoe bij TYCHO de kring van rechteklimming-verschillen de hemel rond op een aantal seconden na precies 360° opleverde, terwijl toch ieder afzonderlijk tot meer dan een halve minuut onzeker was. In de 17de eeuw begonnen enkelen, als HUYGENS en PICARD, in te zien, dat een gemiddelde uit een aantal gelijkwaardige metingen beter was dan ieder afzonderlijk; en in de 18de eeuw kwam dit meer en meer in gebruik. Vooral nu gaandeweg het besef van de „kans”, van de „waarschijnlijkheid” van fouten als een aan te geven grootheid levendiger was geworden. Het denkbeeld van „wetten van het toeval”, reeds door HUYGENS („Rekeningk in Spelen van Gheluk”, 1657), door JAN DE WITT en door HALLEY (in sterftetafels) op practische vraagstukken toegepast, kreeg zijn mooie theoretische vorm in een foutentheorie bij LAPLACE en LEGENDRE en in de foutenwet van GAUSS.

Dit leverde aan de berekenaars een methode om een geheel van waarnemingsgegevens voortaan zonder enige willekeur van hun kant, naar vaste regel te bewerken. En dit bracht een nieuwe houding, die typisch is voor de latere 19de eeuwse natuuronderzoeker tegenover zijn materiaal. Dit is niet enkel meer gegeven stof, waaruit hij naar believen put voor afleiding van conclusies; het is een proces-verbaal van het verhoor, dat de natuur onderging, een document, een hem opgelegd feitengeheel, dat hij heeft te eerbiedigen. In de door GAUSS in 1804 uitgewerkte rekenwijze van de „methode der kleinste kwadraten” vindt hij zijn werkmanier voorgeschreven; door de eis, dat de som der kwadraten van de overblijvende fouten zo klein mogelijk

moet worden, wordt de „meest waarschijnlijke” waarde voor de onbekende grootheid gevonden. Door deze eis t.o.v. elk der onbekenden van het vraagstuk te stellen, konden de waarschijnlijkste waarden van alle onbekenden door directe berekening uit de vergelijkingen opgelost worden. Deze nieuwe rekenwijze vond geestdriftige ingang in de wereld der astronomen, die voortdurend te worstelen had met het probleem, hoe uit een overvloed van gegevens het beste resultaat zonder willekeur te vinden. Het „beste” werd nu streng gedefinieerd als het meest waarschijnlijke; alle aarzeling en twijfel week voor vaste verzekerdheid; en de in de waarnemingen overblijvende afwijkingen, de „fouten”, met de daaruit afgeleide „middelbare” en „waarschijnlijke fout” gaven zelf een maat voor de onzekerheid der uitkomsten.

Bij de waarnemingen van de Venus-overgangen over de zonnescijf werden de tijdstippen van intrede en uitgang door de sterrekundigen waargenomen. Wat deze afweken van de vooruitberekening was een gevolg van drie onbekende grootheden, de verkeerde aanname omtrent de relatieve plaats van Venus en de zon, in twee coördinaten, (hun relatieve beweging was precies genoeg bekend) en de afwijking in de aangenomen zonsparallaxe; de rest was toevallige waarnemingsfout. Elke waarneming, wáár op aarde gedaan, gaf een betrekking tussen deze drie; en zo konden ze alle als één geheel van gegevens, door een direct procédé verwerkt worden tot een uitkomst voor elk der drie onbekenden. Dat ENCKE verwachten kon, op deze wijze ook substantieel iets beters te krijgen dan de berekenaars uit de 18de eeuw, lag daaraan, dat voor tal van waarnemingsplaatsen ver Oost of ver West, aan de Hudsonbaai, op Tahiti, in Orenburg, in Peking, het lengteverschil met Europa, waar alles op aankwam, sindsdien door betere gegevens vastgesteld was. En zo kreeg hij dan een resultaat, dat hij, na een in 1835 nog aangebrachte correctie, aldus uitdrukte: de zonsparallaxe is $8,57116'' \pm 0,0371''$.

Aan deze vorm blijkt, hoezeer de sterrekunde toen, in de jeugddagen van de nieuwe rekenwijze, zwelgde in het genot van nu exact de uitkomst te kunnen berekenen. Want het is duidelijk, dat als volgens het \pm de „waarschijnlijke fout” $0,037''$ is, d.w.z. dat de uitkomst evenveel kans heeft om meer dan $0,037''$, als minder dan $0,037''$ fout te zijn, dat dan de 3de en 4de decimaal niet enkel waardeloos, maar ook zinloos zijn, daar ook de 2de reeds enige eenheden onzeker is. In latere meer nuchtere tijden zou men eenvoudig $8,57'' \pm 0,04''$ geschreven hebben. En het zou blijken, dat de werkelijke onzekerheid daarmee nog onderschat werd.

Men had nu echter, in plaats van al de onzekere combinatieschattingen uit de achttiende eeuw, een vast, bepaald getal; en dit getal is gedurende een halve eeuw aanvaard en gebruikt. Met de bekende straal van de aarde 6377 kilometer volgde uit deze zonsparallaxe, dat de afstand van de zon 153,5 miljoen kilometer bedraagt; dit is dan de astronomische maateenheid, waarin alle afstanden en afmetingen in het zonnestelsel, alle afmetingen van de planetenbanen zijn uitgedrukt; de straal van de zon zelf wordt dan 714000 km. Ook zulk een grootheid als de massa van de zon t.o.v. de massa van de aarde hing er mee samen; want naar NEWTON had aangegeven wordt deze verkregen door de verhouding der loopbanen van aarde en maan (dus van maans- en zonsparallaxe) in de derde macht te delen door de verhouding der omloopstijden in het kwadraat, wat een waarde van 356000 opleverde.

Dit zijn maar getallen van meer of minder cijfers. Om te beseffen wat

zij voor de mensheid betekenen, die zich nu van de grootheid van het heelal bewust werd, moet men de populaire literatuur ter hand nemen, die om het midden van de negentiende eeuw de natuurwetenschap naar de brede scharen van de burgerij uitdroeg. Daar leest men dan hoe, als op de zon een groot kanon op ons afgeschoten werd, wij er niets van zouden merken, en rustig voortleven, tot wij opeens, 25 jaar later, zouden neergeveld worden. In een toen zeer verbreid boekje van A. BERNSTEIN: „Boven lucht en wolken”, wordt de grootte van de zon eerst door haar middellijn plastisch voorgesteld, en dan haar volume op 3500 biljoen kubieke (Duitse) mijlen aangegeven. In een paar hoofdstukken „Alle respect voor een kubieke mijl” wordt op amuse wijze vergeefs gepoogd een kist van een kubieke mijl met alle steden en alle bewoners der aarde vol te krijgen; en dan evenzeer vergeefs gepoogd het benodigde aantal van die kisten af te tellen, wat vele millioenen jaren zou eisen. Tegenover dit bewonderende zwelgen in grote getallen merkte F. KAISER, de hersteller van de sterrekunde in Nederland, ernstig vermanend op, dat de grootsheid van het heelal niet in de grootheid van de afmetingen is gelegen, maar in de orde en wetmatigheid die er heerst.

In dezelfde eerste helft van de eeuw werd nu ook het vraagstuk van de afstand der vaste sterren aangevat. Steeds nog was het in de achttiende eeuw mislukt de jaarlijkse parallaxe van een ster vast te stellen. Nu echter had FRAUNHOFER zulke voortreffelijke nieuwe meetinstrumenten van vroeger onbereikbare nauwkeurigheid verschaft, dat men, indien ergens, dan hiermee kon verwachten te slagen. Men moest dan sterren proberen, waarvan te verwachten was, dat ze dichtbij staan en dus een grote parallaxe zouden vertonen. BESSEL had bij zijn Bradley-bewerking een ster van de 5de grootte opgemerkt in de Zwaan (61 Cygni genoemd), die een zeer snelle eigen beweging toonde van $5,2''$ per jaar, wat een aanwijzing van grote nabijheid was. In de jaren 1837—40 mat hij met zijn heliometer afstand en richting t.o.v. twee kleine sterretjes in de buurt; en daarbij, daar de afstandsmetingen bleken een middelbare fout van niet meer dan $0,15''$ te hebben, kwam het jaarlijkse kringetje van de ster duidelijk te voorschijn. Voor de parallaxe werd eerst in 1838 $0,31''$, en dan in 1840 $0,348''$ gevonden; dus was de ster 590.000 astronomische eenheden van ons verwijderd.

Intussen had ook W. STRUVE met zijn met een dradenmicrometer toegeruste grote Fraunhoferkijker te Dorpat hetzelfde vraagstuk aangevat, en wel op de ster van de eerste grootte Wega (α Lyrae), die vooral als proefstuk was uitgezocht wegens haar helderheid, met daarnaast haar wel niet zeer grote maar toch aanmerkelijke eigen beweging ($0,35''$ per jaar), en haar ligging dicht bij de pool van de ecliptica, waardoor zij een onverkorte kring moest beschrijven. Uit zijn metingen in de jaren 1835—38 volgde een parallaxe van $0,26''$. En tegelijkertijd deden op de sterrewacht te Kaapstad HENDERSON en zijn opvolger MACLEAR metingen op de heldere Zuidelijke ster α Centauri. Het was maar een gewone muurcirkel, waarmee zij op gewone wijze meridiaanhoogten, dus de declinatie maten; maar deze ster, met een grote eigen beweging van $3,7''$, was een dubbelster waarbij men had bemerkt, dat de twee componenten een zeer grote baan in een korte tijd beschreven, waarbij dus het vermoeden sterk was, dat die baan alleen maar groot leek door de

grote nabijheid. En inderdaad werd hier een nog grotere parallaxe gevonden, 0,91". Latere nauwkeuriger metingen hebben deze eerste uitkomst gewijzigd tot 0,76"; maar α Centauri is toch onze allernaaste buur in de sterrenwereld gebleven, de ster met de grootste parallaxe, op een afstand van 270.000 eenheden.

Zo was dan het oude reeds door COPERNICUS gestelde probleem opgelost en waren van enige der naaste vaste sterren de afstanden bepaald. „De muur „van het sterrenstelsel is op drie plaatsen doorbroken; het is de grootste en „roemrijkste triomf die de practische sterrekunde ooit beleefde” aldus sprak JOHN HERSCHEL, de zoon van William, toen hij als voorzitter aan BESSEL de gouden medaille van de Royal Astronomical Society uitreikte. Natuurlijk lokten deze voorbeelden om op dit pad verder te gaan en te trachten van steeds meer sterren, speciaal snelbewegende of zeer heldere, de parallaxe te meten. Maar nu kwamen de teleurstellingen. De uitkomsten van verschillende waarnemers voor een zelfde ster, hoewel ze elk op uitvoerige en zorgvuldige metingsreeksen berustten, liepen dikwijls ver uiteen, veel verder dan naar de innerlijke overeenstemming binnen elke reeks te verwachten was. Zo was er een sterretje van de 7de grootte in de Grote Beer, dat bleek nog sneller te lopen dan de ster van BESSEL, nl. 7,07" per jaar (aangeduid als Nr. 1830 in de catalogus van GROOMBRIDGE); met de Koningsberger heliometer werd een parallaxe 0,182" gevonden, met de dradenmicrometer van de grote kijker op de Poelkowa-sterrewacht 0,034", dus vijfmaal kleiner. Voor 61 Cygni, waarvoor BESSEL uit voortgezette metingen tenslotte 0,35" afleidde, vond OTTO STRUVE uit zijn metingen een heel wat groter waarde 0,51". Blijkbaar waren de metingen sterk onderhevig aan systematische fouten, waarvan de bron slechts onzeker te vermoeden viel: ongelijkmatige veranderingen van temperatuur speelden wellicht een rol; dan verschillen in uiterlijk door de atmosferische kleuschifting op verschillende hoogte, of ook persoonlijke fouten in het pointeren of het op elkaar brengen van de beelden van de meestal heldere doelster en de veel zwakkere vergelijkingssterren. Zo vormden deze parallaxe-bepalingen de zwaarste proef op zorgvuldigheid in het systematisch ordenen der metingen en het elimineren van foutenbronnen, die aan de waarnemers gesteld kon worden. De heliometer bleef uiteraard het aangewezen instrument; en het is voornamelijk DAVID GILL (1843—1914) geweest, die sinds 1870, eerst in Schotland, later als directeur in Kaapstad, door zijn voorbeeld geleerd heeft hoe dit instrument door weloverlegde behandelingsmethode tot een betrouwbaar meetwerktuig te maken. Door hemzelf en door zijn assistent ELKIN zijn eerst aan de Kaap van een aantal Zuidelijke sterren, en later door ELKIN op de Yale-sterrewacht te Newhaven (Conn) van een aantal Noordelijke sterren parallaxen gemeten, die aan hoge eisen van betrouwbaarheid t.o.v. systematische fouten voldeden.

Gaandeweg waren zo toch gegevens over enige dozijnen sterren verkregen, en deze veroorloofden alreeds algemene gevolgtrekkingen. Reeds in de veertiger jaren had PETERS op de Poelkowa voor de gemiddelde parallaxe van sterren van de 2de grootte 0,017" afgeleid; voor zwakkere grootteklassen moest dit dan evenredig minder zijn. Maar steeds meer bleek hoe weinig zulk een gemiddelde zei bij de kolossale verschillen in lichtkracht, die nu voor den dag kwamen. Tal van sterren van de eerste en tweede grootte zijn door ELKIN gemeten: naast grote parallaxen van 0,76" van α Centauri, 0,38"

voor Sirius, 0,32" voor Procyon, 0,24" voor Altair, komen kleine en zeer kleine voor, zoals 0,028" bij Betelgeuze en 0,008" bij Rigel. Deze laatste, schijnbaar even helder als α Centauri, is dus zoiets als een 100 maal verder verwijderd, dus moet in werkelijkheid een 10.000 maal groter lichtkracht bezitten. Daartegenover komen grote parallaxen bij zeer zwakke, ook telescopische sterren voor, die, anders onder de duizenden gelijk uitziende sterretjes onherkenbaar, door hun snelle beweging hun grote nabijheid verrieden: Lalande Nr. 211885, van de 7de grootte 0,40", de z.g. ster van KAPTEYN van de 8ste grootte 0,32", welke dan op gelijke afstand als Procyon verwijderd, 1000 maal zwakker in lichtkracht moet zijn. Sterren kunnen dus zoveel in werkelijke lichtkracht verschillen, dat de een miljoenen maal meer licht geeft dan de ander.

Terwijl deze stapsgewijs voortschrijdende peiling van de naaste sterrenwereld haar voortgang nam, was in de ontwikkeling van onze kennis van de fundamentele basis, de astronomische eenheid, dus van de zonsparallaxe, een dramatische episode opgetreden. Het rustige bewustzijn, dat wij deze door ENCKE's uitkomst tot op $1/200$ van haar bedrag nauwkeurig kenden, werd omstreeks het midden van de eeuw door telkens nieuwe stoten geschokt. In de storingen, die de zon in de beweging van de maan bewerkt, treedt een term op van omstreeks 125", de z.g. „parallactische vereffening", die van de verhouding van de grootte van maanbaan en aardbaan afhangt; uit de empirisch gevonden grootte van die term leidde HANSEN in 1857 en 1863 een waarde van 8,92" voor de zonsparallaxe af. Een soortgelijke uitkomst, 8,95", leidde LEVERRIER af uit de massa van de aarde t.o.v. de zon, die hij uit de storingen vond, die de aarde op de planeten Venus en Mars uitvoerende — deze massa hangt met de afstand aarde-zon samen door de parallaxe van de maan en de omloopstijden van de aarde en maan, alle precies bekend. Daar kwam nu nog bij, dat de snelheid van het licht door directe fysieke proeven gemeten werd: volgens de methode van FIZEAU met een getand rad (1849), en nauwkeuriger volgens de methode van FOUCAULT met een sneldraaiende spiegel, in 1862. Vroeger was deze snelheid uit sterrekundige gegevens afgeleid, nl. uit de aberratie-constante (20,44" volgens de bepaling door OTTO STRUVE), die de verhouding tussen aard-snelheid en lichtsnelheid vastlegt, en de zonsparallaxe, die de aard-snelheid vastlegt; met ENCKE's waarde wordt deze laatste 30,56 km per seconde, en wordt de lichtsnelheid dan 307.900 km per seconde. Maar nu leverden de fysieke metingen een veel kleinere waarde op, 298.000 km volgens FOUCAULT. De aberratie-constante kon moeilijk meer dan 0,1", dus $1/200$ fout zijn; en FOUCAULT wees er dan ook dadelijk op, dat dan de zonsparallaxe 8,8" moest zijn. Alles dus veel groter dan ENCKE's uitkomst.

Men begon dus nu de oude Venus-overgangen wat te wantrouwen en richtte, nu men zoveel nauwkeuriger kon meten, het oog weer naar de vroegere directe methoden uit de 17de eeuw, het meten van de parallaxe van Mars, als deze in een gunstige, een perihelium-oppositie was. Men was er al mee begonnen in 1862, en een aantal corresponderende declinatie-metingen werden op Noordelijke en Zuidelijke sterrewachten gedaan. Voorlopige behandeling van dit materiaal leverde waarden 8,96" en 8,93"; de overtuiging vestigde zich meer en meer, dat de ware zonsparallaxe in de buurt van 8,90"

lag. Ten overvloede werd toen een nieuwe herleiding van de Venus-waarnemingen uit 1769 uitgevoerd door POWALKY (in 1864); doordat hij voor verscheidene waarnemingsplaatsen nu over betere lengteverschillen beschikte dan ENCKE, en meer plaatsen kon gebruiken, kreeg hij een andere uitkomst dan deze, en wel 8,33". Daarmee was nu ENCKE's oude waarde geheel vervallen. Men stond weer frisch en onwetend voor het vraagstuk: waar ergens tussen 8,80" en 8,90" ligt de juiste waarde van de zonsparallaxe?

Men begon met zich voor te bereiden op de volgende Venus-overgangen, die al spoedig, op 8 Dec. 1874 en 6 Dec. 1882, zouden plaatsvinden. Expeditie naar allerlei verre streken der aarde werden uitgezonden. Men stelde zich daarbij niet tevreden met enkel, naar HALLEY's methode, de tijdstippen van intrede en uitgang te noteren; deze was trouwens ontworpen voor een vroegere tijd van primitieve instrumenten, die geen nauwkeurig meten veroorloofden. Het was nu de bedoeling om de plaats van Venus op de zonnenschijf van het begin tot het eind voortdurend door metingen te bepalen. Tien Duitse expeditie gingen naar verschillende werelddelen, alle voorzien van heliometers, de beste instrumenten voor dit doel, en van fotografische kijkers, om op de foto's naderhand de plaats van Venus te kunnen uitmeten. Een enorme hoeveelheid arbeid van herleiding werd hieraan besteed; het werk van de Duitse expeditie kwam eerst na 20 jaar, in vijf dikke kwarto delen uit; en daarbij kwam soortgelijk werk van Engelse en Amerikaanse expeditie. De resultaten waren enigszins teleurstellend; uit de Engelse contactwaarnemingen werden uitkomsten 8,76" (AIRY), 8,88" (STONE) en 8,81" (TUPMAN) afgeleid; uit de Amerikaanse foto's vond TODD 8,88"; uit de Duitse heliometerwaarnemingen van 1874 vond AUWERS $8,88" \pm 0,06"$, uit de foto's $8,81" \pm 0,12"$, uit de waarnemingen van 1882 $8,88" \pm 0,04"$. Dus sterk uiteenlopend, terwijl de bijgevoegde onzekerheidsgrenzen een aanwijzing zijn van gemis aan innerlijke overeenstemming. Het was toch ook wel begrijpelijk, dat men, nu het op het gewone meten aankwam van de plaats van een lichaam t.o.v. een achtergrond, bij metingen dwars door trillende luchtmassa's tegen de hen verhittende zonnestraling in, in ongunstiger toestand verkeerde dan bij metingen met eenzelfde instrument 's nachts ten opzichte van de sterren.

Intussen had in 1877 weer een gunstige perihelium-oppositie van Mars plaatsgevonden. DAVID GILL trok met zijn heliometer naar het eiland Ascension, dicht bij de evenaar, om uit de plaatsen van Mars tussen de omgevende sterren, 's avonds in het Oosten en 's ochtends in het Westen, op zijn eentje de parallaxe af te leiden. Terwijl bij de N-Z-werking van de parallaxe samenwerking van Noordelijke en Zuidelijke sterrewachten nodig is, was hij bij de O-W-werking geheel onafhankelijk van anderen. Door de sterbeeldjes precies op het middelpunt van de ronde Marsschijf te stellen, kon hij de relatieve plaats met grote scherpte vaststellen. Zijn uitkomst 8,78" was dan ook zeer vertrouwenwekkend.

Nu was reeds te voren de gedachte geopperd, het eerst door GALLE in 1872, dat men nog groter nauwkeurigheid en vooral nog groter zekerheid tegen systematische fouten zou verkrijgen, als op de plaats van Mars een sterretje stond, dat er precies zo uitzag als de omgevende sterren. Dat was mogelijk door kleine planeetjes te nemen, die er geheel als sterren uitzien, en wel diegene, die door hun kleine periheliumafstand in oppositie zo dicht mogelijk bij de aarde komen. Bij de planeten Iris, Victoria en Sappho zijn deze kortste

afstanden 0,83—0,84, dus wel heel wat groter dan de 0,37 van Mars; maar wat men verloor doordat de zonsparallaxe hier in veel mindere mate vergroot werd, hoopte men te winnen in afwezigheid van systematische fouten. Zorgvuldig werden vergelijkingssterren van gelijke helderheid uitgezocht, waaraan de planeetjes met heliometers en ook door meridiaanwaarnemingen aangesloten zouden worden, en hun plaatsen nauwkeurig bepaald. De waarnemingscampagnes in 1888 en 1889, waaraan tal van Noordelijke en Zuidelijke sterrewachten deelnamen, hielden wat ze beloofd hadden en leverden in een zorgvuldige bewerking door GILL als uitkomst 8,802".

Zo kwam nu een zekere gerustheid, dat men op de goede weg was, en dat de juiste waarde van de zonsparallaxe dicht bij 8,80" moest liggen. De uitkomsten van de Venus-expeditie konden dit vertrouwen niet verstoren; daar was allerlei twijfelachtig. Nu kwam er nog een physische uitkomst bij. De lichtsnelheid was door MICHELSON en NEWCOMB op 299.860 ± 60 km per sec. bepaald, dus niet meer dan $1/5000$ onzeker. Voor de aberratie-constante was een bedrag van 20,47" gevonden, dat niet meer dan een paar honderdste seconden onzeker was. De daaruit volgende zonsparallaxe 8,80" kon dan ook niet meer dan een enkel honderdste onzeker zijn. Zo mocht men dan nu eindelijk, op het eind van de eeuw, zeggen dat de zonsparallaxe zeker tot op een paar honderdsten van een seconde was vastgesteld.

Maar het zou nog beter worden. In 1898 ontdekte G. WITT te Berlijn een klein planeetje, nr. 433, later Eros genoemd, dat bleek zijn baan niet als de anderen geheel tussen Mars en Jupiter te hebben, maar, door zijn sterke excentriciteit, in het perihelium binnen de Marsbaan te komen. Het was dan ook alleen ontdekt doordat het toen dicht langs de aarde liep; en men kon nu reeds uitrekenen, dat het bij de oppositie van 1900—1901 tot op een afstand van 0,27, en bij de oppositie van 1930—31 nog veel dichter, tot op een afstand 0,17 de aarde zou naderen. Hier was dus, als door een speciale gunst des hemels, een weg ter bepaling van de zonsparallaxe gegeven, die het voordeel van een stervormig uiterlijk van het waarnemingsobject verenigde met een zeshoudige vergrotingsfactor, het dubbele van die van Mars. De oppositie van 1900—1901 leverde al dadelijk, in een samenvattende bewerking van HINKS, uit de fotografische opnamen $8,807" \pm 0,003"$ en uit de micrometerwaarnemingen $8,806" \pm 0,004"$.

De nieuwe eeuw voegde hier nog nieuwere gegevens van gelijksoortige hoge nauwkeurigheid aan toe. HOUGH leidde in 1912 uit de jaarlijkse wissering in radiële snelheid der vaste sterren, als de aarde beurtelings van hen af en naar hen toe beweegt, de snelheid van de aarde in haar baan door directe spectografische metingen af, en vond daaruit een zonsparallaxe van 8,802". Uit de sterke storingen die de aarde op Eros uitoefende, kon NOTEBOOM in 1921 een nauwkeurige waarde voor de massa van de aarde afleiden, en deze leverde een zonsparallaxe van 8,799". In 1924 leidde SPENCER JONES te Kaapstad, uit de door hem gevonden parallaxische vereffening van de maan (125,20") een zonsparallaxe 8,805" af. Toen heeft DE SITTER te Leiden in 1927 een samenvattende discussie van alle onderling samenhangende sterrekundige constanten gegeven, en daarbij kwam voor de zonsparallaxe een uitkomst $8,803" \pm 0,001"$ te voorschijn. Dit wil natuurlijk niet zeggen, dat de 3de decimaal nu verzekerd was. Trouwens, een nog zorgvuldiger behandeling van een nog vollediger materiaal van sterbedekkingen

door de maan leverde in 1929 aan SPENCER JONES een iets andere parallactische vereffening op, van $125,02'' \pm 0,033''$, en daaruit volgde een zonsparallaxe van $8,796'' \pm 0,002''$.

Voor de nog gunstiger Eros-oppositie van 1930—31 werd een grote veldtocht geopend, waaraan een 40-tal Noordelijke en Zuidelijke sterrewachten met hun beste instrumenten en krachten meewerkten, door meridiaanwaarnemingen, fotografische opnamen, en micrometer-metingen. De reducties namen tien jaar in beslag, en eerst in 1942, tijdens de oorlog, kon SPENCER JONES, die intussen van de Kaap als directeur naar Greenwich was verhuisd, de resultaten publiceren. Voor de zonsparallaxe werd nu $8,790'' \pm 0,001''$ gevonden. Gaat men de methoden na, de kolossale omvang van het waarnemingsmateriaal, de nauwkeurigheid van de opnamen en de metingen, de uiterste voorzorg in het elimineren van alle foutenbronnen, dan kan men wel zeggen dat in de naaste tijden geen gelijkwaardige, laat staan beter of nauwkeuriger uitkomst zal te verkrijgen zijn.

Dit wil niet zeggen, dat er nu geen vuiltje meer aan de lucht is en de astronomen op dit punt van alle verdere zorg vrij zijn. Want deze nieuwe allerbeste uitkomst wijkt weer aanmerkelijk meer van de beste vorige uitkomst af dan men naar de opgegeven toevallige onzekerheid zou vermoed hebben. Er zitten dus nog altijd, welke methoden men ook volgt, systematische fouten in. Eros is niet een ronde bol maar een langwerpige onregelmatig blok, of dubbel; om vrij van onregelmatigheden in beeld en beweging te zijn, hadden de foto's op het Noordelijke en Zuidelijke halfrond precies gelijktijdig moeten zijn. De $\pm 0,001''$ moet men dus niet al te letterlijk nemen. Toch, hoe veel geringer is de onzekerheid dan vroeger, en hoeveel dichter is men nu zeker bij de waarheid gekomen.

De geschiedenis van de bepaling van de zonsparallaxe is wel een van de treffendste voorbeelden van wat men wel eens genoemd heeft: de strijd om de volgende decimaal. Men bedenke daarbij wat een geweldige vooruitgang de verzekering van één decimaal meer betekent; een tienvoudige verkleining der mogelijke fouten. Aan het eind van de 17de eeuw wist men dat de zonsparallaxe ongeveer $9''$ moest zijn, maar met enige seconden, zeg $\frac{1}{3}$ van het bedrag, onzekerheid. Na de Venus-expedities van de 18de eeuw wist men dat de waarde zo ongeveer tussen $8,5''$ en $9''$ moest liggen, met een onzekerheid van enige tienden, dus $\frac{1}{30}$ van het bedrag. In de tweede helft van de 19de eeuw, na vele twijfelingen en wisselingen van mening, kon men zeggen, dat zij dicht bij $8,80''$ moest liggen, met enige honderdste seconden onzekerheid, zeg $\frac{1}{300}$ van het bedrag. En nu, na de laatste Eros-campanje, kan ook de derde decimaal er met gerustheid bijgevoegd worden, en lijkt de zonsparallaxe tot op $\frac{1}{3000}$ van haar waarde, tot op enige duizendsten van een seconde verzekerd.

Voor de astronomische eenheid, de halve grote as van de aardbaan, volgt nu uit deze zonsparallaxe en de straal van de aardequator (6378 km) een waarde van $149,7$ millioen km. Deze dient als eenheid niet enkel voor alle afstanden in het zonnestelsel, maar ook voor de afmetingen van de hemelbollen. Daartoe moet dan eerst de schijnbare middellijn in boogmaat gemeten worden. Een nauwkeurige kennis van de afmetingen begint dus eerst met de nauwkeurige meetinstrumenten uit München, met name van de heliometers — want door de diffractieverschijnselen bij het strijken van planeten-

licht langs een draad zijn dradenmicrometers hiervoor niet te gebruiken. Van BESSEL zijn de eerste bruikbare uitkomsten afkomstig; later zijn JOHNSON en MAIN in Oxford, KAISER in Leiden — met een eenvoudiger toestel, maar met uiterste zorgvuldigheid — en HARTWIG te Bamberg in dezelfde lijn voortgegaan. Het meten van de zonsmiddellijn was daarbij een bijzonder werk met eigen methode; voor haar straal werd 696.400 km gevonden, $109,2$ maal groter dan die van de aarde. Bij de planeten Mercurius, Venus en Mars is de straal 2380 km (volgens KAISER), 6372 en 3370 km (volgens HARTWIG); deze vormen dus met de aarde de groep van de vier binnenste, kleinere planeten. Bij Jupiter en Saturnus is volgens de metingen van KAISER de equatorstraal 70550 en 59310 km, 11 keer en 9 keer groter dan de aarde; hier is door de sterke afplatting ($1 : 17,1$ bij Jupiter, $1 : 9,2$ bij Saturnus) de halve pool-middellijn aanmerkelijk kleiner.

Wenden wij ons thans van de zonsparallaxe opnieuw naar het daarmee evenwijdig lopende vraagstuk van de afstanden van en tussen de vaste sterren. In het laatst van de 19de eeuw begon men voor plaatsbepalingen directe metingen aan de kijker meer en meer te vervangen door uitmeting van fotografische opnamen; ook voor parallaxe-bepaling van sterren werden nu en dan reksen van platen opgenomen. Hierbij bleken eerst aanmerkelijke systematische fouten op te treden; maar de oorsprong daarvan was in de fotografische procédé's spoedig na te gaan. Doorgaans is de ster, waarvoor de parallaxe gezocht wordt, veel helderder dan de vergelijkingssterren. De laatste zijn nog juist als goed gevormde schijfjes op de plaat zichtbaar; is nu door een of andere storing, het sterbeeld een tijdje op een iets afwijkende plaats gevallen, dan blijft dat door de zwakte van het licht bij de vergelijkingssterren zonder invloed; maar bij de doelster is de zijdelingse lichtwerking sterk genoeg geweest om bij het ontwikkelen ook daar zilverneerslag te geven, dus het midden van het beeld van de heldere ster naar een verkeerde plaats te verschuiven. Zulk een storing kan b.v. optreden als het gefotografeerde veld dichter bij de horizon komt. Wel houdt de astronomie, die in een vast-verbonden visuele kijker het sterbeeld volgt, dit door correcties aan de kijker op de goede plaats; maar de atmosferische kleurschifting werkt anders op de fotografische stralen dan op de visuele, die bij het volgen van de kijker werkzaam zijn. Met deze verklaring was ook de weg gewezen hoe dit euvel te vermijden: het helderheidsverschil opheffen, en bovendien alleen platen bij gelijkblijvende hoogte, dus omstreeks de meridiaan op te nemen. Het voorbeeld gaf FRANK SCHLESINGER, die in 1903 begon met de 40-inch kijker van de Yerkes sterrewacht parallaxe-platen op te nemen, en dit sinds 1905 op de Allegheny sterrewacht voortzette met een grote fotografische refractor. De gelijkheid in helderheid kreeg hij door juist vóór de plaats van het beeld van de heldere doelster een sectorenschermje snel te laten draaien, waardoor het licht van de ster door de open sectoren slechts gedurende korte ogenblikjes in snelle opeenvolging de plaat kon treffen; de sectoren werden te voren juist zover geopend of gesloten, dat de sterkte van het beeld op de plaat gelijk was aan het gemiddelde van de vergelijkingssterren. Daar bovendien de opnamen symmetrisch om de meridiaan plaatsvonden, niet meer dan een uur voor of na, en daar door de lange brandpunts-

afstand de platen een grote schaal hadden, kreeg hij al dadelijk nauwkeurige en betrouwbare uitkomsten. De onzekerheid door toevallige fouten bedroeg niet meer dan ongeveer 0,01", en daalde bij verdere toepassing dikwijls nog beneden deze grens.

Zijn voorbeeld werd weldra nagevolgd, en een coöperatie kwam tot stand met zes andere sterrewachten, waar men over soortgelijke grote kijkers met lange brandpuntsafstand beschikte, de meeste in Amerika, daarnaast Greenwich en Kaapstad. En overal met dezelfde standaard van nauwkeurigheid. Vergelijking van de uitkomsten voor eenzelfde ster op verschillende sterrewachten verkregen toonde ook niets meer van de vroegere grote verschillen; deze waren nu meestal van de orde van hoogstens een paar honderdsten van een boogseconde. Wel toonde ze kleine systematische verschillen, in zoverre gemiddeld sommige instrumenten wat grotere, andere wat kleinere waarden geven. Maar deze verschillen waren slechts enige duizendsten van een boogseconde, dus tonen zelf het hoge peil van nauwkeurigheid dat bereikt was. Het aantal betrouwbare parallaxen groeide in de eerste decennien van de 20ste eeuw van dozijnen tot honderden, en ten slotte zelfs tot duizenden — SCHLESINGER's „General Catalogue” van 1924 bevatte 1870 sterren. Van alle heldere, voor het blote oog goed zichtbare sterren zowel als voor alle sterren met grote eigen beweging is nu de parallaxe gemeten. Doordat van zovele sterren nu de afstand bekend is — waarvoor als eenheid nu de „parsec”, de afstand bij een parallaxe van 1", in gebruik is gekomen, hoewel in populaire geschriften daarnaast veelal het „lichtjaar”, $\frac{1}{3}$ van een parsec gebruikt wordt — kan men hun onderlinge ligging in de ons omgevende ruimte als in een ruimte-diagram voorstellen. Dit wil niet zeggen, dat van alle gemeten sterren nu ook de afstand bepaald is; is de gemeten parallaxe slechts 0,01", dan betekent dit bij een onzekerheid van 0,01" niet meer, dan dat de parallaxe waarschijnlijk beneden 0,02" ligt, dus dat de ster waarschijnlijk verder dan 50 parsec verwijderd is. Er komen dan ook tal van negatieve parallaxen voor; dit betekent dat zij òf door toevallige fouten beneden 0 geraakt zijn, òf dat inderdaad de parallaxe van de doelster kleiner is dan die van de vergelijkingssterren. Al kan men dan niet voor zulk een ster individueel een afstand aangeven, in een statistische behandeling gelden ze evengoed mee als positieve waarden.

Zo is ook dit probleem van parallaxe en afstand der vaste sterren opgelost. Oorspronkelijk vooral gesteld om de juistheid van het heliocentrisch wereldstelsel te bewijzen, stond daarnaast direct de wens om een eerste maat voor de orde van grootte van de afstanden tussen de sterren te leren kennen. Toen een paar dozijn betrouwbare parallaxen waren verkregen, konden deze reeds voor een statistische behandeling van de naaste ons omgevende sterren dienen. Met de duizenden bepalingen, waarover de sterrekunde nu beschikt, is de grondslag gelegd voor een volledig indringen in bouw en karakter der sterrenwereld.

„Mécanique céleste”, hemel-mechanica, had LAPLACE zijn grote werk genoemd, en daarmee een programma voor de theoretische sterrekunde opgesteld. Mechanica was de leer van de krachten en bewegingen; de krachten waren in hun afhankelijkheid van de plaats door de aantrekkingswet van NEWTON bekend; als wiskundig vraagstuk bleef dus: door integratie van de differentiaalvergelijkingen, die de betrekking tussen kracht en plaats uitdrukten, het karakter der bewegingen, de aard van de loopbanen te berekenen. Uit de waarnemingen moesten dan de speciale afmetingen, de ligging, de bepalende constanten van elke afzonderlijke baan afgeleid worden.

De sterrekunde werd nu de wetenschap van de volhardende berekening. Naast de praktijk van het geduldig waarnemen en meten trad nu het onverdroten rekenen als gelijkwaardige andere helft van de praktische astronomie op. Enerzijds omvatte dit de theoretische oplossing van de wiskundige problemen in de ontwikkeling van een apparaat van formules, waartoe de knapste mathematici hun geest en vernuft inspanden; anderzijds de numerieke calculatie, de praktische detailberekening in eindeloze rijen van tabellen en cijfers. De sterrekunde was toen de enige natuurwetenschap waar nauwkeurig praktisch rekenen een hoofdbedrijf vormde, de inhoud van het dagelijks werk, en waar dus de methoden van praktisch rekenen zorgvuldig ontwikkeld en steeds verbeterd werden. Naast de astronoom, die aan de kijker de hemellichten observeerde en mat, trad gelijkwaardig de astronoom, die aan zijn schrijftafel met de pen de hemellichten volgde en behandelde; natuurlijk ook vaak in één persoon verenigd.

Er kwam volop werk aan de winkel, al dadelijk op het eenvoudige terrein van het vraagstuk der twee lichamen, d.w.z. de banen der hemellichamen onder de aantrekking van de zon alleen. Telkens verschenen kometen, meestal maar zwakke nevelvlekjes, maar toch door ijverige kometenjagers opgespoord, en hun banen dwars door het zonnestelsel heen moesten berekend worden; ook in de achttiende eeuw waren zij berekend, zij het dan ook met veel moeite. Na de eerste primitieve aanwijzingen van NEWTON hadden verschillende wiskundigen zich met dit vraagstuk beziggehouden; ook LAPLACE had formules gegeven, waarmee in opeenvolgende benaderingen een parabolische baan uit de waarnemingen was af te leiden; maar het was toch omslachtig en onbevredigend. Uit de praktijk van hen, die er direct mee te maken hadden, kwam de verbetering, nog vóór het einde van de eeuw. In 1797 gaf WILHELM OLBERS (1758—1840) zijn verhandeling uit „über die leichteste und bequemste Methode die Bahn eines Cometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen”. OLBERS was arts te Bremen, met een drukke praktijk, maar tegelijk amateur-astronoom, die 's nachts de sterren en vooral de kometen waarnam, hun plaats bepaalde met een eenvoudig kijkertje, hun baan berekende, en zo onder de sterrekundigen van zijn tijd als een eerste-rangs vakman gold. Tekenend voor de eenvoud van die tijd was het, dat hij deze rekenwijze al een tiental jaren zelf gebruikte voor hij op aansporing van zijn vrienden er toe kwam om ze ten gerieve van anderen te laten drukken. De gehele 19de eeuw door is zijn methode door opeenvolgende generaties van sterrekundigen, jong en oud, toegepast, die er dan ook

nu en dan kleine technische verbeteringen in aanbrachten.

Maar het bleef niet bij kometen met hun paraboolbanen. Reeds lang was in het planetenstelsel de grote gaping tussen Mars en Jupiter opgevallen, waar KEPLER indertijd zijn viervlak in had weten te plaatsen. In de 18de-eeuwse gedachting van een natuurlijk ontstaan van het planetenstelsel uit een oernevel paste deze gaping niet. En ze kwam nog duidelijker voor den dag toen de regelmaat van alle andere banen, naar buiten geleidelijk steeds verder uiteenliggend, in een eenvoudige getallenreeks, de z.g. wet van TITIUS, of van BODE, werd uitgedrukt. Van Mercurius tot en met Uranus is hun grootte door $0,4$; $0,4 + 0,3$; $0,4 + 2 \times 0,3$; $0,4 + 4 \times 0,3$; $\dots 0,4 + 64 \times 0,3$ weer te geven; daarbij is 1,6 Mars, 5,2 Jupiter, 10,0 Saturnus, 19,6 Uranus, maar 2,8 moest overgeslagen worden; daar was geen planeet bekend.

Er werd dus naar gezocht; de aandacht was er op gericht; en op de eerste dag van de nieuwe eeuw, op 1 Jan. 1801, ontdekte PIAZZI te Palermo onder de sterren, die hij bezig was te bepalen, er een van de 7de grootte, die zich van dag tot dag verplaatste, ongeveer zoveel als te verwachten was. Hij maakte de ontdekking bekend en noemde de nieuwe planeet Ceres. Bekendmaking ging echter langzaam in die tijd — Italië was vervuld van oorlogsgeweld; — veel later eerst kregen andere astronomen haar te zien, en weldra verdween ze in de zonnestralen. PIAZZI had een heel aantal waarnemingen, maar maakte ze niet dadelijk bekend, omdat hij er eerst een baan uit wilde afleiden en die tegelijk bekend maken. Hij tobde zich af met dit vraagstuk, waarvoor toen geen goede geijkte oplossingsmethode bestond; en toen met de gevonden onvolkomen baan de plaats berekend werd waar de planeet moest staan na de onzichtbaarheidsmaanden, bleek ze daar niet te staan. Vergeefs zocht men in die buurt; ze was weer verloren. Toen was het dat het jonge wiskundige genie CARL FRIEDRICH GAUSS (1777—1855), te Göttingen, het vraagstuk onder handen nam en een nieuwe methode opstelde om de baan van een hemellichaam uit drie waarnemingen streng te berekenen. Op PIAZZI's waarnemingen toegepast gaf ze dadelijk een goede oplossing; daarmee vooruitberekend werd Ceres nu aan het einde van het jaar direct gevonden, op een heel andere plaats dan men te voren had gezocht.

Deze triomf van de met bekwame hand correct ontworpen theorie verzekerde aan de baanberekeningsmethode van GAUSS een plaats, die ze de gehele negentiende eeuw door behield. Zij werd uitvoerig neergelegd in zijn in 1809 verschenen „*Theoria motus corporum caelestium*” (Theorie van de beweging der hemellichamen), in vorm en methode het keurigste handboek van de theorie der ongestoorde loopbanen, dat uit NEWTON's theorie alle consequenties ontwikkelde. Terwijl OLBERS' methode uitging van de aanname, dat de baan een parabool was, waarvan 5 elementen berekend moesten worden, maakte GAUSS' methode geen enkele onderstelling omtrent de vorm; de excentriciteit van de ellips kwam er als een van de 6 te bepalen elementen uit.

Weldra vond ze verdere toepassing. In het hemelgebied waar hij Ceres volgde, ontdekte OLBERS in April 1802 een ander soortgelijk bewegend sterretje van de 7de grootte, dat een ongeveer even grote (maar sterk hellende) baan had, en de naam Pallas kreeg. Daarbij voegde zich nog de in 1804 door HARDING ontdekte planeet Juno, en in 1807, door OLBERS ontdekt, de planeet Vesta. Telkens was het GAUSS' methode, die reeds na korte tijd

van waarneming een baan opleverde, waarmee elk der nieuwe planeten met juistheid vooruitberekend en zo verzekerd kon worden. Ze waren wel van een geheel ander soort dan wat men tot nog toe als planeten kende; ze waren 1000 tot 10.000 maal minder helder dan Mars en Jupiter, en zo klein, dat ze er als sterren uitzagen; ze werden dan ook asteroiden of planetoïden genoemd, of eenvoudigweg „kleine planeten”. Ze liepen alle vier in ongeveer even grote banen (2, 3 tot 2,8 maal die van de aarde), met omlooptijden van 3,6 tot 4,6 jaar, dus lagen alle in dezelfde ruimte tussen de Mars- en de Jupiterbaan.

Bijna veertig jaar bleef het bij dit viertal. Daar men overtuigd was dat er meer moesten zijn, werden, om ze gemakkelijker te kunnen opsporen, in deze decennien, door coöperatie van een 20-tal astronomen, de „Berlijnse sterrekaarten” vervaardigd, waarop de sterren tot ongeveer de 9de grootte waren ingetekend. Dank zij dit hulpmiddel begon in 1845 een sindsdien onafgebroken stroom van ontdekkingen van verdere kleine planeten. In 1852 was het aantal tot 20, in 1870 reeds tot 110 gestegen. Bij de eerste helderste voegden zich steeds kleine en lichtwakkere, eerst van de 9de, later van de 10de, 11de, 12de grootte, waarvoor de oude kaarten niet meer konden dienen, en de ontdekkers zelf kaarten met sterretjes van die zwakke grootteklasse hadden moeten maken. Hier kwam nu de fotografie te hulp, die al dat moeizame tijdrovende karteerwerk overbodig maakte. PALISA te Wenen nam door MAX WOLF te Heidelberg opgenomen foto's en reproduceerde ze als sterrekaarten, die hij ook gedrukt uitgaf; zo was hij in staat nagenoeg een honderdtal nieuwe planeetjes bij de reeds bekende te voegen. Een nog eenvoudiger en directer fotografische ontdekkingsmethode werd daarop sinds 1892 door MAX WOLF zelf toegepast. Hij maakte opnamen van vele uren lang, waarbij hij de kijker de sterren precies liet volgen; dus tekenden alle sterren zich als kleine zwarte stippen op de plaat af, maar de planeetjes, door hun verplaatsing in die paar uren belichtingstijd, trokken een streepje. Zo waren ze direct in een oogopslag uit de duizenden sterren te onderkennen, en kon hun plaats voor het middentijdstip van de belichting nauwkeurig op de plaat gemeten worden. WOLF heeft zo het aantal bekende kleine planeten in snel tempo vermeerderd; in 1900 was het aantal tot 450 gestegen, en WOLF heeft er alleen (vóór 1927) ruim 500 ontdekt. En toen op andere sterrewachten dit voorbeeld met steeds beter aangepaste instrumenten nagevolgd werd, ging de toename steeds sneller; en nog meer toen men de kijker de planeetjes liet volgen, die dan stippen tekenden terwijl de sterren streepjes trokken. Zo was in 1938 een aantal van 1500 bereikt. Ze werden nu natuurlijk steeds kleiner; waren de vier eersten nog flinke werelddollen van 600 of 800 km middellijn geweest, deze laatst ontdekten waren niet meer dan 50 of 30 of 20 km in doorsnee.

Deze onvermoede toename plaatste de waarnemers en de berekenaars, en in het bijzonder ook de theoretische sterrekunde voor steeds nieuwe moeilijkheden. Van het begin af gaf het berekenen van de loopbanen aan de rekenaars handen vol werk. De berekening van de baan uit drie waarnemingen, eerst uit de eerste ontdekkingsdagen, dan nauwkeuriger uit drie vele weken uiteenliggende plaatsen, was naar GAUSS' methode vlug genoeg te doen. Maar om ten slotte de best mogelijke baan uit alle waarnemingen af te leiden, wat toch nodig was om de plaatsen voor volgende jaren goed vooruit te kunnen

berekenen, was een lang en volhardend onderzoek nodig — dat bovendien nooit geheel af was, daar elk volgend jaar met zijn volgende opposities nieuwe gegevens verschafte. Zou men dit echter verzuimen, dan was er grote kans dat men het planeetje tussen alle kleine sterretjes niet kon terug vinden en het kwijtraakte, en dat men het niet zou kunnen identificeren bij latere ontdekkingen, en zo in hopeloze verwarring raakte. Er werd wel eens gezegd dat men al dat kleine grut maar moest laten schieten; maar dat ging ook niet; waar was de grens? Het was als met de gehele technische ontwikkeling van de 19de eeuw; men moest voort in gedwongen rusteloze arbeid, die geen ogenblik mocht verslappen. In de eerste jaren waren het enthousiasme en de volharding van de jonge onderzoekers en de bekoring, die in sterrekundig rekenwerk ligt, voldoende om aan de behoeften te voldoen. Maar toen het aantal steeds bedenkelijker werd en de planeetjes als steeds kleinere lichaampjes, alhoewel ze nog steeds namen kregen, toch hun markante individualiteit verloren, ging dat niet meer. Toen werd het werk steeds meer geconcentreerd in rekenbureaux, waar ambtsplicht en routine, organisatie en gemechaniseerde rekenmethoden samenwerkten om, zij het ook met een decimaal minder in nauwkeurigheid, de steeds groeiende stroom te verwerken. Met name was het het Berlijnse rekeninstituut, naderhand in Dahlem gevestigd en omgedoopt tot „Copernicus-instituut”, dat in de latere jaren de zorg voor de wereld der kleine planeten op zich nam.

En ging het hierbij enkel maar om baanberekeningen! Maar al deze lichamen zijn niet enkel aan de aantrekking van de zon onderworpen, maar ook aan die van de grote planeten; door de „storingen” worden hun banen voortdurend gewijzigd. Deze storingen zijn zelfs groter dan bij de oude planeten zelf, ten eerste omdat ze dicht bij Jupiter, de grote verstoorder, rondlopen, en dan omdat vele van de banen een grote excentriciteit en een grote helling hebben. Zou men deze storingen willen negeren, dan zou na een paar jaren reeds blijken dat de berekende ellips niet meer voldeed, dat de afwijkingen in de plaatsen steeds groter werden, en de gehele berekening nutteloos werd. Er was echter ook geen denken aan om voor elk van de kleine planeten op de wijze van LAPLACE eens voor al alle storingen in formule-vorm af te leiden; eiste dit voor het zevental der grote planeten, waar de hogere termen snel afnemen en onmerkbaar worden, reeds de inspanning van een mensleven, hier zou het aantal nodige termen in de formules onafzienbaar veel groter worden. HANSEN heeft naderhand, in 1856, een vereenvoudigde benaderde methode aangegeven, die op enkele der eerst ontdekte planeetjes is toegepast. Maar van het begin af waren de sterrekundigen, die vóór het probleem stonden, GAUSS, ENCKE, OLBERS, BESSEL, zich klaar bewust, dat er om het helemaal goed te doen maar één praktische weg was. Dit was dezelfde als bij de kometen gebruikt werd: de planeet van punt tot punt, van week tot week of van maand tot maand te volgen in haar loop, steeds de storende krachten en de daaruit volgende bewegingsverandering te berekenen, te zien waar ze dan terecht komt, en vandaar uit weer verder gaan. Dus een werk, dat nooit ophoudt en voor elk volgend jaar weer evenveel tijd er bij kost als voor elk vroeger jaar. Wel is deze methode van „speciale storingen”, die vooral door ENCKE is opgebouwd en door andere rekenaars verder uitgewerkt, tot een zo vast en zo eenvoudig mogelijk routine-schema geworden; en alle goede berekenaars van de eerste dozijnen planetoïden hebben met

groet volharding storingen berekend en zo aan hun werk vaste basis en waarde gegeven. Maar op den duur, nadat men over de honderd — later zelfs over de duizend — was gekomen, kon geen nog zo geduldige arbeidslust daartegenop, en heeft men op de rekenbureaux globale methoden ontwikkeld voor snelle benaderde storingsrekening bij groepen van gelijksoortige banen. Hierbij was in het precies afwegen van de tegengestelde eisen van uitvoerbare arbeid en bereikbare nauwkeurigheid vaak niet minder vernuft nodig dan anders op de problemen zelf besteed wordt. Maar men komt toch voor de vraag te staan of het de moeite loont om voor al die steeds kleinere steenklompen van slechts een tiental kilometers middellijn, die daar door de ruimte zwerven, aparte loopbanen af te leiden.

Tegenover al deze opgelegde moeite stond ook een beloning, in de vorm van nieuwe inzichten, nieuwe verschijnselen en nieuwe interessante problemen, die de kleine planeten verschafte. Toen het aantal daartoe nog amper groot genoeg was, werd er door KIRKWOOD in 1857, en nog eens in 1866, de aandacht op gevestigd, dat hun omloopstijden niet regelmatig om de middelwaarde 4,7 jaar verdeeld zijn, maar dat er grote gapingen zijn bij 5,93 en 3,95 jaar, juist $\frac{1}{2}$ en $\frac{1}{3}$ van de omloopstijd van Jupiter. Dit feit, dat bij de verdere toename van het aantal steeds duidelijker te voorschijn trad — en nu ook bij andere waarden, $\frac{2}{5}$ en $\frac{3}{5}$ keer de Jupiter-omloop — toont, dat de aantrekkende of storende kracht van Jupiter deze eenvoudige meetbaarheid der beweging niet duldt en het kleine lichaam daaruit wegduwt. Als onverwacht nieuw verschijnsel stelde het de hemel-mechanica voor nieuwe vraagstukken.

In 1906 werden kort na elkaar vier planeetjes ontdekt — later zijn er nog enige bijgekomen — die een omloopstijd van nagenoeg 12 jaar en een afstand van ruim 5 bleken te hebben. Dus ze liepen in nagenoeg dezelfde baan als Jupiter; maar ze bleven daarbij op ongeveer 60° afstand van Jupiter, deels rechts op kleiner, deels links op groter lengte; dus ze vormden met Jupiter en de zon een gelijkzijdige driehoek. Dit was een geval, dat de hemelmechanica al lang had voorzien. LAGRANGE had in de vorige eeuw theoretisch deze „driehoekspunten” als evenwichtspunten aangewezen; nu werd door verdere theoretische berekeningen aangetoond hoe kleine lichaampjes om deze punten, die met Jupiter meelopen, in regelmatige baanbewegingen, zogenaamde „libraties”, heen en weer kunnen slingeren. Deze merkwaardige meelopers kregen de namen Achilles, Hektor, Patroklos, Nestor en andere helden uit de Trojaanse oorlog en werden de Trojaanse planeten genoemd.

Op andere wijze merkwaardig, en van meer praktisch belang zijn die enkele kleine planeetjes, die in het perihelium binnen de Marsbaan en soms dicht bij de aarde komen. Een daarvan, Eros, hebben wij reeds als een voortreffelijk middel in het bepalen van de juiste afmetingen van ons zonnestelsel leren kennen. Deze Eros, zoals uit de niet geheel regelmatige helderheidsschommelingen bleek, was niet eens rond, maar waarschijnlijk onregelmatig van vorm. Hoeveel van zulke nog kleinere onregelmatige rotsblokken moeten er niet door de ruimte zwerven! Maar voor ons alleen zichtbaar en van belang als ze, buiten hun hoofdgebied, heel dicht langs de aarde strijken. In 1932 ontdekte DELPORTE te Brussel een object op zijn platen, dat even in zijn snelle loop kon gevolgd worden, en juist nog toeliet een onzekere baan te bepalen, het was de aarde op 0,11, d.i. op 44 maansafstanden nabij-

gekomen. Kort daarop vond REINMUTH te Heidelberg op een van zijn platen een streep getekend door een planeetje, dat op een afstand 0,06 de aarde was gepasseerd. De matador in deze toenaderingen tot de aarde was een hemellichaam, dat op 30 Oct. 1937 op een afstand 0,004, d.i. $1\frac{1}{2}$ maal verder dan de maan, ons voorbyschoot. Qua planeten zijn ze weer van een orde lager dan het 1500-tal boven vermeld, niet meer dan enkele kilometers in doorsnee, dus alleen op deze kleine afstand even zichtbaar. Voor de sterrekundigen is het de vraag tot welke graad van kleinheid zulke blokken nog als planeten te beschouwen zijn, waarvoor men banen berekent. Voor de mensheid treedt hier de veel belangrijker vraag op, wat de gevolgen zullen zijn als er een nog dichter langs strijkt, of zelfs tegen de aarde zou botsen. De massa van het blok is zo klein dat de beweging van aarde en maan er niet merkbaar door zouden veranderen. Maar op het continent, dat er juist door getroffen wordt, zou, als de plotseling gestuite en in warmte omgezette bewegingsenergie het gehele lichaam in gas van duizenden graden doet ontploffen, de verwoesting catastrofaal zijn.

Dergelijke ontmoetingen, maar dan op kleine en zeer kleine schaal, hebben inderdaad nu en dan plaatsgevonden. Oude berichten spraken van vurige stenen die uit de hemel vielen; maar aan het eind van de 18de eeuw had men deze naar het rijk der fabelen verwezen. Toen in 1790 in de Franse provincie Gascogne meteorieten neergekomen waren, weigerde de Parijse Academie van Wetenschappen het protocol daarover op te nemen, om niet voet te geven aan een bijgeloof, dat aan deze verlichte tijden onwaardig was. Maar de Duitse natuurkundige CHLADNI toonde in een goed gedocumenteerde studie aan, dat er tal van wel bewezen gevallen waren; en weldra kwamen nieuwe gevallen, waarbij zelfs een boerderij door zulk een meteor in brand werd gestoken, dit bevestigen. Kleine meteorieten werden nu opgezameld en in museums bewaard; grotere trof men in verre landen als met legenden omklede heiligdommen aan. Een grote kraterholte in Arizona, van ruim een km middellijn wordt toegeschreven aan het inslaan, in voorhistorische tijden, van een reusachtige meteor. En op 30 Juni 1908 is in Sibirië een meteor neergekomen, die een gehele, gelukkig zo goed als onbewoonde provincie verwoestte; hoewel deze gebeurtenis atmosferische storingen en in Europa zichtbare lichtverschijnselen bewerkte, bleef ze onbekend en werd pas tien jaar later door een wetenschappelijke expeditie aan het licht gebracht.

Keren we, na deze zijweg van planeten naar meteorieten, terug naar de loopbanen. De baanberekeningsmethode van GAUSS was uit het probleem van een planetenbaan ontstaan. Maar ze was natuurlijk op elke ellips toepasselijk, zelfs op een parabool, waarbij er dan een excentriciteit 1 uit moest komen; dus was ze even goed voor kometen te gebruiken. In de eerste helft van de 19de eeuw kwamen telkens kometen opdagen, meest zwakke kleine nevelvlekjes, waarvoor een parabool, zoals dadelijk bleek, helemaal niet paste; hier kon met de methode van GAUSS direct een meestal sterk uitgerekte ellips van kleine afmeting en korte omlooptijd worden afgeleid. De kleinste baan vertoonde een door PONS te Marseille in 1818 ontdekt komeetje, dat sindsdien naar de berekenaar, die het steeds gevolgd en verzorgd heeft, komeet van ENCKE is genoemd. Het heeft een omlooptijd van 3,3 jaren, en het bleek

dan ook reeds in 1786, 1795 en 1805 te zijn waargenomen. Voor het eerst sinds HALLEY voorspelde hij de terugkeer van een komeet, die dan ook telkens bij elke terugkeer werd berekend, voorspeld en waargenomen. Haar afstand tot de zon wisselt tussen 0,34 en 4,08, dus ze bereikt de Jupiterbaan niet eens. Voor de berekening van de storingen stond ENCKE dan ook geen ander middel ter beschikking dan de komeet van stap tot stap te volgen. De zorgvuldige uitvoering van deze steeds voortgaande berekening leverde als eerste winst een nauwkeurige waarde voor de massa van Mercurius, waar de komeet in 1835 dicht langs streek. En als tweede het merkwaardige verschijnsel, dat de baan gaandeweg kleiner en sneller wordt, wat ENCKE aan een weerstandbiedende middenstof toeschreef, die de ledige ruimte tussen de planeten opvult en alleen bij zulke ijle en uitgebreide dingen als kometen voor den dag kan komen. De andere kometen vertonen dit niet en de latere berekenaars, die ENCKE's werk voortzetten, eerst BACKLUND en daarna VON ASTEN, kwamen daarbij tot de opvatting, dat de komeet van Encke in bepaalde gedeelten van haar baan, door de ontmoeting met andere komeetachtige zwermen, aan deze weerstand is blootgesteld.

Kort daarna, in 1926, werd door BIELA een komeet ontdekt, die ook in 1772 en 1805 was gezien en een omlooptijd van $6\frac{1}{2}$ jaar had; wij komen op deze later terug. En weldra voegden er zich in het verloop van de 19de eeuw nog meerdere kometen van korte omlooptijd bij; maar het aantal bleef toch beperkt. Een dozijn waren er met omlooptijden van 5 of 6 jaar, dan een paar met 13 jaar en een paar met 33 jaar. In deze laatste eeuw verscheen tweemaal, in 1835 en in 1910, de komeet van HALLEY, die natuurlijk zeer zorgvuldig, naar dezelfde methode met de rekenpen gevolgd werd. Een in 1815 door OLBERS ontdekt klein komeetje bleek een omlooptijd van dezelfde orde, ongeveer 72 jaar te hebben, en is in 1887 opnieuw verschenen. Deze groepsvorming van omlooptijden bleek samen te hangen met de planeten; de verste punten van de banen, de aphelia, liggen bij de 6-jarige perioden vlak bij de Jupiterbaan, bij 13, 33 en 75 jaar in de nabijheid van de Saturnus-, de Uranus- en de Neptunusbaan. Dat een kort-periodieke komeet van 5 jaar haar kleine gesloten baan aan de aantrekkende werking van Jupiter kon te danken hebben, was reeds door LAPLACE uitgesproken. Een in een parabool lopende komeet kan, als ze toevallig vlak langs Jupiter komt, door de sterke aantrekking geheel uit de koers worden geslagen, in een kleine elliptische baan worden geworpen, en tot een blijvend lid van het zonnestelsel worden. Maar het kon ook omgekeerd gebeuren. Dat is bij de komeet van 1780 gebeurd, die volgens de berekening van LEXELL te Petersburg slechts twee omlopen van 5 jaar kon volbrengen en toen bij een nieuwe ontmoeting met Jupiter ver weg geslingerd werd en voorgoed verdween. Vindt zulk een „vangen” van de komeet plaats bij het passeren van Saturnus, Uranus of Neptunus, dan zullen de omlooptijden omstreeks 13, 33 en 75 jaren zijn. Dit is algemene theorie; om terugrekenende voor elke afzonderlijke komeet te vinden wanneer dit gebeurd was, daarvoor waren de waarnemingsgegevens niet nauwkeurig genoeg.

Het eigenlijke terrein van de hemelmechanica lag niet in al deze baanberekeningen. Het was gelegen in de storingen, in de eerste plaats die van de

grote planeten, en dan die van de maan. Nadat LAPLACE in zijn grote werk de theoretische ontwikkelingen van de 18de eeuw tot afsluiting had gebracht, bleef aan de 19de eeuw de taak, om enerzijds de grondslagen te verdiepen, zoals JACOBI (omstreeks 1830) en POINCARÉ (omstreeks 1890) het deden, en om anderzijds de detailontwikkelingen eenvoudiger en tegelijk nauwkeuriger te maken. Verscheidene onder de bekwaamste theoretici, zoals CAUCHY, BESSEL en HANSEN, hebben zich daarmee in de eerste helft van de eeuw bezig gehouden. Het grondigst en volledigst zijn de planetenstoringsen sinds 1840 behandeld door U. J. J. LEVERRIER (1811—1877) te Parijs.

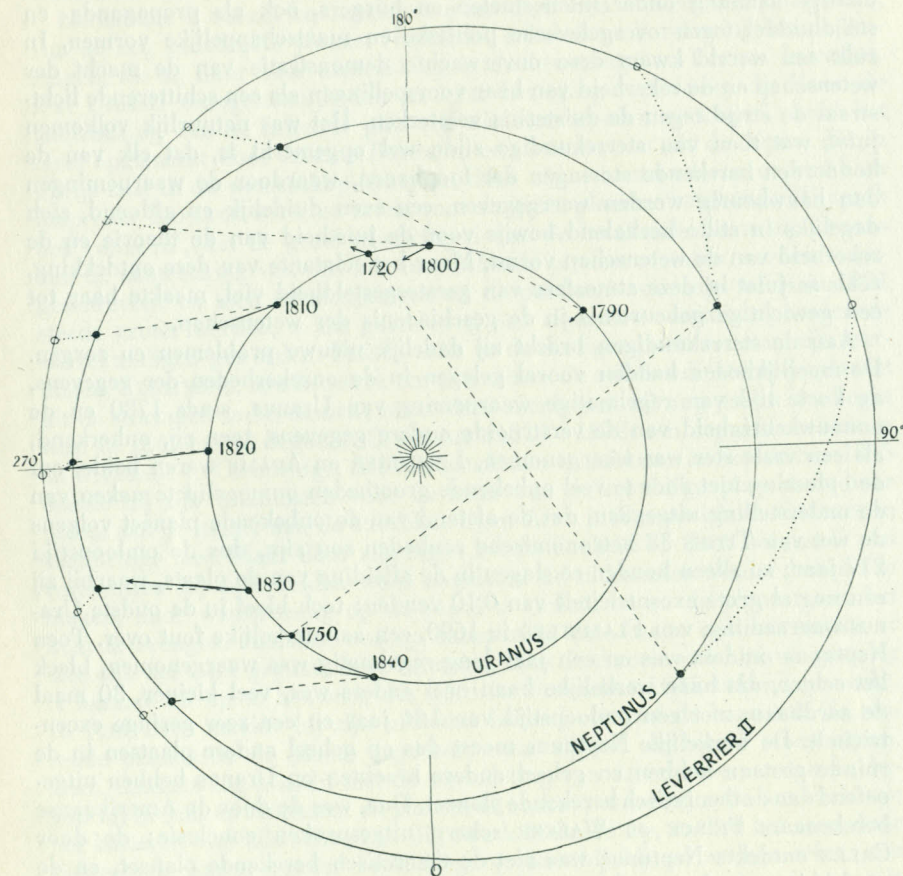
LEVERRIER is vooral beroemd geworden door zijn theoretische ontdekking van de nog onbekende planeet Neptunus, enkel door berekening uit de storingsen, die zij door haar aantrekking in de beweging van Uranus bewerkte. Dat Uranus onregelmatigheden in haar beweging vertoonde, die door de aantrekking van de bekende planeten niet kon worden verklaard, werd het eerst opgemerkt door ALEXIS BOUVARD, een boerenzoon uit de Alpen, die in Parijs zich in de wetenschap inwerkte, door zijn rekentalent een onschatbare hulp voor LAPLACE werd, en tafels voor de grote planeten berekende. Hij sprak ook reeds uit, dat de grote afwijkingen van de berekende baan bij Uranus aan de aantrekking van een nog niet bekende planeet moesten worden toegeschreven; en toen de afwijkingen na de publicatie van zijn tafels in 1821 steeds groter werden, is dit gaandeweg een algemene overtuiging onder de sterrekundigen geworden. BESSEL zette in de dertiger jaren een van zijn leerlingen, FLEMMING, aan het werk om te trachten de onbekende storende planeet uit de storingsen te berekenen; maar deze stierf, toen hij nog pas in het begin was. In 1842 en '43 begon J. C. ADAMS (1819—1892) een begaafd student in de wiskunde te Cambridge, het vraagstuk aan te pakken; in September 1845 deelde hij zijn uitkomsten voor de baan van de schuldige planeet en haar plaats aan de hemel aan de sterrekundigen AIRY in Greenwich en CHALLIS in Cambridge mee. Maar door zijn eigen bescheidenheid en door het gemis aan vertrouwen bij deze beiden werd nagelaten de uitkomsten verder bekend te maken, door waarneming op de proef te stellen, en zo de planeet aan het licht te brengen. Intussen was op aansporing van ARAGO ook LEVERRIER er mee aan het werk gegaan, door eerst nog eens de theorie van Uranus grondig te herzien en op te bouwen; dit werd in November 1845 bekend gemaakt. In Juni 1846 maakte hij zijn uitkomst bekend omtrent de baan van de storende planeet en de plaats ongeveer, waar zij aan de hemel moest staan. Toen CHALLIS zag hoe dit met de mededeling van ADAMS overeenstemde, begon hij in Juli en Augustus de planeet te zoeken; maar hij zette het werk van het karteren van alle sterren in die streek te breed op, en liet het toen door tijdsgebrek liggen zonder herleiding — waarbij hij ze anders zeker zou gevonden hebben, want ze was er bij. Intussen gaf LEVERRIER kennis van zijn uitkomst aan GALLE, assistent op de sterrewacht te Berlijn; en daar werd ze op 23 September met behulp van een der juist voltooide Berlijnse sterrekaarten dadelijk gevonden. Zij vertoonde zich als een ster van de 8ste grootte, en kreeg de naam Neptunus.

Dit gehele verloop bracht natuurlijk veel onverkwikkelijke strijd mee; niet onder de beide ontdekkers, die er levenslange vrienden bij werden, maar onder hun nationale supporters. Er bleek echter wel uit, dat de ontdekking van Neptunus door theoretische berekeningen niet de vrucht van een uit-

zonderlijke persoonlijke genialiteit was, maar een uitvloeisel van de nu bereikte hoogte van de wetenschap. Zij heeft op de wereld der natuuronderzoekers, en niet minder op de massa der ontwikkelde leken een diepe indruk gemaakt. Uit alle landen stroomden LEVERRIER eerbewijzen toe, en de ontdekking, aan de schrijftafel, van een onbekend wereldlichaam, dat niemand ooit gezien had, was een tijd lang het onderwerp van alle gesprek. Het was de tijd toen de natuurwetenschap de wereldbeschouwing van de burgerij in West-Europa steeds meer ging beheersen, en in voortdurende strijd de overgeleverde bijbelse voorstellingen steeds meer verdrong. Door tal van populaire geschriften werd de nieuwe „Aufklärung” verbreid en vond geestdriftige aanhang onder intellectuelen en burgers, ook als propaganda- en strijdmiddel tegen overgeleverde politieke en maatschappelijke vormen. In zulk een wereld kwam deze onverwachte demonstratie van de macht der wetenschap en de zekerheid van haar voorspellingen als een schitterende lichtstraal de strijd tegen de duisternis versterken. Het was natuurlijk volkomen juist, wat toen van sterrekundige zijde wel opgemerkt is, dat elk van de honderden berekende storingsen der loopbanen, waardoor de waarnemingen dan nauwkeurig worden weergegeven, een even duidelijk en afdoend, zich dagelijks in stilte herhalend bewijs voor de juistheid van de theorie en de zekerheid van de wetenschap vormt. Maar het eclatante van deze ontdekking, zoals ze juist in deze atmosfeer van geestesgesteldheid viel, maakte haar tot een gewichtige gebeurtenis in de geschiedenis der wetenschap.

Aan de sterrekundigen bracht zij dadelijk nieuwe problemen en zorgen. De moeilijkheden hadden vooral gelegen in de onzekerheden der gegevens, de korte tijd van regelmatige waarneming van Uranus, sinds 1730 en de onnauwkeurigheid van de verstrooide oudere gegevens, toen zij, onherkend, als een vaste ster was waargenomen. LEVERRIER en ADAMS waren beide, om de oplossing niet door te veel onbekende grootheden onmogelijk te maken, van de onderstelling uitgegaan, dat de afstand van de onbekende planeet volgens de wet van TITIUS 38 astronomische eenheden zou zijn, dus de omlooptijd 217 jaar; zo alleen konden ze slagen in de afleiding van de plaats, waarbij zij een nog al grote excentriciteit van 0,10 vonden; toch bleef in de oudste Uranus-waarneming, van FLAMSTEED in 1690, een aanmerkelijke fout over. Toen Neptunus ontdekt was en een jaar lang regelmatig was waargenomen, bleek het echter, dat haar werkelijke baan heel anders was, veel kleiner, 30 maal de aardbaan, met een omlooptijd van 164 jaar en een zeer geringe excentriciteit. De werkelijke Neptunus moest dus op geheel andere plaatsen in de ruimte gestaan hebben en geheel andere krachten op Uranus hebben uitgeoefend dan de theoretisch berekende planeet. Dus, was de door de Amerikaanse berekenaars PEIRCE en WALKER scherp uitgesproken conclusie: de door GALLE ontdekte Neptunus was niet de theoretisch berekende planeet, en de ontdekking op de aangewezen plaats was een gelukkig toeval geweest. De Europese sterrekundigen, LEVERRIER zelf voorop, hebben met hartstocht deze twijfelingen trachten te weerleggen. Zij werden door PEIRCE en WALKER bevredigend opgelost door het bewijs, ten eerste, dat door de aantrekking van de werkelijke Neptunus de waarnemingen van Uranus, ook de oudste, volkomen werden voorgesteld. En dan, dat het door ADAMS en LEVERRIER behandelde probleem er een was, dat meerdere oplossingen toeliet, onderling sterk verschillend, maar alle in staat om aan de gegevens te voldoen; en

dat zij, door van de onderstelling van een baan van 38 uit te gaan, op de ene waren gestoten, terwijl Neptunus zelf een andere oplossing vertegenwoordigde. Inderdaad toont de figuur, waar de op Uranus werkende storende krachten door pijlen zijn voorgesteld, dat deze alleen in de tijd tussen 1790 en 1850 zeer sterk en van belang waren; en in die jaren stonden de ware en de berekende Neptunus nagenoeg in dezelfde richting — de grote excentriciteit en de iets te groot aangenomen massa compenseerden hier de verkeerd aangenomen baangrootte — terwijl in de 18de eeuw, toen de plaatsen zeer sterk verschilden, de storende kracht onbeduidend was.



De storende krachten van Neptunus op Uranus.

Maar in Europa stootte dit onderzoek van de Amerikaanse geleerden, als een aantasting van de eer der ontdekkers, op onwil en werd grotendeels doodgezwegen. De Leidse sterrekundige KAISER, die met verwondering en afkeuring deze zo onwetenschappelijke gedragslijn constateerde, schreef daarover, dat de sterrekundigen in Europa in de ontdekking van Neptunus „niet veel meer gezien moeten hebben, dan een hulpmiddel, om het algemeen

„een hoog denkbeeld van de volkomenheid der wetenschap in te boezemen”; „zij wilden in die ontdekking ene volmaaktheid hunner wetenschap aanwijken, die zij, als menschelijk voortbrengsel, toch nimmer bereiken kan. . . . „Daarom werd alles met vooringenomenheid bestreden en verworpen, wat eenige twijfel over de overeenstemming tusschen de voorspelling en hare vulling werpen kon. . . . Het schijnt zelfs, dat men in Europa geen onderzoek durfde wagen, wier stellige uitspraak zich tegen het geliefkoosde „denkbeeld had kunnen verzetten. . . .” „In Noord-Amerika heeft men niet „het wonderdadige dier ontdekking uitgeroepen, maar des te strenger „arbeid om haar aan het heil der wetenschap dienstbaar te maken”. Dit wordt begrijpelijk als men bedenkt, dat in Amerika die hartstochtelijke strijd voor maatschappelijke vooruitgang tegen oude gevestigde machten niet behoefde gestreden te worden, waarin in Europa de natuurwetenschap, als grondslag van nieuwe geestescultuur, zulk een belangrijke rol speelde.

LEVERRIER, sinds 1853 directeur van de sterrewacht te Parijs, die vroeger reeds de theorie van Mercurius met grote nauwkeurigheid had uitgewerkt, heeft in de decennien na het tussenspel van Neptunus alle grote planeten onder handen genomen. Hij voerde de benaderingen volgens nieuwe methoden veel verder door dan de vroegere berekenaars, een moeilijk werk door de veelheid en kleinheid van de termen van hoger orde. Daarmee bereikte hij dan ook een nauwkeurigheid in de berekende tafels, groter dan waar men vroeger op had durven hopen, maar die nodig was om in harmonie te blijven met de zo zeer toegenomen nauwkeurigheid en talrijkheid van de waarnemingen. Was men in het begin van de 19de eeuw tevreden geweest met een overeenstemming tot op $10''$ of $20''$, nu daalde de onzekerheid tot een enkele seconde, soms zelfs daar beneden.

Als resultaat van al deze onderzoekingen, die tussen 1855 en 1877 veertien delen van de Parijse Annalen vulden, kon hij een bijna volledige overeenstemming tussen de waargenomen en de theoretisch berekende plaatsen der planeten vaststellen. Er bleven enkele afwijkingen over; de lengte van het perihelium van Mercurius moest per eeuw volgens de theorie $527''$ toenemen, maar de waarnemingen van overgangen van Mercurius over de zonnenschijf, sinds 1631, gaven met grote nauwkeurigheid $565''$, dus $38''$ meer; ook liep de lengte van de knopenlijn van Venus $10''$ minder snel terug en nam het perihelium van Mars minder snel toe, dan de theorie eiste. Het laatste kwam in hoofdzaak in orde, toen het bleek dat de massa van de aarde, door ENCKE's zonsparallaxe, ongeveer $1/10$ te klein was aangenomen. Maar de afwijking bij Mercurius was door geen aannemelijke wijziging der massa's weg te krijgen. Verschillende onderstellingen zijn ter verklaring geopperd: een onontdekte planeet of andere aantrekkende materie binnen de Mercuriusbaan, of ook een afwijking van de wet van NEWTON, waarbij de exponent van de afstand niet precies 2 zou zijn maar één zesmillionste meer. Geen van deze verklaringen kon echter bevredigen.

Toen SIMON NEWCOMB (1835—1909) in 1877 aan het hoofd van het rekenbureau voor de Amerikaanse Nautical Almanac kwam, was hij reeds bezig met als grondslag voor de ephemeriden de bestmogelijke tafels voor de zon en de planeten op te stellen. Als bekwaam theoreticus wist hij door verfijnde symbolische methoden van analyse het anders geheel onoverzichtelijke veld van alle hogere termen te ordenen en volledig in rekening te brengen.

gen, en zo het werk van LEVERRIER nog te verbeteren. Niet minder bekwaam als practicus slaagde hij er in alle oude en nieuwe waarnemingsreeksen, van Greenwich, Parijs, Washington en zovele andere sterrewachten, — door LEVERRIER slechts ten dele gebruikt — naar uniforme gezichtspunten te herleiden, in geconcentreerde tabellen samen te vatten, en voor de beste bepaling van de sterrekundige constanten te gebruiken. De vereniging van deze beide, elk op zichzelf reeds omvangrijke werken van vernuft en volharding leverde ten slotte de toetssteen voor de overeenstemming van practijk en theorie.

Het bleek dat voor de vier binnenste planeten de uit de waarnemingen afgeleide seculaire veranderingen van de baanelementen zo goed als volkomen klopten met de theoretische afgeleide waarden; bij nagenoeg alle zijn de afwijkingen minder, of nauwelijks een ietsje meer, dan de middelbare fouten der empirische uitkomsten. Met slechts een paar uitzonderingen, dezelfde als bij LEVERRIER: bij de knopen van Venus zijn de waargenomen en de berekende teruggang per eeuw 1783" en 1793", verschil $10'' \pm 3''$; bij de periheliumbeweging van Mars bleef tussen de waargenomen 1603" en de berekende 1595" nog een verschilletje van $8'' \pm 3,8''$; en bij de vooruitgang van het perihelium van Mercurius zijn ze 575" en 534", verschil $41'' \pm 2,1''$. Het eerste en tweede betekent afwijkingen in de plaats van Venus en Mars, die tot slechts 2" oplopen; bij Mercurius lopen de afwijkingen in plaats tot 8" op, wat heel wat meer is dan men een gemiddelde uit vele goede waarnemingen kan te laste leggen. Hier bleef dus een zwakke plek, de enige ernstige in het zo steevaste bouwsel van NEWTON's gravitatiewet bestaan.

Het was een ijdel pogen, nu en dan, om de opheffing van deze tegenstrijdigheid door het bedenken van kunstmatige verklaringen te forceren. Men moest, als zo dikwijls, wachten tot van geheel andere zijden nieuwe gezichtspunten zouden opdoemen. En deze kwamen, van de kant van de physica, in 1905, uit het relativiteitsbeginsel van EINSTEIN.

De relativiteitstheorie ging van de gedachte uit dat alleen relatieve bewegingen, geen absolute kunnen worden waargenomen, en zij stelde het beginsel op (in 1914), dat de vorm der natuurwetten niet afhankelijk mag zijn van de voor de waarnemer aangenomen bewegingstoestand. Aan deze eis voldeed de aantrekkingswet van NEWTON niet; NEWTON was dan ook van de grondstelling uitgegaan van een absolute ruimte en een absolute tijd. Om er aan te voldoen moest de formule voor de algemene aantrekking gewijzigd worden; en daarbij trad als gevolg een beweging van de perihelia der planeten op. Het verschil was zo klein, dat het alleen bij de snelste relatieve bewegingen merkbaar was, en de enige wijziging van belang, die de nieuwe formule meebracht, was een vooruitgang van het perihelium van de Mercuriusbaan van 43" per eeuw. Zo was de enige overgebleven ernstige afwijking tussen theorie en waarneming op natuurlijke wijze, zonder enige nieuwe opzettelijke hypothese verklaard. Een tweede consequentie van de relativiteitstheorie, dat lichtstralen langs aantrekkende massa's evenzo afgebogen worden als met lichtsnelheid voortvliegende massadeeltjes — aan de rand van de zon tot een bedrag van 1,75" — werd door opnamen van het sterrenveld rondom de totaal verduisterde zon bij de zoneclips van 1919 door twee Engelse expedities vastgesteld en naderhand door verdere expedities bevestigd. Deze bevestiging gaf onwifbare zekerheid aan de gehele relativiteitstheorie, dus

ook aan haar verklaring van de beweging van het Mercurius-perihelium.

Zoer de planetentheorie, speciaal de beweging van de aarde zichtbaar in die van de zon, haar praktische consequenties had voor alle plaatsbepaling, zo was toch voor de practijk van leven en bedrijf het eigenlijke probleem van de hemelmechanica de theorie van de maan. De achttiende eeuw had het zover gebracht, dat de formules en tafels van LAPLACE in de plaatsen van de maan geen groter fouten dan een halve boogminuut overlieten. Dat ging echter de fouten van de waarnemingen nog verre te boven; en de theorie moest dus nog beter uitgewerkt worden. Had LAPLACE nog termen met de 3de machten van de kleine grootheden excentriciteit en helling meegenomen, nu werden, in antwoorden op een prijsvraag van de Parijse Academie in 1820, door DAMOISEAU en door PLANA termen met hogere machten, tot de 7de toe, in rekening gebracht, met het doel om door enkel theoretische berekening de waarnemingen zo goed mogelijk weer te geven. De afwijkingen waren hier slechts een matig aantal seconden; maar toch nog te groot voor de behoeften van de zeevaart.

Het was de veelheid, ingewikkeldheid en onderlinge inwerking van al deze termen, die het uitwerken van de theorie zo uiterst omslachtig en moeilijk maakte; en door een telkens nieuwe theoretische opzet van het vraagstuk hebben tal van de bekwaamste wiskundigen het trachten op te lossen. In 1838 begon P. A. HANSEN (1795—1874) te Gotha met een theoretische ontwikkeling der formules zijn werk over de beweging van de maan, dat hem twintig jaar bezighield. Zijn doel was de volledige reeks van meridiaanwaarnemingen van de maan, die sinds 1750 al nagenoeg een eeuw lang in Greenwich waren verricht, nauwkeurig tot op een boogseconde weer te geven. In 1857 werden zijn maantafels door de Britse Admiraliteit uitgegeven, en ze hebben meer dan een halve eeuw als grondslag voor alle opgaven in de jaarboeken en almanakken gediend; in 1862—64 voegde hij er een uiteenzetting van zijn gehele werkwijze met de gegevens en vergelijkingen aan toe. Op geheel verschillende wijze, maar even breed en omvattend had tegelijkertijd CH. DELAUNEY te Parijs het vraagstuk ter hand genomen en de uitkomsten in 1860 en 1867 gepubliceerd. Zo verschillend was hun beider opzet, dat naderhand NEWCOMB slechts door een uitvoerig afzonderlijk onderzoek in staat was hun beider uitkomsten voor het bedrag van elk der termen te vergelijken. Maar toen bleek een zo verregaande overeenstemming, dat men kon zeggen, dat de theorie nu een ondubbelzinnig antwoord op de vraag naar de beweging van de maan gaf.

Wel waren er nog een paar zwakke punten. De draaiing van de grote as, dus het vooruitlopen van het perigeum ten bedrage van omstreeks 40° per jaar, dat al in de 18de eeuw CLAIRAUT in moeilijkheden had gebracht, was ook nu nog uiterst moeilijk te benaderen. DELAUNEY was er door moeizame berekening in geslaagd de waarde tot op $\frac{1}{8000}$ vast te stellen; maar dit liet een veel te grote onzekerheid over, nl. van 20" per jaar. Op geniale wijze heeft daarna GEORGE W. HILL, rekenaar aan de Amerikaanse Nautical Almanac, in 1877 deze moeilijkheid door een geheel nieuw principe van behandeling opgelost. In plaats van uit te gaan van de algemene baan voor twee lichamen, de ellips met zijn toevallige excentriciteit, en daaraan de storing door de zon toe te voegen, ging hij uit van de vereenvoudigde baan

zonder toevalligheden voor drie lichamen; wat bij twee een cirkel zou zijn, werd nu in het stelsel zon-aarde-maan een ietwat andere baanvorm, waar TYCHO's „variatie" al bij in begrepen was; en daar aan werd dan in tweede instantie als een toevallige vervorming de excentriciteit aangebracht. Dit paste zoveel beter bij het innerlijk karakter van het probleem, dat hij met een korte numerieke berekening van slechts een paar termen de juiste waarde tot op een honderdduizendmillioenste kon vaststellen. Kwam het nu beter uit met de waarneming? Zo kon de vraag niet gesteld worden. Want in de totale perigeum-beweging zit ook een klein deel, dat door de afplatting van de aarde ontstaat, en dat nu eerst bevredigend als overschot van de waargenomen boven de berekende waarde kon vastgesteld worden, en zo een betrouwbare waarde voor de afplatting opleverde — wel te weten de mechanisch werkzame afplatting, het verschil der traagheidsmomenten, niet de meetkundige van het oppervlak. Op grond van de theorie van HILL heeft naderhand ERNEST W. BROWN maantafels geconstrueerd, die vanaf 1922 als grondslag voor de almanakken die van HANSEN vervangen hebben.

Een tweede punt betrof de seculaire versnelling van de maan. Door LAPLACE was daarvoor door de theorie en uit de eclipsen van de Oudheid overeenstemmend omstreeks 10" per eeuw gevonden. En ook HANSEN had theoretisch 11,47", empirisch 12,18" berekend en dit gebruikt. Maar in 1853 kwam ADAMS op grond van uitvoeriger berekeningen met insluiting van hogere termen tot een veel kleiner uitkomst, nl. 5,70". Hoewel eerst van alle zijden bestreden, omdat de oude waarde zo goed met de waarnemingen klopte, werd zijn berekening ten slotte door DELAUNEY, door PLANA en door de beroemde wiskundige CAYLEY bevestigd en ook door HANSEN als juist erkend. Dan moest er voor de grotere waargenomen versnelling nog een andere oorzaak bestaan. Deze werd gevonden in de getijden-wrijving; doordat de door de maan opgewekte vloedgolf onder vele wrijvingen en weerstanden meegesleurd wordt door de snel roterende aarde, wordt door hun wederzijdse aantrekking de rotatie van de aarde geremd en de maan vooruitgetrokken. Dit laatste bewerkt een verwijdering en verlangzaming van haar baanbeweging, die zich echter, uitgedrukt in de langer geworden dagen, als een versnelling voordoet. Maar kan de wrijving zoveel bewerken? Men nam aan van ja, totdat in 1909 CHAMBERLIN afleidde, dat de wrijving van de vloedgolf tegen zeebodem en kusten van de oceanen te gering was om zulk een effect teweeg te brengen. Zo leek ook die uitweg afgesneden. Totdat in 1919 door G. TAYLOR werd aangetoond, dat het vooral ondiepe binnenzeeën met sterke getijstromen zijn, waar wrijvingsenergie voor de wenteling van aarde en maan verloren gaat. De Ierse Zee alleen levert naar ruwe berekening $\frac{1}{56}$ van wat nodig is; met de Behring Zee, de Fundy Baai, en verdere gunstig gelegen zeestraten zou men er kunnen komen, terwijl inderdaad de oceanen weinig bijdragen. Theoretisch was dan echter het totale bedrag niet aan te geven, en er bleek in elk geval uit, dat men de door HANSEN gebruikte seculaire versnelling niet meer als een theoretisch berekenbare maar als een empirisch bepaalde term moet beschouwen.

In de te Greenwich bepaalde lengten van de maan bleek, als alle andere storingsen in rekening waren gebracht, nog een langzame fluctuatie te zitten van enige tientallen van seconden, waarvan HANSEN de oorzaak in een storing door de planeet Venus vond, in een periode van 240 jaar, die dan een

bedrag van 21" moest hebben. DELAUNEY kon daarvoor theoretisch alleen maar een onmerkbaar bedrag, minder dan 1" vinden. HANSEN bracht ze toch aan; omdat hij zag dat de waarnemingen het eisten, was hij overtuigd, dat de theorie die ten slotte wel zou verklaren. Het was nu echter een empirische term geworden, nodig om metingen en theorie te laten kloppen. In het tijdperk vóór 1750 bleken dan ook de wel is waar toen nog slechtere waarnemingen niet door deze theorie weer te geven. Erger was het, dat, toen de tafels van HANSEN in de almanakken waren ingevoerd, sinds 1860, de maan zelf gaandeweg begon af te wijken. In de jaren zestig bleef ze al enige boogseconden bij de tafels ten achter, in 1880 reeds 10", en in elk volgend decennium werd het meer. Toen heeft NEWCOMB in 1878 de zaak ter hand genomen; om alle gegevens te gebruiken en om de meridiaanwaarnemingen te controleren, reduceerde en verwerkte hij zorgvuldig alle oudere waarnemingen van sterbedekkingen en eclipsen sinds de uitvinding van de verrekijkers, van 1620 af, die hij op een reis door Europa in 1871 uit alle sterrewachts-archieven had verzameld. Hij kon nu dit gehele materiaal behoorlijk voorstellen door een ietwat verschillende empirische term in te voeren, nu van 17" uitwijking in een periode van 273 jaar. Maar de verklaring bleef zoek, en men kon dan ook niet verwachten, dat de afwijkingen nu in de latere jaren zouden ophouden. In het derde deel van zijn grote standaardleerboek „*Traité de mécanique céleste*" besluit dan ook TISSERAND, in 1894, zijn overzicht van de maantheorieën met de woorden: „De theorie van de „maan vindt zich aldus door de hier geschetste moeilijkheid opgehouden. . . . „zij zal de nieuwe hindernis weten te overwinnen; mais il reste à faire une „belle découverte".

De oplossing werd inderdaad gevonden; maar op een geheel ander onverwacht terrein. De oorzaak van de afwijkingen lag niet in de theorie, niet in de maan, niet in de aantrekkingskracht, maar in onregelmatigheden in de aswenteling van de aarde. NEWCOMB had dat al een ogenblik overwogen, maar had het toch weer in zijn laatste werk over de maan, in 1903, verworpen als onwaarschijnlijk en onreëel. Zulke veranderingen moeten zich in gelijksoortige schijnbare onregelmatigheden van alle andere snelbewegende hemellichamen weerspiegelen. In 1914 vond BROWN, dat in de beweging van de zon, van Venus, en van Mercurius dezelfde schommelingen als bij de maan optreden, alleen tot een minder groot bedrag. Dit werd bevestigd door uitvoerige studies van SPENCER JONES in Greenwich (1926 en 1939). Toen W. DE SITTER (1872—1934) te Leiden de beweging van de manen van Jupiter onderzocht en daarbij een volledige theorie van de storingsen in dit stelsel opstelde, vond hij daarin in 1927 dezelfde onregelmatigheden. Dus de maan had geen schuld. De empirische term van HANSEN en van NEWCOMB kon nu vervallen; in plaats daarvan kwamen meer of minder plotselinge sprongen in de duur van de aswenteling: in 1667 een verlenging van 0,0011 seconde per dag, een verkorting van 0,0006 in 1758, van 0,0017 in 1784, van 0,0027 in 1864 (deze bracht de grote afwijkingen van de tafels van HANSEN), een verlenging van 0,0017 in 1876, van 0,0034 in 1897, en een verkorting 0,003 in 1917.

Het is merkwaardig — maar toch ook weer niet verwonderlijk — dat de door eerste ruwe waarneming gegeven zeer eenvoudige toestanden der wereldlichamen, die men als uitvloeisel van de mechanische wetten eeuwen-

lang aannam: de onveranderlijke omwentelingssnelheid en de onveranderlijke ligging van de aardas in het aardlichaam, bij verfijnd onderzoek bleken geen stand te houden. Dat er bij grote benadering aan werd voldaan, heeft wezenlijk meegeholpen om het sterrekundig wereldbeeld als een eenvoudig harmonisch samenstel te doen opgroeien. Maar de grote nauwkeurigheid van de negentiende-eeuwse metingen toonde een meer natuurlijke, zij het ook uiterst weinig afwijkende werkelijkheid. Zo waren ook reeds te voren veranderingen in de aardas ontdekt. In 1885 werd door S. C. CHANDLER afgeleid, en werd onafhankelijk daarvan door FR. KÜSTNER in Berlijn uit zijn bijzonder nauwkeurige metingen ontwijfelbaar vastgesteld, dat de plaatsen van waarneming op aarde periodieke poolhoogte-schommelingen van enige tienden van een seconde ondervinden. Dit betekende dat de pool, het uiteinde van de omwentelings-as, kleine kringen — van niet meer dan een meter of tien! — beschrijft om het poolpunt van het aardlichaam, het uiteinde van de traagheids-as. EULER had indertijd berekend, dat zulk een kring in 305 dagen moest doorlopen worden; en het vruchteloos zoeken naar wisselingen in deze periode had de ontdekking van de schommelingen in de poolhoogte verhinderd. Want nu bleek de periode omstreeks 430 dagen te zijn: en NEWCOMB gaf al spoedig daarvoor de verklaring, dat het oceaانwater zich voortdurend aan elke nieuwe ligging van de wentelings-as enigszins kan aanpassen, waardoor de verplaatsing van de as verlangzaamd wordt. Zoals toen dus de aardas bleek niet precies vast te liggen in de aarde, bleek nu de omwentelingstijd om de as niet precies standvastig te zijn. Men tracht het te verklaren uit uitzettingen, inkrimpingen en materieverplaatsingen in het aardlichaam, waardoor bij gelijkblijvend rotatie-moment veranderingen in de rotatiesnelheid moeten ontstaan; maar dit moet alles, geologisch gesproken, wel op kolossale schaal geschieden.

Het zag er nu echter voor de maan-ephemeriden in de almanakken bedenklijk uit. Er was geen sprake meer van, dat nu de beweging van de maan, gemeten in onze gewone dagen, door de theorie precies, of met onbepaald toenemende precisie, vooruit berekend kan worden. Volkomen onberekenbare en onvoorspelbare veranderingen in de aswenteling van de aarde, dus in de gebruikelijke sterrekundige dagrekening treden nu op, die in de plaatsen van de maan voor die tijdstippen tot uitdrukking komen. Zou dus nu toch voor de zeevaart het hulpmiddel onbereikbaar blijven, waarnaar zolang was uitgezien, waarvoor door praktische en theoretische sterrekundigen zo ontvermoed was gewerkt, en dat nu bijna bereikt scheen?

De zeevaart heeft de maan niet meer nodig. Voor het eeuwenoude vraagstuk van de lengte op zee was intussen de volledige oplossing op andere wijze verwezenlijkt, nl. door de radioseinen. Sinds het daartoe bijeengeroepen internationaal congres in 1913 worden op regelmatige tijden door de grote zendstations tijdseinen draadloos uitgezonden. Elk schip op de oceaan kan om het uur de preciese wereldtijd opvangen en met de eigen plaatselijke tijd vergelijken. Het probleem van de lengte op zee is een historische episode geweest, nu afgesloten; maar die voor de ontwikkeling van de wetenschap van grote betekenis is geweest. Het heeft de hemel-mechanica, de theoretische kennis van de mensheid krachtig gestimuleerd, en het heeft ons geleid tot subtiele detailkennis van nieuwe verschijnselen van onze eigen aarde, die wellicht uitgangspunt voor een nieuwe ontwikkeling zullen zijn.

Een stille drijvende kracht in sterrekundig onderzoek, en vooral in de belangstelling van bredere kringen voor sterrekunde, lag in het verlangen om iets te weten te komen over andere werelden als woonplaats van andere mensen. Wat bij enkele schrijvers in de Oudheid speelse fantasie was, werd sinds COPERNICUS en BRUNO een wel aarzelende maar toch steeds vastere mening, dat ook op de andere planeten en op de maan levende met rede begaafde, intelligente wezens zouden kunnen voorkomen. Nu kreeg de studie van de planeten, van hun oppervlak, hun gesteldheid, een diepere achtergrond.

Zolang de optische hulpmiddelen, de kijkers, nog onvolkomen waren, moest ook deze studie primitief blijven. In het laatst van de 18de eeuw maakte een ijverig amateur-astronoom, „Amtmann” SCHROETER te Lilienthal bij Bremen, met zijn spiegeltelescoop honderden tekeningen van de maanbergen en de planeten. Maar naar de standaard van de daaropvolgende periode waren ze zeer ruw. Deze hogere standaard werd gesteld doordat de techniek nu een sprong voorwaarts deed; sinds 1820 kwamen de kijkers uit München in gebruik, die door hun mooie zuivere scherp getekende beelden en hun gemakkelijke behandeling ook voor deze studie een nieuwe weg openden.

Dat de maan bewoond zou zijn, paste geheel in de rationalistische denkwijze van de 18de eeuw. In een van zijn eerste aan de Royal Society aangeboden stukken had WILLIAM HERSCHEL zijn overtuiging van het bestaan van maanbewoners uitgesproken; maar op raad van MASKELYNE had hij deze uitspraak, als niet streng wetenschappelijk gegrond, weer geschrapt. Naderhand wierp GRUITHUISEN te München de kwestie weer op, doordat hij omstreeks 1916 wolken op de maan zag, en in sommige maanformaties vestingwerken en andere menselijke bouwsels meende te onderkennen. Maar met dit soort fantasieën was het toch spoedig uit. Want in 1834 stelde BESSEL vast, dat uit sterbedekkingen de middellijn van de maan niet merkbaar kleiner gevonden werd dan uit directe metingen, dus dat het sterlicht bij het strijken langs de maanrand niet merkbaar gebogen werd. Dit betekende, dat de horizontale straalbreking, die in de aardse dampkring 2000'' bedraagt, op de maan niet meer dan een enkele seconde kan zijn, dus dat de dampkring daar 2000 maal ijler, of nog minder, dan op de aarde moet zijn. Dit is wat weinig voor mens en dier om adem te halen.

Waarom heeft de maan praktisch geen dampkring? Als zij uit de aarde was ontstaan, waarom had zij dan geen lucht meegekregen? Had zij die misschien wel gehad maar later verloren? Een verklaring voor zulk een verlies van de dampkring kon eerst na de opstelling van de kinetische gastheorie gegeven worden. In 1870 betoogde JOHNSTONE STONEY dat, aangezien de moleculen van een gas in de dampkring van een hemellichaam voor een klein percentage een zo grote snelheid hebben, dat ze in de wereldruimte kunnen ontsnappen, dit gas dan geheel uit die dampkring zou kunnen verdwijnen. Bij de aarde is de ontsnappingssnelheid 11 km, bij de maan 2,4 km per seconde, terwijl de gemiddelde molecuulsnelheid bij waterstof 1,6 km, bij waterdamp 0,53, bij zuurstof 0,4 km is. De waterdamp in de aardatmosfeer bewijst dat als de gemiddelde molecuulsnelheid $\frac{1}{21}$ van de ontsnappings-snelheid is, bedoeld percentage te klein is; de waterstof bewijst dat als ze $\frac{1}{7}$

is, het percentage groot genoeg is, om het gas te laten verdwijnen. Deze theorie is later door MILNE en anderen nog verfijnd. Op de maan toegepast betekent dit, dat alle waterdamp en alle zuurstof van de maan weggediffundeerd moet zijn.

Voor de sterrekundigen bleef nu alleen de taak van een zorgvuldige topografie van de maan. Een meeslepend werk, zo van boven uit de verte het landschap van een andere wereld te bespieden en te tekenen. Maar bij de haast onafzienbare rijkdom in fijn detail, dat al in kleine kijkers te zien is, eiste dit ongelooflijk veel geduldige en toegewijde arbeid, van vele jaren duur. Het eerst kwam het werk van LOHRMANN in 1824; in plaats van de afzonderlijke tekeningen te geven, zoals SCHROETER had gedaan, was bij hem dit directe materiaal reeds tot topografische kaarten verwerkt, met de bergen net zo weergegeven als op landkaarten. Het bleef bij enige kaartbladen; door een oogziekte van de waarnemer bleef het werk onvoltooid. In 1828 begonnen een Berlijns bankier WILHELM BEER en een jonge sterrekundige J. H. MÄDLER hun gemeenschappelijke studie van de maan, op een door de eerste gebouwd sterrewachtje met een kleine kijker uit München van 4 duim (108 mm) opening. Evenals TOBIAS MAYER vroeger had gedaan, maar nu op veel groter schaal werd door nauwkeurige metingen een netwerk als zuivere basis vastgelegd; met de micrometer werd de plaats van ruim honderd goed herkenbare primaire en nog veel meer secundaire punten bepaald; en tevens werd van ruim duizend toppen de hoogte uit de gemeten schaduwlengthen afgeleid. Dit gaf het geraamte voor een topografische kaart, die op vier bladen het gehele maanoppervlak als een cirkel van een meter middellijn afbeeldt. In al hun werk, dat hen in 8 jaren 600 waarnemingsnachten in beslag nam en in 1836 werd gepubliceerd, bespeurden zij nooit iets van enige verandering, noch in atmosferisch te duiden verschijnselen, noch in de maanformaties. Hard en star stond sindsdien het maanoppervlak met zijn pikzwarte scherp begrensde schaduwen als een slechts door geologische krachten gevormde en beheerste rots- en gesteentewereld.

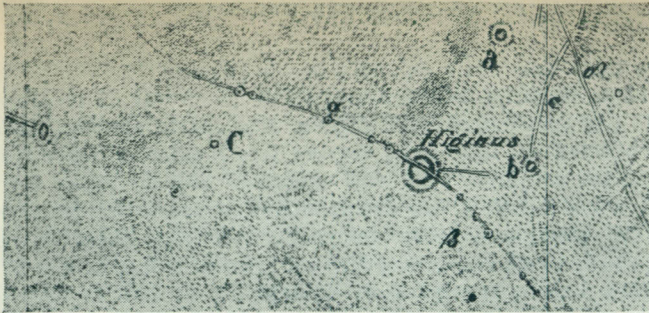
Was ook de maanatlas van BEER en MÄDLER een veel vollediger en gedetailleerder topografie dan enige vroegere, er stond toch niet meer op dan wat in een klein kijkertje te zien was. Dus hielden zich in de volgende decennien tal van astronomen en amateurs er mee bezig om met hun grotere kijkers fijnere details af te beelden en in de vorm van kaarten weer te geven. Alleen bij J. F. JULIUS SCHMIDT (1825—1884), die te Athene met weinig hulpmiddelen maar een mooi klimaat alle meest aan amateurs overgelaten gebieden met grote ijver beoefende, waren ze volledig genoeg om ze tot een grote maankaart van 2 meter middellijn te verenigen, die in 1878 verscheen. In Engeland gaf NELSON in 1876 een boek over de maan uit met uitvoerige beschrijving en tal van detailkaarten.

Daarmee was meteen een secuurder basis geschapen voor het vraagstuk of kleinere veranderingen op de maan optreden. In 1866 maakte JUL. SCHMIDT zelf er op opmerkzaam, dat de kleine krater Linné, die door LOHRMANN, MÄDLER en hemzelf vroeger gezien en getekend was, nu was verdwenen en vervangen door een wittige vlek of een zeer ondiepe kuil. Andere meer twijfelachtige beweringen over verandering werden nu en dan geuit, waarover veel strijd werd gevoerd, omdat nooit precies was uit te maken in hoeverre de oude tekeningen tot in zulke details betrouwbaar waren; het ontbreken op

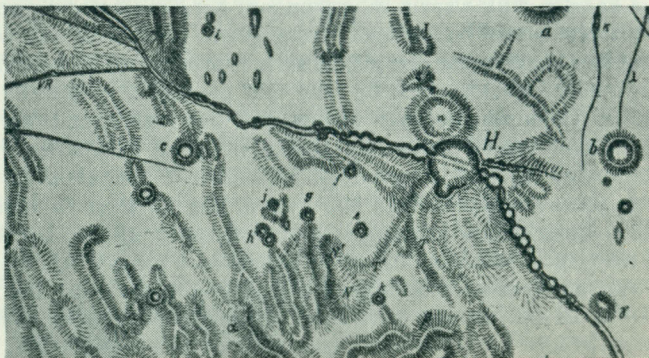
een vroegere kaart kan nooit als strikt bewijs gelden.

Voor zulk een detailrijk hemellichaam als de maan was de toepassing van de fotografie een onschatbare vooruitgang. Eén enkele opname, doordat ze de gehele schijf tegelijk afbeeldde, verving vele honderden tekeningen, dus spaarde maanden en jaren werk van natekenen aan de kijker uit; en ze had bovendien het voordeel van documentaire getrouwheid. De eerste, die een behoorlijk maanbeeld door fotografie met een kijker kreeg, was W. C. BOND, de directeur van de Harvard sterrewacht te Cambridge (Mass) in 1850. Hij werd weldra gevolgd door WARREN DE LA RUE in Engeland, in 1852, die met een spiegeltelescoop werkte, sinds 1857 met uurwerkbeweging, en maanbeeldjes van 28 mm kreeg, zo scherp, dat ze een 20-voudige vergroting verdroegen. In Amerika kreeg HENRY DRAPER in 1863 met de door hemzelf geslepen spiegeltelescoop maanbeelden van 32 mm, die hij tot 90 cm kon vergroten. Dit was alles proefneming, die niet meer leverde dan men al wist. De grote vooruitgang bracht ook hier de invoering van de droge broomzilver-gelatine-platen sinds 1871, die de expositietijd tot enkele seconden beperkte. Deze tijd kon zo kort zijn doordat het maanbeeld direct in het brandvlak werd opgenomen, zonder enige vergroting, die de lichtsterkte te zeer zou hebben verzwakt. Wetenschappelijke vooruitgang was dus alleen mogelijk door kijkers met zeer lange brandpuntsafstand te gebruiken, die directe beelden van voldoende grootte konden vormen. Zo de grote 36-inch kijker op de Lick sterrewacht met 14,5 meter brandpuntsafstand, waar de directe maanbeelden 14 cm middellijn hebben; zo ook het elleboog-vormige „equatorial coudé” te Parijs, waarmee LOEWY en PUISEUX sinds 1894 maanbeelden van 18 cm opnamen. Vergrotingen van delen daarvan, tot op een schaal van 1 meter maanmiddellijn bij de Lick-negatieven, en van 2,6 meter bij de Parijse, zijn als atlasbladen gereproduceerd en gepubliceerd; bij deze vergrotingen kwam men aan de grens, waar de zilverkorrel merkbaar wordt en fijner detail uitwist. Nog fijner gedetailleerd waren latere opnamen met de 40-inch van de Yerkes-sterrewacht en met de 100-inch telescoop op Mt. Wilson. Maar deze waren beperkt in aantal, en omvatten niet de gehele maan in haar verschillende fasen.

Zulke fotografische atlassen verschillen van de vroegere, doordat zij uiteraard slechts het onbewerkte aspect weergeven met alle schaduwen, en geen topografische kaarten zijn, waarin de astronoom het resultaat over een landschap-relief uit vele afbeeldingen heeft samengevat. Men heeft dus voor elk landschap niet één kaart, maar een gehele serie reproducties bij verschillende fasen nodig; volledigheid is hierbij dus veel moeilijker te bereiken. Het bleek bovendien (men zie hiervoor op blz. 308 het maanlandschap om de krater Hyginus naar verschillende onderzoekers) dat zij in rijkdom van fijn detail achterstonden bij wat zorgvuldige waarnemers met kleinere kijkers weten weer te geven; zoals die van PH. FAUTH, een amateur te Landstuhl, die sedert 1895 kaartbladen van speciale landschappen uitgaaf. Dit had ten gevolge, dat de visuele waarneming in het geheel niet uit het veld werd verdreven; tal van amateur-sterrekundigen, die over goede kijkers beschikken (meer dan 10 of 15 cm opening is niet nodig) hielden en houden zich regelmatig met detailstudie van speciaal uitgezochte landschappen bezig, vooral ook om het optreden van minutieuze veranderingen te controleren. Tegenover dit gebrek aan volkomenheid van de fotografie staat natuurlijk steeds

BEER en
MÄDLER

JUL SCHMIDT

PARIJS
fotogr.

PH. FAUTH

Maanlandschap Hyginus.

haar documentaire waarde. Deze opnamen werden nu door de waarnemers gebruikt als ondergrond voor hun eigen visueel werk, waarbij zij alle kleinste details op de juiste plaats konden intekenen. Op deze werkwijze berusten de atlassen van KRIEGER, 1898—1912, en van GOODACRE in 1910.

Twee vraagstukken heeft dus de ontwikkeling van de maantopografie in de negentiende eeuw aan de orde gesteld. Ten eerste: is het maanoppervlak werkelijk star en onveranderlijk, of gebeurt daar nog wat? Precieser gezegd: wat is de mate van realiteit van de nu en dan opgemerkte uiterst kleine veranderingen in het in grote trekken onveranderlijke beeld? Dit is alleen door minutieuze samenwerkende studie van meerdere waarnemers vast te stellen, wat wel hoofdzakelijk visueel zal moeten gebeuren. Nawerkende geologische krachten kunnen wellicht kleine kratertjes, holten of bergen doen ontstaan of verdwijnen. In later tijd heeft W. H. PICKERING veel aandacht gegeven aan de kleine details van donkere figuren, die bij volle maan, als er geen schaduwen zijn, op de vlakten binnen sommige ringwallen te voorschijn treden. Hij zag ze als voortschrijdende en in vorm wisselende „kleuringen”, d.w.z. donker worden, en ontkleuringen, verbleken. Fotografische opnamen bevestigden de veranderlijke donkere vlekken, maar konden door hun grovere structuur niet alle details controleren. Hij zocht de verklaring in het opgroeien en verwelken, in de levensperiode van de 14-daagse zonschijn, van een primitieve bodem-vegetatie, die gevoed werd door koolzuuruitstromingen uit spleten; en mogelijk, misschien, met kuddevormig, zelfstandig bewegend, primitief organisch leven. „Wij vinden hier een levende wereld, „vlak voor onze deur, waarvan het leven volkomen verschilt van wat ook op „onze eigen planeet” aldus zijn conclusie in 1921. Aldus in fijn detail bestudeerd zou dan de maan toch niet die geheel dode wereld zijn van de eerste globale beschouwing.

Het tweede vraagstuk is dat van het ontstaan van het starre maanoppervlak met al die merkwaardige vormen: ringbergen, walvlakten, kraters, rillen, bergmassa's en donkere vlakten, de z.g. zeeën. Dit is dus een geologisch — of taalkundig dan juister selenologisch — vraagstuk te noemen. Het wezenlijke probleem daarbij is, waardoor het komt, dat de geologisch werkzame krachten op de maan zo geheel andere vormen hebben voortgebracht dan op aarde. In twee verschillende richtingen werd het antwoord gezocht. PROCTOR opperde in een boek over de maan, in 1873, het denkbeeld, dat de maankraters door het inslaan van grote meteoren zijn ontstaan, die door de dunne vaste korst heen sloegen waarbij dan lava-overstromingen de ronde wallen opbouwden; op aarde is het effect van soortgelijke inslag, toch al sterk verzwakt door de remmende luchtweerstand, door latere klimatische en geologische werkingen uitgewist. Deze gedachte is in latere tijd door de bekende geograaf KURT WEGENER nog eens weer opgehaald. De meest verbreide opvatting echter zoekt het in de inwendige werkingen van de maan zelf; tal van physici en astronomen hebben getracht door proeven met gesmolten vaste stoffen het mechanisme na te bootsen. In aansluiting aan de Parijse maanfotografische heeft PUISEUX in 1896 een uitvoerige theorie over het ontstaan van de verschillende maanvormingen gegeven. Hier, evenals in de door de physicus EBERT gegeven verklaringen, treden de door de aarde in het maanlichaam bewerkte getijden als primaire bepalende krachten op, daar zij, door het verschil in massa van aarde en maan, zeer veel sterker zijn dan die, welke

de maan in het lichaam der aarde bewerkte.

De studie van de planetenoppervlakken is een vraagstuk van geheel andere orde dan dat van de maan, beperkter en moeilijker. Sinds in de negentiende eeuw de maan door haar onbewoonbaarheid aan belangstelling inboette, richtte zich de algemene aandacht in de eerste plaats op de planeet Mars, die onder de gehele stoet de meeste kansen bood. Maar ze was moeilijk waar te nemen, in de gunstigste periheliumoppositie een schijfje van slechts 26" middellijn, waar 1" 260 km voorstelt. Wat aan het eind van de achttiende eeuw de spiegeltelescopen van HERSCHEL in Engeland en van SCHROETER in Lilienthal vertoonden, waren, behalve de scherpgetekende witte poolvlekken, slechts vage en vrij vormloze tintschakeringen, zelden duidelijk herkenbare vormen. Men beschouwde ze dan ook meest als wolkvormingen. Hier brachten de kijkers uit München met hun betere optiek een ommekeer. BEER en MÄDLER begonnen in het najaar van 1830, toen er een gunstige oppositie was, met hun 4-duims kijker tekeningen te maken. En hierop kwamen nu voor het eerst duidelijk begrensde donkere vlekken voor den dag. Kenschetsend voor karakter en moeilijkheid van dit werk is hun mening: „Es verging „meistens einige Zeit ehe sich die unbestimmte verwaschene Fleckenmasse, „die anfangs gesehen ward, in erkennbaren Formen auflöste“. Maar doordat zij steeds in nagenoeg dezelfde afwisselende markante vorm terugkeerden, deden zij zich als vaste aardrijkskundige vormingen van het planeetoppervlak, geen voorbijgaande wolkenformaties, kennen. Voor het eerst verschijnt nu, als resultaat van hun werk, een wereldkaart van Mars in de vorm van twee halfronden. Om ook het Noordelijk halfrond goed te krijgen moesten ze de waarnemingen bij de volgende opposities, 1832 tot 1839, als Mars zijn Noordpool naar de zon toekeerde, voortzetten, waarbij zij sinds 1835, toen Mars een veel kleiner schijfje werd, van de 9-duims kijker van de Berlijnse sterrewacht gebruik maakten. Door vergelijking van de vroegere met de latere tekeningen leidden zij een omwentelingsduur van 2u 37m 23,7s, af.

Zo was een grondslag gelegd, waarop men kon voortbouwen. Tal van waarnemers hebben bij volgende opposities tekeningen gemaakt en gepubliceerd; uit het vaak sterk verschillend aspect blijkt hoe moeilijk het preciese opvatten en weergeven van de vlekken is, en hoeveel verschillen in persoonlijke manier daarbij optreden. De oppositie van 1862 brengt wezenlijke vooruitgang boven BEER en MÄDLER; de tekeningen van LOCKYER in Engeland en KAISER in Leiden — ook tot een Marsglobe en wereldkaart samengevat — die beiden met een 6-duims kijker werkten, tonen meer duidelijke details; en SECCHI te Rome maakte sinds 1858 met een 9-duims refractor tekeningen, waarop de fijne schakeringen van de groene tinten in de donkere en de gele in de lichte streken in kleur werden weergegeven. KAISER was in staat de op oude tekeningen van HOOKE en van HUYGENS (1666 en 1667) weergegeven vlekken met de moderne te identificeren en leidde daaruit een omwentelingstijd van 24u 37m 22,6s af, tot op $\frac{1}{10}$ seconde nauwkeurig.

Deze nieuwe waarnemingen tonen, dat terwijl er een vaste blijvende topografie van het planetenoppervlak aanwezig is, toch allerlei veranderingen in de details optreden: lichte wazige vlekken als tijdelijke wolk- of nevelvormen,

verandering van donkere tot lichtere tinten en omgekeerd, kleinere vormveranderingen van vlekken en grenzen, waarvan slechts een deel aan verschil in gezichtsrichting of omstandigheden is toe te schrijven. De waarnemers zijn het in het algemeen erover eens, dat de lichte gele of rossige tinten land of woestijn, de donkere groenige tinten water voorstellen — de verscheidenheid en variatie in dit groen wijst op ondiepten, of op vegetatie in plaats van water —; verder, dat de met het seizoen in grootte wisselende poolvlekken sneeuw en ijs zijn; en dat de levensvoorwaarden op Mars niet zo heel veel verschillen van die op aarde — enkel de temperatuur wat lager, de dampkring wat ijler en droger, het water veel minder, wat alles als een verder ontwikkeld, ouder stadium in de evolutie der planeten is op te vatten.

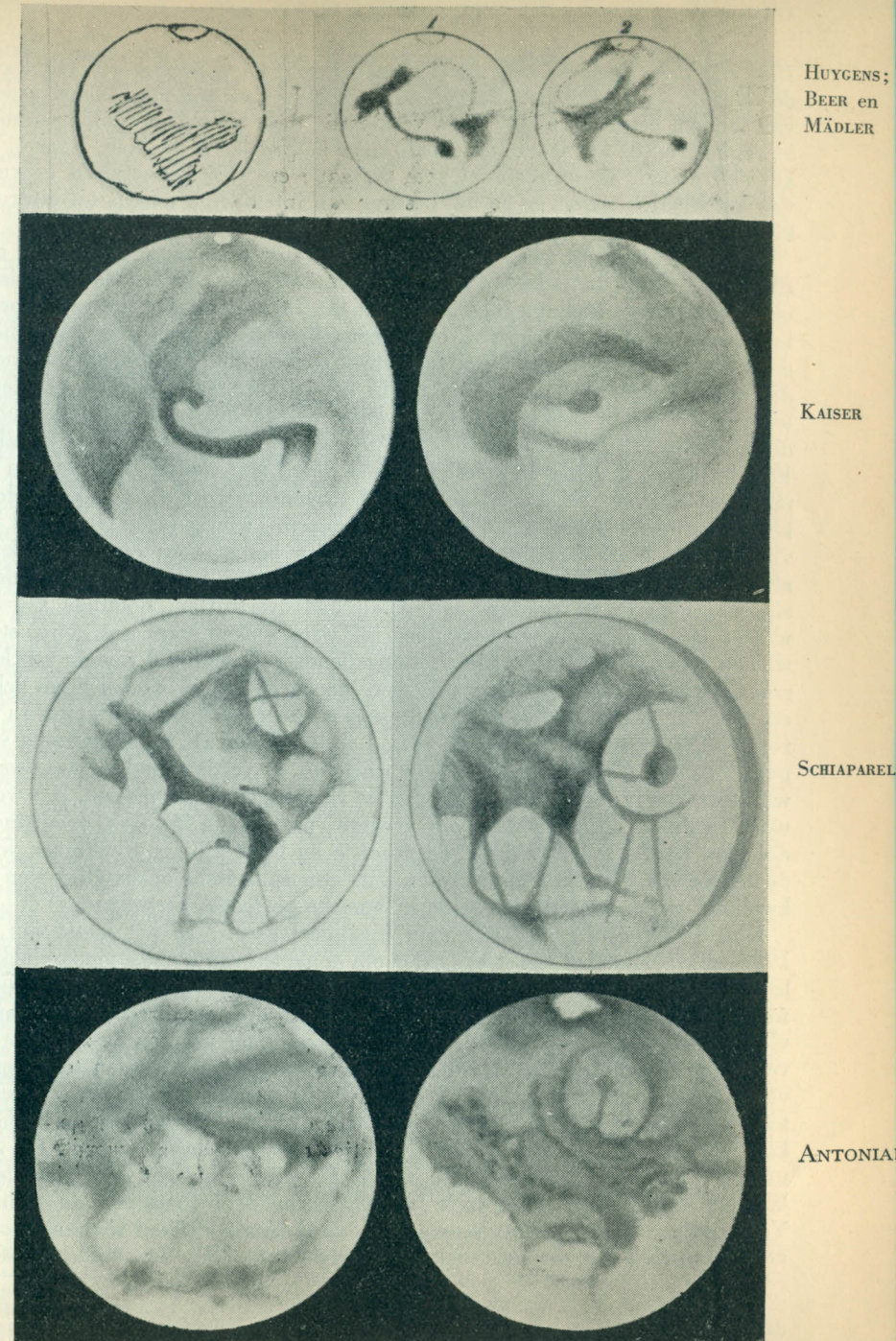
De periheliumoppositie van 1877 brengt nieuwe vooruitgang en nieuwe verrassing, door de ontdekking van de z.g. kanalen op Mars, door G. V. SCHIAPARELLI (1835—1919), die te Milaan met een Münchense kijker van 22 cm opening werkte. Hij bracht de areografie dadelijk op hoger peil door van 62 goed gekenmerkte punten de plaats met de micrometer te meten, nadat hij vooraf door micrometrische plaatsbepaling van de kleine witte Zuidpoolvlek de richting van de omwentelingsas van Mars nauwkeurig had vastgelegd. Hij merkte lange dunne rechte donkere strepen op, die vooral de gele Noordelijke helft van de planeet doorkruisten; hij noemde ze kanalen, zonder te willen beweren dat zij uit water bestonden; door de kleine schaal van het planetenschijfje vertegenwoordigt het fijnste zichtbare lijntje nog vele kilometers breedte, en sommige van deze kanalen vertoonden zich als duidelijk bredere strepen.

De waarnemingen en metingen werden in 1879 en de volgende opposities voortgezet, bevestigd en uitgebreid. Maar nu trad van 1881 af een nieuw verschijnsel op, de verdubbeling der kanalen. Van nu af zijn de uitkomsten van SCHIAPARELLI een voorwerp van onophoudelijke discussie, twijfel en critiek van de kant van de vakgenoten. In hun tekeningen ziet men nu ook, als het ware aarzelend, enkele kanalen optreden. Op zichzelf lag er niets onmogelijks in, dat rechte kanalen daar feitelijk zouden voorkomen. Maar wel werd nu de kwestie van de bewoonbaarheid van de planeet van een fantastische verbeelding tot een practisch vraagstuk: is Mars door intelligente wezens bewoond en mag hun intelligentie, door het scheppen van voor ons zichtbare kunstmatige werken, als verklaringsoorzaak bij de verschijnselen op Mars gebruikt worden? Zelfs de verdubbeling liet zich dan, bij vrije fantasie over andere behoeften van andere intelligenties, begrijpelijk maken: b.v. als behoefte van verkeer, of van irrigatie. Maar ten opzichte van de verdubbeling was de stemming toch meest zeer sceptisch; PERROTIN in Nizza, met zijn assistent THOLLON, waren de enigen die, met de grote refractor van 38 cm, er in 1886 in slaagden ze te zien en te bevestigen. Maar er lag toch iets vreemds in, dat deze waarnemers eerst wekenlang probeerden en er niets van zagen, en later een afbeelding leverden, die in karakter geheel op die van SCHIAPARELLI geleek. Zo werd de vraag gesteld: in welke mate kunnen vooropgestelde meningen en onbewuste neigingen een rol spelen in de vormbepaling van wat aan de grens der zichtbaarheid ligt? Kon hier de physiologische werking van een onvermoed zwak astigmatisme van het oog een rol gespeeld hebben? Tegenover zulke critiek hield SCHIAPARELLI vast aan de objectieve realiteit van de door hem ontdekte vormen. In 1892 gaf hij in een Duits

tijdschrift een samenhangend overzicht van zijn resultaten over de gesteldheid van Mars, vergezeld van een gekleurde kaart in twee halfronden, zo rijk aan inhoud en detail, dat men daarbij eerst ten volle de grote vooruitgang in kennis omtrent onze buurplaneet beseft. Maar vergezeld van een dergelijke kaart met alle dubbele kanalen, die de lezer weer geheel in twijfelingen over realiteit en betekenis terugwierp.

In deze tijd was juist op de Lick-sterrewacht de 36-inch reuzenkijker opgesteld, en het was te begrijpen dat de Lick-astronomen HOLDEN en KEELER deze weldra, in 1888, op Mars richtten, om van dit machtige instrument de oplossing van de twijfelingen te vernemen. Het was een teleurstelling. Niet zozeer omdat ze niets van de scherpgetekende kanalen en hun verdubbeling zagen; maar hun tekeningen zijn grof en armoedig als waren ze uit een vroegere eeuw afkomstig. Het was al dikwijls gezegd, dat de grote telescopen in het afbeelden van planetenoppervlakken achterstaan bij kleinere kijkers, zoals uit een vergelijking van HERSCHEL, SCHROETER, LORD ROSSE met BEER en MÄDLER, LOCKYER en KAISER kon blijken. Flauwe verschillen in tint komen, samengetrokken in kleine afmeting veel scherper uit dan uitgespreid onder sterke vergroting. Bovendien vervagen de luchtslieren in de brede lichtbundel van grote objectieven de scherpe details. Natuurlijk staat daar tegenover, dat wat een flauw en ingewikkeld samenstel van donkerten is, bij te sterke verkleining door het oog in de illusie van een regelmatig eenvoudig figuurtje wordt opgevat. Bij de Lick-waarnemers was hier ongetwijfeld gemis aan oefening in het spel; eerst op den duur begint de waarnemer bij zo moeilijke voorwerpen zijn weg te vinden en details behoorlijk op te merken; waarbij dan echter tegelijk zijn bijzondere wijze van vormen zien en weergeven tot een steeds vastere persoonlijke manier wordt.

Het vraagstuk van de mogelijkheid van Marsmensen deed zijn betovering voelen. De welbepaalde Franse popularisator der sterrekunde, CAMILLE FLAMMARION, liet in 1892 een grote monografie verschijnen „*La planète Mars et ses conditions d'habitabilité*”, waarvan de titel al aanduidt en de inhoud uitsprekt, hoezeer hij overtuigd is, dat daar een broeder-wereld naast de onze leeft met zijn eigen, ons nog grotendeels onbekende levensverschijnselen. „De aarde wordt een provincie van het heelal, en wij voelen, dat daar onbekende broeders wonen in andere vaderlanden van de Oneindigheid”. „Als wij stil deze vastelanden en zeeën, door de aswenteling van de planeet „rondgevoerd, langzaam aan ons oog voorbij zien trekken, en wij ons afvragen welke van deze stranden het aangenaamst zouden zijn om te leven, „woeden daar wellicht stormen en onweders, vulkanen, maatschappelijke „beroeringen en allerlei strijd in de worsteling om het leven. . . . Maar wij „mogen toch hopen, dat op de wereld van Mars, omdat zij ouder is dan de „onze, de mensheid hoger ontwikkeld is en wijzer. Ongetwijfeld zijn het „werken des vredes waarvan het gedruis sinds vele eeuwen dit buurland „vervult”. Ook velerlei fantastische fictie-literatuur houdt zich met de Marsbewoners bezig. Een rijk Amerikaans aristocraat, geestdriftig, begaafd en welbeslagen op velerlei gebied, PERCIVAL LOWELL, stichtte in 1894 een sterrewacht te Flagstaff, op een hoogte van 2200 meter in het schitterende droge woestijnklimaat van Arizona, speciaal om daar met een grote Clark-kijker van 45 cm (later een van 60 cm) Mars en zijn bewoners te bestuderen. Talloze tekeningen met tal van grotendeels nieuw ontdekte kanalen, in totaal



Tekeningen van Mars.

183, zijn door hem en zijn assistenten gemaakt en gepubliceerd. Hij legde de nadruk op de met het Marsseizoen wisselende verandering in het aspect van landen, zeeën en kanalen, en verklaarde deze als een periodieke waterbeweging van de afsmeltende poolkap naar de groeiende poolkap, waarbij de kanalen dienen als hulpmiddel voor irrigatie en voor economisch gebruik van het weinige water, en zo het bestuur van intelligente wezens tot uitdrukking brengen.

Nog vruchtbaarder was het werk van de Franse astronoom ANTONIADI, die sinds 1909 Mars bestudeerde met de 83 cm-refractor van het astrofysisch observatorium te Meudon bij Parijs. Met dit instrument, dat alle refractoren in Europa in opening overtrof, en in een klimaat, dat zich over het geheel door uiterst rustige lucht bleek te onderscheiden, kon ANTONIADI aantonen, dat onder zulke omstandigheden en in handen van een goed en geoefend waarnemer, grote instrumenten de kleine beslist overtreffen in de studie der planeten. Hij zag dat, wat SCHIAPARELLI als rechte of dubbele kanalen had getekend, opgelost in velerlei kleiner detail aan vlekjes in soms min of meer regelmatige reeksen, maar meestal toevallig verdeeld, of ook als donkerder en lichter verschillend gekleurde figuren. Twintig jaren lang heeft hij voortdurend Mars waargenomen, getekend en beschreven; en zijn werk is alweer een even grote verrijking en vooruitgang boven SCHIAPARELLI, als deze zijn voorgangers in rijkdom aan detail had overtroffen. Soms tijds zag hij wolken optreden, soms witte vermoedelijk waterwolken, vaak ook gelige stofwolken, die de details vervagen. Het opvallendste verschijnsel was de verkleuring met het seizoen; de meeste donkere groenachtige of blauwachtige delen en vlekken, waarschijnlijk de laagste streken, worden door uitdroging in de zomertijd geel, bruin, zelfs rood, elk op andere wijze. De waterbeweging van pool tot pool, als ijs, rijp en sneeuw smeltend en verdampend en weer vastwordend, ziet hij ook als de basis van de wisselende verschijnselen. Het werk van ANTONIADI opent de weg voor verdere vooruitgang in locale detailstudie door het bewijs te leveren, dat de grootste en beste kijkers vruchtbaar voor de kennis van Mars kunnen worden, mits atmosferische omstandigheden en kwaliteit van de waarnemer beide in hoogste perfectie meewerken.¹⁾

Kon de fotografie hier niet enig uitsluitel geven? In het laatst van de 19de eeuw gelukte het wel steeds beter om opnamen van planetenoppervlakken te maken, maar wat ze vertoonden was op zijn best een grovere vervaagde weergave van wat op tekeningen te zien was. Bij opname direct in het brandvlak waren de beeldjes uiterst klein, slechts een paar mm, en de zilverkorrel vergroefde alle detail. Bij opname van vergrote beelden werden tengevolge van de langere belichtingstijden deze details door de luchtrillingen uitgewist, terwijl het waarnemende oog op de kortere ogenblikken van rustige beelden kan wachten, als alle fijnste detail eventjes scherp zichtbaar wordt. Op opnamen van Mars door SLIPHER op de Lowell-sterrewacht in 1922, door WRIGHT in 1924 met de 36-inch Lick-kijker, en door ROSS met de 40-inch Yerkes-kijker komen de gedaanten van de donkere vlekken in hun hoofdvorm duidelijk uit, evenals ook de poolvlekken. Van de smalle kanalen

¹⁾ Op de tekeningen op blz. 313 wordt hetzelfde donkere trechtervormige object, de z.g. Syrtis Major, op de afbeelding van HUYGENS en de linkerfiguur van SCHIAPARELLI voorgesteld en eveneens, aan de linkerrand, op de 2de van BEER en MADLER en de linkerfiguur van KAISER en van ANTONIADI.

echter is natuurlijk niets te zien. Maar in ander opzicht waren deze fotografische opnamen toch zeer leerzaam. WRIGHT maakte opnamen van Mars op voor beperkt kleurgebied verschillend gesensibiliseerde platen. Daarbij toonden de infrarode en rode beelden zeer markant de oppervlakte-topografie; daarentegen was deze geheel onzichtbaar op de blauwe en violette platen, die behalve de witte poolvlekken slechts vage schaduwintinten vertoonden. Het blauwe licht was afkomstig van de atmosfeer; voor rood licht is deze geheel doorschijnend, maar blauw licht wordt diffuus teruggekaatst; en dit teruggekaatste atmosferische licht overstraalt alle blauwe licht uit dieper lagen¹⁾.

De andere planeten hebben in de 19de eeuw veel minder stof tot opzienbarende ontdekkingen geleverd. Duidelijke vlekken op Mercurius werden niet opgemerkt, totdat in 1881 SCHIAPARELLI een systeem van vage flauwe strepen waarnam, dat ten opzichte van de schaduwgrens steeds dezelfde ligging behield. Daaruit zou dan volgen, dat deze planeet steeds dezelfde kant naar de zon toekeert — evenals de maan naar de aarde, en uit gelijksoortige oorzaken van vervorming en aantrekking door het centrale lichaam. Dit werd later door PERCIVAL LOWELL te Flagstaff bevestigd, maar door LEO BRENNER, die in het gunstige klimaat van Lussinpiccolo in Istrië met een kleine kijker veel in Marskanalen had gewerkt, tegengesproken. De kwestie werd definitief opgelost door ANTONIADI die 1924—1929 met de grote kijker van Meudon een groot aantal afbeeldingen maakte en ook de omwentelingstijd op 88 dagen vaststelde. Hij zag op de planeet een stelsel van vage brede iets donkerder strepen, waarin de figuren van SCHIAPARELLI duidelijk waren te herkennen. Zij zijn vaste vormingen van het planetenoppervlak, d.w.z. van het halve oppervlak dat steeds naar de zon gekeerd is en door de zon bestraald wordt, terwijl de andere helft steeds in het duister blijft. ANTONIADI zag bovendien nu en dan veranderlijke witte vlekken, die hij voor wolken van fijn wit stof houdt — waterdamp kan door de geringe zwaartekracht op Mercurius niet worden vastgehouden —; een beetje zij het ook dunne dampkring zou er dan moeten zijn.

Bijna elk astronoom die zich met Venus bezighield, heeft daarop nooit anders dan uiterst vage tintverschillen gezien. Soms tijds, als hij iets meer meende te zien, werd daaruit een uiterst twijfelachtige aswentelingsduur afgeleid; zo DE VICO te Rome, die in 1839 zelfs vlekken van BIANCHINI een eeuw vroeger meende te herkennen, en aldus 23u 21m 22s afleidde. Daarentegen vond SCHIAPARELLI, dat ook Venus steeds dezelfde kant naar de zon toekeert en dus in 225 dagen om haar as wentelt. Dit vond meer twijfel en tegenspraak dan bij Mercurius; VILLIGER te München merkte in 1878 op, dat op een volkomen effen matwitte bol bij zijdelingse verlichting tintverschillen optreden, vooral door flauwe contrastwerking, die de indruk wekken van vage vlekken, die een bepaalde ligging houden ten opzichte van de schaduw-

¹⁾ In de laatste jaren is hier nog een grote vooruitgang te boeken, door een vernuftige methode van LYOT en zijn medewerkers om de zilverkorrel te elimineren. Dit geschiedt door snel achtereenvolgende een aantal kleine opnamen met korte belichting te maken en van hen een gezamenlijke afdruk op vergrote schaal te maken; daarop is de korreligheid der afzonderlijke opnamen vereffend tot een gelijkmatige grond. Deze afbeeldingen vertonen alles wat ook op de tekeningen te zien is, soms nog meer; zij openen een nieuwe weg in de studie van de planetenoppervlakken.

grens. Er is een algemene overtuiging, dat wij bij Venus niet op het planetenoppervlak zelf, maar boven op een dichte wolkenomhulling zien. Dat Venus een duidelijke atmosfeer heeft, was reeds bij de Venusovergang in 1761 bemerkt, doordat een lichtring de buiten de zon uitstekende donkere schijf omgaf; en in de 19de eeuw werd herhaaldelijk opgemerkt, dat de smalle eerste of laatste sikkel van Venus meer dan 180° omvatte.

Bij de planeet Jupiter heeft de 19de eeuw veel minder vernieuwing van belang gebracht. De hoofdzaak: de twee donkere gordels ter weerszijden van de bijna met het baanvlak samenvallende evenaar, gescheiden door een lichtere evenaarsgordel, alle met onregelmatige vlekken die een snelle aswenteling in bijna 10 uren doen kennen, en de daarbij behorende grote op het oog zichtbare afplatting — het was alles al in de vorige eeuw vastgesteld. Ook het feit, dat wij op een wolkenlaag kijken, niet op het lichaam van de planeet, dus uit de sneller of langzamer bewegende vlekken geen bepaalde nauwkeurige rotatietijd kunnen afleiden; bij de donkere gordels is deze ongeveer 9u 55m, bij de evenaarsgordel 9u 50m. Doordat de planeet door haar grootte reeds in een kleine kijker rijke details vertoont, die voortdurend groeien en wisselen, was zij een aantrekkelijk waarnemingsobject voor amateurs en sterrekundigen met beperkte hulpmiddelen. De gehele negentiende eeuw door hebben tal van waarnemers steeds opnieuw de vlekjes in die wolk gordels gevolgd en getekend, zonder dat er veel anders uit kon komen, dan dat ze steeds nieuw ontstaan, veranderen en verdwijnen. Wel kreeg men vooral met wat groter instrumenten een goed beeld van de kleuren-verscheidenheid: meest gele en rossige tinten met groenige delen daartussen. En in 1878 vertoonde zich als iets nieuws een grote spoelvormige rode vlek, die jaren lang zichtbaar bleef, hoewel gaandeweg bleker en minder duidelijk. Het bleek, dat ze ook al in 1859 en wellicht zelfs in 1831 aanwezig was; maar ze was toch niet iets van het planetenlichaam zelf, want haar rotatietijd, omstreeks 9u 55m, werd na 1910 korter dan ze te voren was.

Aan Saturnus, volgens de metingen nog sterker afgeplat dan Jupiter, dus zeker ook in snelle aswenteling, was met oppervlakte-tekening nog minder te beleven. Doorgaans zag men een flauwe effene donkere gordel om de evenaar. Een paar malen dook een vlekje op dat, als het een tijdje bleef bestaan, gelegenheid bood om de rotatietijd te bepalen. Zo vond ASAPH HALL in 1876 10 u 14 m 24s aan de evenaar. STANLEY WILLIAMS in 1894 10u 12—13m aan de evenaar en 10u 14—15m boven 20° , en DENNING in 1903 op 36° N-breedte 10u 39m. Dus ook hier zien wij niet anders dan bovenop een ondoorzichtig wolkenhulsel.

Nog moeilijker was natuurlijk Uranus; op een schijfje van 3" of 4" middellijn was behalve de algemene groenachtige tint toch niet veel op te merken. Soms werden enige flauwe banden aangegeven; LOWELL tekende een paar verdachte vlekjes; snelle aswenteling om een nagenoeg horizontaal liggende as was aangeduid door de duidelijke afplatting van omstreeks $\frac{1}{12}$. Bij Neptunus was de studie van oppervlakedetail door kijkers vrijwel uitgesloten.

De satellieten van al deze planeten behoren ook tot de veelheid der werelden, hetzij, als van ouds onze eigen maan, als denkbeeldige woonplaats, hetzij als completering van het levensbeeld van hun hoofdplaneet. Daar door hun

kleinheid voor allen wel hetzelfde moest gelden als voor onze maan: dat ze geen dampkring vast kunnen houden, viel het eerste bij hen als mogelijkheid weg. Het spreekt van zelf, dat de steeds grotere en betere kijkers in de 19de eeuw steeds meer van zulke satellieten deden ontdekken. Mercurius en Venus bleven er vrij van, hoe vaak ook bedriegelijke reflexbeelden in de kijkers een illusionaire Venusmaan aankondigden. In 1877 bracht de toen grootste kijker, de 26-inch te Washington, aan ASAPH HALL de ontdekking van twee Marsmanen. Zij zijn wel de kleinste in hun soort, met naar schatting slechts 15 en 18 kilometer middellijn. De binnenste van de twee, met een omlooptijd van 7u 39m, loopt sneller dan Mars roteert en gaat dus voor een waarnemer op Mars in het Westen op en in het Oosten onder.

In 1892 ontdekte BARNARD met de 36-inch Lick-kijker een 5de maan van Jupiter binnen het systeem van de oude vier van GALILEÏ, ook een klein voorwerp van wellicht een 100 km. Buiten dit systeem werden in 1904 tot 1914 nog vier zeer kleine maantjes fotografisch ontdekt, — later nog enige — met voor een deel wonderlijke, sterk excentrische en sterk hellende, door storingen sterk veranderlijke banen, de buitenste zelfs teruglopend — alles hoogst interessante objecten voor de hemel-mechanica; hierbij werd o.a. de vraag opgeworpen, en door MOULTON gedeeltelijk bevestigend beantwoord, of ze ook door Jupiter gevangen genomen kleine planeetjes konden zijn. Ook bij Saturnus werd, naast de reeds bekende 7 satellieten en een 8ste kleinere, die in 1848 door Bond was ontdekt, in 1898 fotografisch een klein maantje op zeer grote afstand gevonden, dat een teruglopende beweging heeft met sterke helling. Bij Uranus werden bij de twee door W. HERSCHEL reeds ontdekte manen, in 1851 door LASSELL met zijn grote telescoop nog twee bijgevoegd, alle uiterst zwakke objecten; de banen van dit viertal staan nagenoeg loodrecht op de in de ecliptica liggende omwentelingsas. Bij Neptunus vond, kort na de ontdekking van de planeet zelf, LASSELL een maan, die ook een teruglopende beweging in een sterk hellende baan heeft.

Deze satellieten sluiten zich in lichaams grootte regelmatig aan de planeten zelf aan. De 3de en 4de maan van Jupiter hebben een middellijn van omstreeks 5000 km, dus ze zijn even groot als Mercurius — de Neptunusmaan is nog iets groter — de andere twee, evenals de aardmaan en de 6de van Saturnus, zijn ietsje kleiner. Dan komen de overige in afdalende lijn, tot de manen van Mars, die voor ons alleen door hun grote nabijheid zichtbaar zijn. Wij zagen reeds dat ook de kleine planeetjes een dergelijke afdalende reeks vertonen. Terwijl de vorige eeuwen enige in grootte en karakter verschillende soorten van hemellichamen scherp onderscheidden — de zon, de planeten, de satellieten — heeft de 19de eeuw deze verschillen overbrugd tot een continue reeks van afdalende afmetingen. De zon staat wel als eenling bovenaan; maar dan gaat van Jupiter (middellijn 140.000 km, $\frac{1}{10}$ van de zon) de rij regelmatig naar beneden, tot lichaampjes van een tiental kilometers die wij nog planeetjes noemen, en dan tot meteorstenen van steeds kleiner grootte, in onbeperkt aantal.

De sterrekunde leert ons niet enkel de buitenzijde van de hemellichamen kennen, maar dringt ook in hun binnenste door. Zij kan daarover iets te weten komen door de hemel-mechanica, want in de aantrekkingskrachten