

Enkele hoogtepunten uit de Griekse sterrenkunde¹

CHRISTOFFEL WAELKENS

Toen er nog geen lichtvervuiling was, en ook geen internet om uren aan gekluisterd te zitten, hadden de mensen meer kansen en tijd om naar de sterren te kijken. Dat deden ze dan ook. Vandaag vertellen vele wetenschappers uit uiteenlopende disciplines mij dat het de verwondering over de sterrenhemel was die hun tot de wetenschap dreef, en dat was ook in de oudheid zo. Men kan stellen dat de sterrenkunde het oudste wetenschappelijke beroep is, en als zodanig een eerbare bezigheid.

We zullen het verder met bewondering hebben over de Griekse sterrenkunde. Maar het weze gezegd dat ook andere volkeren merkwaardige waarnemingen hebben gedaan en tot verstandige interpretaties zijn gekomen. Dan denken we aan de Maya's, de Inca's wellicht, uiteraard het oude China, Egypte en Mesopotamië, maar ook bij ons aan de Kelten en hun voorlopers die Stonehenge hebben gebouwd. Verschillende sites wereldwijd waren in zekere zin observatoria. Als je ze gaat bezoeken, word je bevangen door bewondering voor die vroege beschavingen, en kan je ook geïrriteerd geraken door de afwezigheid van basiskennis van sterrenkunde bij de gemiddelde toerist, die zich graag laat verleiden tot de meest waanzinnige interpretaties over wat er toen allemaal moet zijn gebeurd. Recent werden we nog geconfronteerd met een overinterpretatie van de Mayakalender, een voorval dat illustreert dat elke aanspraak die wij maken intelligenter te zijn dan onze voorouders, twijfelachtig is.

De Griekse sterrenkunde

De Grieken dan. Voor zover wij weten, zijn zij het die het verst zijn gegaan in het theoretiseren over de kosmos; het is in elk geval vanuit hun erfenis dat de wetenschappelijke traditie van onze beschaving, die daarin toch dominant is gebleken, is gegroeid. Het grote publiek denkt spontaan aan Pythagoras, aan Archimedes, en misschien aan Aristoteles. De voorbeelden die we verder zul-

¹ Dit artikel wordt opgedragen aan de nagedachtenis van de retoricaleraar van de auteur, classicus Paul Elsen, die overleed in de week waarin de laatste hand aan deze bijdrage werd gelegd.

len bespreken spelen zich echter alle af in de hellenistische periode, na de klassieke periode dus. Het is inderdaad dan dat de wetenschap het meeste floreerde, met in de wiskunde figuren zoals Archimedes, Euclides en Apollonius, en in de geneeskunde Hippocrates. Vermits we niet de fout willen maken om wetenschap te beperken tot de zogenaamde exacte variant ervan, vermelden we ook graag dat het in de hellenistische tijd was dat Thucydides, de pionier van de geschiedeniswetenschap, heeft geleefd.

Natuurlijk liggen de wortels van die hellenistische wetenschap (vanaf nu enkel sterrenkunde) in de klassieke periode, en zelfs bij presocratici zoals Anaxagoras. Aristoteles wist dat de Aarde een bol moest zijn, vanuit de waarneming dat de schaduw van de Aarde op de Maan bij een verduistering altijd een stuk van een cirkel is. En het zou op een suggestie van Plato zijn geweest, om een manier te vinden om de beweging van de planeten te verklaren als een combinatie van cirkelbewegingen, dat Eudoxus de eerste stappen zette naar het wereldmodel dat uiteindelijk zijn grootste sofisticatie zou vinden bij Ptolemaeus.

Een belangrijk aspect van de bloei van de wetenschap in de hellenistische periode was wellicht de internationalisering in die tijd, de contacten met andere culturen die ook hadden gekeken en nagedacht. Mijn favoriete auteur in mijn Grieks-Latijnse jeugd was Herodotus, niet zo wetenschappelijk als historicus als Thucydides, maar een fijn verteller. Men kan niet anders dan geboeid zijn door zijn verhaal van de zeereis van de Feniciërs rond Kaap de Goede Hoop, waarin hij verhaalt dat ze bij hun terugkeer vertelden dat ze de Zon in het noorden hadden gezien, waaraan Herodotus zelf toevoegde “dat hij het eigenlijk niet kon geloven”. Had Aristoteles deze *storyteller* ernstig genomen, dan had hij eruit moeten besluiten dat het ook mogelijk was ‘aan de onderkant van de aardbol’ te staan.

Het is ongetwijfeld ook de lange reeks waarnemingen van de Egyptenaren en van de Mesopotamiërs die Hipparchus mee moet gemotiveerd hebben om zich te bekommeren om de precessie van de equinoxen (*cf. infra*). Waar de Egyptische sterrenkundigen nuttig voor waren, was voor het voorspellen van de jaarlijkse overstroming van de Nijl, om op tijd de landbouwgereedschappen klaar te zetten. Ze hadden geen waarnemingsstation aan het Victoriameer van waaruit ze op de hoogte gebracht konden worden dat het water eraan kwam, en moesten zich beroepen op astronomische waarnemingen om vast te leggen wanneer het einde juni was. Ten tijde van de eerste dynastieën (3^{de} millennium v.C.) hadden ze opgemerkt dat het begin van het wassen van de Nijl overeenkwam met de tijd waarop de helderste ster Sirius elk jaar voor het eerst in de ochtendschemering kon gespot worden. Maar dat bleef niet duren,

Sirius kwam steeds later, en men kan zich indenken dat er toen ook enige sprake kan zijn geweest van argwaan t.a.v. wetenschappers vanwege de burgerlijke overheid of de publieke opinie. In de Griekse oudheid vond deze ‘heliacale opkomst’ van Sirius pas plaats in augustus, vandaar de naam ‘hondsdagen’ voor de warmste dagen van het jaar, want Sirius is gesitueerd in het sterrenbeeld ‘De Grote Hond’. We spreken vandaag nog steeds van ‘hondsdagen’, hoewel de eerste verschijning van Sirius nu pas in september optreedt. Wat deze anomalie ons leert, is dat er een verschil bestaat tussen het jaar gemeten ten opzichte van de vaste sterren (al is Sirius niet zo vast...), het ‘siderische’ jaar, en dat van de seizoenen, het ‘tropische’ jaar.

De Griekse sterrenkundigen hebben zich na Eudoxus intensief bezig gehouden met het verfijnen van zijn model, en er zijn steeds epicikels bijgekomen, tot het ophield met Ptolemaeus. Met nu en dan een dissidente stem, zoals Heraclides van Pontus (390-310 v.C.), die voorstelde dat de planeten Mercurius en Venus eigenlijk rond de Zon draaien, en Aristarchus van Samos (310-230 v.C.), die dat poneerde voor alle planeten, inclusief de Aarde. En ook de volgelingen van Democritus (460-370 v.C.), de atomisten, die durfden stellen dat er een pluraliteit van werelden is, dat er vele werelden zijn zoals de onze, met telkens een diversiteit aan levende wezens.

Deze merkwaardige opvattingen zijn in brede kringen bekend, maar hoe de auteurs ertoe kwamen, is dat minder. Het geeft teveel de indruk dat die Grieken toch maar vooral sofisten met losse ideeën waren, terwijl het juist zou moeten aantonen hoe modern het intellectuele debat rond die zaken toen eigenlijk was. Heraclides vertrok van de waarnemingen dat Mercurius en Venus ten opzichte van ons altijd dicht bij de Zon te vinden zijn, en ook dat ze sterk in helderheid veranderen: met epicykels wordt dat een vrij onnatuurlijke constructie. De pluraliteit van de werelden is niet onlogisch in het atomistische model: als de mesoscopische materie uit allemaal microscopische entiteiten bestaat, waarom zou de macroscopische wereld dan niet bestaan uit talloze mesoscopische entiteiten? Dat is inderdaad wat we vandaag weten: de wereld van heel klein naar heel groot lijkt wel een fractale structuur.

Onze invalshoek bestaat er dan ook uit wat dieper in te gaan op de redeningen die achter sommige merkwaardig juiste bevindingen schuilen. We zullen het achtereenvolgens hebben over Eratosthenes en de bepaling van de omtrek van de Aarde, het heliocentrische werelbeeld van Aristarchus, en ten slotte de precessie van de equinoxen zoals gemeten door de grootmeester, Hipparchus van Rhodos.

Eratosthenes en de omtrek van de Aarde

Eratosthenes van Cyrene (276-195 v.C.) was eigenlijk een Griek in de bredere zin, want Cyrene ligt tegenwoordig in Lybië. Hij studeerde wel in Athene. In de wiskunde is hij bekend voor de ‘zeef van Eratosthenes’, een algoritme om snel na te gaan of een getal al dan niet een priemgetal is. Hij werd door de Griekse farao Ptolemaeus III gevraagd om de leiding op zich te nemen van de Bibliotheek van Alexandrië, en het is daar dat hij zijn belangrijkste sterrenkundig werk verrichtte. Die bibliotheek was hetgeen in de oudheid zowat het meest op een moderne universiteit leek, en de positie van Eratosthenes was vandaar equivalent aan die van een universiteitsrector vandaag. Nog iets dat we van de oude Grieken kunnen leren: een universiteit waarin de rector nog aan wetenschappelijk onderzoek kan doen!

Het verhaal hoe Eratosthenes de omtrek van de Aarde bepaalde, is genoegzaam bekend. Als we ons op een meridiaan naar het zuiden (niet te ver evenwel!) begeven, zien we op de middag de Zon steeds hoger staan. Het hoekverschil is gewoon het verschil in breedtegraad. Wanneer we ook weten hoe groot de afstand is die we hebben afgelegd, kunnen we de omtrek bepalen: de omtrek is 360 maal de afstand die is afgelegd bij een verplaatsing over één graad. Het probleem voor een enkeling is dat hij niet op twee plaatsen tegelijk kan zijn. Eratosthenes loste dat als volgt op. Hij was te weten gekomen dat op de middag van de langste dag van het jaar (21 juni dus) het zonlicht kon doordringen tot op de bodem van een diepe waterput in Syene (thans Assuan); de Zon staat dan pal in het zenith, Syene bevindt zich inderdaad juist op de Kreeftsekeerkring. Het tijdstip van de lokale middag in Alexandrië kan men bepalen wanneer de schaduw van een vertikaal opgerichte stok het kleinste is; de allerkleinste schaduw geeft aan wanneer het 21 juni is. Door de lengte van de schaduw te vergelijken met de lengte van de stok, bepaalt men de invalshoek van de Zon, en meteen het breedteverschil met Syene.

Om daaruit de omtrek van de Aarde te bepalen, was alleen nog de lineaire afstand van Alexandrië tot Syene nodig (beide plaatsen liggen nagenoeg op dezelfde meridiaan). Hoe Eratosthenes die afstand kende, weten we niet. In elk geval: het getal van 250.000 stadia wordt genoemd. Een probleem is nu dat er drie versies van het Egyptische stadium circuleren. Met één ervan vindt men de juiste waarde van 40.000 km voor de omtrek, en men gaat er dan maar van uit dat hij die genomen heeft. Maar dat is niet altijd zo geweest. Toen Columbus naar Amerika (eigenlijk naar India) vertrok, steunde hij zich op een kleinere waarde van het Egyptische stadium, waarmee de omtrek van de wereld maar ca. 25.000 km was, zodat India even snel in westelijke dan in

oostelijke richting bereikt zou kunnen worden. Als men beseft dat slechts de helft van Columbus' bemanning de overtocht overleefde, kan men er beter niet aan denken wat er zou gebeurd zijn als Amerika niet had bestaan...

Aristarchus en het heliocentrisme

Een oorspronkelijke tekst waarin Aristarchus uitlegt waarom hij denkt dat de Aarde omheen de Zon draait en niet andersom, hebben we niet. We kunnen het wel afleiden uit hetgeen wel rechtstreeks van zijn pen is overgeleverd. Zijn boek *Over de relatieve afmetingen van en de afstanden tot de hemellichamen* behoort immers tot een compendium van Griekse wetenschappelijke werken dat door de generaties heen telkens opnieuw gekopieerd werd.

De Zon en de Maan lijken ongeveer even groot, maar zijn ze dat echt? Het hangt af van de relatieve afstanden: als de Zon tweemaal zo ver staat als de Maan, dan is de Zon tweemaal groter. Hoeveel verder de Zon van ons afstaat dan de Maan, bepaalt Aristarchus op een ingenieuze manier, vanuit de maanstanden. Als de Maan tussen ons en de Zon staat, zien we haar verlichte kant niet, het is dan Nieuwe Maan. Exact tussen Aarde en Zon staat de Maan zelden: dan treedt een totale zonsverduistering op, zo spectaculair dankzij de toevallige omstandigheid dat Zon en Maan schijnbaar ongeveer even groot zijn. De baan van de Maan om de Aarde maakt een hoek met het baanvlak van de beweging Zon-Aarde die tien maal groter is dan de hoekdiameters van Zon en Maan; een zonsverduistering kan dus enkel optreden als Nieuwe Maan optreedt dicht bij het moment dat de Maan in haar baan gekomen is op een snijpunt met het vlak van Aarde en Zon. Bemerkt trouwens dat de term 'zonsverduistering' slecht gekozen is: de Zon wordt helemaal niet verduisterd; ze blijft stralen, alleen zien we het niet meer. Men spreekt beter van een 'zonne-occultatie'.

Volle Maan treedt op wanneer de Aarde zich tussen de Zon en de Maan bevindt, een halve 'maand' dus na Nieuwe Maan. En ergens halfweg tussenin hebben we Eerste en Laatste Kwartier, wanneer de Maan naar ons toe half verlicht is door de Zon. 'Ergens halfweg' inderdaad, want het is enkel precies halfweg als de Zon oneindig ver zou staan. Eerste en Laatste Kwartier treden op wanneer de hoek Zon-Maan-Aarde in de Maan recht is; halfweg tussen Nieuwe en Volle Maan betekent dat de hoek Zon-Aarde-Maan in de Aarde recht is. Een 'driehoek' kan maar één rechte hoek hebben, tenzij de derde hoek nul is, en dan staat de Zon effectief op oneindig. Eerste Kwartier moet dus optreden vóór de Maan halfweg is tussen nieuw en vol, en als we dat tijdsverschil uitdrukken in een hoek, kennen we meteen de hoek waaronder de

Zon de afstand Aarde-Maan ziet. Simpele driehoeksmeting volstaat dan om de verhouding van de afstanden Aarde-Maan en Aarde-Zon te berekenen.

Aristarchus legt er zich dus op toe die hoek te bepalen. Hoe hij het in de praktijk gedaan heeft, daar zegt hij niets over. Het probleem wordt trouwens bemoeilijkt door het feit dat de maanbaan geen cirkel is maar een ellips, en dat de snelheid van de Maan in haar baan niet constant is. Maar dat doet er in essentie niets toe: het belangrijke feit is dat de hoek klein is, en dat de Zon dus veel verder staat dan de Maan, en dus ook veel groter is. De waarde voor de hoek die Aristarchus vindt, is 3 graden, gevoelig meer dan de werkelijke waarde: de Zon staat dus nog veel verder en is nog veel groter dan hij dacht. Zijn conclusie luidt dat de Zon achttien maal (we ronden gemakshalve wat af) verder en groter is dan de Maan.

En de Aarde in het verhaal? De laatste stap die Aristarchus zet, is te bepalen wat de relatieve afmetingen van de Aarde en de Maan zijn. En dat doet hij gedurende een totale maansverduistering. Dat is een echte verduistering, en op een gegeven plaats komt ze meer voor dan een ‘zonsverduistering’, gewoon omdat de aardschaduw groter is dan de schaduw van de Maan, uiteindelijk dus omdat de Aarde groter is. Een maansverduistering duurt ook lang, de tijd die de Maan nodig heeft om doorheen de aardschaduw te bewegen. Het is die tijdsspanne die Aristarchus meet. Hij vindt dat de Maan drie keer past in de aardschaduw. Die aardschaduw heeft de vorm van een kegel met de Zon in de top, maar omdat Aristarchus al weet dat de Zon zoveel verder staat, mag hij het stuk tussen Aarde en Maan benaderen door een cilinder, en kan hij besluiten dat de Aarde drie maal groter is dan de Maan. Slechts drie maal, de zon was het achttien keer. Besluit: de Zon is in lineaire dimensies zes maal groter dan de Aarde, in volume 216 maal!

Daar stopt het gekende verhaal van Aristarchus. Maar het lijkt weinig twijfel dat het zijn bewijs voor de grotere omvang van de Zon is die hem dit hemellichaam in het centrum van het (lokale) heelal heeft doen plaatsen, gewoon door toepassing van het gezonde verstand. Een strikt bewijs voor het heliocentrisme is het echter niet, want zolang men er geen idee van heeft waarom iets omheen iets anders beweegt, is het niet evident waarom het grootste lichaam centraal zou moeten staan. Dit was trouwens een probleem waar Copernicus en Galilei evenzeer mee geconfronteerd zouden worden: een strikt bewijs voor het heliocentrisme konden ook zij niet geven.

De redenering van Aristarchus is erg overtuigend, en toch heeft hij zijn tijdgenoten niet overtuigd, ook al omwille van eenzelfde probleem waarmee Copernicus later zou geconfronteerd worden in de wetenschappelijke wereld. Als wij bewegen rond de Zon, dan bewegen wij dus ook ten opzichte van de

vaste sterren om ons heen. Gedurende een omwenteling verandert dus de richting waarin wij een bepaalde ster zien, maar die verandering (de zogenaamde parallax) zag men niet. De reden is dat het effect klein is, omdat de afstanden naar de sterren zoveel groter zijn dan de aardbaan: de bomen langs de weg zien we ook sneller voorbijflitsen dan een verre kerktoeren. Dat begreep Copernicus heel goed, en hij was de eerste in de moderne tijd om te beweren dat de sterren inderdaad heel ver staan. Dat we ze tot op die grote afstanden kunnen zien, betekent dat de sterren intrinsiek heel helder zijn. Copernicus beweerde dan ook als eerste dat de sterren lichamen zijn zoals de Zon. Het zou echter nog tot 1838 duren vooraleer de parallax van sterren effectief aangetoond kon worden.

Een gevolg van het heliocentrisme is dus dat de wereld om ons heen zoveel groter is dan we eerst dachten, en die gedachte leek absurd, in Copernicus' tijd en ook in de oudheid. Het was om die reden dat Tycho Brahe het oude model van Heraclides nieuw leven inblies. Hoe werd de oppositie gevoerd in de oudheid? Door niemand minder dan Archimedes! Hij verwoordde het probleem van de parallax als volgt: "Voor Aristarchus verhoudt de sfeer van de vaste sterren zich tot het systeem Aarde-Zon zoals een bol tot zijn centrum." Dat kon hij niet aanvaarden, en dus was de discussie gesloten. Wij geraken er niet over uitgepraat dat Rome zich verzette tegen het heliocentrisme, en dat tegen alle evidentie in bijna 200 jaar hardnekkig volhield. Maar als Archimedes gesproken had, was dat nog iets helemaal anders: zeventien eeuwen zou het duren vooraleer de waarheid weer bespreekbaar werd! Hoe dan ook, al is Aristarchus het zwijgen opgelegd, enig gezag heeft hij toch mogen behouden. Dezelfde Tycho Brahe – wiens waarnemingen van Mars zijn leerling Kepler uiteindelijk zou leiden tot het spoor van zijn befaamde wetten, die op hun beurt de leidraad waren voor Newton om zijn gravitatiewet te ontdekken – gebruikte nog steeds de aristarchische waarde van 3 graden voor wat toen de parallax van de Zon werd genoemd...

Vanuit epistemologisch standpunt is het interessant hoe Aristarchus zijn bevindingen verwoordde. Hij sprak de wetenschappelijke taal van zijn tijd, en dat was de axiomatic van de *Elementen* van Euclides. Eerst de axioma's ("Door twee punten gaat juist één rechte"), dan definities, lemma's, stellingen, gevolgen, telkens opnieuw. Aristarchus' boek begint ook met een lijst van *hypotheses*, die gevolgd worden door (hulp)stellingen en gevolgen, bladzijden lang. Het eerste van die hypothesen luidt: *tèn seleunèn tou hèliou to phoos lambanein* ("de Maan krijgt haar licht van de Zon"). Enkele volgende axioma's zijn eveneens (geometrische) evidenties, zoals hierboven beschreven. Maar één van die (dus onbewezen) hypothesen is juist dat die fameuze

hoek 3 graden is. Met andere woorden, wat in de huidige wetenschapspraktijk het centrale accent zou krijgen – de meting, hoe die is uitgevoerd, en wat de onzekerheden op het resultaat zijn – wordt hier gewoon in enkele regels geponeerd, terwijl de hele wiskundige redenering die gedurende bladzijden volgt vandaag eigenlijk triviaal is, met enkele sinussen en cosinussen. Maar Aristarchus had geen sinussen en cosinussen (die zou Hipparchus bedenken), en moest zich op archimedaanse wijze behelpen met steeds betere benaderingen, via beneden- en bovenlimieten voor het getal dat hij uiteindelijk wenste te bekomen.

Hipparchus en de precessie van de equinoxen

Hipparchus van Rhodos (190-120 v.C.) was eveneens een geocentrist, trouw aan Archimedes. Hij slaagde er als eerste in om niet relatieve, maar absolute afstanden tot een hemellichaam – de Maan – te bepalen. De Maan beweegt vanuit ons standpunt omheen het centrum van de Aarde, niet omheen een waarnemer die op het oppervlak staat. Als de Maan dicht bij de horizon staat, kijken we zodoende vanuit een richting een aardstraal hoger dan de baan, en die hoek zien we weerspiegeld in de positie van de Maan ten opzichte van de vaste sterren, opnieuw een parallax-effect dus. In functie van hoe hoog de Maan aan de hemel staat, schommelt haar baan dus schijnbaar ten opzichte van een cirkel op de hemelsfeer. De amplitude van die schommeling is groter naarmate de Maan dichterbij ons staat, en is dus een maat voor de afstand tot de Maan. Door dat effect te meten vond hij – gebruik makend van de straal van de Aarde zoals door Eratosthenes bepaald – een afstand tot de Maan die heel goed overeenkomt met de juiste waarde. Hij vond zelfs dat de afstand tot de Maan verandert gedurende haar baan, en bedacht zo een model van een cirkelbeweging rond een punt dat niet samenviel met het centrum van de Aarde. Ook voor de beweging van de Zon omheen de Aarde kwam hij – door de lengte van de seizoenen accuraat te meten – tot een dergelijk excentrisch model. Het meten van de lengte van de seizoenen brengt ons in de buurt van de meest merkwaardige ontdekking die hij deed, deze van de precessie van de equinoxen. We zagen hierboven al dat het siderische jaar en het tropische jaar niet identiek zijn, en dat wilde Hipparchus nu precies nagaan door, op een onafhankelijke manier, beide jaren te meten.

Het siderische jaar kan men dus vinden door gedurende opeenvolgende jaren vast te stellen wanneer men voor het eerst een ster (Sirius bijvoorbeeld) ziet verschijnen in het ochtendgloren. Of het nu de Aarde is die rond de Zon draait of omgekeerd, doet er niet toe: doorheen het siderisch jaar zien we de

Zon een baan (de ecliptica) beschrijven tussen de vaste sterren. Of liever, we zien het niet, want als de Zon er is, zien we geen sterren. Sterren verdwijnen dus achter de Zon, en komen weer te voorschijn, en dat laatste zien we telkens voor het eerst in de ochtendhemel. Een dergelijke bepaling van de lengte van het jaar lijkt in eerste instantie niet precies: er zit op elke meting een onzekerheid van de orde van een dag, als men met twee opeenvolgende metingen het jaar bepaalt, kan de fout twee dagen zijn. Maar als men dat gedurende vele jaren doet, is die fout van twee dagen er één op het gehele interval, en per jaar wordt dat dan twee dagen gedeeld door het aantal jaren die erover zijn gegaan. Het is dus de zaak om over vele jaren te meten en de tel niet kwijt te geraken. En het helpt ook – zoals in het geval van Hipparchus – wanneer men een beroep kan doen op accurate metingen die door vroegere waarnemers zijn gemaakt. De waarde die Hipparchus uiteindelijk vond voor het siderische jaar, komt goed overeen met de juiste waarde, namelijk 365,256 dagen.

Het tropische jaar is het jaar van de seizoenen, de tijdsspanne dus tussen twee opeenvolgende keren dat de lente begint. In astronomische termen begint de lente wanneer de Zon door de hemelevenaar komt van zuid naar noord. Voor een waarnemer aan de evenaar komt de Zon dan – zoals daar trouwens altijd – in het oosten op, en passeert ze op de middag door het zenith. Voor een waarnemer op een willekeurige breedte komt ze ook in het oosten op, maar is haar hoogste punt niet het zenith. Als die waarnemer slim en handig is – en Hipparchus was beide – dan kan hij op zijn waarneemplaats een cirkel zo positioneren dat hij evenwijdig is aan de evenaar. Wanneer het nog winter is, zit de Zon nog onder de evenaar, en is de schaduw van de cirkel een ellips boven de cirkel; eens de lente begonnen is, is het een ellips eronder. De lente begint dus wanneer de schaduw van de cirkel een streep is in het vlak van de cirkel. Het is dat tijdstip dat Hipparchus herhaaldelijk gemeten heeft. Opnieuw hangt de nauwkeurigheid van de jaarbepaling af van die van een individuele meting, en die bepaalt Hipparchus empirisch op een zestal uren; de voornaamste fout wordt veroorzaakt door de breking van het licht door de atmosfeer, en men kan zich voorstellen dat Hipparchus zich daar het hoofd over gebroken heeft. Opnieuw helpt het indien men kan beschikken over een vroegere accurate meting van het fenomeen, en die vindt Hipparchus bij de nalatenschap van niemand minder dan Aristarchus. De waarde die Hipparchus uiteindelijk vond voor het tropische jaar, komt ook overeen met de juiste waarde, namelijk 365,242 dagen.

En dan gebeurt iets historisch voor de wetenschap. Hipparchus had – in de stijl van een student die een practicummeting moet uitvoeren – kunnen besluiten dat de waarden dicht bijeen lagen en hij zijn werk dus goed gedaan had.

Hipparchus heeft echter een vroege neus voor foutenberekening, wat Aristarchus duidelijk minder had. Hij besloot dat het verschil dat hij meet significant groter is dan zijn waarnemingsfouten, en dat er dus iets aan de hand moest zijn. Wellicht ook omdat hij van tevoren wist dat er iets aan de hand moest zijn, vanwege de problemen die de Egyptenaren en (in zijn geval) de Mesopotamiërs hadden gehad met de verschuiving van de seizoenen ten opzichte van de sterren. Wat kan dat nu zijn? Tussen twee opeenvolgende keren dat de lente begint zit een ander tijdsinterval dan tussen twee opeenvolgende identieke posities van de Zon ten opzichte van een vaste ster. Het punt waar de Zon zich bevindt aan de hemel wanneer de lente begint – het lentepunt – moet dus traagjes bewegen ten opzichte van de vaste sterren. Dat lentepunt ligt op de evenaar en in het baanvlak van de Zon, het is het snijpunt van de hemelevenaar en de ecliptica. Dus moeten die beide grote cirkels ten opzichte van elkaar bewegen: de evenaar verandert ten opzichte van het vlak van Aarde en Zon, en dus ook de richting loodrecht op de evenaar, de poolas. Vermits de hoek tussen evenaar en ecliptica dezelfde blijft, beschrijft die beweging van de poolas een kegel, en dat is hetgeen we een precessiebeweging noemen.

De volgende stap die Hipparchus wilde ondernemen, was een rechtstreekse meting van de verschuiving van het lentepunt op de ecliptica. Maar hoe doe je zo iets nu in hemelsnaam? Het lentepunt is geen ster, het is een abstract punt aan de hemel. Per definitie is het het punt aan de hemel waar de Zon staat bij het begin van de lente, maar als je de Zon ziet, dan zie je geen sterren ten opzichte waarvan de positie vastgelegd kan worden. De redenering die Hipparchus volgde, is opnieuw ingenieus. Wat hij op een willekeurige dag kon meten, was de positie van de Zon op de ecliptica ten opzichte van het lentepunt. Die is nul graden bij het begin van de lente, 90 graden op 21 juni, en voor elke willekeurige dag kan ze afgeleid worden uit de hoogte die de Zon bereikt op de middag, te meten met het stokje van Eratosthenes. Maar kunnen we 's nachts weten waar de Zon staat? Over het algemeen niet, maar wel bij een zeldzame omstandigheid, deze van een totale maansverduistering: dan staat de Zon precies 180 graden verder dan de Maan op de ecliptica! Als hij op het centrale moment van de verduistering – gedurende een verduistering kan men de Maan zien door het licht dat via de breking door de Aardse atmosfeer de Maan toch bereikt – de positie mat van de Maan ten opzichte van een vaste ster op de ecliptica (in dit geval de heldere ster Spica), dan wist hij genoeg. Hij kende van overdag (en de volgende middag) de positie van de Zon ten opzichte van het lentepunt, en had via zijn meting 's nachts en de 180 graden tussen Maan en Zon de positie van de Zon ten opzichte van die vaste ster gemeten, dus kende hij het hoekverschil tussen de vaste ster en

het lentepunt. Opnieuw kwam het hem goed uit dat hij goed gedocumenteerd was en beslagen in het dateren van verduisteringen. Hij wist van een positie-meting van Spica door een zekere Timocharis gedurende een totale maansverduistering 160 jaar eerder, en vond uiteindelijk dat het lentepunt in die tijdsspanne over een tweetal graden (vier maandiameters) verschoven was. Dit komt neer op 45 boogseconden per jaar, de echte waarde is 50.

Hier word je stil van. Eenzelfde persoon ontdekt een anomalie, interpreteert ze, bedenkt een experiment ter toetsing van zijn hypothese, voert dat experiment uit, en vindt de correcte uitkomst. Voor de relativiteitstheorie zou dat betekenen dat Michelson, Morley, Lorenz, Einstein en Eddington in één persoon verenigd zijn. De precessie van de equinoxen is nu niet onmiddellijk het meest sexy fenomeen in de natuur, maar de prestatie van Hipparchus was absoluut weergaloos.

Men kan zich de scène inbeelden, op Rhodos, in het jaar 120 v.C. Verwanten van Hipparchus zien dat hij toch wat zenuwachtiger is dan normaal, en vragen hem of er iets aan de hand is. “Ja”, is het antwoord, “het is vannacht maansverduistering, en nog wel een ideale om de precessie van de equinoxen te meten”.

Epiloog

Men zegt weleens dat Copernicus het Griekse wereldbeeld heeft omvergegooid. Dat is niet helemaal waar, en wel om twee redenen. Er was niet zoiets als een Grieks wereldbeeld, er zijn vele wereldbeelden geweest in het oude Griekenland; het is pas in de 1400 jaar na Ptolemaeus dat er slechts één wereldbeeld werd gehanteerd. Verder voelde Copernicus zich niet antagonistisch met de Griekse wetenschap; integendeel, hij was er zo door geboeid dat hij zich eerder zag als iemand die de draad van de Grieken terug opnam. Hij hield van dat intellectuele debat dat de controverse niet schuwde.

Dat intellectuele, wetenschappelijke debat van toen klinkt nog steeds verrassend modern, en verdient vandaag in de kijker te worden geplaatst. Net zoals de tijd waarin het plaatsvond, deze van de hellenisten: een tijd waarin de ‘grote verhalen’ het misschien iets minder deden, maar waarbij de wetenschap floreerde. Wellicht door de relatieve welvaart die toen heerste, alsook door de internationalisering van de wereld, die kennis en debat verspreidde. Een tijd – inderdaad – zoals de onze.

Bibliografie

- Heath, Sir Th. 2004. *Aristarchus of Samos: The Ancient Copernicus*. Mineola: Dover Publications.
- Neugebauer, A. 1975. *A History of Ancient Mathematical Astronomy*. Berlin: Springer Verlag.
- Pannekoek, A. 1951. *De groei van ons wereldbeeld: een geschiedenis van de sterrenkunde*. Amsterdam: Wereldbibliotheek.