DE AANTREKKINGSKRACHT.

35. DE ZWAARTEKRACHT EN HET VALLEN.

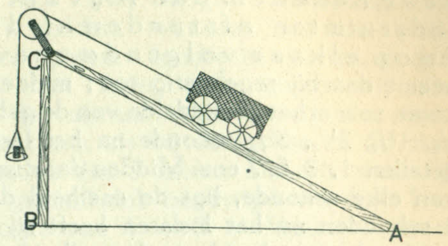
Wij moeten nu van den hemel eerst weer naar de aarde terugkeeren. Want wanneer wij dieper in de oorzaken van de bewegingen der hemellichamen willen doordringen, moeten wij eerst de bewegingen van de dingen om ons heen nauwkeurig onderzoeken. Dit onderzoek, dat de grondslagen tot de mechanica, de wetenschap der beweging, heeft gelegd, is het werk geweest van de 17de eeuw.

Als wij een steen uit de hand loslaten, valt hij naar beneden, naar de aarde toe. Waarom? Omdat hij „zwaar" is. Dat hij zwaar is, voelen wij als wij hem op de vlakke hand laten rusten; het is of hij door een kracht naar beneden getrokken wordt, en aan deze kracht gehoorzaamt hij, wanneer de hand hem loslaat; dan valt hij. Wat er bij dit vallen gebeurt, moeten we nu wat precieser nagaan.

Iedereen, die op 't vallen van een steen let, bemerkt licht, dat hij langzaam begint en dan hoe langer hoe sneller valt. Valt de steen uit een bovenverdieping of van een toren, dan treft hij de aarde met veel grooter kracht, dan wanneer wij hem uit de hand laten vallen, terwijl wij op den vlakken grond staan. Maar alles gaat zoo snel, dat het haast niet mogelijk is, de verschijnselen nauwkeurig en oplettend waar te nemen. Daarom gebruiken wij een hulpmiddel, dat het eerst door Galilei toegepast werd. Laat men een knikker over een schuine plank naar beneden rollen, dan begint hij ook eerst langzaam en krijgt vervolgens steeds grooter vaart. Maar niet zooveel als een vrij naar beneden vallende steen. Hij wordt ook wel door zijn zwaarte naar beneden

getrokken, maar niet door zijn volle zwaarte; 't grootste deel van zijn zwaarte drukt hem tegen de plank aan, en slechts een klein deel trekt hem langs de plank naar beneden.

Dat dit werkelijk zoo is, kan men door een proef gemakkelijk vaststellen. Op een schuine plank, die een glad hellend vlak vormt, staat een zeer lichtloopend wagentje, dat vastzit aan een touw, dat boven aan de plank over een rolletje loopt en een gewicht (of een schaal met gewichtjes) draagt. Is dit gewicht klein, dan rolt het



wagentje naar beneden en trekt het gewichtje op; is daarentegen het gewicht groot, dan trekt het den wagen naar boven; blijft alles in rust, dan trekken gewichtje en wagentje even sterk aan het touw, ze houden elkaar in evenwicht, en de grootte van het gewichtje geeft aan, met welke kracht het wagentje door zijn eigen gewicht naar beneden getrokken wordt. Wij zien dan — wat iedereen trouwens wel weet — dat die kracht des te grooter is, naarmate de plank schuiner staat. De proeven wijzen uit, dat de kracht — dus het gewichtje, dat den wagen in rust houdt — tot het geheele gewicht van het wagentje staat, als de hoogte C B van de schuine plank staat tot haar lengte C A. Weegt het wagentje een pond, is de plank 2 meter lang en staat het eene eind 4 cM. ($^1/_{50}$ van 2 meter) hooger dan het andere, dan is de kracht, die den wagen langs de plank naar beneden trekt, slechts $^1/_{50}$ pond.

Men kan dus de kracht, die het wagentje (of een knikker) aan 't rollen brengt, zoo klein maken als men wil, door de plank meer of minder scheef te stellen. En dan gaat alles zooveel langzamer, dat men het op zijn gemak kan waarnemen en meten — dit was ook de reden, waarom Galilei het hellend vlak gebruikte. Wij stellen dus de plank van 2 M. lengte zóó, dat het eene eind 4 cM. hooger dan het andere staat, en laten daar een knikker af rollen. Wij laten den knikker los, precies op het oogenblik dat de klok tikt, en zien dan waar hij bij elken volgenden tik gekomen is.

Het blijkt dan, dat de knikker in de eerste sekonde 10 centimeter doorloopt, in de tweede sekonde 30, in de derde 50, in de vierde sekonde 70 centimeter. Zoo vinden wij de door Galilei ontdekte wet: *beweegt zich een voorwerp door zijn zwaarte naar beneden, dan legt het in opvolgende gelijke tijdsruimten afstanden af, die zich verhouden als de op elkaar volgende oneven getallen.* De snelheid neemt daarbij regelmatig toe; midden in elk van deze tijdsruimten komt ze met het gemiddelde van de geheele tijdruimtes overeen: dus $^1/_2$, $1^1/_2$, $2^1/_2$, $3^1/_2$ sekonde na het loslaten klimt de snelheid als de getallen 1, 3, 5, 7 enz. Midden daartusschen in, bij het begin en einde van elke sekonde, ligt de snelheid daar juist tusschen; dus 1, 2, 3, 4 sekonden na het loslaten heeft zij de waarden 2, 4, 6, 8 bereikt. In de eerste sekonde is de snelheid van 0 tot 2 toegenomen (gemiddeld 1); in de tweede sekonde van 2 tot 4 (gemiddeld 3); in de derde sekonde van 4 tot 6 (gemiddeld 5). *In iedere sekonde vergroot de kracht, die het voorwerp naar beneden trekt, de snelheid met eenzelfde bedrag.* Wij kunnen het karakter van deze beweging nog anders uitdrukken, door nl. naar den geheelen afgelegden weg te vragen. In de eerste sekonde is een weg 1 afgelegd, in de 2de sekonde komt er 3 bij, maakt samen 4; na 3 sekonden is de weg $4 + 5 = 9$; na 4 sekonden $9 + 7 = 16$. Deze getallen zijn juist de tweede machten van 1, 2, 3 en 4. Dat is geen toeval; want wanneer wij alle tweede machten naast elkaar schrijven: 0 1 4 9 16 25 36 49, dan zien wij, dat hun verschillen 1 3 5 7 9 11 13 juist de reeks der oneven getallen vormen. *De afgelegde weg neemt dus met de tweede macht van den tijdsduur der beweging toe.*

Wat verandert er nu bij onze proef, wanneer wij de plank schuiner stellen? De wet van Galilei blijft nog altijd gelden, maar de snelheden en de afgelegde afstanden worden des te grooter, naarmate de plank sterker helt en dus de kracht, die den knikker naar beneden trekt, grooter is. Wordt de hooge kant tweemaal zooveel, dus 8 cM. hooger dan de lage kant gesteld, dan legt de knikker in de eerste sekonde 20, in de tweede 60 cM. af, dus tweemaal zooveel als bij de eerste proef. Stellen we de plank aan den hoogen kant 40 cM. hoog, dus 10 maal zooveel als bij de eerste proef, dan zijn alle snelheden ook 10 maal zoo groot: in de eerste sekonde wordt dan 1 Meter doorloopen. In dit geval is de kracht, die den knikker naar beneden doet rollen, $^1/_5$ van zijn geheele zwaarte (want 40 cM. is $^1/_5$ van 2 M.). Wij mogen aannemen, dat dit alles precies zoo blijft gelden, wanneer wij de plank steeds steiler en ten slotte zuiver loodrecht stellen, zoodat de knikker dan heelemaal niet meer rolt, maar vrij naar beneden valt. Dan moet de afstand, dien hij in de eerste sekonde valt, 5 maal zoo groot zijn als bij de laatste en 50 maal zoo groot als bij de eerste proef, dus 5 meter. Dat dit werkelijk uitkomt, kan door een proef gemakkelijk bevestigd worden. Laat men een steen van een hoogte van $1 + 3 + 5$ maal 5 meter, dus van 45 meter vallen, dan komt hij juist in 3 sekonden beneden. Nauwkeurige metingen hebben voor de valhoogte in de eerste sekonde het bedrag van 490 cM. opgeleverd.

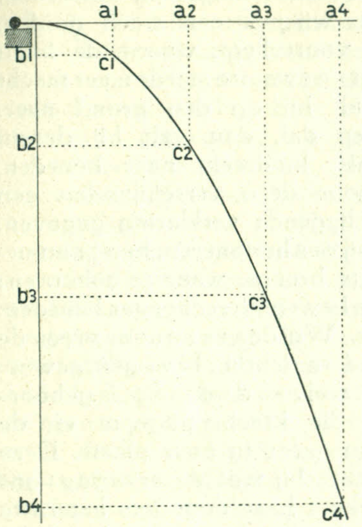
Zulk een beweging, waarbij de snelheid regelmatig grooter wordt, heet een *gelijkmatig versnelde beweging*. Was er geen kracht, die het voorwerp naar beneden trok, en was dit, zonder inwerking van buiten, geheel aan zichzelf overgelaten, dan zou het, zooals wij vroeger vonden, steeds dezelfde snelheid behouden. De versnelling van zijn beweging is een gevolg van de kracht, die het omlaag trekt en zijn snelheid vergroot. Is deze kracht het gewicht van het voorwerp zelf, valt het dus vrij naar beneden, dan neemt de snelheid elke sekonde 2×5 meter toe: *de versnelling bij het vrije vallen bedraagt 10 meter* (nauwkeuriger 981 cM). Rolt het voorwerp langs een schuin vlak naar beneden, dan is de versnelling in dezelfde mate kleiner als de kracht, die er de oorzaak van is.

Zoo hebben wij de wet vastgesteld, die het vallen der voorwerpen beheerscht. Maar heelemaal in orde is dit toch nog niet. Wij hebben hier van het vallen der dingen in 't algemeen gesproken, alsof dat bij alle lichamen precies hetzelfde is. Uit onze dagelijksche ervaring weten wij echter, dat dit niet uitkomt; een donsveertje blijft zweven, een dun blaadje papier daalt langzaam, terwijl zware steenen veel sneller vallen. In de natuurleer van Aristoteles waren deze feiten in de stelling samengevat, dat de dingen des te sneller vallen, naarmate ze zwaarder zijn. Tot in de 16de eeuw gold deze stelling als onaantastbare waarheid, totdat Galilei haar onjuistheid aantoonde. Wanneer wij zulk een donsveertje of een blaadje zijpapier tot een balletje samenkneden, vallen ze even snel als een steentje; en toch zijn ze niets zwaarder geworden. Letten wij er echter op, hoe een dun papier valt, al heen en weer zwaaiend, dan wordt het dadelijk duidelijk, dat het de weerstand van de lucht is, die zijn val tegenhoudt en verlangzaamt; wordt het tot een balletje samengeperst, dan heeft de lucht er niet meer zooveel vat op en kan het niet meer zoo tegenhouden. *Door den weerstand van de lucht vallen lichte voorwerpen, die haar een grooter oppervlak bieden, slechts langzaam naar beneden.* Was er geen lucht, dan zouden alle dingen, licht of zwaar, even snel vallen. Dat dit werkelijk zoo is, kon een halve eeuw na Galilei, nadat de luchtpomp uitgevonden was, door een proef bevestigd worden. Doet men in een lange, wijde buis een veertje en een stukje lood, en pompt men dan de buis luchtledig, dan blijkt, wanneer men de buis omkeert, tegen alle gewone ervaring, dat het veertje even snel naar beneden valt als het stukje lood. *De boven afgeleide valwetten van Galilei gelden dus inderdaad voor alle voorwerpen, maar alleen in een ruimte zonder lucht.* In de lucht wordt de beweging door haar weerstand gewijzigd. Bij zware voorwerpen bemerken wij weliswaar op het eerste gezicht niets van dien weerstand; maar daar treedt hij toch ook op, wanneer zij uit groote hoogte, dus met groote snelheid naar beneden storten. Dan groeit de weerstand van de lucht zoo geweldig, dat hij op 't laatst de zwaartekracht evenaart; dan neemt de snelheid verder niet meer toe. *Ieder ding, dat in de lucht valt, verkrijgt ten laatste een eindsnelheid, die des te grooter is, naarmate het lichaam zwaarder is met betrekking tot het oppervlak, waarop de luchtweerstand werkt.* Bij een veertje is die eindsnelheid zoo klein, dat wij het eerste aangroeien van de beweging niet eens bemerken. Waterdruppels bereiken die eindsnelheid slechts, wanneer ze uit de hooge wolken naar beneden vallen, en ieder weet, dat fijne motregen langzamer valt dan groote droppen. De nog zwaardere en grootere hagelkorrels vernielen door hun geweldige vaart het koren en slaan door glasruiten heen; was er

echter geen weerstandbiedende lucht, dan zouden zij, en trouwens de regendruppels ook, nog veel vernielender op de planten neerkomen.

Tot nog toe hebben wij alleen over de valbeweging gesproken. Maar de meeste bewegingen, die wij in onze omgeving opmerken, zijn veel minder eenvoudig. Wanneer wij met een steen gooien, zien wij, dat hij eerst in de richting voortvliegt, waarin de hand hem voortslingerde; dan echter krijgt de zwaarte steeds meer macht over hem, en in een wijden boog valt hij op den grond neer. Staan wij aan den rand van een diep dal, dan valt hij daarin steeds sneller en op 't laatst nagenoeg loodrecht naar beneden. Aristoteles heeft in zijn natuurleer voor deze verschijnselen een bijzonder eenvoudige en voor de hand liggende verklaring gegeven. Alle dingen hebben daarin, zooals wij ons herinneren, hun „natuurlijke" beweging, die ze naar de plaats brengt, waar ze behooren; voor zware lichamen is deze natuurlijke beweging recht naar beneden, naar 't middelpunt der aarde gericht. Worden ze nu door vreemde inwerkingen „gewelddadig" in een andere richting bewogen, geworpen of geschoten, dan moeten ze eerst wel aan dezen impuls gehoorzamen; langzamerhand echter wordt die kracht uitgeput en de natuurlijke beweging treedt meer en meer in haar plaats. Deze voorstellingswijze past zoo voortreffelijk bij wat de ervaring ons leert, dat het groote moeite heeft gekost haar door iets beters te vervangen. Eerst door zeer nauwkeurig waar te nemen wat bij zulke bewegingen gebeurt, kon haar onjuistheid blijken.

Wij leggen een knikker op tafel en geven hem een flinken stoot. Zoolang de tafel hem draagt, rolt hij, afgezien van eenige vertraging door de wrijving, met gelijkmatige snelheid horizontaal voort. Bereikt hij dan den rand van de tafel, dan vliegt hij in een boog verder, steeds steiler naar beneden, tot hij op den grond valt. Begint daarbij eerst na eenigen tijd zijn „natuurlijke" valbeweging? Neen; zoodra hij over den rand is en niet meer door de tafel gedragen wordt, begint hij te vallen; maar natuurlijk, evenals al het vallen, eerst heel langzaam en dan steeds sneller. *De natuurlijke valbeweging treedt niet langzamerhand eerst op, maar vindt plaats van het eerste oogenblik af, dat hij niet meer ondersteund wordt,* juist zooals wanneer hij van den tafelrand recht naar beneden valt. Doordat de valbeweging steeds sneller wordt, wordt de richting der beweging aldoor steiler; maar volkomen loodrecht wordt ze niet; de knikker komt onder het vallen steeds verder van de tafel af. De beweging door den oorspronkelijken stoot wordt niet uitgeput, maar blijft voortbestaan. In de werkelijke beweging treedt niet de eene soort beweging, de „natuurlijke", langzamerhand in de plaats van de andere, die door uiterlijk geweld, b.v. door een stoot bewerkt wordt; beide zijn ze van 't begin af aan aanwezig, van het oogenblik af dat de knikker aan den rand gekomen is; beide blijven ze ook bestaan, en te zamen bewerken zij de werkelijke beweging. Deze beweging is een kombinatie van twee eenvoudige bewegingen, die ieder op zich zelf zóó plaats vinden, alsof de andere er niet was. Was de eerste beweging er alleen, zonder dat de knikker vallen kon — b.v. wanneer de tafel grooter was geweest — dan was hij na gelijke tusschentijden achtereenvolgens in a^1, a^2, a^3, a^4 gekomen. Was hij eenvoudig van den tafelrand naar beneden gevallen, zonder horizontale beweging, dan was hij na dezelfde tijdsruimten in b^1, b^2, b^3, b^4 gekomen. Doordat de knikker beide bewegingen tegelijk uitvoert, komt hij achtereenvolgens in c^1, c^2, c^3, c^4; de beweging, die horizontaal begon, wordt steeds sneller en steeds steiler, en zoo ontstaat de schijn, dat de eene beweging uitdooft en de andere er voor in de plaats komt.



Op die manier toonde Galilei aan (in een in 1638 verschenen werk vat hij al deze onderzoekingen samen) wat sindsdien als grondslag der mechanika geldt; dat een lichaam als het ware twee (of meer) bewegingen tegelijk kan hebben, die elk haar eigen wet volgen en wier samenvoeging eerst de werkelijk beweging geeft. Elke nog zoo ingewikkelde beweging kan volgens dit principe in de eenvoudige bewegingen, waaruit zij opgebouwd is, ontbonden en zoo verklaard worden.

Wanneer wij een steen recht omhoog gooien — b. v. met een snelheid van 20 M. per sekonde — dan begint hij dadelijk te vallen, en deze valbeweging vertraagt eerst de opstijgende beweging en doet haar vervolgens omkeeren. Door den eersten impuls alleen zou de snelheid zijn:

na	0	1	2	3	4 sekonden
	20	20	20	20	20 M. omhoog;
door het vallen daarentegen:					
	0	10	20	30	40 M. naar beneden;
dus is de werkelijke snelheid:					
	20	10 M. omhoog	0	10	20 M. omlaag.

Na 2 sekonden is dus het hoogste punt bereikt en begint het dalen. De afgelegde weg zou zijn, door de eerste werpsnelheid alleen:

0 20 40 60 80 M.

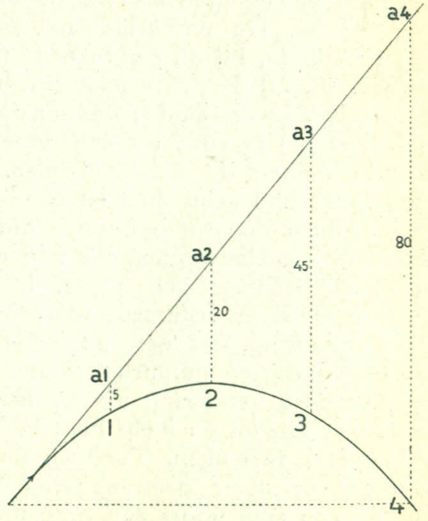
naar boven; door de valbeweging alleen is hij:

0 5 20 45 80 M.

naar beneden; dus is de werkelijk afgelegde weg:

0 15 20 15 0 M.

naar boven. De steen is in 't geheel 20 meter hoog gekomen, en na 4 sekonden valt hij met dezelfde vaart, waarmee hij naar boven geslingerd werd, op de aarde terug.



Hetzelfde geldt voor een steen, die schuin naar boven geworpen wordt; de gedaante van de baan, die hij dan beschrijft, is ieder bekend. Ontleden wij deze beweging in haar samenstellende bestanddeelen, dan zien wij, dat de steen door de eerste werpsnelheid in een rechte lijn schuin naar boven zou vliegen. Maar tegelijk begint hij te vallen. eerst langzaam en dan steeds sneller; daardoor is hij na 1 sekonde 5 Meter, na 2 sekonden 20 M., na 3 seconden 45 M. beneden die rechte baan gekomen. Nemen wij het geval, dat hij door de eerste werpsnelheid per sekonde 20 M. hooger zou komen, dan gaat alles juist als in het vorige voorbeeld, alleen met dit verschil, dat hij tegelijk in elke sekonde eenzelfde eind horizontaal voortvliegt. Zoo beschrijft hij dan zijn regelmatig gebogen baan, die in het midden een top heeft en vervolgens weer naar de aarde terugbuigt.

---

36. DE CIRKELBEWEGING.

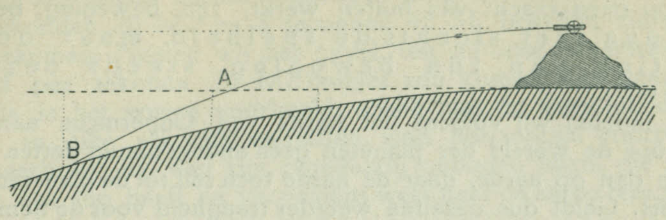
In de oude wereldleer stonden aarde en hemel door de natuur van hare bewegingen als twee geheel verschillende werelden tegenover elkaar. De natuurlijke beweging van de aardsche lichamen was rechtlijnig, bij de zware naar beneden, naar het middelpunt der wereld, bij de lichte naar boven. Zulke bewegingen hadden een doelwit en een einde; was een ding gekomen waar het behoorde, dan bleef het in rust, tot een vreemde kracht het gewelddadig stoorde. Anders de hemellichamen. Hun cirkelbeweging om het middelpunt had geen doel en geen einde; zij kon nooit ophouden, omdat elke reden tot ophouden ontbrak. Deze eeuwige nooit ophoudende cirkelbeweging, die zoo goed bij de onvergankelijkheid der hemellichamen zelf paste, had niets met de bewegingen op aarde gemeen en behoorde tot een geheel andere wereld.

De opvatting, dat een gelijkmatige eindelooze cirkelbeweging zoo eenvoudig en natuurlijk is en zoo vanzelfsprekend, dat zij geen verdere verklaring noodig heeft, beheerschte zelfs nog den geest van Galilei en hielp hem in 't begin om zijne nieuwe ideeën aannemelijk te maken. Toen hij de stelling uitsprak. dat een bal, wanneer er maar geen wrijving was, over een horizontaal vlak steeds even snel voort zou blijven rollen, beriep hij zich er op, dat deze beweging toch eigenlijk niets anders dan een deel van een cirkelbeweging om het middelpunt der aarde was, en het dus eigenlijk vanzelf sprak, dat zij steeds met onverminderde snelheid voortging. Eerst na hem hebben anderen uit zijn onderzoekingen

verdere gevolgtrekkingen afgeleid en de stelling geformuleerd — de zoogenaamde wet der traagheid — dat elk lichaam, waarop geen kracht van buiten werkt, zijn beweging behoudt: dat dus niet slechts de snelheid, maar ook de richting van zijn beweging steeds dezelfde blijft.

Nu moeten wij volgens het stelsel van Copernicus aannemen, dat voor de wereld der planeten geen andere natuurwetten kunnen gelden dan op aarde, daar de aarde toch zelf tot de planetenwereld behoort. Geldt dus dezelfde wet der traagheid voor de hemellichamen, dan is hun beweging in een cirkel niet meer een eenvoudige, vanzelfsprekende beweging; dan moet de cirkelbeweging uit eenvoudiger bewegingen en krachten verklaard worden. Wij spreken hier aldoor van cirkelbewegingen, omdat in dien tijd de wetten van Kepler nog geen aandacht getrokken hadden; men hield de banen der planeten meestal voor cirkels, en wij weten, dat ook volgens Kepler een cirkel zonder excentriciteit een mogelijke, en wel de eenvoudigste baan voor een planeet kan zijn. Eerst door de regelmatige cirkelbeweging uit de grondstellingen te verklaren, die voor de bewegingen op aarde gelden, kon de kloof, die hemel en aarde scheidde, voor goed gedempt worden. De weg daartoe wordt ons gewezen, wanneer wij op de beweging van een voortgeslingerd voorwerp nog nader ingaan.

Wij denken ons boven op een berg een kanon opgesteld, waaruit met groote snelheid een kogel precies horizontaal weggeschoten wordt. De kogel begint te vallen op hetzelfde oogenblik, dat hij uit den mond van het kanon vliegt; na 1 sekonde is hij 5 M., na 2 sekonden 20 M., na 3 sekonden 45 M. gevallen. Hij buigt dus in een kromme baan naar de aardoppervlakte en valt eindelijk op den grond neer. Wij denken ons de lucht met haar weerstand weg, want het is er ons niet om te doen de proef werkelijk uit te voeren; wij stellen ze ons alleen maar in gedachten voor. Nu is de aardoppervlakte niet vlak, maar gebogen. Trekt men daar, waar wij staan, een horizontale rechte lijn, dan zinkt het oppervlak naarmate men verder weggaat, steeds dieper onder deze lijn weg. De kogel bereikt den vasten grond dus in werkelijkheid niet zoo gauw, als bij een vlakke aarde het geval zou zijn; de vlakke aarde zou hij in A getroffen hebben, op de werkelijke gebogen aarde komt hij in B neer. Men kan met behulp van de meetkunde gemakkelijk berekenen, hoeveel het bolvormige aardoppervlak onder

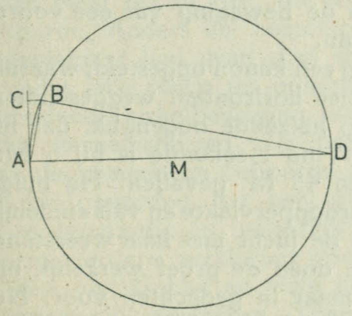


een horizontale lijn daalt, die wij van uit de plaats trekken, waar wij staan. Dit bedrag neemt evenredig met het kwadraat van den afstand tot deze plaats toe; 3,6 KM. van ons verwijderd is het 1 M., twee keer zoover is het 4 M. enz. Op een afstand van 8 KM. is het 5 M., bij 16 KM. is het tot 20 M., bij 24 KM. is het tot 45 M. aangegroeid. [1])

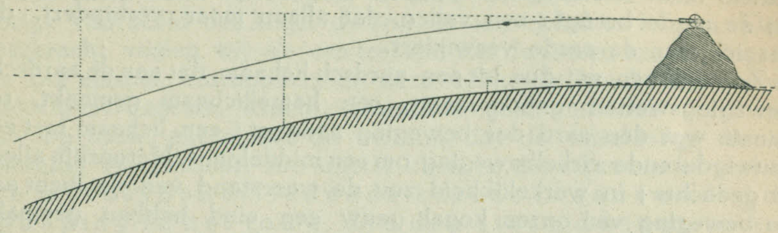
Wat zou er nu gebeuren als ons kanon, geweldiger dan alle

---

[1]) Omdat deze getallen als 't ware het fundament van de verdere uiteenzettingen vormen, vermelden wij de meetkundige stelling, waarop ze berusten. A en B zijn 2 punten van een cirkel en A C raakt den cirkel in A aan. Uit de gelijkvormigheid der driehoeken A B C en A B D volgt, dat B C tot A B staat als A B tot A D. Bij de aarde geeft B C aan, hoever 't aardoppervlak onder de horizontale lijn, die de aarde in A raakt, op den afstand A B daalt. *Deze daling staat tot den afstand, als de afstand tot de middellijn der aarde staat.* Daar de middellijn van de aarde 12,7 millioen Meter bedraagt, levert het kwadraat van den afstand in kilometers, gedeeld door 12,7 het bedrag van de daling in meters. Op een afstand van 3.6 KM. is de daling $\frac{3.6 \times 3.6}{12.7} = 1.02$ M.; bij 8 KM. is ze $\frac{8 \times 8}{12.7} = 5.04$ M., en ze bedraagt 4.90 M. op een afstand van 7.89 KM., (want $7.89 \times 7.89 = 62.25$ en $4.90 \times 12.7 = 62.23$). Deze eenvoudige regel leert ons tevens, hoever men op aarde van verschillende hoogten uit kijken kan; voor wie zich in C op de hoogte C B boven de aarde bevindt, ligt de horizon in A, op een afstand A B. Zijn hoogte in meters, vermenigvuldigd met 12.7, levert het kwadraat van den afstand van zijn horizon in kilometers.



werkelijk bestaande kanonnen, den kogel met een snelheid van 8 KM. per sekonde wegslingerde? Na 1 sekonde was hij dan 8 KM., na 2 sekonden 16 KM., na 3 sekonden 24 KM. ver weggevlogen; tegelijk was hij gaan vallen: na 1 sekonde 5 M., na 2 sekonden 20 M., na 3 sekonden 45 M. Maar nu daalt de aardoppervlakte op een afstand van 8 KM. juist 5 M., van 16 KM. juist 20 M.,



van 24 KM. juist 45 M., juist evenveel als de kogel op dezelfde afstanden gedaald is. *De kogel is dus niets dichter bij de aarde gekomen*; wel valt hij in een gebogen lijn, maar de aardoppervlakte is even sterk gebogen. Terwijl hij dus voortvliegt en evenver van de aarde blijft, blijft zijn baan steeds loodrecht op de richting van de zwaartekracht, is dus in elke volgende plaats wat daar horizontaal heet. De kogel blijft dus aldoor precies in dezelfde omstandigheden, steeds even hoog boven de aarde, steeds horizontaal en even snel voortvliegend; en voor elk verder punt van zijn baan geldt hetzelfde als voor zijn punt van uitgang. De beweging gaat dus ook verderop steeds op dezelfde wijze voort; de kogel blijft steeds even ver van het middelpunt der aarde verwijderd: *hij beschrijft een cirkelbaan om de aarde* en komt, anderhalf uur (nauwkeuriger $\frac{40000 \text{ K M}}{7.89 \text{ K.M.}} = 5067$ sekonden) na het schot van den anderen kant weer bij het kanon terug.

Zoo zien wij, hoe een cirkelbeweging tot stand komt. *De cirkelbeweging ontstaat uit het samenwerken van de zwaartekracht en een voortsnellende beweging.* Zonder de zwaartekracht zou de kogel in een rechte lijn voortgevlogen zijn, steeds verder van de aarde weg. Door de zwaartekracht wordt zijn baan tot een cirkel gebogen, evenals ook de baan van een schuin opgeworpen steen tot een kromme lijn gebogen wordt. De zwaartekracht bewerkt, dat de kogel, in plaats van weg te vliegen, in de buurt van de aarde vastgehouden wordt en in een kring om haar heen moet loopen. De zwaarte werkt hier niet als versnellende kracht, maar als een kracht, die aldoor de richting van de beweging verandert. Zij doet den kogel vallen, maar het is een vallen, dat het vallende lichaam niet dichter bij de aarde brengt: een vallen, dat alleen maar verhindert, dat het zich van de aarde verwijdert.

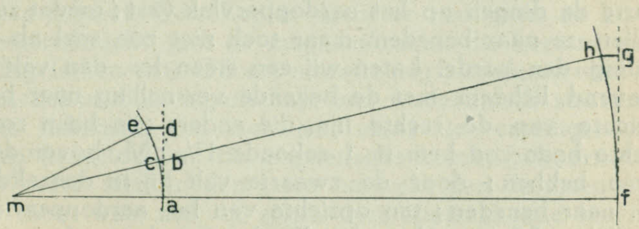
Zoo hebben wij dus uit een aardsch lichaam, dat aan de aardsche bewegingswetten gehoorzaamt, een hemellichaam gemaakt, ten minste wat den aard der beweging aangaat: een lichaam met een eeuwigdurende cirkelbeweging om een middelpunt. Natuurlijk alleen in gedachte; in werkelijkheid zou de weerstand van de lucht aan de beweging van onzen kogel gauw een eind hebben gemaakt. Maar buiten den dampkring bestaat deze hindernis niet; daar zou zulk een cirkelbeweging praktisch zeer goed mogelijk zijn. Hier hebben wij dus een verklaring voor de cirkelbeweging der hemellichamen uit de wetten der beweging, die op aarde gelden. *Een cirkelbeweging om een middelpunt vindt haar oorzaak in een kracht, die naar dit middelpunt gericht is.*

Tegelijk krijgen we hier nu een goed inzicht in de middelpuntvliedende kracht, die wij reeds bij de aswenteling van de aarde leerden kennen, maar die wij nu eerst goed kunnen beprijpen. Het waren dan ook de onderzoekingen, die *Christiaan Huygens*, in verband met zijn uitvinding van het slingeruurwerk, in 1673 over de middelpuntvliedende kracht bekend maakte, die het verband tusschen een aantrekkende kracht en een cirkelbeweging tot volkomen klaarheid brachten.

Als wij een steen of een ander zwaar voorwerp aan een touw in het rond slingeren, voelen wij dat het touw aan de hand trekt. Hoe komt dat? Wij kunnen antwoorden: door de middelpuntvliedende kracht; maar dan hebben wij het verschijnsel alleen maar een nieuwen naam gegeven. Wij passen dus dezelfde redeneering toe als hier boven. Kon de steen vrij zijn eigen weg volgen, dan zou hij rechtuit vliegen; dat zien wij ook gebeuren, als het touw breekt. Dat hij in een kring rondvliegt komt hierdoor,

dat het touw een kracht op hem uitoefent, hem naar binnen trekt. Wat dat voor kracht is, zien wij nog beter, wanneer wij in plaats van een touw een elastiek nemen. Dit elastiek geeft eerst mee, wanneer de steen rechtuit vliegt; het wordt uitgerekt, omdat de steen zich daarbij van het middelpunt verwijdert. Maar door het rekken wordt het gespannen, en de veerkracht, waarmee het zich tracht samen te trekken, trekt aan den steen en dwingt hem in een cirkel rond te loopen, evenals de zwaartekracht in het vorige voorbeeld den kogel dwong, in een cirkel te loopen. Deze veerkracht voelen wij als een trekken van den steen aan de vingers, die het elastiek vasthouden, en deze trekkende kracht noemen wij middelpuntvliedende kracht. Datzelfde geldt nu ook voor een gewoon touw, alleen met dit verschil, dat de uitrekking, die de spanning veroorzaakt, zoo uiterst klein is, dat wij ze niet bemerken. *De middelpuntvliedende kracht is eenvoudig de spanning in het touw, die den steen dwingt, in een cirkel rond te loopen.*

Het kost nu ook geen moeite, te vinden, hoe groot de middelpuntvliedende kracht is; zij wordt gemeten door den afstand, dien zij in 1 sekonde den steen uit de rechte lijn, die anders zijn weg zou zijn, naar het middelpunt trekt. Beteekent in de onderstaande figuur m a het touw, en doorloopt de steen in 1 sekonde den



weg a c, dan zou hij zonder touw en zonder deze kracht den weg a b zijn gegaan; het eindje b c is de werking van de spanning in 1 sekonde. Wij zien nu dadelijk, dat, wanneer de steen twee keer zoo snel in 't rond geslingerd werdt, b c de werking der kracht in $^1/_2$ sekonde is, en d e, de werking in 1 sekonde, viermaal grooter dan b c is; de middelpuntvliedende kracht wordt dus bij dubbele draaiingssnelheid vier keer zoo groot. Nemen wij een viermaal zoo lang touw, dan wordt bij denzelfden tijd van draaiing de kracht vier keer zoo groot ($gh = 4 \times bc$); dit viermaal langere touw moet in den dubbelen tijd rondgeslingerd worden, om dezelfde middelpuntvliedende kracht te krijgen ($gh = de$). Wat wij vroeger (blz. 134) eenvoudig als resultaat van proefneming en berekening aangaven, vindt dus hier zijn bewijs.

Wij kunnen nu ook de middelpuntvliedende kracht, die uit de aswenteling der aarde ontstaat, beter begrijpen. Wij denken ons het geval, dat een aardsch voorwerp, ergens aan den evenaar, plotseling zijn zwaarte verliest. Wat gebeurt er dan mee? Het bewoog zich tot dusver met een snelheid van 463 meter per sekonde in een cirkel. Wordt het niet meer door de zwaarte tegen de aarde gedrukt, dan behoudt het eenvoudig de beweging, die het heeft, en het vliegt met zijn snelheid van 463 meter in een rechte lijn voort. Deze rechte lijn verwijdert zich steeds meer van het aardoppervlak; op 1 KM. afstand is zij er 8 cM. boven, en dit bedrag neemt toe met het kwadraat van den afstand. Wij zouden dat gewichtlooze ding dus eerst gewoon met ons zien meeloopen; dan rijst het langzamerhand, na 1 sekonde $1^2/_3$ cM., na 2 sekonden 7 cM.; steeds sneller schijnt het te stijgen: het is alsof een kracht — de middelpuntvliedende kracht — het in een gelijkmatig versnelde beweging omhoog trekt. Nu houdt in werkelijkheid de zwaarte de dingen op het aardoppervlak vast; omdat ze zwaar zijn, vallen ze naar beneden, maar toch niet zoo snel als zonder de draaiing der aarde. Laten wij een steen los, dan valt hij als vrij zwevend lichaam met de bekende versnelling naar beneden ten opzichte van de rechte lijn, die anders zijn baan zou zijn; deze rechte baan zou hem in 1 sekonde $1^2/_3$ cM. boven de aarde opgeheven hebben; door de zwaarte valt hij in denzelfden tijd 490 cM. naar beneden; ten opzichte van het aardoppervlak valt hij dus $488^1/_3$ cM. naar beneden. De draaiing der aarde vermindert dus de valsnelheid en de zwaarte met $^1/_{300}$ — wat wij vroeger reeds als uitwerking der middelpuntvliedende kracht vermeld hebben. Wanneer de aarde tweemaal zoo vlug draaide, zou het gewichtlooze voorwerp viermaal zoo snel stijgen; de valhoogte in de eerste sekonde zou dus bij de zware dingen viermaal zooveel, nl. 7 cM. minder zijn dan bij een stilstaande aarde, en in dezelfde verhouding zouden zij minder zwaar drukken. Wanneer de aarde ruim 17 maal sneller om haar as wentelde, zou de stijging 300 maal grooter zijn, dus even groot als de daling door de zwaarte. Dan vallen de aardsche voorwerpen in het geheel niet meer, omdat hun zwaarte door de middelpuntvliedende kracht opgeheven wordt. Zij hebben in het geheel geen gewicht meer; vrij zweven ze met de draaiende aarde mee. Zij verkeeren in hetzelfde geval als onze kanonskogel van vroeger, want daar de aarde dan in $1\frac{1}{2}$ uur om haar as wentelt, vliegen zij met een snelheid van 8 KM. per sekonde voort. Zij loopen dan als vrijzwevende hemellichamen om de aarde heen, dicht bij haar oppervlak, en hun zwaarte is juist voldoende hen in deze cirkelbanen te houden.

---

37. DE OORZAAK VAN DE PLANETENBEWEGING.

Dat de zwaarte niet enkel een aardsch verschijnsel is, was vroeger al dikwijls door schrijvers uit de oudheid en uit lateren tijd gezegd. De bolvormige gedaante van de hemellichamen wees er op, dat hun deeltjes op dezelfde wijze bij elkaar gehouden en naar een middelpunt getrokken werden als bij de aarde. Wij voerden reeds aan (blz. 178) wat Copernicus over de zwaarte bij andere lichamen schreef. Ook Kepler dacht er zoo over, en hij vergeleek de zwaartekracht met de magneetkracht, die kort te voren door den Engelschen arts Gilbert nauwkeurig bestudeerd was. „Zwaarte „is een lichamelijke eigenschap, een wederzijdsch streven van ver„wante lichamen, om zich met elkaar te vereenigen en te ver„binden (waartoe ook de magnetische kracht behoort) zóó, dat de „aarde veel sterker den steen aantrekt dan de steen de aarde." Maar men was niet in staat, deze aantrekkende kracht met de beweging der hemellichamen in verband te brengen. Wel moest, zoodra de zon als middelpunt der planetenbanen erkend was, vanzelf de gedachte opkomen, dat in de zon ook de oorzaak voor het rondloopen der planeten ligt. „Daarvoor, dat de oorzaak van „de planetenbeweging," schreef Kepler, „nergens anders dan in „het zonnelichaam moet gezocht worden, spreken vooral twee „feiten: ten eerste is de beweging van de verstverwijderde pla„neten het langzaamst, en ten tweede loopt elke planeet sneller

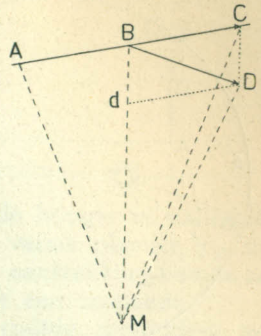
„of langzamer al naar haar afstand tot de zon, zóó, dat zij dicht „bij de zon het snelst, ver van de zon het langzaamst beweegt." Maar hij zocht deze oorzaak in een wenteling van de zon, die de planeten meesleept en ze zoo in hun cirkels doet rondloopen. Dat een zwaartekracht, die de lichamen naar een middelpunt trekt, de oorzaak voor een kringloop om dit middelpunt is — dat kon bij niemand opkomen, zoolang niet de grondslagen der bewegingsleer tot op deze hoogte opgebouwd waren.

Eerst in de tweede helft van de 17de eeuw kon daarom de gedachte opkomen en tot een algemeene overtuiging worden, dat een aantrekkingskracht, die van de zon uitgaat, de beweging van de planeten veroorzaakt. Bewezen was het echter alleen nog maar voor een zuivere cirkelbaan, waarin de kracht en de snelheid altijd even groot blijven. De planeten daarentegen bewegen zich volgens de wetten van Kepler in ellipsen met wisselende snelheid. Is deze beweging ook door een van de zon uitgaande aantrekking te verklaren, en hoe verandert die kracht daarbij met den afstand? Men kon wel van te voren vermoeden, dat op grooter afstand de kracht zwakker moest worden; maar iets zekers was over de wet, die haar beheerschte, niet bekend.

Het antwoord op al deze vragen werd door een Engelsch geleerde, Isaac Newton, gegeven. Hij ging uit van de wetten van Kepler, waarvan de beteekenis nu eerst aan het licht trad, toen hij er door zijn wiskundig vernuft de wetten der aantrekkingskracht uit wist af te leiden.

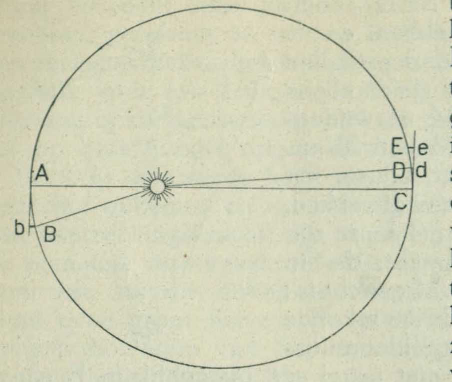
Een cirkelbaan ontstaat door een kracht, die naar het middelpunt is gericht. Bij de planetenbaan staat de zon in een der brandpunten; is hier de kracht naar dat brandpunt gericht? Newton kon deze vraag met behulp van Kepler's wet der perken beantwoorden. Wanneer een lichaam de rechte lijn A B C zonder eenige uiterlijke kracht doorloopt, legt het in elke sekonde een even langen weg A B = B C af. De verbindingslijn van het voorwerp met een middelpunt M strijkt in de eerste sekonde over den driehoek A M B, in de tweede over den driehoek B M C, en deze beide driehoeken zijn even groot. Treedt nu echter voor een oogenblik, terwijl het in B is, een kracht op, die naar het middelpunt M gericht is en het lichaam in 1 sekonde naar d zou brengen, dan komt het door samenvoeging van de beide snelheden in D. De

vlakte, die nu in de tweede sekonde door den voerstraal bestreken wordt, is driehoek B M D; maar deze driehoek is even groot als B M C — dus ook als A M B — omdat ze de zijde B M gemeen hebben, en de toppen C en D even ver van deze grondlijn verwijderd zijn. Deze gelijkheid geldt alleen als C en D even ver van B M verwijderd zijn, dus wanneer d op de lijn B M ligt. Wanneer de in B optredende kracht, alleen, het lichaam op zij van de lijn B M zou aftrekken, dan waren de driehoeken niet gelijk; ze zijn het echter altijd, wanneer de kracht, die in B werkt, naar het middelpunt M gericht is; dan is de bestreken driehoek in de 2de sekonde even groot als in de eerste. Dit geldt natuurlijk ook, wanneer de kracht niet enkel een oogenblik in B een stootje geeft, maar voortdurend werkt en zoo de baan regelmatig buigt. Newton kon op die manier als algemeene waarheid bewijzen, dat, wanneer bij een beweging de gelijkheid der perken ten opzichte van een centrum geldt, er een kracht werkt, die naar dit centrum gericht is; en omgekeerd geldt hetzelfde. En daar wij door de wet van Kepler weten, dat voor de planeten de gelijkheid der perken met betrekking tot de zon geldt, kon Newton als zijn eerste wet vaststellen: de oorzaak van de planetenbeweging is een aantrekkingskracht, die naar de zon gericht is.



Uit de tweede wet van Kepler, die zegt dat de planetenbanen ellipsen zijn, was nu zonder moeite te vinden, volgens welke wet de aantrekkingskracht met den afstand tot de zon verandert. Daartoe vergelijken wij de beide plaatsen van de ellips met elkaar, die aan het einde der groote as tegenover elkaar liggen: de eene het dichtst bij de zon, de andere het verst er af. In die beide plaatsen heeft de baan precies denzelfden vorm, maar zij wordt er met verschillende snelheid doorloopen. Nemen wij zulk een ellips, dat de grootste afstand in C 2 maal zoo groot is als de kleinste afstand in A. Loopt de planeet op beide plaatsen hetzelfde stuk A B = C E in haar baan voort, dan wordt zij in beide gevallen door de zon een even groot bedrag b B = e E van den rechten weg afgetrokken.

Maar deze valhoogten worden niet in denzelfden tijd doorloopen; de weg C E op den grooten afstand tot de zon eischt den dubbelen tijd, omdat hier de snelheid half zoo groot is als in A. Daar de valhoogte in een tweemaal grooter tijd viermaal grooter wordt, zou de planeet in C in denzelfden tijd slechts viermaal zoo weinig naar de zon toe vallen als in A; de valhoogte d D, die bij den halven weg C D en bij hetzelfde tijdsverloop behoort, is $^1/_4$ van b B. De kracht, waarmee de zon de planeet van den rechten weg aftrekt, is dus in C viermaal kleiner dan in A.

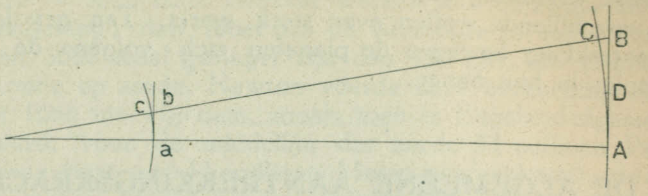


Wij kunnen dezelfde redeneering toepassen op een ellips, waarbij de grootste afstand tot de zon 10 maal grooter is dan de kleinste afstand; de weg in C zou dan voor een gelijk tijdsverloop 10 maal kleiner en de valhoogte 100 maal kleiner zijn dan in A. Zoo vindt men als tweede wet van Newton:

de van de zon uitgaande aantrekkingskracht neemt bij toenemenden afstand in verhouding tot het kwadraat van den afstand af.

Newton bewees streng wiskundig, dat dit ook voor alle andere punten van de ellips opgaat. Uit deze beide eerste wetten van Kepler laat zich dus de wet van de aantrekkingskracht volkomen afleiden. Maar wij kunnen de verandering met den afstand ook nog op andere wijze vinden, namelijk uit de derde wet van Kepler. Wij nemen daarvoor het geval van twee planeten, die zich in cirkels om de zon bewegen, de eene viermaal verder dan de andere. Naar de derde wet moet dan haar omloopstijd 8 maal grooter en haar snelheid half zoo groot zijn als bij de andere. Hebben beide hetzelfde gedeelte van hun baan afgelegd, dan zijn de weg A B en de valhoogte B C bij de verste planeet 4 maal grooter dan bij de andere; om dezelfde valhoogte b c te hebben, moet zij slechts halfzoover, tot D loopen. Deze weg A D is nog tweemaal zoo lang als a c en wordt tweemaal zoo langzaam

doorloopen, eischt dus den vierdubbelen tijd. Op viermaal grooter afstand van de zon is dus een viermaal grooter tijd noodig om



door de werking der zonskracht eenzelfde hoogte te vallen; in gelijke tijden zou dus de valhoogte bij de verste planeet $^1/_{16}$ van die bij de naaste planeet zijn; m. a. w: de aantrekking van de zon vermindert op viermaal grooter afstand tot een zestiende.

Schijnbaar hebben we hier nog eens hetzelfde gevonden, wat wij al wisten. Maar er is toch een verschil. De eerste afleiding leerde ons, dat dezelfde planeet, wanneer zij op den dubbelen afstand van de zon komt, viermaal zwakker aangetrokken wordt. De laatste afleiding leert ons daarentegen, dat een andere planeet op den dubbelen afstand viermaal zwakker aangetrokken wordt dan de eerste; dus, dat verschillende planeten, op gelijken afstand van de zon geplaatst, even sterk door de zon worden aangetrokken en door die aantrekking een even groote versnelling krijgen. Daar wij mogen aannemen, dat de verschillende planeten nu niet precies dezelfde stoffelijke samenstelling hebben, volgt hieruit de derde wet van Newton:

de aantrekkingskracht is onafhankelijk van de bijzondere stoffelijke samenstelling der wereldlichamen.

Zoo was de oorzaak van de planetenbeweging volkomen opgehelderd. De wetten, die op grond van Kepler's berekeningen als niet meer dan ervaringsregels konden gelden, hadden hier tot een algemeene grondwet gevoerd, die ze in zich besloot. Daardoor verdween meteen hun toevalligheid; terwijl te voren niet in te zien was, waarom juist tusschen het kwadraat van den omloopstijd en de derde macht van den afstand een vaste betrekking moest bestaan, en waarom de banen juist ellipsen moesten zijn, kregen deze wetten van Kepler nu een innerlijke noodzakelijkheid als uitvloeisels van een veel algemeenere eenvoudige grondwet. De zon oefent op de planeten een aantrekkingskracht uit, die omgekeerd evenredig met het vierkant van den afstand afneemt en op verschillende stoffen even sterk werkt. Ten gevolge van deze aantrekking bewegen de planeten zich volgens de wetten van Kepler in hun banen.

38. DE ALGEMEENE AANTREKKINGSKRACHT.

Zoo was nu de beweging der planeten in vrijwel ronde ellipsen door een van de zon uitgaande aantrekkingskracht verklaard. Maar de zon is niet het eenige centrum, waaromheen zich hemellichamen in zulke banen bewegen: wij vermeldden reeds de manen, die om Jupiter rondloopen; naderhand waren dergelijke manen bij Saturnus ontdekt, en om de aarde beweegt zich onze eigen maan. Dan moet voor die banen — die ook alle vrij ronde ellipsen zijn — dezelfde verklaring gelden; *ook Jupiter en Saturnus bewerken door hun aantrekking de beweging van hun manen; ook van de aarde gaat een aantrekking uit*, die de maan in haar baan houdt en van dezelfde natuur is als de aantrekkingskracht van de zon.

Maar kennen wij zulk een aantrekking der aarde niet al lang? Wanneer een steen door zijn zwaarte naar beneden valt, is het toch ook een soort aantrekkingskracht, die hem naar beneden trekt. *Is misschien de kracht, die de maan in haar baan houdt, dezelfde kracht, die een steen doet vallen, en die wij tot nog toe zwaartekracht noemden?* Deze vraag beteekent niet, of zij evenals de zwaartekracht werkt; dat weten wij al, want wij hebben in het begin de aardsche zwaarte als voorbeeld van een aantrekkende kracht gebruikt, waaruit een cirkelbeweging ontstaat. De vraag is, of de op de maan werkende kracht de *zwaartekracht zelf* is. Om ze te beantwoorden, behoefde men het niet bij ijdel vragen en filosofeeren te laten; de berekening kon het uitwijzen. Want wanneer de kracht, die de maan van den rechten weg trekt en haar zoo haar baan doet doorloopen, de zwaartekracht zelf is, moet zij bij de maan,

die 60 keer verder van het aardmiddelpunt verwijderd is dan een voorwerp op het aardoppervlak, volgens de boven gevonden wet $60 \times 60 = 3600$ maal zwakker werken dan de zwaartekracht in onze omgeving; dan moet dus de valhoogte in één sekonde bij de maan 3600 maal geringer zijn dan 490 cM., de valhoogte in één sekonde op aarde. Newton voerde deze berekening reeds in het jaar 1666 uit. Hij nam, zooals toen in Engeland algemeen gedaan werd, voor de middellijn der aarde 34 millioen Parijsche voeten aan (wat met 11 millioen Meter overeenkomt); de afstand van de maan, 30 maal meer, wordt dan 330 millioen M., de lengte van haar baan 2070 millioen M. Deze baan wordt in $27\,^1/_3$ dag $= 27\,^1/_3 \times 86400 = 2\,360\,000$ sekonden doorloopen: per sekonde legt de maan dus een weg van 877 M. af. Naar den bekenden, vroeger vermelden regel (blz. 242) is dan de valhoogte van de maan in 1 sekonde 0.00117 M. = 1.17 millimeter (want $877 \times 877 = 0.00117 \times 660$ millioen). De valhoogte op aarde moet dan 3600 maal grooter zijn; 3600×1.17 mM. = 4.21 Meter. De werkelijke valhoogte op aarde is echter 4.90 M., dus aanmerkelijk meer. Teleurgesteld legde Newton zijn berekeningen weg; zijn mooi en eenvoudig idee had de proef niet doorstaan, want uit de berekening was gebleken, dat buiten de gewone aardsche zwaarte nog een andere kracht op de maan moest werken.

Zoo meende hij. Maar in 1682 vernam hij toevallig, dat de Fransche graadmeting, die Picard in 1671 voltooid had, een belangrijk grootere waarde voor den omvang der aarde opgeleverd had dan hij had aangenomen. Hij had inderdaad de aarde en dus ook de maanbaan aanmerkelijk te klein aangenomen, hoewel Snellius vroeger al een veel juister bedrag gevonden had. Hij ging toen opnieuw aan het werk en nu met een heel ander resultaat. Neemt men, zooals het moet, voor den omvang der aarde 40 millioen M., voor de maanbaan 2400 millioen M. en voor haar middellijn 762 millioen M. aan (dus alles $^1/_6$ à $^1/_7$ meer), dan vindt men voor de snelheid van de maan 1017 M. per sekonde en voor haar valhoogte in één sekonde 1.36 mM. Dit met 3600 vermenigvuldigd, geeft 4.90 meter voor de valhoogte op aarde, precies wat het zijn moet.

Hetzelfde resultaat is ook nog op andere wijze af te leiden. Wij vonden vroeger, dat een kogel, horizontaal met zoo groote snelheid afgeschoten, dat hij in een cirkelbaan om de aarde loopt, daarvoor 5070 sekonden = 1.41 uren noodig zou hebben. Zulke om de aarde rondloopende lichamen kan men zich ook verder van de aarde voorstellen; en wanneer de zwaarte op grooter afstand van de aarde met het vierkant van den afstand afneemt, moeten omloopstijd en afstand van al die lichamen aan de derde wet van Kepler gehoorzamen. Wat moet dan de omloopstijd van een lichaam zijn, dat onder de werking der zwaartekracht op maansafstand rondloopt? Is zijn afstand 60 maal zoo groot als bij onzen vroegeren kogel, dan moet zijn omloopstijd 466 maal zoo groot zijn (60 × 60 × 60 is nagenoeg 466 × 466) dus 466 × 1.41 uren = 657 uren = $27^1/_3$ dag, precies de omloopstijd van de maan. Onder de werking van de aardsche zwaartekracht moet, wanneer ze volgens de wet van Newton afneemt, een lichaam op den afstand van de maan zich juist zoo bewegen als de maan het doet. De kracht, die de maan in haar baan doet loopen, is dus de aardsche zwaartekracht zelf.

Door deze ontdekking was meteen het wezen van de aantrekkingskracht der zon opgehelderd. Zij was niet een soort van magneetkracht, die „verwante" lichamen — zooals Kepler het uitdrukte — naar elkaar toedrijft; zij is niets anders dan de van ouds bekende zwaartekracht. Daarom noemde Newton haar ook, als een soort meer algemeen geldige zwaarte: de gravitatie (gravitas is het latijnsche woord voor zwaarte): „de planeten graviteeren naar de zon," d.w.z. zij zijn zwaar naar de zon, zooals een steen zwaar is naar de aarde. De zwaartekracht huist in de aarde en trekt de steenen en ook de maan naar deze toe; zij huist in de zon en trekt alle planeten, ook de aarde, naar de zon toe; zij huist in de planeten, wat niet slechts hun manen bewijzen, maar ook hun ronde vorm aantoont. Zij moet dus aan alle wereldlichamen als eigenschap toekomen.

Is nu deze eigenschap aan die lichamen zelf gebonden? Zou een gedeelte van de zon, als het van de geheele zon gescheiden werd, niet ook nog een aantrekking uitoefenen? Wanneer men eenmaal weet, dat de aantrekking in alle wereldlichamen huist, ligt het voor de hand, haar ook aan de samenstellende deelen van deze lichamen toe te kennen, en de aantrekkingskracht van de zon als de totaalsom van de aantrekking van al haar deelen op te vatten. Was de aantrekking tot nog toe alleen opgetreden als een op de wereldbollen werkende kracht, die hun beweging in ellipsen naar Kepler veroorzaakte, zoo kreeg zij nu een veel omvattender beteekenis: de aantrekking is een algemeene eigenschap van de stof. Op dit principe bouwde Newton in zijn hoofdwerk, dat in 1686 verscheen: „Wiskundige beginselen der natuurfilosofie," zijn theorie ter verklaring der hemelsche bewegingen op, die nog steeds als het fundament der astronomie en als een der belangrijkste aanwinsten der menschelijke kennis geldt. Dat was echter alleen mogelijk, doordat hij tegelijk de leer van de bewegingen en krachten, waarvan Galilei het begin opgebouwd had, tot algeheele klaarheid en volmaaktheid bracht.

Wij vonden, dat lichte en zware lichamen onder den invloed der zwaarte even snel vallen, of juister uitgedrukt, met dezelfde versnelling vallen. Wil dat zeggen, dat de aarde ze even sterk aantrekt? Natuurlijk niet; wij voelen met de hand het verschil in deze aantrekking als een verschil in zwaarte; een groote steen wordt door de aarde sterker aangetrokken dan een kleine, en de grootte van die aantrekking wordt ons juist door het gewicht aangegeven. Hoe komt het dan, dat de groote steen, die de grootste kracht ondervindt, niet veel sterker, met grooter versnelling valt, dan de kleine?

Het antwoord op die vraag wordt door het vroeger (bij de behandeling van de tegenwerpingen tegen de beweging der aarde) vermelde feit gegeven: een zelfde kracht brengt een licht voorwerp gemakkelijker in beweging dan een zwaar lichaam. Om bij verschillende lichamen — zoo werd daar gezegd — eenzelfde verandering in de voorhanden beweging (of rust) te bewerken, is een des te grooter kracht noodig, naarmate het lichaam zwaarder is. Wij kunnen nu echter het gewicht niet meer als de beste uitdrukking gebruiken voor de mate, waarin een kracht op een lichaam werkt; terwijl wij het vroeger voor iets hielden, dat voor elk lichaam vast bepaald en onveranderlijk was, weten wij nu, dat het gewicht, als werking van de aantrekkingskracht, met de plaats wisselt. Een ding, dat hier een pond weegt, zou op maansafstand gebracht, slechts $^1/_{3600}$ van een pond wegen; en ook in Afrika weegt het minder dan hier. Toch zou eenzelfde stoot het daarginds geen grooter snelheid geven dan hier. Wat de werking van een kracht op een voorwerp bepaalt, is niet zijn gewicht, dat slechts iets uiterlijks en veranderlijks is, maar zijn massa, die iets innerlijks en blijvends uitdrukt en ook wel als hoeveelheid stof betiteld wordt. Bij de voorwerpen in onze omgeving, die alle onder de werking van dezelfde aantrekkingskracht staan, kennen wij de massa aan het gewicht; daarom spreken wij zoo dikwijls van gewicht, waar wij de massa bedoelen. Wie een pond suiker koopt, is het om een bepaalde massa, een bepaalde hoeveelheid suiker te doen; in Afrika bedoelt hij niet iets minder suiker te krijgen, al is het gewicht daar ook minder; het gewicht dient alleen om de juiste hoeveelheid af te meten.

Een steen, die 5 maal zoo zwaar is als een andere, heeft dus ook een 5 maal grootere massa en komt daarom 5 maal moeilijker in beweging; een 5 maal grootere kracht is noodig, om hem, als zij voortdurend werkt, dezelfde versnelling te geven. Wij kunnen nu onze vroegere stelling van blz. 160 scherper en juister uitdrukken: Om bij een voorwerp een bepaalde verandering der beweging te bewerken, is een kracht noodig, die evenredig is met de massa van het voorwerp. En daar wij vroeger reeds vonden, dat de versnelling in gelijke reden met de grootte van de kracht grooter of kleiner wordt, kunnen wij nog algemeener zeggen: de kracht is evenredig met het produkt van de door haar bewerkte versnelling en de massa van het voorwerp.

Nu is elke tegenstrijdigheid opgeheven. De groote steen van 5 pond wordt wel met een 5 maal grootere kracht door de aarde aangetrokken dan de steen van 1 pond; maar deze 5 maal grootere kracht moet een 5 maal grootere massa in beweging brengen, en daardoor krijgt de groote steen precies dezelfde versnelling als de kleine. En omgekeerd kunnen we nu zeggen: daar de ondervinding ons leert, dat alle voorwerpen bij het vallen dezelfde versnelling krijgen, besluiten wij daaruit — wat wij straks eenvoudig aangenomen hebben — dat bij al deze voorwerpen gewicht (de kracht van de aarde) en massa precies evenredig met elkaar zijn. Maar nu zal ons deze gevolgtrekking niet meer dienen, om iets over de grootte van de massa te weten te komen, doch omgekeerd, om een eigenschap van de aantrekkingskracht uit te

drukken. Om het verschil in gedrag tusschen verschillend zware lichamen vast te houden nadat wij ingezien hadden, dat gewicht en zwaarte zelf iets toevalligs en veranderlijks zijn, hebben wij daaruit de massa als eenvoudigst grondbegrip afgeleid, dat het verschil in gedrag der voorwerpen uitdrukt in een grootheid, die voor elk ding vast en onveranderlijk is. En vinden wij nu, uit de gelijkheid der versnellingen, dat gewicht en massa steeds in dezelfde verhouding tot elkaar staan, dan beteekent dit: de aantrekkingskracht, die de aarde op een voorwerp uitoefent, is evenredig met de massa van dit voorwerp. Omdat de groote steen een 5 maal grootere massa heeft, daarom wordt hij door de aarde 5 maal sterker aangetrokken, en daarom weegt hij 5 maal zoo zwaar.

Deze kracht hangt natuurlijk niet enkel van de massa van den steen (en van den afstand) af. Konden wij de aarde in twee helften verdeelen, dan zou iedere helft den steen nog maar met halve kracht aantrekken. De aantrekkingskracht is ook evenredig met de massa van het aantrekkende lichaam. Konden wij uit de aarde een steen van 10 pond, die misschien het duizendtrillioenste deel van de geheele aarde mag zijn, afzonderen en op zijn eentje op denzelfden afstand van ons als het aardmiddelpunt plaatsen, dan zou deze op onzen vijfpondssteen een aantrekking uitoefenen, die slechts een duizendtrillioenste van zijn gewicht, van 5 pond, zou bedragen. Maar wordt deze aantrekking nu enkel door den tienpondssteen op den vijfpondssteen uitgeoefend? De een is evengoed een deel van de aarde als de ander. Of trekken misschien alleen de groote lichamen de kleine aan? Wij behoeven slechts onzen tienponder in tien stukken van 1 pond te verdeelen, die ieder met een tiende van de eerste kracht den vijfponder aantrekken, om te zien, dat dat geheel onaannemelijk is. Wij kunnen de dingen niet in twee groepen verdeelen, zoo, dat de eene soort, de grooten, de aantrekking alleen uitoefenen, en de anderen, de kleinen, de aantrekking ondergaan. Ook de wereldlichamen bewijzen dat: de aarde ondergaat, als alle planeten, de aantrekking van de zon; zijzelf trekt de maan aan; waarom zou zij alleen op de maan en niet ook op de zon een aantrekkingskracht uitoefenen? Al zulke tegenstrijdigheden zijn alleen te vermijden, als men aanneemt, dat niet slechts sommige lichamen andere aantrekken, maar dat alle lichamen elkaar aantrekken. De aantrekking werkt tusschen elke twee lichamen en tracht ze naar elkaar toe te trekken met een kracht, die van hun beider massa's op dezelfde wijze afhangt, en waarin beide volkomen dezelfde rol spelen; beide trekken aan en beide worden aangetrokken. Op het eerste gezicht lijkt het vreemd, dat, zonder dat wij het bemerken, de aarde de zon even sterk zou aantrekken als de zon de aarde; maar een kort nadenken toont ons, dat het niet anders kan zijn.

De aarde trekt den steen aan; maar met dezelfde kracht trekt de steen de aarde aan. Waarom valt dan alleen de steen naar de aarde en niet omgekeerd ook de aarde naar den steen? Er is geen enkele reden, waarom de aarde niet naar den steen toe zou vallen, want de aarde zweeft even vrij in de wereldruimte als de steen. Beide lichamen bewegen zich dus naar elkaar toe, de steen wordt naar beneden en de aarde met dezelfde kracht naar boven getrokken. Daar echter de aarde wel duizendtrillioen maal grooter is dan de steen, dus ook haar massa zooveel grooter dan die van den steen moet zijn, bewerkt dezelfde kracht bij haar een versnelling, die duizendtrillioen maal kleiner is dan bij den steen. In denzelfden tijd dat de steen een meter naar beneden valt, valt de aarde een trillioenste millimeter naar den steen toe, naar boven. En wie zou meenen, dat daardoor dan toch de plaats van de aarde in het heelal dit kleine bedrag gewijzigd zou worden, vergist zich ook nog daarin; want toen ik te voren den steen opbeurde, dus de aarde en den steen tegen hun wederzijdsche aantrekking in van elkaar verwijderde, door met de hand den steen aan te vatten en met de voeten tegen de aarde te drukken, werd de aarde ditzelfde bedragje van een trillioenste millimeter naar beneden geduwd, terwijl de steen een meter omhoog ging; bij het vallen nemen beide hun oude plaats weer in.

Wij zien hier nu, waarom wij de aantrekkingskracht eerst als een eenzijdige werking van het eene ding op het andere leerden kennen. Van de lichamen, bij welke wij haar ontmoetten, was altijd het eene veel grooter dan het andere, en daarom bemerkten wij alleen de beweging van het kleine lichaam: het vallen van den steen op de aarde, het rondloopen van de planeet om de zon — de beweging van het groote lichaam was onmerkbaar. Eerst door

deze theoretische redeneeringen konden wij tot het eigenlijke wezen doordringen. En zoo kon Newton zijn wet der aantrekking, onafhankelijk van planeten, zon en aarde, als een algemeene grondwet der natuur in dezen vorm vaststellen:

alle stofdeeltjes, die de lichamen van het heelal samenstellen, trekken elkaar aan met een kracht, die met beider massa evenredig is en omgekeerd evenredig met het vierkant van hun afstand.

Van een bepaalden afstand kan men natuurlijk alleen bij kleine deeltjes, bij punten spreken. De aantrekking van een geheel lichaam is dan het totaal der aantrekkingen van al zijn deeltjes. De zwaarte van een steen ontstaat hierdoor, dat alle deeltjes die te zamen de aarde vormen en waarvan sommige dichtbij, vlak onder onze voeten liggen en andere zeer ver af, den steen aantrekken en deze aantrekkingen zich samenvoegen. Wiskundig laat zich bewijzen, dat bij een bolvormig lichaam de totale aantrekking precies zoo groot is, als wanneer de geheele massa in zijn middelpunt verzameld was. De aarde trekt den steen op haar oppervlak en de maan in de verte juist zoo aan, alsof zij alleen met haar middelpunt aantrekt; deze eigenschap, waarvan wij als iets vanzelfsprekends al gebruik gemaakt hebben, veroorlooft, de wet der aantrekking ineens op groote wereldbollen toe te passen, en daarbij van „hun" afstand te spreken, evenalsof zij kleine punten zijn.

De massa van een hemellichaam bepaalt dus de aantrekkingskracht, die het uitoefent; deze massa is het grondelement, dat wij moeten kennen, om de aantrekking te kunnen berekenen; wij willen dus in de eerste plaats de massa van de zon kennen in verhouding tot die van de aarde. Daartoe moeten wij hun werkingen vergelijken, die voor de zon uit de beweging van de aardplaneet, voor de aarde uit de baan van de maan blijkt. Dat kan echter alleen, wanneer wij de grootte der aardbaan, d.w.z. den afstand van de zon tot de aarde nauwkeurig kennen.

In de oudheid was over dezen afstand niets zekers bekend; ook Copernicus, Tycho en Kepler behielpen zich nog met de uitkomst van Aristarchus (zie blz. 56). Maar juist ten tijde van Newton was zij voor het eerst met eenige zekerheid gemeten. Het daarbij toegepaste beginsel is hetzelfde als vroeger bij de maan uitgelegd is (blz. 80), alleen met dit verschil, dat niet de parallaxe van de zon zelf, maar van Mars bepaald werd, die in zijn oppositie veel dichter bij ons is. Daartoe diende de reis van Richer naar Cayenne in 1672. In Cayenne, waar Mars hoog aan den hemel stond, zag hij hem noordelijker tusschen de sterren staan, dan de sterrekundigen te Parijs, voor wie Mars laag in het Zuiden stond; dit verschil leverde de parallaxe en den afstand van Mars, en uit de tafels van Kepler was te zien, hoeveel malen de zon verder dan Mars van de aarde af stond. Zoo werd gevonden, dat de zon 20 000 aardstralen van ons verwijderd is en een parallaxe van 10 seconden bezit. Daar de maan 60 aardstralen verwijderd is, is de zon ruim 330 maal verder dan de maan van ons verwijderd.

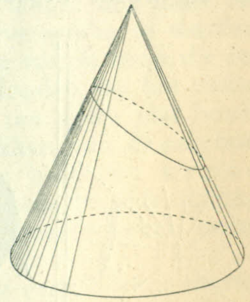
Nu is de berekening van de massa der zon niet moeilijk meer. Wij stellen eerst de vraag: hoever zou een maan van de aarde verwijderd moeten zijn, om in een jaar rond te loopen? De derde wet van Kepler geeft het antwoord: daar het kwadraat van $13^1/_3$ gelijk is aan de derde macht van 5,6, zal een maan, die 5,6 keer verder dan onze maan van de aarde verwijderd is, in $13^1/_3$ maal langeren tijd, dus juist in een jaar rondloopen. Om de zon en de aarde beide loopt dan een hemellichaam in een jaar rond; maar de baan van het om de zon loopende lichaam is $^{330}/_{5\cdot6}$ = 59 maal grooter dan de andere. Alles in deze baan, dus ook het bedrag, dat het lichaam in 1 sekonde van den rechten weg afgetrokken wordt, de werking dus van de aantrekking de zon, is 59 maal grooter dan de werking van de aarde. Maar deze zonswerking vindt op 59 maal grooteren afstand plaats; 59 maal dichterbij, dus op gelijken afstand als de aarde op het om haar loopend lichaam werkt, zou ze nog 59×59 keer sterker zijn. Op gelijken afstand moet dus de werking van de zon $59 \times 59 \times 59 = 205000$ maal sterker zijn dan die van de aarde.

Nu hebben de nauwkeurigste moderne metingen voor de parallaxe van de zon een nog iets kleiner bedrag, nl. 8.8 sekonden opgeleverd, dus een iets grooteren afstand, nl. 23400 aardstralen. Daarmee worden alle getallen eenigszins anders; de zon is in werkelijkheid 389 maal verder dan de maan van ons verwijderd; in plaats van 59 moet ruim 69 gelezen worden, en *de massa van de zon is 330 000 maal grooter dan de massa van de aarde.*

39. DE UITWERKINGEN DER AANTREKKINGSKRACHT.

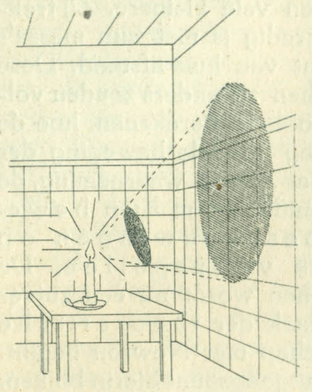
De grondwet, die de beweging der wereldlichamen beheerscht, is nu bekend. In de wereldruimte bevinden zich meerdere bolvormige lichamen, een zeer groot, de zon, en vele kleinere. Zij trekken elkaar aan met een kracht, die evenredig is met hun massa's en omgekeerd evenredig met het vierkant van hun afstand. Deze kracht trekt hen uit den rechten weg, dien ze anders zouden volgen. Daar deze kracht nu bekend is, is ook te berekenen, hoe de lichamen zich bewegen. Terwijl tot nog toe de beweging der hemellichamen en haar wetten alleen maar uit de waarneming, de ervaring te vinden was, hebben wij nu een middel, *om hun beweging door zuiver theoretische beschouwingen op het papier te berekenen en te voorspellen.* De beweging van een hemellichaam berekenen wordt nu een zuiver theoretisch vraagstuk; dit is de groote taak der *theoretische sterrekunde*, die als nieuwe wetenschap met Newton begint. Daarbij moet dan de juistheid van het uitgangspunt hierin blijken, dat wat door berekening gevonden wordt, in de praktijk aan den hemel ook werkelijk uitkomt.

Het eerst stelde Newton zich deze vraag: welke baan moet een lichaam doorloopen, dat door de zon aangetrokken wordt? Wij weten al, dat een ellips zulk een baan is; maar zij kan ook nog anders zijn. Met behulp van de hoogere wiskunde, waarvan de grondslagen in de 17de eeuw door Descartes, Leibnitz en Newton zelf gelegd waren, kon men bewijzen, *dat de baan van een lichaam, dat door de zon volgens de wet van Newton wordt aangetrokken, altijd een kegelsnede moet zijn, met de zon in het brandpunt.*



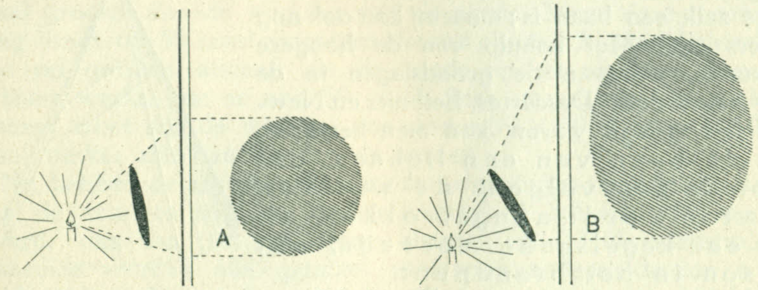
Kegel met snede.

Wat is een kegelsnede? De naam zegt het reeds; de figuur, die men krijgt bij het doorsnijden van een kegel — een kegeloppervlak krijgt men door een lijn, die in één punt als draaipunt vastgehouden wordt (de top), langs een cirkel te laten glijden. Men kan deze figuren ook gemakkelijk te zienkrijgen, zonder dat men iets doorsnijdt. Zet men een kaars (of een ander licht) op tafel, en houdt men een eindje daarvandaan een ronde schijf, b.v. een deksel, dan ziet men achter dat deksel op den muur zijn schaduw. De ruimte, die in



de schaduw ligt en verder van het deksel aldoor breeder wordt, heeft de gedaante van een kegel, waarvan de vlam de top is, vanwaar de lichtstralen als rechte lijnen uitgaan. De muur doorsnijdt dezen donkeren kegel, en de doorsnee, de zwarte figuur op den muur, is een kegelsnede.

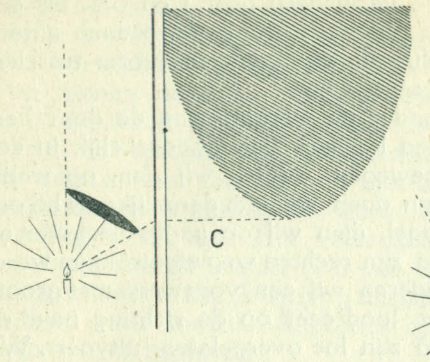
Houdt men het deksel rechtop tusschen de vlam en den muur, dan is de schaduw op den muur een cirkel. Wordt het deksel iets hooger en meer schuin gehouden, dan vertoont zich als schaduwfiguur de ons reeds bekende ellips (A). De ellips en de cirkel behooren beide tot de kegelsneden. Houdt men het deksel steeds hooger en schuiner, dan ziet men de zwarte ellips op den muur naar boven sterk groeien (B); zij wordt langwerpiger, maar niet doordat zij smaller wordt — zij wordt breeder en beneden stomper, want de kleine as



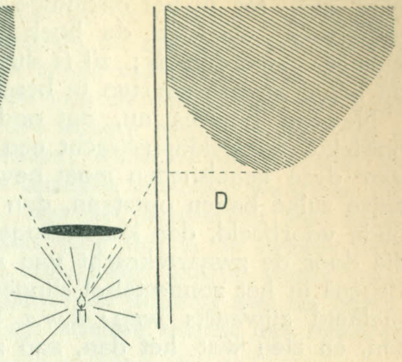
Schaduwellipsen.

wordt grooter — maar doordat de groote as sterker toeneemt dan de kleine as. Houden wij eindelijk het deksel zoo hoog, dat

de bovenrand juist boven de vlam komt, dan kan geen lichtstraal meer over dezen rand heen op den muur vallen, hoe hoog deze



Schaduwparabool.

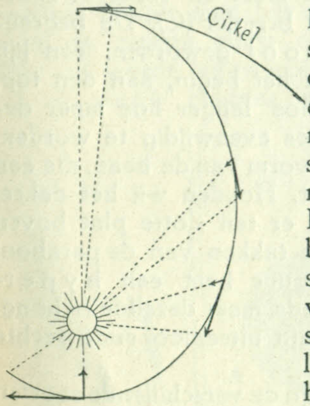


Schaduwhyperbool.

zich ook uitstrekt. De schaduw is naar boven tot in het oneindige gegroeid, er is boven geen einde of spits meer en vanaf de benedenste top wordt zij naar boven steeds breeder (C). De begrenzing van de schaduw is nu een p a r a b o o l geworden, een lijn met twee oneindig lange takken, die in het begin, aan den top, sterk uiteenloopen, maar dan verder hoe langer hoe meer dezelfde richting krijgen, zonder ooit precies evenwijdig te worden. Wij kennen deze figuur ook al als den vorm van de baan, die een schuin naar boven geworpen steen volgt. Houden wij het deksel nog verder boven de vlam, zoodat het er ten slotte plat boven ligt (zooals in D), dan ziet men de beide takken van de parabool steeds verder uiteen buigen. Zulk een figuur heet een h y p e r b o o l; de beide takken krijgen niet steeds meer dezelfde richting, maar naderen steeds meer tot twee schuin uiteenloopende rechte lijnen.

Cirkel, ellips, parabool en hyperbool zijn de verschillende soorten van kegelsneden. Alle cirkels en ook alle parabolen zijn gelijk van vorm en alleen verschillend in grootte. Daarentegen verschillen de ellipsen, en evenzoo de hyperbolen, onderling zeer in vorm; ellipsen kunnen ronder of langwerpiger zijn, en bij de hyperbolen kunnen de beide beenen in hun eindelijke richting een kleinen scherpen of een zeer grooten stompen hoek met elkaar maken. Een parabool is als een ellips op te vatten, waarvan het eene eind zich tot in het oneindige verwijderd heeft; en ook als een hyperbool, waarvan de hoek tusschen de beide beenen aldoor kleiner geworden is; zij is dus als een overgangsvorm tusschen de beide andere soorten te beschouwen.

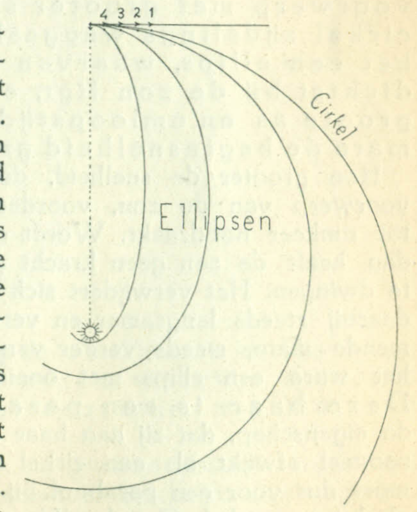
Newton bewees nu, dat onder de werking van de door hem ontdekte aantrekkingskracht een lichaam zich noodzakelijk in een van deze kegelsneden moet bewegen. Willen wij zien, op welke wijze zulke banen ontstaan, dan doen wij iets dergelijks als bij ons oude voorbeeld, den kanonskogel, dien wij op aarde afschoten en die door de zwaartekracht van zijn rechten weg afgetrokken werd. Ergens in het zonnestelsel slingeren wij een voorwerp met groote snelheid zijwaarts weg: d.w.z. loodrecht op de richting naar de zon, en zien wat het dan, aan zijn lot overgelaten, uitvoert. Wij weten reeds, dat het bij een zekere bepaalde snelheid een cirkelbaan gaat beschrijven. Wat gebeurt er echter, wanneer het met een kleinere snelheid weggeslingerd wordt?



Hoe een ellipsbaan ontstaat.

Wanneer op aarde een kogel met een kleinere snelheid dan 8 KM. wordt afgeschoten, komt deze al dalende steeds dichter bij de aardoppervlakte en valt eindelijk op den grond. Zoo gaat het ook met ons voorwerp, alleen met dit verschil, dat er geen vaste grond is, die het na korten tijd opvangt en tegenhoudt. Het gaat steeds voort met verder naar beneden te vallen, de baan wordt steeds steiler naar beneden gebogen en het voorwerp komt, terwijl de snelheid toeneemt, steeds dichter bij de zon. Het kan natuurlijk niet recht naar de zon toe vallen, want het behoudt altijd zijn zijdelingsche beweging: wij weten al, dat bij zulk een beweging de wet der perken geldt. Het schijnt, alsof het door zijn snelle vaart voorbij de zon zal schieten; maar hoe dichter het bij de zon komt, des te sterker buigt de snel

toenemende aantrekking van de zon zijn baan naar binnen. En eerst als het aan den anderen kant van de zon is gekomen, recht tegenover het punt van uitgang, gelukt dit voorbijschieten. Op die plaats is zijn beweging loodrecht op de richting naar de zon; hier is het voorwerp op zijn dichtst bij de zon gekomen, en van hier verwijdert het zich door zijn snelle vaart weer van de zon. Dan komen dezelfde verschijnselen van de eerste helft der baan in omgekeerde volgorde terug. De andere helft van de baan is precies het spiegelbeeld van de eerste; want als het voorwerp uit dit naaste punt bij de zon met dezelfde snelheid, waarmee het aankwam, teruggeslingerd werd, zou het denzelfden weg terug doorloopen hebben. Het verwijdert zich dus in de tweede helft der baan steeds verder van de zon, loopt daarbij steeds langzamer en komt eindelijk weer op zijn punt van uitgang met de beginsnelheid aan, zoodat het precies op dezelfde manier een tweeden omloop kan beginnen.



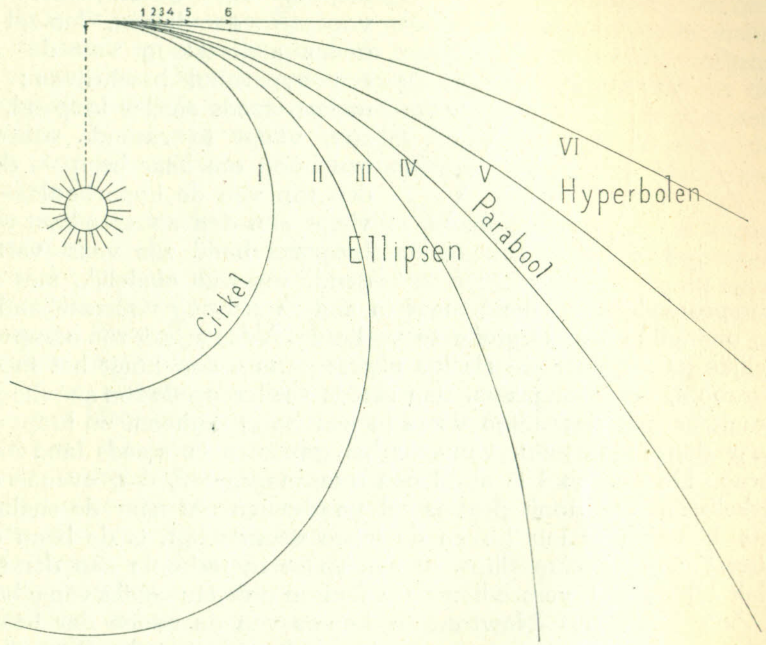
Verschillende ellipsbanen.

Deze baan is een ellips, waarbij het punt van uitgang het uiteinde der groote as is, die het verst van de zon verwijderd is. Hoe kleiner de beginsnelheid en dus ook het in een bepaalden tijd overstreken perk, des te smaller en uitmiddelpuntiger is de ellips, des te kleiner de groote as, des te dichter komt de planeet bij de zon, des te korter is de omloopstijd en des te grooter de gemiddelde snelheid. Als uiterste grens kan men het geval nemen, dat het voorwerp in het begin in het geheel geen snelheid kreeg en regelrecht naar de zon toe viel. Wij vinden dus: wanneer een lichaam met kleiner snelheid dan die van den cirkel zijdelings weggeslingerd wordt, doorloopt het een ellips, waarbij het punt van uitgang het verste punt is, en *die des te meer naar binnen ligt, des te excentrischer is en des te kleiner omloopstijd heeft, naarmate de beginsnelheid kleiner is.*

Wij nemen nu het omgekeerde geval, waarbij het lichaam met een grootere snelheid dan die van een cirkelbaan weggeslingerd wordt. Het valt dan minder sterk naar de zon toe dan bij een cirkelbeweging — onze vroegere kogel, met nog grooter snelheid dan 8 KM. voortgeschoten, zou dan minder sterk naar beneden buigen dan het aardoppervlak, dus schijnbaar langzaam omhoog stijgen. Het voorwerp verwijdert zich dus van de zon en zijn beweging wordt langzamer. Het verkeert in hetzelfde geval als ons, vorig lichaam, toen het het naaste punt bij de zon gepasseerd was en de tweede helft van zijn baan begon af te leggen. Het beschrijft dus óók een ellips en komt tegenover het punt van uitgang in het verste punt van zijn baan. *Wanneer dus een voorwerp met grooter snelheid dan die van den cirkel zijdelings weggeslingerd wordt, beschrijft het een ellips, waarvan het punt van uitgang het dichtst bij de zon ligt, en waarvan excentriciteit, groote as en omloopstijd des te grooter zijn, naarmate de beginsnelheid grooter is.*

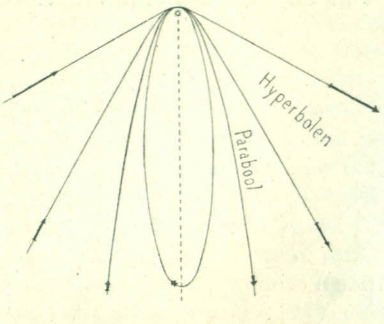
Hoe grooter de snelheid, des te verder verwijdert zich het voorwerp van de zon, voordat deze het eindelijk terugbuigt en tot omkeer noodzaakt. Wordt de snelheid eindelijk nog grooter, dan heeft de zon geen kracht genoeg het voorwerp tot omkeer te dwingen. Het verwijdert zich steeds verder van de zon, wordt daarbij steeds langzamer en verwijdert zich, zij het ook in afnemende mate, steeds verder van de as der baan; de baan is als het ware een ellips met oneindig lange groote as geworden. *Deze baan is een parabool.* Nu heeft een parabool de eigenschap, dat zij aan haar top van een rechte lijn juist half zooveel afwijkt als een cirkel om het brandpunt. De valhoogte moet dus voor een parabool bij gelijken weg half zoo groot zijn als bij een cirkel. Om dezelfde valhoogte te vinden moet de afgelegde weg bij een parabool dus 1.41 maal zoo groot zijn als bij een cirkel (want $1.41 \times 1.41 = 2$). *De baan wordt dus een parabool, als de beginsnelheid ruim 1,4 maal zoo groot is, als voor een cirkel noodig was.*

Is de beginsnelheid nog grooter, dan is de zon nog veel minder in staat, het lichaam naar de as terug te trekken. Het verwijdert zich steeds verder van de zon en van de as, en vliegt ten slotte



haast rechtuit in schuine richting de wereldruimte in. *De baan is dan een hyperbool geworden, waarvan de beide beenen des te verder uiteenstaan, naarmate de beginsnelheid grooter is.*

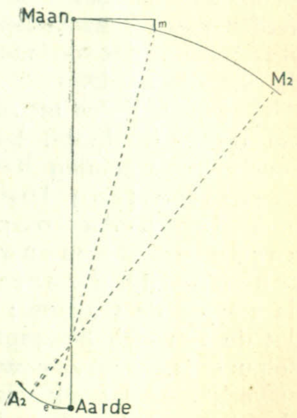
Volgen wij zulk een voorwerp op grooten afstand van de zon, dan zien wij het, als het een parabool beschrijft, zich ongeveer in de richting van de as langzaam voortsleepen, alsof al zijn snelheid uitgeput is — inderdaad behoefde deze maar iets kleiner te zijn, en het voorwerp zou naar de as toe getrokken worden, en in een langgestrekte ellips naar de zon terug vallen. Op de hyperbool daarentegen snelt het met een flinke vaart voort, en nadert de snelheid bij de verwijdering van de zon steeds meer tot een eindbedrag, dat des te grooter blijft naarmate de beenen verder uiteen staan. Komt uit de diepten der wereldruimte een voorwerp aanvliegen, dan zal het onder aantrekking van de zon een hyperbool beschrijven; het nadert, steeds sneller loopend, de zon, vliegt in razende vaart in een boog om haar heen — door den top van de hyperbool — en vliegt aan den anderen kant weg, langzamerhand zijn vaart vertragend, om zich eindelijk, met zijn oorspronkelijke snelheid maar in andere richting voortsnellend, in de oneindige wereldruimte te verliezen. Was echter zijn oorspronkelijke eigen snelheid slechts uiterst gering, dan komt het in een parabool, eerst langzaam, dan steeds sneller op de zon aanvliegen, draait er met geweldige vaart in een boog omheen, en loopt dan naar denzelfden kant, vanwaar het gekomen is, steeds langzamer terug. De parabool is altijd een overgangsgeval, dat, evenals een cirkelbaan, wel nooit precies zal voorkomen. Al naar de snelheid iets beneden of iets boven de juiste waarde ligt, is de baan een uiterst langgestrekte ellips, of een spitse hyperbool; aan den top, vlak bij de zon verschillen deze figuren ook nauwelijks van elkaar.



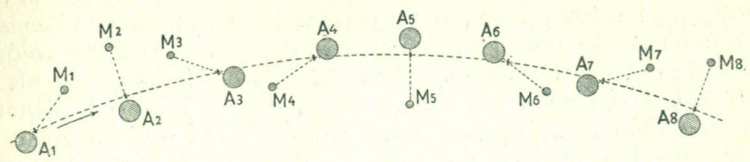
Zoo heeft dus Newton de kennis van de banen der hemellichamen buitengewoon uitgebreid en dieper gemaakt. Terwijl de ervaring te voren slechts getoond had, hoe het bij sommige hemellichamen was, bewees hij door zijn theorie, hoe het noodzakelijk moest zijn. De ellipsen, die Kepler bij de planeten ontdekt had, bleken hier slechts het bijzondere geval van een veel algemeener regel te zijn. Zij zijn niet de eenige banen, die bij hemellichamen mogelijk zijn, als ze door de zon worden aangetrokken; maar zij zijn de eenig mogelijke banen voor hemellichamen, die altijd in de buurt van de zon blijven en voor altijd vaste leden van het zonnestelsel zijn. De andere banen behooren bij lichamen, die uit oneindige verte komen aanvliegen, het zonnestelsel eenmaal bezoeken en dan weer voorgoed verdwijnen.

In de aantrekkingskracht van Newton bezitten wij dus nu een algemeene wereldwet, die de wetten van Kepler als bijzonder geval omvat, maar zelf veel ruimer en algemeener is. Maar ook in anderen zin brengen de ontdekkingen van Newton ons verder dan wij door de wetten van Kepler waren. De beweging van de maan om de aarde en van de planeten om de zon, zooals die volgens de wetten van Kepler plaats vindt, hebben wij afgeleid uit de aantrekking, die de aarde op de maan, die de zon op de planeten uitoefent. Maar wij weten nu, dat omgekeerd ook de maan de aarde en elke planeet de zon aantrekt. Wat heeft dat voor gevolgen?

De maan trekt de aarde aan met dezelfde kracht als de aarde de maan aantrekt. Daar echter de massa van de aarde veel grooter is dan die van de maan (wij zullen verderop zien, dat ze 80 keer grooter is), bewerkt deze gelijke kracht bij de aarde een veel geringere, hoewel toch merkbare versnelling. De aarde valt dus eenigszins naar de maan toe. Hoe is dat mogelijk, zonder dat daarbij de afstand der beide lichamen vermindert? Doordat de aarde een klein cirkeltje beschrijft, dat bij deze versnelling behoort. De maan, die snel naar de aarde valt, beschrijft daardoor een grooten cirkel; de aarde met haar 80 maal kleinere versnelling beschrijft in denzelfden tijd een 80 maal kleineren cirkel — de figuur, waar m en e deze versnellingen voorstellen, is voor een veel geringer verschil der massa's, voor een verhouding van 1 tot 5 geteekend. In plaats van het middelpunt der aarde blijft nu een ander punt in rust, dat tusschen beide lichamen in ligt en wel 80 maal dichter bij de aarde; dit zoogenaamde g e m e e n s c h a p p e l ij k e z w a a r t e p u n t van aarde en maan is het werkelijke middelpunt van de groote maanbaan en de kleine aardbaan. Terwijl zij om dit punt heenloopen, staan zij natuurlijk altijd tegenover elkaar; is de Aarde in A_2 aangekomen, dan is de maan in M_2. Waren aarde en maan alleen in de wereld, dan zou dit gemeen-



schappelijk zwaartepunt in rust blijven. In werkelijkheid worden beide door de zon aangetrokken en moeten zij samen in een jaar om de zon loopen; daarbij volgt dan het gemeenschappelijk



zwaartepunt precies de Keplersche ellips om de zon, en het middelpunt der aarde schommelt daaromheen, beurtelings in een maand wat vooruitloopend en wat achterblijvend, zooals de figuur toont, waar de afstand aarde—maan in verhouding tot de baan om de zon 40 maal te groot is geteekend. Dit heen en weer slingeren, vooruitloopen en achterblijven der aarde, dat zich in de waarnemingen van de zon en van de planeten duidelijk verraadt, bedraagt ongeveer $^3/_4$ van den straal van den aardbol. Het gemeenschappelijk zwaartepunt ligt dus nog binnen in het aardlichaam, $^3/_4$ van den straal van het middelpunt verwijderd; en daar de afstand der maan 60 aardstralen bedraagt, is de maan 80 maal verder van dit zwaartepunt af dan het middelpunt der aarde; zoo vinden wij, dat de massa van de maan 80 maal kleiner is dan die van de aarde.

Terwijl wij dus uit onze eerste ervaring vonden, dat de maan om de aarde loopt, leert ons nu de theorie — die door nauwkeurige waarneming bevestigd wordt — dat dit niet geheel juist is: *niet alleen loopt de maan om de aarde, maar ook de aarde loopt om de maan*, of, juister nog: *de aarde en de maan loopen beide om hun gemeenschappelijk zwaartepunt*. Dit geldt natuurlijk evenzoo voor de zon en de planeten; daar is er echter niets van te bemerken, dat de zon zich beweegt, omdat de zon voor ons het vaste middelpunt is, waarvan wij niet zeggen kunnen hoe en of het zich beweegt, omdat elk vast punt van vergelijking ontbreekt. Bij de planeten treedt echter het pas gevondene op een andere manier te voorschijn.

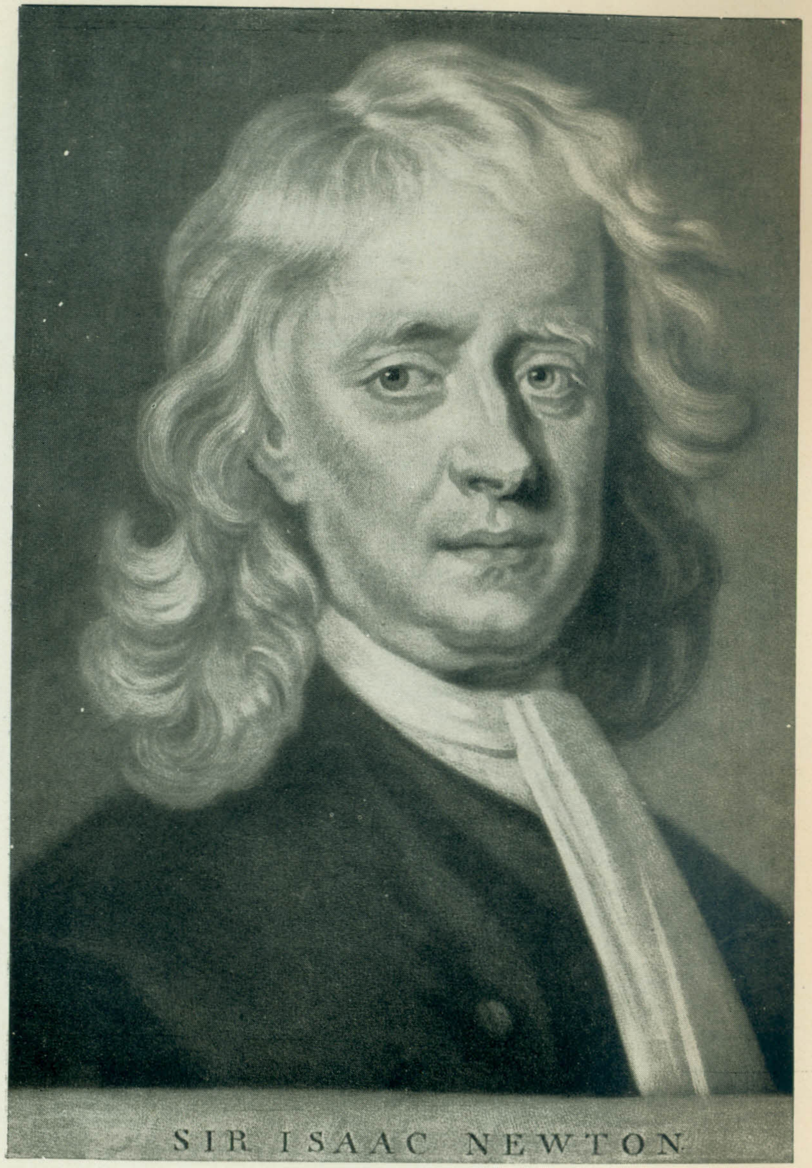
Wanneer de maan een uiterst klein lichaampje was (dus het

gemeenschappelijk zwaartepunt in het middelpunt der aarde viel), zou zij een kring met den vollen afstand aarde—maan als straal beschrijven, dus een iets grooter kring, dan zij nu om het gemeenschappelijk zwaartepunt beschrijft. Toch zou de versnelling, waarmee zij naar de aarde valt, in beide gevallen dezelfde zijn. Hoe kan dat? Eenvoudig zoo, dat nu de kleinere cirkel in iets korter tijd doorloopen wordt dan het kleine lichaampje den grooteren cirkel zou doorloopen. *De omloopstijd van de maan is dus kleiner dan de omloopstijd van een zeer klein maantje bij gelijken afstand zou zijn.* Hoe grooter de massa van de maan is met betrekking tot die van de aarde, des te meer wordt haar omloopstijd verkleind; het is alsof een grootere aantrekkende massa dan de aarde haar doet rondloopen, en de berekening leert, dat zij zóó rondloopt, alsof de maanmassa bij de aardmassa in het middelpunt gevoegd was. Passen wij dit op de planeten toe, dan mogen wij zeggen, dat elke planeet zóó rondloopt, als een nietig klein planeetje op dien afstand zou rondloopen, dat niet door de zonsmassa alleen, maar door de zons- en planetenmassa te zamen werd aangetrokken. Voor elke andere planeet, als nietig klein lichaampje beschouwd, is het dus, alsof de zon een andere massa bezit. *De derde wet van Kepler kan dus niet volkomen juist zijn*; volkomen juist zou zij slechts zijn voor uiterst kleine planeetjes met onmerkbare massa. Dit komt wel nagenoeg uit, want de planetenmassa's zijn vergeleken met de zon uiterst klein; en daardoor kon Kepler zijn wet ook ontdekken. Zooals wel meer in de wetenschap voorgekomen is, heeft dus de uit de ervaring gevonden derde wet van Kepler tot de algemeenere aantrekkingswet geleid, en heeft deze algemeenere wet naderhand theoretisch de — wel is waar geringe — onjuistheid van haar eigen grondslag aangetoond. Zoo overwint elke vooruitgang der wetenschap, die op vroegere uitkomsten voortbouwt, tegelijk de onvolkomenheid van het vroegere.

Doch ook nog op andere wijze heeft de wet der aantrekkingskracht de wetten van Kepler onjuist gemaakt. Deze wetten gelden, naar onze afleiding, voor een planeet, die enkel door de zon wordt aangetrokken. Maar wij weten nu, dat op de planeten nog andere krachten werken, want alle wereldlichamen trekken elkaar aan. *Een planeet wordt niet alleen door de zon, maar* o o k d o o r a l l e a n d e r e p l a n e t e n a a n g e t r o k k e n. Zoo wordt ook onze maan niet enkel door de aarde, maar bovendien door de zon en de andere planeten aangetrokken. Door deze bijkomende krachten wordt de beweging van de maan en de planeten anders, dan wij tot nog toe aangenomen hebben.

Toen de waarnemingen der planeten in de 2de helft van de 17de eeuw steeds talrijker en nauwkeuriger werden, viel het op, dat deze niet precies zóó liepen, als de tafels en de wetten van Kepler aangaven. Hun banen veranderden; zoo werden b.v. de baan en de omloopstijd van Jupiter langzamerhand kleiner, terwijl zij bij Saturnus grooter werden. Dat bracht de sterrekundigen in verlegenheid en zorg; en sommigen meenden reeds, dat de wetten van Kepler eenvoudig onjuist waren en verworpen moesten worden. Meer nog vond de meening ingang, dat de wetten van Kepler slechts op dezelfde wijze golden als het regelmatige stijgen en dalen van de temperatuur in den loop van het jaar; evenals het weer slechts in groote trekken aan deze wisseling gehoorzaamt en er in de details voortdurend op de onregelmatigste wijze van afwijkt, evenzoo wijken ook de planeten toevallig en onregelmatig nu eens zoo, dan weer anders een beetje van de gemiddeldenormale Keplersche baan af. Was dit werkelijk het geval, dan was alle kans verkeken om in de wetenschap der sterrekunde tot grooter zekerheid en nauwkeurigheid te komen. Gelukkig kwam toen juist te rechter tijd de theorie van Newton en bewees, d a t d e p l a n e t e n a a n d e w e t t e n v a n K e p l e r o o k n i e t p r e c i e s k u n n e n g e h o o r z a m e n. De afwijkingen ontstaan echter niet door een onberekenbaar toeval; zij ontspruiten uit een bekende oorzaak, de onderlinge aantrekking der planeten. Daar de massa's der planeten gering zijn in vergelijking met de zonsmassa, zijn de daardoor bewerkte afwijkingen van de Keplersche wetten ook gering, en vertoonen zich als kleine s t o r i n g e n van den regelmatigen loop. En wat de hoofdzaak was: deze krachten en storingen waren nauwkeurig te berekenen, en geen onberekenbaar toeval kon meer een rol spelen in de beweging der planeten. Met vasten tred ging de wetenschap weer voorwaarts op den weg naar steeds hoogere volkomenheid.

Wel was de berekening van deze storingen moeilijk en stelde zij de hoogste eischen aan de wiskunde; de scherpzinnigste wis-



ISAAC NEWTON.
(1643—1727)

kundigen van de 18de en 19de eeuw hebben aan deze berekening deelgenomen, en de wiskunde werd zelf buitengewoon vooruitgebracht door de nieuwe taak, deze storingen nauwkeurig af te leiden. Het vraagstuk, de bewegingen van de planeten en de maan enkel op grond van Newton's aantrekkingswet te vinden, werd voor het eerst volledig door den Franschen wiskundige L a p l a c e opgelost, op wiens in 1799 verschenen „Mechanika des Hemels" de onderzoekers van de 19de eeuw voortbouwden. Laplace toonde aan, dat de planeten niet slechts kleine wisselende bedragen afwijken van hun regelmatige banen, maar dat deze ellipsen zelf ook langzaam hun stand en hun vorm veranderen. De richting van de groote as draait langzaam — bij de aarde hebben wij vroeger al gevonden, dat zij ten tijde van Hipparchus in November het dichtst bij de zon kwam, en nu in Januari; de excentriciteit, de helling en de groote as van de baan veranderen alle zoo, dat zij in lange tijdsruimten beurtelings grooter en kleiner worden. De plaatsen der planeten te vinden was nu niet meer het oplossen van een eenvoudig meetkundig, maar van een moeilijk mechanisch vraagstuk, dat lange berekeningen eischte. Maar daardoor werd ook een nauwkeurigheid in de uitkomst verkregen, die vroeger onbereikbaar scheen. Kepler was tevreden, dat zijn tafels geen grooter fout dan een paar minuten overlieten; nu werd dit honderdmaal overtroffen. Tegelijk is door het gebruik van den verrekijker de nauwkeurigheid der waarnemingen in dezelfde mate toegenomen; daardoor kon de juistheid der berekeningen op een uiterst scherpe proef gesteld worden, en deze proef hebben zij schitterend doorstaan; t o t o p b ij n a o n m e r k b a r e k l e i n i g h e d e n b l e k e n b e r e k e n i n g e n w a a r n e m i n g o v e r e e n t e s t e m m e n. Deze overeenstemming van de berekende storingen met de werkelijkheid l e v e r t e v e n z o o v e l e n i e u w e b e v e s t i g i n g e n v a n d e a a n t r e k k i n g s w e t v a n N e w t o n, als er verschillende storingen zijn. Wat in iedere wetenschap als maatstaf van volkomenheid geldt: de nauwkeurigheid en zekerheid, waarmee zij toekomstige verschijnselen voorspelt, maakt de wet van Newton tot een der stevigste grondslagen van het menschelijk weten, tot een van de schitterendste veroveringen van den menschelijken geest.

Op bijzonder treffende wijze werd deze zekerheid der sterrekundige wetenschap door een ontdekking bewezen, die in het midden van de 19de eeuw buitengewoon opzien wekte. In 1781 ontdekte de Engelsche sterrekundige Herschel op de grens van den Stier en de Tweelingen een nieuwe planeet, die als een voor het bloote oog amper zichtbaar sterretje langs de ekliptika wandelt en een kring beschrijft, die bijna 2 maal zoo groot is als die van Saturnus. Zij kreeg den naam U r a n u s; haar gemiddelde afstand tot de zon is 19,2 maal zoo groot als die der aarde en haar omloopstijd is 84 jaren. Haar baan was spoedig uit de waarnemingen berekend — zij was ook al vroeger in de 18de eeuw waargenomen, maar steeds voor een gewoon sterretje gehouden — en ook haar storingen door de aantrekking der andere planeten werden nauwkeurig berekend. Maar in het begin van de 19de eeuw bleek, dat zij niet zoo liep, als zij naar de berekening moest loopen. Bij de sterrekundigen zette zich steeds meer het denkbeeld vast, dat nog een onbekende kracht op haar moest werken, en het vermoeden werd uitgesproken, dat er een nog verder verwijderde planeet moest bestaan, die door haar aantrekking deze afwijkingen veroorzaakte. Twee jonge wiskundigen, Le Verrier te Parijs en Adams te Cambridge (in Engeland), gingen, zonder van elkaar te weten, bijna tegelijk aan het werk om uit de afwijkingen bij Uranus af te leiden, waar deze onbekende planeet zich bevond. Door aan te nemen, dat zij nagenoeg tweemaal zoo ver als Uranus van de zon af moest staan, gelukte het inderdaad haar plaats te berekenen, en op aanwijzing van Le Verrier werd in 1846 in Berlijn de onbekende niet ver van de berekende plaats, in den Waterman, inderdaad gevonden. Het bleek weldra, dat deze planeet, die den naam N e p t u n u s kreeg, aanmerkelijk dichter bij de zon rondloopt, dan aangenomen was; de gemiddelde afstand tot de zon overtreft dien der aarde 30 maal en de omloopstijd is 164 jaar. Men begrijpt licht, dat deze ontdekking een buitengewonen indruk maakte; nooit te voren was de macht der wetenschap aan het groote publiek zoo duidelijk voor oogen gevoerd, als door de theoretische ontdekking van een onbekend hemellichaam, en de onmiddellijke bevestiging door de waarneming. Natuurlijk beteekende dat niet, zooals toen onder den indruk van de eerste geestdrift wel gezegd werd, dat nu inderdaad de wet van Newton afdoende bewezen was. Deze wet stond vóór de ontdekking van Neptunus even vast als daarna; elke vooruitberekening van de

plaats van een planeet volgens de theorie en de latere bevestiging hiervan door de waarneming levert evengoed een bewijs voor de juistheid van Newton's theorie, als de ontdekking van Neptunus.

Le Verrier heeft vervolgens ook van de overige planeten alle storingen nauwkeurig volgens de theorie berekend, en tegelijk uit alle waarnemingen de werkelijke banen der planeten met de uiterste zorgvuldigheid afgeleid. En in alle gevallen bleek een volkomen overeenstemming tusschen de theorie en de praktijk te bestaan — met één uitzondering. De richting van de groote as van de Mercuriusbaan draait iets (43 sekunden per eeuw, dus een graad in 8400 jaar) sneller rond dan uit de aantrekking der andere planeten berekend wordt. De oorzaak van deze afwijking, waarvoor allerlei verklaringen bedacht zijn, is eerst onlangs, zooals hierna zal blijken, opgehelderd.

---

40. DE ONREGELMATIGHEDEN VAN DE MAANBEWEGING.

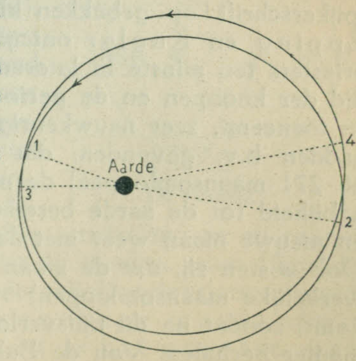
Reeds in het begin van onze waarneming der hemelverschijnselen leerden wij den loop van de maan in groote trekken kennen. Wij zagen toen, dat zij in $27^1/_3$ dag regelmatig in een kring om de aarde loopt. Vervolgens hebben wij het een en ander over haar plaats in het heelal afgeleid; eerst vonden wij, dat zij veel dichter bij de aarde is dan eenig ander hemellichaam; vervolgens bleek het ons, dat zij alleen de aarde trouw bleef, toen alle planeten naar de zon als middelpunt overgingen, en dat zij met de aarde te zamen een jaarlijkschen kring om de zon beschrijft. Ook leerden wij de oorzaak van haar beweging in de aantrekkingskracht der aarde kennen en leidden theoretisch af, dat zij niet om het aardmiddelpunt, maar om het gemeenschappelijk zwaartepunt als middelpunt van haar baan beweegt. Maar bij al deze uitbreiding van onze kennis hebben wij nog steeds verzuimd, haar beweging in alle kleinere details te onderzoeken. En er is alle reden tot zulk een onderzoek, omdat de maan een aantal merkwaardige bijzonderheden en onregelmatigheden vertoont, die wij bij andere hemellichamen niet aantreffen.

Enkele moesten reeds aan de eerste waarnemers in het oog vallen, en wij hebben deze ook in ons 8ste Hoofdstuk vermeld. De verduisteringen toonen, dat de maanbaan iets schuin staat ten opzichte van de ekliptika en deze in twee tegenover elkaar liggende punten, de knoopen van de baan, snijdt. En wij vonden uit het steeds vroeger vallen der eklipsen, dat de knoopen van de maanbaan langs de ekliptika terugloopen, en in 18 jaar 7 maanden de geheele ekliptika rondwandelen. De maan komt dus bij haar knoopen telkens wat sneller terug dan haar omloopstijd bedraagt. Terwijl de omloopstijd gemiddeld 27 dagen 7 uren 43 minuten 11 sekonden bedraagt, verloopen tusschen twee opeenvolgende doorgangen door denzelfden knoop 27 dagen 5 uren 5 minuten 36 sekonden, dus $2^1/_2$ uur minder.

Hiertoe beperkte zich echter de kennis der maanbeweging bij de volken der oudheid niet. Wij namen tot dusver aan, dat de maan een regelmatige cirkelbeweging volbrengt. Is dat juist, dan moet de tusschentijd tusschen twee opeenvolgende verduisteringen altijd een vol aantal maanperioden zijn, of precies een halve maanperiode meer. Dat dit niet uitkomt, toont reeds onze lijst van verduisteringen op blz. 60, ofschoon de tijd daar maar ruw, in volle uren aangegeven is. Tusschen een zons- en een maansverduistering, die 14 dagen uiteen liggen, vinden wij daar als tusschentijd: in 1891 13 d, 22 u., in 1898 14 d. 7 u., in 1901 14 d. 16 u., in 1905 15 d. 10 u., in 1912 15 d. 14 u., terwijl een halve maanperiode 14 d. 18 u. is. Door eklipsen te vergelijken, die een half jaar, dus $5^1/_2$ of $6^1/_2$ maanperiode uiteen liggen, zouden wij uit die lijst nog meer gegevens kunnen krijgen. Maar deze zijn al voldoende om aan te toonen, dat de maan de eene helft van de ekliptika gemiddeld met een andere snelheid doorloopt dan de andere. De afwijking loopt tot 20 uren op, waarin de maan 10 graden aan den hemel doorloopt; in een halven omloopstijd legt de maan dus soms 10 graden meer, soms 10 graden minder af dan de halve omtrek des hemels.

Naar hetgeen wij van de planeten weten, ligt de verklaring van deze onregelmatigheid dadelijk voor de hand. In het kader van de Grieksche sterrekunde zouden wij zeggen, dat de aarde niet in, maar $^1/_{11}$ buiten het middelpunt van de maanbaan staat. In het kader van onze moderne sterrekunde zeggen wij: de maan

beschrijft om de aarde volgens de wetten van Kepler een ellips met een excentriciteit van ongeveer $^1/_{22}$. Probeeren wij nu echter de ligging van de groote as van haar baan te vinden, waarin zij het dichtst bij en het verst van de aarde komt, dan stooten wij op nieuwe moeilijkheden. Wij kunnen bij de boven opgegeven tusschentijden tusschen twee eklipsen bijschrijven, welk deel van de ekliptika zoo snel of zoo langzaam doorloopen werd, om zoo te vinden in welke lengte haar snelheid het grootst en het kleinst was. Doen wij dit, dan verkrijgen wij de meest tegenstrijdige uitkomsten; hetzelfde deel van de ekliptika, dat in 1891 zeer snel doorloopen werd, kostte in 1912 den langsten tijd. Uit deze weinige gegevens laat zich dus niets zekers vinden; de oplossing van het vraagstuk blijkt echter spoedig, wanneer wij ons niet tot eklipsen beperken, maar zoo dikwijls mogelijk de plaats van de maan tusschen de sterren waarnemen. Dan blijkt, dat de snelheid van de maan langs den hemel beurtelings grooter en kleiner wordt, zooals bij een beweging in een ellips behoort, en het is niet moeilijk de plaats te vinden, waar de snelheid het grootst en de maan het dichtst bij de aarde is. Doen wij zulke waarnemingen van jaar tot jaar, dan vinden wij, dat de richting van de groote as regelmatig verandert, 40 graden per jaar, en in 9 jaren in dezelfde richting als de maan eenmaal den geheelen hemel rondloopt. Hoe deze beweging in een ellips plaats vindt, die zelf langzaam ronddraait, toont nevenstaande figuur in zeer overdreven maatstaf. De maan komt minder snel in haar grootste nabijheid tot de aarde terug, dan zij haar omloop voltooit; dat tijdsverloop duurt nl. gemiddeld 27 dagen 13 uren 18 minuten 37 sekonden. dus $5^1/_2$ uur langer dan de omloopstijd. In deze periode neemt dus de snelheid van de maan regelmatig toe en af. De juiste waarde voor den draaiingstijd der groote as is $3232^1/_2$ dag, dus 8 jaar $310^1/_2$ dagen.

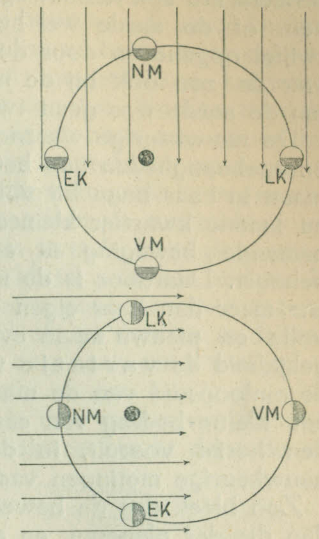


Hier rijst de vraag hoe het bij zulk een sterke wisseling in den tusschentijd tusschen twee verduisteringen dan toch voor de oudheid mogelijk was, een bepaalde Sarosperiode te vinden, waarna de eklipsen op dezelfde manier terugkwamen. Wij vonden immers, dat ze na 18 jaar en 15 dagen terugkwamen, maar dan steeds 8 uren later. Het antwoord is, dat de Sarosperiode zeer weinig van de dubbele draaiingsperiode der groote as verschilt; na 18 jaren vallen de kleinste en de grootste afstand tot de aarde weer op dezelfde plaats, en daarom volgen de verduisteringen dan weer met denzelfden tusschentijd op elkaar.

De kennis van deze ongelijkheden in de maanbeweging behoort tot de vroegste aanwinsten der wetenschap. Uit eeuwenlange waarnemingsreeksen hadden reeds de Babyloniërs de perioden gevonden, waarna de verduisteringen terugkeeren; en deze kennis gebruikten zij, om den tijd van volle en nieuwe maan nauwkeurig vooruit te berekenen. Uit de bewaard gebleven inschriften in spijkerschrift op gebakken kleitafeltjes, die door de Assyriologen *Epping* en *Kugler* ontcijferd zijn, blijkt, dat de Babylonische priesters ten minste in lateren tijd de maanperioden, den omloopstijd der knoopen en de periode, waarin de snelheid der maan af- en toeneemt, zeer nauwkeurig kenden en wisten te gebruiken. Zij hadden b.v. gevonden, dat in 251 maanperioden (ruim 20 jaren of 271 maansomloopen) de maan precies 269 maal haar grootste nabijheid tot de aarde bereikt, en dat dus na dit tijdsverloop volle en nieuwe maan weer met dezelfde tusschentijden op elkaar volgen. Ook wisten zij, dat de maan in 5458 perioden (441 jaren of 5899 werkelijke maansomloopen) 5923 maal bij denzelfden knoop terugkomt, zoodat na dit tijdsverloop de verduisteringen zich op dezelfde manier herhalen. Van de Babyloniërs hebben de Grieken de kennis van deze perioden gekregen.

De belangstelling van de Grieksche sterrekundigen voor de maan ging echter verder dan het voorspellen van eklipsen en nieuwe manen. Zij hadden zich een voorstelling gevormd, hoe de hemellichamen door de wereldruimte loopen; zij trachtten hun beweging door een systeem van cirkelbanen voor te stellen en letten dus ook op de maan in andere gedeelten van haar baan. Daarbij ontdekte Ptolemaeus, dat de plaats van de maan in eerste en laatste kwartier heelemaal niet uitkwam met de baan, die uit de verduisteringen was afgeleid; en het gelukte hem ook het

karakter van deze onregelmatigheid, die *evektie* genoemd is, vast te stellen.



De evektie.

Wanneer de zon op zij staat, in de richting loodrecht op de groote as van de maanbaan (zooals in de bovenste figuur), is de maan in eerste en laatste kwartier het dichtst bij en het verst van de aarde; volle en nieuwe maan verdeelen de baan in twee helften, die met ongelijke snelheid doorloopen worden; en wij vonden reeds, dat dan in den halven omloopstijd 10 graden meer (of minder) dan de halve hemelomtrek doorloopen wordt. Drie maanden later staat de zon in de richting van de groote as (als in de tweede figuur), volle en nieuwe maan vallen samen met den grootsten en kleinsten afstand der aarde; zij verdeelen de maanbaan in twee gelijke helften, en uit de verduisteringen kan de excentriciteit niet gevonden worden. Deze moeten wij vinden uit eerste en laatste kwartier, die nu de baan in twee ongelijke helften verdeelen; en zij toonen, dat nu in een halven omloopstijd niet 10 graden, maar 15 graden meer (of minder) dan de helft van de ekliptika doorloopen wordt. *De excentriciteit van de maanbaan wordt afwisselend grooter en kleiner; zij is het grootst, wanneer de groote as naar de zon gericht is, het kleinst, wanneer deze op zij van de groote as staat.*

De verduisteringen konden ons alleen de kleinste excentriciteit doen kennen; de grootste is $1\frac{1}{2}$ maal zoo groot en gemiddeld is de excentriciteit van de maanbaan dus $^{1}/_{18}$. Ptolemaeus probeerde deze onregelmatigheid door een bijzonder stel van epicykels voor te stellen; maar het is te begrijpen hoe ingewikkeld en onbevredigend hier de geheele epicykeltheorie moest worden. En toch is juist de evektie een sterke steun voor de epicykeltheorie geworden. Want zij was een onregelmatigheid in de maanbeweging, die van den stand van de zon afhing, evenals bij de planeten ook een samenhang met de zon bestaat. Anders had de door de zon beheerschte epicykelbeweging bij de planeten twijfel kunnen wekken, of de aarde wel het echte middelpunt was; nu werd deze twijfel opgeheven door de overweging, dat zulk een afhankelijkheid van de zon ook bij de maan voorkwam, en aan háár beweging om de aarde was geen twijfel mogelijk.

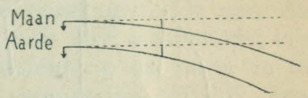
De nauwkeurige waarnemingen van Tycho brachten nog verdere onregelmatigheden aan het licht. Hij vond, dat de snelheid van de maan in haar baan bij volle en bij nieuwe maan grooter, bij eerste en laatste kwartier kleiner is dan bij een regelmatige af- en toenemende beweging in een excentrischen cirkel (of een ellips) behoort. Daardoor is de maan 3 dagen na volle en nieuwe maan iets meer dan haar eigen middellijn te veel vooruit, 3 dagen vóór volle en nieuwe maan evenveel achter. Tycho noemde deze ongelijkheid de *variatie* van de maan. Tegelijk ontdekte hij, dat de omloopstijd van de maan 's winters iets grooter is dan 's zomers; het kleine bedrag van eenige minuten, dat de maan daardoor in den herfst vooruit, in de lente achter is, was slechts door zijn nauwkeurige metingen vast te stellen.

Zoo bleek dus de beweging van de maan nog veel ingewikkelder dan die der planeten, en alle scherpzinnigheid van Kepler, die bij de planeten een zoo grooten triumf behaalde, schoot te kort bij het probleem van de maan. Hij kon niet meer doen, dan de verschillende ongelijkheden eenvoudig als feiten aannemen en hun bedrag uit Tycho's waarnemingen zoo goed mogelijk bepalen. Een verklaring werd eerst mogelijk door Newton's ontdekking van de algemeene aantrekking. Toen was de samenhang van de meeste onregelmatigheden met de zon onmiddellijk duidelijk; de maan wordt niet slechts door de aarde, maar ook door de zon aangetrokken. Daarom kan de maan zich niet in een regelmatige ellips om de aarde bewegen; *de onregelmatigheden in den loop van de maan zijn storingen, waarvan de oorzaak in de aantrekking door de zon ligt*. De verklaring van de maanbeweging door Newton en de Fransche wiskundigen der 18de eeuw, die op zijn werk voortbouwden, werd nu een nieuw en belangrijk bewijs voor de juistheid van de wetten der algemeene aantrekkingskracht.

41. VERKLARING VAN DE MAANBEWEGING.

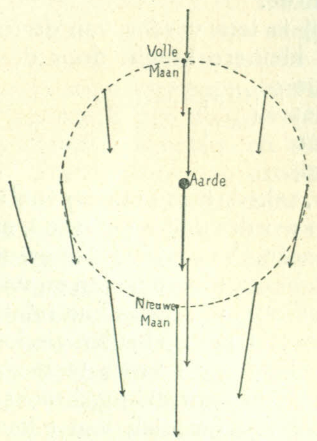
Zooals de zon de aarde aantrekt, zoo trekt zij ook met ongeveer dezelfde kracht alles aan, wat zich in de buurt van de aarde bevindt, dus ook de maan. Omdat aarde en maan beide met ongeveer dezelfde kracht door de *zon* worden aangetrokken, krijgen zij ongeveer dezelfde versnelling naar de zon toe, worden evenveel van den rechten weg afgebogen, en doorloopen zoo samen hun jaarlijksche baan om de zon. Was de aantrekking op aarde en maan precies gelijk, dan zouden zij volkomen gelijk bewegen alsof zij aan elkaar vastzaten; er kwam dan alleen de aantrekking van de aarde op de maan bij, die deze als tweede beweging om de aarde doet cirkelen. Maar in werkelijkheid gaat het anders. De aantrekking van de zon is op ieder ander punt van de ruimte iets anders; zij neemt op grooter afstand af, en daarom is de aantrekking van de zon op de maan wel ongeveer, maar niet precies gelijk aan haar aantrekking op de aarde.

Nemen wij b.v. de volle maan. Zij is iets verder van de zon af dan de aarde en wordt dus met iets kleinere kracht door de zon aangetrokken. Was nu de onderlinge aantrekking tusschen aarde en maan niet voorhanden, waren beiden dus b.v. kleine stofjes, wat zou er dan gebeuren? Als zij

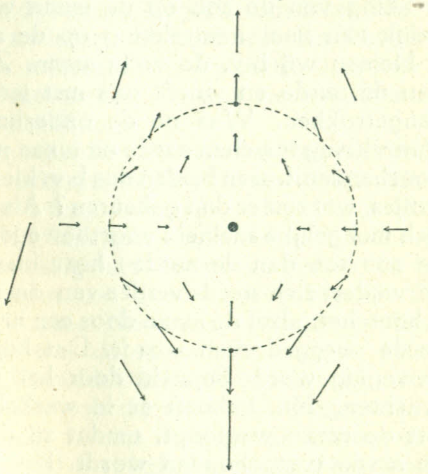


zich met gelijke snelheid voortbewegen, zakt de maan minder snel naar de zon toe dan de aarde; haar baan wordt minder gekromd, en zij verwijdert zich steeds verder van de aarde. Voor de aardbewoners schijnt het, alsof de maan door een kracht omhooggeheven en van de aarde weggedreven wordt. Dat komt ook uit, want hun relatieve beweging wordt bepaald door het verschil der op beiden werkende krachten. Nu behoeft er in werkelijkheid geen vrees te bestaan, dat de maan wegloopt, omdat zij door de aantrekkingskracht van de aarde vastgehouden wordt. Het streven om zich van elkaar te verwijderen bewerkt nu alleen, dat de aardkracht verminderd wordt en de maan met een iets kleinere versnelling naar de aarde valt. De aantrekkende kracht der aarde wordt verminderd door een kracht, die de maan van de aarde wegdrijft, en die niets anders is dan het verschil der zonsaantrekking op aarde en maan. In het algemeen kan men zeggen, dat van de aantrekkingskracht, die de zon op de maan uitoefent, het deel dat aan de op de aarde werkende kracht gelijk is, daartoe dient om de maan met de aarde mee te laten loopen; het overschot, het verschil dus tusschen de op de aarde en op de maan werkende zonnekrachten, bepaalt hun relatieve beweging en komt bij de gewone wederzijdsche aantrekking van aarde en maan. Deze laatste voor zich alleen bewerkt de regelmatige beweging in een ellips volgens de wetten van Kepler; *de afwijkingen van de Kepler'sche beweging, die wij als onregelmatigheden van de maanbeweging hebben leeren kennen, worden veroorzaakt door het verschil tusschen de door de zon op de aarde en op de maan uitgeoefende krachten.* Dit verschil is de storende kracht van de zon, die wij nu moeten onderzoeken.

Op de hiervolgende figuur is de grootte en de richting van de zonnekracht voor de aarde en voor een aantal plaatsen in de



Aantrekkingskracht van de zon.



Storende kracht van de zon.

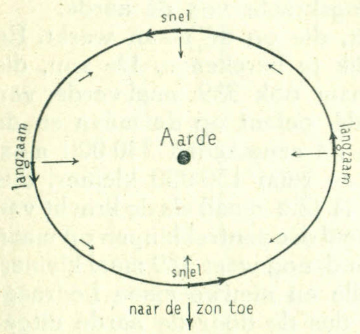
omgeving der aarde door pijltjes weergegeven — waarbij wij, om de verschillen sterk overdreven te doen uitkomen, de zon slechts 5 maal zoo ver van de aarde aannemen als de maan. Wij zien daar, hoe de kracht naar de zon toe grooter, van de zon af kleiner

is dan in het midden, waar de aarde staat, terwijl zij op zij van de aarde wel even groot is, maar schuin gericht. De pijlen in de tweede figuur geven aan, hoeveel al deze krachten anders zijn dan de op de aarde werkende kracht; met de pijl aan de aarde vereenigd geven deze storende krachten samen weer de totale kracht uit de eerste figuur. Bij nieuwe maan zien wij dit overschot, deze storende kracht, naar de zon toe gericht, bij volle maan van de zon af gericht, *in beide gevallen dus van de aarde af gericht.* Bij eerste en laatste kwartier is het verschil *een kleinere naar de aarde toe gerichte kracht,* die de aantrekkingskracht der aarde vergroot. Tusschen deze hoofdstanden in zien wij als storende kracht een scheef gerichte kracht, die aan weerszijden van de nieuwe maan naar de nieuwe maan, aan weerszijden van de volle maan naar deze gericht is. Aan de pijlen, die in punten binnen en buiten de maanbaan aangebracht zijn, zien wij, *dat de storende kracht met den afstand tot de aarde regelmatig grooter wordt;* zij verandert dus in omgekeerden zin als de aantrekkingskracht van de aarde.

Zoo ziet de storende kracht er uit, die op de maan werkt. En hoe groot zij is, is ook gemakkelijk te berekenen. De zon, die 330 000 maal grooter massa heeft, maar ook 389 maal verder van de maan verwijderd is dan de aarde, oefent op de maan en de aarde een aantrekking uit, die om de eene reden 330 000 maal grooter, om de andere 389 × 389 = ruim 150 000 kleiner, dus grooter, om beide samen dubbel zoo groot is (2.2 maal) als de kracht van de aarde op de maan. Het onderscheid der aantrekkingen op maan en aarde is, in den zijdelingschen stand, nog weer 389 maal kleiner, dus $^1/_{180}$ van de aardkracht; bij volle en nieuwe maan bedraagt zij het dubbele daarvan, vermindert dus de door de aarde uitgeoefende aantrekking met $^1/_{90}$.

Welke werking heeft nu deze storende kracht op de beweging van de maan? Beurtelings versterkt en verzwakt zij de aantrekking van de aarde; maar de verzwakking bij volle en nieuwe maan is dubbel zoo groot als de versterking bij eerste en laatste kwartier. Als totaal blijft dus gemiddeld een verzwakking over. Het is alsof de aarde met een kleinere kracht aantrekt of een kleinere massa heeft. Kon men de zon ineens laten verdwijnen, dan zou het zijn alsof de aarde de maan eensklaps sterker ging aantrekken; de maan zou dan, met behoud van de perkensnelheid, die zij eenmaal heeft, een meer naar binnen gelegen baan inslaan, dichter bij de aarde komen en in korteren tijd rondloopen. Dit is nu wel onmogelijk, maar men kan er toch uit afleiden, wat er gebeuren moet, wanneer de kracht van de zon beurtelings sterker en zwakker wordt. En dit vindt werkelijk plaats; 's winters is de zon dichter bij ons en trekt zij de aarde sterker dan 's zomers. Dus moet de omloopstijd van de maan 's winters grooter en haar beweging langzamer zijn dan 's zomers, juist zooals Tycho het uit de waarnemingen had gevonden.

Was de maanbaan in plaats van een ellips precies een cirkel, dan zou zij onder de storende werking van de zon toch geen cirkel blijven. Want de aantrekking naar het centrum is nu niet meer aan alle kanten even groot. Naar de zon toe en van de zon af is ze kleiner, op zij is zij grooter, terwijl de storende kracht vóór volle en nieuwe maan voortdrijvend, versnellend werkt, na volle en nieuwe maan tegenhoudend, vertragend. Daardoor moet de baan naar beide kanten zijdelings uitgerekt worden; zij wordt een ellips met de aarde als middelpunt en de kleine as naar de zon gericht. In deze baan beweegt de maan zich met wisselende snelheid; is het volle en nieuwe maan, dan loopt zij sneller, in de kwartierstanden langzamer — evenals een aan een touw hangend zwaar voorwerp, dat men in een langwerpige baan laat rondslingeren. Deze afwisselende versnelling en vertraging is de door Tycho ontdekte variatie.

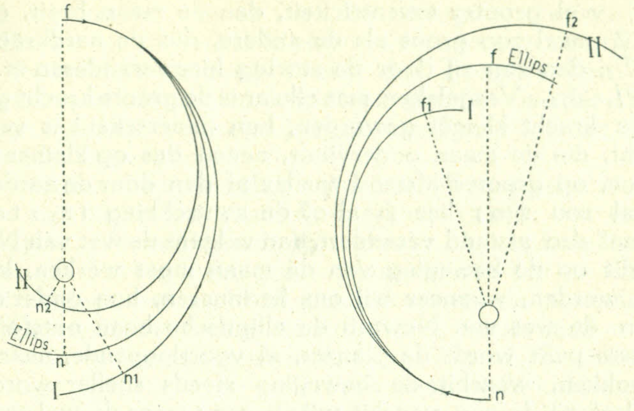


De variatie van de maan.

Nu is echter de ongestoorde maanbaan geen cirkel, maar een ellips met de aarde als brandpunt. Terwijl de maan beurtelings dichter bij en verder van de aarde komt, wordt de storende kracht van de zon beurtelings kleiner en grooter. Nemen wij eerst het geval, dat de groote as van de maanbaan naar de zon is gericht. Zoowel op den kleinsten als op den grootsten afstand wordt de aantrekking der aarde door de storende kracht verminderd. Maar

niet in dezelfde mate; op den grooteren afstand, waar de aardkracht het geringst is, wordt zij sterk verminderd, op den kleinsten afstand, waar de aardkracht het grootst is, gaat er minder af. Was bij veel grooter excentriciteit, dan de maan bezit, de eene afstand 2 maal zoo groot als de andere, dus de aardkracht hier 1, daar $^1/_4$, dan zou zij door de storing hier veranderen in $1 - ^1/_{90}$, daar in $^1/_4 - ^2/_{90}$. Vergeleken met elkaar is de groote kracht grooter, de kleine kracht kleiner geworden, hun onderscheid is versterkt. De kracht, die de maan ondervindt, neemt dus op kleiner afstand sneller toe, op grooter afstand sneller af dan door de aarde alleen het geval zou zijn; het is alsof de aantrekking *in sterker mate* met den afstand verandert, dan volgens de wet van Newton.

Hoe dit op de beweging van de maan moet werken, kan ons duidelijk worden, wanneer wij ons herinneren, hoe onder de werking van de wet van Newton de elliptische baan ontstond. Uit haar verste punt wordt de planeet, al voortloopende, naar de zon toe getrokken, waarbij de beweging steeds sneller wordt; het schijnt alsof zij de zon voorbij wil vliegen; maar de snel groeiende aantrekking van de zon buigt haar baan steeds sterker, en eerst als zij aan den overkant gekomen is, gelukt het; de bewegingsrichting is dan zachtjesaan minder scheef ten opzichte van den voerstraal geworden, en juist tegenover het punt van uitgang komt de planeet het dichtst bij de zon, vliegt voorbij en verwijdert zich weer. Wel is een wiskundige berekening noodig om te bewijzen, dat juist bij de wet van Newton, waarbij de kracht precies omgekeerd evenredig met het kwadraat van den afstand afneemt, de grootste nadering tot de zon juist tegenover het punt van grootste verwijdering ligt. Maar onze meer algemeene beschouwing kan toch duidelijk maken, wat er moet gebeuren, als de kracht sneller of minder snel met den afstand verandert. Groeit de kracht bij de nadering tot de zon minder snel, dan wordt de baan in haar verder verloop minder sterk gebogen en bereikt vroeger en nog verder van de zon af de plaats, waar zij de zon voorbijschiet (I in de figuur; groeit de kracht sterker en wordt de baan dus sterker gebogen, dan gelukt het voorbijschieten eerst later, verderop en dichterbij de zon (als in II). En hetzelfde vindt men, wanneer men de tweede helft van de baan beschouwt (tweede figuur). Neemt de kracht bij de verwijdering van de zon langzamer af, blijft ze dus grooter, dan dwingt zij de planeet vroeger en op kleiner afstand terug te keeren (I); neemt zij snel af en wordt zij



dus klein, dan keert de planeet eerst later om en nadat zij verder van de zon is weggeloopen (II). De baan is nu geen ellips meer; maar men kan het toch zoo opvatten, alsof de planeet een ellips beschrijft, die zelf intusschen verandert. In geval I is het een ellips, die tegelijk terugdraait, doordat de richting van de groote as achteruitloopt, tegen de planeet zelf in; in geval II draait de ellips vooruit, met de planeet mee.

Hei is nu gemakkelijk te zien, wat er met de maan gebeurt. In het door ons aangenomen geval, dat de zon in de richting van de groote as staat, verandert de kracht op de maan in sterker mate dan volgens de wet van Newton. Dat is dus geval II. De maan komt van haar versten tot haar kleinsten afstand in meer dan een halven omloop en nadert de zon sterker; en zij gebruikt van haar kleinsten tot haar grootsten afstand weer meer dan een halven omloop, en gaat daarbij verder van de aarde weg. De baan blijkt te zijn een *ellips met grooter excentriciteit, waarvan de groote as vooruitdraait.*

Drie maanden later hebben zich echter de omstandigheden veranderd. De zon (of eigenlijk de aarde) heeft een vierde van haar

baan doorloopen en staat nu opzij, in een richting loodrecht op de groote as. Is de maan nu in haar grootsten en kleinsten afstand tot de aarde, dan is zij tegelijk in de kwartierstanden, waar de storende kracht de aantrekking vergroot, en wel alweer met een bedrag, dat het grootst is bij den grootsten afstand, waar de aantrekkingskracht het kleinst is. Nu is alles net omgekeerd als in het vorige geval; de krachten 1 en $^1/_4$ in ons voorbeeld worden nu $1 + {}^1/_{180}$ en $^1/_4 + {}^2/_{180}$. De kleine kracht wordt sterk, de groote weinig vergroot, en de werkelijke kracht op de maan *verandert minder sterk met den afstand* dan volgens de wet van Newton. Hier is dus geval I van onze figuren toepasselijk; de maan bereikt den kleinsten en grootsten afstand sneller, de eerste op grooter, de tweede op kleiner afstand dan zonder de storing het geval zou zijn. De beweging is dus zoo uit te drukken, dat de maan *een ellips met kleiner excentriciteit beschrijft, waarvan de groote as terugdraait.*

Hier hebben wij dus de verklaring voor de door Ptolemaeus ontdekte evektie; staat de zon in de richting van de groote as, dan is de excentriciteit grooter, staat zij loodrecht daarop, dan is de excentriciteit kleiner. Maar wij vinden hier bovendien iets, wat wij nog niet wisten, dat echter door de nauwkeurige waarnemingen na Newton's tijd dadelijk bevestigd werd: *dat de richting van de groote as beurtelings vooruit en terug draait*; vooruit, als zij naar de zon gericht is, terug, als zij er loodrecht op staat. Wat is het totale resultaat van deze beweging? De vermindering der aantrekking in het eerste geval is dubbel zoo groot als haar vermeerdering in het tweede; wij weten dat gemiddeld een vermindering overblijft. De storende werking in het eerste geval, de draaiing vooruit, is dus ook tweemaal zoo sterk als de terugdraaiing. Als totaal blijft dus over, *dat de groote as vooruit draait* — zooals aan de volken der oudheid reeds bekend was.

Nu blijft nog over de storingen te vinden, die uit den schuinen stand van de maanbaan t.o.v. de ekliptika ontstaan. De maan stijgt nu eens aan de eene zijde boven de ekliptika, keert dan terug, verwijdert zich aan den anderen kant van deze en keert weer terug; zoo schommelt zij op en neer. De aantrekking van de aarde trekt haar, als zij boven de ekliptika staat, schuin naar beneden, als zij er onder staat schuin naar boven, en wel des te sterker naarmate zij verder van de ekliptika af staat. Zoo is haar beweging dus geheel met die van een slinger te vergelijken, die ook des te sterker teruggetrokken wordt, naarmate hij verder uit den middenstand afwijkt: alleen met dit verschil, dat de maan in juist denzelfden tijd, dat zij eenmaal heen en weer slingert, ook eenmaal om de aarde heen loopt. Nu komt de aantrekking van de zon er bij; deze trekt de maan altijd schuin naar de ekliptika terug, naar welken kant zij ook afwijkt; de zonnekracht vergroot dus de kracht der aarde, die de maan naar de ekliptika trekt. Wordt bij een slinger de kracht, die hem naar zijn middenstand terug trekt, grooter, dan gaat hij sneller schommelen. Ook de maan moet dus door de vergrooting van de kracht sneller om de ekliptika heen en weer schommelen. Werd nu de totale aantrekking der aarde ook vergroot, dan zou de maan daarbij sneller haar omloop om de aarde volbrengen. Maar wij weten, dat de totale aantrekkingskracht door de zonnekracht verminderd wordt en de maan dus langzamer rondloopt. De tijd van heen en weer schommelen is dus nu korter dan de omloopstijd, in plaats van daaraan gelijk zooals bij de ongestoorde beweging. De maan komt telkens sneller bij haar knoopen terug, dan zij op dezelfde plaats van den hemel terugkomt; *de knoopen schuiven terug* langs de ekliptika, juist zooals uit de waarneming der eklipsen van oudsher gebleken is.

Zoo waren alle onregelmatigheden in de beweging van de maan, die ten tijde van Newton bekend waren, door zijn aantrekkingswet te verklaren en leverden zij een nieuw bewijs voor de waarheid en de groote beteekenis van deze wet. Natuurlijk waren ook de theoretisch berekende getallenwaarden voor het bedrag van elke storing juist zoo, als met de waarnemingen overeenstemde. Maar de theorie leerde nog meer; zij toonde, dat de hier opgenoemde storingen de beweging van de maan alleen maar in groote trekken, niet in de kleinere details weergeven. Wij hebben de groote storingen ook telkens als werkingen van de gemiddelde waarden der storende krachten leeren kennen; in werkelijkheid wisselen deze krachten van plaats tot plaats en van dag tot dag, en de storingen moeten dus ook veel onregelmatiger verloopen. Ook wordt ieder

dezer werkingen weer anders, omdat door de storingen zelf de plaatsen van de maan en de zon veranderen. Bovendien trekt de afgeplatte aarde de maan wat anders aan dan een volkomen ronde aarde zou doen, en ten slotte bewerkt ook de aantrekking der planeten nog eenige kleinere storingen in de beweging van de maan. Door dat alles loopt het aantal merkbare storingen van de maan in de honderden, en aan hun berekening hebben de knapste theoretici een groot deel van hun leven besteed. Dat was ook noodig, omdat de waarnemingen steeds nauwkeuriger werden; hoe scherper en juister de plaats van de maan aan den hemel vast te stellen was, des te nauwkeuriger moest ook de berekening worden, en des te meer storingen moesten in rekening gebracht worden, om met de waarnemingen in overeenstemming te blijven.

Wat daarbij de geleerden aanvuurde, was niet enkel het wetenschappelijke belang van een zoo volledig mogelijke kennis der wereld. Er was ook een groot praktisch belang in het spel: het voor de scheepvaart zoo buitengewoon belangrijke vraagstuk van *de lengte op zee*. Wil de schipper in de open zee, ver van alle kusten, veilig varen, dan moet hij uit de hemellichten de plaats kunnen bepalen, waar hij zich bevindt, dus zijn lengte en breedte op aarde. De breedte van een plaats is gemakkelijk uit de middaghoogte van de zon te vinden; de ligging van den horizon ten opzichte van den sterrenhemel, dus van de sterren ten opzichte van den horizon, verandert met de breedte. Met de lengte verandert ze niet; of men zich meer Oostelijk of Westelijk bevindt is aan den sterrenhemel niet te zien. De lengte van een plaats kennen wij slechts als het verschil tusschen den plaatselijken tijd, en den tijd van een vaste plaats op aarde, b.v. van de sterrewacht te Greenwich. Van deze beide is weer de plaatselijke tijd uit de hemelverschijnselen gemakkelijk te vinden; overal is het 12 uur plaatselijke tijd als de zon in het Zuiden staat. Weet dus de schipper, hoe laat het op dit oogenblik in Greenwich is, dan is het vraagstuk opgelost en de lengte bekend. Maar hier ligt de moeilijkheid, die de regeeringen van alle zeevarende volken — de Spanjaarden in de 16de, de Hollanders in de 17de, de Engelschen in de 18de en 19de eeuw — telkens opnieuw dwong om hun aandacht aan dit vraagstuk te wijden. Want duizende schepen, die op klippen strandden, waren het offer van de onvolkomenheid in de oplossing van dit probleem.

Hoe is het mogelijk, midden in den oceaan den tijd van Greenwich te weten te komen? Twee verschillende wegen werden daartoe ingeslagen. De eenvoudigste weg is, bij het uitvaren een goed uurwerk — een chronometer — dat Greenwichtijd aanwijst, mee te nemen. Alles hangt er dan van af, dat het uurwerk volkomen goed loopt en den juisten tijd bewaart; daarom heeft de Engelsche Admiraliteit herhaaldelijk hooge premies op elke belangrijke verbetering der chronometers gesteld en uitbetaald, waardoor deze vertrouwbaarder werden. Tegenwoordig behoort een aantal nauwkeurig geregelde en onderzochte chronometers, die elkaar kontroleeren, tot de vast voorgeschreven uitrusting van ieder zeeschip. Maar in den tijd der zeilschepen, toen het vaak maanden duurde, voor het schip weer in een haven kwam, was dit middel toch niet voldoende. Daar werd dan het tweede middel, de waarneming van de maan, toegepast.

De maan doorloopt per dag $^{1}/_{27}$ van den omtrek des hemels, dus ongeveer 13 graden. In den loop van den dag doorloopt zij, langzaam en regelmatig voortwandelend, dezen afstand. Weet men nu, waar zij zich om 12 uur Greenwichtijd bevond, dan is op elk ander oogenblik aan haar plaats aan den hemel te zien, hoe laat het in Greenwich is. Denkt men zich dat bij de plaatsen, waar zij vandaag en morgen om 12 uur staat, de cijfers 0 en 24 gezet worden en dat de tusschenruimte door streepjes in 24 parten verdeeld en met cijfers van 1 tot 24 voorzien is; dan is deze verdeelde strook als het ware een wijzerplaat, waar de maan als wijzer langs loopt. Op de geheele aarde kon men dan op die klok kijken en zien, hoe laat het in Greenwich is. Nu ontbreken aan den hemel die kunstmatige strepen en cijfers; als vaste merkpunten moeten hier de sterren dienen, en in zijn Almanak vindt de zeeman precies opgegeven, hoe ver de maan van uur tot uur Greenwichtijd van naburige sterren verwijderd is. Hij behoeft dus slechts zoo nauwkeurig mogelijk dezen afstand op zijn schip te meten, om midden in den oceaan den Greenwichtijd aan de groote hemelklok af te lezen.

Bij deze methode komt natuurlijk alles aan op de juistheid en nauwkeurigheid van de opgaven in den Almanak, die verscheidene jaren vooruit berekend worden. Daarin bestaat het belang van een volmaakte theoretische kennis van de beweging der maan, dat zij ons in staat stelt, haar beweging jaren lang vooruit te berekenen. Daarom heeft de Engelsche Admiraliteit niet alleen de chronometermakers met prijzen aangemoedigd en beloond, maar ook de sterrekundigen, die in de 18de en 19de eeuw door berekening van nauwkeurige maantafels de grondslagen legden voor deze oplossing van het probleem der lengten op zee. Wij moeten er echter bijvoegen, dat later, onder de stoomvaart, door den korteren duur der reizen, de beteekenis van de maan voor de zeevaart lang niet meer zoo groot was als in den tijd der zeilschepen. En in den nieuwsten tijd is eindelijk een derde, volmaakte oplossing van het oude probleem bereikt door de uitvinding van de draadlooze telegrafie; deze maakt het mogelijk van uit een aantal over de aarde verspreide stations den Greenwichtijd uiterst nauwkeurig aan alle met de noodige ontvangtoestellen toegeruste schepen over te seinen, waar die zich ook op den oceaan bevinden. Is eenmaal de internationale organisatie dezer draadlooze seinen geheel in orde gebracht, dan verdwijnt de vroegere beteekenis van de maan voor de zeevaart geheel en al.

---

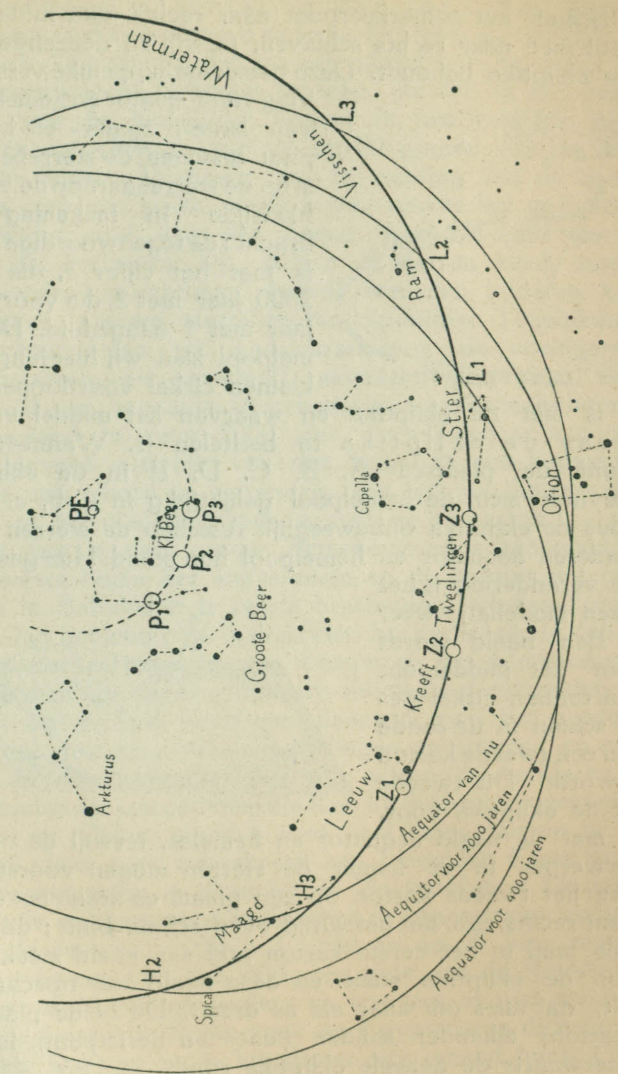
42. DE TERUGGANG DER NACHTEVENINGEN.

Toen de Grieksche sterrekundige Hipparchus zijn waarnemingen van de sterren vergeleek met die, welke anderhalve eeuw vroeger door de Alexandrijnsche sterrekundigen Aristyllus en Timocharis gedaan waren, bemerkte hij, dat bij alle sterren de lengte een paar graden grooter geworden was, terwijl de breedte ten noorden of ten zuiden van de ekliptika gelijk gebleven was. Alle sterren schuiven dus langzaam evenwijdig aan de ekliptika voort, aan den eenen kant van den hemel schuin naar het Noorden, aan den anderen kant schuin naar het Zuiden. Het is of de geheele sterrenhemel langzaam in de richting van de ekliptika ronddraait. Maar ten opzichte waarvan draait hij? Het nulpunt, van waaruit de lengten geteld worden, is het lentepunt, het punt waar de zon, naar het Noorden klimmend, den evenaar des hemels passeert. Dus bestaat het door Hipparchus ontdekte verschijnsel hierin, dat het lentepunt ten opzichte van de sterren langs de ekliptika terugschuift. Deze beweging treedt des te sterker aan het licht, naarmate zij langeren tijd duurt. Wat Hipparchus slechts met moeite door vergelijking van verschillende metingen kon vinden, vertoont zich nu op het eerste gezicht als een duidelijke verandering van den hemel sinds den tijd der Grieken.

Toen, voor ongeveer twee duizend jaren, lag het lentepunt in het sterrebeeld de Ram, en daarmee overeenkomstig het herfstpunt in de Weegschaal, het noordelijkste keerpunt van de zonnebaan in de Kreeft, het zuidelijkste in den Steenbok. Daarvandaan worden nog steeds in leerboeken en almanakken het lente- en herfstpunt als „teeken van den Ram" en „teeken van de Weegschaal" betiteld, en heeten op de wereldkaarten de parallelcirkels, die op 21 Juni en 21 December de zon boven zich hebben, nog steeds „Kreefts- en Steenbokskeerkring". Deze namen wortelen in een traditie der oudheid; op den tegenwoordigen toestand passen zij in het geheel niet meer. Tegenwoordig ligt het lentepunt in de Visschen, het herfstpunt in de Maagd, en zomer- en winterkeerpunt in de Tweelingen en den Schutter, en wel overal reeds dicht bij de grens van de daaraan voorafgaande sterrebeelden. In ruim 2000 jaren schuiven al deze bijzondere punten der zonnebaan een vol dierenriemsbeeld terug. [1])

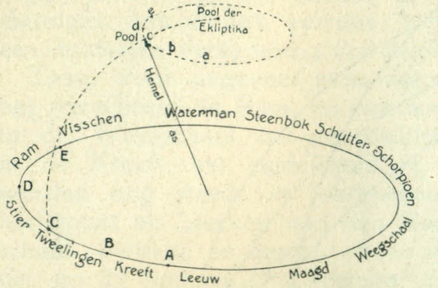
Daardoor verandert tegelijk de plaats van den hemelaequator en de hemelpool tusschen de sterren. Aan den kant van den hemel, waar zich het herfstpunt bevindt, schuift de aequator met dit herfstpunt schuin naar het Noorden, aan den kant van het lentepunt naar het Zuiden. Daar echter lente- en herfstpunt steeds even ver van de Noordpool des hemels blijven, sleepen zij deze hemelpool mee, die dus van de plaats van het herfstpunt af, naar de plaats van het lentepunt toe bewegen moet. De Noordelijke hemelpool ligt het dichtst bij die plaats van de ekliptika, waar zich het zomerkeerpunt bevindt; want het zomerkeerpunt is niets anders dan de plaats, waar de ekliptika het dichtst bij de Noord-

[1]) De lengten, die wij op onze dierenriemskaart door streepjes en getallen hebben aangegeven, gelden dus ook niet voor altijd, maar alleen voor het jaar 1900. De geheele maatstaf der lengten schuift ten opzichte van de sterren langzaam naar rechts, zóó, dat zij in 72 jaren één deelstreep, een graad, verschuift. De lengten, die op de kaart afgelezen worden, gelden ten opzichte van het lentepunt van 1900.

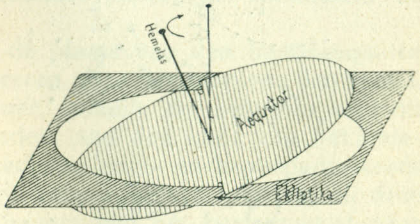


Teruggang der nachteveningen in 4000 jaren.

pool komt. Schuift het zomerkeerpunt naar rechts, dan moet ook de hemelpool mee naar rechts schuiven, terwijl zij denzelfden afstand tot de ekliptika behoudt. Deze gemeenschappelijke verschuiving van aequator en hemelpool, van lente-, zomer- en herfstpunt tusschen de sterrebeelden is op de sterrekaart op de vorige bladzijde in teekening gebracht; de tegenwoordige stand is met het cijfer 3, die voor 2000 jaar met 2, die voor 4000 jaar met 1 aangeduid. De hemelpool zien wij hier langs een kleinen cirkel voortloopen, die evenwijdig is met de ekliptika en waarvan het middelpunt als de pool van de ekliptika te betitelen is. Wanneer het zomerkeerpunt de plaatsen A, B, C, D, E in de ekliptika inneemt, bevindt zich de hemelpool gelijktijdig in a, b, c, d, e.



Terwijl dus de ekliptika onbeweeglijk tusschen de sterren blijft staan, veranderen aequator en hemelpool hun stand. Hun gemeenschappelijke verandering is het best door een modelletje weer te geven. Een naald wordt loodrecht in het middelpunt van een kartonnen cirkel gestoken, die schuin in de ronde opening van een tweede karton gehouden wordt. Dit tweede karton stelt de ekliptika voor, het eerste met de naald aequator en hemelas, terwijl de omringende voorwerpen in de kamer de sterren mogen voorstellen. Men laat nu het tweede karton op zijn plaats en draait het eerste langzaam naar rechts, zoo, dat het altijd even schuin blijft; dit gaat het best als men in het eerste karton nog een naald steekt, die loodrecht op de ekliptika staat, en deze naald zoo tusschen de vingers rolt, dat alles om haar als as draait. De beide plaatsen, waar de kartons elkander snijden (lente en herfstpunt), loopen daarbij achterwaarts de geheele ekliptika rond.



H i e r d o o r o n t s t a a t i n d e n l o o p d e r e e u w e n e e n d i e p g a a n d e v e r a n d e r i n g i n h e t u i t e r l i j k v a n d e n h e m e l. Wij weten, dat op een plaats van de aarde alle sterren achtereenvolgens zichtbaar worden, die tot op een bepaalden afstand van de hemelpool liggen. In ons land b.v. blijven alleen diegene onzichtbaar, die tot op 50 graden van de Zuidpool des hemels liggen. Wanneer nu de richting van de hemelas en de plaats van de polen veranderen, omvat het onzichtbare gebied een ander deel van den hemel. Aan den kant van den hemel, waar het herfstpunt ligt, zakken de sterren steeds zuidelijker weg en worden onzichtbaar, terwijl aan den anderen kant, bij het lentepunt, nieuwe sterrebeelden opduiken. Tegelijkertijd worden de wintersterren tot voorjaarssterren, de voorjaarssterren tot zomersterren, en verschuift, algemeen gesproken, de zichtbaarheidstijd van bepaalde sterrebeelden op een steeds later jaargetijde, een maand in ruim 2000 jaar. Terwijl wij er aan gewend zijn, een bepaald uiterlijk van den hemel en een bepaald jaargetijde steeds met elkaar te verbinden, zien wij nu, dat ook in dit opzicht alles, zij het ook langzaam, wisselt en verandert.

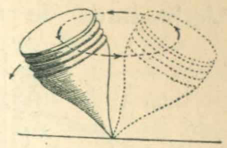
Dit feit is van groote beteekenis voor een goed begrip van het eerste begin der sterrekunde en de kultuur der oude volken. Toen in Babylonië de eerste beschaving opkwam, ongeveer 3000 v. C., lag het lentepunt in den Stier, het herfstpunt in den Schorpioen, het zomerkeerpunt in den Leeuw en het winterkeerpunt in den Waterman. In de astronomisch-religieuse denkbeelden en de oudste sagen en mythen vindt men daarvan, naar het oordeel van vele Assyriologen, nog vele aanduidingen en sporen; en ook de namen van de dierenriemsbeelden zijn alleen te verklaren uit de verschijnselen der jaargetijden, die toen bij deze sterrebeelden behoorden. Sirius en Orion stonden toen veel lager dan nu in het Zuiden, terwijl daar toen omgekeerd het Zuidelijke Kruis zichtbaar was, dat daarvoor nu te dicht bij de Zuidpool staat. De datum, waarop Sirius 's morgens voor het eerst uit de zonnestralen opduikt, verloopt met de eeuwen; 2000 v. C. viel hij op 29 Juni, tegelijk met het eerste wassen van den Nijl; ten tijde van de Romeinen was deze datum al 20 Juli geworden, en kon dus al niet meer de rol vervullen, waardoor Sirius voor de Egyptenaren de belangrijkste aller sterren was; en nu is hij alweer een maand later. Onze poolster aan de punt van den staart van de Kleine Beer heeft deze plaats van rust pas in de laatste duizend jaar ingenomen; vroeger stond zij vrij ver van de pool af, die ten tijde van de Grieken tusschen de beide Beeren lag, en in nog oudere tijden dicht boven den staart van de Groote Beer. Toen moet de draaiing van de Groote Beer om een pool dicht boven zijn staart nog veel meer dan nu een merkwaardig en opvallend verschijnsel geweest zijn; en waarschijnlijk komt het daarvandaan, dat de Groote Beer als aanwijzer der jaargetijden in de oudste Chineesche astronomie een zoo gewichtige plaats inneemt.

Soortgelijke veranderingen zullen ook in de toekomst plaats vinden, al zien wij er zelf door haar buitengewone langzaamheid niets van. De Groote Beer zal zich steeds verder van de Noordpool verwijderen en een sterrebeeld worden, dat voor Midden-Europa op- en ondergaat. Sirius en Orion zullen lentegesternten worden en ten slotte voor onze streken geheel verdwijnen; daarvoor in de plaats treden dan nieuwe zuidelijke beelden in onzen gezichtskring. Na 13000 jaren zal de hemel het allermeest van zijn tegenwoordig uiterlijk verschillen. Dicht bij de Noordpool staat dan de heldere Wega; hoog aan den winterhemel schitteren dan de Schorpioen en de Schutter, en lager, onder hen, staan de Centaurus en het Kruis, die allen te zamen de mooiste gedeelten van den Melkweg bevatten; in de zomernachten staat onze tegenwoordige poolster boven ons hoofd, terwijl zich in het Zuiden Capella en nog lager, dicht bij den horizon, de Stier en de Tweelingen vertoonen.

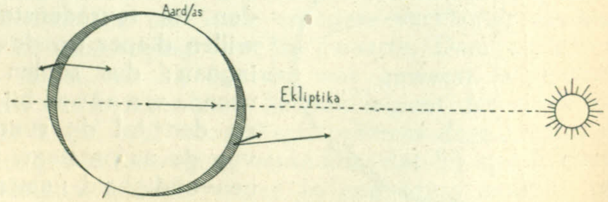
Wat kan wel de oorzaak van deze merkwaardige veranderingen van den hemel zijn? Newton heeft haar door zijn aantrekkingswet volkomen opgehelderd. Wij komen vanzelf tot zijn verklaring, wanneer wij ons model weer ter hand nemen. De naar de hemelpool wijzende naald, die wij de hemelas noemden, is in werkelijkheid de aardas. In plaats van het aequatorblad met de naald moesten wij dus eigenlijk een bolletje nemen, dat de aarde voorstelt, met de naald als as er door gestoken; aardas en aardbol voeren in werkelijkheid dezelfde beweging uit als het aequatorblad in ons eerste model. Willen wij nu alles nog echter maken, dan laten wij dit aardbolletje met razende snelheid om zijn as snorren — want in 2000 jaar, waarin de as zich slechts een klein eindje verplaatst,

draait de aarde 700 000 maal om haar as. En kijken wij nu ons toestelletje goed aan, dan herkennen wij daarin het speelgoed, dat ons den weg ter verklaring aanwijst: de tol.

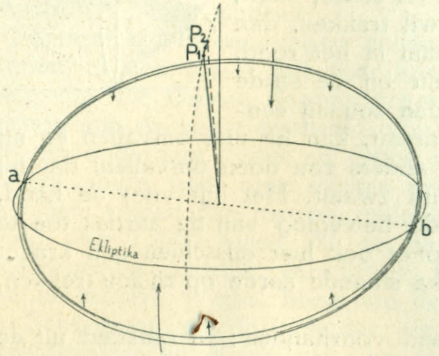
We hebben de aarde vroeger al eens met een tol vergeleken. Aan een rechtop staanden tol zagen wij hoe een snel draaiend voorwerp zijn as steeds in dezelfde richting tracht te houden, en zoo begrepen wij, waarom ook de as van de aarde bij haar jaarlijkschen omloop haar stand behoudt. Wanneer echter een tol scheef staat, en dus een kracht hem opzij wil trekken, dan zwaait hij met zijn as langzaam in het rond, op dezelfde manier als wij nu bij de aarde bevonden. Draaide hij niet, dan zou hij eenvoudig omvallen; nu hij snel draait, kan hij niet omvallen en nu bewerkt de kracht, die hem anders zou doen omvallen, dat hij in schuinen stand in het rond zwaait. Het ligt voor de hand, dezelfde verklaring ook op de beweging van de aardas toe te passen en de vraag te stellen, of er ook hier misschien een kracht is, die de scheef op de ekliptika staande aarde op zij zou trekken, als zij niet zoo snel draaide.

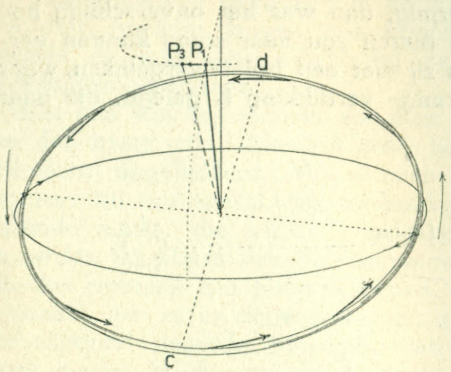


Zulk een kracht is inderdaad voorhanden; zij ontstaat uit de aantrekking, die zon en maan op de afgeplatte aarde uitoefenen. Was de aarde zuiver bolvormig, dan was het onverschillig hoe ze staat, en geen kracht van buiten zou haar stand kunnen veranderen. Nu zij afgeplat is, is zij met een bol te vergelijken, waar om den evenaar een ringvormige verdikking is gelegd, die naar



het Noorden en Zuiden toe steeds dunner wordt. Deze ring, die scheef ten opzichte van de ekliptika ligt, wordt door de zon en de maan aangetrokken; daar zij in de ekliptika staan, trachten zij hem naar de ekliptika te trekken. In de figuur is de aantrekking, die de zon op het naaste en verste deel van den ring uitoefent, door dunne lijntjes voorgesteld; de dikke pijlen geven aan, hoeveel deze anders zijn dan de aantrekking op het middelpunt, die de aarde als geheel doet bewegen. Wij zien, hoe deze overblijvende krachten den ring naar de ekliptika trachten te draaien en dus de geheele daaraan vastzittende aarde rechtop te zetten. Verhinderde de snelle aswenteling dit niet, dan zou de aardas zich onder de werking van die krachten loodrecht op de ekliptika stellen. Door de aswenteling komt in plaats daarvan, evenals bij den tol, een rondzwaaien van de as om den stand, waar zij heengetrokken wordt. De teruggang der nachteveningen is dus een noodzakelijk gevolg van de aantrekking van de zon en maan op de scheef op de ekliptika staande, afgeplatte, snel om haar as wentelende aarde.





Maar wij willen ons nu niet met deze vergelijking met den tol tevredenstellen, wij willen dieper op de oorzaken ingaan; dus stellen wij de vraag, waarom bij de aarde en den tol dit rondzwaaien van de as ontstaat. Voor de eenvoudigheid nemen wij enkel een ring, die om den evenaar van een bolvormige aarde ligt en zoo aan de aarde vastzit; in onze figuur ligt de laagste plaats van den ring onder de ekliptika naar voren, de

hoogste naar achteren, dus staat de as schuin naar voren. De aantrekking van zon en maan probeert nu dezen ring van uit zijn scheeven stand in het vlak der ekliptika te brengen; aan den voorkant worden de deeltjes van den ring naar boven, aan den achterkant naar beneden getrokken. Was er geen draaiing om de as, dan zou daardoor een beweging ontstaan (1ste figuur), die het voorste deel van den ring naar boven, het achterste naar beneden schuift, dus den heelen ring om de as a b doet wentelen en de schuin naar voren staande aardas naar achteren drukt, van P_1 naar P_2, zoodat zij steeds steiler gaat staan, totdat zij eindelijk loodrecht op de ekliptika staat. Nu draait echter de ring met de geheele aarde snel om de aardas, en alle deelen van den ring bewegen zich aan den voorkant snel naar rechts, aan den achterkant snel naar links. De nieuwe kracht, die ze naar de ekliptika toe trekt, kan nu alleen maar de richting van de beweging een beetje veranderen, zooals de tweede figuur doet zien; aan den voorkant wordt de beweging schuin naar boven, aan den achterkant schuin naar beneden gericht. Deze verandering komt hierop neer, dat de geheele ring met al wat er aan vastzit, een beetje om de as c d draait, aan den rechterkant iets hooger, aan den linkerkant iets lager komt. Daarbij schuiven de snijpunten met de ekliptika iets terug, en de aardas verzet zich wat naar links, van P_1 naar P_3, waarbij zij even scheef blijft als te voren. Doordat ditzelfde in den nieuwen stand weer juist zoo plaatsvindt en zich telkens in gelijke omstandigheden herhaalt, zwaait de aardas steeds meer naar links, altijd even schuin ten opzichte van de ekliptika blijvend, in een kring in het rond.

Men bemerkt hier een zekere overeenstemming, zij het ook wat ingewikkelder, met onze vroegere verklaring van het ontstaan van een cirkelbeweging door de zwaarte. Daar werkte een kracht, die den kogel, als hij in rust was geweest, naar beneden had getrokken, steeds meer naar het middelpunt der aarde toe; omdat echter de kogel snel voortvliegt, bewerkt deze kracht, dat alleen zijn richting van beweging verandert, dat hij steeds even ver van het middelpunt afblijft en er in een kring omheen loopt. Hier werkt een draaiende kracht, die de richting van de aardas naar de richting, loodrecht op de ekliptika, toe trekt; door het snelle rondtollen om de as blijft hij echter steeds even ver van dit doel af en zwaait er in een kring omheen.

Ook is er overeenstemming met de verklaring, die in het vorig hoofdstuk voor het teruglopen der maansknoopen gegeven werd. Als de ring uit enkel losse deeltjes bestond, die achter elkaar aan liepen, zoodat de as slechts een denkbeeldige lijn was, dan zou toch de geheele redeneering op dezelfde manier blijven gelden; deze deeltjes zouden door de kracht, die hen naar de ekliptika toe trekt, de richting van hun beweging veranderen, en wel zoo, dat het snijpunt van hun banen met de ekliptika langzaam terugwijkt. Elk dezer deeltjes stond dan met een maantje gelijk, en we hadden precies het geval van de maan, die in een schuin tot de ekliptika staande baan om de aarde loopt. Wij hebben dus hier een anderen vorm van het vroeger gegeven bewijs voor het teruglopen der maanknoopen.

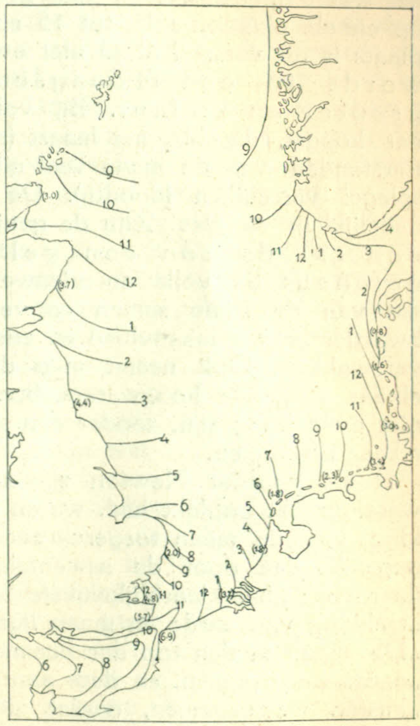
Zoo heeft Newton dadelijk met behulp van zijn wet der aantrekkingskracht een verklaring voor dezen vanouds bekenden teruggang der nachteveningen gegeven. Nu staat de maan niet precies in de ekliptika; haar baan staat, in 18 jaren wisselend, nu eens meer, dan weer minder schuin op den aardevenaar dan de ekliptika. De kracht van de maan wisselt dus eenigszins in een 18-jarige periode, en daarom komen er bij de regelmatige zwaaiing der aardas nog kleine schommelingen in deze periode bij.

43. EBBE EN VLOED.

Ieder schipper en iedereen, die aan de zeekust of in een havenstad woont, kent de getijden, de wisseling van ebbe en vloed. Tweemaal per dag stijgt het zeewater en stroomt in de baaien en riviermonden; tweemaal daalt het en stroomt terug. Het hoogwater komt echter niet altijd even laat; elken volgenden dag komt het ongeveer 50 minuten later dan den vorigen dag: na 14 dagen is het 12 uur later gekomen, zoodat dan het eene hoogwater op denzelfden tijd van den dag valt als 14 dagen vroeger het andere hoogwater. Wat beteekent deze regelmatige verschuiving? Ook de maan verlaat zich ongeveer 50 minuten per dag. *Ebbe en vloed volgen de maan; zij komen altijd een vasten tijd na de oogenblikken, waarop de maan in*

het Zuiden het hoogst, of in het Noorden onder den horizon het laagst stond. Dit tijdsverloop, dat het hoogwater na de maan komt — dus de tijd van hoogwater op den dag van volle of nieuwe maan, als de maan om 12 uur in het Zuiden staat — heet *haventijd*. Voor de schippers is het van groot belang dezen haventijd, die voor elke zeeplaats en haven verschillend is, te kennen, omdat vele havens alleen bij hoogwater met diepgaande schepen te bereiken zijn, en bij andere het in- en uitstroomende water de schepen meevoert.

Vergelijkt men nu den haventijd van een aantal naburige plaatsen, dan ziet men dat hij regelmatig van plaats tot plaats verandert; op het kaartje is hij voor de kusten der Noordzee van uur tot uur aangegeven. Men ziet hier, hoe het hoogwater als een golf voortschuift; van uit het Noorden buigt een golf om Schotland heen, die langs de Engelsche en Noorsche kusten naar het Zuiden loopt, terwijl uit het Zuiden, uit het Kanaal een golf langs de Hollandsche en Duitsche kusten oploopt. Deze vloedgolven loopen natuurlijk ook over de open zee, al kan men ze daar bij gebrek aan peilschalen niet bemerken. Van de beide golven, die van het Noorden en van het Zuiden komen, nemen wij aan de kusten de vereenigde werking waar; aan de getallen tusschen haakjes op de kaart, die de vloedhoogte in meters aangeven, is te zien, hoe zij elkaar op sommige plaatsen



Vloedgolf in de Noordzee.

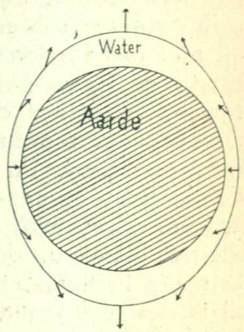
versterken, op andere verzwakken. Het eerste is het geval bij de wadden, van Den Helder tot Esbjerg, waar de gescheurde kusten het geweld van de door stormvloeden veroorzaakte overstroomingen toonen; het laatste is het geval bij de gave kustlijn van Noord-Holland en van Jutland.

Wij zien hier hoe het verschil tusschen hoog en laag water niet overal even groot is. Aan rechte kusten en bij eilanden in den oceaan is het vaak niet eens een meter; waar echter de vloedgolf in een zeeëngte dringt, die steeds nauwer wordt, wordt het water opgestuwd, en daar groeit het verschil tot vele meters, op enkele plaatsen zelfs tot 15 en 20 meter. Maar ook op dezelfde plaats is dit verschil altijd niet even groot; de *vloedhoogte wordt in een 14-daagsche periode beurtelings grooter en kleiner*. Bij volle en nieuwe maan is de vloed het hoogst, de ebbe het laagst (springtij), terwijl zij in de kwartierstanden van de maan veel minder van den gemiddelden zeespiegel verschillen (doodtij). De oorzaak van dit verschijnsel is dadelijk in te zien. Zijn de getijden een werking van de maan, *dan zal de zon een gelijksoortige werking uitoefenen*; bij volle en nieuwe maan valt deze werking met die van de maan samen en versterken zij elkaar, terwijl in de kwartierstanden maanvloed en zonneebbe samenvallen, dus elkaar verzwakken. Ook neemt men dikwijls waar, dat de beide op elkaar volgende hoogwaters, b.v. de dagvloed en de nachtvloed niet even hoog zijn, zoodat een sterke en een zwakke vloed met elkaar afwisselen.

Reeds voordat Newton zijn aantrekkingskracht als algemeene wereldkracht ontdekt had, waren de getijden al aan een aantrekking van de maan toegeschreven. Terwijl Galilei de oorzaak in ongelijkheden door de aswenteling der aarde zocht, zei Kepler daarover: „het klaarblijkelijkste bewijs voor de wederzijdsche aan- „trekking van aarde en maan ligt in de ebbe en vloed der zeeën. „De maan in den top der oceanen trekt de wateren aan, die de „aarde omstroomen, en deze aantrekking bewerkt, dat zij van hun „kusten wegstroomen, omdat zij zich naar de open, niet door „vastelanden afgesloten gedeelten der zeeën spoeden, die juist „onder de maan liggen." Newton kon dus dadelijk op de getijden als bewijs voor de algemeenheid der aantrekking wijzen; en

omdat hij de wetten van deze aantrekking nauwkeurig had vastgesteld, kon hij een volledige verklaring geven.

Zon en maan trekken alle deeltjes van de aarde aan, en het totaal van al deze aantrekkingen is de geheele kracht, die de beweging van de aarde als geheel bepaalt, en die juist zoo groot is, alsof alle deeltjes in het middelpunt verzameld waren. Maar al deze deeltjes worden niet even sterk aangetrokken; die het dichtst bij de maan (of de zon) zijn, worden het sterkst, die aan den achterkant liggen het zwakst aangetrokken. Hier geldt nu hetzelfde als wij op bladzij 282 voor de krachten vonden, die op de maan werken; de beweging van de aarde als totaallichaam wordt door de kracht bepaald, die op het middelpunt werkt; wordt een deeltje aan den achterkant zwakker aangetrokken, dan heeft het neiging om langzamer dan de totale aarde naar de maan te bewegen, dus achter te blijven, d.w.z. omhoog te stijgen. Zijn gewicht wordt zooveel verminderd, als de op hem werkende kracht van de maan minder is dan die op het middelpunt werkt. Het verschil tusschen de kracht op een of ander deeltje en de kracht op het middelpunt bepaalt de beweging van dit deeltje ten opzichte van het middelpunt. Nu blijft de aardkorst voor die krachten ongevoelig — alleen voor zooverre zij niet geheel vast, of eenigszins veerkrachtig is, kan zij er iets door vervormd worden — maar het beweeglijke water moet er aan gehoorzamen. Hoe zijn nu die krachten? Voor deze geldt hetzelfde, wat wij vroeger voor de op de maan werkende storende zonnekrachten vonden; aan den voor- en den achterkant zijn ze van het middelpunt af gericht en verzwakken zij de zwaartekracht; zijdelings zijn ze naar het middelpunt toe gericht en versterken zij de zwaartekracht. Denken wij ons de aarde geheel met water bedekt, dan moet het water aan den kant tegenover en naar de maan (of de zon) toe, waar de zwaarte verminderd is, omhoog stijgen; daar stroomt het onder de werking van de maankracht van alle kanten heen, terwijl het zijdelings, waar de zwaarte sterker is geworden, lager komt. Het wateroppervlak krijgt zoo den vorm

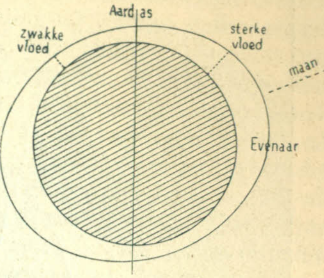


van een ei met twee gelijke spitsen, of een naar twee kanten uitgerekten bol. Alleen bij die gedaante blijft het wateroppervlak onder de gezamenlijke werking van maankracht en zwaartekracht in evenwicht.

Zulk een afwijking van den bolvorm van het wateroppervlak wordt nu zoowel door de zon als door de maan teweeggebracht; maar de afwijking door de zon is de kleinste. Hoe is dat mogelijk, terwijl de aantrekkende kracht van de zon op de aarde toch ruim 170 maal grooter is dan die van de maan? De zon is 12000, de maan slechts 30 aardmiddellijnen van ons verwijderd; over denzelfden afstand, b.v. tusschen den voorkant en het middelpunt der aarde, vermindert de zonnekracht 400 maal minder snel dan de maankracht; en deze vermindering, dit verschil, dat de oorzaak van ebbe en vloed is, is dus bij de zon slechts half zoo groot als bij de maan. Daarom bepaalt de maan de hoofdzaak van het verschijnsel, en werken de zonnegetijden slechts als verzwakking of versterking van de maangetijden. Wij zullen verder alleen maar over de maangetijden spreken, alsof de maan er alleen was; wij denken er dan wel aan, dat zij bij volle en nieuwe maan $1^1/_2$ maal zoo sterk, bij eerste en laatste kwartier tot nagenoeg de helft verzwakt zijn.

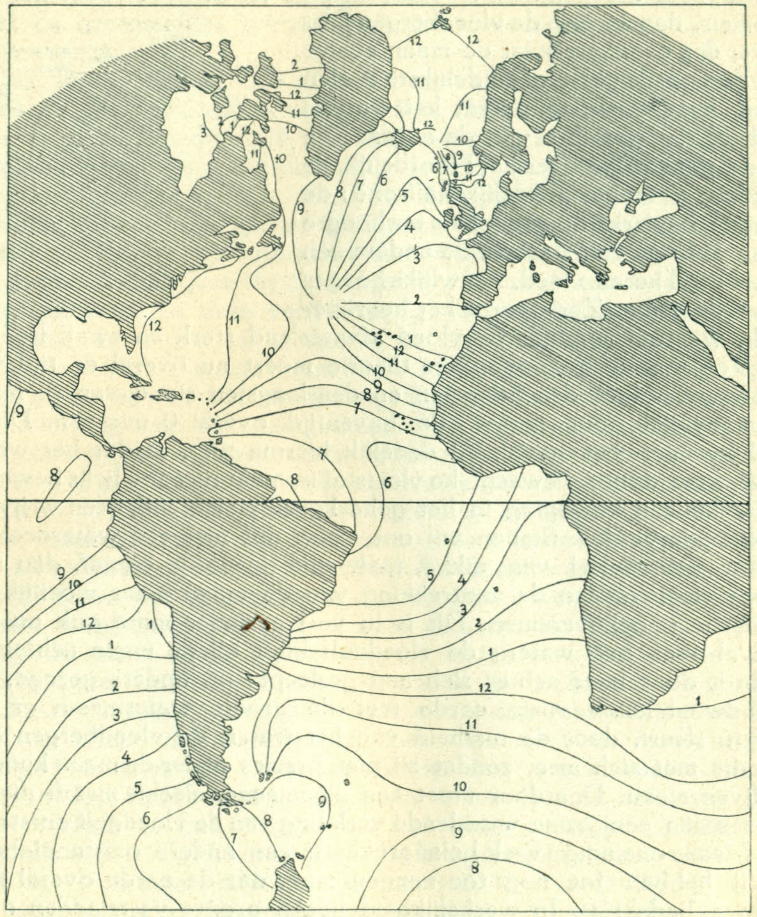
Nu draait de aarde om haar as en keert in den loop van den dag alle kanten naar de maan toe. De beide watereispitsen, die naar de maan toe en van de maan afgekeerd zijn, kunnen natuurlijk niet meedraaien; zij moeten naar de maan toe gekeerd blijven, terwijl de vaste aarde en het diepere water van den oceaan als 't ware onder hen door draait. Of, zooals het zich voor ons aardbewoners vertoont: de maan loopt elken dag eens om de aarde heen en sleept de waterbergen mee, die als twee reusachtige vloedgolven over de vaste aarde en den wereldoceaan heen strijken. Ziet men ergens de maan in het Oosten opkomen en hooger klimmen, dan begint ook het water te stijgen; wanneer de maan in het Zuiden staat, gaat de hoogste golfkam ons voorbij; hij is des te hooger, naarmate de maan dichter langs het toppunt des hemels strijkt. Daalt de maan naar het Westen, dan wordt het ebbe, en het water staat op zijn laagst als de maan ondergaat. Dan komt de tegenoverliggende golf aanloopen, waarvan de kam ons voorbij trekt, wanneer de maan in het Noorden het diepst onder den horizon staat.

Wij zien hier nu meteen de verklaring voor een andere eigenaardigheid der getijden. Bevindt zich de maan in den aequator des hemels, dan loopen de vloedbergen juist over den evenaar. Staat de maan echter in de noordelijkste of zuidelijkste deelen van haar baan, dan staat het waterei scheef ten opzichte van de aardas; de eene punt strijkt over het Noordelijk, de andere over het Zuidelijk halfrond; de eerste bewerkt op een plaats ter hoogte van Europa een sterken, de andere een veel zwakkeren vloed, nauwlijks hooger dan de ebbe. Zoo wordt het begrijpelijk, waarom somtijds de vloed afwisselend sterk en zwak is.



Volgens deze eenvoudige theorie moest nu overal de tijd van hoogwater met den hoogsten en den laagsten stand van de maan samenvallen, dus m.a.w. de haventijd overal 0 uur zijn. Dit is echter niet het geval. Al dadelijk hierom niet, omdat het water wel eene dunne beweeglijke vloeistof is, maar niet zoo licht beweeglijk, dat zijn beweging in het geheel geen weerstand, geen wrijving zou ondervinden. Stellen wij ons voor, dat niet een wateroceaan, maar een hulsel van dikke, taaie olie de aarde omgaf, dan zou deze vloeistof aan de aantrekking van de maan maar moeilijk en langzaam gehoorzamen. Dit is in veel geringer mate ook nu het geval met het water; de vloedgolf blijft bij de maan achter en wordt door haar achter zich aan gesleept; of, anders gezegd, de rondwentelende vaste aarde met de groote watermassa er om heen sleurt, door de taaiheid van het water, de vloedbergen een eindje met zich mee, zoodat zij niet precies onder de maan kunnen blijven staan. Daardoor moet een algemeene, slechts met de diepte der zeeën eenigszins wisselende verlating van de vloedgolf ontstaan.

Maar oneindig veel belangrijker is een andere omstandigheid. Wij hebben tot nog toe aangenomen, dat de aarde overal met water bedekt is. In werkelijkheid liggen groote vastelanden over den aardbol verspreid, die de vloedgolf verhinderen regelmatig voort te loopen. Waar deze tegen een vasteland stoot, moet zij uitwijken, ombuigen, achterblijven, om later in de open zee weer vooruit te schieten. De vastelanden verdeelen het water in een



De vloedgolf in den Atlantischen Oceaan.

aantal bekkens, die slechts door nauwe straten verbonden zijn; van een geregeld om de aarde loopende vloedgolf kan dus eigenlijk in het geheel geen sprake zijn. In ieder oceaanbekken ontstaat een eigen, uiterst ingewikkelde golfbeweging; waar zulk een golf aan den ingang van een zeearm komt, rolt zij daarin voort volgens haar eigen wetten, zonder zich verder om de maan te bekommeren, soms zelfs in oostelijke richting tegen de beweging van de maan in.

Er is al dikwijls geprobeerd, om uit de haventijden van alle mogelijke kustplaatsen op aarde op een kaart weer te geven, hoe de vloedgolf over de oceanen voortloopt, op die manier, dat alle plaatsen op zee, die tegelijkertijd hoogwater hebben, door lijnen met elkaar verbonden worden. Natuurlijk is dat uiterst moeilijk, omdat men alleen gegevens van kustplaatsen heeft; midden in den oceaan is geen peilschaal te plaatsen, en de verstrooide eilanden vullen dit gemis maar gebrekkig aan. Waar deze lijnen ver van de kust af loopen, berusten ze grootendeels op fantasie. Een beeld van deze moeilijkheid kan ons kaartje van de Noordzee geven, waar deze lijnen aan de kusten aangegeven zijn; wie beproeft de lijnen over de open zee te teekenen, zal bemerken, dat dit bijna onmogelijk is. Men heeft wel gemeend, dat ten minste voor de groote oceanen, zooals de Indische en de Stille Oceaan, de vloedgolf vrij regelmatig van het Oosten naar het Westen voortrolde; en zoo vindt men het ook op oude kaarten voorgesteld. Maar in werkelijkheid is de beweging van het water hier oneindig veel gekompliceerder; hier vindt men plaatsen zonder getijwisseling, waar de vloedgolf in een kring omheenloopt; daar vindt men gebieden, waar de geheele watermassa als in een tobbe heen en weer schommelt. Voor den Atlantischen Oceaan is de vloedbeweging nog het best bekend. Uit de Zuidelijke IJszee komt de vloedgolf aanrollen, en loopt door dezen oceaan, die eigenlijk niet meer dan een breede zeestraat is, noordwaarts. Met de maan heeft deze golf dan niets meer te maken; na 12 uren heeft zij de kusten van Senegambië en van Noord-Amerika bereikt, en nog 12 uur later is zij op Spitsbergen gekomen en om Schotland heen en langs Calais in de Noordzee gedrongen. Vindt men dus in Ostende of aan de Schotsche kust een haventijd van 12 uur, d.w.z. dat de vloedgolf tegelijk met de maan komt, dan is deze golf reeds een dag vroeger door de maan veroorzaakt.

Bedenkt men nu, dat de sterkte van de vloedgolf nog weer verandert, al naar zon en maan verder noordelijk of zuidelijk staan, en dat ook de verschillende achter elkaar loopende golven elkaar weer beïnvloeden en doorkruisen, dan beseft men, hoe moeilijk het moet zijn, alleen nog maar het werkelijk verloop der verschijnselen uit de ervaring vast te stellen. En eerst wanneer dat gebeurd is, kan men trachten, dit verloop met den kustvorm en de diepte der zeeën in verband te brengen. Zoo eenvoudig en natuurlijk de verklaring van ebbe en vloed uit de aantrekking van zon en maan in het algemeen is, zoo moeilijk is het, de ingewikkelde bijzonderheden van dit verschijnsel uit de vormen van het aardoppervlak te verklaren.

---

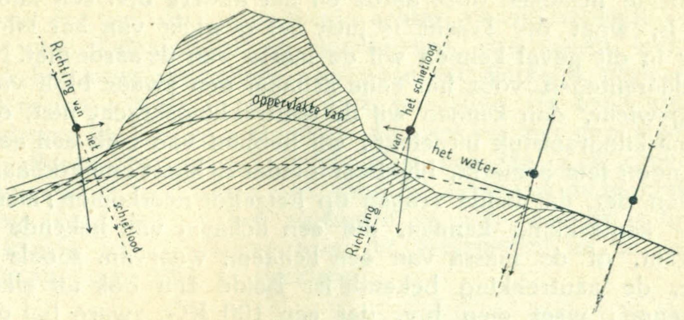
44. HET GEWICHT VAN DE AARDE.

In de uitdrukking „gewicht van de aarde” ligt eigenlijk een tegenstrijdigheid; want het gewicht van een ding geeft aan, hoe sterk het door de aarde wordt aangetrokken. Toch wordt de uitdrukking algemeen gebruikt, en ieder voelt ook onmiddellijk wat er mee bedoeld wordt: d e m a s s a v a n d e a a r d e. Wij stellen dus de vraag: hoeveel malen is de massa van de aarde grooter dan de massa van een kilogram, b.v. dan de massa van het stuk platina, dat in Parijs als standaard van het kilogramgewicht bewaard wordt? Omdat bij de dingen in onze omgeving het gewicht 10 of 100 keer zoo groot is, wanneer de massa 10 of 100 keer grooter is, zijn wij gewend altijd gewicht te zeggen, wanneer wij massa bedoelen. In dien zin spreken wij dan ook van het gewicht van de aarde, maar wij bedoelen de massa.

De wet van Newton zegt, dat de kracht, waarmede twee voorwerpen elkaar aantrekken, evenredig met de massa van beiden verandert en omgekeerd evenredig met het vierkant van den afstand. K u n n e n w i j d u s n u d e k r a c h t b e r e k e n e n, w a n n e e r w i j d e b e i d e m a s s a's e n h u n a f s t a n d k e n n e n? N e e n, e n d a a r o m m o e t e r a a n d e z e w e t n o g i e t s t o e g e v o e g d w o r d e n. Wij moeten voor één geval, voor twee lichamen met bekende massa's en bekenden afstand, de

kracht kennen; door de wet van Newton kennen wij ze dan voor alle andere gevallen. Nu kennen wij de kracht in geval het eene der beide lichamen onze aarde en het andere b.v. een kilogramstuk is, want die kracht is juist het gewicht van het kilogram. Maar in dit geval kennen wij de massa van de aarde niet. Nemen wij daarentegen voor het eene lichaam een zwaar blok van een ton gewicht, dan kennen wij de aantrekkingskracht niet, die het op ons kilogramstuk uitoefent; wij hebben van zulk een aantrekking nooit iets bemerkt, blijkbaar omdat zij haast onmerkbaar klein is. Men ziet, dat beide vragen op hetzelfde neerkomen; men moet òf de aantrekking kennen, die een lichaam van bekende massa uitoefent, òf de massa van een lichaam, waarvan, zooals bij de aarde, de aantrekking bekend is. Beide zijn ook uit elkaar te berekenen; weet men b.v. dat een 100 KG. zware bal op een afstand van 1 M. een lichaam met een kracht aantrekt, die 100 000 maal kleiner dan zijn gewicht is, dan rekenen wij: van het aardmiddelpunt is het lichaam 6 millioen meter, dus 6 millioen keer verder verwijderd dan van den bal, en toch trekt de aarde het nog 100 000 maal sterker aan: op gelijken afstand zou de aarde het dus 6 millioen × 6 millioen × 100 000 keer sterker aantrekken, en de massa van de aarde is dus 6 millioen × 6 millioen × 100 000 keer grooter dan die van den bal van 100 KG. D e b e p a l i n g v a n d e m a s s a d e r a a r d e i s d u s h e t z e l f d e a l s d e b e p a l i n g v a n d e o n d e r l i n g e a a n t r e k k i n g v a n t w e e v o o r w e r p e n v a n b e k e n d e m a s s a.

Nu is zelfs de aantrekking van een blok van 100 of 1000 KG. zoo onmerkbaar gering, dat het buitengewoon moeilijk is ze te meten. Men heeft daarom eerst beproefd het vraagstuk op te lossen door de aantrekking van heele bergen te meten. Toen wij de gedaante van de aarde behandelden, hebben wij vermeld, dat het oppervlak van het stilstaande water, als het door kanaaltjes overal door het vaste land geleid werd, niet precies een afgeplatte bol is, maar op onregelmatige wijze soms hooger, soms lager ligt, vooral in de buurt van gebergten. Wij zien nu, wat de oorzaak van deze onregelmatigheden is; de groote bergmassa's trekken alles in hun buurt aan; daardoor moet het schietlood aan beide kanten een beetje scheef naar het gebergte toe hangen, en de waterspiegel, die loodrecht op het schietlood staat, moet in de buurt van het gebergte hooger komen. Ook andere onregelmatigheden van de aardkorst, b.v. bijzonder zware of bijzonder lichte



Aantrekking van een berg.

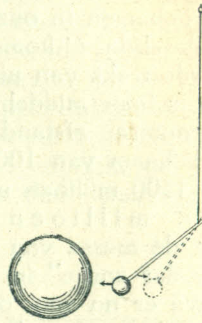
gesteenten, diep onder het aardoppervlak, bewerken zoo een hoogeren of lageren stand van het wateroppervlak.

Toen deze aantrekking der bergen in de 18de eeuw opgemerkt werd, begreep men dadelijk, dat zij ons de massa van de aarde kon leeren kennen. In 1774 deed de Engelsche sterrekundige Maskelyne met dit doel nauwkeurige metingen van de poolshoogte op twee plaatsen ten Noorden en ten Zuiden van een alleenstaanden berg in Schotland; en hij vond het verschil inderdaad aanmerkelijk grooter dan het volgens den afstand der beide plaatsen moest zijn. Dit kwam natuurlijk door de aantrekking van den berg; uit de figuur is te zien, dat de richtingen van het schietlood aan beide zijden van den berg veel meer verschillen, dan zonder den berg het geval zou zijn. Uit de afwijking was te zien, hoeveel malen de aantrekking van den berg kleiner is dan die van de aarde; uit de hoogte en den omvang van den berg benevens het gewicht van het gesteente, waaruit hij bestond, kon men de massa van den berg schatten en zoo de massa van de aarde vinden. Natuurlijk blijft de uitkomst ietwat onzeker, daar men niet precies weet, welk gesteente zich diep in het binnenste van den berg bevindt.

In de 19de eeuw werden de instrumenten zooveel nauwkeuriger en fijner, dat het nu niet meer hopeloos scheen, de zwakke aantrekking van een gewoon handelbaar aardsch voorwerp te meten.

Allerlei methoden en instrumenten zijn daarvoor gebruikt. Het meest voor de hand liggende is een gewone weegschaal, die natuurlijk buitengewoon gevoelig moet zijn; daarmee hebben Jolly te München, Poynting in Engeland en later nog anderen de massa van de aarde bepaald. Ligt in de beide schalen een gewicht van 1 kilo, dan is de balans in evenwicht; wordt dan een zware metalen bol beurtelings onder het eene en onder het andere gewicht geplaatst, dan wordt dit door de aantrekking van den bol een paar milligram zwaarder, en deze gewichtsvermeerdering werd nauwkeurig gemeten.

Een andere manier, de oudste van alle, is die, welke het eerst door Cavendish in 1797 toegepast werd. Aan een metaaldraad hangt, in het midden opgehangen, een horizontale stang met kleine bollen aan de beide uiteinden. Hangt alles geheel in evenwicht en draait men dan de stang een weinig om den draad als as, dan wordt deze draad iets ineengedraaid, gewrongen, tracht zich te ontwringen en brengt zoo de stang weer in den eersten stand terug.



De kracht, waarmee de gewrongen draad de stang weer terug wil draaien, is wel uiterst gering, wat zich in de langzaamheid van de slingeringen heen en weer verraadt. Maar dat komt hier juist van pas; want nu kan de aantrekking van twee zware bollen, die naast de kleine bolletjes gezet worden, zooals de figunr aangeeft, de stang merkbaar uit haar ruststand trekken. Hier wordt dus de aantrekking van een zwaren bol niet onmiddellijk met die van de aarde vergeleken, maar met de uiterst zwakke draaikracht van een gewrongen draad; uit de langzaamheid der slingeringen, die deze kracht bewerkt, kan men afleiden, hoeveel malen zij zwakker is dan de aantrekkingskracht der aarde.

Uit al deze verschillende metingen is nu gevonden, dat *een lichaam van 100 kilo op een afstand van 1 meter een aantrekkingskracht uitoefent, die niet meer* bedraagt dan een 1500 millioenste van de aantrekking der aarde, dus een voorwerp van een kilogram met een kracht van $^1/_{1500}$ milligram aantrekt. Als men daarmee de elektrische en magnetische krachten vergelijkt, die kleine voorwerpjes zelfs tegen hun zwaarte in naar boven trekken, dan ziet men, dat de algemeene aantrekkingskracht tot de allerzwakste natuurkrachten behoort. Alleen omdat zij van reusachtige wereldlichamen uitgaat, wordt zij tot die machtige beweegkracht, die de loopbanen der wereldbollen beheerscht. Hadden wij haar niet dagelijks als aantrekking van den geweldigen aardbol voor oogen, dan waren wij zeker nooit op de gedachte gekomen, de onmerkbaar kleine wederzijdsche aantrekking van de lichamen in onze omgeving te onderzoeken.

Wij kunnen dezelfde uitkomst ook als massa der aarde uitdrukken. De aarde trekt van uit een afstand van 6360000 meter — want zoover is haar middelpunt van ons af: en van uit dien 6360000 maal grooteren afstand trekt zij nog 1500 millioen maal sterker dan het lichaam van 100 Kilo; dus is haar massa 6360000 × 6360000 × 1500 millioen maal grooter dan dit lichaam, dus 6 millioen × millioen × millioen × millioen keer grooter dan de massa van een kilogramstuk. Dit getal drukt dus „het gewicht der aarde" in kilogrammen uit.

Wat hebben wij er nu aan, of wij dit reuzengetal kennen, dat wij niet eens kunnen uitspreken? Wanneer wij het vergelijken met den inhoud van de aarde, kunnen wij er een paar belangrijke gevolgtrekkingen over de innerlijke natuur der aarde uit afleiden. Het gewicht van een lichaam hangt ten eerste van zijn inhoud af, en ten tweede van de dichtheid of het soortelijk gewicht der stof, waaruit het lichaam bestaat. Deze dichtheid, het gewicht van een kubieken decimeter of een liter van de stof, drukt uit, hoeveel malen zij zwaarder of lichter dan water is, want 1 liter water weegt 1 Kilo. De meest voorkomende mineralen en gesteenten, zooals kwarts en veldspaat, hebben een dichtheid van ongeveer 2½; daarentegen zijn de meeste metalen veel zwaarder: ijzer heeft een dichtheid van 7 tot 8, lood van 11, goud zelfs van 19. Wat is nu de dichtheid van de aarde? Berekenen wij haar inhoud, dan vinden wij 1083 × millioen × millioen × millioen kubieke meter; dus moet een kubieke meter van

het aardlichaam 5500 kilogram wegen, d.w.z. de dichtheid der aarde is 5½.

Nu bestaat de aardkorst, zoover wij er door mijnen en boringen in kunnen dringen, uit gesteenten, die een dichtheid tusschen 2 en 3 hebben. Dat de aarde gemiddeld zooveel zwaarder is, bewijst, dat zij niet geheel en al uit zulke gesteenten kan bestaan; het voor ons onbereikbare binnenste der aarde moet uit andere, veel zwaardere stoffen bestaan. Daar wij geen andere zoo zware stoffen kennen dan metalen, neemt men aan, dat het binnenste der aarde door metalen, en wel vooral door ijzer wordt gevormd. Deze gevolgtrekking wordt nog op andere wijze bevestigd. Theoretische berekeningen hebben aangetoond, dat de aarde, als zij van binnen naar buiten overal uit dezelfde stof bestond, sterker moest afgeplat zijn dan zij is; haar kleinere afplatting bewijst, dat zij in haar binnenste dichter moet zijn dan aan de oppervlakte. Waarnemingen van aardbevingen hebben in de laatste jaren geleerd, dat de metalen kern en de steenen korst door een vrij scherpe grens gescheiden worden, die op ongeveer $^1/_5$ van den straal der aarde beneden de oppervlakte ligt.

---

45. HET WEZEN DER AANTREKKINGSKRACHT.

Men zou denken, dat Newton, toen hij zijn werk bekend maakte, dadelijk van alle zijden met instemming en bewondering begroet werd. Maar dat was niet het geval. Alleen onder zijn eigen landgenooten vond zijn „nieuwe filosofie" aanhang, en hier werd hij weldra geprezen en geëerd als een sieraad van zijn land; maar in het overige Europa bleef zij nog bijna een halve eeuw lang onopgemerkt. Men kende zijn theorie wel, maar begreep haar groote beteekenis niet. De groote natuuronderzoekers op het vasteland waardeerden wel de scherpzinnige berekeningen en gevolgtrekkingen van Newton, en twijfelden er ook niet aan dat zij goed en juist waren. Maar zijn geheele manier van denken, het grondkarakter van zijn werk, was hun ongewoon en vreemd. Christiaan Huygens schreef in een aanhangsel, dat hij aan zijn geschrift „Over de oorzaak van de zwaarte" toevoegde: „Ik had „ook niet zoozeer aan die regelmatige afname van de zwaarte „gedacht, namelijk, dat zij omgekeerd evenredig is met het vier- „kant van den afstand; dat is een nieuwe en hoogst merkwaar- „dige eigenschap van de zwaarte, waarvan de oorzaak op te „sporen zeer de moeite waard is..." Deze uiting toont duidelijk, dat voor hem door de ontdekking van Newton de oorzaak van de planetenbeweging ook niet in 't minst verklaard werd.

Hier blijkt, hoe Newton's theorie bij haar verschijnen een algemeene denkwijze aantrof, die voor haar begrip hoogst ongunstig was. De natuuronderzoekers, die toen de wijsgeeren meteen waren, trachtten in de eerste plaats de wereld, de natuur uit haar grondprincipes te begrijpen. Daarvoor was wel de ervaring een onontbeerlijk hulpmiddel, maar volgens de „rationalistische" opvatting was het toch vooral de taak der menschelijke rede, deze principes te vinden. Naar de denkbeelden van den beroemden natuurfilosoof Descartes, die in de 2de helft van de 17de eeuw in Frankrijk, het geestelijke centrum van het vasteland, algemeen aangehangen werden, was het heelal gevuld met een zeer dunne vloeistof, die om de zon draaide en de planeten in cirkelbanen om de zon meesleepte. Deze opvatting, waaruit Huygens dan nog nader een verklaring van de aardsche zwaarte wist af te leiden, gaf voor de beweging der planeten een dadelijk voor iedereen begrijpelijke verklaring. Iedereen had wel eens gezien, hoe schepen door stroomend water, bladeren door den wind meegevoerd werden; de waterdeeltjes drukken tegen het schip, de luchtdeeltjes tegen de bladeren, en zoo duwen ook de bewegende deeltjes van den wervelenden wereldaether de planeten voort. Wat bij Newton als gevolg van de aantrekkingskracht optreedt, is dus een uitwerking van dezen druk; Newtons's ontdekking over de afname van de aantrekking met den afstand was belangrijk, om nader uitsluitsel over dien druk en die wereldvloeistof te krijgen, maar meer ook niet. En Newton's opvatting, dat alle kleinste stofdeeltjes, ook die diep in het binnenste der aarde zitten, elkaar aantrekken, lijkt Huygens geheel absurd toe, want hij „gelooft duidelijk te zien, „dat de oorzaak van zulk een aantrekking in het geheel niet ver- „klaarbaar is door eenig principe der mechanika of door de wet-

„ten der beweging." Hij kan ook niet gelooven, dat Newton de zwaarte voor een grondeigenschap der materie wil verklaren: „Iets anders is het, wanneer wij de gravitatie als een innerlijke „(inherente) eigenschap van de stoffelijke materie zouden be- „schouwen. Maar ik geloof niet, dat Newton dit wil, daar toch „een dergelijke onderstelling ons ver van de wiskundige en mecha- „nische principes zou verwijderen." En nog duidelijker drukte zich Leibniz in een brief aan Huygens uit: „Het schijnt, dat de „zwaarte volgens hem (Newton) niets dan een zeker onstoffelijk „en onverklaarbaar vermogen (vertu) is, terwijl gij haar daaren- „tegen zeer goed door de wetten der mechanika verklaart."

Een geheel andere geestesrichting dan dit rationalisme heerschte in Engeland. In dit land, dat door den bloei van zijn handel langzamerhand aan de spits der ekonomische ontwikkeling kwam te staan en meer dan andere landen een onbegrensde toekomst voor zich zag, was de geest der menschen bovenal op de praktijk, op de werkelijkheid gericht. Hier heerschte filosofisch de van alle abstrakte bespiegeling afkeerige empiristische richting. De Engelschen lieten zich door geen spekulatief systeem verhinderen de praktijk tot leidster van hun filosofische denkwijze te maken, en zoo werden zij tot baanbrekers van een nieuwe wetenschappelijke beschouwingswijze. Zij konden met de theorie van Newton praktisch werken; zij konden daarmee de banen der hemellichamen juist en nauwkeurig berekenen, en dat bewees haar waarheid. Aan de geleerden op het vasteland gaf Newton's leer geen antwoord op de vragen, die hen bezighielden; want wanneer wij weten, volgens welke wet de aantrekking van de zon of de aarde werkt, zijn wij nog even ver van het inzicht verwijderd, waar deze kracht vandaan komt en wat eigenlijk haar wezen is. Daarentegen werden de Engelsche geleerden door zulke zorgen niet gekweld. „De oor- „zaak van deze eigenschappen der aantrekkingskracht" schreef Newton aan het slot van zijn werk, „kon ik echter niet uit de „verschijnselen afleiden, en hypothesen verzin ik niet. Want „een hypothese is dat, wat uit de verschijnselen niet kan gevonden „worden; en hypothesen, hetzij metaphysische of physische, hetzij „met behulp van verborgen eigenschappen of mechanische, be- „hooren in de proefondervindelijke wijsbegeerte niet te huis."

Dat ten slotte de filosofische hindernissen in andere landen overwonnen werden, lag niet enkel aan de overtuigingskracht, die van de juistheid der op Newton's theorie berustende berekeningen uitging. Er kwam bij, dat in de 18de eeuw in Frankrijk met de opkomende oppositie en kritiek der politieke en maatschappelijke toestanden een geestestoestand ontstond, die Engeland bewonderde en tot voorbeeld nam en de Engelsche empiristische denkwijze in zich opnam. Voltaire maakte zijn landgenooten met de nieuwe Engelsche filosofie bekend, die nu een veel gunstiger bodem vond. Een reeks van schitterende wiskundigen bouwden voort op Newton's werk, en berekenden volgens zijn aantrekkingswet de beweging van de planeten en de maan met steeds grooter nauwkeurigheid; toen zonken de oude wervelkringen, die tot zoo iets niet in staat waren, in de vergetelheid weg. En toen in het laatst van die eeuw Laplace het geheele zonnestelsel als een groot mechanisme, een machine beschreef, waar alle bewegingen tot in de kleinste bijzonderheden berekend werden als een puur wiskundig vraagstuk, toen was de triomf van Newton's theorie volkomen.

En nu trad ook een volkomen ommekeer in de gronddenkbeelden voor den dag. Terwijl Newton zelf, blijkens zijn boven aangehaalde woorden, over de „oorzaak" van de aantrekkingswet gesproken had als iets, waarover men alleen vermoedens kon opperen, die in de strenge wetenschap niet thuis behoorden, vond men nu zulk een oorzaak niet meer noodig; als een verschijnsel tot een uit de verte werkende aantrekkingskracht teruggebracht was, achtte men het volkomen verklaard en alle raadsels opgelost. Het doel der wetenschap, met name der mechanika, was nu, alle verschijnselen en bewegingen uit de krachten te verklaren, die ze bewerken. Een aantrekkingskracht, die van uit de verte door een leege ruimte heen op de lichamen werkte, scheen aan de geleerden in het begin der 19de eeuw zoo eenvoudig, begrijpelijk en natuurlijk toe, dat zij ook andere verschijnselen, b.v. de elektrische en magnetische werkingen door zulke van verre werkende krachten zochten te verklaren. En toen Gruithuisen, een door allerlei zonderlinge ideeën bekende Beiersche professor, eens verklaarde, dat aantrekking van verre een onding was en dat een aantrekkende kracht zonder verbindende touwen of stangen niet denkbaar was, moest hij zich wegens dit gebrek aan begrip menige spotternij laten welgevallen.

En toch had hij niet zoo heelemaal ongelijk; mettertijd lieten zich steeds meer stemmen hooren, die er op wezen, dat het woord „kracht" toch eigenlijk niets is dan een woord, dat juist van pas komt, als men iets niet weet te verklaren. Wanneer wij de oorzaak van het vallen van de steenen „zwaartekracht" noemen, weten wij er dan iets meer van dan te voren? Neen, het verschijnsel, dat een steen vanzelf naar de aarde valt, is er even geheimzinnig door gebleven. En wanneer wij met Newton de oorzaak van de planetenbeweging in een aantrekkingskracht zoeken, die dezelfde natuur heeft als de aardsche zwaartekracht, geven wij ons dan niet aan het zelfbedrog over, dat wij iets onbekends meenen te kunnen verklaren door iets, dat even onbekend is? Hadden dus, welbeschouwd, Leibniz en Huygens niet gelijk, toen zij vroegen, wat de wet van Newton hen nu eigenlijk in het begrijpen van de wereld verder gebracht had?

De tegenstrijdigheid tusschen zulke twijfelingen en de zekerheid, die wij desondanks gevoelen, dat wij in Newton's aantrekkingswet toch een verklaring van de hemelsche bewegingen bezitten, wordt opgelost door het inzicht, wat eigenlijk wetenschappelijk verklaren beteekent. In de laatste halve eeuw is dit inzicht in de kennisleer zooveel helderder geworden, dat nu voor geheimzinnigheid en mystiek in de leer der wetenschap geen plaats meer is.

Wetenschap doet niets anders, dan systeem en orde in de menschelijke ervaring brengen. De verwarrende veelheid der verschijnselen kan in onze hersens geen plaats vinden; daarom vatten wij datgene, wat telkens en overal terugkomt, het algemeene, het gemeenschappelijke in een groep van verschijnselen theoretisch in een begrip samen. „De wetenschap," aldus Mach, „heeft de ekono-„mische taak, ervaringen te sparen en de feiten met het kleinst „mogelijke gebruik van gedachten weer te geven." „Het is de taak „der mechanika," had Kirchhoff reeds vroeger gezegd, „om de bewe-„gingen in de natuur zoo eenvoudig en volledig mogelijk te be-„schrijven." „De menschelijke geest," aldus Dietzgen, „is het orgaan „van het algemeene; het wetenschappelijke oorzaakbegrip wil niets „anders, dan het algemeene der verschijnselen uitdrukken." Zoo is in het begrip „zwaartekracht" het gemeenschappelijke samengevat van alle verschijnselen van vallende of voortgeworpen steenen, weggeschoten kogels, van een drijvende kurk en een opstijgenden luchtballon, een schommelenden slinger, van neervallenden regen, van golven op zee en stroomende rivieren. Al deze verschijnselen verschillen door de bijzondere omstandigheden en de verschillende eigenschappen der stoffen; wat hun echter gemeen is, wordt door het begrip en de wet van de zwaartekracht weergegeven. Wij behoeven nu niet meer elk bijzonder geval van een weggeworpen steen of een vallend lichaam te onthouden en evenmin al deze verschillende soorten van verschijnselen; in de „zwaartekracht" hebben wij ze alle als het ware in een korte formule samengevat; door de theorie, de wet der zwaartekracht weten wij precies wat in elk dergelijk geval van een beweging op aarde gebeurt.

Het is zinloos, daarbij nog naar een verborgen „wezen" der kracht te vragen. Wat alleen werkelijk voorhanden is, is de totaliteit van alle verschijnselen. Een zwaartekracht als iets aparts bestaat alleen in ons hoofd, als begrip, en nergens anders. De vraag naar het wezen der zwaartekracht is de vraag naar het wezen van alle abstrakte begrippen, en het antwoord luidt, dat zij het algemeene uit de konkrete verschijnselen uitdrukken. Maar daarmee is niet gezegd, dat er verder niets te vragen overblijft. Het begrip „zwaartekracht" is uit een bepaalde groep van verschijnselen gevormd; daarnaast bestaan tallooze andere verschijnselen — bv. het kaatsen van biljartballen, het op- en ondergaan van de zon, bliksem en donder, het lichtgeven van een kaars — die er niets mee te maken hebben. Gelukt het nu echter een samenhang met zulke verschijnselen te vinden, dus in deze veel grootere groep van verschijnselen iets gemeenschappelijks te vinden, dat dan nog algemeener is dan de zwaartekracht, zoodat de zwaartekracht als bijzonder geval, als uitvloeisel van dit nog algemeenere begrip optreedt, dan wordt de ekonomie van het denken nog hooger opgevoerd, de beschrijving van de wereld nog eenvoudiger gemaakt, ons inzicht in de wereld grooter en volkomener, onze wetenschap rijker en geslotener.

Het mooiste voorbeeld van zulk een vervolmaking der wetenschap is nu juist de theorie van Newton; en omgekeerd toont ons deze exkursie op het terrein der kennisleer, waarin de groote beteekenis van de leer van Newton ligt, die wij tot dusver slechts instinktief voelden. Vóór den tijd van Newton waren de bewe-

gingen op aarde en de bewegingen in de wereldruimte twee geheel verschillende groepen van verschijnselen, die niets met elkaar te maken hadden. De eerste groep werd door Galilei's wetten der zwaartekracht, de tweede groep door Kepler's wetten der planetenbeweging samengevat. Newton vereenigde ze tot één geheel, door de planetenbeweging tot een algemeene aantrekkingskracht terug te brengen, waarvan de aardsche zwaartekracht slechts een bijzonder geval is. Meer nog: niet alleen de wetten van Kepler zelf, maar ook de afwijkingen van die wetten werden door zijn theorie weergegeven. De onregelmatigheden in de maanbeweging, de getijden in de oceanen, de zwakke aantrekking door aardsche gewichtblokken, de gedaante van het aardoppervlak, de verandering van den sterrenhemel door den teruggang der nachteveningen — al deze verschijnselen werden in het begrip „aantrekkingskracht" samengevat en door een eenvoudige wet uitgedrukt. Doordat zij gelijksoortig blijken te zijn met de ons van ouds bekende valverschijnselen op aarde, verliezen zij voor ons al wat er vreemd, onbekend en geheimzinnig aan was. In een paar eenvoudige stellingen wordt een onafzienbaar gebied van de meest verschillende verschijnselen, op aarde en aan den hemel, in verleden en toekomst, eenvoudig en volledig beschreven, in orde en systeem gebracht. Daarin ligt de buitengewone belangrijkheid van Newton's ontdekking.

Wanneer dus naar een verdere verklaring van het wezen of de oorzaak der aantrekkingskracht gevraagd wordt, komt dat meestal neer op een gebrek aan inzicht in het wezen van alle wetenschappelijke verklaring. In de 19de eeuw zijn een groot aantal „verklaringen" van de aantrekkingskracht uitgedacht, waarbij deze kracht nu eens uit het stooten van rondvliegende kleine deeltjes, dan weer uit de drukking van een de wereldruimte vullende vloeistof afgeleid werd. Voorzoover die verklaringen van de grondgedachte uitgaan, dat druk en stoot iets zonder meer natuurlijks en begrijpelijks, aantrekking iets vreemds en onbegrijpelijks is, berusten zij op een misvatting. Omgekeerd zijn er natuurkundigen geweest, die de verschijnselen van botsing en vloeistofdruk uit de werkingen van kleine stofdeeltjes afleidden, die elkaar niet onmiddellijk aanraken maar van op een afstand aantrekken of afstooten. Voor het eene is evenveel te zeggen als voor het andere, in zooverre daarbij druk, stoot en aantrekking, die ons alle uit het dagelijksch leven bekend zijn, met elkaar in samenhang worden gebracht. Wanneer het gelukte, door samenvatting van de aantrekkingskracht en die andere groepen van verschijnselen een eenvoudiger beeld van dit geheele gebied te krijgen, dan zou men inderdaad van een „verklaring" van de aantrekkingskracht mogen spreken. Maar bij al deze theorieën zijn zooveel gekunstelde onderstellingen noodig, dat zij geen van alle aan dien eisch voldoen; een vereenvoudiging van ons wereldbeeld hebben zij niet gegeven.

Huygens had iets dergelijks gewild; maar voor hem lag de zaak nog eenigszins anders. Dat hij de aardsche zwaarte uit de wervelkringen zocht te verklaren, die de planeten rondsleepten, lag voor hem hierom zoo voor de hand, omdat hij uit geheel andere verschijnselen de overtuiging gekregen had, dat de wereldruimte niet ledig maar met een of andere stof, een wereldaether gevuld moest zijn. Naar de door hem opgestelde theorie van het licht brengen de heete, lichtgevende voorwerpen dezen aether in fijne snelle trillingen, die zich dan als golvingen naar alle kanten met de bekende reusachtige snelheid van bijna 300000 KM. per sekonde uitbreiden en in ons oog treden. Newton had daartegenover de theorie opgesteld, dat het licht uit kleine deeltjes bestaat, die door de gloeiende voorwerpen weggeslingerd worden en met groote vaart door de ledige wereldruimte vliegen; en deze theorie vond in de 18de eeuw den meesten aanhang. In het begin van de 19de eeuw werden echter lichtverschijnselen ontdekt en nader onderzocht, die alleen uit golvingen en trillingen te verklaren waren; hier bleek Huygens dus gelijk te hebben gehad. En aan deze lichttheorie van Huygens knoopte in de 19de eeuw een nieuwe richting der wetenschap aan.

De stoot voor dezen ommekeer in de gronddenkbeelden der natuurkunde kwam weer uit Engeland. Terwijl Duitsche professoren de aantrekking uit de verte omgekeerd evenredig met het vierkant van den afstand tot filosofisch principe der natuur proklameerden, en haar tot verklaring der elektrische verschijnselen gebruikten, kwam een Engelsch onderzoeker, de apothekersbediende Michael Faraday, door zich enkel door de proefnemingen zelf te laten leiden, tot geheel andere opvattingen. Zijn

geestesoog zag tusschen de elektrisch geladen lichamen en stroomgeleiders een onzichtbare middenstof, die gespannen, gedrukt, getrokken en gedraaid werd en daardoor de bewegingen veroorzaakte, die zich aan ons als elektrische afstooting en aantrekking vertoonen. Zijn denkbeelden stonden zoo geheel vreemd tegenover de heerschende theoretische opvattingen, dat zij eerst veel later eenigermate begrepen werden, toen Maxwell ze in wiskundigen vorm uitdrukte. Toen vonden zij in de tweede helft der 19de eeuw, tegen de remmende macht der ingewortelde traditie, steeds meer bijval, eerst in Engeland, daarna op het vasteland. Want zij had op de oude theorieën dit voor, dat zij uit de wetten der elektriciteit tegelijk alle verschijnselen van het licht wist te verklaren, en aldus twee tot nog toe geheel gescheiden groepen van verschijnselen tot één theorie terugbracht. Die alom tegenwoordige substantie van Faraday, die door haar spanning en beweging de elektrische en magnetische verschijnselen bewerkt, is niets anders dan de wereldaether, dien Huygens voor de verklaring van het licht had aangenomen. De juistheid van de theorie van Maxwell, waarvan de draadlooze telegrafie een direkte toepassing is, wordt thans door iedereen erkend.

Het lag nu voor de hand om te beproeven, of ook de algemeene aantrekkingskracht niet evengoed als de elektrische krachten met behulp van deze overal aanwezige middenstof, den wereldaether, verklaard kon worden. Deze pogingen zijn echter niet gelukt; en het is naderhand gebleken, dat op deze wijze het probleem te beperkt gesteld was. Voor de wetenschap komt het er niet op aan, een antwoord juist in de richting te vinden, die men verwacht; haar doel wordt bereikt door de aantrekkingskracht op een of andere wijze in samenhang met de andere natuurverschijnselen te brengen, en zoo tot een dieper inzicht in haar wezen, tot een grootere eenheid in de natuurleer te komen. En in dezen zin is juist in de laatste jaren een belangrijke schrede op den weg der „verklaring" van de gravitatie gedaan.

Wij hebben in onze beschouwingen over beweging en rust uiteengezet, dat het onmogelijk is om in de wereldruimte van absolute beweging of rust te spreken. Alle lichamen bewegen zich ten opzichte van elkaar, en alleen deze relatieve bewegingen kunnen wij leeren kennen. Wij mogen voor het gemak, om de verschijnselen eenvoudig uit te drukken, nu eens de aarde, dan weer de zon als rustend aannemen; maar weten doen wij het niet. Of liever, er is in het geheel niet over te spreken, of een of ander punt in rust is, daar dit een zinledig woord is. Dit was de grondslag van de ontwikkeling der mechanika in de 17de eeuw. Maar gaat dat alles nu nog wel op? De natuurkunde van de 19de eeuw leert, dat de geheele wereldruimte gevuld is met den wereldaether, het voertuig der lichtverschijnselen. Het ligt nu voor de hand om alle bewegingen ten opzichte van dezen aether te beschouwen; en dan kan men wel van absolute beweging en rust spreken. In absolute rust is de wereldaether en elk ding, dat zich ten opzichte van den wereldaether niet beweegt.

Het was nu van belang om de beweging van de aarde in absoluten zin, dus t. o. v. den wereldaether te vinden. De aether doordringt alle stoffen, vult de tusschenruimte tusschen alle atomen, en wanneer dus de lichamen, waarmee wij werken, en hun atomen met groote snelheid (b.v. van 27 KM per sekonde, de snelheid van de aarde in haar baan) door den aether heen vliegen, moet dat in bepaalde optische en elektrische verschijnselen voor den dag komen. Men heeft deze proeven herhaaldelijk gedaan, maar de verwachte verschijnselen bleven uit. Van een invloed der snelle beweging van de aarde t.o.v. den aether was niets te bespeuren. Op alle vragen, die men haar omtrent onze absolute beweging stelde, bleef de natuur stom. Het was alsof ze zeide: uw vragen zijn zinloos. Men heeft allerlei onderstellingen gemaakt om het uitblijven van de verwachte verschijnselen te verklaren, tot Albert Einstein in 1906 in zijn relativiteitstheorie het principe formuleerde, volgens hetwelk dit uitblijven natuurlijk en vanzelfsprekend was. Niet alleen de hemelsche bewegingen, maar ook alle natuurkundige verschijnselen, die wij waarnemen, vinden zóó plaats, dat daarbij van geen absolute maar alleen van relatieve bewegingen sprake is. Wij mogen in de wereld als rustend of bewegend aannemen, wat wij willen: alle wetten en verschijnselen moeten er dezelfde om blijven. Het is alsof er in het geheel geen wereldaether is, en vele natuurkundigen, ook Einstein zelf, laten de onderstelling dat er een wereldaether bestaat, als een soort stoffelijke substantie, die alle werkingen in de ruimte

voortplant, geheel vervallen. Daarvoor in plaats treedt dan echter het feit, dat de snelheid van het licht een bepalende rol in alle bewegingsverschijnselen speelt; want alle kennis, die een waarnemer van de gebeurtenissen in de wereld heeft, en die hij in wetten uitdrukt, wordt hem naar zijn rustend of beweeglijk gedachte standplaats overgebracht door voortplanting van lichtverschijnselen. De lichtsnelheid is de bovenste grens van alle mogelijke bewegingen. Niet alleen is het onmogelijk en zelfs ondenkbaar, dat ooit een voorwerp deze snelheid overtreft of zelfs bereikt, maar elke werkelijke beweging voelt ook het bestaan van die grens als het ware als een soort druk van boven, die haar wijzigt, zij het ook in een zoo geringe mate, als zij gering is in verhouding tot de lichtsnelheid.

Nu verschijnt de algemeene aantrekkingskracht ook in een nieuw licht. Zij is onder alle natuurkrachten een zeer bijzondere, of nog juister gezegd: alle andere (b.v. de elektrische) krachten zijn bijzonder en hangen van bijzondere toestanden af; maar de gravitatie is algemeen en wordt bepaald door dezelfde massa, die in alle bewegingen een rol speelt. Het is zelfs de vraag of men haar wel een aparte kracht mag noemen. Want men kan haar door wijziging van onze onderstellingen omtrent rust en beweging geheel laten verdwijnen. Wij hebben bij onze beschouwingen over de middelpuntvliedende kracht al gezien, hoe een bewegingstoestand zich als kracht kan openbaren. Was de aarde steeds met een ondoorzichtige wolkenlaag bedekt, zoodat de menschen nooit iets van de sterren hadden bemerkt, dus ook nooit op het idee van een aswenteling waren gekomen, dan zouden zij uit nauwkeurige waarnemingen gevonden hebben, dat de aantrekkingskracht op een bepaalde manier van de plaats op aarde afhangt, en zoo hadden ze alle bekende feiten evengoed weergegeven als wij door onze leer van de aswenteling doen. Een ander voorbeeld kunnen wij vinden in het projektiel, dat Jules Verne naar de maan liet schieten; de menschen daar binnen in konden niets van zwaarte ondervinden, omdat zij met alle voorwerpen om hen heen even snel als het projektiel zelf naar de aarde toe vielen (d.w.z. hun vaart naar boven in dezelfde mate vertraagden). In al hun bewegingen t.o.v. elkaar en de wanden was de zwaartekracht afwezig, opgeheven door hun gemeenschappelijke beweging. Wij kunnen ons nu in plaats van dit projectiel een kamer, duizenden malen grooter voorstellen, met dezelfde beweging; dan kunnen wij alle bewegingen en verschijnselen daar binnen t.o.v. de kamer voorstellen, alsof deze in rust is. Daar gelden alle wetten van de mechanika en de natuurkunde; er is geen aantrekkingskracht, alles is gewichtloos en heeft enkel massa, alle bewegingen vinden eenparig plaats, en een kogel, die er horizontaal doorheen vliegt, loopt volkomen rechtlijnig. Beschouwen wij echter alles t.o.v. de vaste aarde beneden, dan gelden ook nu nog dezelfde natuurwetten alle, maar nu zijn de bewegingen naar beneden versneld, de kogel beschrijft een gekromde baan, de voorwerpen oefenen een druk naar beneden uit, en wij zeggen, dat er een aantrekkingskracht werkt.

Nu zou men kunnen opmerken, dat de laatste manier van beschouwen dan toch de meer natuurlijke en juiste is, terwijl de eerste alleen maar een oogenblik als gefantaseerd geval gedacht wordt. Maar volgens het beginsel van de relativiteit zijn beide manieren van opvatting even goed en even juist; men kan alleen dit onderscheid maken, dat de een voor ons praktischer en doelmatiger kan zijn dan de andere, omdat ze eenvoudiger formules geeft of ruimer gebieden omvat. Maar daaraan, wat voor ons doelmatig is, kan de natuur zich niet storen; zij mag niet van onze willekeur afhankelijk zijn, en de natuurwetten moeten in beide gevallen op dezelfde manier gelden. De natuurwetten mogen dus nooit zóó geformuleerd worden, dat er een onderstelling in ligt omtrent rust of absolute beweging; want dan zijn ze zeker niet precies goed. Nu zijn uit de waarnemingsgegevens dikwijls eenvoudige natuurwetten afgeleid, waarvan nu blijkt, dat ze niet aan dezen eisch voldoen van onveranderd te blijven gelden, wat wij ook over onze beweging of rust willen aannemen. Zij moeten dus eenigszins gewijzigd worden, maar daar dit maar uiterst weinig is — omdat de snelheden ten opzichte van de lichtsnelheid uiterst klein zijn — zal het verschil in de praktijk meestal absoluut onmerkbaar zijn. Ook de eenvoudige aantrekkingswet, die Newton had afgeleid, kan nu niet meer precies goed zijn; de gravitatie moet nog op zeer ingewikkelde wijze van de snelheden afhangen. Bij zijn berekeningen bleek het in 1915 aan Einstein, dat de wijzigingen, die daardoor in de planetenbeweging ontstaan, zoo klein zijn, dat zij voor onze beste waarnemingen geheel onmerkbaar

blijven — met één uitzondering: de groote as van de Mercuriusbaan moet door dezen invloed 43 sekonden per eeuw van richting veranderen. Nu was echter juist (zie blz. 275) het eenige punt, waarin de waarnemingen en de berekening volgens de wet van Newton niet overeenstemden, dat de groote as van de Mercuriusbaan per eeuw 43 seconden te veel draaide. Zonder dat dus eenige verdere onderstelling noodig was, gaf de relativiteitstheorie ineens een ongezochte verklaring van het eenige feit in de planetenbeweging, dat door de zuivere wet van Newton niet verklaard kon worden. Dit was een triomf van de nieuwe theorie, die bewees, dat het door Einstein vooropgestelde relativiteitsbeginsel geen theoretische fantasie was, maar in de werkelijkheid van de natuur wortelt.

In het voorbeeld van Jules Verne's projektiel bleek, dat de verschijnselen daar binnenin op twee manieren beschouwd en verklaard konden worden: de eene plaats vindende in een ruimte zonder gravitatie, de andere in een ruimte met gravitatie. Deze beide manieren van beschouwing verschillen alleen, doordat de ruimten in beide gevallen op een bepaalde manier ten opzichte van elkaar bewegen; de gravitatie is dus geheel gelijkwaardig met betrekkingen tusschen de eene ruimte en de andere, die niets met lichamen, maar alleen met meetkundige eigenschappen van de ruimte en met tijd te maken hebben. De gravitatie is niet een bijzondere kracht, die op een lichaam werkt, dat zich ergens in de ruimte bevindt; zij is een eigenschap van die ruimte zelf; zij is als het ware een verandering, een vervorming van de meetkundige eigenschappen van de ruimte (en daarbij ingesloten de tijd) waarin zij werkt, en dit maakt, dat de beweging van de lichamen daarin niet meer eenparig rechtlijnig kan zijn. Een eeuw geleden hadden Laplace en Poisson de gravitatie ook al, in plaats van als kracht tusschen twee lichamen, opgevat als een grootheid, die op elk punt van de ruimte een bepaalde waarde heeft, bepaald door de naaste (ledige of met stof gevulde) omgeving, en die zich dus van plaats tot plaats voortplanten moet; deze grootheid bepaalt, wat er met de beweging van een lichaam gebeurt, dat zich in dat punt bevindt. Wat voor hen een wiskundige grootheid was geweest, alleen ten dienste van de berekeningen, heeft nu echter een dieperen zin gekregen.

Want de relativiteitstheorie, die de gravitatie tot een meetkundige eigenschap van de ruimte maakt, brengt vanzelf mee, dat alle natuurkundige verschijnselen in deze ruimte daarvan den invloed ondervinden, d.w.z. naar het ons voorkomt, onderworpen zijn aan de aantrekkingskracht. Evenals een voortgeschoten kogel loopt ook een horizontale lichtstraal door onze bovenonderstelde projektielkamer rechtlijnig voort. Maar dan moet ten opzichte van de aarde deze lichtstraal evengoed als de kogel een gebogen baan beschrijven. Een lichtstraal — dat volgt dus uit het relativiteitsbeginsel — is aan de zwaarte onderworpen en gedraagt zich als een voorwerp, dat met een snelheid van 300000 K.M. per sekonde voortvliegt. Ook deze gevolgtrekking heeft men op de proef kunnen stellen. Een lichtstraal, die van een ster achter de zon komt en langs haar rand strijkt, zal door de aantrekking van de zon 1 ¾ sekonde van haar richting worden afgebogen; de fotografieën, die bij de totale zoneklips van 29 Mei 1919 werden opgenomen, hebben deze voorspelling geheel bevestigd.

Zoo heeft de leer van de gravitatie in de 20ste eeuw een grooten sprong voorwaarts gedaan — de grootste vooruitgang sinds Newton — maar in geheel andere richting dan in de 19e eeuw verwacht werd. Men had gehoopt, de aantrekkingskracht uit haar isolement te kunnen bevrijden door haar terug te brengen tot denzelfden wereldaether, die de natuurkunde als drager van alle elektrische verschijnselen en van de voortplanting van het licht had opgesteld. Maar de samenhang van deze verschillende gebieden is omgekeerd tot stand gebracht door alle natuurkundige verschijnselen aan de gravitatie te onderwerpen. En deze gravitatie zelf staat onaantastbaarder en geheimzinniger voor ons door haar identiteit met de meest fundamenteele meetkundige eigenschappen van ruimte en tijd. Men had gehoopt, de hypothesen, die Newton niet had willen verzinnen, en die de aantrekking uit bekende en begrijpelijke inwerkingen van lichamen op elkaar moest verklaren, te kunnen vinden door tot de grondgedachte van Huygens terug te keeren, in modernen, hooger ontwikkelden vorm, door den toestand op elk punt van de ruimte aan een overal tegenwoordige substantie met bepaalde eigenschappen toe te schrijven. Maar op het voetspoor van Newton maakt Einstein de ruimte weer ledig, vraagt niet hoe men zich de werkingen moet voorstellen, doch beperkt zich tot

het opstellen van formules, waarmee de verschijnselen juist berekend kunnen worden. Als men dan let op de fundamenteele beteekenis van de lichtsnelheid, waarmee zich de werkingen door de wereldruimte voortplanten, dan is het duidelijk, dat deze onderzoekingen van Einstein de ontwikkeling van de leer der gravitatie tot een steeds grootere eenheid in het wetenschappelijk natuurbeeld niet afgesloten, maar haar veeleer nieuwe banen geopend hebben.