

DE PLANETESIMAALHYPOTHESE

DOOR

H. G. JONKER.

Sedert meer dan een eeuw wordt het ontstaan der aarde verklaard met behulp van de „nevel”-hypothese van KANT-LAPLACE. Het is deze hypothese, die de basis vormt voor de geologie als historische wetenschap. Toch valt niet te ontkennen, dat er in den laatsten tijd vooral van mathematischen, maar ook van geologischen kant ernstige bezwaren tegen haar worden ingebracht, zoodat er allengs een groep van geleerden ontstaan is, die de oude denkbeelden van KANT en LAPLACE ook in gewijzigden vorm niet meer als betrouwbaren grondslag voor de oerontwikkeling der aarde kunnen beschouwen. De uitbreiding onzer kennis der nevelvlekken, waaronder ringnevels in den strikten zin van LAPLACE niet voorkomen; de samenstelling en de snelheden van de verschillende deelen van den ring van Saturnus, zoo lang als direct bewijs der oude hypothese beschouwd; de omlooptijd van Phobos, die minder dan een derde van den tijd bedraagt, dien Mars voor een wenteling om zijn as noodig heeft; de retrograde beweging van verscheiden satellieten der buitenplaneten; vooral ook de niet te overwinnen moeilijkheden, die zich voordoen bij de verklaring van de verdeeling van het totale moment der hoeveelheid beweging van ons zonnestelsel over de verschillende planeten — ziedaar enkele der hoofdbezwaren tegen de gangbare hypothese. Daardoor zijn vele gezaghebbende onderzoekers van de onhoudbaarheid van LAPLACE's opvatting overtuigd geworden en zijn er pogingen gedaan om de oude denkbeelden door nieuwe te vervangen. Twee daarvan treden meer in 't bijzonder op den voorgrond: 1. de meteorietenhypothese van LOCKYER (- DARWIN) en 2. de planetesimaalhypothese van CHAMBERLIN-MOULTON. Van deze beide op Amerikaanschen bodem ontstane opvat-

tingen wil ik hier alleen de laatste nader bespreken. De grond-denkebeelden zijn afkomstig van professor T. C. CHAMBERLIN, hoogleeraar in de geologie te Chicago; nader mathematisch uitgewerkt zijn deze door F. R. MOULTON, astronoom te Chicago.

Volgens deze nieuwe hypothese zijn de constituenten kleine deeltjes, die in oneindige hoeveelheden alle om een centrale massa als gravitatie-centrum wentelen, juist zooals de planeten tegenwoordig om de zon loopen. Deze deeltjes zijn heel klein, geen planetoiden, maar oneindig veel kleiner, moleculen misschien, niet bepaald gasvormig, of andere heel kleine elementen. Vandaar de naam planetesimalen. Als dynamisch stelsel verschilt deze nevel van planetesimalen niet essentieel van ons huidig planetenstelsel, en dat is reeds een groot voordeel boven den gasnevel van LAPLACE. De geheele ontwikkeling van dezen nevel bestaat feitelijk alleen in het aggregeeren der planetesimalen tot planeten en satellieten.

De aan den hemel waarneembare nevels verdeelt men gewoonlijk in twee klassen: witte en groene nevels. De laatste zijn het minst talrijk, hebben allerlei onregelmatige vormen en worden daarnaar in verschillende groepen onderverdeeld. Gemeen hebben ze, dat het spectrum slechts enkele heldere lijnen vertoont; wegens dat lijnenspectrum spreekt men ook wel van gasnevels. Spectroscopisch zijn waterstof en helium altijd aan te toonen en daarnaast een nog onbekend element: nebulium. Maar metalen ontbreken! Dat maakt de afleiding onzer aarde, waarin metalen zulk een groote rol spelen, uit een dergelijken nevel onwaarschijnlijk. Met deze conclusie moet men trouwens voorzichtig zijn, omdat de transformatie van een element in een ander element toch misschien mogelijk is. Omtrent de beweging in deze groene nevels is niets bekend en de vorm in 't algemeen belooft niet veel voor de evolutie van ons planetenstelsel uit zulk een nevel.

De tweede klasse, de witte nevels, geven een continu spectrum; daar moet dus vaste of vloeibare materie overheerschen. De hoofdvorm van deze nevels is de *spiraalnevel*, welke in groot aantal aan den hemel schijnt voor te komen, hetgeen eerst in de laatste jaren gebleken is. Zulk een nevel bestaat uit een min of meer duidelijke *kern* met spiralige armen, waartusschen de rest der nevelmaterie onregelmatig verspreid

is. Opmerkelijk is het steeds voorkomen van *twee spiraal-
armen*, die van diametraal tegenover elkaar gelegen deelen
der kern uitgaan. Dicht bij de kern zijn er altijd slechts
twee armen en zijn ze zeer symmetrisch gelegen; aan de buiten-
zijde zijn er vaak meer en zijn ze onsymmetrisch. Van het
éénarmige type van een horlogeveer zijn geen voorbeelden
bekend.

Een tweede kenmerk is de aanwezigheid van *knoopen*,
onregelmatige partieele verdichtingen der materie op of buiten
de armen. Een derde kenmerk is de algemeene vorm: een
*schijf*vorm, die voor de afleiding van ons zonnestelsel zeer
geschikt is. Het uiterlijk dier nevels kan nu zeer verschillend
zijn, naarmate de verhoudingen van kern, armen, knoopen
en diffuse nevelmaterie afwisselen. Een en ander wordt door
de figuren 1—6 voldoende geïllustreerd.



Fig. 1.

Spiraalnevel in Ursa Major. Domineer-
rende kern met symmetrische armen.



Fig. 2.

Spiraalnevel in Ursa Major. Armen on-
symmetrisch met veel knoopen.

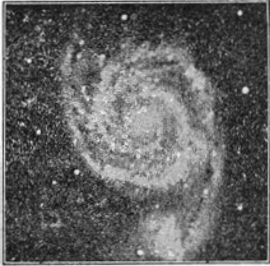


Fig. 3.

Fraaie spiraalnevel in Canes Venatici. Duidelijke armen en veeldiffuse materie.



Fig. 4.

Typische spiraalnevel in Piscium. Zeer symmetrische armen en weinig diffuse materie.



Fig. 5.

Elliptische nevel, vermoedelijk een spiraalnevel, van een punt in zijn eigen vlak gezien. Schijfvorm.



Fig. 6.

De groote nevel in Andromeda. Grootste spiraalnevel, schuin gezien Vroeger voor een ringsysteem in den zin van LAPLACE gehouden.

De onderstelling is nu, dat deze nevels werkelijk planetesimale nevels zijn, d. w. z. dat alle materie zich in min of meer concentrische banen beweegt om de kern, juist zooals de planeten zich om de zon bewegen. Daardoor alleen wordt de onafhankelijkheid der verschillende deelen duidelijk. Maar waargenomen heeft men die beweging niet! De afstanden der nevels moeten enorm zijn, omdat men geen parallaxis heeft kunnen vinden. En het onderzoek is nog maar van zoo korten duur, dat vergelijkende fotografische studiën nog niet mogelijk zijn. Voorloopig moeten we die beweging dus maar aannemen in de hoop, dat de verfijnde waarneming ons spoedig daaromtrent iets zal leeren.

Uit zulk een nevel denkt men zich nu ons planetenstelsel ontstaan. De hypothese zelf is nu dadelijk in twee gedeelten te splitsen. Het eerste deel verklaart de vorming der spiraalnevels zelf, het tweede het ontstaan van ons planetenstelsel uit zulk een nevel. Beide deelen zijn onafhankelijk van elkaar.

De vorming van spiraalnevels. Denkt men zich een hemellichaam met een atmosfeer, dat zich beweegt recht naar de zon toe. Naarmate dit lichaam de zon meer en meer nadert, zal de aantrekking der zon een steeds toenemende vormverandering van den dampkring van dat hemellichaam in 't leven roepen. Het gas wordt op de naar de zon toegekeerde zijde van het hemellichaam sterker aangetrokken dan het lichaam zelf, dat lichaam zelf weer sterker dan het gas op de van de zon afgekeerde zijde. De zon tracht dus den atmosfeer zoowel van voren als van achteren van het lichaam te verwijderen. Het schijnt daardoor, dat de zon den atmosfeer aan de vóórzijde aantrekt, aan de achterzijde afstoot, zoodat de dampkring een langwerpigen vorm verkrijgt, waarvan de langste as in de richting der zon gelegen is. Deze verlenging wordt bij grooter nadering hoe langer hoe sterker; ten slotte komt er een moment, dat deze aantrekking en afstooting de eigen zwaartekracht overwinnen en er een gasstraal aan beide zijden, naar de zon toe en van de zon af, naar buiten schiet.

Dit beginsel der getijwerking kunnen we nu in 't groot gaan toepassen. Een spiraalnevel maakt den indruk, dat vroeger eenmaal al zijn materie was vereenigd tot één massa,

een gasvormige zon, niet essentieel verschillend van onze zon of van een andere ster. Waarom is zulk een zon dan overgegaan in een nevel met planetesimale condities? In de hemelruimte bewegen zich minstens honderd millioen sterren, allicht in verschillende richtingen en met verschillende snelheden, vergelijkbaar met de bewegingen van een extreem ijl gas. Misschien is er ook een zekere regelmaat in die sterbewegingen, zijn er bepaalde sterstroomen [KAPTEYN]. Behalve dit enorme aantal lichtende sterren is er ook nog een even groot of misschien zelfs grooter aantal donkere lichamen, die zich op dezelfde wijze bewegen. Bij deze groote hoeveelheid sterren is, hoewel de onderlinge afstanden onbegrijpelijk groot zijn, de kans niet uitgesloten, dat twee sterren eenmaal dicht aan elkaar voorbijgaan. Een directe botsing van twee sterren is weliswaar niet onmogelijk, maar stellig een veel zeldzamer verschijnsel dan een dicht aan elkaar voorbijgaan. Welnu, *als twee zonnen elkaar op geringen afstand passeeren, ontstaat er een spiraalnevel*. Want wat gebeurt er? Beide sterren bewegen zich met kolossale snelheden langs elkaar heen. Voor de voorstelling is het gemakkelijker de eene zon te laten stilstaan en de beweging van de voorbijgaande dus relatief te beschouwen. Bij de nadering van den voorbijganger zal de getijwerking snel toenemen tot een maximum, wanneer de afstand zoo gering mogelijk is, en daarna even snel weder afnemen. Het effect zal de uitstrooming van gas zijn steeds op twee diametraal tegenover elkaar liggende punten. Dit zal tijdens de passage voortdurend gebeuren en maximaal zijn bij den minimum-afstand.

Daar komt echter nog iets anders bij, waarop CHAMBERLIN opmerkzaam maakt. Dagelijks hebben op de zon enorme gas-erupties plaats, die we onder den naam van protuberancen kennen. Deze bereiken hoogten van vele duizenden mijlen en snelheden tot 300 mijl per seconde. Door de tegenhoudende werking van den zonneatmosfeer worden de bewegingen der protuberancen belemmerd; door de gravitatie valt dit materiaal weer terug op de zon. Maar heel veel scheelt het niet of deze protuberancen zijn werkelijk weggeschoten deelen, die nooit meer terugkeeren, maar in een parabolische baan om de zon gaan loopen. De parabolische snelheid, de snelheid uit het oneindige, waarmede een object op de zon valt, is

382 mijl per seconde. Dat is dus de maximumgrens van zonnecontrôle. We zien dus, dat de protuberancen daar dicht toe naderen, zoodat de eruptieve krachten in de zon bijna in staat zijn in normale gevallen deelen werkelijk weg te schieten.

Nu evenwel passeert een andere zon; daardoor wordt de zwaartekracht der zon voor een groot deel opgeheven. Nu geschieden de gasrupties kolossaal veel krachtiger; de normale uitstrooming geeft de verspreide materie, de uitbarstingen, als schoten op te vatten, de knopen en bij-knopen, die door het schot zelf reeds ieder voor zich een draaiende beweging aannemen. Door de passerende ster wordt alle substantie, die de zon verlaten heeft, gedwongen zich te bewegen in de richting der voorbijgaande massa; het resultaat is een spiraalnevel.

Waarom? Dit is buitengewoon moeilijk precies aan te toonen en het strenge bewijs is dan ook nog niet geleverd. Daarvoor moet men de banen berekenen van weggeschoten deelen onder allerlei omstandigheden. Dit is een uiterst tijdroovend werk en zeer ingewikkeld. Het zal zeker nog heel wat jaren duren, vóórdát men daarbij tot een zekere uitkomst geraakt. MOULTON meent evenwel reeds nu te kunnen voorspellen, dat het resultaat een spiraalnevel zal zijn, waarvan iedere planetesimaal en iedere knoop zich in een elliptische baan om de centrale kern beweegt.

Laat ons dus aannemen, dat dit inderdaad de wijze is, waarop spiraalnevels uit zonnen ontstaan. De voorstelling treft door haar opvallende eenvoudigheid. Toch blijven er nog allerlei moeilijkheden over. Op ons gebrek aan kennis van de *beweging* der materie van zulk een nevel hebben we reeds gewezen. Maar een groot bezwaar is ook de verklaring van het *licht* van zulk een nevel buiten de kern. Dat de kern zelf korteren of langeren tijd gloeiend kan blijven, is niet onwaarschijnlijk. Voor de knopen, vooral voor de grootere, die van het begin af een atmosfeer konden houden, is hetzelfde het geval. Maar de planetesimalen zelf moeten heel spoedig na de ejectie haar lichtend vermogen hebben verloren, omdat ze terstond zijn afgekoeld. Vanwaar dan haar licht, als ze niet heet kunnen zijn? Men weet het niet, maar denkt daarbij aan de eigenschap van radio-actieve stoffen om andere materie

bij lage temperatuur lichtend te maken. Allicht zal er in den planetesimalen nevel dus radio-actieve substantie zijn, die de rest van den nevel doet lichten.

Dat is het eerste deel van de hypothese.

Het ontstaan der planeten. Hoe ontstaan nu zon en planeten uit een spiraalnevel? Stellen we ons daarbij zulk een nevel voor van de gedaante, die hij in het geval van ons zonnestelsel ongeveer moet gehad hebben. In fig. 7 is deze voorstelling volgens CHAMBERLIN weergegeven.



Fig. 7.

Theoretische moedernevel van ons zonnestelsel. De kern wordt de zon, de knopen worden de planeten en manen.

Hoe zijn nu de planeten ontstaan uit de knopen? Deze zijn gegroeid door het voortdurend oppikken van planetesimalen. Deze bewogen zich oorspronkelijk in allerlei elliptische banen om de kern; wanneer een knoop een planetesimaal ontmoette, vereenigde ze zich daarmee. Daardoor nam zijn massa steeds toe. Daaraan kwam eerst een einde, toen alle planetesimalen opgevangen waren door de zon en de planeten, zooals thans het geval is.

En de satellieten? Dit waren secundaire bijknoopjes,

tegelyk met de hoofdknoopen uitgestooten. Bevonden deze bijknoopjes zich niet in de nabijheid van een grooteren knoop, zoo bleven ze, weinig aangroeiende, zelfstandig bestaan : asteroiden. Was dat wel het geval, dan vereenigden ze zich later met den hoofdknoop, als ze een geringe snelheid hadden meegekregen ; was deze grooter, zoo werden het manen.

Uit dit groeiproces moeten nu, wil de hypothese op eenige waarde aanspraak maken, de hoofdeigenschappen van ons planetenstelsel kunnen verklaard worden. Dit willen we thans in 't kort nagaan en daarbij in 't bijzonder onze aandacht vestigen op die punten, welke in de uiteenzetting van LAPLACE moeilijkheden opleveren.

Twee hoofdeigenschappen van ons zonnestelsel vinden dadelijk een eenvoudige verklaring. 1°. De schijfvorm : alles speelt zich af in het baanvlak der passeerende zon. Daarom moeten alle baanvlakken der planeten vrijwel samenvallen. 2°. De richting, waarin de planeten om de zon loopen : deze moet voor alle dezelfde zijn, daar ze een gevolg is van de bewegingsrichting der storende ster.

'n Krachtig argument vóór deze theorie is ook, dat hier de bezwaren tegen de verdeeling van het totale moment der hoeveelheid beweging van het geheel over de verschillende deelen van ons zonnestelsel wegvallen, omdat deze verdeeling tijdens den groei der planeten niet belangrijk gewijzigd wordt.

Beschouwen we nu enkele der hoofdmoeilijkheden volgens LAPLACE : den omlooptijd van Phobos en den ring van Saturnus. De eerste kan verklaard worden door den groei van Mars. Oorspronkelijk moet de Marsknoop veel kleiner zijn geweest dan thans de planeet. Hoe toen de verhouding van rotatietijd van Mars en omwentelingstijd van Phobos was, is niet met zekerheid te zeggen. Er is geen reden om aan te nemen, dat daartusschen een zeker verband moet hebben bestaan. Maar zeker is, dat door den groei van Mars Phobos hoe langer hoe dichter naar Mars werd getrokken, tot zijn tegenwoordige omlooptijd was bereikt. Als dit waar is, kan men uit deze toeneming van Phobos' omwentelingssnelheid zelfs globaal berekenen, hoeveel Mars ongeveer gegroeid moet zijn. Daaruit blijkt in elk geval, dat de oorspronkelijke Marsknoop een veel kleinere massa had dan thans de planeet Mars heeft. In meer of mindere mate moet dit natuurlijk voor alle planeten

gelden. Dat nu is geologisch van het grootste belang. Want de aarde is dan niet zooals bij LAPLACE op éénmaal als later niet meer gewijzigde massa ontstaan, maar eveneens uit een oorspronkelijk veel kleineren nevelknoop tot haar tegenwoordige grootte gegroeid. De ontwikkeling der aarde geschiedt daarom volgens deze hypothese totaal anders dan bij LAPLACE. Hierop komen we straks uitvoeriger terug. In 't algemeen volgt hieruit, dat de manen vroeger alle op grooteren afstand van haar centraal lichaam hebben gestaan dan thans het geval is. Denkt men zich nu een sterk groeiende planeet, dan kan de mogelijkheid zich voordoen, dat de afstand van knoop en bijknoop te klein wordt. Is deze afstand — naar het principe van ROCHE — minder dan $2.44 \times$ den straal van dat centrale lichaam, dan wordt die maan uiteengerukt in fragmenten. Welnu, zóó moet dan de ring van Saturnus zijn ontstaan. De te groote snelheid van den binnensten ring wordt dan verklaard als bij Phobos; de samenstelling van dien ring uit een wolk van meteorieten dankt haar ontstaan aan de desintegratie van een door den te grooten groei van Saturnus binnen de grens van ROCHE geraakten satelliet. Men ziet, dat deze beide anomalieën bij LAPLACE hier reeds dadelijk een veel betere verklaring vinden dan vroeger.

Uit de wijze nu, waarop de aangroeiing der knopen heeft plaats gehad, is ook een zeer aannemelijke verklaring te vinden voor de geringe excentriciteit der planetenbanen in 't algemeen en de daarbij optredende verschillen in excentriciteit in 't bijzonder. Bij het ontstaan van den spiraalnevel zullen stellig knopen en planetesimalen zich in ellipsen van veel grootere excentriciteit hebben bewogen om de kern dan thans de planeten om de zon doen. Niet onwaarschijnlijk is het, dat oorspronkelijk alle knopen en planetesimalen zich in min of meer parallele stroomen om de kern hebben bewogen. Indien dit zoo gebleven was, indien de banen vrijwel concentrisch waren gebleven, zouden er geen botsingen hebben kunnen plaats hebben. Maar dat kan niet zoo zijn, omdat iedere planeet thans en dus ook iedere knoop en planetesimaal vroeger een zij het ook langzame beweging der apsidenlijn moet hebben gehad. Daardoor moeten de eerst vrijwel evenwijdige banen elkaar zijn gaan snijden; dan is de mogelijkheid van botsing gegeven. De knoop kan groeien. MOULTON heeft nu aange-

toond, dat wanneer twee planetesimalen elkaar ontmoeten, de resulteerende baan een kleinere excentriciteit heeft dan de beide oorspronkelijke. Daaruit volgt echter, dat de baan van een knoop hoe langer hoe meer tot een cirkel nadert, naarmate hij meer planetesimalen opneemt, naarmate hij meer groeit. Als dat waar is, moeten de knopen, die geworden zijn tot de grootste planeten, de kleinste excentriciteit hebben, banen hebben, die het meest tot een cirkel naderen. Dat komt uitstekend uit. De banen der groote buitenplaneten zijn bijna cirkelvormig; de kleinste planeet, Mercurius, heeft een tweemaal grootere excentriciteit dan iedere andere planeet. De in grootte volgende, Mars, heeft ook de daaropvolgende grootste excentriciteit. Ook die van onze aarde is nog tweemaal grooter dan die van Neptunus. Vele planetoiden hebben nog grootere excentriciteiten dan Mercurius; planetoiden nu zijn heel weinig door opname van planetesimalen vergroot geworden. De verdeling der excentriciteiten in ons planetenstelsel kan door CHAMBERLIN dus wel, door LAPLACE niet verklaard worden.

Wanneer we thans nog even op den schijfvorm van ons zonnestelsel terugkomen, kunnen we uit de helling der baanvlakken een geheel analoge conclusie trekken. Want bij botsing zal het resulteerende lichaam in een baanvlak gaan loopen, dat tusschen de beide oorspronkelijke ligt. Bij voortdurende opneming van planetesimalen zal daarom het baanvlak van de knoop hoe langer hoe meer tot het oorspronkelijk storingsvlak moeten naderen. De kleinste planeet zal dus ook de grootste helling van het baanvlak moeten vertoonen. Dat is de verklaring van den grooten hellingshoek (7°) bij Mercurius, terwijl de banen der groote planeten vrijwel alle in één vlak liggen. Ook de baanvlakken der kleine planeetjes vertoonen groote hellingen; dat van Eros b.v. maakt een hoek van ongeveer 10° met de baanvlakken van aarde en Mars, wat volgens LAPLACE moeilijk te verklaren is.

Een hoofdcharacteristicum is evenwel ook de bewegingsrichting der planeten, zoowel om de zon als om haar eigen as. Dat alle planeten in dezelfde richting om de zon moeten loopen, hebben we zooeven reeds opgemerkt. Maar alle planeten draaien ook in dezelfde richting om haar as. Kan de nieuwe hypothese ook dit verschijnsel, dat volgens LAPLACE ook niet

zoo dadelijk is in te zien, verklaren? MOULTON meent van wel. Hoe ontstaat de rotatie van een planeet? Bij de oorspronkelijke ejectie van het knoopp materiaal zal dit natuurlijk in de een of andere richting zijn gaan draaien. Niet echter steeds in een bepaalde richting en allicht ook niet zeer snel. De stoot zal toch wel min of meer centraal zijn geweest en dan is de rotatie slechts gering. MOULTON gaat daarom uit van een niet draaienden knoop en berekent het effect der botsingen van al de planetesimalen met den knoop, waardoor deze gaat roteeren. Door al de planetesimalen in verschillende groepen te verdeelen en den invloed daarvan afzonderlijk na te gaan, komt hij tot het resultaat, dat in het algemeen de planeten direct moeten roteeren, maar allicht met zeer verschillende snelheden, omdat het aantal botsingen bij de verschillende knoopen zeer verschillend geweest kan zijn en bovendien soms een initiaalrotatie in tegenovergestelden zin eerst geneutraliseerd moest worden. Dit hoofdpunt schijnt dus wel goed te kunnen worden verklaard.

Thans een enkel woord over de satellieten. Dit zijn secundaire bijknoopjes, tegelijk met den hoofdknoop uitgeschoten. Ze zijn, voorzoover ze gebleven zijn, geheel gegroeid als de planeet zelf door opname van planetesimalen. Waarom heerscht daar nu ook een bepaalde voorkeur in omloopsrichting? Want bijna alle manen loopen direct, op enkele uitzonderingen — sommige manen der buitenplaneten — na. Dit is een recht moeilijk probleem. Terwijl deze afwijkingen volgens de oude theorie in 't geheel niet verklaard kunnen worden, meent MOULTON hier wel tot een in het algemeen bevredigend resultaat te zijn gekomen. Hij zegt, dat oorspronkelijk de manen wel in willekeurige richting om de planeten zullen hebben geloopt, maar dat de kans op het persisteeren van retrograde bewegingen gering is. Daarom loopen bijna alle manen direct. Alleen in extreme gevallen, waarin de satelliet weinig gegroeid, dus klein gebleven is, op een grooten afstand van zijn planeet staat en in een sterk hellend vlak loopt, is het blijven bestaan van de retrograde beweging niet uitgesloten. Welnu, dat is ook juist het geval, want de enkele gevallen van afwijkende bewegingsrichting, die we kennen, hebben juist bij die enkele manen der buitenplaneten de pas opgesomde eigenschappen. Geheel opgelost is intusschen dit vraag-

stuk der satellieten nog niet. De hypothese wacht hier op nadere uitwerking en voor de groote meerderheid der manen schijnt LAPLACE's voorstelling der secondaire ringen eenvoudiger.

Allerlei andere eigenschappen, die door de voorstellers zijn nagegaan, ga ik hier met stilzwijgen voorbij. Geconstateerd moge nog slechts worden, dat ook de opvallend geringe densiteit der buitenplaneten door hen op aannemelijke wijze uit het verschil in afkoelingsverhoudingen bij groote en kleine knopen wordt afgeleid.

Na deze algemeene schets der planetesimaalhypothese willen we thans nagaan, wat daaruit volgt voor de ontwikkeling der aarde meer in het bijzonder.

De oerstadiën der aarde. Deze geven een gansch ander beeld dan volgens de oude hypothese. Het uitgangspunt is al dadelijk totaal verschillend. Bij LAPLACE is de geheele massa der aarde bij de geboorte aanwezig, wordt alleen maar vervormd, bij CHAMBERLIN groeit de aarde tijdens haar ontwikkeling. In den beginne is de knoopmassa slechts een kleine fractie van die der latere planeet. Deze massa, bij het uitstooten gloeiend gasvormig, moet spoedig afgekoeld zijn tot een vaste massa van geaggregeerde planetesimalen. Deze afkoeling moet snel gegaan zijn wegens de geringe grootte van den aardknoop, waarmede de groote dichtheid der aarde samenhangt. Door de geringe massa moet de geconsolideerde aardknoop eerst zonder atmosfeer zijn geweest. *Het eerste stadium is dus een vaste aardkern*, warm misschien, maar *zonder atmosfeer*. De vraag is of we ons van de grootte der aarde in dat stadium een voorstelling kunnen vormen. Berekenen, hoe groot een hemellichaam precies moet zijn om een atmosfeer te kunnen vasthouden, kan men nog niet. Daaromtrent kan men alleen iets te weten komen door waarneming van de ons omringende hemelobjecten. De maan, wier massa $\frac{1}{81}$ van onze aarde bedraagt, heeft geen atmosfeer; geen enkel kleiner hemellichaam heeft er trouwens een; noch maan, noch asteroïde. Mars, wiens massa $\frac{1}{9.34}$ van die der aarde is, heeft zoo al geen uitgestrekten dan toch een duidelijk waarneembaren dampkring. De grens tusschen atmosfeerlooze en atmosfeerhoudende hemellichamen ligt dus blijkbaar tusschen $\frac{1}{80}$ en

$\frac{1}{10}$ der aardmassa. Om die grens nader te bepalen, moeten we als daartusschen liggend lichaam Mercurius nemen; daarvan is ongelukkig de massa niet nauwkeurig bekend, omdat deze planeet geen maan heeft. De waarden schommelen tusschen $\frac{1}{26}$ en $\frac{1}{9}$. Wat Mercurius' atmosfeer betreft, hoewel het laatste woord daarover nog niet gesproken is, schijnt het toch wel, dat deze ontbreekt: er is geen atmosferische straalbreking, enz. Een dampkring, die werkelijk verweering en denudatie zou bewerkstelligen, zal op Mercurius vermoedelijk niet aanwezig zijn. De bovenbedoelde grens ligt derhalve dichter bij Mars dan bij de maan. Globaal kunnen we daarom zeggen, dat de aarde op het moment, dat haar massa $\frac{1}{20}$ van de tegenwoordige was, nog geen atmosfeer had; toen ze aangegroeid was tot $\frac{1}{10}$, was er langzamerhand een dampkring, hoe gering eerst ook, gekomen. *Het tweede stadium omvat dus het ontstaan van den initiaal-atmosfeer* en de vraag is dus nu: hoe is die atmosfeer ontstaan en waaruit bestond hij?

Daarvoor zijn twee bronnen, een uitwendige en een inwendige. Laat ons eerst de uitwendige bron nagaan. Toen de aarde klein was, was haar gravitatie onvoldoende om de gasvormige planetesimalen vast te houden. Nadat ze voldoende gegroeid was, begon dit hoe langer hoe meer te gelukken; na de botsing verwijderden de gasmoleculen zich niet meer, maar bleven.

Werkelijk groeien deed de aarde door de aanhechting van vaste planetesimalen. Deze herbergden gassen, juist als meteorieten en stollingsgesteenten steeds doen. Bij de botsing werden deze vaste planetesimalen gloeiend en lieten daarbij een deel van haar gas los, zooals gesteenten ook doen bij verhitting. Of deze toevoer belangrijk was, is onzeker, daar bij afkoeling en vastwording der planetesimalen weer een deel van het gas geabsorbeerd en ingesloten kan zijn.

Thans enkele woorden over de inwendige bron. Bij de afkoeling der oorspronkelijke knoopplanetesimalen en aanhechting van latere planetesimalen sloten deze min of meer groote hoeveelheden gasmoleculen in. Deze hoeveelheden moet men niet te gering achten. Alle stollingsgesteenten bevatten gas, en niet weinig, voornamelijk als insluitsels in kwartskristallen, omdat dit mineraal vaak het laatst kristalliseert. Een denkbeeld omtrent de ingesloten hoeveelheid krijgt men door het

resultaat eener analyse van 25 verschillende stollingsgesteenten : daarin was gemiddeld $4\frac{1}{2}$ maal het volume van het gesteente, onder normalen druk, in gasvorm aanwezig. De overhand heeft waterstof, daarna volgt kooldioxyde, dan kooloxyde, en eindelijk methaan en stikstof. Waterdamp komt dikwijls in geringe hoeveelheden voor ; vrije zuurstof ontbreekt geheel. De verhouding van waterstof tot kooldioxyde is 7 : 3.

Ook meteorieten zijn in dit verband zeer belangrijk ; deze toch bevatten gemiddeld verscheiden maal hun volume aan gas. Dit voorbeeld is daarom bijzonder leerzaam, omdat meteorieten ook een onnoemelijk langen weg hebben afgelegd in een vrijwel zuiver vacuum en bij het vallen ook sterk verhit zijn. Bovendien zijn ze afkomstig van atmosfeerlooze hemellichamen ; niettemin zitten ze vol gas. We mogen dus veilig aannemen, dat de groeiende aarde groote hoeveelheden gas ingesloten bevatte. Deze werden door andere processen, die we straks zullen bespreken, uit den lithosfeer aan den dampkring toegevoerd.

Beide bronnen leverden samen het materiaal voor den oer-atmosfeer. Laat ons even zien, welke elementen ze aanvoerden. De uitwendige gasplanetesimalen mogen al die elementen geleverd hebben, die in de nevelmaterie zweefden, afkomstig uit de zon op het oogenblik en de plaats der ejectie. Omtrent de verhoudingen, waarin de gassen in den zonneatmosfeer voorkomen, is weinig bekend. We weten alleen, dat waterstof overvloedig voorhanden is. Daarmede stemt overeen, dat waterstof het voornaamste gas der gesteenten is. Toch komt dit gas nu niet in onzen dampkring voor ; de reden daarvan zal dadelijk blijken. In welke verhouding de uitwendige bron dus meegeholpen zal hebben voor de tegenwoordige bestanddeelen, is niet goed te zeggen ; alle elementen zullen daarin wel aanwezig geweest zijn, maar in onbekende verhoudingen.

Wat de inwendige bron aangaat, nemen we aan, dat de gasinsluitsels der planetesimalen dezelfde zijn geweest als die der tegenwoordige gesteenten : H_2 , CO_2 en CO in grootere, CH_4 en N_2 in kleinere hoeveelheden. Om experimenteele redenen neemt men aan, dat bij bepaalde temperatuur en druk waterstof het ferrioxyde, dat stellig rijkelijk aanwezig was, gereduceerd heeft onder vorming van water. Daardoor zullen de inwendige gassen voor een groot deel bestaan hebben

uit H_2O , CO_2 en CO in grootere, H_2 , N_2 en CH_4 in kleinere kwantiteiten.

Voegen we daarbij de uitwendige, uit den zonneatmosfeer afkomstige H_2 , O_2 , CO_2 , N_2 en misschien nog enkele andere. De CO mag in CO_2 , de CH_4 in CO_2 en H_2O zijn overgegaan. We houden dus als werkelijke oerelementen over: CO_2 , H_2 , H_2O , O_2 en H_2 in niet aan te geven proporties, al zullen N_2 en O_2 waarschijnlijk wel een zeer ondergeschikte rol hebben gespeeld.

Maar uit dezen toevoer blijkt nog niet de eigenlijke samenstelling van den oeratmosfeer. Want het komt niet op den toevoer alleen aan, vooral de macht om te behouden is van belang. Naarmate de aarde groeide, werd haar vermogen om de lichtere moleculen vast te houden grooter. Volgens de kinetische gastheorie zijn de moleculaire snelheden omgekeerd evenredig met den wortel uit de moleculairgewichten. Eerst zal de aarde dus kooldioxyde, daarna zuurstof, dan stikstof, dan waterdamp en eindelijk waterstof kunnen vasthouden. Maar dit laatste oogenblik is zelfs nu nog niet gekomen; zie daar de verklaring van het ontbreken van waterstof in het ons bekende deel van den aardischen dampkring, hoewel ze in beide bronnen overvloedig aanwezig was. De eerste atmosfeer zal dus eerst grootendeels uit CO_2 bestaan hebben en eerst langzamerhand de andere elementen hebben opgenomen. Door talrijke processen tijdens de ontwikkeling der aarde is de samenstelling van dien oeratmosfeer belangrijk gewijzigd. Door vorming van carbonaatgesteenten — voor een gering deel ook van kaustobiolieten — is de kooldioxyde grootendeels verbruikt; stikstof, thans het hoofdbestanddeel der lucht, heeft zich, hoewel oorspronkelijk maar in geringe hoeveelheid aanwezig, steeds geaccumuleerd wegens haar chemische inertie; zuurstof is in den beginne een onbelangrijk bestanddeel geweest, doch op twee wijzen vermeerderd: eensdeels door splitsing der watermoleculen bij de botsing, anderdeels later door de koolzuurassimilatie. Over den waterdamp spreken we straks nader en op het gedrag der waterstof hebben we reeds gewezen.

Zooveel over den oeratmosfeer. We hebben daarbij eenigszins uitvoerig stilgestaan, omdat hier de nieuwe hypothese totaal andere opvattingen huldigt dan bij LAPLACE, waar

juist een fantastische dampkring van honderden atmosferen druks het initiaalstadium vormt.

Thans moeten we nagaan, op welke wijze de inwendige gassen aan den atmosfeer werden toegevoerd. Welke kracht moet dit doen? Het vulcanisme. Tegenwoordig zien we, dat bij vulcanische uitbarstingen geweldige hoeveelheden gas bij den atmosfeer worden ingelijfd, ook in den vorm van uit lava ontsnappende gassen. Deze theorie nu veronderstelt, dat zulke vulcanische gassen voor het grootste deel juveniele gassen zijn.

De eerste atmosfeer kan dus van binnen alleen door vulcanische werking gevoed zijn. Wanneer deze begon, is niet zeker. Misschien was de aarde toen reeds zoo groot, dat de uitwendige bron voor den dampkring reeds werkte; dan begint het vulcanische stadium dus na het eerste ontstaan van het gashulsel. Maar misschien is dat ook niet zoo. Als de kraters op de maan inderdaad producten van vulcanischen aard zijn, hebben we daarin een bewijs, dat het vulcanisme veel eerder begon dan het ontstaan van den dampkring. De maan toch heeft zelfs die uitgestooten gassen nooit kunnen vasthouden.

Voor vulcanische werking is een centrale warmtebron noodig en de eerste vraag is dus: waar kreeg de groeiende aarde de noodige warmte vandaan? Daarvoor bestaan vier bronnen.

1°. Door de botsing der planetesimalen ontstaat warmte. Deze is in totaal natuurlijk geweldig geweest en zeker in staat de geheele aarde te smelten. Maar deze warmte werd aan de aarde toegevoerd in een heel lang tijdsverloop en het lijkt niet waarschijnlijk, dat deze botsingen, behalve misschien heel in het begin, zoo talrijk waren, dat daarvan de aarde voortdurend noemenswaard heet werd. Ook al, omdat in den eersten tijd de uitstraling zoo enorm groot was.

2°. Bij de condensatie van den nevelknoop in vast en vloeibaar materiaal mag zooveel hitte zijn achtergebleven, dat de aarde tengevolge daarvan nog een tijdlang warm was.

3°. De derde en voornaamste oorzaak is evenwel die, welke warmte doet ontstaan door zelfcompressie, door samendrukking van zuiver mechanischen aard. Deze samendrukking nam bij den groei der aarde steeds toe en deze druk zette zich om in warmte. [Wet van LANE]. Men kent den waren aard

van dit proces nog ver van voldoende, maar het schijnt, dat het verzet tegen samendrukking een gevolg is van bewegingen van de bestanddeelen der atomen (electronen); één dier bewegingsvormen is warmte. Goede berekeningen ontbreken nog, maar CHAMBERLIN meent, dat toen de aarde $\frac{1}{10}$ van haar tegenwoordige massa had bereikt, de zelfcompressie voldoende was om de temperatuur tot het smeltpunt der gesteenten te doen stijgen.

4°. Een vierde, hier trouwens mee samenhangende bron van warmte is de moleculaire omvorming, die door deze drukking in de aardmaterie ontstaat. Deze toch is opgebouwd uit planetesimalen, die verdicht zijn in een zuiver vacuum, dus bij totaal ontbreken van druk. In de groeiende aarde binnengeloodst, raken zij onder een steeds toenemenden druk. Het gevolg daarvan is, dat ze in dichtere moleculaire combinaties worden omgezet en deze hebben vermoedelijk lagere soortelijke warmten. Daardoor ontstaat dus nog eens warmte.

Hieruit blijkt, dat de temperatuur in het centrum maximaal moet zijn en naar buiten afnemen. Volgens de nieuwste berekening moet in de tegenwoordige aarde een temperatuur heerschen van 20000° C. in het centrum als gevolg van zelfcompressie. In vroegere stadia zal deze dus ook allicht eenige duizenden graden bedragen hebben. Hoewel nu het smeltpunt der meeste stoffen bij druk wordt verhoogd, zullen er in de groeiende aarde toch stellig wel kleinere porties geweest zijn, die daardoor tot smelting kwamen. Eerst alleen in het centrum, later ook in de meer uitwendige deelen. Door den druk werden die deelen naar buiten geperst; d. w. z. ze bewogen zich niet werkelijk, maar vraten zich steeds verder voort in centrifugale richting. Zoo kwamen ze in streken van lagere temperatuur en lageren druk en gingen naarbij tongvormig naar buiten groeien. Indien deze opstijgende lavatongen de fragmentale zone niet bereikten, stolden ze als batholieten; geschiedde dit wel, dan ontstonden geweldige vulcanische erupties, doordat die lavamassa's op haar weg overal gas hadden opgenomen. Zoo werden aan de oppervlakte zeer groote kraters gevormd, omdat de zwaartekracht der aarde nog zoo gering was en ook de atmosfeer nog niet of weinig hinderde. Het is dit vulcanisch proces, waardoor de

atmosfeer van binnen gevoed werd. Dat is dus *het stadium der eerste vulcanische werking*.

We komen nu aan een volgend stadium. Want de atmosfeer is er wel, maar de hydrosfeer nog niet. Waar komt deze nu vandaan en hoe ontstaat hij?

Toen de dampkring het verzadigingspunt voor waterdamp bereikte, sloeg deze neer en er ontstond water. Maar dit was eerst later het geval. Want door het geringe moleculairgewicht ontsnapte H_2O heel lang aan de aantrekking der aarde. Veel eerder reeds werkte een andere bron voor den hydrosfeer, nl. een onderaardsche. H_2O toch wordt onder de vulcanische gassen gerekend te zijn ontstaan uit waterstof, die de zuurstof aan ferrioxjde ontleende. Het aldus ontstaande water bleef capillair in de fragmentale zone verborgen. Eindelijk groeide dit „grondwater” zoo, dat het de oppervlakte bereikte in de depressies, die de vulcanische erupties in krater-vorm hadden geschapen. Daarna groeide de hydrosfeer langzamerhand ook door externen atmosferischen toevoer.

Deze depressies, waarin zich het eerste water verzamelde, zullen in den beginne wel heel onregelmatig over de oppervlakte der toenmalige aarde verspreid zijn geweest. Denken we ons de aarde slechts zoo groot als Mars, omdat deze waarschijnlijk wel een hydrosfeer heeft, d. i. ongeveer $\frac{1}{10}$ van de tegenwoordige aarde. Deze moet dus nog oneindig veel groeien na dit *stadium van den initiaal-hydrosfeer*. Maar nu er een atmosfeer en een hydrosfeer, lucht en water zijn, beginnen er „lijnen” in de oppervlakte te komen. Hoe? Beide sferen bewerken samen de verweering, de uitlooging der gesteenten. De landgedeelten worden uitgeloogd; de uitloogingsproducten komen voor een groot deel in den hydrosfeer terecht, die den bodem daaronder beschermt. Wat is verweering? Een relatief veel sterker oplossen van de basische dan van de zure bestanddeelen: Na, K, Ca en Mg-verbindingen worden naar zee gevoerd, kiezelzuur (kwarts) en (Al-) silicaten (klei) blijven achter. Practisch wil dit zeggen, dat het land lichter, de bodem onder de zee zwaarder wordt. Met iedere laag, die de planetesimalen aan de aarde toevoegen, geschiedt hetzelfde. Dat komt daarop neer, dat streken rijk aan land rijzen, streken rijk aan water dalen. Men ziet, dat uit deze ontwikkeling van den hydrosfeer de theorie van de permanentie

van continenten en oceanische bekkens te voorschijn komt.

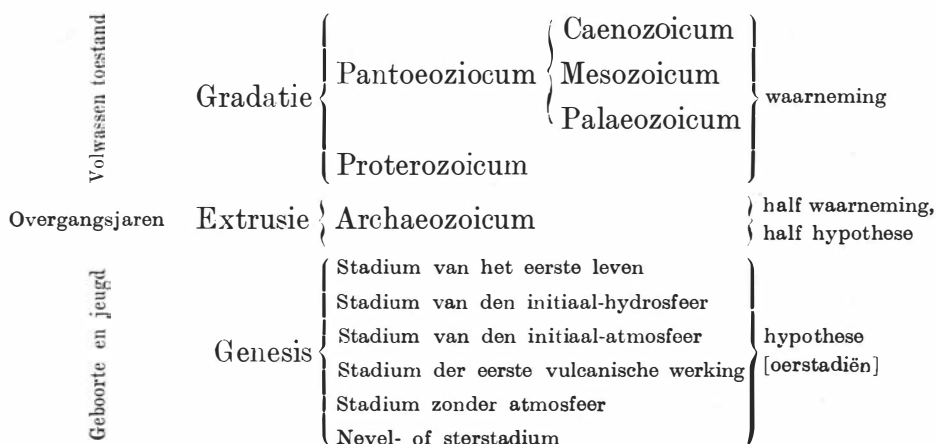
Zooveel over dit eerste hydrosferische stadium. Nu kan er, hoewel de aarde nog klein is, iets anders gebeuren. Er is water, er is lucht, de oppervlakte-temperatuur is niet hoog: dus zijn er levenscondities! Men kan zich dus leven denken. De verklaring van de overbrenging der eerste levenskiemen van een andere planeet kan hier niet dienen, omdat alle planeten gelijktijdig ontstaan. Wij denken ons daarom het leven in zijn eenvoudigste gedaante in den vorm van ééncellige groene waterplanten ontstaan. Een gunstige omstandigheid daarbij is, dat we hier voor de evolutie der levensvormen, die in het Cambrium reeds zulk een hoogen trap hebben bereikt, zulk een lange tijdsruimte te onzer beschikking hebben. Want toen de aarde zoo groot was als Mars nu, was er lucht en water; nemen we dus maar het dubbele, dan was ze nog slechts $\frac{1}{5}$ van de tegenwoordige. Ze moest nog voor $\frac{4}{5}$ groeien. Meent men, dat bij $\frac{1}{5}$ de botsing der planetesimalen de oppervlakte-temperatuur nog te hoog maakte, dan denke men aan $\frac{1}{4}$ of $\frac{1}{3}$; steeds houdt men nog een zeer lange periode over. Dat is *het stadium van het eerste leven*.

Door deze intrede van den biosfeer begon de atmosfeer langzaam van karakter te veranderen, zooals we reeds hebben uiteengezet. Maar alle vijf sferen zijn nu voorhanden. Toch grijpen nog niet *al* de gewone geologische processen plaats: *diastrophisme* (bewegingen der aardkorst), *vulcanisme* en *gradatie* (nivelleering): aggradatie, degradatie. Want de groei houdt nog steeds aan door de bijvoeging van nieuwe planetesimalen. De aarde is nog lang niet volwassen. Maar langzamerhand wordt dit minder en minder. Wat gebeurt er dan?

Dan neemt het vulcanisme een tijdlang de overhand. Door den groei neemt de zelfcompressie steeds toe; daardoor ontstaat naar binnen een steeds hoogere temperatuur, die langzamerhand naar buiten gaat werken en tot vulcanische verschijnselen aanleiding geeft. Deze moeten dus ver na den voltooiden groei plaats hebben. Daarom volgt op den volwassen toestand een *periode van overheerschende vulcanische werkzaamheid*: geweldige hoeveelheden lava's en tuffen bereiken de oppervlakte der aarde. Daardoor ontstaat een verlies van materiaal en temperatuur in den pyrosfeer; het evenwicht wordt verbroken en dit wordt door diastrophisme

weer hersteld : er grijpen sterke processen van plooiing, kneeding, metamorphose, enz., plaats ; intrusies van uiteenloopen den aard treden op, terwijl sedimentatie, zoo ze al niet ontbreekt, dan toch zeer ondergeschikt is ! Wat is dit alles ? De oudste bekende formaties, het Archaeicum ! Dat is dus hetgeen op de eigenlijke oerstadiën volgt : een climax van vulcanische werkzaamheid.

De aarde groeit nu niet meer ; dus moeten deze werkingen bij gebrek aan toename der zelfcompressie langzamerhand ophouden. Daardoor vermindert het vulcanisme en dus ook het diastrophisme, en nu — de aarde is volwassen — komt het derde proces, de gradatie, aan de beurt. Het is dit proces, dat sedert de volgroeijing der aarde haar verdere ontwikkeling heeft beheerscht. Daaraan hebben alle bekende formaties haar ontstaan te danken, d. w. z. alles wat op het Archaeicum volgt : Proterozoicum (Algonkium), Palaeozoicum, enz. De naam Archaeicum is echter volgens deze nieuwe theorie nu minder goed ; beter is Archaeozoicum, omdat reeds tijdens deze periode en misschien zelfs reeds vroeger leven aanwezig geweest is. Het algemeene evolutiebeeld wijst er naar mijn meening verder op, dat het tijdvak van het Palaeozoicum niet gelijkwaardig is met dat van Proterozoicum en Archaeozoicum ; ik stel daarom voor den tijd na het Cambrium in zijn geheel samen te vatten onder den naam van *Pantoeozoicum*¹⁾. Zoo komen we ten slotte dus tot het volgende schema :



1) παντοῖος = van allerlei aard, menigvuldig.

Het is natuurlijk uiterst moeilijk dadelijk een oordeel te vellen over een hypothese als deze, die, blijkt zij bruikbaar, een groote revolutie zal brengen in de tot heden gehuldigde opvattingen. Vooral omdat hier de kennis uit de grensgebieden van vele wetenschappen is bijeengebracht, past het in zijn oordeel bescheiden te zijn. Te meer is dit het geval, wijl er onder de mannen van gezag in de wetenschappen, wier terrein de hypothese bestrijkt, nog bijna geen zijn, die hun denkbelden daaromtrent hebben bekend gemaakt. Slechts van den pas gestorven GEORGE DARWIN, den man van het getijdenprobleem, bezitten we een gunstige beoordeeling. Maar POINCARÉ is heengegaan zonder zich erover te hebben uitgelaten; in zijn in 1911 verschenen werk: „Leçons sur les hypothèses cosmogoniques” komen de namen CHAMBERLIN en MOULTON niet voor. In afwachting van zulk nader onderzoek wil het mij echter voorkomen, dat deze hypothese tot de allerbelangrijkste bijdragen op het gebied der cosmogenese behoort en dat in 't bijzonder de historische geologie veel van haar verdere uitwerking en toepassing heeft te verwachten.

L i t e r a t u u r: T. C. CHAMBERLIN and R. D. SALISBURY: *Geology*. Vol. II. *Earth History. Genesis-Paleozoic*, [New York, 1906; 8°], p. 38—81, 91—132¹⁾.

F. R. MOULTON: *An introduction to astronomy*, Ed. 1911, p. 463—487.

1) Aan dit werk zijn ook de in dit opstel opgenomen afbeeldingen ontleend