INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3, avenue Circulaire, UCCLE - BRUXELLES 18

AERONOMICA ACTA

A - N° 44 - 1966

De magnetosfeer der Aarde

door E. AERTS

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3, Ringlaan, UKKEL - BRUSSEL 18

VOORWOORD

Deze tekst is een synthese van de huidige kennis van de magnetosfeer.

AVANT-PROPOS

Ce texte constitue une synthèse des connaissances actuelles concernant la magnétosphère.

FOREWORD

This text constitutes a synthesis of the present knowledge about the magnetosphere.

VORWORT

Dieser Text is eine Synthese der heutigen Kenntnisse über der Magnetosphäre.

DE MAGNETOSFEER DER AARDE

door

E. AERTS

Samenvatting

Na een korte historiek over het verband dat er bestaat tussen aardse atmosferische en magnetische verschijnselen en de zonneactiviteit wordt een overzicht gegeven van de experimentele bevindingen opgedaan met behulp van interplanetaire satellieten. Vervolgens wordt de magnetosfeer der aarde bestudeerd wat betreft vorm en samenstelling. De corpusculaire stromingen in de schoot der magnetosfeer worden eveneens bestudeerd om te besluiten met de opmerking dat onze kennis nog te gering is om de magnetosfeer op bevredigende wijze voor te stellen.

Résumé

Après l'historique succinct des relations entre les phénomènes atmosphériques et magnétiques terrestres et l'activité du Soleil, un aperçu des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de sondes interplanétaires est donné. Ensuite la composition et l'aspect géométrique de la magnétosphère terrestre sont étudiés. Les courants corpusculaires se situant au sein de la magnétosphère le sont également et l'on conclu par la remarque que momentanément nos connaissances ne suffisent pas encore pour donner une image satisfaisante de la magnétosphère.

Abstract

After a brief history of the relationship between terrestrial atmospheric and magnetic phenomena and solar activity an account is given of the various experimental results obtained from the interplanetary spacecrafts. Next the composition and the geometric aspect of the magnetosphere together with the various corpuscular flows inside the magnetosphere are studied. It is concluded that since our knowledge is still incomplete it is impossible to give a correct picture of the magnetosphere.

Zusammenfassung

Nach einem kurzen Historische der Verbindungen zwischen den erdatmosphärischen and erdmagnetischen Phänomen und der Sonnenaktivität, geben wir einen Überblick der experimentalen Ergebnisse, die mit Hilfe der Raumsondes erreicht wurden. Danach, werden die Komposition und das geometrische Ansehen der Magnetosphäre, sowie die Urkörperströme studiert. So beschliesst man, dass die heutige Kenntnisse noch nicht genügen, um ein hinreichendes Bild der Magnetosphäre zu geben.

1.- De gevolgen van enkele berekeningen

Onlangs las ik volgend citaat : "Onwetendheid ligt aan de basis van woordenstrijd. Wetenschap daarentegen steunt op feiten, die hun verklaring vinden in natuurwetten". Hierop volgden enkele voorbeelden uit de fysica en de scheikunde om deze uitspraak te verduidelijken. Het is de bedoeling thans een gelijkaardig voorbeeld te bespreken dat behoort tot het domein van de ruimte-aëronomie. Tot voor kort konden de algemeen geldende begrippen over ons zonnestelsel bondig samengevat worden als volgt :

a) De zon als centraal element bestaat uit een kern, omgeven door een atmosfeer bestaande uit een fotosfeer en inversielaag, een chromosfeer en een corona. Deze laatste is het buitenste deel van de zonneatmosfeer die zich zowat tot op 2.10^7 km van dit hemellichaam uitstrekt.[1]. Verder wordt de zon nog gekenmerkt door een veranderlijk aantal zonnevlekken gelegen in de fotosfeer. Ook zonnevlammen behoren tot de gekende begrippen van de zon. Tenslotte weze nog herinnerd dat de zon draait en magnetische verschijnselen vertoont.

b) In een schijnbaar ledige ruimte wentelen een aantal hemellichamen rond de zon waaronder de aarde, de planeten en ook de kometen. Deze laatste zijn meestal gekenmerkt door een lichtende staart die steeds afgewend is van de zon. En zoals de Romeinen al vroeger opmerkten : "in cauda venenum". Inderdaad over de oorsprong de samenstelling en vooral de richting van deze staart was in de loop der tijden heel wat geredetwist. Ten slotte nam men vrede met de hypothese dat ten gevolge van de elektromagnetische stralingsdruk de staart afgewend was van de zon. Alles bleek dus zowat tot ieders voldoening verklaard te zijn en men kon met "grote kennis van zake" spreken over het zonnestelsel. Hieraan zou echter spoedig een einde komen toen Biermann[2] zich in de vijftiger jaren aan het rekenen

zette en tot verbluffende resultaten kwam. Hij steunde hierbij op de waarnemingen van Wurm[3] die vaststelde dat in de lichtende staart van de kometen van het type I, de moleculaire ionen een radiale versnelling vertoonden die afgewend was van de zon onafgezien de helling van de baan der kometen. Deze versnelling bleek twintig tot duizend maal de versnelling van de aantrekkingskracht van de zon te overtreffen op de plaats waar de komeet zich bevond. Tevens bleek ook, dat deze radiale versnelling het grootst was in perioden van grote zonneactiviteit. Biermann bewees nu twee zaken :

1º de elektromagnetische stralingsdruk uitgeoefend op de kometen was niet sterk genoeg om deze hoge versnellingen te veroorzaken op de plaats waar de kometen zich bevonden.

2º de ionisatie der gasmoleculen in de staart kon maar veroorzaakt worden door een corpusculaire straling. Deze laatste kon trouwens ook de optredende versnellingen op bevredigende wijze verklaren. De besluiten die Biermann hieruit zou trekken lagen dan ook voor de hand : de zon zendt ononderbroken een plasma-stroom uit, welke de interplanetaire ruimte vult. Wegens zijn hydrodynamisch karakter gaf Parker[4] hem de naam van "zonnewind".

Reeds vroeger hadden geleerden reeds vermoedens gehad van het bestaan van deze wind. Inderdaad, reeds in 1896 stelde Birkeland voor, dat het noorderlicht zou ontstaan door precipitatie in de dampkring van geïoniseerde deeltjes afkomstig van de zon volgens de geomagnetische krachtlijnen. Sinds 1907 hield Störmer zich vervolgens bezig met het berekenen van mogelijke banen van deze deeltjes.

In de dertiger jaren, met de opkomst van de radio, was men zeer begaan met het optreden van magnetische storingen die radio- en telegraafverbindingen hinderden. Hierbij had men opgemerkt dat deze storingen meestal samengingen met sterke zonneactiviteit. Sommigen meenden hierin de invloed te zien van een verhoogde ultraviolette

straling die gewoonlijk gepaard gaat met een uitbarsting. Chapman schreef deze stormen echter toe aan het uitstoten van een geïoniseerde-gaswolk door de zon en samen met Ferraro[5] voerde hij een reeks berekeningen uit welke onomstotelijk aantoonden dat een ionenwolk van geringe dichtheid en met supersonische snelheid in staat waren de waargenomen veranderingen van het aards magnetisch veld te verklaren. In feite waren de resultaten zo sprekend, dat de opvatting van de grote geleerde, die Chapman is, dadelijk en zonder discussie aanvaard werd.

Chapman was evenwel van oordeel, dat deze wolk maar optrad wanneer er een zonneuitbarsting plaats had. Hij vermoedde echter nog geen voortdurend uitstromen van wat men ook het zonneplasma genoemd heeft. Toch was zijn idee zo geniaal, dat het bepalend is geweest voor de huidige gerichtheid van het fysisch denken inzake ruimte-onderzoek.

Een andere aanwijzing van het bestaan van een zonnewind waren de waarnemingen van Forbush[6]. Deze stelde vast, dat de cosmische straling het hevigst was in periodes van weinig zonneactiviteit en ze plotseling daalde gedurende een magnetische storm. Opnieuw werden er veronderstellingen geuit en weer begon men te cijferen. Ook thans kon alleen het bestaan van een zonnewind de verschijnselen bevredigend verklaren.

Op grond van deze waarnemingen, samen met de laatste bevindingen van het ruimteonderzoek, heeft Parker[7] een samenhangende theorie kunnen opstellen over het ontstaan en de morfologie van de zonnewind. Deze komt in 't kort hierop neer, dat de relatief ijle corona zo sterk opgewarmd wordt door de zon, dat haar temperatuur van de orde van 10^6 °K is. Deze opwarming heeft een dubbel effect :

1º de gassen welke de corona samenstellen worden praktisch volledig geïoniseerd en vormen alzo een plasma.

2º de drukking welke in de corona heerst is zo groot, dat de kinetische energie der ionen hun potentiële energie overtreft. Ten gevolge hiervan bevindt de corona zichniet in een statische toestand, zoals de aardse atmosfeer, maar wel in een dynamische. De ionen zullen ten gevolge hiervan een radiale versnelde beweging uitvoeren.

Wegens het bestaan van het algemeen magnetisch veld der zon en door het feit dat het uitzettend corona-gas een plasma is, zal het een magnetisch veld met zich meevoeren, dat door de draaiing van de zon spiraalvormige krachtlijnen gaat vertonen zoals fig. 1 aantoont. Melden wij ten slotte nog, dat de zonnewind zowat tot aan Uranus zou reiken en dat sinds haar 5 miljardenjarig bestaan de zon op die manier zowat 10^{29} gram verloren heeft d.i. 10^{-4} van haar huidige massa[1].

2.- Wat de kunstmatige satellieten ons leren

Enkele jaren geleden was de techniek zodanig gevorderd, dat men er aan kon denken kunstmatige satellieten in een interplanetaire baan te brengen om aldus experimentele bevestiging te bekomen van de theorieën, die hogervermelde geniale cijferaars hadden opgebouwd. Het resultaat was verbijsterend ; niet alleen werd het bestaan van de zonnewind bevestigd, maar ook weidonomstotelijk aangetoond, zoals Chapman het vermoedde, dat ook gans het geomagnetische veld werd gewijzigd onder invloed van deze plasmastroom.

Het was met Pioneer I dat men in 1958 voor het eerst de ruimte buiten de magnetosfeer ging verkennen. Sonett et al.[27] vonden voor het eerst aanwijzingen nopens het bestaan van een interplanetair magnetisch veld, later bevestigd door Explorer 6 die tevens het bestaan van een magnetopauze verraadde. De eerste gegevens over de zonnewind waren afkomstig van metingen verricht met de Lunik I en II in 1959 gedurende

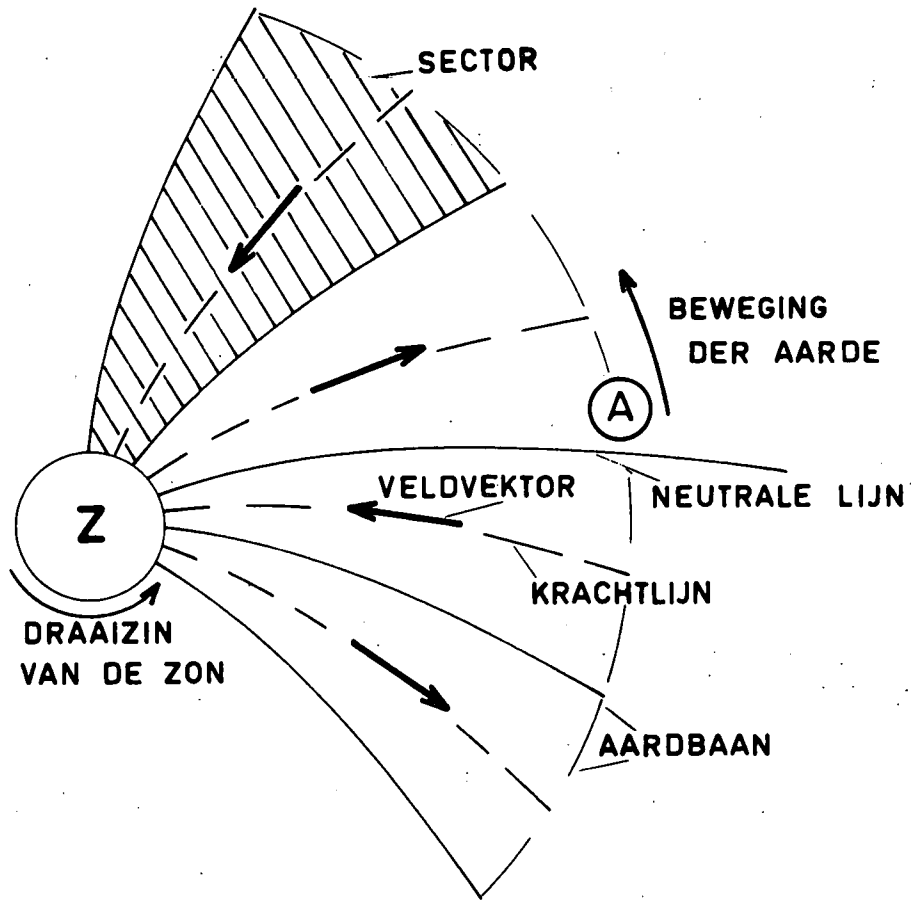


Fig. 1.- Elementen van het interplanetair magnetisch veld.

een kalme-zonne-periode. De resultaten werden meegedeeld door Shklovskii, Moroz en Kurt [8] welke een ionenconcentratie vaststelden van 30 cm^{-3} terwijl de snelheid der protonen zowat 60 km sec^{-1} bedroeg. Met een volmaakter instrument aan boord van Explorer 10 vonden Bridge et al.[9] volgende waarden in de nabijheid der aarde gedurende een kalme zonne periode : concentratie 7-20 cm^{-3}, snelheid protonen : 250-400 km sec^{-1}. Op ogenblikken van grote zonneactiviteit kan de wind een snelheid bereiken van 2.10^3 km sec^{-1}. Het jaar vóór het lanceren van Explorer 10 had men met Pioneer 5[10] reeds een ondubbelzinnige bevestiging bekomen voor het bestaan van een magnetopauze.

Metingen aan boord van Mariner 2[11] toonden het bestaan aan van een interplanetair magnetisch veld met spiraalvormige krachtlijnen, die nagenoeg in het vlak der ecliptica gelegen waren. De sterkte van dit veld bedroeg ongeveer 5γ (1γ = 10^{-5} oersted).

Later werden aan boord van Explorer 12, (1961) en Explorer 14 (1962) eveneens magnetometers geïnstalleerd, die er alle op wezen dat het geomagnetisch veld afnam op een manier die volkomen in overeenstemming was met een dipoolveld tot op een afstand van nagenoeg 10 aardstralen, dan een sterk gestoord veld registreerden om vervolgens voorbij 20 aardstralen een nagenoeg constante waarde aan te nemen van enkele gamma's.

Het was echter met de I.M.P. 1[12] dat de merkwaardigste bevindingen betreffende het interplanetair magnetisch veld opgedaan werden. Deze kunnen het best gevolgd worden aan de hand van fig. 2 , welke de verschijnselen weergeeft die gedurende de 11e baan om de aarde op 5 januari 1964 waargenomen werden. Het blijkt, dat bij grotere afstanden dan 10 aardstralen, gerekend van het midden der aarde, het geomagnetisch veld stelselmatig groter is dan dat van een normaal dipoolveld. Op ongeveer 13,6 aardstralen doet er zich een plotse verandering voor in de richting van het magnetisch veld der aarde, terwijl de

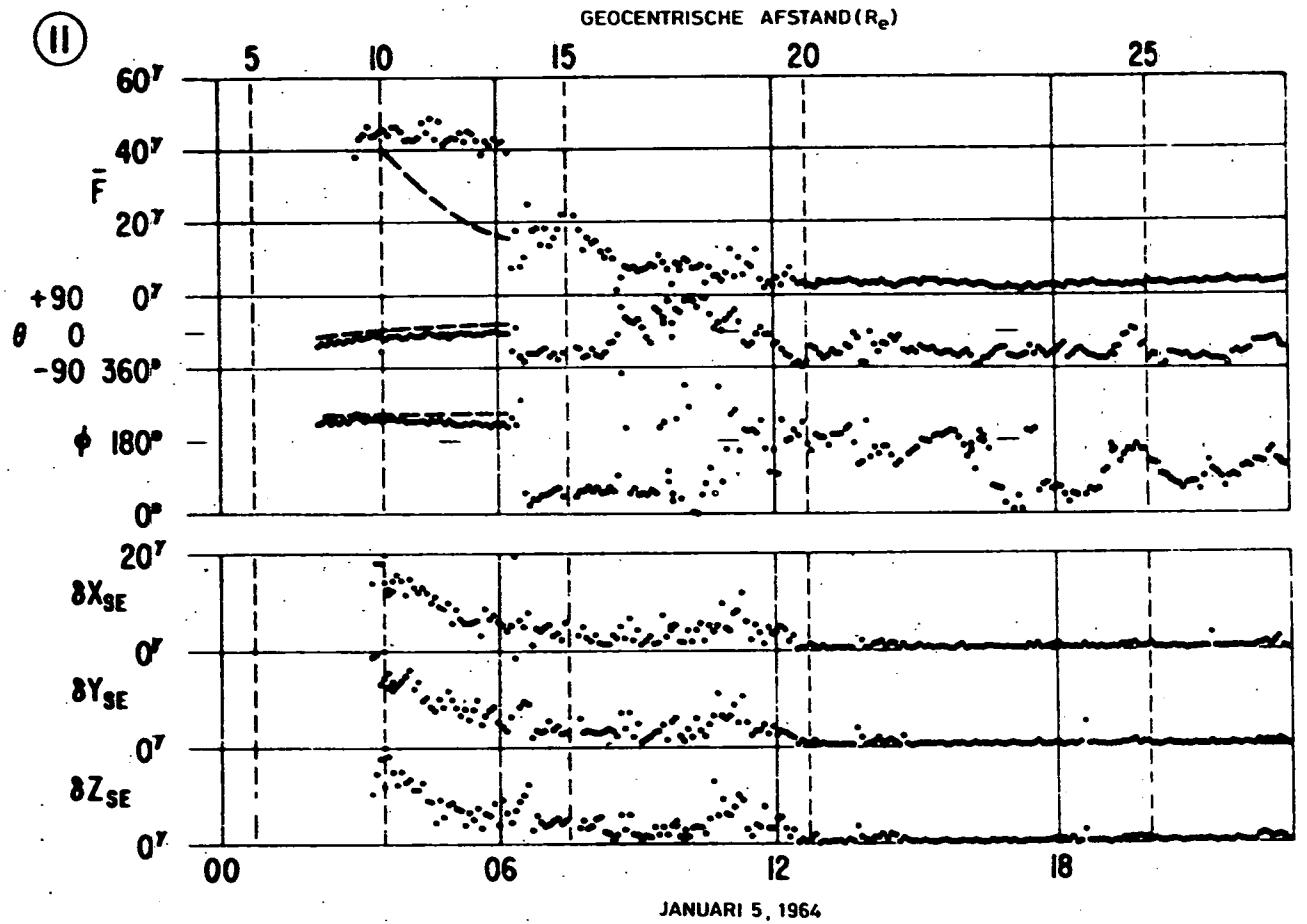


Fig. 2.- Elementen van het magnetische veld gemeten tijdens de 11e baan van de satelliet IMP 1 op 5 januari 1964.

intensiteit tot op nagenoeg 19,7 aardstralen grote schommelingen gaat vertonen. Verder dan 20 aardstralen blijkt de grootte van het gemeten veld nagenoeg constant te zijn. De richting van het veld blijkt evenwel nog van zin te veranderen.

De waarnemingen van I.M.P. 1* laten toe volgend beeld te vormen van het interplanetair plasma. De zon stoot plasmawolken uit, die onder invloed van de centrifugale versnelling en de eenparige rotatiebeweging een spiraalvormige begrenzing bekomen. Hierdoor wordt de interplanetaire ruimte verdeeld in ongelijke sectoren, juist geteld 4 in het totaal, welke om de 27 dagen terugkeren. De kunstmatige satelliet toonde daarenboven aan, dat de velden in aanpalende sectoren diametraal gericht zijn d.w.z. de veldvectoren maken onderling een hoek van nagenoeg 180° zoals in fig. 1 aangetoond wordt. Vermelden we nog, dat de veldvector niet precies in het vlak van de ecliptica gelegen is, maar er een lichte helling mee maakt. Ontbindt men de veldvector in een componente in de ecliptica en een er loodrecht op, dan is deze laatste overwegend gericht naar de zuidelijke ecliptische pool. De grenslijn tussen twee naburige sectoren is een neutrale lijn hierbij dient er op gewezen te worden dat de verandering in polariteit in de nabijheid van deze lijn op discontinue wijze gebeurt. Dit wijst er op dat er geen aanknoping geschiedt tussen de krachtlijnen van twee aanliggende magnetische sectoren. Hierbij dient aangestipt te worden, dat met uitzondering van die van Explorer 10 al de waargenomen afwijkingen zich voordeden terwijl de satelliet zich bevond aan de loefzijde** van de aarde t.o.v. de zonnewind. Men neemt aan dat al de hogervermelde wijzigingen verband houden met de wisselwerking tussen het geomagnetisch en het interplanetair magnetisch veld.

---

* I.M.P.1 : Interplanetary Monitoring Platform nr 1.

** zie volgende bladzijde.

Met Mariner-4, tijdens zijn lange reis naar Mars, bestond de mogelijkheid waarnemingen te verrichten aan de luwzijde** van onze planeet. De meting van de magnetische velden werd toevertrouwd aan Smith et al[13]. Zij vonden :

1º veranderingen, zowel in richting als in grootte van het geomagnetisch veld respectievelijk op nagenoeg 12, 22 en 36 aardstralen. Deze waarden liggen merkelijk hoger dan deze welke gevonden werden bij vroegere vluchten met satellieten. Men wijdt dit verschil aan de geringere zonneactiviteit welke tijdens deze laatste waarnemingen heerste.

2º het interplanetair veld is zeer ongeorderd, waarschijnlijk te wijten aan de onregelmatige plasma-emissie van de zon tijdens uitbarstingen en door het verschil in voortplantingssnelheid tussen de verschillende stromen. Hierdoor zouden schokgolven ontstaan welke de anisotropische beweging der protonen verstoren. Dit wordt geïllustreerd door fig. 3. Over het algemeen blijkt de voorstelling van Parker met de feiten overeen te stemmen. Bepaalde verschijnselen in het interplanetair plasma zouden zich om de 27 dagen opnieuw voordoen. Blijkbaar hebben zij iets te maken met de draaiing van de zon.

3.- De begrenzing van de magnetosfeer der aarde.

Indien de aarde niet blootgesteld was aan de zonnewind, dan zou haar krachtveld er uitzien zoals door fig. 4 aangegeven. Blijkbaar strekt zich in dit geval de invloedssfeer van de geomagnetische dipool oneindig ver uit. De aanwezigheid van het interplanetair magnetisch veld en de zonnewind beperken echter deze invloedssfeer tot een begrensd gebied. Zij werd door Gold[14] betiteld als magnetosfeer en streng gedefiniëerd als volgt :

** Met het gebruik van deze termen willen we het aerodynamisch karakter van de zonnewind beklemtonen. De loefzijde is deze welke de wind opvangt en de luwzijde is deze waar windstilte heerst. De termen loef- en luwzijde stemmen respectievelijk overeen met dag- en nachtzijde.

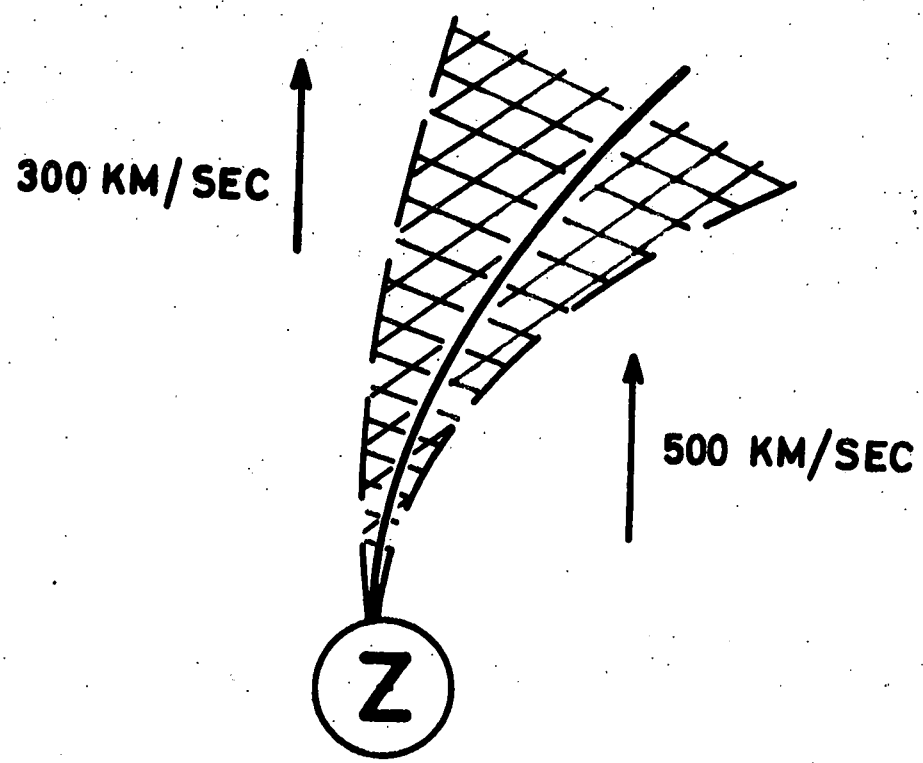


Fig. 3.- Schokgolfvorming in de nabijheid van de neutrale lijn door de verschillende voortplantingssnelheden van de zonnewind in de twee aanliggende sectoren.

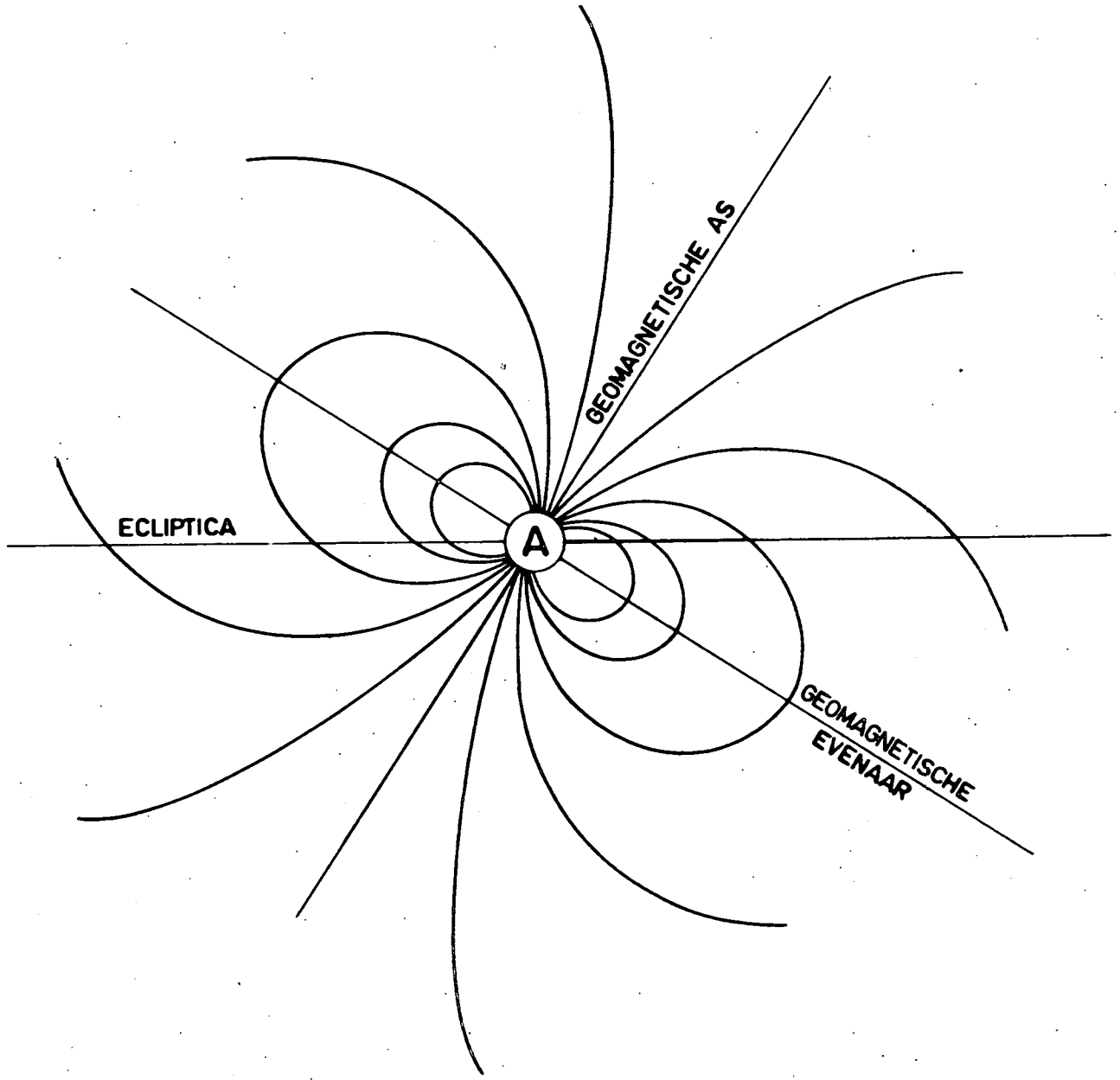


Fig. 4.- Ongestoord geomagnetisch veld.

het is het gebied in de nabijheid der aarde waar de beweging der geïoniseerde gassen beheerst wordt door het magnetisch veld der aarde. Zij omvat de bovenste lagen van de atmosfeer en de ionosfeer.

Haar benedengrens wordt arbitrair bepaald, op ongeveer 150 km boven het aardoppervlak. Alhoewel de ionisatie tot op lagere hoogten kan doordringen, nl. 60 à 70 km[15], kan men aantonen dat op deze lagere hoogten het gedrag der ionen niet meer hoofdzakelijk bepaald wordt door het magnetisch veld der aarde.

Haar bovengrens wordt de magnetopauze genoemd. Zij werd proefondervindelijk vastgesteld door de talrijke kunstmatige satellieten. Men kan haar definiëren als de plaats waar het geleidelijk afnemend geomagnetisch veld plots van oriëntatie gaat veranderen en een onregelmatig verloop begint te vertonen. Op fig. 2 kunnen we op 13,6 aardstralen zeer duidelijk deze grens onderscheiden. De waarnemingen met Pioneer 1 en 5[10], Explorer 12 en 14 en Mariner 2[11] toonden aan, dat langs de loefzijde deze magnetopauze tussen de 5 en 10 aardstralen moet gelegen zijn. Mariner-4 registreerde aan de luwzijde van onze planeet daarentegen een magnetopauze op ongeveer 22 aardstralen.

Over de vorm van deze magnetopauze is men het nog verre van eens. Het meest gangbare model is dit van Dessler[17]. Het stemt overeen met de laatste bevindingen van Ness en Wilcox[18] en is voorgesteld in fig. 5. Hierbij wordt de mogelijkheid beschouwd dat de magnetosfeer wel een gesloten geheel vormt, maar zich zeer ver uitstrekt (langer dan 20 A.U.)[24]. Daarenboven neemt men het bestaan aan van een neutraal blad d.w.z. een vlakke zone waar het geomagnetisch veld praktisch nul is. Door de druk uitgeoefend door de interplanetaire plasmastroom wordt het gedeelte van de magnetosfeer aan de loefzijde samengedrukt. Hierdoor neemt het geomagnetisch veld minder sterk af dan theoretisch voorzien. Blijkbaar zijn alle waarnemingen hiermee

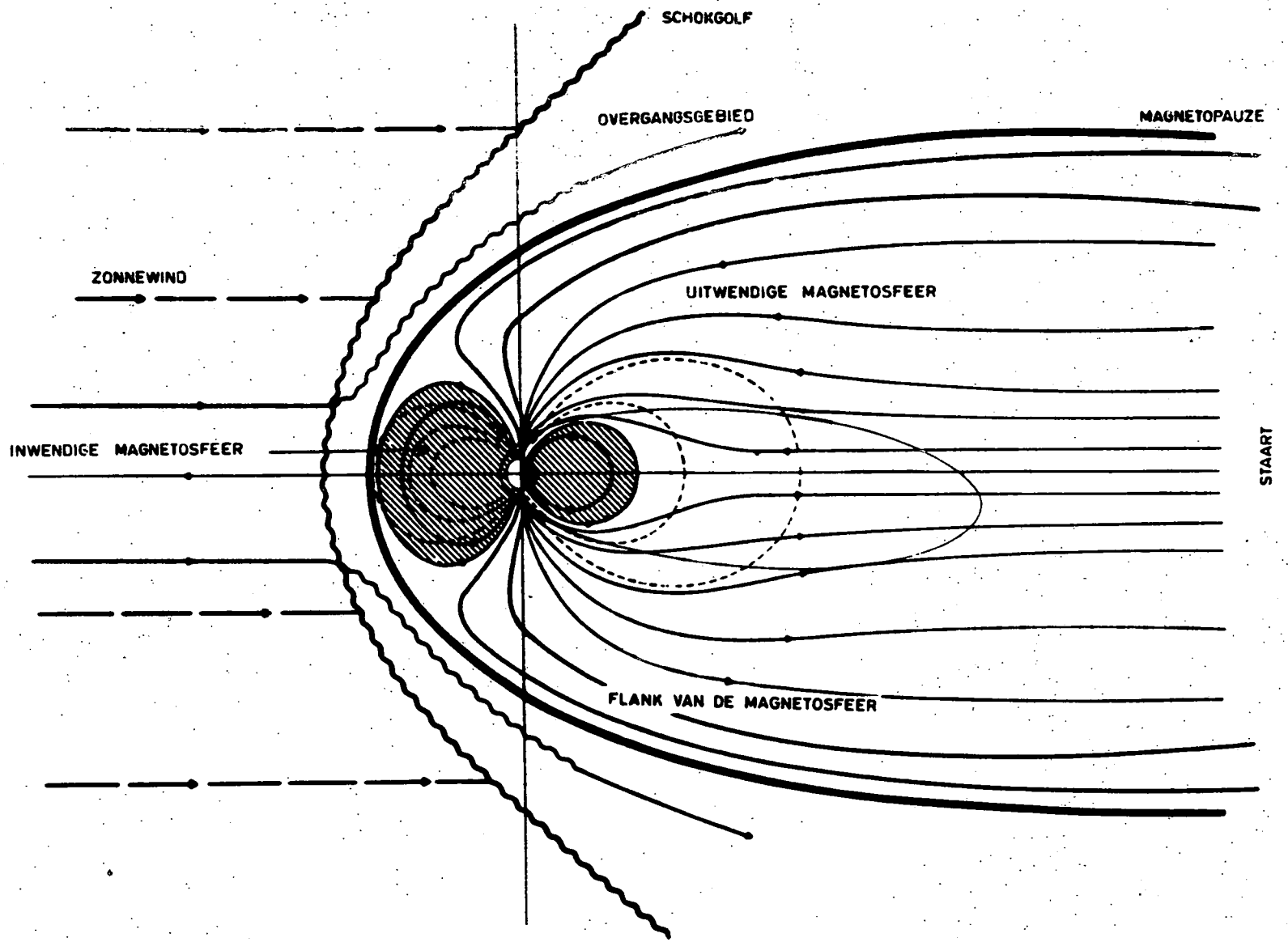


Fig. 5.- Model van de magnetosfeer volgens Dessler met aanduiding der verschillende gebieden. (Meridiaandoorsnede).

in overeenstemming. Het feit is bijzonder goed merkbaar op fig. 2, waar de stippellijn in het F diagram het verloop der veldsterkte voorstelt van een volmaakte magnetische dipool. Op fig. 5 bemerkt men dat langs de luwzijde de magnetosfeer verlengd is en krachtlijnen bevat welke van de loefzijde afkomstig zijn. Deze hebben hun basis op de magnetische breedten waar normaal noorderlicht optreedt. Men neemt aan dat de krachtlijnen, welke binnen de aangeduide donkere gebieden liggen, meedraaien met de aarde, terwijl de overige een plaatselijke werveling zouden vertonen.

Het binnenste gebied, dat zowat de vorm heeft van een appelbeignet, noemt men wel eens inwendige magnetosfeer. Zij bevat in het bijzonder de bekende stralingsgordels van Van Allen. Het overige gebied wordt de uitwendige magnetosfeer genoemd.

Het in fig. 6 voorgestelde model van Harrison[16] is er een van het gesloten type. Rekening gehouden met de afmetingen der aarde, de sterkte van het geomagnetisch dipoolveld, de snelheid van de zonnewind evenals de sterkte van het interplanetair magnetisch veld moest het staarteinde van de magnetosfeer zowat op 3 000 aardstralen gelegen zijn. Men had gehoopt dit gebied te kunnen bestuderen met Mariner 4. Jammer genoeg heeft geen enkel instrument aan boord van deze satelliet ook maar enige aanwijzing gegeven welke op het bestaan van dit gesloten staarteinde zou wijzen. Op de vermoede plaats kon de magnetometer aan boord van Mariner 4 geen enkele storing in het interplanetair magnetisch veld registreren.

Alhoewel men uit deze enkele waarneming geen definitief besluit kan trekken - er zijn immers talrijke oorzaken welke het ontbreken van de magnetopauze op die plaats kunnen verklaren - zou dit er kunnen op wijzen, dat men te doen heeft met een magnetosfeer van de zgn. open type zoals zij opgevat wordt door Dungey[20] en voorgesteld door fig. 7. Men ziet in, dat in dit geval de polaire kracht-

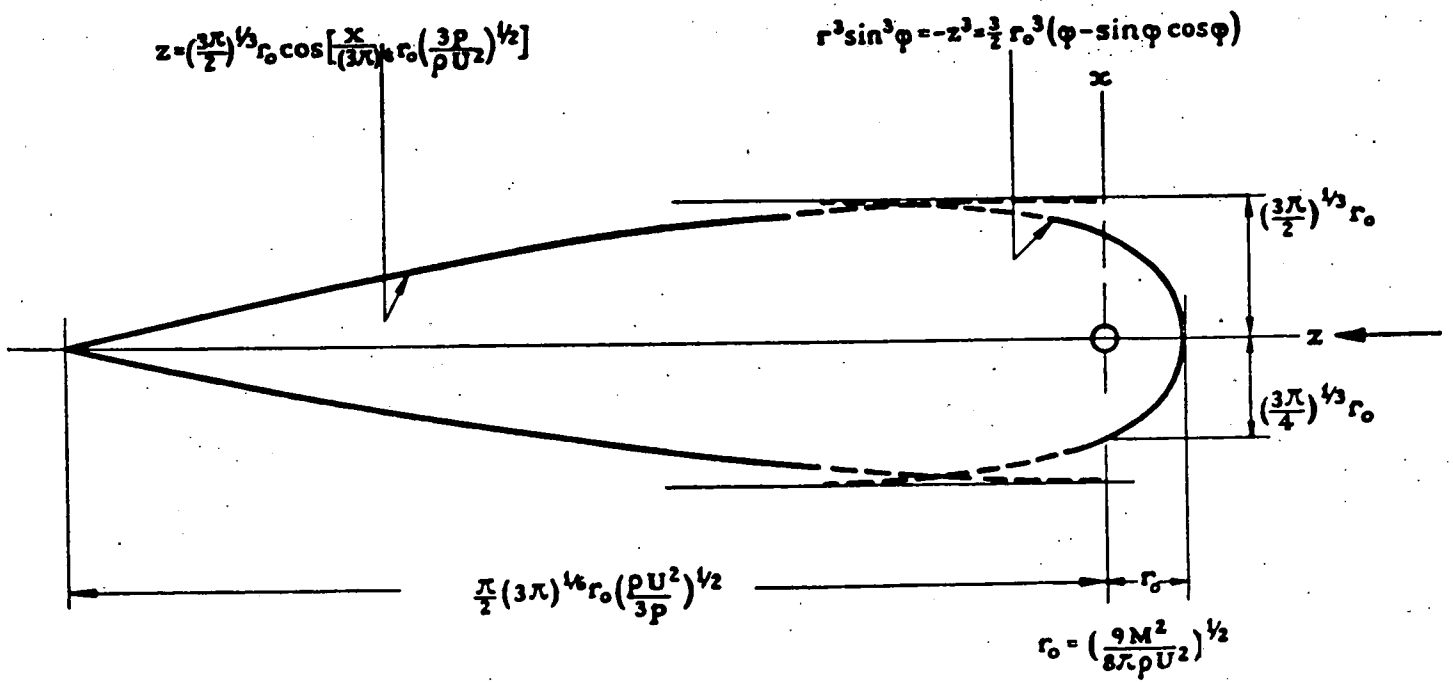


Fig. 6.- Model van een gesloten magnetosfeer volgens Harrison (evenaarsdoorsnede).

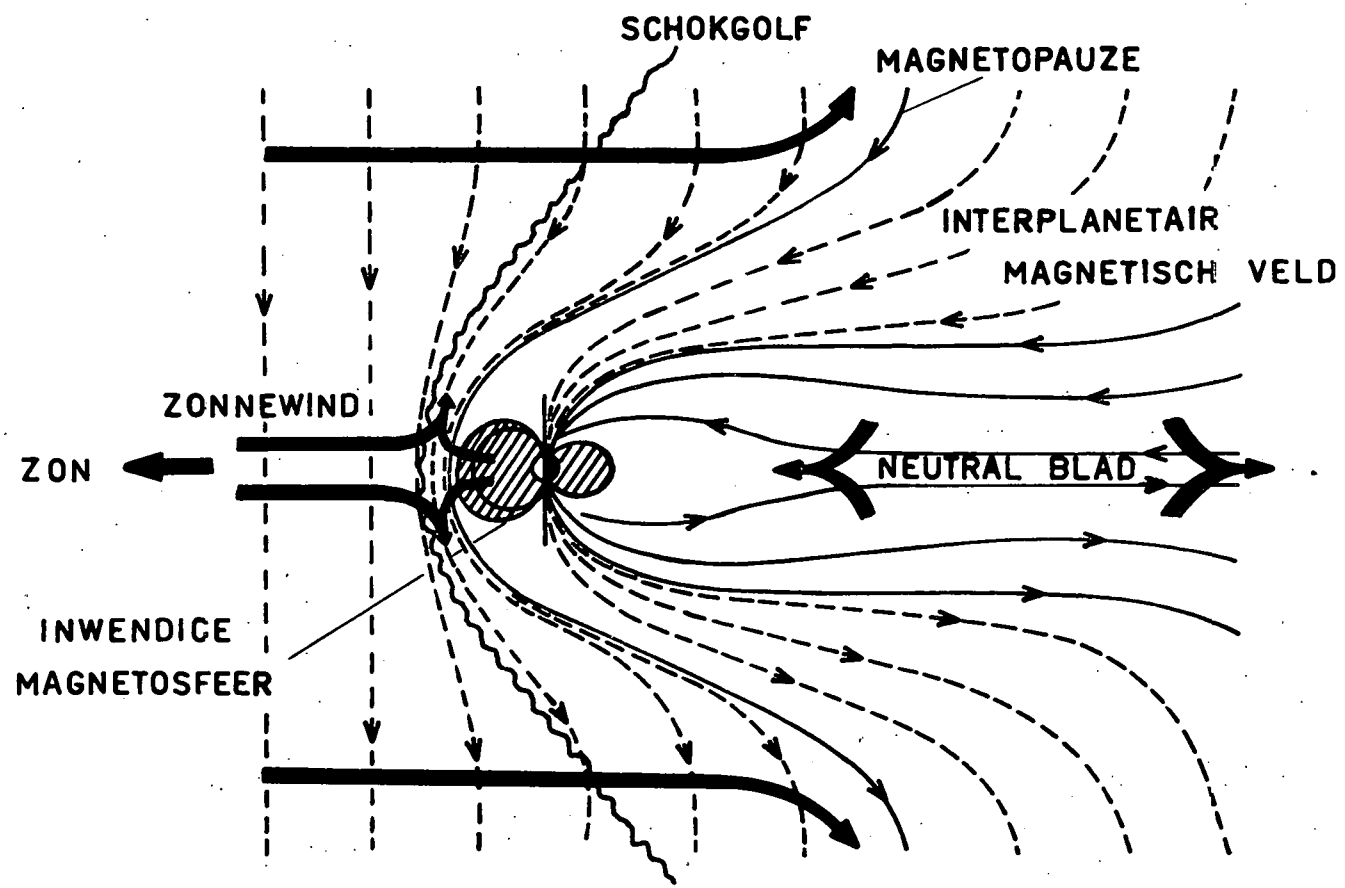


Fig. 7.- Model van open magnetosfeer volgens Dungey (Meridiaandoorsnede).

lijnen rechtstreeks gekoppeld worden aan deze van het interplanetair magnetisch veld. De begrenzing van de inwendige magnetosfeer aan de luwzijde van deze laatste vormt dan een pseudo-magnetopauze. Welke ook de vorm van de magnetosfeer mag zijn, zij is een hindernis voor de supersonische plasmastroom der zon. Het gevolg hiervan is dat aan de loefzijde van de magnetosfeer een schokgolf gevormd wordt.

Het is deze laatste welke door I.M.P.1 waargenomen werd op nagenoeg 19,7 aardstralen en door Mariner-4 op 36 aardstralen langs de luwzijde. De relatieveligging van deze gebieden is weergegeven in fig. 8, welke de bevindingen weergeeft afkomstig van I.M.P.1. Tussen deze schokgolf en de magnetopauze blijkt er zich een thermisch plasma te bevinden. De energie der zich aldaar bevindende deeltjes is van de orde van 1 keV[21]. Tevens vindt men er een twintig maal hogere electronenconcentratie dan vóór de schokgolf[22].

4.- Samenstelling der magnetosfeer

Uit de definitie van de magnetosfeer volgt, dat zij voornamelijk gevuld is met geladen deeltjes die onderworpen zijn aan de actie van het geomagnetisch veld. Deze geladen deeltjes zijn hoofdzakelijk elektronen en positieve ionen. Men onderstelt dat deze laatste voornamelijk protonen zijn, maar men kent geenszins de samenstelling van de ionenstroom. In de inwendige magnetosfeer zijn deze laatste gevangen in de zogenaamde stralingsgordels. Men onderscheidt twee soorten : een protonengordel en een elektronengordel welke beide nagenoeg dezelfde ruimte in beslag nemen : de inwendige magnetosfeer. Maakt men verder een onderscheid tussen energiearme en energierijke deeltjes, dan stelt men vast, dat iedere gordel twee maxima gaat vertonen waardoor men van binnenste en buitenste zones spreekt. De binnenste protonengordel en de buitenste elektronengordel staan bekend als de Van Allen gordels. Beide bestaan uit energierijke deeltjes.

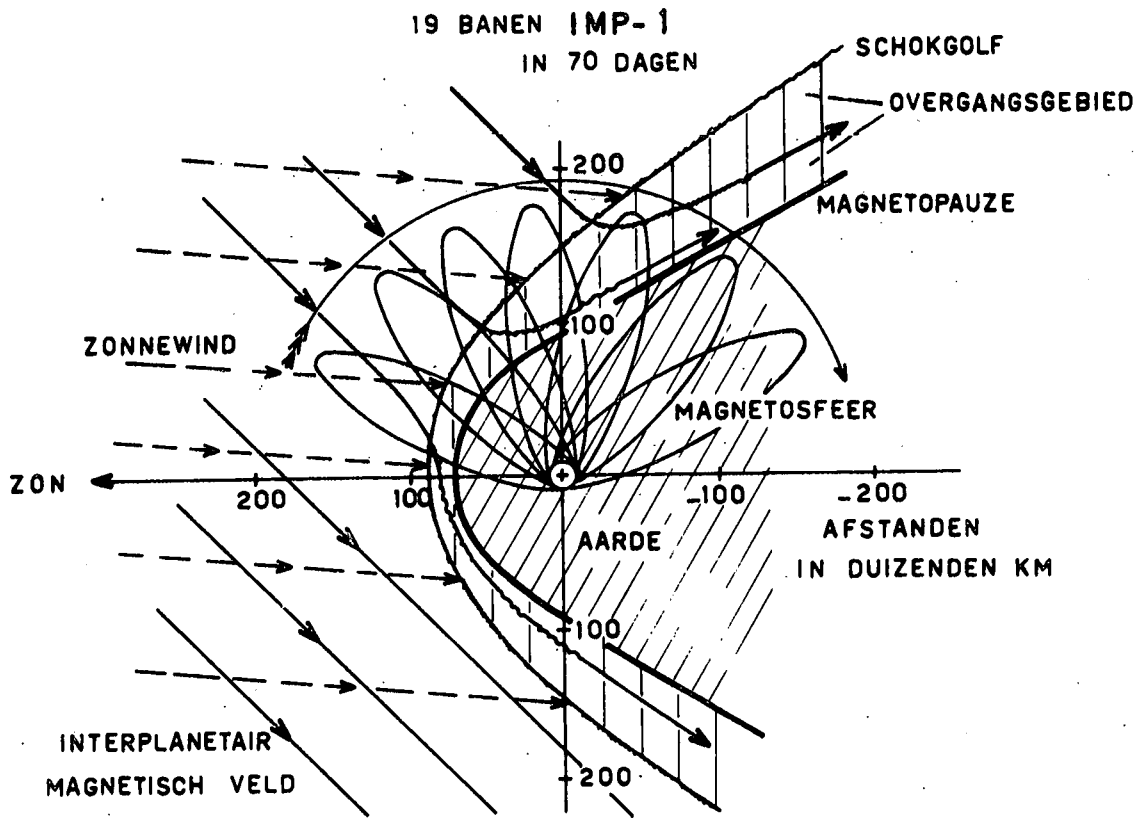


Fig. 8.- De onmiddellijkenabijheid der aarde volgens de bevindingen van de satelliet IMP 1 (Meridiaandoorsnede).

De energierijke protonen (> 40 MeV) hebben een maximum op nagenoeg 1,4 aardstralen van het middelpunt der aarde gelegen en de energiearme protonen (≈ 100 keV) hebben hun maximum op nagenoeg 3,5 aardstralen. Hiermee stemt ook het maximum voor alle elektronen overeen terwijl de energierijke elektronen (> 1 MeV) nog een tweede maximum gaan vertonen op 1,4 aardstralen. Deze deeltjes bewegen zich in een medium van zeer wisselvallige samenstelling[15]. Besteden we hieraan wat meer aandacht.

De basis van de magnetosfeer valt zowat samen met de overgang van de homosfeer naar de heterosfeer. Waar de eerste een samenstelling heeft die nagenoeg overeenstemt met deze welke wij inademen, wordt de tweede gekenmerkt door de aanwezigheid van gedissocieerde zuurstof. Het voornaamste kenmerk van de heterosfeer is, dat de diffusie van de samenstellende gassen gebeurt onder invloed van het zwaarteveld. In de lagere regionen der heterosfeer blijkt de stikstofconcentratie echter nog altijd deze van de atomaire zuurstof te overtreffen.

Hoger in de heterosfeer overtreft deze laatste echter wel deze van de neutrale stikstof terwijl men vanaf 750 km moet rekening houden met de aanwezigheid van helium welke het hoofdbestanddeel gaat vormen op 1 500 km hoogte. Nadien, op 3 000 km hoogte begint de atomaire waterstof een belangrijke rol te spelen en gaat overwegen in de protonosfeer , waarmee aangeduid wordt, dat de waterstofionen het hoofdbestanddeel van deze lagen vormen.

Deze atomaire waterstof ontmoet men al aan de benedengrens van de magnetosfeer doch slechts in verwaarloosbare hoeveelheden. Op 2 000 km hoogte ontmoet men geen moleculaire stikstof meer. Hoger dan 3 000 km is de aanwezigheid van zuurstof niet meer aan te tonen. Het is echter van belang te weten, dat de verdeling der verscheidene gassen over de verschillende hoogten niet constant is, maar afhankelijk van de heersende temperatuur. Deze wordt in sterke mate beïnvloed door de zonne-

activiteit. Vandaar dat het profiel van de aardse dampkring een ander uitzicht zal vertonen tijdens een periode van weinig zonne-activiteit en tijdens een actieve periode. De diagrams van fig. 9 en 10[25] tonen dit aan voor de relatieve verdeling der voornaamste bestanddelen van de atmosfeer. Een analoog verschil, maar minder sterk uitgesproken, stelt men vast wanneer men een vergelijking maakt van de samenstelling tijdens plaatselijke middag of middernacht.

We kunnen deze paragraaf niet besluiten zonder een woord te reppen over de cosmische stralen welke voortdurend de magnetosfeer binnendringen. De cosmische straling is er een van corpusculaire aard, bestaande uit ionen welke een zulkdanige hoge snelheid bezitten dat de ralativiteitsleer op hen toepasselijk is. De lichtste kernen vormen de meerderheid : waterstof, helium, koolstof en zuurstof met een overgrote meerderheid van de eerste. Hun snelheid is zodanig groot dat praktisch alleen maar het magnetisch veld in de nabijheid van de polen sterk genoeg is om de cosmische deeltjes te precipiteren in de homosfeer. Deze cosmische stralen bombarderen de atmosferische zuurstof- en stikstofatomen waardoor neutronen vrijkomen. Volgens Lenchek en Singer[26] zou het verval van deze neutronen aanleiding geven tot de protonen van de binnenste gordel. De recente waarnemingen van Freden et al[28] hebben echter aangetoond dat de albedo-theorie zoniet onhoudbaar, dan toch niet het enige mechanisme is dat de aanwezigheid der protonen in de binnenste stralingszone kan verklaren. Het bestaan der energierijke deeltjes moet volgens de laatste inzichten meer gezocht worden in dynamische processen in de magnetosfeer ; waarvan we in volgende paragraaf alleen het kinematisch aspekt zullen bestuderen. Elektronenprofielen kunnen met succes bestudeerd worden door middel van "fluiters". Deze ontstaan doordat de voortplantingssnelheid van het geluid veroorzaakt bij een bliksem afhankelijk is zowel van de densiteit der luchtlagen als van de frekwentie.

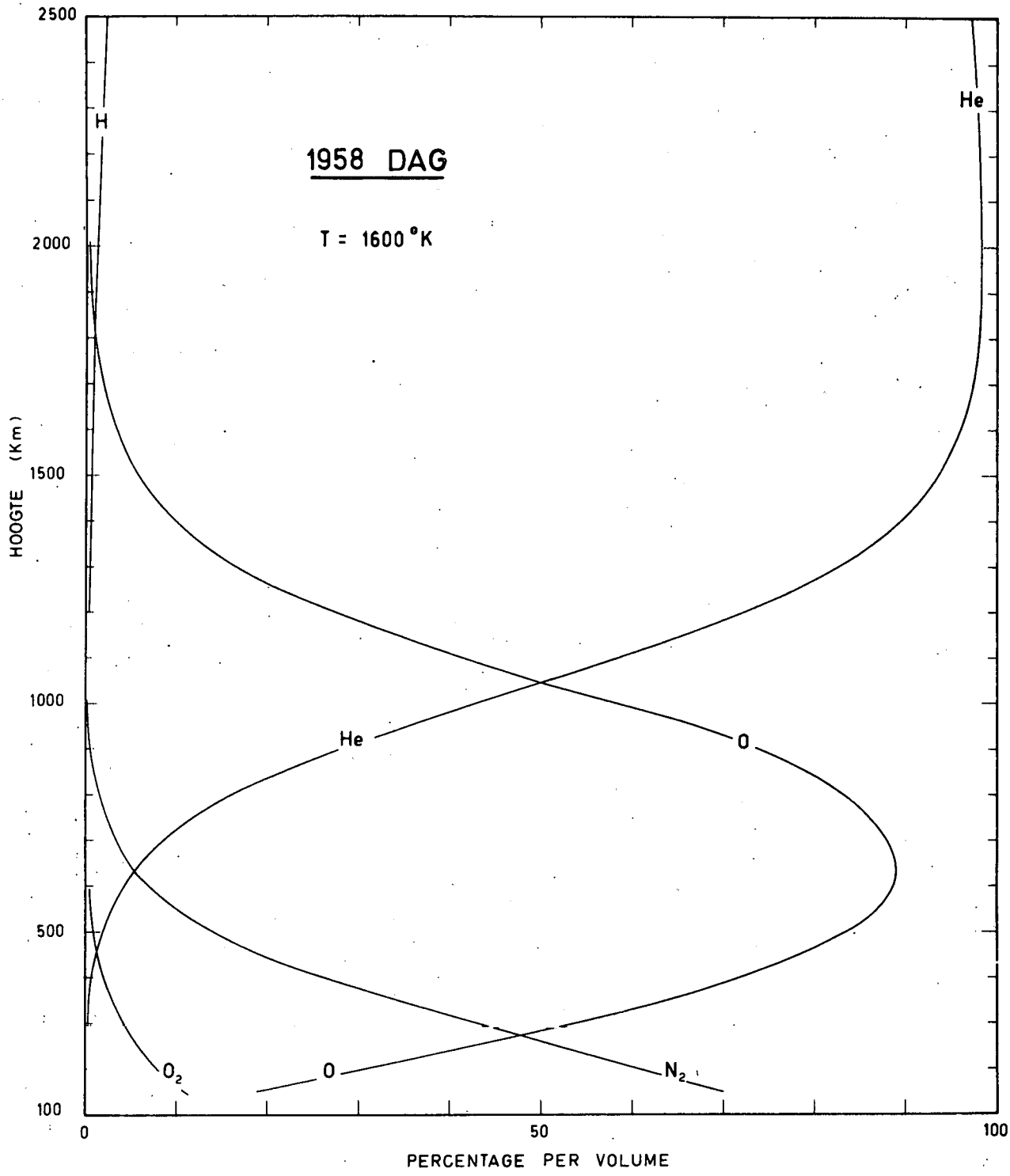


Fig. 9.- Relatieve verticale verdeling der atmosferische bestanddelen zoals ze overdag voorkomen tijdens een actieve-zonneperiode.

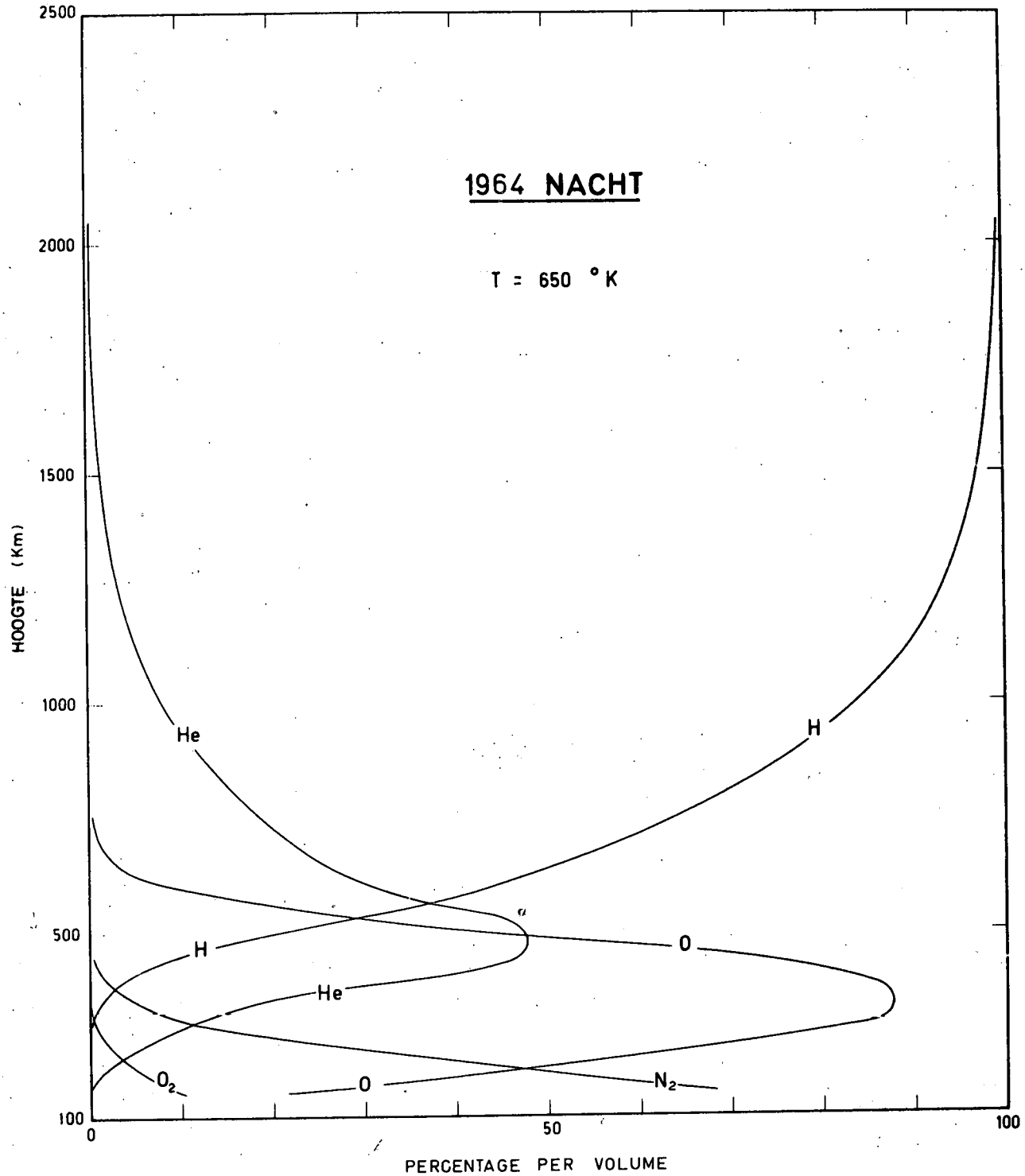


Fig. 10.- Relatieve verticale verdeling der atmosferische bestanddelen zoals ze 's nachts voorkomen tijdens een kalme zonneperiode.

5.- Kinematika van de magnetosfeer

1. De studie van de bewegingen en stromingen welke in de magnetosfeer gebeuren wordt ten zeerste bemoeilijkt wegens het uitgebreid energiespectrum van de deeltjes die er zich in verplaatsen. In hoofdzaak is echter de volgende stelling der magnetohydrodynamica van toepassing [19] :

"Wanneer een stroom geïoniseerde deeltjes op een bepaald ogenblik begrensd wordt door een magnetische buis, zal hij op ieder later tijdstip begrensd worden door een magnetische buis met dezelfde flux".

De gevolgen hiervan werden voor het eerst ingezien door Gold[14] en worden verduidelijkt door fig. 11 welke aan zijn werk ontleend is.

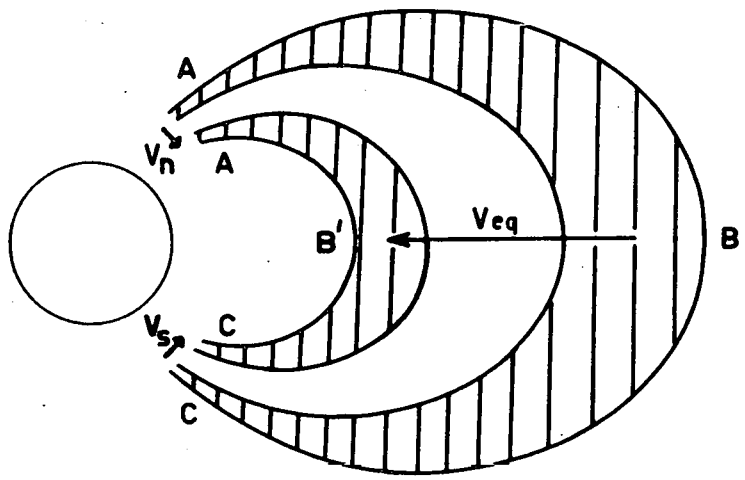


Fig. 11.- Convectiebewegingen in de magnetosfeer volgens Gold.

Beschouw de magnetische buis ABC welke aan de evenaar met een snelheid Veq naar de aarde toegedreven wordt. De beweging wordt in veranderlijke mate meegedeeld aan de verschillende onderdelen van de magnetische buis, zodanig, dat haar loodrechte doorsnede aangepast wordt opdat de flux die er doorheen gaat steeds constant blijft. Hierbij dient aangestipt te worden dat het geomagnetisch veld afneemt met de derde macht van de equatoriale afstand. De gevolgen van deze inwaartse beweging zijn :

1º een verhoging der energie van de gevangen ionen.
2º een verplaatsing van de voet van de magnetische buis naar lagere breedten.
3º Een verlaging van het keerpunt voor de ionen, gevangen in de stralingsgordels.

In de stralingsgordels spiraleren de ionen heen en weer van het zuidelijk naar het noordelijk halfrond langs de magnetische krachtlijnen. Het punt waar de bewegingszin omgekeerd wordt is het keerpunt. Wordt dit verlaagd, dan betekent dit, dat de ionen in de dichtere atmosferische lagen kunnen doordringen en aldaar ionisatieverschijnselen veroorzaken zoals het noorderlicht. Pulsatieverschijnselen die een effect hebben zoals door Gold voorgesteld, werden verscheidene malen door de kunstmatige satellieten waargenomen, wanneer ze op hun baan achtereenvolgende wijzigingen van de magnetopauze registreerden.

2. Buiten deze magnetohydrodynamische pulsaties voert de inwendige magnetosfeer een draaiende beweging uit. Men neemt aan dat door viscositeit de thermische ionen in beweging gebracht worden door de draaiende aarde. Zij zouden zich nagenoeg evenwijdig met de breedtecirkels bewegen.

Tengevolge van deze rotatie ontstaat een elektrisch veld. Inderdaad, ieder ion, gelegen op een afstand r van de as der aarde,

bezit een lineaire snelheid gelijk aan

$$\bar{v} = \bar{\omega} \times \bar{r}$$

wanneer ω de hoeksnelheid is. Tengevolge van zijn elektrische lading ondervindt het ion een Lorentzkracht.

$$\bar{F} = \bar{e} \; \frac{\bar{\omega} \times \bar{r}}{c} \times \bar{B}$$

waarin e de lading van het ion

c de snelheid van het licht

B de magnetische veldstrekte.

Door analoge redenering ziet men in, dat een elektron een kracht $-\bar{F}$ ondergaat waardoor de elektronen ten opzichte van de ionen verplaatst worden waardoor een elektrisch veld onstaat. Een stationaire toestand zal maar bereikt worden indien de elektrische en mechanische krachten op de geladen deeltjes mekaar wederzijds opheffen. In dit geval wordt het elektrisch veld

$$\bar{E} = - \frac{\bar{\omega} \times \bar{r}}{c} \times \bar{B}$$

Het blijkt nu dat de banen van de ionen equipotentiaallijnen zijn van het veld. Men kan aantonen,[17] dat in een magnetisch dipoolveld het potentiaalverschil V tussen de evenaar en de breedte λ gevonden wordt door de formule

$$V = \frac{\omega R^2 B_o}{2} (\cos^2 \lambda - 1)$$

waarin R de aardstraal aan de evenaar in cm.

B_o de veldstrekte van het geomagnetisch veld aan de polen, in casu 0,6 gauss.

V, uitgedrukt in elektrostatische eenheden, bedraagt ongeveer 90 kilo Volt tussen de polen en de evenaar[17].

Een schematische voorstelling van een dergelijk stroomsysteem is voorgesteld in fig. 12a.

3. Buiten hogervermelde bewegingen welke men uit zuiver analytische gronden kan afleiden bestaan er deze welke door de zonnewind veroorzaakt worden. Men neemt aan, dat de zonnewind langs de magnetosfeer strijkt en langs achteren in deze laatste binnendringt, aldus een convectie systeem vormend waarvan fig. 12b een projectie weergeeft aan de benedengrens van de magnetosfeer. Zij vormen een beeld van het stroomsysteem bij een gematigde magnetische storm. Hierbij stelt het middelpunt van de cirkel de noordpool voor terwijl de rechte lijn de projectie is van het meridiaanvlak van Greenwich.

De nulmeridiaan in 't bijzonder is aan de bovenkant gelegen. Ook de hier voorgestelde lijnen zijn equipotentiaallijnen van het geïnduceerd elektrostatisch veld. Het convectie- en het rotatiepatroon kunnen samengevoegd worden en vormen dan het meer ingewikkeld systeem van fig. 12c. Het aldaar voorgestelde beeld stemt in grote trekken overeen met het in werkelijkheid waargenomen patroon. Bij sterke stormen kan fig. 12b vervormd worden tot beelden zoals fig. 13 en welke voor het eerst door Oguti[23] gepostuleerd werden.

4. Een ander voorkomend type van beweging is de zgn. driftbeweging. Deze laatste is een gemiddelde verplaatsing der gevangen geladen deeltjes der magnetosfeer loodrecht t.o.v. de magnetische krachtlijnen. Deze bewegingen worden veroorzaakt door het bestaan van gravitatiekrachten, gradiënten in het geomagnetisch veld en de kromming van de krachtlijnen van dit laatste.

Ten slotte dient er nog op gewezen te worden dat de meeste der beschreven bewegingen gepaard gaan met elektrische stromen waarvan de intensiteit tienduizenden ampères kan bedragen en in bepaalde omstandigheden van grote zonneactiviteit stijgt tot 10^7 ampères.

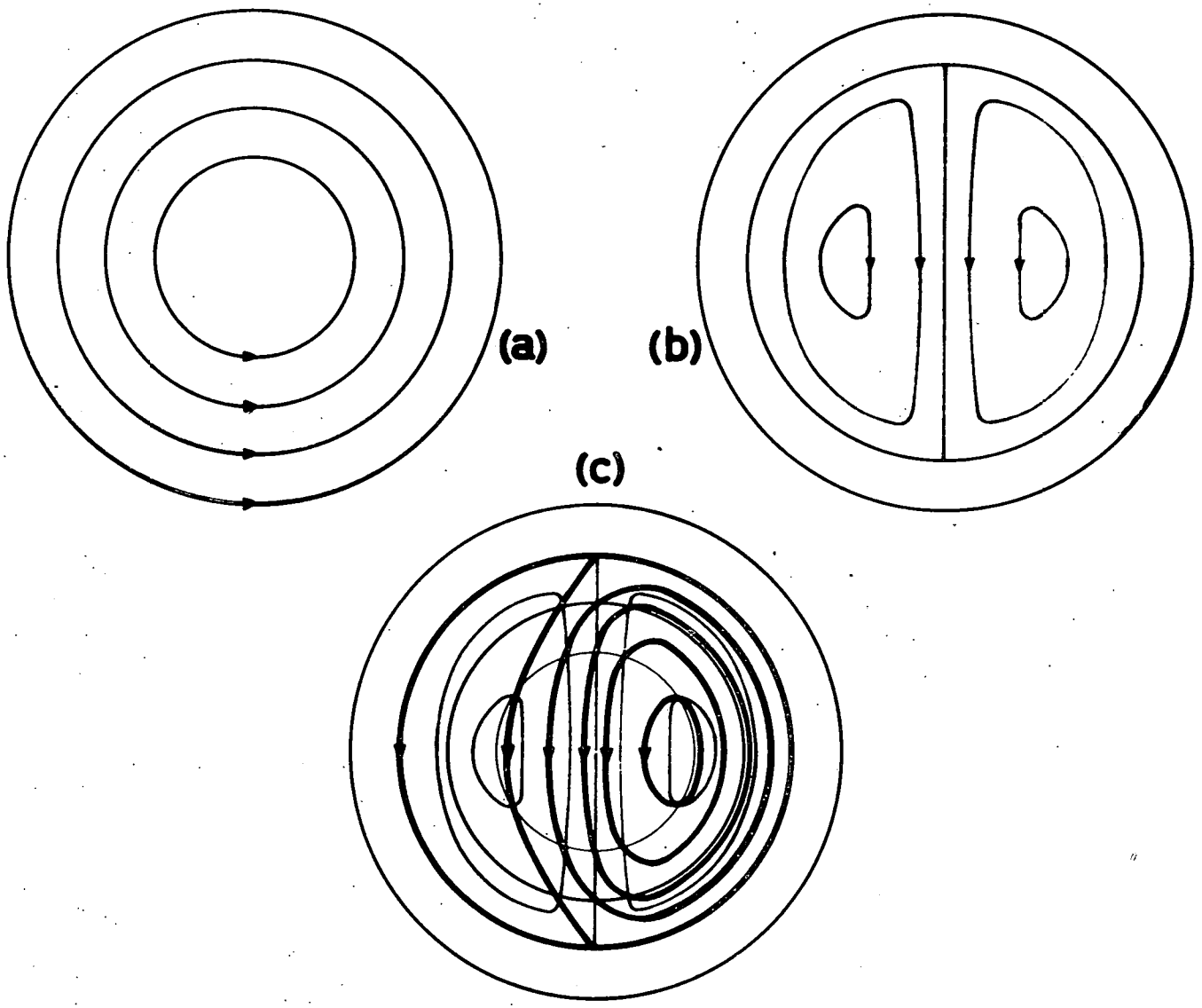
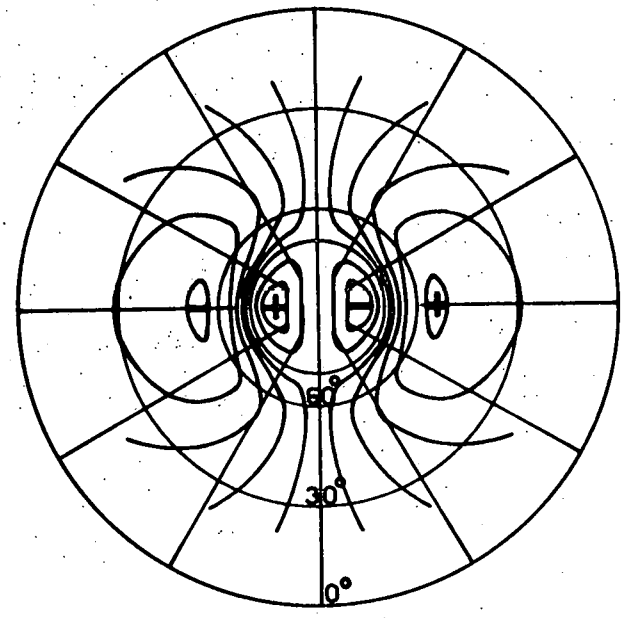
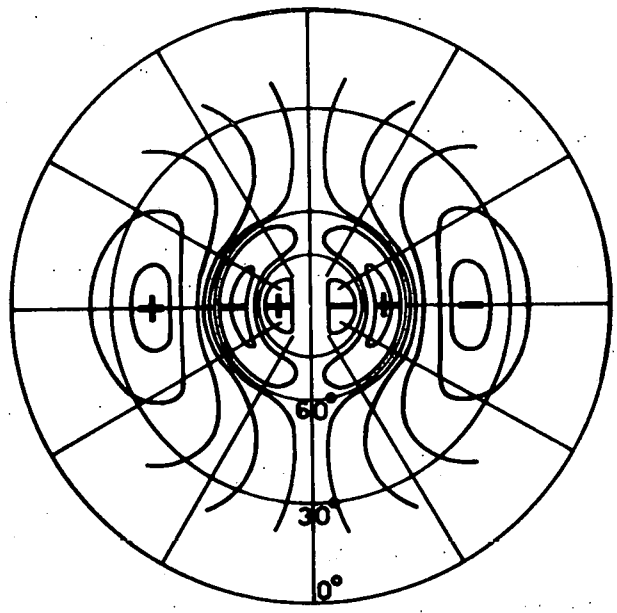


Fig. 12.- Stroomlijnen van twee quasi-stationaire hydromagnetische systemen.
a. zuiver-rotatiepatroon.
b. convectie-patroon
c. resulterend patroon.



ZONNEWIND



ZONNEWIND

Fig. 13.- Stormpatronen voor het noordelijk halfrond, naar de berekeningen van T. Oguti.

De meeste elektrische stromen behoren tot het type van de Hall-stromen (I_H). Dit is een stroom gelegen in een vlak loodrecht op de richting van de magnetische-veldvector $\bar{B}$ en tevens ook loodrecht op de componente $E_\perp$ van de elektrische-veldsterkte $\bar{E}$.

Een voorstelling van de ligging dezer vectoren is in fig. 14 weergegeven.

Aangezien de Hall-stromen hoofdzakelijk gedragen worden door elektronen is de zin der elektrische stromen nagenoeg tegengesteld aan de zin der convectie in fig. 12 en 13. Wegens het bestaan van andere stroomtypes zoals de Pedersen-stroom I_p (zie fig. 14) zijn deze convectielijnen echter niet volledig te identifiëren met elektrische stroomlijnen. Al deze stromingen zijn van belang om de magnetische storingen te verklaren welke aan het aardoppervlak geregistreerd worden.

6.- Epiloog

In het voorgaande werd gepoogd een beeld op te hangen van de aardse magnetosfeer, haar oorsprong, haar samenstelling en de stromingen welke er in plaats grijpen.

Er moet echter de sterke nadruk op gelegd worden dat deze laatsten louter speculatief zijn en dat men nog over geen enkele waarneming beschikt waarmee rechtstreeks, en op ondubbelzinnige wijze, ook maar één enkel dezer stromingen kon aangetoond worden[19]. Alleen over het bestaan van de magnetosfeer en haar uitstraling tot op nagenoeg 10 aardstralen langs de loefzijde van de aarde heeft men zekerheid. Dit toont ten overvloede aan welk een ontzaglijk werkterrein hier nog braak ligt.

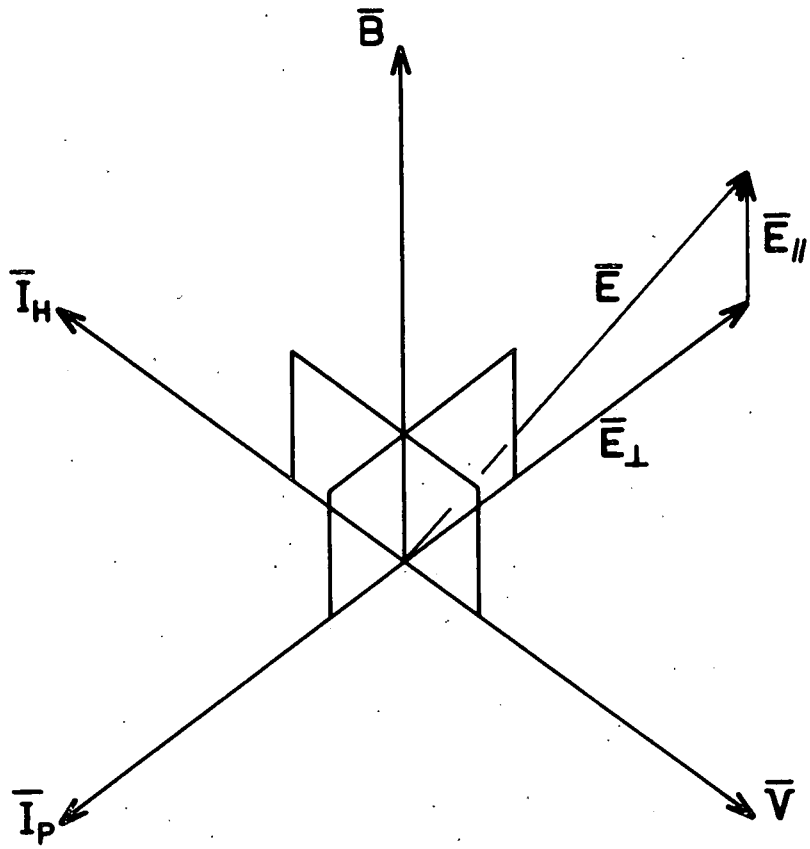


Fig. 14.- Relatieve ligging der elektrische ($\bar{E}$) en magnetische velden ($\bar{B}$) met de zin van de Hall- (I_H) en Pedersen-stromen (I_p).

BIBLIOGRAFIE

[1] LEQUEUX, J., La Nature - Paris, 3354, 369, 1964.

[2] BIERMANN, Zeit. Astrophys., 29, 19, 1951.

[3] WURM, K., Mitt. Sternw. Hamburg-Bergedorf, 8, n° 51, 1943

[4] PARKER, E.N., Astrophys. J., 128, 664, 1958

[5] CHAPMAN, S., FERRARO, V.C., Terr. Magn. Atm. Electr., 77, 171, 1931.

[6] FORBUSH, S.E., Terr. Magn. Atm. Electr., 42, 1, 1937

[7] PARKER, E.N., Interplanetary Dynamical Processes, New York, 1963, Interscience Publishers.

[8] SHKLOVSKII, I.S., MOROZ, V.I. and KURT, V.G., Astronom. Zh., 37, 931, 1960.

[9] BRIDGE, H. et AL., J. Phys. Soc. Japan, 17, A-II, 553, 1962.

[10] COLEMAN et al., Phys. Rev. Letters, 5, 43, 1960.
GREENSTADT, E.W., te verschijnen in J. Geophys. Res.

[11] NEUGEBAUER, M. and SNYDER, C.W., Science, 138, 1095, 1962.

[12] NESS, N.F. et al., J. Geophys. Res., 69, 3531, 1964.

[13] SMITH, E.J. et al., Space World, Vol. B 7-21, 8, July 1965.

[14] GOLD, T., J. Geophys. Res., 64, 1219, 1959.

[15] NICOLET, M., Geophysics, New York, 1963, Gordon and Breach, p. 201.

[16] HARRISON, E.R., Geophys. J. Roy. Astronom. Soc., 6, 479, 1963.

[17] DESSLER, A.J. and MICHEL, F.C., Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field, nog te verschijnen.

[18] NESS, N.F. and WILCOX, J.M., Phys. Rev. Letters, 13, 461, 1964

[19] HINES, C.O., Sp. Sci. Rev., 3, 342, 1964.

[20] DUNGEY, J.W., Phys. Rev. Letters, 6, 47, 1961.

[21] OBAYASHI, T., Rep. Ionos. Sp. Res. Japan, 18, 228, 1964.

[22] Space World, Vol. B 7-21, 39, July 1965.

[23] OGUTI, T., Rep. Ionos. Sp. Res. Japan, 18, 109, 1964.

[24] DESSLER, A.J., J. Geophys. Res. , 69, 3913, 1964.

[25] KOCKARTS, G., Ann. Géophys. Paris, 22, 1966.

[26] LENCHEK, A.M. and SINGER, S.F., Planet. Sp. Sci., 11, 1151,1963.

[27] SONETT, C.P. et al.: Space Res. I, 921, 1960.

[28] FREDEN, S.C., J. Geophys. Res., 70, 3111, 1965.