

Roentgenstraling in de poolstreken

E. Aerts

1. Inleiding

Veel lezers zijn vertrouwd met het begrip noorderlicht alhoewel de benaming poollicht beter gepast is aangezien deze lichtverschijnselen zich openbaren nabij de beide polen. Dit poollicht, dat met het blote oog waarneembaar is, ontstaat doordat molekulen van de lucht uit hun normale toestand in een energetisch verstoorde toestand gebracht werden ten gevolge van een korpusculaire neerslag. Over de oorsprong van deze laatste is men het verre van eens. Geen enkele waarneming heeft tot nu toe ondubbelzinnig de herkomst ervan kunnen aantonen, ondanks de talrijke proefnemingen aan boord van ballons, raketten en satellieten. Dit zal blijken uit het verdere verloop van deze uiteenzetting. Eerst zal echter een welbepaald gevolg worden behandeld van de korpusculaire neerslag, namelijk de roentgenstraling die ontstaat bij het afbuigen van elektronen in het elektrisch veld van de kernen der atmosferische deeltjes. Ter verduidelij-

king van de tekst is het evenwel wenselijk vooreerst vertrouwd te worden met de aardse magnetosfeer.

2. Begrippen in verband met de aardse magnetosfeer

2.1. De magnetosfeer

De magnetosfeer is een gebied van de dampkring waarin energierijke, elektrisch geladen deeltjes onderworpen zijn aan het magnetisch veld van de aarde. Een belangrijke bijdrage over dit gebied door L. de Feiter verscheen reeds in Hemel en Dampkring in 1965. In verband met dit overzicht zijn hieraan nog enkele begrippen toe te voegen. Vooreerst vestig ik er de aandacht op dat het niet begrensd is door concentrische sferen zoals zijn naam doet vermoeden. Het is veeleer een gebied dat gekenmerkt is door de aard van zijn bevolking, nl. energierijke, elektrisch geladen deeltjes. Als dusdanig doorboort het, of valt het gedeeltelijk samen, met andere atmosferische gebieden die evenzeer gekenmerkt worden door de aard van hun bevolking, zoals de ionosfeer, de heliumgordel, enz. De magnetosfeer is onderaan begrensd door de dichte lagen van de dampkring en dringt dus door tot de lagere gebieden van de ionosfeer. De buitenste grens is afhankelijk van de wisselende invloed van de zonne-

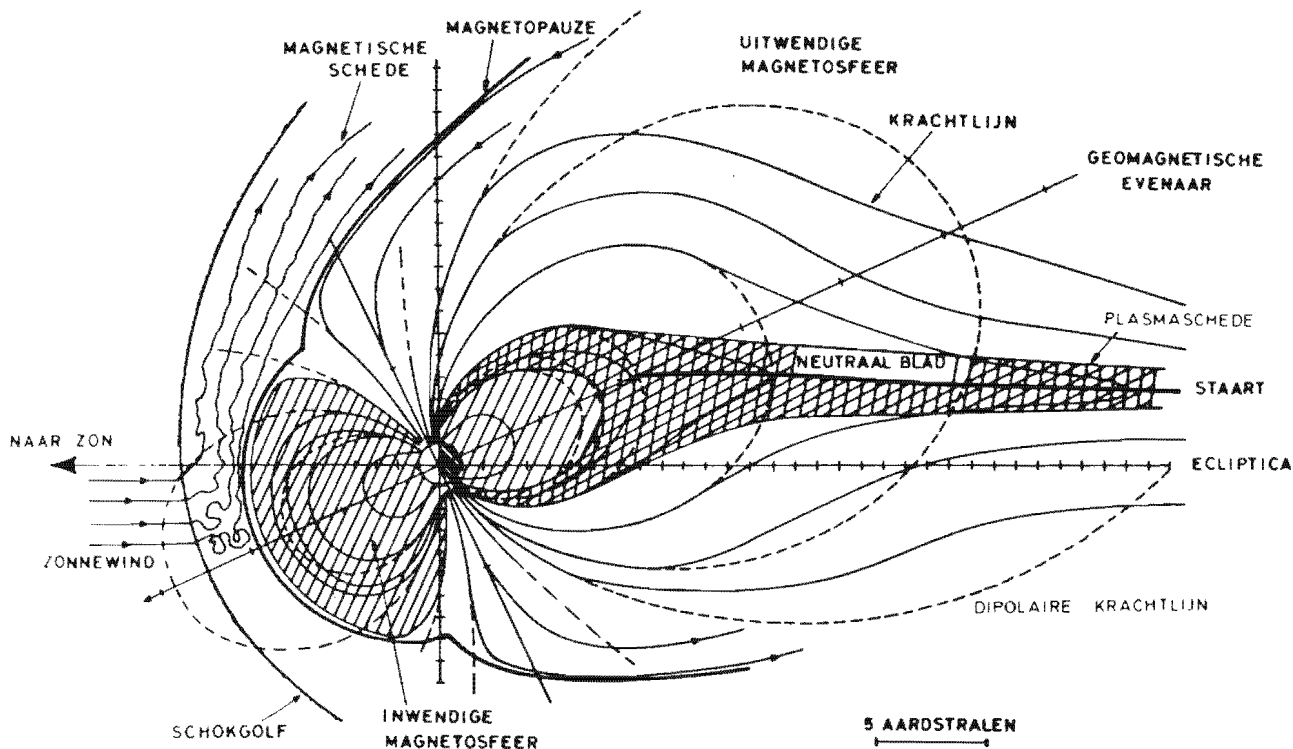


Fig. 1. Gebieden der aardse magnetosfeer.

wind op het magnetisch veld van de aarde. Lang voordat het verkend werd door satellieten bestonden er in de lage landen al vermoedens over het bestaan van dit gebied. Tegen het einde van de vorige eeuw maakte de belgische astronoom Houzeau zijn vermoedens bekend in het eerste nummer van 'Ciel et Terre' naar aanleiding van een studie over het zodiakaal licht terwijl de waarnemingen van de nederlandse hoogleraar Bruins in 1938 reeds tot conclusies leidden als die van Van Allen.

2.2. Gebieden in de magnetosfeer

Gezien de kenmerken van het aards magnetisch veld, de invloed van de zonnwind, de beweging en de aard der geladen deeltjes, kan men een aantal gebieden onderscheiden in de magnetosfeer (zie figuur 1). Men onderscheidt eerst de zgn. inwendige en de uitwendige magnetosfeer. De eerste is gekenmerkt door gesloten veldlijnen, de andere door open veldlijnen. Ten slotte is het geheel omgeven door een dun gebied dat men de magnetopause noemt en dat het best bepaald is aan de verlichte kant van de aarde. In de inwendige magnetosfeer onderscheidt men verder de stralingszones met gebonden en pseudogebonden deeltjes, in de uitwendige de poolgebieden, de plasmaschede en de staart. Inzicht in de beweging van elektrisch geladen deeltjes in het geomagnetisch veld is nodig om deze indeling te begrijpen.

2.3. De beweging van elektrisch geladen deeltjes in de magnetosfeer

In een magnetisch dipoolveld, zoals dat bij benadering heerst in de magnetosfeer, voeren elektrisch geladen deeltjes een beweging uit die kan worden ontbonden in

drie enkelvoudige bewegingen, die alle periodiek zijn.

- een cirkelbeweging om de veldlijnen
- een slingerbeweging langs de veldlijnen
- een driftbeweging om de dipoolas.

Deze bewegingen zijn schematisch voorgesteld in figuur 2. De periodes van deze drie soorten bewegingen zijn van verschillende grootte-orde. Voor de cirkelbeweging zijn ze van de orde van mikrosekondes tot millisekondes alnaargelang de kinetische energie van de deeltjes. Voor de slingerbeweging zijn ze van de orde van sekonden en decisekonden terwijl voor de driftbeweging rekening moet gehouden worden met periodes van minuten of uren.

Aan deze drie soorten bewegingen kan men adiabatische bewegingsinvarianten vastknopen, nl.

- het magnetisch moment μ gedefinieerd als

$$\mu = E_{\perp} / B$$

waarin E_{\perp} de energiecomponente is in een vlak loodrecht op de krachtlijn en B de plaatselijke magnetische veldsterkte.

- de totale hoeveelheid van beweging J langs een veldlijn

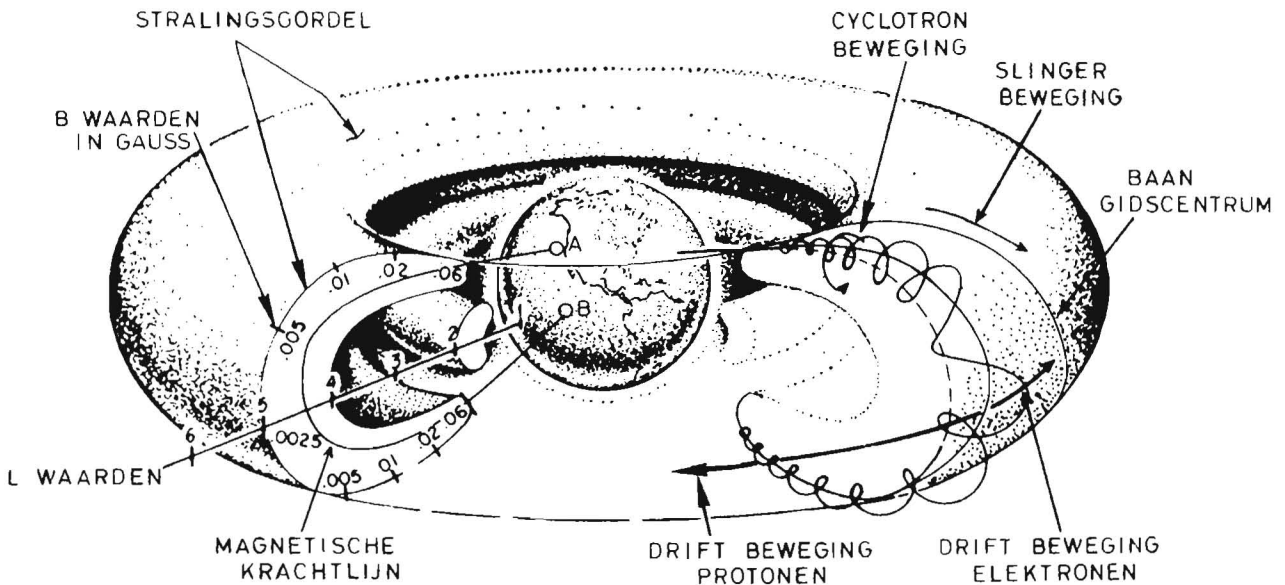
$$J = \int p_{\parallel} dl$$

waarbij over een gesloten weg langs een veldlijn geïntegreerd wordt.

- de totale flux Φ door het oppervlak S beschreven door het deeltje

$$\Phi = \int B dS$$

Fig. 2. Schematische voorstelling van de beweging van geladen deeltjes in de stralingsgordels; A en B zijn geomagnetisch verwante punten.



Deze *adiabatische* invarianten zijn evenwel geen bewegingsconstanten in de echte zin van het woord zoals b.v. de totale energie en het impulsmoment. Zij zijn het slechts op voorwaarde dat de beweging ongestoord verloopt of slechts zwakjes gestoord wordt. Dat betekent dat zij echte invarianten zijn in een *statisch* dipoolveld. In het *geomagnetisch* veld daarentegen zijn zij het slechts in eerste benadering. Zij kunnen op ieder ogenblik drastisch veranderen tengevolge van een plotselinge verandering van het magnetosferisch klimaat, zoals o.a. bij het optreden van een magnetische storm.

2.4. Keerpunten

De slingerbeweging langs een veldlijn vereist een nadere studie. Ze ontstaat omdat langs de krachtlijn het geomagnetisch veld een *gradiënt* (toe- of afname) vertoont, zoals blijkt uit hun convergentie. Schematisch kan dit voorgesteld worden zoals in figuur 3. Een deeltje dat spiralerend naar de polen snelt wordt afgeremd tengevolge van de Lorentzkracht veroorzaakt door de overlangse gradiënt. Er komt zo een ogenblik dat het praktisch een cirkel zal beschrijven in een vlak loodrecht op de krachtlijn om daarna een spiralerende beweging terug te gaan beschrijven. Even later, aan de antipode, zal hetzelfde verschijnsel zich herhalen. De punten op de veldlijn waar de bewegingszin omslaat zijn de keerpunten. Principieel moet deze beweging blijven voortduren, waarbij het deeltje tengevolge van zijn driftbeweging een ringvormig oppervlak gaat beschrijven waarin het gevangen blijft. Figuurlijk spreekt men van *gebonden* deeltjes omdat het net is alsof ze aan een bepaalde veldlijn verbonden zijn die met de driftsnelheid van het deeltje om de dipoolas wentelt. Toch ontsnappen er deeltjes aan hun gevangenis. Tijdens de overlangse beweging verandert de helling van de baan van het deeltje t.o.v. de krachtlijn voortdurend, om in het keerpunt de waarde 90° aan te nemen. Een elektron echter dat b.v. in het evenaarsvlak wentelt zal zich niet verplaatsen langs de veldlijn omdat zijn helling reeds 90° bedraagt. Kennelijk wordt de plaats van het keerpunt bepaald door de helling van de baan van het deeltje t.o.v. het evenaarsvlak. Anderzijds zal een deeltje waarvan de baan in de nabijheid van het evenaarsvlak samenvalt met de veldlijn deze laatste volgen om zodoende in de dichte dampkringlagen terecht te komen, waarin zijn beweging onomkeerbaar wordt. Opdat een deeltje dus net boven deze dichte lagen zou terugkeren moet de hellingshoek t.o.v. het evenaarsvlak een minimale waarde θ_0 bereiken. Alle deeltjes waarvan de hellingshoek θ kleiner is dan θ_0 zullen aldus in de dichte atmosfeer terechtkomen

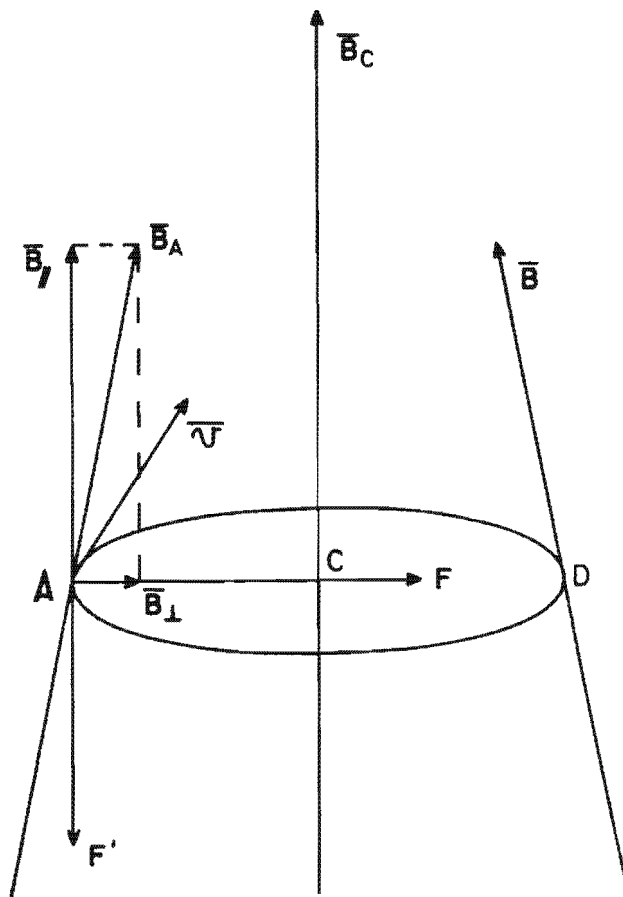


Fig. 3. Beweging van een proton, gelocaliseerd in A, in een convergerend magnetisch veld (de snelheidsvector v wordt loodrecht ondersteld op het vlak van de figuur.)

waaruit ze niet kunnen terugkeren. Men zegt dat zulke deeltjes precipiteren. Het meetkundig lichaam waarbinnen de banen van de precipiterende deeltjes lopen heet de precipitatiekegel.

2.5. Magnetosferische coördinaten

Vanaf het ogenblik dat de eerste deeltjesstromen in de stralingsgordels vastgesteld werden, stelde zich het vraagstuk de verdeling te bepalen van hun bestanddelen. Het bleek alras dat men tot geen steekhoudend inzicht kwam wanneer men dit volgens de klassieke manier deed d.w.z. in coördinaten waarvan de oorsprong gelegen was in het middelpunt van de aarde. McIlwain kwam op de gedachte de verdeling te bestuderen volgens de helling van de baan t.o.v. de veldlijn waaraan de deeltjes geacht werden verbonden te zijn. Om deze laatste te identificeren beschouwde hij het snijpunt met het evenaarsvlak waarbij hij de evenaarsstraal der aarde als maatstaf nam. De alzo gedefinieerde parameter stelde hij voor door L .

Aangezien anderzijds de hellingshoek in nauw verband staat met de keerpunten beschouwde hij als tweede parameter de magnetische veldsterkte in het keerpunt, aangeduid door B . Aldus ontstonden dynamische coördinaten, bekend als $(B; L)$ -coördinaten. Zij wijzen geen ondubbelzinnig punt in de ruimte aan, doch betekenen dat men deeltjes beschouwt waarvan de veldsterkte in het keerpunt B is en die gebonden zijn aan een krachtlijn die het evenaarsvlak op L aardstralen snijdt. De werkelijke plaats van het deeltje kan dan even goed in het zenit van Singapore als van Lissabon zijn. Uitgaande van dit dynamisch coördinatenstelsel kan men een statisch coördinatenstelsel definiëren, dat het invariantenstelsel genoemd wordt aangezien het steunt op de adiabatische bewegingsinvarianten. Het vertoont een zekere gelijkenis met het sferisch coördinatenstelsel en wordt gekenmerkt door een invariante breedte Λ gedefinieerd als volgt

$$\cos 2\Lambda = l/L$$

De plaats waar $\Lambda = 90^\circ$ noemt men de invariante pool en de grote cirkel waarvoor theoretisch $\Lambda = 0^\circ$, noemt men de invariante evenaar. Men onderscheidt dus eveneens een noorder- en zuiderbreedte die verkort voorgesteld worden door INL en ISL. De grote cirkel

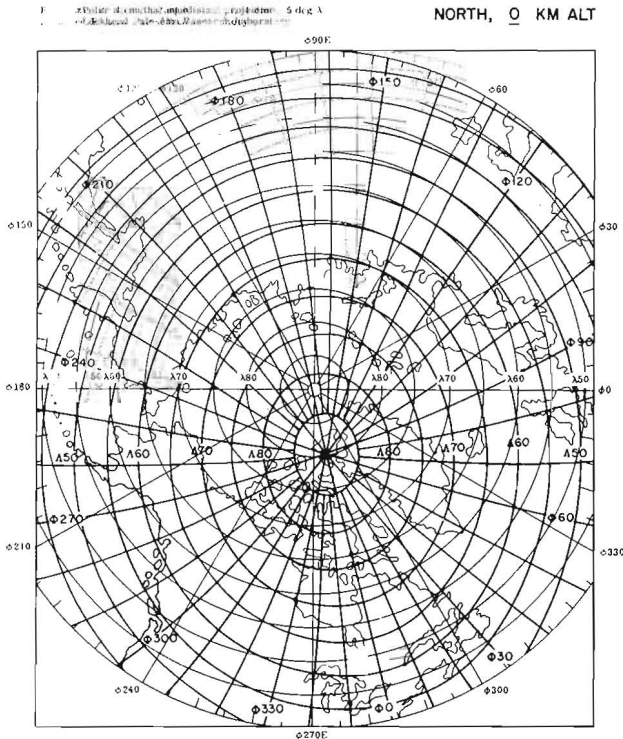


Fig. 4. Kaartnet voor het noordpoolgebied in invariante magnetische coördinaten.

gaande door de invariante polen en de geografische noordpool is de oorsprongsmeridiaan voor de invariante lengte Φ , die uitgedrukt wordt in graden. Verdeelt men evenwel de invariante evenaar in uurgordels dan kan men aldus een invariante lokale (magnetische)-tijd definiëren (INLT) t.o.v. de zonnestand. Figuur 4 illustreert deze invariante coördinaten. Punten die op eenzelfde magnetische meridiaan liggen in twee verschillende halfronden met dezelfde breedte, noemt men verwante punten.

2.6. Gevolgen van de afwijkingen van het geomagnetisch veld van een dipool

Men weet dat het magnetisch veld van de aarde niet volledig kan worden beschreven door een perfect dipoolveld. Ten gevolge hiervan wordt het eenvoudige beeld dat hierboven geschetst werd ingewikkelder. Dit komt o.a. tot uiting in het feit dat de symmetrie verstoord wordt en de veldlijnen niet door een eenvoudige formule kunnen worden voorgesteld. Dit brengt met zich mee dat de doorsnijding met het evenaarsvlak moeilijk bepaald kan worden. McIlwain stelde daarom voor dat men voor L de geocentrische afstand koos van het snijpunt van de dipolaire veldlijn die door het keerpunt van het beschouwde deeltje gaat. Wanneer men dit principe verder uitdiept stelt men vast, zoals Roederer gedaan heeft, dat, in het werkelijk magnetisch veld van de aarde, deeltjes die op een bepaald ogenblik op eenzelfde veldlijn liggen tijdens hun driftbeweging op verschillende veldlijnen komen te liggen. Dit verschijnsel noemt men de splitsing der veldlijnen. Dit feit is proefondervindelijk aangetoond geworden door waarnemingen aan boord van de satelliet ATS 1. Het resultaat dezer waarnemingen is voorgesteld in figuur 5.

Ten gevolge van deze splitsing van veldlijnen zal een deeltje dat op een bepaald ogenblik aan een gesloten veldlijn gebonden is, overgaan op een open veldlijn. Dan is het deeltje niet in staat een volledige wenteling om de aarde te maken en men spreekt van pseudo-gebonden deeltjes.

2.7. De poolstreken

De verschillende magnetosferische gebieden kunnen, dank zij hun begrenzing door krachtlijnen, worden geprojecteerd op het aardoppervlak, waar men aldus bepaalde gebieden kan herkennen. In de poolstreken onderscheidt men de volgende zones:

a. poollichtovaal

Men vermoedt dat dit ovaal de projectie is van de gebieden waarin de pseudogebonden deeltjes aanwezig zijn. Dit gebied maakt deel uit van de inwendige

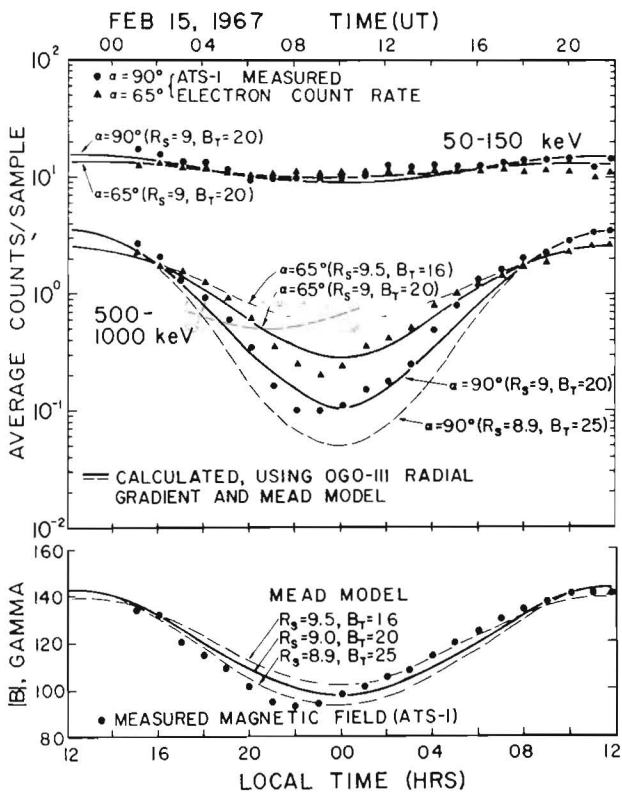


Fig. 5. Proefondervindelijk bewijs der veldlijnensplitsing. In de bovenste figuur ziet men duidelijk dat elektronen van 0,5 tot 1 MeV, met hellingshoeken $\alpha = 65^\circ$ en $\alpha = 90^\circ$, omstreeks 8h en 16h INLT op dezelfde veldlijn gelegen zijn en omstreeks 24h op gescheiden veldlijnen liggen.

De onderste figuur geeft het verloop weer der geomagnetische veldsterkte.

magnetosfeer. Uit gelijktijdige waarnemingen van vergelijkbare vormen van poollicht in verwante punten moet afgeleid worden dat dit zich voordoet langs gesloten geomagnetische veldlijnen. Deze verwantschap komt nog tot uiting voor $L = 10$. Lange tijd was men er evenwel van overtuigd dat de poollichtverschijnselen plaats hadden volgens open veldlijnen. Verder is gebleken dat dagelijks het leeuwenaandeel van de korpuskulaire neerslag en van het poollicht zich voordoet in dit ovaal. Mogelijk kan men het nog onderverdelen in kleinere zones ieder gekenmerkt door welbepaalde deeltjes. Figuur 6 geeft een beeld van het poollichtovaal.

b. de poollichtzone

Het poollichtovaal heeft geen vaste plaats. Het verandert voortdurend onder invloed van de magnetische onrust. Het beschrijft aldus een oppervlak dat men de poollichtzone genoemd heeft en waarvan de grenzen

bepaald worden door de veldlijnen waarvoor $L = 5$ en $L = 17$. Het is in deze zone dat het poollicht hoofdzakelijk waargenomen wordt.

c. de poolkap

De uitwendige magnetosfeer wordt geprojecteerd in de poolkap die volledig omgeven is van de poollichtzone. Binnen deze poolkap treedt zelden poollicht op.

2.8. Magnetosferische stormen

Uit een nauwgezette studie van talrijke geofysische verschijnselen is gebleken, dat ze voornamelijk in de poolstreken eng verbonden zijn met storingen van het geomagnetisch veld: magnetosferische stormen genoemd of ook wel substormen. Het zijn betrekkelijk onschuldige storingen die regelmatig terugkeren in een tempo van één- of tweemaal daags en slechts geregistreerd worden door magnetische observatoria die op betrekkelijk hoge breedte gelegen zijn. De duur van zo'n storing schommelt tussen één en drie uur. Eenmaal begonnen bereiken ze hun grootste hevigheid in minder dan een half uur. Men kan ze zeer gemakkelijk in een magnetogram herkennen door hun vorm, die

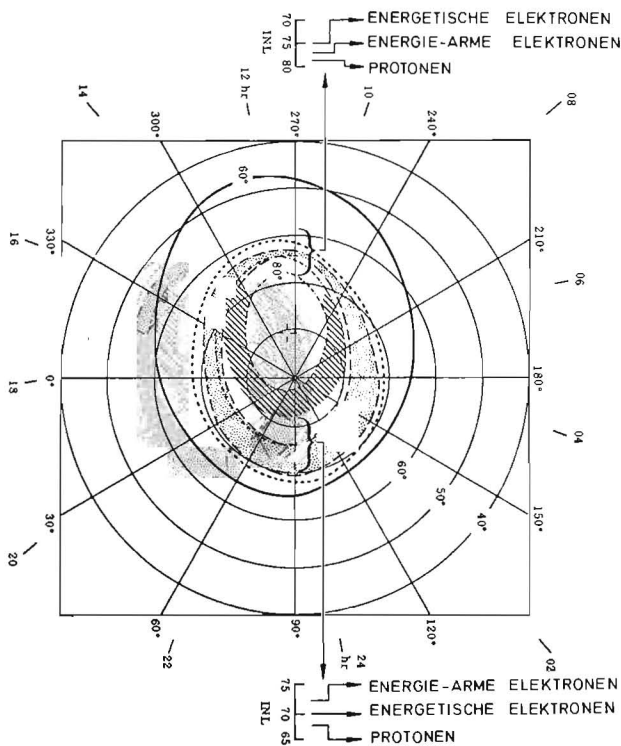


Fig. 6. Begrenzing der verschillende poolgebieden.
 - volle lijn: projectie der plasmapaauze
 - gestippeld gebied: poollichtovaal
 - geharceerd gebied: poolgolven.

aan een geografische baai herinnert; vandaar de benaming *magnetische baai*. Meestal zijn de magnetische stormen gekenmerkt door een verzwakking van het aardveld doch in sommige gevallen treedt een versterking op. In het eerste geval spreekt men van een negatieve baai en in het laatste geval van een positieve. In geen geval is deze storing te vergelijken met een echte magnetische storm die in alle streken van de aarde waargenomen worden. Men kent nog niet precies de ware oorsprong van deze substormen. Ze ontstaan misschien door injectie in de inwendige magnetosfeer van korpusculaire stromen afkomstig van de staart, die een asymmetrische kringstroom vormen zoals voorgesteld in figuur 7. Plasmaspecialisten zijn echter van oordeel dat deze magnetosferische stormen de uiting zijn van een der talrijke instabiliteiten die kunnen voorkomen in een plasma. Grofweg kan men het verschijnsel zien als het opspatten van een magnetische buis die door te grote injectie overbevolkt raakt, net zoals een luchtband springt wanneer hij te sterk opgepompt wordt.

3. Overzicht van de geofysische verschijnselen in de poolstreken

In grote trekken kan men zeggen dat in nauw verband met het optreden van een magnetosferische storm de volgende geofysische verschijnselen vastgesteld worden:

- a. toenemende absorptie van radiostraling boven de poolkap, meestal vermeld als P.C.A. (= polar cap absorption)
- b. korpusculaire neerslag
- c. optische verschijnselen als poollicht en poolgloren
- d. verhoogde ultra-violette straling
- e. uitzending van roentgenstraling
- f. radioëlektische verschijnselen
- g. magnetische mikropulsaties
- h. het vermoedelijk optreden van een krachtige polaire elektrische stroom.

Al deze verschijnselen vertonen een onderlinge afhankelijkheid. We zullen nu nader op de studie van de roentgenstraling ingaan en zijn afhankelijkheid bestuderen van de andere verschijnselen.

4. Algemeenheden over de roentgenstraling

De roentgenstraling in de poolstreken ontstaat doordat energierijke elektronen van onbekende oorsprong geïnjecteerd worden in de dichte dampkringslagen, waar zij afgeremd worden. De aldus vrijgekomen energie wordt omgezet in een stralingsenergie die gewoonlijk de remstraling wordt genoemd.

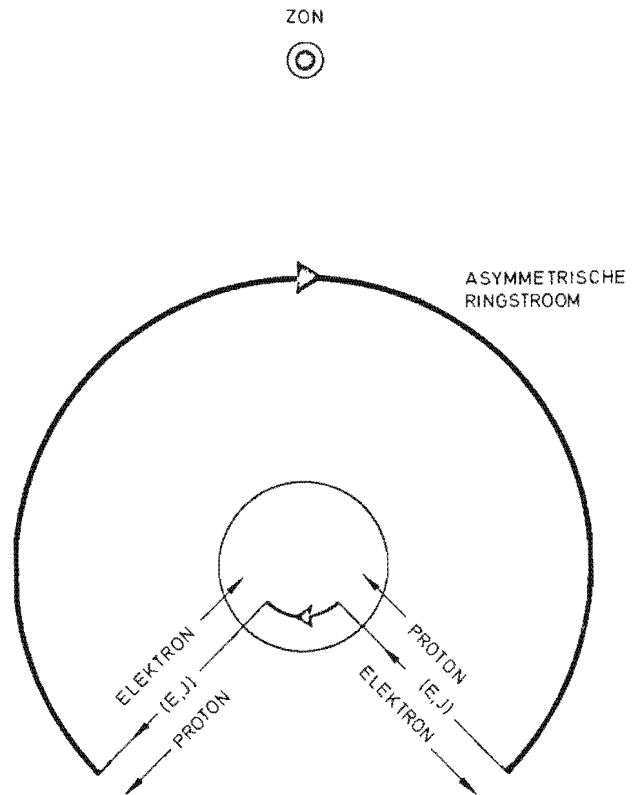


Fig. 7. Projectie van de asymmetrische ringstroom in het evenaarsvlak.

4.1. Historisch overzicht

Tussen 1953 en 1957 stelden Van Allen en zijn medewerkers vast dat er in de poollichtzone, op ongeveer 40 km hoogte, roentgenstraling waarneembaar is, afkomstig van energierijke elektronen die zowat op 80 km hoogte afgeremd worden. Alhoewel bekend was dat het zichtbaar poollicht insgelijks veroorzaakt wordt door elektronen was het moeilijk het verband te leggen tussen het zichtbaar poollicht en de roentgenstraling. Tegenwoordig zijn er heel wat ploegen werkzaam op dit gebied. In de V.S. is het vooral aan de Universiteiten van Minnesota, Berkeley, Iowa, dat de roentgenstraling in de poolstreken bestudeerd wordt. In Europa werken hieraan o.a. het Max Planck Instituut voor Aeronomie te Lindau (D), de Service d'Aéronomie van de CNES te Verrières (F), de Universiteit te Bergen (N), te Toulouse (F).

4.2. Waarnemingsmethodes

Een stratosferische ballon, die nagenoeg standvastig op 40 km blijft hangen, vormt een zeer stabiele waarnemingspost op een hoogte waar de roentgenstraling nog voldoende sterk is om waargenomen te

worden. Het is gebleken dat die nog merkbaar is op relatief lage invariante breedten, zoals $L = 3,5$. Dit is vnl. het geval voor de stad Minnesota. Een ander belangrijk voordeel van de ballon is dat het hiermee mogelijk wordt onderscheid te maken tussen plaatselijke en tijdelijke verschijnselen d.w.z. die zich op verschillende wijze in verschillende geografische plaatsen voordoen resp. die van voorbijgaande aard zijn in één enkele plaats.

Als stralingsdetector neemt men bijna altijd scintillatiespectrometers vervaardigd uit natriumjodide of natriumbromidekristallen waarin thallium als activator verwerkt is. Achter deze kristallen plaatst men fotovermenigvuldigers waarvan het uitgangssignaal versterkt en uitgefilterd wordt. Met dergelijke instrumenten kan alle roentgenstraling worden gemeten afkomstig van elektronen waarvan de energie 20 keV overtreft. Figuur 8 stelt het schema van een scintillatiespektrometer voor. Jammer genoeg kunnen de ballons niet hoog genoeg vliegen om de roentgenstraling te meten van elektronen met lagere energie, die naar men vermoedt aanleiding geven tot het zichtbaar poollicht. Raketten bieden de mogelijkheid om de roentgenstraling bij hun ontstaan te bestuderen. Ze zijn ook aangewezen om de verandering in de stralingsintensiteit te bestuderen langs een veldlijn waardoor be-

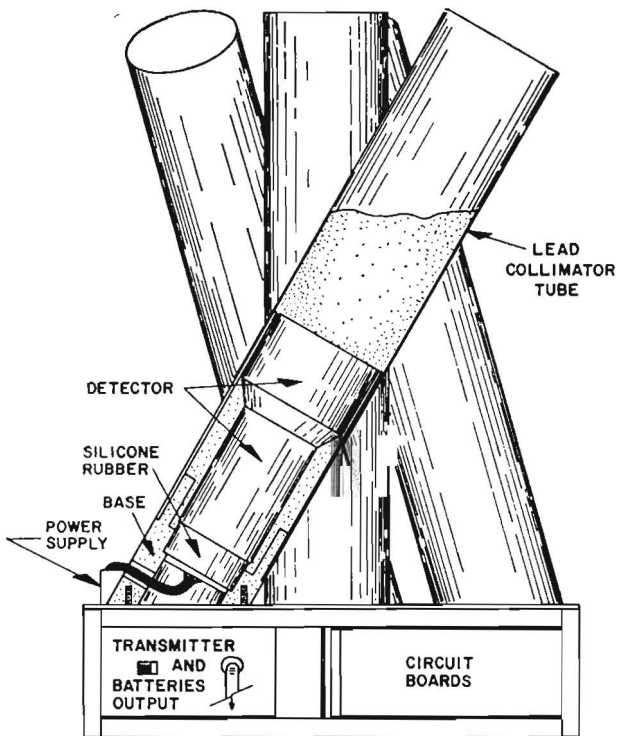


Fig. 8. Voorbeeld van roentgenstralingstelescoop met scintillatiedetector.

langrijke inlichtingen ontstaan over profielen langs dgl. veldlijnen. Ten slotte zijn zij het aangewezen werktuig om de hoekverdeling van de roentgenstraling te bestuderen en de afhankelijkheid te onderzoeken van andere poollichtverschijnselen zoals poollicht en korpuskulaire neerslag. Anderzijds vertonen proefnemingen met raketten belangrijke tekortkomingen: o.m. de geringe observatietijd en het kleine waarnemingsgebied. Beide waarnemingsmethodes laten enkel toe de neerwaartse roentgenstraling te meten. Om de opwaartse straling te bestuderen moet men beroep doen op satellieten. Deze laatste zijn het aangewezen instrument om uitgestrekte gebieden te overschouwen en het verband te leggen tussen de roentgenstraling en de meeste geofysische verschijnselen. Zij vertonen evenwel dezelfde tekortkomingen als de raketten nl. dat zij niet in staat zijn onderscheid te maken tussen plaatselijke en tijdelijke verschijnselen.

Tenslotte kan men nog onrechtstreeks inlichtingen inwinnen over de roentgenstraling op de aardbodem, niettegenstaande de roentgenstraling die niet bereikt. Sommige lichtverschijnselen van het aangeslagen molekuul N_2^+ , zouden verband houden met de ionisatie van het stikstofmolekuul N_2 door de roentgenstraling. De intensiteit van deze lichtemissies zou dus een maatstaf zijn voor de intensiteit van de roentgenstraling. Wij zullen echter zien dat het verband tussen de zichtbare poolverschijnselen en de roentgenstraling nog niet volledig duidelijk is.

4.3. Morfologie van de roentgenstraling

Over langdurige tijdperken kan men een onderscheid maken tussen

- een aanhoudende straling waarin weinig reliëf te bespeuren valt
- kortstondige 'buien' van zeer veranderlijke duur
- een veranderlijke straling die nagenoeg periodiek verandert.

Over kortstondige intervallen kan men nog het volgend onderscheid maken

- zeer kortstondige kleine uitbarstingen, mikro-erupties genoemd, die zelden langer dan 1,2 sec. duren
- langduriger erupties die tot langer dan 30 sec. duren
- aanhoudende erupties van de orde van 90 sec.

Een voorbeeld van deze verschillend veranderlijke vormen van roentgenstraling vindt men in figuur 9. Vanzelfsprekend kunnen combinaties optreden van langdurige en kortstondige verschijnselen. Deze laatste houden waarschijnlijk verband met mikroskopische processen in de magnetosfeer. Zij illustreren waarschijnlijk verschillende evolutiefazen van verschijnselen waarvan de aard nog niet voldoende gekend is. De

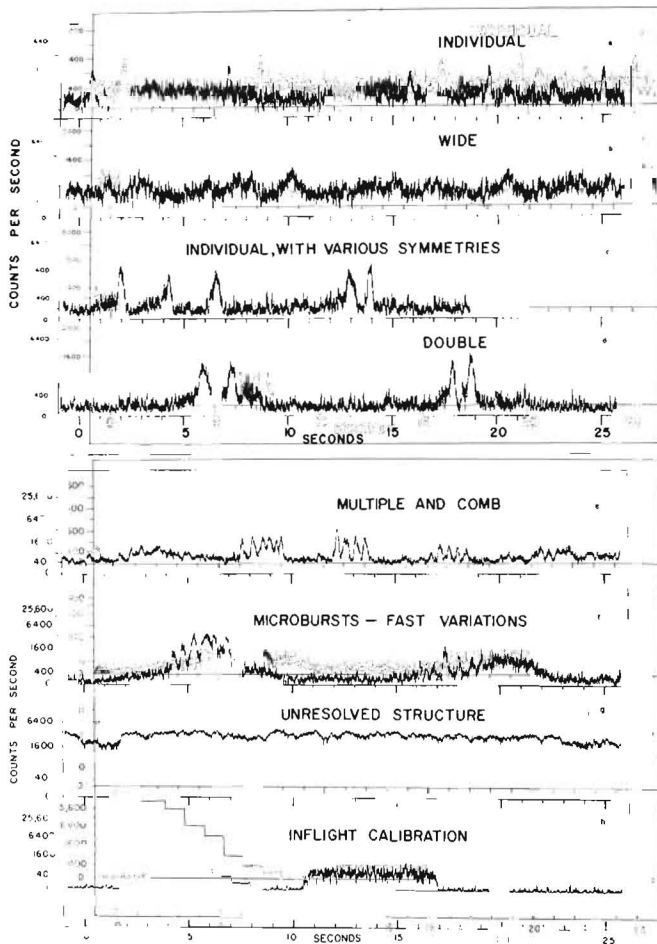


Fig. 9. Verschillende uitingsvormen van de roentgenstraling.

mikro-erupties kunnen individueel voorkomen maar zijn meestal gegroepeerd in de vorm van 'buien' van veranderlijke duur van enkele minuten tot enkele uren. Meestal duurt een bui 90 min d.w.z. een duur van dezelfde grootteorde als van een magnetosferische storm. Meestal doen deze buien zich 's morgens voor. De gemiddelde duur van de erupties bedraagt 0.1 tot 0.5 sec. Sommige waarnemers menen een onderscheid te moeten maken:

- een uitgesproken asymmetrische intensiteitsverdeling waarbij de uiterste waarde bereikt wordt in zeer korte tijd (van de orde van 30 msec) om daarna geleidelijk af te nemen
- een min of meer symmetrische intensiteitsverdeling over een tijdsinterval van ongeveer 0,1 seconde.

De stralingsintensiteit van deze mikro-erupties is van de orde van 3 fotonen per (cm² s ster keV) en zou veroorzaakt worden door een elektronenneerslag van 10⁶ elektronen per (cm²s ster keV). De overeenstemmen-

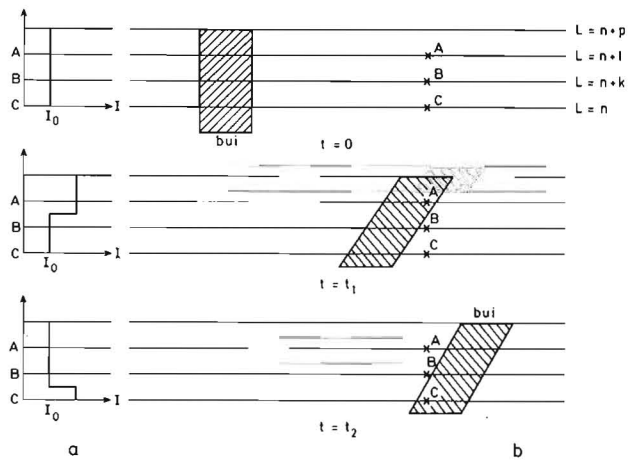


Fig. 10. Longitudinale verplaatsing van een buienzone. Ten gevolge van de verschillende driftsnelheden op verschillende geomagnetische breedten ontstaat een spreading in lengte (fig. b) wat op plaatsen met dezelfde geomagnetische lengte, maar verschillende breedte, de indruk verwekt van een equatorwaartse verplaatsing van de bui (fig. a).

de energieflex is van de orde van 10^{-2} erg s⁻¹ cm⁻².

De langdurige erupties komen evenzeer impulsief voor met een ritme van 4 à 30 sec en dit tijdens buien die tot 3 uur kunnen duren. In tegenstelling met wat wel eens vermoed werd, bestaat er geen verband tussen het ritme der pulsaties en de slingerperiode der elektronen langs de krachtlijnen. Soms zijn de pulsaties gemoduleerd; d.w.z. zij vertonen zwevingen waarvan de periode blijkbaar afhankelijk is van het ritme.

4.5. Ruimtelijke verdeling van de straling

De uitbarstingen blijken verband te houden met verschijnselen die zich in beperkte haarden voordoen waarvan de diameter van de orde van 20 tot 40 km is en die zich voortplanten met een snelheid van iets minder dan 1000 km/h tot bijna 4000 km/h. De ganse strook die de haard afbakt bij zijn doortocht, drijft dan verder af met een snelheid van zowat 300 km/h. Figuur 10 geeft hiervan een idee. De smalle stroken die aldus op de aarde afgetekend worden zijn honderden tot duizenden km lang. Zij liggen in het poollichtovaal tussen 66° IL en 69° IL en komen voor van middernacht tot 12.30 INLT. Binnen deze stroken komen de mikro-erupties nagenoeg eenvormig voor. Zij bereiken evenwel hun grootste hevigheid op 66° IL d.w.z. op magnetische breedten overeenstemmende met $L = 6$. De snelheid en de zin der verplaatsing van de kernen blijkt verband te houden met het tijdstip waarop de bui plaats heeft. Tijdens hun verplaatsing volgen de haarden lijnen met constante L en dit met een snelheid van de orde van 1 km/s. Deze verplaatsing gaat gepaard

met een zekere dispersie in breedte. In de herstelfase na een magnetische storm en eveneens bij een matinale inzet verplaatst de haard zich naar het zuiden met een snelheid van de orde van 0.5 km/s. Evenals voor de kortstondige mikro-erupties blijkt er een verband te bestaan tussen de langdurige erupties en de magnetische breedte waarop ze zich voordoen. Zij vertonen zich daarbij het vaakst in de meest zuidelijk gelegen gedeelten van het poollichtovaal en wel van middernacht tot omstreeks 6h INLT. Ook hun haarden verplaatsen zich en wel met een snelheid van 30 tot 100 km/s.

4.6. Verloop der roentgenstraling

's Avonds laat en omstreeks middernacht INLT treden er een groot aantal erupties op, hetzij alleenstaand, hetzij gegroepeerd. Ze vertonen grote schommelingen zowel wat hun intensiteit als wat het spectrum betreft. Dit laatste 'verzacht' plotseling omstreeks middernacht om gaandeweg terug 'harder' te worden tot omstreeks 17h INLT. Deze opeenvolgende gedaantewisselingen van het spectrum noemt men de dagelijkse variatie. Dit effect is aanschouwelijk voorgesteld in figuur 11. Na middernacht treden vnl. buien op die zowat een half uur duren. Erupties en onregelmatige variaties sluiten daarbij elkaar niet uit. 's Morgens treden vnl. buien van mikro-erupties op waarvan de duur nogal uiteenlopend is. De buienperiodes kunnen vijf uur aanhouden met onderbrekingen van wel twee uur. Alleenstaande mikro-erupties die zich omstreeks 8h 30 INLT voordoen zijn daarbij zeer asymmetrisch. Het is zelden dat ze vóór 6h INLT optreden. Onafhankelijk van de buien treedt 's morgens een geleidelijke toename op van de intensiteit gedurende een half uur om geleidelijk langzaam urenlang terug af te nemen. Gelijktijdig neemt de gemiddelde energie van de straling toe gedurende de intensiteitstoename. Omstreeks middag INLT kan men mikro-erupties en aanhoudende erupties waarnemen, doch nooit langdurige erupties. De mikro-erupties zijn daarenboven min of meer symmetrisch. 's Middags treden er zelden buien op.

5. Verband tussen de roentgenstraling en de andere poolverschijnselen

5.1. Verband tussen de roentgenstraling en de elektronenneerslag

Er moet een nauw verband bestaan tussen de intensiteit van de waargenomen roentgenstraling en de aard en intensiteit van de korpusculaire neerslag; vnl. wat de elektronen betreft van meer dan 60 keV. Het verband is 's ochtends bijzonder opvallend bij de mikro-erupties en de neerslag van elektronen van meer dan 60 keV. Zo stelt men o.a. vast dat

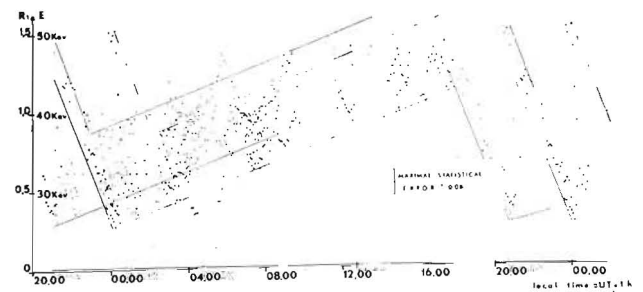


Fig. 11. Dagelijkse variatie van de roentgenspectrum.

a. erupties en neerslag dezelfde morfologie vertonen d.w.z. met geïsoleerde erupties stemt geïsoleerde neerslag overeen en met opeenvolgende mikro-erupties stemt herhaalde neerslag overeen volgens nagenoeg eenzelfde patroon.

b. de korpusculaire flux berekend uit de stralingsintensiteit stemt binnen de waarnemingsfouten overeen met de waargenomen flux van de elektronenneerslag.

c. de zones waar de neerslag optreedt vallen nagenoeg samen met de gebieden waar roentgenstraling waargenomen wordt. Neerslag en straling blijken beide verband te houden met een verhoogde bevolking van de stralingszones. Zo stelt men vast dat er een één-éénduidig verband bestaat tussen de variaties van de roentgenstraling in de poolstreken en de elektronenbevolking aan de evenaar in de stralingsgordels ter hoogte van de synchrone satellieten. Deze laatste stellen vast dat elektronen met een energie van de orde van 30 keV omstreeks middernacht diep in de magnetosfeer doordringen en dan ten gevolge van de kromming der geomagnetische veldlijnen oostwaarts gaan verplaatsen met een snelheid die van dezelfde grootte-orde is als die waarmee de haarden der roentgenstraling zich in het poollichtovaal verplaatsen. Evenwel stelt men vast dat tussen 1730 en 2400 INLT ook westwaartse bewegingen optreden der precipitatiezones, een verschijnsel dat alleen kan worden verklaard door het bestaan aan te nemen van elektrische velden. De waargenomen schijnbare evenaarwaartse verplaatsing van de elektronenbui staat in nauw verband met het feit dat in een dipoolveld de elektronen in de buitenste schalen sneller driften dan in de inwendige. De elektronenneerslag is het gevolg van een spreiding in inclinatie van de elektronen van 50 keV in de inwendige magnetosfeer. De oorsprong van deze spreiding (pitch-angle scattering) is vooralsnog niet met zekerheid bekend.

5.2. Verband tussen de roentgenstraling en het zichtbaar poollicht

Alhoewel de meningen nog verdeeld zijn kan men

niettemin enkele betrekkingen als vaststaand beschouwen. Zo blijken de mikro-erupties gepaard te gaan met het opflakkeren van onregelmatige poollichthaarden om de 5 à 15 sec. Zowel wat de geografische ligging als wat de frekwentie betreft blijkt het verband wederkerig te zijn. De verschijnselen doen zich voornamelijk voor ten zuiden van het poollichtovaal wanneer na middernacht het noordpoollichtgordijn uiteenvalt. Het verband is vooral duidelijk wanneer men de opflakkingen van de groene lijn van 5577 Å van geïoniseerd zuurstof vergelijkt met de roentgenstralingserupties. Anderzijds is de energie-arme roentgenstraling (2-10keV) er voornamelijk wanneer stabiel poollicht zichtbaar is tijdens magnetisch kalme periodes. De volgende betrekkingen kunnen eveneens als bewezen geacht worden:

- a. toename van de intensiteit van de lijn van 3914 Å van stikstof met de toename van de roentgenstraling.
- b. het gelijktijdig optreden van een intense band die zich verplaatst in rood poollicht en een hevige, aanhoudende roentgenstraling. Men kan als algemene regel stellen dat roentgenstraling geassocieerd moet worden met het optreden van actieve zichtbare poollichtverschijnselen.

5.3. Verband tussen magnetische onrust en roentgenstraling

Het duidelijkst komt dit verband tot uiting op microscopische schaal. Zo bestaat er een eng, doch niet wederkerig verband tussen magnetische mikropulsaties van het type Pi 1 en mikro-erupties van roentgenstraling; d.w.z. als deze laatste optreden zal men steeds mikropulsaties vaststellen doch het omgekeerde is niet noodzakelijk waar. Figuur 12 illustreert het verband tussen magnetische mikropulsaties en mikro-erupties van roentgenstraling. 's Middags blijkt het optreden van deze laatste samen te vallen met parelvormige geomagnetisch mikropulsaties van het type Pc 1. Daarentegen is er blijkbaar geen verband tussen mikropulsaties van het type Pc 3 en het optreden van roentgenstraling. Op makroscopische schaal lijkt het alsof de roentgenstraling verband houdt met het al of niet optreden van magnetische onrust. Tijdens het optreden van magnetosferische stormen, tijdens de hoofdfase van een geomagnetische storm of een andere magnetische storing die wereldomvattend is stelt men vast dat roentgenstraling urenlang kan aanhouden. Zij kan tot op betrekkelijk lage invariante breedten waargenomen worden en komt bij voorkeur tot uiting na middernacht INLT. Laatstvermelde geomagnetische verschijnselen zouden de rechtstreekse aanleiding vormen tot het ontstaan van mikro-erupties die op systematische en recurrente wijze met deze vormen van

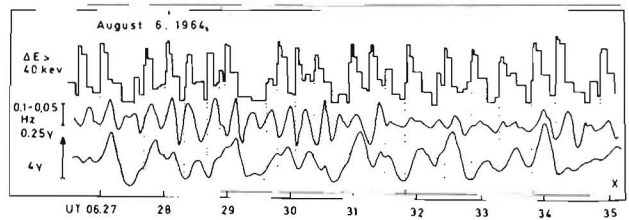


Fig. 12. Verband tussen magnetische mikropulsaties en mikroerupties van roentgenstraling.

onrust gepaard gaan. Het is veelbetekend dat de gemiddelde duur van een roentgenbui van de orde van 90 min is, wat precies de duur is van een magnetosferische storm, evenals het feit dat men in de staart van de magnetosfeer periodieke magnetische storingen vastgesteld heeft waarvan de periodes kunnen schommelen tussen 0.1 tot 0.2 sec en vnl. 1.2 sec d.w.z. net dezelfde duur als de geomagnetische mikropulsaties, gemeten op aarde, en de duur der mikro-erupties van de roentgenstraling. Vermelden we ten slotte dat de invloed van een geomagnetische storm na twee dagen nog merkbaar is in de elektronenreënslag en roentgen-erupties. Bij een plotselinge inzet van een geomagnetische storm neemt men gewoonlijk gedurende een vijftal minuten een uniforme roentgenstraling waar. De mikro-erupties hiermee verbonden in de hoofdfase kunnen gedurende een vijftal dagen op recurrente wijze optreden, naargelang de hevigheid van de storm.

Vermelden we ten slotte nog dat zelfs wanneer geen magnetische onrust merkbaar is, toch nog een zwakke aanhoudende gestructureerde roentgenstraling waarneembaar is in het poollichtovaal.

5.4. Verband tussen radio-elektrische verschijnselen en roentgenstraling

Op makroscopische schaal bestaat er verband tussen zekere vormen van roentgenstraling, de absorptie van kosmische radiostraling (CNA), en de verschillende uitingen van magnetische onrust. Het is nl. gebleken dat de haarden van roentgenstraling en gebieden van CNA zich gelijktijdig verplaatsen. Op microscopische schaal evenwel is het periodiek karakter ondergeschikt aan de intensiteit der verschijnselen zodat het kans loopt gemaskeerd te worden waardoor het enkel door statistische methoden kan worden aangetoond. Vermelden we eveneens dat hoorbare emissies, zoals het zgn. ochtendkoor, in dezelfde gebieden waarneembaar is als de roentgenstraling. Evenwel worden deze hoorbare emissies dikwijls vermeld bij de geomagnetische mikropulsaties.

5.5. Verband tussen de ontwikkeling van de polaire straalstroom en de aard van de roentgenstraling

Vooreerst blijkt er een nauw verband te bestaan tussen de breedteverschuivingen van de straalstroom, d.i. noord-zuidwaartse verplaatsing, en de verplaatsing van de precipitatiezones der polaire elektronen die aanleiding geven tot de roentgenstraling. Verder lijkt het alsof de langdurige erupties pas optreden wanneer de straalstroom zijn hoogtepunt bereikt.

6. Oorsprong van de poolverschijnselen

Het lijkt geen twijfel dat de poolverschijnselen verband houden met een verhoogde flux van geladen deeltjes. De laatste is merkbaar zowel door de bevolkingstoename in de stralings gordels als door een verhoogde elektronenneerslag en het optreden van een elektrische straalstroom in de poolstreken. Na zich lange tijd bezonnen te hebben over de herkomst van deze elektronen geloofde men in de eerste helft van deze eeuw dat zij rechtstreeks afkomstig waren van de zon; m.a.w. men geloofde dat zij een direkte toegang hadden tot de aarde net zoals de kosmische stralen. Met de aanwending van de satellieten, de ontdekking van de magnetosfeer en de vaststelling van het bestaan van een zonnewind is men echter betrekkelijk sceptisch tegenover deze opvatting komen te staan en wel om volgende redenen.

a. De berekeningen van Störmer toonden aan dat geladen deeltjes buiten de magnetosfeer deze laatste niet kunnen binnendringen. Deze berekeningen steunden evenwel op louter mechanische overwegingen en hielden geen rekening met fysische processen waaraan een plasma onderhevig is.

b. Voortgaande op de eerste proefondervindelijke gegevens over de zonnewind stelde men vast dat de energie van de protonen helemaal niet overeenstemde met de grootte-orde van die welke in de poollichtzone precipiteren. Toch weet men tot op heden nog maar heel weinig af van het gedrag der elektronen uit de zonnewind.

Naderhand, naargelang men beter ingelicht werd over de morfologie en de uitgestrektheid van de magnetosfeer werd de gedachte geopperd dat de bestanddelen van de zonnewind op onrechtstreekse wijze de magnetosfeer zouden kunnen binnendringen. Verschillende manieren hiervoor werden uitgedacht. De voornaamste mechanismen die in aanmerking kwamen zijn

a. de onderlinge samenhang tussen de magnetische veldlijnen van de aarde en die van het interplanetair magnetisch veld. Op die manier zou het b.v. mogelijk zijn dat een deeltje vertrekkend op het zonne-oppervlak

door één enkele veldlijn te volgen op aarde zou precipiteren

b. binnendringen langs het neutraal punt. Uit wetenschappelijke studies is n.l. gebleken dat het geomagnetisch veld een punt vertoont op de magnetopauze waar de veldsterkte praktisch nul is waarlangs geladen deeltjes de magnetosfeer kunnen binnendringen.

c. convectie in de staart

In verband met deze laatste drie hypothesen kan men zeggen dat de eerste bevestigd wordt voor het binnendringen van zonneprotonen met kosmische snelheden afkomstig van zonnevlammen. De hypothese is evenwel niet van toepassing voor deeltjes die het poollicht veroorzaken wegens het feit dat dit laatste zich voordoet volgens gesloten veldlijnen. Wat de tweede hypothese betreft kwam vrij spoedig vast te staan dat de flux te gering is. Blijft dus de derde hypothese die op het ogenblik de meeste aanhangers kent vooral door de vaststelling van de aanwezigheid van ophopingen van energetische elektronen in de staart. Zij treden sporadisch op en zouden tot de mikro-erupties kunnen aanleiding geven. Tot deze opvatting pleiten de corresponderende energie, de beperkte ruimtelijke verspreiding en hetzelfde karakter van het geregistreerde signaal.

Daarentegen vormt het feit dat de mikro-erupties verband houden met magnetosferische substormen een bezwaar aangezien de elektronenophopingen in de staart nu juist geen verband houden met het optreden van magnetosferische substormen. Het is echter totaal uitgesloten dat deze elektronen ook maar enig verband houden met de roentgenerupties in het poollichtovaal. Deze elektronen doen zich immers enkel voor in de staart en deze wordt binnen de poolkap geprojecteerd, een gebied waar men zelden elektronenneerslag waarneemt. Theoretische berekeningen hebben verder aangetoond dat het gebied der open krachtlijnen, geen precipitatie geeft, doch integendeel een uitlaatklep is voor geladen deeltjes van aardse oorsprong.

Onlangs echter werden door Frank, discipel van Van Allen en eveneens werkzaam aan de universiteit te Iowa, opzienbarende waarnemingen verricht, die de tot nu toe geldende opvattingen drastisch kunnen wijzigen. Hij stelde n.l. vast, dat

1. in de zonnewind belangrijke fluxen van protonen van 30 keV aanwezig zijn, die een hoeveelheid energie voorstellen vergelijkbaar met wat nodig is om een magnetische storm te veroorzaken.

2. dezelfde klasse van deeltjes voorkomt zowel in de staart van de magnetosfeer als diep in de inwendige magnetosfeer. Tijdens een magnetische storm kunnen zij doordringen tot op $L = 3$ vooraleer er merkbare elektrische stromen optreden.

3. deze deeltjes verdwijnen meestal binnen het uur. Ten gevolge hiervan is Frank van oordeel dat deeltjes van de zonnewind wel degelijk kunnen doordringen tot in de inwendige magnetosfeer. Door spreiding van de inclinatie der banen der elektronen zouden deze laatste bij voorkeur precipiteren in het poollichtovaal.

In dezelfde zin heeft Van Allen zich uitgesproken tegen de hypothesen die uitgingen van de onderstelling dat in de poolzone elektrische velden aanwezig zijn die energie-arme elektronen uit de zonnewind zouden versnellen tot ze energieën hebben die noodzakelijk zijn voor roentgen-emissie. Volgens hem is het bestaan van krachtige elektrische velden binnen de magnetosfeer, die welke versnelling ook zouden kunnen veroorzaken, uitgesloten.

Dan bestaat nog de mogelijkheid dat de elektronen die neerslaan, afkomstig zijn uit de lagere dampkring. Dit geval zou veel analogie vertonen met de convectie van waterdamp in de troposfeer: waterdamp stijgt op van het oppervlak van oceanen, zeeën en rivieren, om later terug te precipiteren. Iets dergelijks zou voor elektronen gelden: zij zouden b.v. afkomstig kunnen zijn uit de ionosfeer, zich van de aarde verwijderen, zich ergens ophopen in gebieden die op een gegeven ogenblik instabiel worden, waarna een elektronen-neerslag zou ontstaan.

Litteratuur

1. L. D. De Feiter: 'De magnetosfeer der aarde' 1 & 2, Hemel en Dampkring 63, 1965, p. 1 en p. 35.
2. C. E. McIlwain: 'Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles' J. Geophys. Res. 66, 1961, 3681.
3. J. G. Roederer: 'On the Adiabatic Motion of Energetic Particles in a Model Magnetosphere' J. Geophys. Res. 72, 1967, 981.
4. K. A. Pfitzer et al: 'Experimental Verification of Drift Shell Splitting in the Distorted Magnetosphere' Technical Report CR 133, University of Minnesota 1969.
5. L. Frank: 'Direct Detection of the asymmetric injection of extra-terrestrial 'Ring Current' protons into the Outer Radiation Zone' Reprint University of Iowa, nr 69-39, 1969.
6. J. A. Van Allen: 'On the Electric field in the Earth's Distant Magnetotail' J. Geophys. Res. 75, 1970, 29.
Fig. 4. J. E. Evans et al: 'North Polar, South Polar, World Maps and Tables of Invariant coordinates for six

altitudes. Lockheed Palo Alto Res. Lab. DASA 2347, 1969.

Fig. 6, 7, 8, 9: B. McCormac Ed. 'Aurora and Airglow' Reinhold Publishing Company New York 1967.

Fig. 12: B. McCormac and A. Omholt Ed.: 'Atmospheric Emissions' Van Nostrand Reinhold Company, New York 1969.

Apollo 14 en Fra Mauro

C. A. van den Bosch

De Heer Titulaer opende de nieuwe jaargang van Hemel en Dampkring met een belangwekkende mededeling over doeleinden van de Apollo-14-vlucht. Het doelpunt ligt in een interessant gebied van de oppervlakte van de Maan. Figuur 4, op bladzijde 3, een reproductie van foto no. 7595 van het Apollo-12-project, heeft in het bijzonder daarop betrekking, doordat het karakter van het landingsgebied er zo mooi op tot uitdrukking komt. In het onderschrift, en ook overigens, komt die foto weinig ter sprake, en dat was zeker ook niet de bedoeling van de schrijver. Ik moet dus nu verwijzen naar de figuren 1, 4 en 5 van Titulaer's artikel in de januari-aflevering.

Het linker beneden kwart van Fig. 4 vertoont het grootste en noordelijke deel van de oude krater Fra Mauro, die 470 km SSE van Copernicus ligt. Beide kraters zijn even groot, maar daarmee houdt overeenkomst volledig op. In de foto valt de diagonaal die van links-onder naar rechts-boven loopt vrijwel samen met de meridiaan van 17° westerlengte. De andere diagonaal, die in de figuur wel loodrecht op de eerste staat, wijkt niettemin vrij veel af van de richting oost-west. Toch, als je zegt: noord is rechts-, west links-boven, is dat voldoende om de richtingen uit elkaar te houden.

Ruim een tiental direct opvallende kraters hebben middellijnen van 3 tot 6 km. Alleen die grote, links-boven, haalt 10 km, Fra Mauro A. Al deze kraters heten Fra Mauro met de toevoeging van een hoofdletter. De bult met klein topkratertje, 3 cm oostwaarts van het midden, is Fra Mauro α , met kleine Griekse letter. Een bult is nu eenmaal geen krater!

De astronaut Gordon, die op 100 km hoogte rond de Maan bleef cirkelen, nam deze foto ongeveer naar het westen, toen hij in de 'Command Module', loodrecht boven een punt was, dat in Fig. 4 een of twee centimeter rechts van de benedenhoek getekend moest