

Les 7

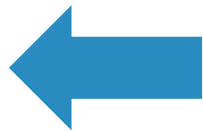
Atmosfeerfysica en -chemie

Inleiding tot de wetenschappen van de atmosfeer

Auteur: Erik de Schrijver

Inhoud

- Geschiedenis van het onderzoek
- Lagen van de atmosfeer
- Druk-, temperatuur- en dichtheidsgradiënten
- Chemische samenstelling
- Stralingseffecten
- Meteorieten en terugkerende ruimteschepen
- Electromagnetisme
- Planetaire atmosferen



Les 7: Elektromagnetisme

Deze les omvat drie aspecten van elektromagnetisme: het elektrisch en het magnetisch veld van de Aarde binnen de atmosfeer en het gedrag van radiogolven.

Het elektrisch en magnetisch veld van de Aarde reiken dan wel (veel) verder dan de atmosfeer, maar gezien de opzet van deze lessen-reeks gaan we ons beperken tot atmosferische effecten.

Radiogolven met voldoende lage frequentie kunnen weerkaatsen op geleidende lagen in de ionosfeer (en zo wereldwijde radiocommunicatie mogelijk maken). Welke factoren spelen hierbij een rol?

A. Het elektrisch veld van de atmosfeer.

Het elektrisch veld van de atmosfeer is het gevolg van ionisaties tgv. kosmische straling, UV-licht van de zon, straling van radio-isotopen in de aardkorst (én in de lucht) en elektrische ontladingen in de lucht.

Vele atmosferische processen zoals convectie, wolkenvorming en neerslag zorgen voor een partiële scheiding van elektrische ladingen waardoor elektrische velden ontstaan.

De atmosfeer is positief geladen tov. het aardoppervlak.



Het veld van de atmosfeer kan zorgen voor plaatselijke en tijdelijke ontlading van de capacitor die het systeem Aarde/Atmosfeer vormt. Processen die extra bijdragen zijn oa. neerslag, bliksem en puntontlading aan scherpe voorwerpen:

Geleidingsstroom	$+60 \text{ Coulomb}/(\text{km}^2 \cdot \text{jaar})$
Neerslagstroom	$+20 \text{ Coulomb}/(\text{km}^2 \cdot \text{jaar})$
Bliksemstroom	$-20 \text{ Coulomb}/(\text{km}^2 \cdot \text{jaar})$
Puntontlading	$-100 \text{ Coulomb}/(\text{km}^2 \cdot \text{jaar})$

Opm: Boven de oceaan is er geen puntontlading. Over de hele Aarde is $I_{\text{netto}} \approx 0$ al is er wel een netto-spanning: $U_{\text{Aarde}} < U_{\text{atmosfeer}}$.



Sint Elm's vuur

Als er een grote spanning wordt opgebouwd voordat er ontlading optreedt kunnen positief geladen vonken lading laten weglekken: St-Elm's vuur.

Dat gebeurt het gemakkelijkst aan puntige objecten zoals scheepsmasten, en is daardoor bij zeelui al eeuwenlang bekend.

Het gaat soms gepaard met een sissend geluid en het gevoel van geëlektrificeerd haar.

B. Het elektrisch veld van de aarde.

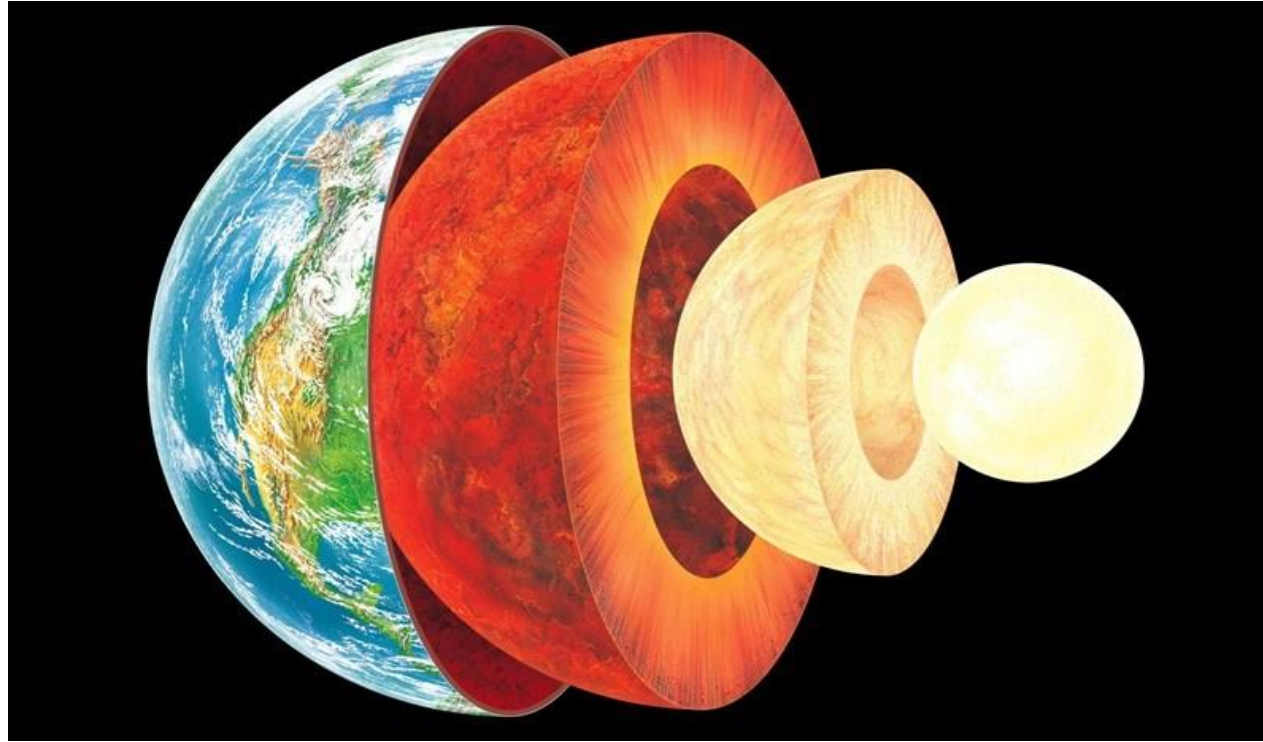
Het magnetisme van de Aarde kan bekeken worden als bestaande uit drie delen: het magnetisch veld dat ontstaat in het diepe binnenste van de Aarde (de zgn 'selfsustaining dynamo'), het magnetisme van de aardkorst of lithosfeer ('crustal magnetism') en het magnetisme dat ontstaat als gevolg van elektrische stromen in de atmosfeer.

Dat laatste veld is erg instabiel, met variaties die voorkomen op tijdschalen van dagen (respons op zonnestormen) tot fracties van seconden. Het magnetisme van de aardkorst is dan weer meestal zwak maar stabiel (op de tijdschaal van een mensenleven).

Variatie van het inwendig geproduceerde veld en het 'crustal field' doorheen de atmosfeer:

Het inwendig geproduceerde veld ontstaat tgv. convectie-stromen in de buitenkern van de Aarde, dat is het vloeibare deel tussen de mantel en de vaste kern van de planeet.

Het 'crustal field' wordt veroorzaakt door gemagnetiseerd gesteente. Het wordt soms ook 'fossiel' magnetisme genoemd, omdat het in het verre verleden ontstaan is door magnetisatie van lavastromen.



Delen van de aardkorst zijn magnetisch omdat lava ijzerhoudend is en ijzeratomen de oriëntatie van het globaal aardmagneetveld aannemen zolang ze mobiel zijn, dwz tot de lava stolt. (De studie van magnetisme in prehistorische lavastromen noemt men 'paleomagnetisme'.)

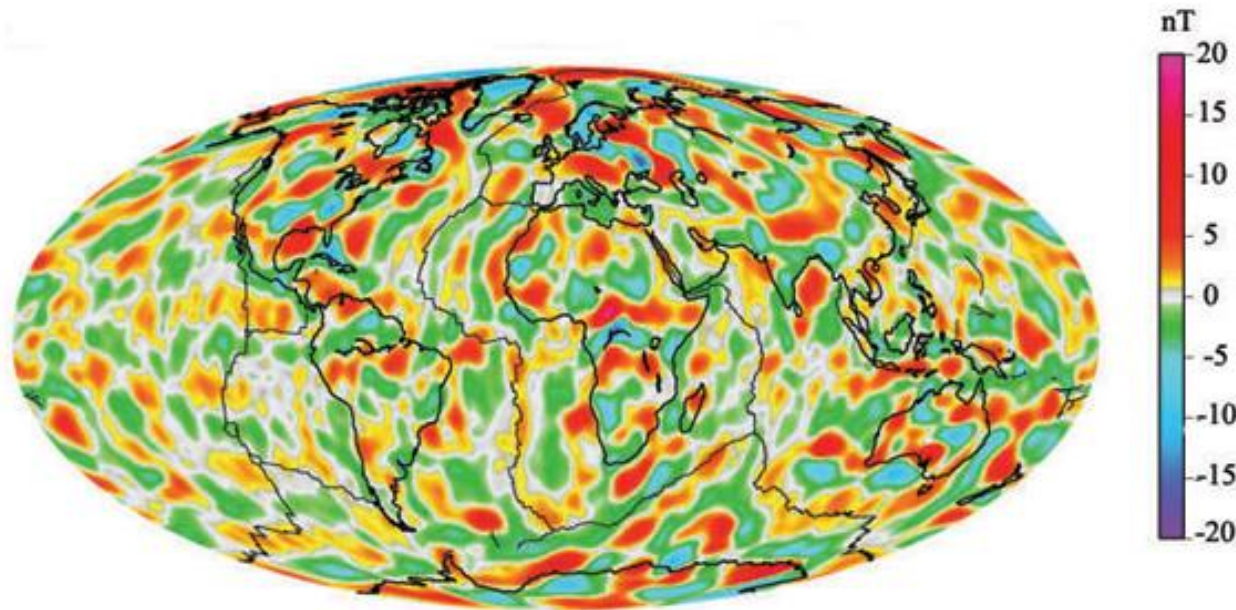
De atmosfeer is erg dun vergeleken met de straal van de Aarde en daarom zal de hele atmosfeer zich bevinden op grote afstand van de bron van het inwendig veld. Als gevolg daarvan zijn er geen grote veranderingen met de hoogte te verwachten als gevolg van dat inwendig veld.

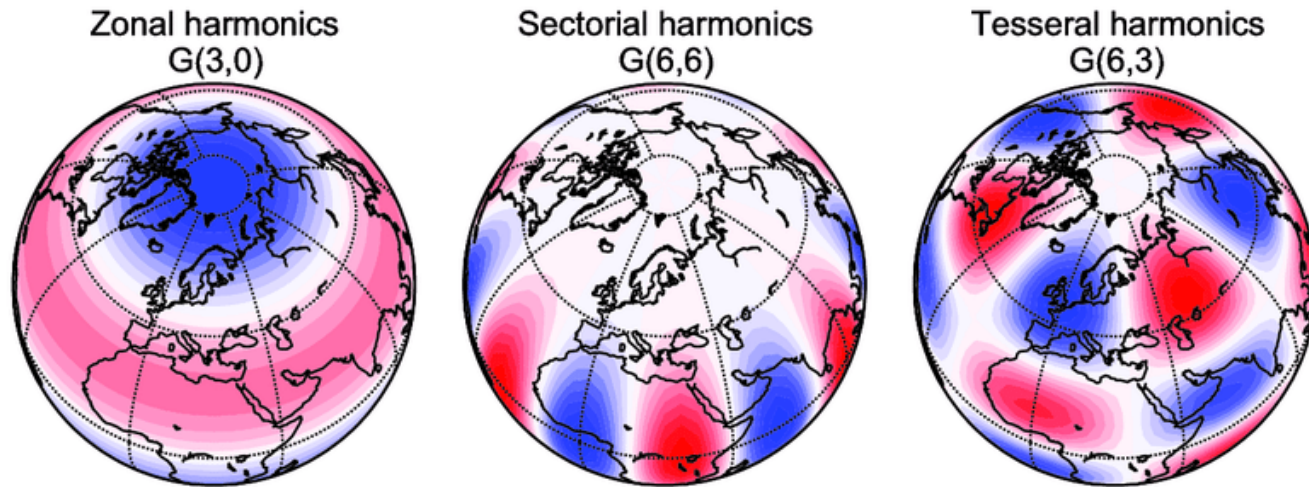
Omdat de atmosfeer zich vlak boven de aardkorst bevindt geldt dezelfde conclusie niet voor het 'crustal field': dat zou juist erg sterk kunnen variëren met de hoogte.

Nu is het niet mogelijk om beide bijdragen apart te meten: elke meting bepaalt de resultante van de drie componenten (inwendig, 'crustal' en atmosferisch).

Een meting van lange duur zou toelaten om de atmosferische component 'uit te middelen'. De twee overblijvende componenten zijn erg ongelijk in grootte:

de lithosfeer (lithos=steen dus lithosfeer=aardkorst) heeft een magnetische bijdrage van slechts een paar tientallen nT (zie figuur), het inwendig veld heeft een veldsterkte van 25 à 65 μT .





De wiskundige beschrijving van het aardmagnetisch veld over het gehele aardoppervlak vergt het gebruik van zgn. 'sferische harmonischen' en Fourier-analyse. Deze visueel erg aantrekkelijke tak van de wiskunde kent ook in de sterrenkunde vele toepassingen, maar gaat het doel van deze lessen ver voorbij.

Aangezien de bijdrage van het inwendig magneetveld op één plaats in goede benadering onafhankelijk is van de hoogte in de atmosfeer*, zal een gemeten variatie met de hoogte te wijten zijn aan het veld van de aardkorst. Voldoende kennis daarvan kan dan gebruikt worden om het magneetveld uit de korst te reconstrueren, omdat geweten is hoe het effect van een klein stukje magnetisch materiaal varieert met de afstand. Deze wiskundige reconstructie noemt men 'downward continuation' en is ook het onderwerp van een studie die het bereik van deze lessen te buiten gaat, al is de meting op zich zeker haalbaar voor leerlingen secundair onderwijs.

* $R_{Atmosfeer} \ll R_{Aarde}$ en de atmosfeer ligt ver weg van de bron van het inwendig veld

Naast de buitenkern en de lithosfeer hebben ook de atmosfeer en de Zon invloed op de sterkte van het magneetveld aan en boven het aardoppervlak.

Wat de atmosfeer betreft: de effecten van de troposfeer op het magnetisch veld beperken zich tot het effect van cumulonimbuswolken - 'donderwolken' in de volksmond- (grootteorde 20nT) en bliksem, dat een veel groter effect kan hebben.

De ionosfeer – waar grote elektrische stromen kunnen optreden – heeft een sterkere invloed, waarvan de oorzaak kan liggen in het inwendig veld, de aardrotatie en variaties in de zonnewind.

Oefening 1

Bereken de stroom die moet optreden in de D-laag en de F2-laag van de Ionosfeer op een hoogte van 75km (D-laag) en 400km (F2-laag), opdat het magnetisch veld aan het aardoppervlak er juist onder met 1nT zou veranderen.

Gebruik de formules voor het magneetveld van een stroomvoerende rechte geleider.

Oefening 1

Bereken de stroom die moet optreden in de D-laag en de F2-laag van de Ionosfeer op een hoogte van 75km (D-laag) en 400km (F2-laag), opdat het magnetisch veld aan het aardoppervlak er juist onder met 1nT zou veranderen.

Gebruik de formule voor het magneetveld van een stroomvoerende rechte geleider.

We gebruiken de formule voor het magneetveld van een rechte geleider: $B = \mu_0 \cdot I / (2\pi d)$ waarin $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$, $I = \text{stroom (A)}$

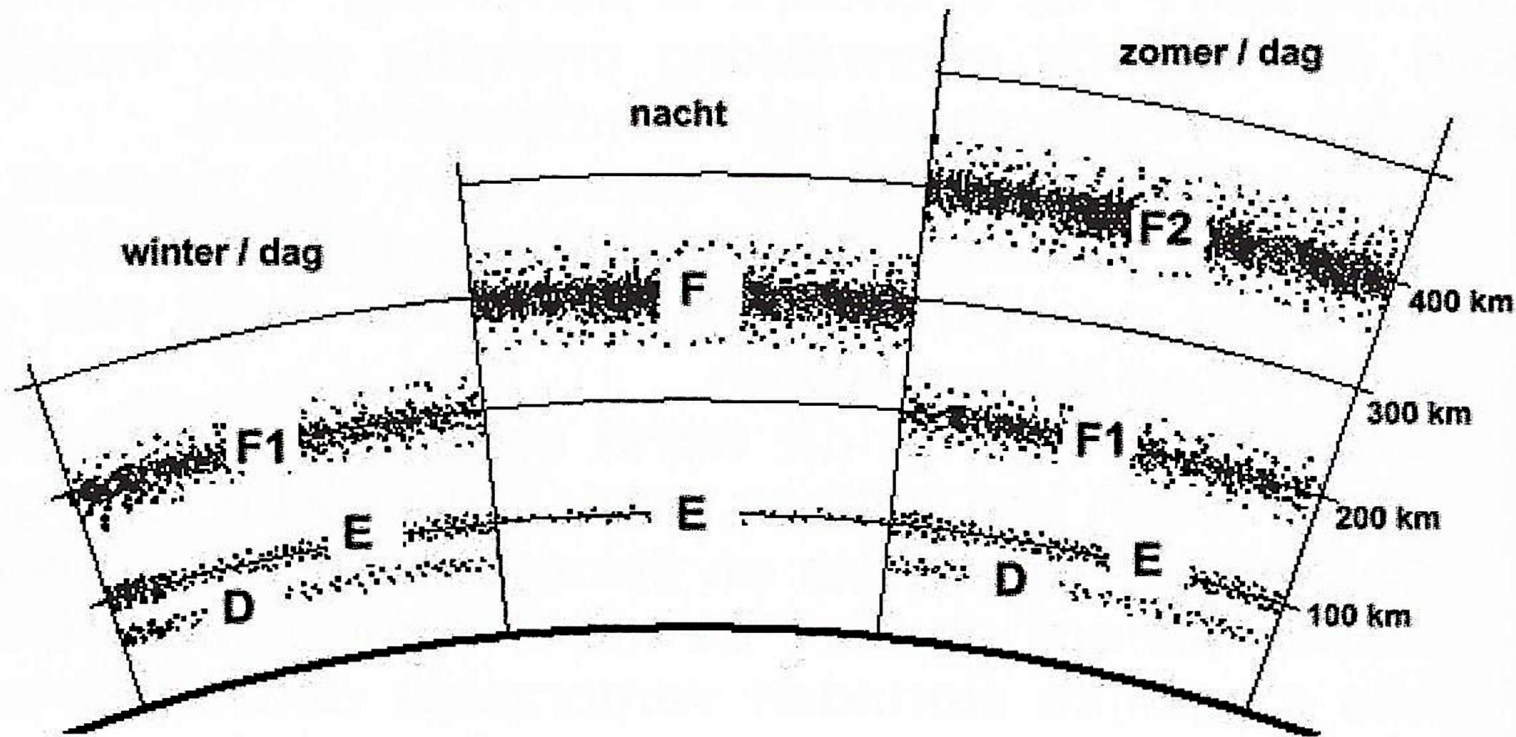
$$\text{a) } I = 2\pi dB / \mu_0 = 2\pi \cdot 75 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} / 4\pi \cdot 10^{-7} = 37,5 \cdot 10 = 4 \cdot 10^2 \text{ A}$$

$$\text{b) } I = 2\pi dB / \mu_0 = 2\pi \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} / 4\pi \cdot 10^{-7} = 200 \cdot 10 = 2 \cdot 10^3 \text{ A}$$

C. Radiogolven in de atmosfeer.

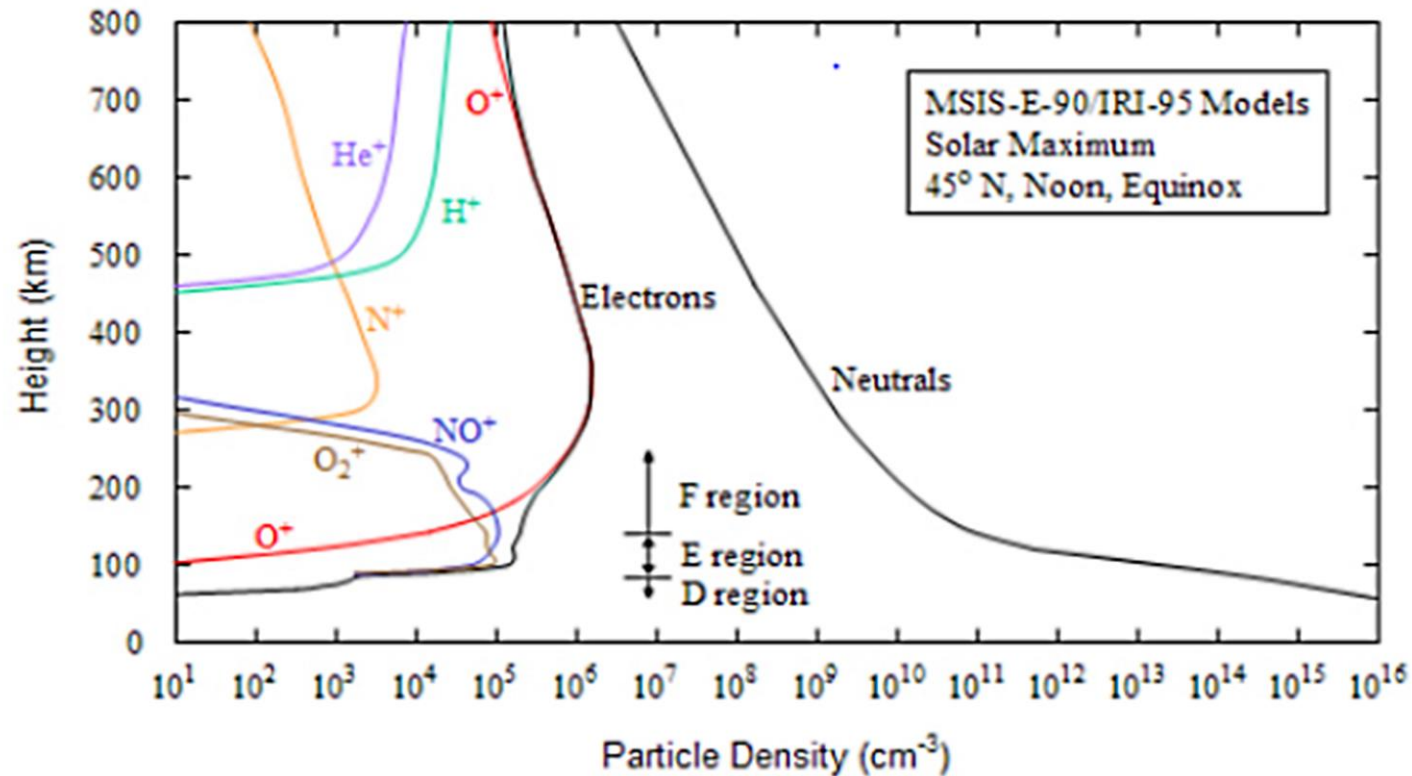
In de ionosfeer zal een deel van de aanwezige moleculen geïoniseerd worden door zonlicht, waardoor geleidende lagen ontstaan. Er stelt zich in zo'n laag dan een evenwicht in tussen ionen en neutrale moleculen. De ligging van dat evenwicht wordt bepaald door de twee deelreacties: creatie oiv. zonlicht enerzijds, recombinitie anderzijds.

Daaruit volgt meteen dat er een dag-nacht cyclus zal zijn die de ladingsdichtheid en de hoogte van de geleidende lagen zal bepalen, maar ook een seizoenscyclus.



De laagste laag (D) verdwijnt 's nachts: de hoge ρ op 30 à 80 km zorgt voor een hoge recombinatiesnelheid. De E-laag verzwakt 's nachts maar verdwijnt niet helemaal. De F-laag verschuift en is in de zomer sterker (meer uren zonlicht).

Principal Constituents of the Ionosphere



De oorzaak voor de verschillende lagen is te zoeken in de aard van de gevormde ionen en dus van de chemische samenstelling van de atmosfeer op de betrokken hoogte.

Dingen om zelf op te zoeken

De vaste kern, vloeibare buitenkern, mantel en korst hebben elk hun eigen dikte.

Zoek deze op en druk uit als een percentage van de aardstraal, doe hetzelfde met de troposfeer.

De korst en de troposfeer samen noemt men de biosfeer. Het is de plaats waar alle leven op aarde voorkomt (een paar bacteriën in de stratosfeer daar gelaten).

Hoeveel % van de aardstraal is de biosfeer dik?

Een radiogolf die verticaal* omhoog wordt uitgezonden zal weerkaatsen als zijn frequentie lager is dan een bepaalde grens (de zgn. kritische frequentie).

Deze wordt bepaald door verschillende factoren, waaronder de elektronen-dichtheid, en ligt meestal tussen 5 en 9MHz.

* Bij schuin invallende golven ligt de grens hoger. Dit effect wordt gebruikt door radio-amateurs om te communiceren over grote afstanden. Op de 10m band bvb. (frequentie-bereik 30MHz) is intercontinentaal radiocontact heel gewoon.

Verklaring: Een geleidend gas – of plasma – kan in eerste orde benaderd worden met het 'koud elektron'-model. In dat model wordt de thermische beweging van elektronen verwaarloosd, waardoor oscillatie van de ladingsdichtheid kan beschreven worden met de plasmafrequentie:

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e \cdot e^2 / m \cdot \epsilon_0}$$

Waarin

ω_{pe} = cirkelfrequentie van de plasma-oscillaties of
Langmuir-golven (rad/s)

n_e = elektronendichtheid (m^{-3})

e = 0,16aC

m = elektronmassa = $9,1 \cdot 10^{-31} kg$

ϵ_0 = permittiviteit van vacuüm = $8,85 \cdot 10^{-12} A^2 s^4 m^{-3} kg^{-1}$

De kritische frequentie voor reflectie van een radiogolf is dan de grootste frequentie die een plasma trilling aankan,

maw. $\omega_{pe} = 2\pi f$ waarin f = kritische frequentie.

Bijgevolg zal
$$f = 1/2\pi \cdot \sqrt{n_e \cdot e^2 / m \cdot \epsilon_0}$$

Opm: In dit model wordt de rol van de ionen verwaarloosd omdat hun massa $\approx \infty$ ivm. de elektronen.

Oefening 2

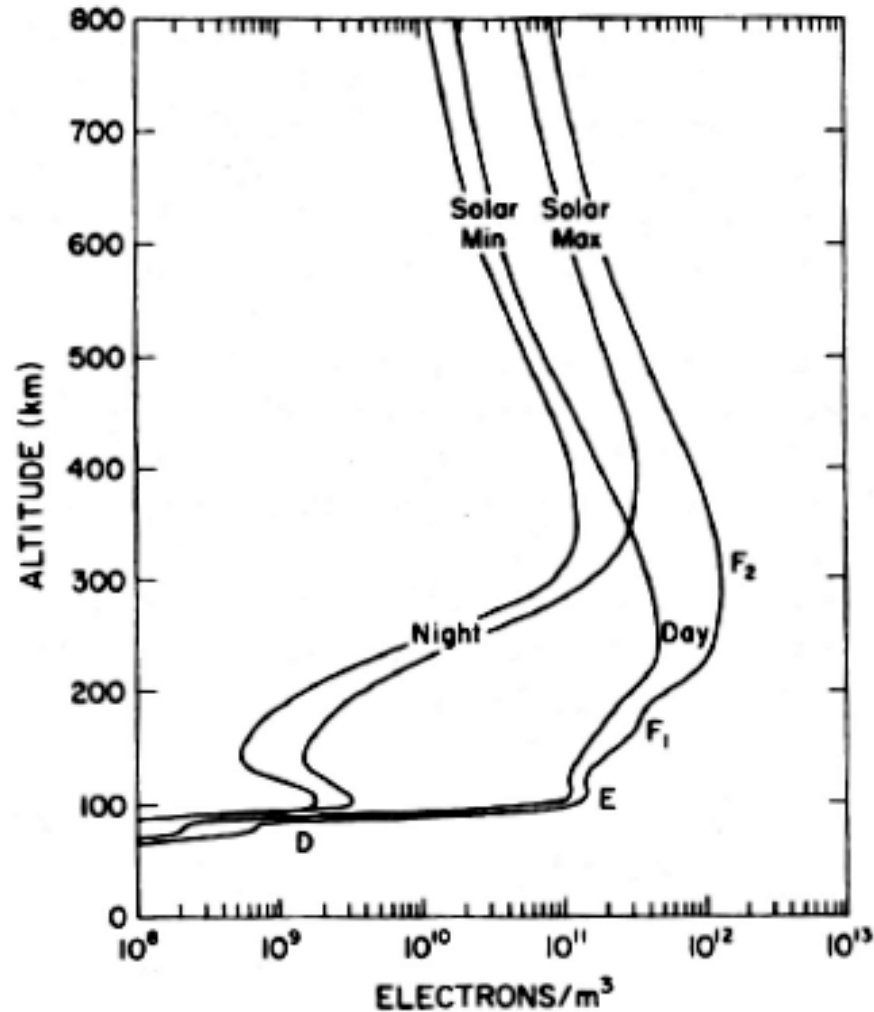
Bereken de elektronendichtheid in de F-laag als je weet dat de kritische frequentie gelijk is aan 6,5MHz.

Oefening 2

Bereken de elektronendichtheid in de F-laag als je weet dat de kritische frequentie gelijk is aan 6,5MHz.

$$f = 1/2\pi \cdot \sqrt{n_e \cdot e^2 / m \cdot \epsilon_0} \quad \text{en dus} \quad n_e = (2\pi f)^2 \cdot m \cdot \epsilon_0 / e^2$$

$$\begin{aligned} n_e &= (2\pi \cdot 6,5 \cdot 10^6) \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} / (0,16 \cdot 10^{-18})^2 \\ &= 5,2 \cdot 10^{11} m^{-3} \end{aligned}$$



De elektronendichtheid zal echter niet alleen een dag/nacht cyclus vertonen, maar ook afhankelijk zijn van de zonne-activiteit: de F-laag vertoont bijna een grootteorde verschil in ladingsdichtheid.

Merk op dat zonne-activiteit nauwelijks invloed heeft op de D- en E-lagen, terwijl de dag/nacht cyclus de F-laag niet beïnvloedt.

Dingen om over na te denken

- Waarom heeft de zonne-activiteit weinig of geen invloed heeft op de D/E-lagen?
- De dag/nacht cyclus heeft weinig invloed op de F-laag. Waarom?

Dingen om over na te denken

- Waarom heeft de zonne-activiteit weinig of geen invloed heeft op de D/E-lagen?
 - De extra straling van de zon in periodes van maximale activiteit situeert zich in dat deel van het elektromagnetisch spectrum dat prioritair ionen H^+ , He^+ en N^+ produceert in de thermosfeer. Daarbij komt dat het deel van die straling dat doordringt tot de mesosfeer navenant kleiner is.
- De dag/nacht cyclus heeft weinig invloed op de F-laag. Waarom?
 - Door de extreem lage massadichtheid in de thermosfeer is de recombinatiesnelheid zo laag dat één nacht niet volstaat om de ionendichtheid significant te verlagen.

Aanbevolen lectuur

- *The Magnetic Field of the Earth. Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle. Ronald T. Merrill, Michael W. McElhinny and Phillip L. McFadden. 1998. Academic Press. ISBN: 0-12-491246-X.*
- *Lightning-Driven Electric and Magnetic Fields Measured in the Stratosphere: Implications for Sprites, PhD thesis Jeremy Norman Thomas. 2005, University of Washington.*
- *UBA Handboek HAREC, Rik Strobbe en John Devoldere. ISBN: 90-808-6932-5.*
- *http://jro-app.igp.gob.pe/x_colage/lectures/L17%20-%20Valladares%20-%20Ionospheric%20Physics.pdf*